

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN  
CIENCIA Y TECNOLOGÍA ESPACIAL**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

***CARACTERIZACIÓN DE LA ATMÓSFERA DE MARTE  
CON EL INSTRUMENTO CHEMCAM DE MARS  
SCIENCE LABORATORY***

<b>Estudiante</b>	<i>Pereira, Castelo, Unai</i>
<b>Director/a</b>	<i>Perez, Hoyos, Santiago</i>
<b>Director/a</b>	<i>Chen, Chen, Hao</i>
<b>Departamento</b>	<i>Física Aplicada I</i>
<b>Curso académico</b>	<i>2021-2022</i>

*Bilbao, 15, Septiembre, 2022*

---

## Resumen

Múltiples misiones se han enviado a Marte para estudiar su superficie y atmósfera. La aplicación de la espectroscopía a las atmósferas planetarias es de gran utilidad para determinar sus composiciones. En este proyecto se caracteriza la atmósfera de Marte mediante el instrumento ChemCam de la misión Mars Science Laboratory y la herramienta Planetary Spectrum Generator (PSG) de NASA, la cual se emplea para simular los espectros de radiancia observados por el instrumento. Para ello, primero se generan modelos atmosféricos de Marte en PSG y después se lleva a cabo un proceso de retrieval por medio del cual se obtiene información de los aerosoles presentes y que influyen en el espectro. Luego, se estudian estos espectros para determinar los componentes presentes en la atmósfera gracias a las líneas de absorción. Por último, se discuten los resultados obtenidos y la viabilidad de la herramienta utilizada para la caracterización en otros proyectos.

## Laburpena

Planetaren informazioa lortzeko, Martera egindako misio askoren helburua planetaren gainazala eta atmosfera aztertzea izan da. Atmosfera planetarioetan espektroskopia aplikatzea oso baliagarria da konposizioak zehazteko. Proiektu honetan, Marteko atmosfera Mars Science Laboratory misioko ChemCam tresna, zeruaren behaketa pasiboan erabiliz, ezaugarritzen da, eta NASA Goddard Space Flight Centerren Planetary Spectrum Generator (PSG) tresnaren bidez, instrumentuari jasotako erradiantzia-espektroak simulatzen dira. Horretarako, lehenik, Marteko eredu atmosferikoak PSGn sintetizatzen dira, eta gero, retrieval prozesu bat egiten da, bertan dauden eta espektroan eragina duten scattering aerosolen informazioa lortzeko. Ondoren, espektro horiek aztertzen dira atmosferan dauden osagaiak zehazteko, xurgapen-lerroei esker. Azkenik, lortutako emaitzak eta beste proiektu batzuetan karakterizatzeko erabilitako tresnaren bideragarritasuna eztabaidatzen dira.

## Abstract

Multiple missions have been sent to gather information about Mars' surface and atmosphere. The use of spectroscopy on planetary atmospheres is useful to determine its composition. In this work, the atmosphere of Mars is characterized using observations retrieved by the ChemCam instrument of the Mars Science Laboratory mission and simulated radiance spectrums by the Planetary Spectrum Generator (PSG) tool of NASA. First, atmospheric models of Mars are loaded into the PSG and afterwards information about the scattering aerosols which influence the spectrum is obtained by means of a retrieval process. Then, these spectra are evaluated to determine the components of the atmosphere by analyzing the absorption lines. Finally, the obtained results and the feasibility of using the PSG tool in future projects are discussed.

**Palabras clave** Marte, atmósfera, transporte radiativo, Planetary Spectrum Generator



# Índice

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>7</b>
1.1	Motivación . . . . .	8
1.2	Objetivos . . . . .	8
<b>2</b>	<b>Exploración de Marte</b>	<b>9</b>
2.1	Características de la atmósfera de Marte . . . . .	9
2.1.1	Composición . . . . .	10
2.1.2	Estructura vertical de la atmósfera . . . . .	10
2.1.3	Reacciones fotoquímicas . . . . .	11
2.1.4	Ciclos climáticos . . . . .	12
2.2	Polvo en la atmósfera . . . . .	14
2.2.1	El ciclo del polvo . . . . .	14
2.2.2	Características del polvo . . . . .	15
2.3	Misión Mars Science Laboratory . . . . .	16
2.3.1	Curiosity . . . . .	17
2.4	Instrumento ChemCam . . . . .	18
2.5	Método de observación mediante ChemCam . . . . .	19
<b>3</b>	<b>Modelos y metodología</b>	<b>21</b>
3.1	Transporte radiativo . . . . .	21
3.2	Planetary Spectrum Generator . . . . .	23
3.3	Retrievals . . . . .	25
3.4	Modelos atmosféricos . . . . .	28
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>35</b>
4.1	Caracterización del polvo atmosférico . . . . .	35
4.2	Discusión de los resultados . . . . .	41
4.2.1	Ajustes de los modelos de radiancia . . . . .	41
4.2.2	Radio efectivo del polvo . . . . .	42
4.2.3	Evaluación del espesor óptico del polvo . . . . .	43
4.3	Ratio de los espectros de radiancia de los modelos . . . . .	44
<b>5</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>48</b>
5.1	Análisis de PSG . . . . .	48
5.2	Evaluación de los objetivos . . . . .	49
5.3	Mejoras al estudio . . . . .	50

## Índice de figuras

1	Estructura vertical de la atmósfera de Marte. Los datos proceden de: Pathfinder en rojo; Viking I en azul; Viking II en verde. Figura extraída de [7]. . . . .	11
2	Representación esquemática de los ciclos en la atmósfera de Marte. Figura extraída de [20] . . . . .	13
3	Representación del planeta Marte antes y durante la tormenta global de 2018. A la derecha Marte el 28 de Mayo de 2018; a la izquierda Marte el 1 de Julio de 2018. Figura extraída de [16] . . . . .	15
4	Esquema de los instrumentos del rover Curiosity. Figura extraída de [15]	17
5	Geometría de la observación pasiva del cielo ("passive sky observation") de ChemCam. Figura extraída de [12] . . . . .	19
6	Esquema de la geometría de una atmósfera plano-paralela. $\theta$ es el ángulo cenital, $\phi$ es el ángulo acimutal y $s$ el vector de posición. Figura extraída de [11, p31] . . . . .	22
7	Esquema de las intensidades en las capas superior ( $\tau = 0$ ), referencia( $\tau$ ) e inferior( $\tau = \tau_*$ ) en una atmósfera plano paralela. Figura extraída de [11, p32] . . . . .	22
8	Interfaz inicial del Planetary Spectrum Generator (PSG). Nótese como al seleccionar un cuerpo celeste, PSG da cierta información básica del mismo y su geometría. . . . .	23
9	Resultado de la generación de un espectro de ejemplo en PSG. Todos los gráficos pueden ser explorados en la propia herramienta online y descargados en cualquier formato de texto si se desea. La opción "Layering" descarga un archivo de datos en formato de texto con las características de las capas plano-paralelas usadas en la simulación. . . . .	25
10	Interfaz "Retrievals" del PSG. La figura muestra las posibles opciones a alterar. Nótese como para cualquier parámetro a calcular se debe dar un valor inicial y una cota superior e inferior. . . . .	27
11	Esquema de la implementación de la Estimación Óptima de Rodgers en PSG. Figura extraída de [25, p136] . . . . .	27
12	Interfaz "Change Object" del Planetary Spectrum Generator (PSG). La imagen muestra el sol 380 como ejemplo de coordenadas. La opción "looking up" hace referencia a el instrumento observando desde la superficie en un ángulo. Estos ángulos se definen con mayor precisión en apartados posteriores. . . . .	29
13	Interfaz "Change Composition" del Planetary Spectrum Generator (PSG) para el sol 380. Las abundancias se determinan mediante la unidad "scalar" que da cuenta de la fracción del perfil vertical del gas. . . . .	31
14	Perfil vertical de la atmósfera para el sol 380, proporcionado por la interfaz "Change Composition" del PSG. . . . .	32
15	Ejemplo de archivo de configuración en formato TXT del sol 380 para PSG. . . . .	33
16	Ajustes de los modelos del PSG a los datos de ChemCam en observaciones de Ángulo Alto para: (16a) sol 380; (16b) sol 473; (16c) sol 617; (16d) sol 793; (16e) sol 2140 . . . . .	37

17	Ajustes de los modelos del PSG a los datos de ChemCam en observaciones de Ángulo Bajo para: (17a) sol 380; (17b) sol 473; (17c) sol 617; (17d) sol 793; (17e) sol 2140 . . . . .	38
18	Gráficos de las profundidades ópticas ( $\tau$ ) de los soles seleccionados en elevaciones alta (color naranja) y baja (color Gris) y los datos de ChemCam (color Azul). . . . .	40
19	Ratio sin continuo entre los datos de observación de la alta y la baja elevación realizada por el instrumento ChemCam. La línea magenta indica el mejor ajuste posible. Figura extraída de [12]. . . . .	45
20	Representación gráfica del ratio sin continuo (eliminación mediante iteración de 2 polinomios) entre la elevación alta y baja de los modelos del PSG del sol 380. Ventanas de: (a) 700 – 750 nm; (b) 750 – 800 nm; (c) 800 – 850 nm. . . . .	46

## Índice de tablas

1	Composición de la baja atmósfera de Marte. Tabla extraída de [7]. . . .	10
2	Soles de Marte seleccionados. . . . .	29
3	Elevaciones del instrumento ChemCam para cada sol. . . . .	35
4	Retrieval de la profundidad óptica ( $\tau$ ) y el radio efectivo ( $r_{eff}$ ) del polvo de Marte para cada sol en elevación alta. . . . .	36
5	Retrieval de la profundidad óptica ( $\tau$ ) y el radio efectivo ( $r_{eff}$ ) del polvo de Marte para cada sol en elevación baja. . . . .	36
6	Datos del retrieval y profundidades ópticas del polvo de Marte dadas por ChemCam ( $\tau_{ChemCam}$ ). Los subíndices <i>high</i> y <i>low</i> hacen referencia a las elevaciones alta y baja del instrumento respectivamente. . . . .	39
7	Retrieval de la profundidad óptica del hielo para cada sol. . . . .	41
8	Radios efectivos de las partículas de polvo observadas ( $r_{effob}$ ) y los modelos iterados en PSG para la alta elevación ( $r_{effhigh}$ ) y baja elevación ( $r_{efflow}$ ). No existen datos de observación del sol 380, por lo que se asumen datos en base a datos de soles posteriores de igual longitud solar, en este caso, del sol 1049[12]. . . . .	43



# 1 Introducción

Desde la antigüedad, Marte ha sido uno de los planetas más interesantes para la humanidad. El llamado coloquialmente Planeta Rojo ha sido objetivo de mitos y un integrante importante en la cultura de todo el mundo, tanto por su cercanía como por su brillo tan característico. Fue a finales del siglo XIX cuando los telescopios comenzaron a ser lo suficientemente avanzados como para realizar observaciones de la superficie marciana, creyéndose erróneamente haber observado canales artificiales en su superficie. Por supuesto, hasta el momento, no se ha encontrado confirmación alguna de que en Marte exista o haya habido vida pero estas observaciones levantaron aún más interés en el planeta. Desde entonces, y con el gran avance tecnológico conseguido en el último siglo, las propiedades y características de Marte han sido reveladas de forma continuada.

Actualmente se conocen una gran cantidad de características físicas de Marte. Es un planeta con aproximadamente la mitad de radio que la Tierra y con algo menos de densidad, lo que provoca que la gravedad sea aproximadamente un 40 % menor. Su superficie está cubierta por óxido de hierro y polvo, dándole esa tonalidad roja tan característica. Como es sabido, Marte es el cuarto planeta del Sistema Solar luego la órbita del mismo provoca que un año marciano sean aproximadamente dos años terrestres. Por otro lado, la rotación del planeta es parecida en velocidad a la de la Tierra, con una duración aproximada de 24 horas y 40 minutos. En Marte los días se conocen como "sol"<sup>1</sup> y serán denominados como tal en todo este texto a partir de ahora. Además su órbita es excéntrica y con una inclinación axial de unos 25°, lo que provoca que, al igual que la Tierra, Marte tenga estaciones definidas en ambos hemisferios. Estas son muy importantes para los eventos atmosféricos debido a la radiación solar que llega. El planeta no tiene magnetosfera, por lo que las partículas cargadas provenientes del sol (viento solar) interactúan con las partículas de la atmósfera y contribuyen al escape de los gases de la misma.

Muchas características de la atmósfera de Marte son conocidas, tales como su composición (Tabla 1) y los ciclos de algunos componentes (Apartado 2.1.4). La atmósfera es muy débil y la presión atmosférica también sea baja. De hecho, es tan baja que de forma general no puede haber agua líquida en la superficie. Sin embargo, sí que puede y existe agua en forma de hielo y vapor en los polos y atmósfera respectivamente y el ciclo del agua está muy ligado al ciclo del dióxido de carbono del planeta (se desarrollarán estos ciclos más adelante). Aún con ello, podría haber más agua bajo la superficie del planeta. A pesar de que múltiples aspectos de Marte son conocidos hoy en día, muchos procesos son desconocidos o poco entendidos. Tal es el caso de las tormentas de polvo de Marte, cuyos mecanismos de generación aun no son comprendidos del todo[7].

Desde la década de los sesenta, múltiples misiones han sido enviadas para explorar con mayor profundidad el planeta. En este texto, se usan los registros de datos de la misión Mars Science Laboratory (MSL) de la NASA de su rover Curiosity [15] que a día de hoy sigue en funcionamiento.

---

<sup>1</sup>A menudo se dirá sol seguido de un número. Esto indica el número del día marciano.

## 1.1 Motivación

Existen múltiples instrumentos y misiones en la superficie marciana capaces de realizar observaciones de la atmósfera del planeta y obtener espectros a partir de la misma. La motivación de este trabajo es la de utilizar uno de dichos instrumentos, concretamente el ChemCam del Curiosity mediante observación pasiva, apoyándose en el trabajo de McConnochie et al. 2018 [12] para caracterizar la atmósfera de Marte y en concreto la abundancia de polvo de la misma en varias épocas, y comprobar así su utilidad para este tipo de estudios. Asimismo, se trata de comprobar el uso y ventajas del código de la NASA Goddard Space Flight Center, Planetary Spectrum Generator (PSG) y sus aplicaciones para futuras investigaciones similares o con otros instrumentos.

## 1.2 Objetivos

Se tienen varios objetivos claros en este texto:

- Entender las bases del transporte radiativo y su aplicación.
- Comprobar el funcionamiento del Planetary Spectrum Generator (PSG) y su síntesis de los modelos atmosféricos.
- Construir los modelos atmosféricos necesarios para la realización de los retrievals.
- Realizar los retrievals de los soles seleccionados en ambas elevaciones y obtener los modelos de espectros de radiancia.
- Caracterizar el tamaño y la profundidad óptica del polvo atmosférico de Marte para ciertos soles y observar su evolución.
- Comparar el ajuste del polvo con los datos de las observaciones y analizar la precisión y viabilidad del método.
- Presentar posibles mejoras a futuro en la metodología en base a los resultados obtenidos.

Para lograr los objetivos planteados primero se asentarán las bases teóricas necesarias del transporte radiativo y los retrievals, así como la introducción al uso del PSG en el Apartado 3, dando un contexto teórico del planeta, las observaciones y el instrumento en el Apartado 2. Finalmente, se analizarán los resultados obtenidos y se presentarán posibles mejoras al estudio realizado.

## 2 Exploración de Marte

Desde la carrera espacial, Marte se ha convertido en uno de los planetas más importantes para los científicos de todo el mundo. Siempre ha sido uno de los principales objetivos de exploración espacial, tanto por su interés geológico como por la posibilidad de haber sido habitado en algún punto de su historia. No es de extrañar que desde la década de 1960 múltiples misiones hayan sido dirigidas al planeta vecino con la intención de estudiarlo, desde los sobrevuelos al planeta de los primeros años hasta los rovers y orbitadores actuales.

Hoy en día, se poseen múltiples imágenes detalladas de Marte, su superficie, su atmósfera y actualmente se están recogiendo muestras de la superficie como parte de la misión "Mars 2020" [26] que serán traídas a la Tierra en misiones posteriores ya propuestas[14]. Sin embargo, la exploración de Marte sigue siendo fundamental para obtener respuestas a muchas de sus características aún desconocidas. La cercanía de Marte a la Tierra lo convierte en un objetivo perfecto de exploración, pero a pesar de ello, las misiones de exploración en su conjunto han tenido una alta tasa de fracasos. Por ello, las misiones al planeta deben ser preparadas con sumo cuidado y precisión.

En este texto, se estudiará la atmósfera de Marte tratando de caracterizar el polvo atmosférico. En los Apartados 2.1 y 2.2 se verán ambas características en mayor profundidad.

### 2.1 Características de la atmósfera de Marte

Marte posee características similares a las de la Tierra. Tanto su período de rotación como su inclinación axial son parecidas<sup>2</sup> y la atmósferas del planeta es fina. Las principales diferencia entre ambas provienen de la composición, donde en Marte se tiene una atmósfera con alto contenido en dióxido de carbono y una presión de superficie menor que la de la Tierra. La atmósfera posee partículas de polvo las cuales provocan efectos de calentamiento[7] y que serán el principal estudio de este texto. Debido a este efecto de calentamiento, a pesar de que la atmósfera de Marte es más fría que la de la Tierra (en parte debido a la mayor distancia del planeta al Sol), esta es relativamente cálida en la atmósfera baja ( $\leq 120$  km).

Gracias a las misiones mencionadas anteriormente, es conocido que Marte no siempre tuvo estas mismas características atmosféricas. De hecho, la atmósfera del planeta era cálida y más densa en los primeros periodos de Marte[20], lo que apunta a un fuerte cambio climático en el pasado. Debido a ello, se cree que el planeta pudo haber tenido agua líquida en su superficie, incluso océanos, cuya presencia podría haber permitido la aparición de vida. Estas características han provocado que la atmósfera de Marte sea un objetivo muy interesante para su estudio.

---

<sup>2</sup>24,62 horas y 25,19° respectivamente

### 2.1.1 Composición

La composición atmosférica de Marte es bien conocida desde hace décadas<sup>3</sup> siendo el dióxido de carbono el gas más abundante con mucha diferencia. Después, el nitrógeno molecular y el argón con trazas menores de oxígeno molecular, monóxido de carbono y otros gases nobles. La Tabla 1 recoge los principales gases presentes en la baja atmósfera.

Componente	Abundancia
CO <sub>2</sub>	95,32 %
N <sub>2</sub>	2,7 %
<sup>40</sup> Ar	1,6 %
O <sub>2</sub>	0,13 %
CO	0,07 %
H <sub>2</sub> O	0,03 % (variable)
O <sub>3</sub>	0,04 – 0,2 ppm (variable)
Polvo	0 a $\gg$ 5 (profundidad óptica visible)

Tabla 1: Composición de la baja atmósfera de Marte. Tabla extraída de [7].

Tal y como puede verse en la Tabla 1, existen ciertos componentes variables en la atmósfera. La abundancia de estos es distinta según la época del año en la que se encuentre el planeta. La determinación de la variación en la abundancia del polvo atmosférico es precisamente uno de los objetivos a estudiar en este texto y que es analizado en el Apartado 4.1.

A pesar de formar parte de la composición principal de la atmósfera, se cree que Marte ha perdido entre el 50 % y el 90 % de los valores iniciales de dióxido de carbono, argón y nitrógeno molecular en los últimos 3500 millones de años[20], probablemente debido a impactos de asteroides, absorción del dióxido de carbono o procesos de escape.

### 2.1.2 Estructura vertical de la atmósfera

Al igual que la atmósfera de la Tierra puede dividirse en capas separadas, la atmósfera de Marte también puede dividirse en estratos con diversas características. Estas son una troposfera seguida por una mesosfera, termosfera y, por último, exosfera. Como puede verse, la diferencia con la atmósfera terrestre es la ausencia de la estratosfera, lugar donde debe recordarse que se encuentra la capa de ozono terrestre. En Marte, al no poseer dicha capa, tampoco posee estratosfera. Debido a que la atmósfera es muy ligera, normalmente la mayoría de la radiación que llega a Marte desde el Sol alcanza la superficie. La Figura 1 [7] presenta la estructura vertical en capas de la atmósfera del planeta según los datos recogidos de las misiones de aterrizaje (llamados "lander") Viking I y II y la misión Pathfinder.

Tal y como puede verse (Figura 1) la temperatura en la atmósfera se reduce a medida que se aumenta la altitud. La temperatura que se observa está ligada a efectos

<sup>3</sup>Las sondas Viking I y II (1970) realizaron los análisis in situ más detallados hasta los rovers (1990).

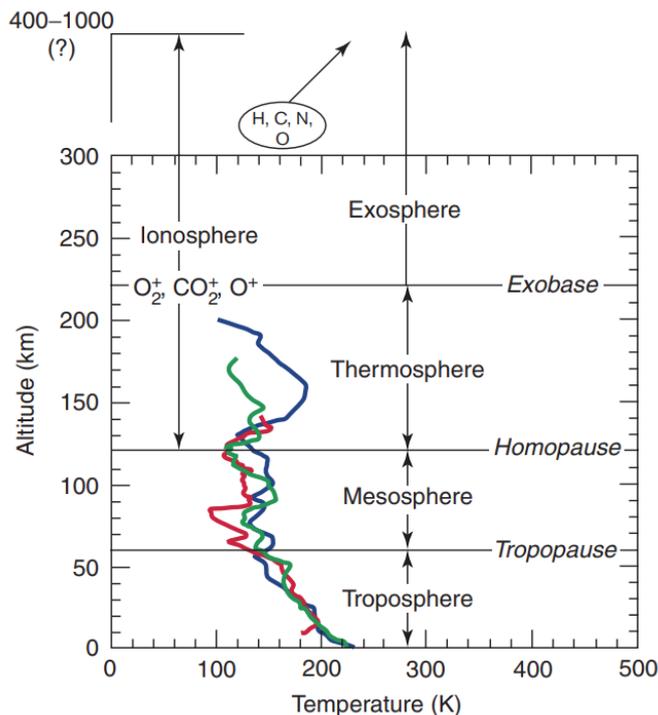


Figura 1: Estructura vertical de la atmósfera de Marte. Los datos proceden de: Pathfinder en rojo; Viking I en azul; Viking II en verde. Figura extraída de [7].

de convección hasta unas alturas moderadas de 15 km, y a partir de entonces a efectos de radiación.

En la exosfera ocurre un fenómeno bien conocido: el escape atmosférico. Estos procesos son aquellos los cuales, debido a la temperatura y la gravedad del planeta, los gases de la última capa atmosférica escapan al espacio. En Marte, los gases que se suelen perder de la atmósfera son el hidrógeno, el oxígeno, el carbono y el nitrógeno. Los escapes de hidrógeno se producen cuando una molécula mayor como el agua, al disociarse en hidrógeno y oxígeno molecular, las nuevas moléculas son generadas con energía tal que son capaces de tener velocidades superiores a la velocidad de escape de Marte (evidentemente la trayectoria de las mismas también debe ser la correcta). Por supuesto, el oxígeno molecular también debe escapar para no generar un exceso del mismo (el cual no existe). El escape suele ocurrir cuando la molécula de oxígeno está ionizada y en la ionosfera recibe un electrón, adquiriendo así la energía necesaria.

### 2.1.3 Reacciones fotoquímicas

La atmósfera de Marte es débil y salvo durante las épocas de tormenta de polvo (ver Apartado 2.2) casi toda la radiación que llega al planeta alcanza la superficie. Esta radiación provoca reacciones fotoquímicas en los componentes de su atmósfera, como la disociación del dióxido de carbono tan abundante en monóxido de carbono y oxígeno (reacción 1). Esta disociación del  $CO_2$  es muy rápida en comparación con la reacción fotoquímica inversa, y teniendo en cuenta que este elemento es el más abundante en la atmósfera, es evidente que deben existir otras reacciones que generen esta molécula [7]. Gracias a estas reacciones el agua se disocia en hidrógeno (reacción 2) y el ozono en

oxígeno (reacción 3)<sup>4</sup>.



Ocurre algo interesante con el ozono. Tal y como se ha indicado previamente, Marte no posee capa de ozono (y por ende estratosfera) y la abundancia del ozono es variable, pero baja (Tabla 1). El ozono de forma usual se genera cuando se combina el oxígeno molecular ( $\text{O}_2$ ) con un oxígeno ( $\text{O}$ ). Sin embargo, los datos que se disponen de Marte apuntan a que, basándose exclusivamente en esta forma de generación, la abundancia de ozono debería ser mucho mayor. Por ende, debe existir algún mecanismo que aniquile el exceso de moléculas de  $\text{O}_3$ . El hidrógeno y el OH parecen ser la respuesta. El vapor de agua se disocia en estas moléculas al recibir radiación y estas tienden a combinarse con el ozono, disociándolo en oxígeno molecular de nuevo. Esto tiene una consecuencia directa en la atmósfera. Debido a que son las moléculas resultantes de la desintegración del agua las que provocan la consecuente transformación del ozono en oxígeno, el  $\text{H}_2\text{O}$  y el  $\text{O}_3$  están inversamente relacionados entre sí. En las regiones donde el agua sea abundante es de esperar poca cantidad de ozono y viceversa, hecho que es aprovechado usualmente para la detección y el análisis de las columnas de vapor del planeta.

#### 2.1.4 Ciclos climáticos

El planeta tiene una gran interacción entre la superficie y la atmósfera, entre las cuales se intercambia material. Este intercambio está sujeto a cambios estacionales y comprende tres ciclos importantes: el ciclo del dióxido de carbono, el ciclo de agua y el ciclo del polvo. Este último será analizado con mayor profundidad en el Apartado 2.2, pero conviene detallar también los otros dos ciclos primarios para comprender la atmósfera. Un resumen esquemático de estos ciclos puede encontrarse en la Figura 2 [20]. Por supuesto, debe tenerse en cuenta el ciclo del polvo, que se describe en el próximo apartado.

##### Ciclo del $\text{CO}_2$

Los ciclos de dióxido de carbono ocurren debido al  $\text{CO}_2$  que se condensa en los polos durante las épocas de invierno del planeta. Las temperaturas alcanzan valores tan bajos que el gas se congela y se precipita a los polos. Después, durante la época de primavera, el dióxido de carbono congelado se sublima, provocando este ciclo. La cantidad de  $\text{CO}_2$  que está involucrado en este ciclo es tal que es claramente visible el crecimiento y decrecimiento de los polos en un año marciano, donde aproximadamente el 30 % de

---

<sup>4</sup>El átomo de oxígeno generado por esta reacción está excitado y suele combinarse con el agua generando 2 moléculas de OH.

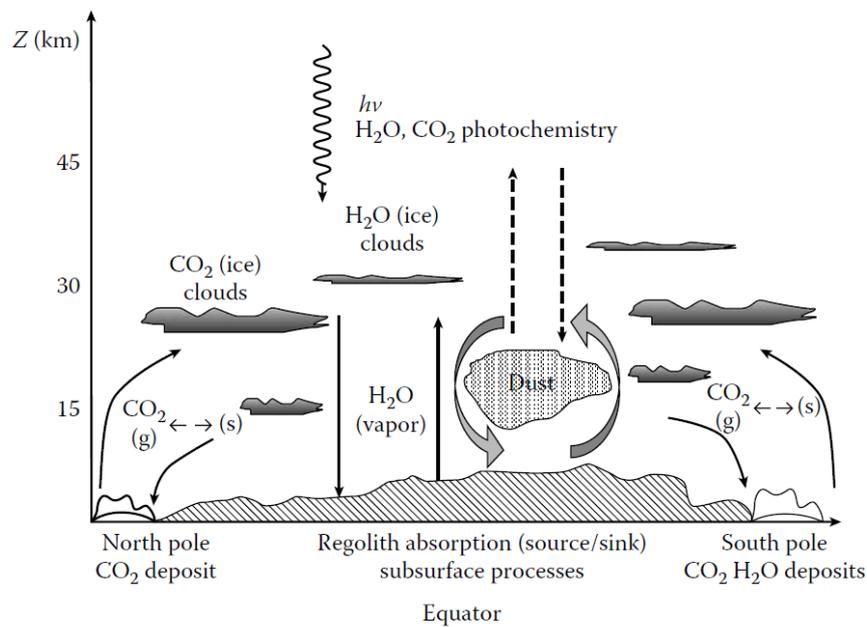


Figura 2: Representación esquemática de los ciclos en la atmósfera de Marte. Figura extraída de [20]

la atmósfera está involucrada en el ciclo. Evidentemente esta cantidad provoca una variación muy apreciable en la presión superficial de Marte, produce transportes de calor y tiene un efecto claro en la generación de nubes.

El ciclo es semianual pero asimétrico en los polos debido a la excentricidad de la órbita de Marte. Esta excentricidad provoca que no se experimenten exactamente las épocas de igual duración en ambos hemisferios. Por ende, los ciclos de dióxido de carbono que son resultados de la condensación y la sublimación del polo norte implican menos abundancia del gas que en el polo sur. Debido a esto, los efectos antes descritos son más fuertes en el hemisferio sur que en el norte. Aún así, los polos de ambos hemisferios jamás desaparecen (subliman) por completo durante sus respectivos veranos.

### Ciclo del H<sub>2</sub>O

Una vez más el ciclo del agua está regido por las épocas y los polos del planeta, donde se debe recordar la asimetría fruto de la excentricidad. Cuando el hielo de agua se sublima en los polos, parte de el vapor de agua resultante es transportado hacia el ecuador. Este efecto ocurre en ambos hemisferios, pero en el sur la cantidad de vapor de agua transportada es menor que la del norte. Evidentemente durante los inviernos, el vapor de agua es transportado junto al dióxido de carbono y se congela en los polos, precipitándose y acumulándose.

El vapor de agua transportado en la atmósfera genera nubes en Marte. El vapor se condensa y forma nubes (Figura 2), pero estas no poseen demasiada cantidad de agua.

## 2.2 Polvo en la atmósfera

Una de las principales características de Marte y fuente de interés de este texto es el polvo. La superficie del planeta está cubierta por una fina capa de material de polvo ligero que puede ser arrastrado a la atmósfera por los vientos de Marte. Una vez más, la atmósfera de del planeta es muy débil por lo que para que esto último ocurra, los vientos deben ser de una intensidad considerable. Estos vientos son los que provocan las famosas Tormentas de Polvo de Marte, tormentas tan grandes que no es raro que el planeta entero sea cubierto por una capa atmosférica de polvo. Por supuesto, estas tormentas varían en tamaño, desde "simples" remolinos de polvo (llamados "dust devils", de unos  $0,1\text{km}^2$ ) hasta tormentas locales y planetarias. Dependiendo del tamaño de la tormenta, estas son más o menos frecuentes, siendo las tormentas más pequeñas las más comunes y las más grandes las poco comunes. Por ello, las gigantescas tormentas planetarias son poco frecuentes y parecen ocurrir durante las épocas de primavera y verano del hemisferio sur.

### 2.2.1 El ciclo del polvo

Según el reciente estudio realizado por Creedy et al. de 2022[4], la generación de estas enormes tormentas de polvo es resultado, probablemente, de los desequilibrios energéticos de energía solar absorbida y reemitida por Marte durante las diferentes estaciones del planeta. En planetas rocosos como la Tierra también se da este tipo de desequilibrio energético de la energía emitida entre épocas, el cual tiene un fuerte impacto en el clima. Sin embargo, este desequilibrio es muy pequeño, del orden del 0,4% en el caso máximo, mientras que en Marte puede llegar a superar hasta el 15%. Creedy et al. aseguran que aún queda trabajo que realizar y modelos numéricos que implementar para mejorar el estudio, pero todo apunta a que este desequilibrio detectado por múltiples misiones al planeta es la causa de las espectaculares tormentas.

De forma general, las tormentas evolucionan en tamaño con el tiempo desplazándose y aumentando de tamaño. Comenzando como varias tormentas menores, estas se desplazan y combinan hasta generar las tormentas planetarias. Las más pequeñas es más seguro que aparezcan por medio de mecanismos de convección<sup>5</sup>, mientras que las más grandes se mantienen por retroalimentación entre sus diversos factores desencadenantes. Tal y como se verá a continuación, el polvo ayuda a calentar la atmósfera de Marte y este calor aumenta la circulación del viento, que a su vez añade más polvo de la superficie planetaria a la atmósfera. Esto provoca una retroalimentación, donde el polvo atmosférico ayuda a añadir cada vez más hasta que se llega a un límite de estabilidad energético.

### Tormenta de polvo de 2018

El 30 de Mayo de 2018 el Mars Reconnaissance Orbiter de la NASA detectó el comienzo de la que es, hasta la fecha, la última tormenta de polvo planetaria de Marte (Figura 3). La tormenta creció rápidamente hasta envolver al planeta el 19 de Junio de 2018. Su magnitud fue tal que bloqueó la luz solar recibida hasta tal magnitud que el rover Opportunity de la NASA no podía recargarse a partir de sus paneles solares y se perdió el contacto con el mismo, no pudiendo ser recuperado posteriormente. El tamaño de la

<sup>5</sup>En la Tierra los remolinos de arena se generan por este mecanismo.

tormenta provocó que a simple vista se pudiese distinguir una diferencia notable en la luz reflejada por el planeta a un brillo más amarillo. La misión Mars Science Laboratory (MSL) mediante la Mast Camera del rover Curiosity detectó una profundidad óptica en la atmósfera que alcanzó valores extremos (de hasta 8,5) y la radiación ultravioleta recibida se redujo hasta un 97%[6]. Puesto que la atmósfera era muy opaca a la radiación, la temperatura atmosférica durante el día se redujo, aumentando la presión atmosférica en superficie. La gran cantidad de misiones que observaron el evento in situ y de forma remota permiten que la tormenta sea un evento de gran interés para estudiar los mecanismos del polvo de Marte que aún no son del todo comprendidos.

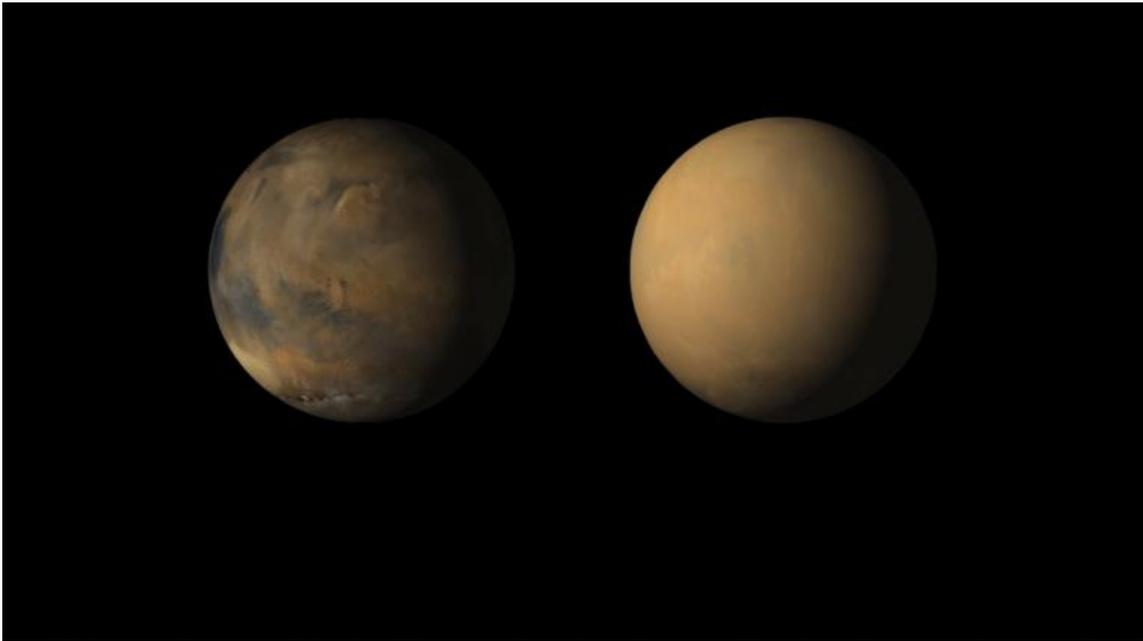


Figura 3: Representación del planeta Marte antes y durante la tormenta global de 2018. A la derecha Marte el 28 de Mayo de 2018; a la izquierda Marte el 1 de Julio de 2018. Figura extraída de [16]

### 2.2.2 Características del polvo

Tal y como se ha visto, el polvo de Marte supone un componente fundamental de la atmósfera. A continuación se expondrán las propiedades básicas del polvo y como actúa en el planeta.

Se cree que la composición del polvo marciano es constante en base a las medidas realizadas y el ciclo del polvo visto anteriormente[9]. Esta composición es mayoritariamente de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ [18][1]. El tamaño de partícula es bastante variable, teniendo tamaños de entre  $0,5 - 3\mu\text{m}$  para el polvo atmosférico y  $0,20 - 2\mu\text{m}$  para el polvo en superficie[18]. La composición supone un problema grave para una posible habitabilidad futura del planeta, pues producen enfermedades pulmonares y pueden ser cancerígenas. El tamaño de las partículas también es un problema prioritario, pues son tan pequeñas que pueden introducirse en los sistemas eléctricos y mecánicos fácilmente.

El polvo marciano tiene una fuerte influencia en la radiación. El tamaño de las

partículas de polvo permite que estas interactúen con los fotones que llegan desde el Sol y algo menos con aquellos que proceden de las emisiones térmicas del planeta. Tal y como se ha visto en el caso de la tormenta de 2018, esto provoca un efecto interesante. Puesto que las partículas actúan en gran medida con la radiación solar, la reflejan mucho más que la radiación térmica del planeta. Es decir, se produce un efecto anti-invernadero, donde como se refleja mucha más radiación de vuelta al sol que radiación de vuelta a Marte, el planeta se enfría. Esto es algo que se pudo ver claramente durante la tormenta global de 2018. Por supuesto, se debe distinguir el factor de enfriar la superficie del planeta de su atmósfera. Tal y como ya se indicó anteriormente, estas partículas interactúan mucho con la radiación solar, lo cual implica que también la absorben en gran medida. Por lo tanto, durante las tormentas, la capa atmosférica que posee el polvo se calienta, lo cual provoca a su vez vientos más fuertes por diferencia de temperatura.

Otro de los factores importantes a analizar del polvo es su contribución en la opacidad de la atmósfera a la radiación. En relación a lo indicado, en épocas de mucha abundancia de polvo atmosférico gran parte de la radiación solar es reflejada de vuelta, luego la radiación que llega a la superficie es menor. Esto es, se dice que la profundidad óptica de la atmósfera es alta. Esta profundidad óptica es muy importante a la hora de caracterizar el polvo atmosférico pues está relacionada con la abundancia y el tamaño de las partículas[3]. El análisis de los retrievals del polvo que serán realizados en este texto (Apartado 4.1) permitirá arrojar resultados sobre estos tamaños y profundidades ópticas en varias épocas distintas del planeta.

## 2.3 Misión Mars Science Laboratory

El estudio realizado en este trabajo está basado en las observaciones realizadas por el rover Curiosity. Este es parte de la misión "Mars Science Laboratory" (MSL) de la NASA lanzada en Noviembre de 2011, que a su vez es parte del Mars Exploration Program (MEP) de la Jet Propulsion Laboratory (JPL), programa centrado en la exploración robotizada de Marte. Entre los ocho objetivos principales de la misión están el análisis de la posible habitabilidad del planeta, estudio geológico y atmosférico del mismo y medir la radiación recibida en superficie.

La misión estaba constituida por la nave principal que albergaba la grúa aérea y el rover Curiosity. El escudo térmico de la nave estaba equipado con el instrumento MSL EDL (Entry, Descent and Landing) (MEDLI), que debía medir con precisión los parámetros atmosféricos, la respuesta y orientación del vehículo y los valores del escudo térmico para facilitar la entrada en la atmósfera. Una vez realizada la entrada y decelerado con el paracaídas, el escudo térmico se separó de la nave liberando la grúa y el rover acoplado a la misma. Esta descendió el último kilómetro y medio hacia la superficie decelerando mediante retrocohetes donde, a unos 7,5 metros de la superficie, la grúa depositó el rover en el lugar indicado. Esta operación tuvo un éxito sin precedentes en la historia de la exploración de Marte a pesar de los grandes inconvenientes con los que se presentaba el proyecto de forma inicial. Desde su diseño, Curiosity era mucho más pesado que otros rovers hasta el momento, luego el uso de paracaídas durante todo el descenso, tal y como se había hecho hasta entonces, era inviable. La grúa aérea resultó ser la respuesta más adecuada a este problema. Esta

misma técnica fue usada posteriormente para poner en superficie el rover Perseverance de la misión Mars 2020.

### 2.3.1 Curiosity

El Curiosity es un rover de la NASA diseñado para estudiar y analizar la geología, clima y habitabilidad de Marte. El rover posee multitud de sistemas e instrumentos que ayudan a cumplir los ocho objetivos de la misión: (1) clasificar componentes orgánicos del carbono; (2) investigar los componentes básicos de la vida; (3) identificar eventos propios de procesos biológicos; (4) investigar la composición química y mineral de la superficie; (5) interpretar procesos de formación de rocas; (6) estudiar la evolución atmosférica; (7) determinar el ciclo del H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub>; (8) caracterización del espectro de radiancia de la superficie.

De forma inicial, se esperaba que el rover tuviese un tiempo de misión de dos años, los cuales fueron extendidos múltiples veces hasta hoy día más de 10 años después. Debido a este rotundo éxito, la misión y el diseño del Curiosity constituyeron las bases del diseño de la misión Mars 2020 y su rover Perseverance. La importancia del Curiosity reside en sus instrumentos científicos los cuales serán analizados en el siguiente apartado incluyendo el instrumento ChemCam de donde proceden las observaciones realizadas por el rover y las cuales han sido usadas como base de este texto.

### Instrumentos del Curiosity

Curiosity posee un total de 10 instrumentos (Figura 4), entre los que se encuentran cámaras, espectrómetros, microscopios, láseres, detectores e instrumentos para realizar análisis químicos, así como un brazo robótico para recoger muestras o eliminar polvo no deseado[15].

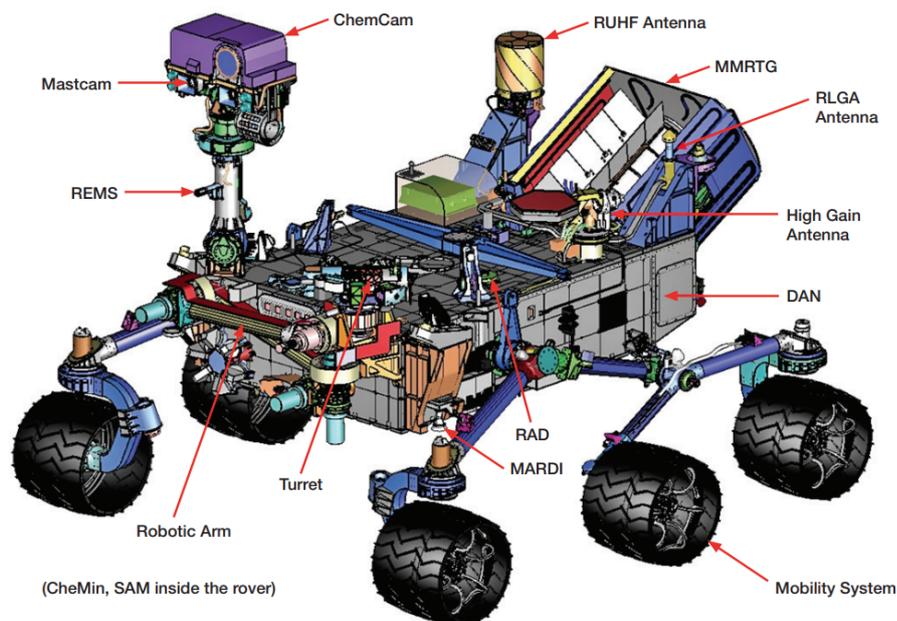


Figura 4: Esquema de los instrumentos del rover Curiosity. Figura extraída de [15]

Estos instrumentos son:

- **Mast Camera (MastCam):** Dos cámaras de dos megapíxeles para observar los alrededores del rover con sumo detalle.
- **Chemistry and Camera (ChemCam):** Un láser y un telescopio ubicado en el mástil. Se analizará este instrumento en mayor detalle.
- **Alpha Particle X-Ray Spectrometer (APXS):** Instrumento que radía partículas alfa y un espectrómetro de Rayos-X ubicado en el brazo robótico usado para el análisis de la abundancia de elementos en muestras recogidas.
- **Mars Hand Lens Imager (MAHLI):** Una cámara de color en el brazo robótico para observar de cerca las muestras para ser recogidas.
- **Chemistry and Mineralogy (CheMin):** Un espectrómetro basado en difracción de polvo que identifica las muestras de mineral recogidas por el brazo robótico.
- **Sample Analysis at Mars (SAM):** Un conjunto de instrumentos que analiza los gases y componentes orgánicos tanto de la atmósfera como de las muestras recogidas.
- **Rover Environmental Monitoring Station (REMS):** Un conjunto de instrumentos meteorológicos cuya función es la de medir la humedad, presión, temperatura, velocidad del viento y la radiación recibida.
- **Radiation Assessment Detector (RAD):** Es un instrumento cuya función es detectar y caracterizar la radiación recibida desde el Sol u otras fuentes.
- **Dynamic Albedo of Neutrons (DAN):** Es un emisor de neutrones y un detector cuya función es medir la cantidad de hidrógeno, hielo y agua cerca de la superficie.
- **Mars Descent Imager (MARDI):** Instrumento que tomó imágenes del suelo marciano durante el descenso del rover cuando fue bajado por la grúa aérea.

Por supuesto, las funcionalidades de cada instrumento exceden las expuestas en este texto, pero puesto que no son de interés para el estudio no serán vistas con detenimiento. Si se desea, puede consultarse en las referencias las características detalladas de cada elemento[15].

## 2.4 Instrumento ChemCam

Chemistry and Camera complex (ChemCam) es un sistema compuesto por dos instrumentos: un espectrómetro de plasma inducido por láser (en inglés "Laser-induced breakdown spectroscopy, LIBS) cuyo objetivo es el de analizar la composición química del suelo marciano y muestras y un telescopio remoto Micro Imager (en inglés "Remote Micro Imager", RMI)[27]. De forma usual, ChemCam suele ser utilizado para el análisis de las muestras del suelo del planeta, donde mientras RMI otorga imágenes de alta resolución del área de la muestra, LIBS analiza la muestra en sí vaporizando la muestra y recogiendo el espectro de radiancia emitido por la misma. En el caso del estudio

presente, ChemCam apunta al cielo de Marte en ángulos de elevación establecidos y recoge los espectros de radiancia del Sol recibidos que han atravesado la atmósfera. De esta forma se consigue identificar la composición atmosférica en la trayectoria observada. Puesto que el objetivo es obtener las abundancias de los componentes de la atmósfera mediante un proceso de retrieval (ver Apartado 3.3) el cual será realizado mediante un programa de síntesis, conviene definir las características de observación del instrumento y cómo realiza las observaciones.

El instrumento LIBS posee un láser para vaporizar las muestras y así recoger el espectro de emisión. Sin embargo, no se detallará este sistema puesto que no ha sido el usado para recoger los datos (el detalle del método de observación se encuentra en el próximo apartado). El espectrómetro recoge espectros con longitudes de onda de rangos de  $240 - 850nm$  con resoluciones de  $0,09 - 0,30nm$  en 6144 canales.

## 2.5 Método de observación mediante ChemCam

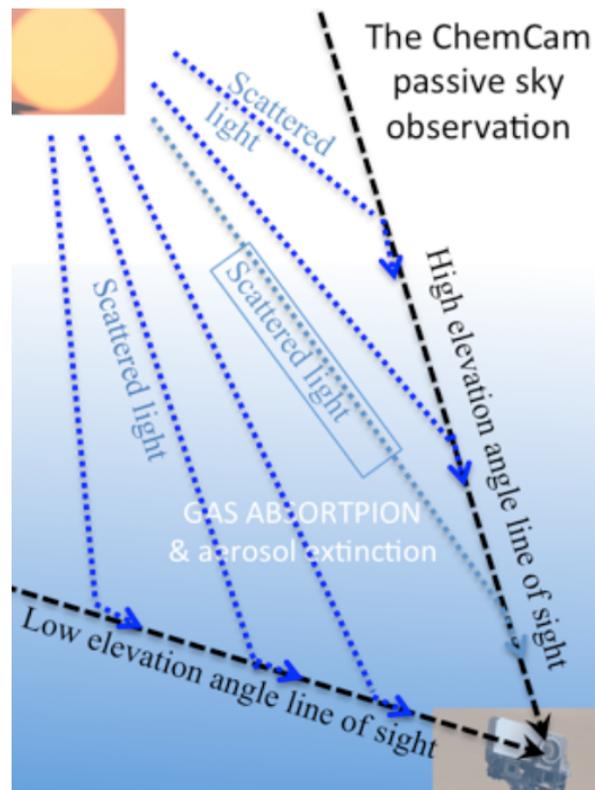


Figura 5: Geometría de la observación pasiva del cielo ("passive sky observation") de ChemCam. Figura extraída de [12]

Con el fin de caracterizar la atmósfera de Marte se usa el instrumento ChemCam para detectar la radiación solar que atraviesa la atmósfera del planeta. De esta forma, observando el espectro de radiancia e invirtiendo el proceso físico en el cual, mediante unos elementos se obtendría el espectro (es decir, a partir de dicho espectro de radiancia obtener los elementos, ver Apartado 3.3) se determina la composición atmosférica. Tal y como ha sido mencionado en el apartado anterior, ChemCam se diseñó con el fin de realizar espectroscopia de muestras del suelo y rocas de Marte. Sin embargo, el

instrumento también posee un modo de funcionamiento que permite conseguir información de la radiación solar: el modo de Observación Pasiva del Cielo ("Passive Sky Observation") representado en la Figura 5. Tal y como puede verse, ChemCam en este modo realiza dos observaciones del cielo del planeta con breve separación temporal entre las mismas: una observación en baja elevación ("low elevation angle") y otra en alta elevación ("high elevation angle"). Puesto que esas observaciones recogen la luz solar que ya ha atravesado la atmósfera, y por ende ha sufrido efectos de absorción, emisión y scattering (el transporte radiativo es analizado en el próximo Apartado 3.1), esta radiación contiene toda la información relevante de la composición atmosférica.

El desarrollo y los datos recogidos por las observaciones se acreditan al trabajo de McConnochie et al. de 2018 [12]. La razón de la elección de las dos elevaciones es poder realizar un ratio entre ambos resultados con el fin de eliminar incertidumbres provocadas por el instrumento y otras características solares que no son de interés. En el caso de este estudio, se usarán ambas observaciones para realizar retrievals independientes y caracterizar la atmósfera en relación al ángulo observado.

Las observaciones pasivas del cielo se realizan con una media de  $20^\circ$  desde el horizonte para la baja elevación y con una media de  $70^\circ$  para la alta elevación. El campo de visión del instrumento (llamado Field of View, FOV) es de 54 miliradianes. El instrumento trabaja con una relación señal-ruido de aproximadamente 3000 para cada píxel individual, una franja de error más que suficiente.

Evidentemente el principal factor que determinará las radiaciones recibidas en la cámara es el propio Sol. Su posición en el cielo marciano es muy importante puesto que influye en el ángulo con el que entrarán los rayos en la atmósfera visto desde la posición del Curiosity. Por suerte, tal y como se verá en el Apartado 3.2, el programa utilizado para realizar los cálculos para recuperar la composición atmosférica implementa un sistema automático que calcula la posición tridimensional del planeta y la estrella con unos pocos parámetros y ajusta automáticamente los ángulos con los que los rayos entrarán. A pesar de ello, con el fin de no quemar la CCD, las observaciones realizadas nunca se encuentran a menos de  $22,5^\circ$  de la trayectoria solar en el cielo marciano. De todas las medidas realizadas, se escogen para su estudio 5 soles marcianos que cubren un amplio abanico de Longitudes solares y años distintos para ver la evolución del polvo atmosférico: sol 380, sol 473, sol 617, sol 793 y sol 2140. Estos soles se calculan a partir del sol de llegada del Curiosity a Marte. Este último difiere mucho en días del resto de soles (casi 4 años terrestres), escogido debido a la ya nombrada Tormenta de Polvo de 2018 puesto que tuvo lugar en dicho sol.

## 3 Modelos y metodología

### 3.1 Transporte radiativo

El transporte radiativo define el proceso físico mediante el cual la energía es transmitida en forma de radiación de tres formas diferentes: absorción, scattering<sup>6</sup> y emisión. La descripción de estos tres tipos de radiación y sus interacciones viene dada por la llamada Ecuación de Transporte Radiativo (ETR). Cuando se trata de calcular la ecuación de forma clásica, la absorción de la radiación por la superficie del planeta y la emisión térmica del mismo son suficientes. Sin embargo, si la atmósfera incluye aerosoles que provoquen dispersión, ésta deberá tenerse en cuenta en el modelo de transporte radiativo. Concretamente, en el análisis realizado, se han debido usar modelos de dispersión múltiple, donde los fotones son dispersados varias veces al atravesar el aerosol.

La ecuación de transporte radiativo surge a partir de la conservación de la energía en una atmósfera gobernada por la emisión, absorción y scattering de los fotones[20]. Supóngase un haz de radiación  $I_\lambda$  donde al atravesar un medio de densidad  $\rho$  su intensidad es reducida en una cantidad diferencial  $dI_\lambda$ . Se tiene entonces que esta reducción al atravesar un grosor  $ds$  es[11]

$$dI_\lambda = -k_\lambda \rho I_\lambda ds, \quad (1)$$

donde  $k_\lambda$  es el coeficiente de extinción másico por sección transversal ("mass extinction cross section") el cual incluye el término de dispersión para una longitud de onda  $\lambda$ . Este último se define a su vez como la suma entre las secciones transversales de absorción y scattering. Ahora bien, se debe considerar también la contribución de la emisión del material, así como el scattering múltiple, los cuales añaden radiación al haz en contraposición a las primeras. Con el fin de caracterizarlas, se define una "función fuente" ("source function")  $J_\lambda$ , cuyo coeficiente  $j_\lambda$  denota el incremento en la intensidad como

$$dI_\lambda = j_\lambda \rho ds. \quad (2)$$

Evidentemente, ambas ecuaciones se presentan de igual forma, puesto que el objetivo es considerar el balance de energía. Combinando las ecuaciones (1) y (2), se llega a

$$dI_\lambda = -k_\lambda \rho I_\lambda ds + j_\lambda \rho ds, \quad (3)$$

donde de forma más conveniente, se puede escribir mediante la función fuente como

$$\frac{dI_\lambda}{k_\lambda \rho ds} = -I_\lambda + J_\lambda. \quad (4)$$

Esta es la Ecuación de Transporte Radiativo (ETR). Puesto que el objetivo a tratar es el transporte radiativo en una atmósfera con aerosoles de scattering, a continuación se presentarán las aproximaciones y conceptos necesarios para resolver la ecuación.

### Atmósfera plano-paralela

Cuando se trata de describir la transferencia radiativa en atmósferas planetarias, en este caso particular la atmósfera de Marte, conviene considerar dichas atmósferas como

<sup>6</sup>En la literatura a veces se lo denomina dispersión, aunque es más común referirse siempre en inglés como scattering.

si estuviesen constituidas por capas paralelas separadas. Esta es la que se conoce como aproximación de la atmósfera plano-paralela[11] (Figuras 6 y 7).

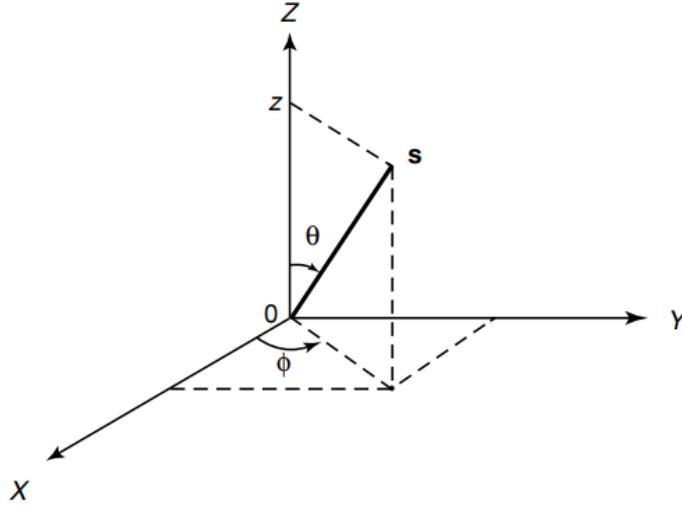


Figura 6: Esquema de la geometría de una atmósfera plano-paralela.  $\theta$  es el ángulo cenital,  $\phi$  es el ángulo acimutal y  $s$  el vector de posición. Figura extraída de [11, p31]

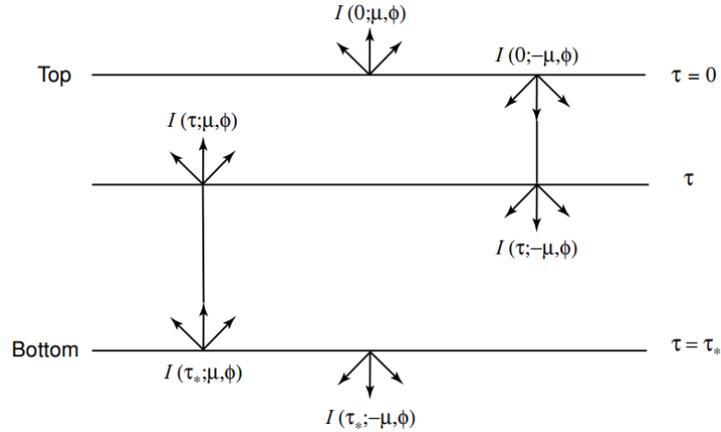


Figura 7: Esquema de las intensidades en las capas superior ( $\tau = 0$ ), referencia( $\tau$ ) e inferior( $\tau = \tau_*$ ) en una atmósfera plano paralela. Figura extraída de [11, p32]

Considerando la geometría de la Figura 6, se puede reescribir la ecuación (4) como

$$\cos \theta \frac{dI(z, \theta, \phi)}{k\rho dz} = -I(z, \theta, \phi) + J(z, \theta, \phi). \quad (5)$$

Otra forma más conveniente de definir la ecuación (5) es mediante el espesor óptico  $\tau$  que por supuesto depende del material (en este caso, la capa). Entonces, se llega a la ecuación

$$\mu \frac{dI(\tau, \mu, \phi)}{d\tau} = I(\tau, \mu, \phi) - J(\tau, \mu, \phi), \quad (6)$$

donde por simplicidad en la ecuación  $\mu = \cos \theta$ . Esta es la Ecuación de Transferencia Radiativa para atmósferas plano-paralelas, la cual es la base usada en el programa Planetary Spectrum Generator[25, p77].

## 3.2 Planetary Spectrum Generator

Con el fin de cumplir el objetivo de modelizar la atmósfera de Marte se ha hecho uso de la herramienta online Planetary Spectrum Generator[24] de la NASA Goddard Space Flight Center. Se trata de un modelo de transferencia radiativa que permite obtener espectros planetarios desde un amplio catálogo de observatorios, orbitadores e incluso desde la superficie a múltiples longitudes de onda[25, p8]. PSG realiza las simulaciones mediante la lectura de un archivo de configuración en formato relacionado con XML, donde quedan registrados todos los elementos necesarios para la simulación: la geometría, la atmósfera y el instrumento utilizado en la simulación. Una de las características más interesantes de la herramienta es que posee múltiples modelos atmosféricos de los planetas del sistema solar. Estas atmósferas pueden ser modificadas cómodamente desde la misma interfaz del programa. Ha sido precisamente uno de estos modelos atmosféricos, concretamente el Mars Climate Database (MCD), el utilizado en la modelización de los datos de radiancia espectral realizados.



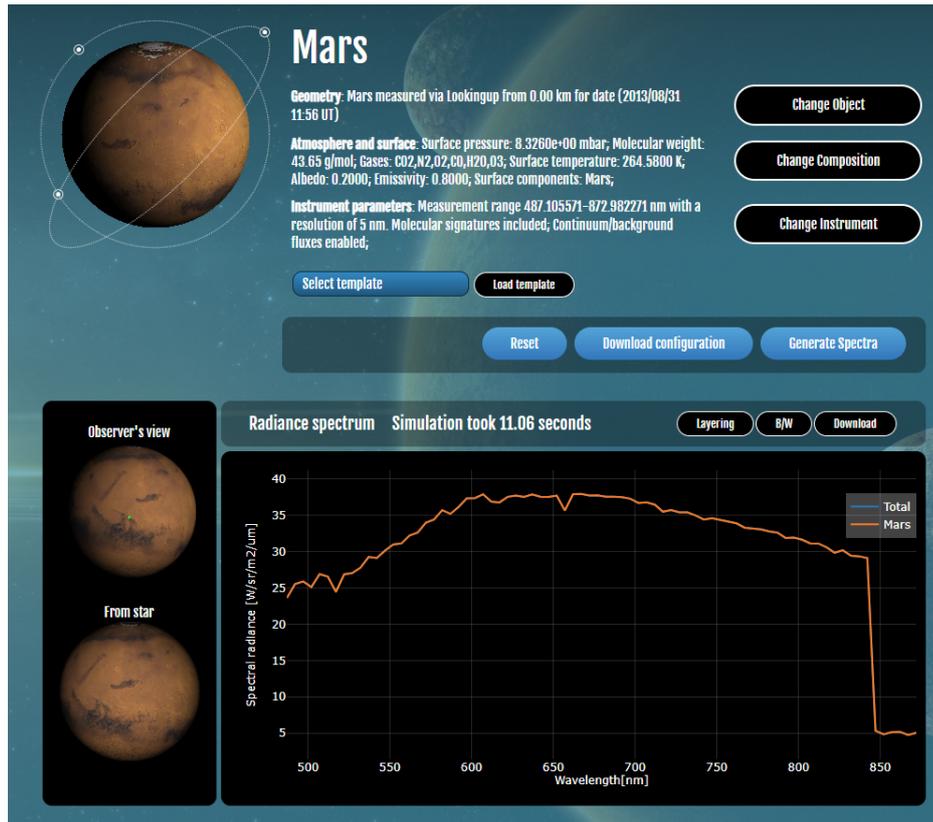
Figura 8: Interfaz inicial del Planetary Spectrum Generator (PSG). Nótese como al seleccionar un cuerpo celeste, PSG da cierta información básica del mismo y su geometría.

La interfaz inicial de PSG (Figura 8) ofrece la posibilidad de cargar modelos predefinidos de múltiples objetos vistos desde observatorios, orbitadores y otras posibilidades. Las funciones más importantes, sin embargo, pueden encontrarse en la parte derecha de la interfaz, donde podemos escoger el objeto celeste a observar, la composición atmosférica del mismo y el instrumento con el que se va a observar. PSG no solo posee una amplia base de datos de donde seleccionar objetos, modelos atmosféricos e instrumentos, también ofrece la posibilidad de definir nuestros propios objetos, construir modelos atmosféricos y definir un instrumento, su posición y dirección de observación. Una parte vital de la herramienta es la capacidad de integrar modelos estelares y de modificar el tipo de estrella que proporciona radiación que se absorbe en la atmósfera. Esta personalización incluye el tipo de estrella, la temperatura y el radio de la misma. Una vez seleccionada, es por supuesto importante la posición del objeto con respecto a la misma, lo cual PSG es capaz de calcular para la determinación de las efemérides en tres dimensiones al proporcionarle ciertos datos.

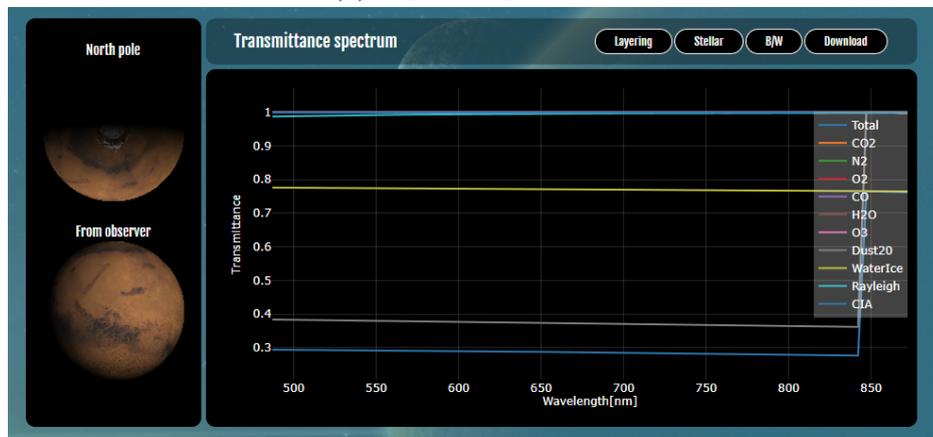
El apartado de composición (Figura 13) permite seleccionar uno de múltiples modelos atmosféricos y alterarlos según la necesidad. El programa es capaz de simular atmósferas compuestas por diferentes gases cuya abundancia puede ser modificada por el usuario desde la interfaz. Estas abundancias se corresponden con perfiles verticales de la atmósfera, también recogidos en las bases de datos y que el PSG actualiza según la posición del Sol si esta se encuentra en la base de datos. Asimismo, PSG posee datos de los aerosoles presentes en la atmósfera y permite añadir, eliminar o modificar estos en la misma. Puesto que estos aerosoles son los que producen la radiación de dispersión, son de vital importancia en nuestros modelos. Es, además, en esta parte de la interfaz donde se encuentran dos de los parámetros más importantes de la modelización de scattering múltiple: NMAX y LMAX. NMAX indica el número de corrientes del modelo, mientras que LMAX indica el número de polinomios de Legendre a incluir en la expansión de la función de fase [25, p83] en la linealización de las ecuaciones integrodiferenciales. Evidentemente, aumentar el número de pares de rayos a considerar en el cálculo es lo que provoca que el tiempo de computación aumente de forma drástica (según Villanueva et al., el tiempo aumenta de forma cúbica con cada corriente). Por esta razón, se debe tener especial cuidado a la hora de escoger los valores de NMAX y LMAX puesto que aumentar ambos valores con el fin de aumentar de igual forma la precisión no es lo óptimo. Se debe llegar a un equilibrio entre precisión y tiempo de computación aceptable, para lo cual se ha partido de unos valores asumibles y se ha probado hasta obtener el equilibrio deseado en el tiempo de computación.

Por último, en la composición podemos cambiar la temperatura superficial, el albedo y la emisividad del objeto. PSG actualiza según la base de datos que dispone del día seleccionado estos valores, aunque una vez más siempre se pueden modificar. La opción del instrumento permite seleccionar dentro de una amplia gama de observatorios, orbitadores y cámaras, pudiendo también definir una propia. Dentro de las opciones a modificar disponibles se encuentra el rango espectral, la resolución, las unidades de salida del modelo y la capacidad de integrar o no los datos estelares antes definidos entre otras. A pesar de que PSG permite modelizar el ruido, no se ha usado esta característica en los modelos de este texto.

Una vez establecidos todos los datos necesarios en las tres interfaces y guardar los datos, solo queda generar el espectro (Figura 9). Tras la simulación, PSG devuelve en la propia interfaz online los gráficos del espectro de radiancia, transmitancia, reflectancia y otros si han sido solicitados. Por supuesto, también puede obtenerse el archivo de configuración en formato de texto usado en la simulación mediante la opción "Download configuration". Tal y como puede verse en la Figura 9, cualquier gráfico puede descargarse mediante la opción "Download" en formato de texto y cuyos datos de longitud de onda y radiancia espectral se escribirán en forma de columna para su uso. "Layering" es otra opción útil que descargará un archivo con las características de las capas atmosféricas y sus gases y aerosoles usados durante la simulación. Este archivo será útil para ciertos apartados posteriores puesto que revela información adicional interesante.



(a) Espectro generado.



(b) Transmitancia de los gases atravesados.

Figura 9: Resultado de la generación de un espectro de ejemplo en PSG. Todos los gráficos pueden ser explorados en la propia herramienta online y descargados en cualquier formato de texto si se desea. La opción "Layering" descarga un archivo de datos en formato de texto con las características de las capas plano-paralelas usadas en la simulación.

### 3.3 Retrievals

Sin duda la parte más importante de la herramienta puede encontrarse en la parte superior de la interfaz: la opción "Retrievals". Una vez definida la geometría de nuestro objeto, su atmósfera y el instrumento, esta herramienta del PSG permite recuperar cualquier característica (ya sea geométrica o atmosférica) de nuestro sistema a partir

de datos del espectro proporcionados al programa. Es decir, PSG permite realizar el camino inverso de la construcción de la atmósfera y, proporcionando observaciones de la misma, poder recuperar abundancias, presiones, temperaturas y demás factores importantes. Esta es la herramienta principal que se usará en este texto para caracterizar la atmósfera de Marte

”Retrievals” basa su funcionamiento en lo que se conoce como el problema inverso (”inverse problem”), donde considerando unas medidas iniciales se obtienen los parámetros necesarios para obtener dichos resultados[22]. Por supuesto, a diferencia de un problema directo donde un conjunto de parámetros fijos suele conllevar a un resultado único, este no es el caso general de un problema inverso pues si existen múltiples parámetros que contribuyan en la descripción del resultado, cualquier combinación válida de los mismos podría dar el valor buscado. La respuesta se halla en la forma a realizar este camino inverso, pues a pesar de que numéricamente los resultados de los parámetros sean aceptables, físicamente pueden no tener sentido alguno. Queda en manos de quien realiza la investigación llevar a cabo una buena acotación de los parámetros, tratando de buscar resultados coherentes con la teoría del problema.

PSG posee puede realizar el problema inverso[25, p132] de forma óptima para problemas sobre planetas del Sistema Solar. Este es el llamado método de la estimación óptima (”Optimal Estimation”, OE)[19]. Éste método permite un cálculo óptimo de los parámetros si se posee información previa sobre los mismos que permita acotar su valor. La forma de saber cómo de ajustado es el modelo obtenido por el retrieval a los datos es mediante la desviación cuadrática media, también conocida como chi-cuadrado ( $\chi^2$ )[2]. Considérese los datos del espectro a estudiar  $R$  un conjunto de  $N$  medidas, un modelo a ajustar  $r$  y  $\sigma^7$  el ruido. Entonces, la desviación cuadrática media se define como

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(r_i - R_i)^2}{\sigma_i^2}. \quad (7)$$

En PSG, el ruido se adopta de forma automática en las pruebas de retrieval (a menos que sea impuesto por el usuario) a un 5% de los datos. Con el fin de no obtener resultados demasiado altos en el cálculo de  $\chi^2$ , éste suele dividirse por el número de grados de libertad del sistema dando lugar al  $\chi^2$  reducido ( $\chi_\nu^2$ ). En este caso, el objetivo es obtener resultados del orden de  $\chi_{mu}^2 \lesssim 1$ , resultando el 0 el valor donde el modelo se ajusta de forma perfecta a los datos. Para valores mucho mayores que 1 usualmente significa que existen desviaciones muy altas en el modelo debido a pocas o incompletas medidas.

Para poder realizar el retrieval se deben cargar en PSG los datos de las observaciones. Estos deberán estar escritos en columnas de longitud de onda ( $\lambda$ ) y la unidad de intensidad escogida (en este caso, radiancia espectral) con una tercera columna opcional del error de las medidas. En caso de no ser proporcionada, esta última será tomada como un valor general del 5%. La Figura 10 muestra la interfaz del programa PSG para realizar los retrievals. Estos requieren de que, cuando se trate de calcular una característica, se debe otorgar al programa un valor inicial ”a priori” y una cota

---

<sup>7</sup>Conocida como desviación estándar.

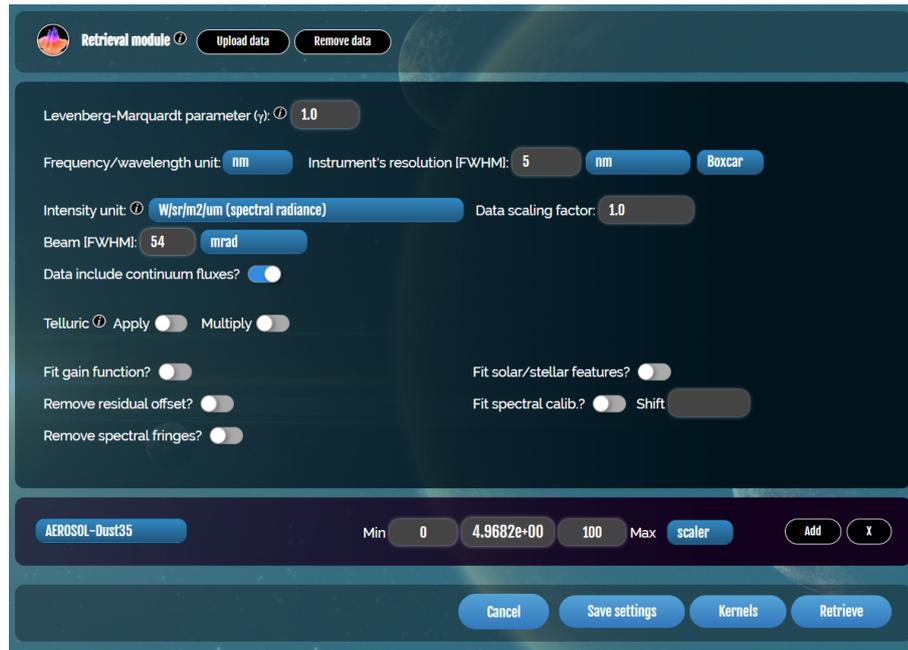


Figura 10: Interfaz "Retrievals" del PSG. La figura muestra las posibles opciones a alterar. Nótese como para cualquier parámetro a calcular se debe dar un valor inicial y una cota superior e inferior.

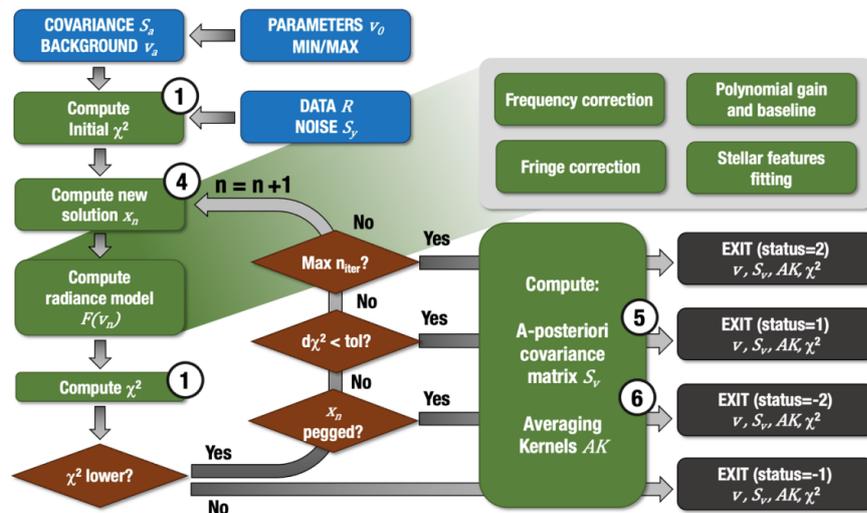


Figura 11: Esquema de la implementación de la Estimación Óptima de Rodgers en PSG. Figura extraída de [25, p136]

superior e inferior para poder realizar el modelo de forma correcta. El primero de todos los valores es el parámetro de Levenberg-Marquardt ( $\gamma$ ), parámetro de regularización que trata de mantener una relación entre el valor dado "a priori" y las observaciones: con  $\gamma = 0$  se usa el método clásico de Levenberg-Marquardt (LM), con  $\gamma = 1$  se usa el formalismo de Rodgers clásico y con  $\gamma$  de valores altos (10) el retrieval se restringirá más hacia el valor propuesto "a priori". Durante el desarrollo de este texto, se restringe al valor de 1 (formalismo clásico de Rodgers). Las siguientes opciones permiten seleccionar la resolución del instrumento y las unidades de longitud de onda y la intensidad. Por último, se presentan opciones para añadir absorción telúrica y otros ajustes

del ruido y opciones estelares. Puesto que no son de relevancia para los objetivos a cumplir, no serán exploradas en este texto pero puede consultarse más información al respecto en la bibliografía[25, p137-139].

## Fundamentos del retrieval

La ecuación formal del retrieval implementada en PSG es

$$\chi (\gamma S_a^{-1} + K^T S_y^{-1} K) = y (K^T S_y^{-1}), \quad (8)$$

donde  $K$  es la matriz Jacobiana,  $S_y$  es la matriz de covarianza que representa el ruido de las observaciones ( $S_y = \epsilon_R \epsilon_R^t$ ) y  $S_a$  es la matriz de covarianza de los errores de la estimación inicial ("a priori"). Esta última se construye mediante los valores de las cotas superior e inferior dadas inicialmente, siendo sus elementos diagonales el 10% de la diferencia entre las cotas. El proceso es iterativo (Figura 11) con un valor máximo de 20 iteraciones.

Como se verá en el próximo apartado, PSG permite especificar la abundancia de los gases en una atmósfera de múltiples formas. En el caso particular de este texto, es de interés representar la abundancia del aerosol de polvo atmosférico en unidades de profundidad óptica  $\tau$ , el cual está entre las opciones a elegir. Sin embargo, al realizar un retrieval en PSG no es posible seleccionar esta opción, lo que puede dificultar futuras evaluaciones. Por ello, conviene definir correctamente la profundidad óptica y cómo obtenerla a partir de los resultados de abundancia otorgados por el retrieval.

Por definición, la profundidad óptica de una capa atmosférica plano-paralela se obtiene a partir de[11]

$$T = e^{-m\tau}, \quad (9)$$

donde  $T$  es la transmitancia del medio y  $m$  es la masa de aire relativa ("relative air mass")<sup>8</sup>. Al generar un espectro en PSG (Figura 9) también se tiene información de la transmitancia del medio, lo cual será lo usado para calcular el espesor óptico. Sin embargo, aún falta por especificar la masa de aire relativa la cual es información extra de las capas. Tal y como se vio en el Apartado 3.2 se puede conseguir esta información mediante la opción "Layering" y observando el archivo de datos. Siempre se escogerá la media de ambos datos para obtener así la media de  $\tau$  en cada caso.

## 3.4 Modelos atmosféricos

La caracterización de la atmósfera de Marte se realiza mediante el instrumento Chem-Cam, en dos ángulos de observación distintos. Gracias a los datos recogidos por el instrumento de la radiancia espectral recibida, se modeliza la atmósfera con el fin de caracterizar los aerosoles de scattering (dispersión) presentes en la misma, es decir, el polvo atmosférico. El primer paso, por ende, es modelizar en el programa PSG las atmósferas necesarias para realizar el retrieval de los datos que se requieren.

Puesto que el objetivo es caracterizar la atmósfera, se usan datos de hasta cinco soles marcianos diferentes, tratando de seleccionar épocas de abundancia de polvo

<sup>8</sup>Ratio entre la cantidad de aire en la línea de visión y el cénit.

distintas para observar su evolución. Dichos soles se recogen en la Tabla 2 con sus longitudes solares (Ls) correspondientes, la posición del instrumento en longitud y latitud y la equivalencia en fecha terrestre. La elección de dichos soles se realiza con el fin de cubrir un abanico de diferentes profundidades ópticas y longitudes solares, habiendo escogido el sol 2140 debido a que se produjo la tormenta de polvo de 2018 en dicha fecha[21].

Sol	Ls	Longitud	Latitud	Fecha
380	15	137.42 E	-4.60 N	31-08-2013
473	58.5	137.41 E	-4.62 N	05-12-2013
617	124.5	137.40 E	-4.63 N	02-05-2014
793	223.6	137.37 E	-4.66 N	29-10-2014
2140	229.9	137.37 E	-4.72 N	13-08-2018

Tabla 2: Soles de Marte seleccionados.

Conocer la longitud solar (Ls) y la posición del instrumento es muy importante, pues define la radiancia espectral que recogerá ChemCam al observar. Asimismo, tal y como se vio en el apartado anterior, PSG requiere de estos datos para realizar una correcta síntesis. El primer paso es introducir estos valores en la interfaz "Change Object" de PSG tal y como se ha visto y como aparece como ejemplo en la Figura 12.



Figura 12: Interfaz "Change Object" del Planetary Spectrum Generator (PSG). La imagen muestra el sol 380 como ejemplo de coordenadas. La opción "looking up" hace referencia a el instrumento observando desde la superficie en un ángulo. Estos ángulos se definen con mayor precisión en apartados posteriores.

Una vez inicializada la posición geométrica del planeta, se procede a la construcción del modelo atmosférico. Es imprescindible realizar este paso con todos y cada uno de

los soles, puesto que PSG no actualiza la posición en el modelo atmosférico al cambiar la geometría. En otras palabras, al cambiar la longitud solar en "Change Object" se debe construir y actualizar el modelo en la interfaz de "Change Composition".

La modelización atmosférica se realiza mediante una de las opciones antes descritas que posee el PSG. Al seleccionar la interfaz de "Change Composition" la primera de las ventanas que PSG muestra indica "Atmosphere", donde podremos cargar una opción llamada "Atmospheric Template" (modelo atmosférico) la cual, a su vez, permite cargar múltiples modelos ya presentes en el programa. En particular, el modelo de interés a cargar se trata del Mars Climate Database (MCD)[13]. Esta es una base de datos de campos meteorológicos resultado de simulaciones numéricas de modelos de circulación general de la atmósfera de Marte (Millour et al. 2018). MCD es de uso libre, lo que lo convierte en la herramienta perfecta para investigaciones y desarrollos de ámbito atmosférico.

Al cargar el modelo, PSG actualiza los datos atmosféricos para ajustarse a la longitud solar correspondiente. Mediante el MCD, el programa construye una atmósfera cargando el valor de la presión en superficie y la abundancia de los gases en la atmósfera respondiendo a un perfil vertical de los mismos. Puesto que el modelo base usado es MCD, también carga de forma automática el perfil vertical y la abundancia de los aerosoles de interés, que en este caso son el hielo de agua (WaterIce) y el polvo (Dust). En el caso del primero de los aerosoles se dejará, por norma general, el valor de la abundancia nominal, es decir, no se alterará en los modelos. Lo mismo ocurre con los gases de la atmósfera, los cuales se mantendrán en sus valores de abundancia nominales dictados por el MCD, así como la presión en superficie. La Figura 13 muestra un ejemplo de estos valores de abundancia en los gases y aerosoles mientras que la Figura 14 muestra un ejemplo del perfil vertical de la atmósfera.

Como ya se ha indicado varias veces a lo largo de este texto, el componente de importancia a tratar es el polvo de Marte, luego la abundancia de este será la analizada durante el desarrollo. Sin embargo, PSG posee una pequeña desventaja en este estudio en particular. Tal y como puede verse en la Figura 13b se ha definido el tipo de aerosol como Dust (polvo) y un subtipo llamado "CRISM\_WOLFF", es decir, los cálculos de las funciones de fase para las propiedades del polvo usa los datos del trabajo de Wolff et al. (2009)[28]. Este subtipo del polvo marciano tiene como inconveniente que el radio efectivo de las partículas de polvo son exactamente iguales en todo momento, concretamente de  $1,50\mu m$ , y no puede ser cambiada (la opción de cambiar el tamaño de la partícula sigue estando disponible, sin embargo alterarla no produce resultados diferentes). Es conocido que el tamaño del polvo de Marte puede variar de forma significativa entre épocas, alterando la radiancia espectral recibida en el instrumento debido al scattering. Por ello, es necesario realizar un último paso en la construcción de los modelos atmosféricos y que requiere de ajustar los archivos de configuración del PSG. Puesto que el subtipo de polvo presente en el programa no permite realizar los cálculos que se precisan, se usará un nuevo subtipo de polvo calculado de forma externa y para el cual se ajustará un perfil vertical nuevo basado en el perfil vertical del polvo de Marte ya construido por el MCD.

Los datos que se van a utilizar provienen de "Modelled Optical Properties of en-

The screenshot shows the 'Atmosphere' tab with 'Hydrostatic equilibrium' selected. The interface includes input fields for 'Surface pressure' (8.3280 mbar) and 'Mean molecular weight [g/mol]' (43.65). A list of gases is displayed with their respective types and abundances:

Gas	Type	Abundance	Model
CO <sub>2</sub>	HIT[2]	1	7-CKTB/LBLN
N <sub>2</sub>	HIT[22]	1	7-CKTB/LBLN
O <sub>2</sub>	HIT[7]	1	7-CKTB/LBLN
CO	HIT[5]	1	7-CKTB/LBLN
H <sub>2</sub> O	HIT[1]	1	7-CKTB/LBLN
O <sub>3</sub>	HIT[3]	1	7-CKTB/LBLN

Each gas entry includes a 'Search' button, a 'scaler' button, and a chemical structure icon. At the bottom, there are 'Processes' controls: Rayleigh (Add), Rayleigh (X), Refraction (X), CIA\_all (X), and UV\_all (X).

(a) Abundancia de los gases en la atmósfera.

The screenshot shows the 'Atmospheric scattering aerosols' tab with 'Stream-pairs (NMAX) / phase LMAX' set to 0 and 0. The interface includes input fields for 'Type' and 'Abundance' for two aerosol types:

Type	Model	Abundance	Radius [reff]
Dust	CRISM_Wolff[r=1.50um 0.44-98.54um]	1	1
Waterice	CRISM_Wolff[r=2.00um 0.31-99.57um]	1	1

Each entry includes a 'scaler' button and a '4-SCAL' button. The 'Add' button is visible at the bottom right.

(b) Abundancia de los aerosoles en la atmósfera.

Figura 13: Interfaz "Change Composition" del Planetary Spectrum Generator (PSG) para el sol 380. Las abundancias se determinan mediante la unidad "scaler" que da cuenta de la fracción del perfil vertical del gas.

sembles of Aerosol Particles" (MOPSMAP)[5], una herramienta para modelizar las propiedades de aerosoles. En resumen, esta herramienta permite crear el mismo polvo marciano del subtipo de Wolff et al. pero con la ventaja de poder seleccionar el tamaño de partícula deseado. Entonces se generan múltiples subtipos de partículas diferentes, cada una de un tamaño fijo distinto, con los que poder realizar los retrievals en apar-

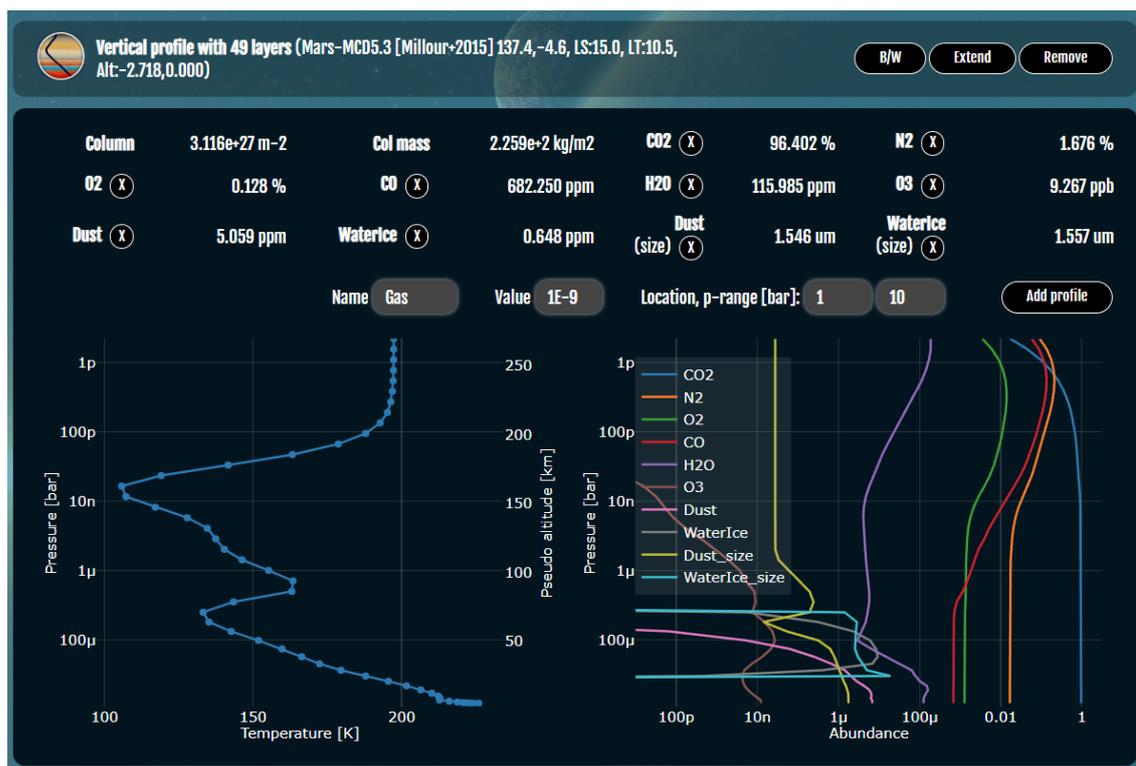


Figura 14: Perfil vertical de la atmósfera para el sol 380, proporcionado por la interfaz "Change Composition" del PSG.

tados posteriores. Para usar dichos subtipos se deben realizar dos últimos pasos. El primero es cargar en el PSG los archivos de datos de MOPSMAP mediante la opción "Add Spectroscopic File" que se encuentra presente en la ventana de "Atmosphere". Tras dar un nombre al aerosol se selecciona el tipo de archivo espectroscópico que en este caso es un Tipo 5, Aerosol Scattering. El segundo paso, tal y como se dijo anteriormente, es construir el perfil vertical del nuevo aerosol. Puesto que diseñar un perfil vertical desde cero puede ser un arduo trabajo, sencillamente se utiliza el perfil vertical del polvo ya construido por el PSG previamente con MCD. Se debe entonces indicar al PSG que el perfil vertical del MCD es en realidad el perfil vertical del polvo de MOPSMAP, por lo que debe modificarse el archivo de configuración. La Figura 15 muestra un ejemplo de las líneas a modificar en el archivo de configuración. La línea de "ATMOSPHERE-LAYERS-MOLECULES" da cuenta de las posiciones de las columnas de cada una de las moléculas que participan en la atmósfera, mientras que las líneas denominadas como "ATMOSPHERE-LAYERS" indican dichas columnas, construyendo así el perfil vertical (nótese que la primera columna indica la altitud). Es paso tomado es el de sustituir la molécula "Dust" por la molécula nueva creada durante la fase de "Add Spectroscopic File", manteniendo la columna exactamente igual. De esta manera, cambiando el archivo de configuración para cada nueva molécula con un nuevo tamaño, se realizan pruebas de retrieval con el fin de obtener el resultado más favorable en consonancia con los datos recogidos por ChemCam.

```

<OBJECT>Planet
<OBJECT-NAME>Mars
<OBJECT-DATE>2013/08/31 11:55
<OBJECT-DIAMETER>6779
<OBJECT-GRAVITY>3.711
<OBJECT-GRAVITY-UNIT>g
<OBJECT-SEASON>15.00
<OBJECT-SOLAR-LONGITUDE>159.4
<OBJECT-SOLAR-LATITUDE>6.43
<OBJECT-OBS-LONGITUDE>137.42
<OBJECT-OBS-LATITUDE>-4.60
<OBJECT-OBS-VELOCITY>0.000
<OBJECT-STAR-RADIUS>1.0
<OBJECT-STAR-DISTANCE>1.59363
<OBJECT-STAR-VELOCITY>1.87622
<OBJECT-STAR-TEMPERATURE>5777
<OBJECT-STAR-TYPE>G
<OBJECT-PERIOD>1.02721
<OBJECT-PERIAPSIS>0.00
<OBJECT-ECCENTRICITY>0.00000
<OBJECT-INCLINATION>101.03
<OBJECT-POSITION-ANGLE>351.86
<GEOMETRY-SOLAR-ANGLE>24.559
<GEOMETRY-OBS-ANGLE>17.950
<GEOMETRY-PLANET-FRACTION>0.000000e+00
<GEOMETRY-STAR-DISTANCE>-1.000000e+00
<GEOMETRY-STAR-FRACTION>0.000000e+00
<GEOMETRY-ROTATION>0.00,0.00
<GEOMETRY>Lookupup
<GEOMETRY-REF>User
<GEOMETRY-OBS-ALTITUDE>0.00
<GEOMETRY-ALTITUDE-UNIT>km
<GEOMETRY-USER-PARAM>17.95
<GEOMETRY-DISK-ANGLES>1
<GEOMETRY-OFFSET-NS>0.0
<GEOMETRY-OFFSET-EW>0.0
<GEOMETRY-OFFSET-UNIT>arcsec
<GEOMETRY-STELLAR-TYPE>G
<GEOMETRY-STELLAR-TEMPERATURE>5778
<GEOMETRY-STELLAR-MAGNITUDE>0
<GEOMETRY-BRDFSCALER>1.0
<GEOMETRY-AZIMUTH>63.260
<ATMOSPHERE-DESCRIPTION>Mars-MCD05.3 [Millour+2015] 137.4,-4.6, LS:15.0, LT:10.5, Alt:-2.718,0.000
<ATMOSPHERE-STRUCTURE>Equilibrium
<ATMOSPHERE-WEIGHT>43.65
<ATMOSPHERE-PRESSURE>8.3280e+00
<ATMOSPHERE-PUNIT>mbar
<ATMOSPHERE-NGAS>6
<ATMOSPHERE-GAS>CO2,N2,O2,CO,H2O,O3
<ATMOSPHERE-TYPE>HIT[2],HIT[22],HIT[7],HIT[5],HIT[1],HIT[3]
<ATMOSPHERE-ABUN>1,1,1,1,1,1
<ATMOSPHERE-UNIT>=scl,scl,scl,scl,scl,scl
<ATMOSPHERE-LAYERS-MOLECULES>Altitude,CO2,N2,O2,CO,H2O,O3,Dust,WaterIce,Dust_size,WaterIce_size
<ATMOSPHERE-NAEROS>2
<ATMOSPHERE-AEROS>Dust30,WaterIce
<ATMOSPHERE-ATYPE>Dust30,T5_USER,CRISM_MolFff
<ATMOSPHERE-AABUN>4.1322e-01,1
<ATMOSPHERE-AUNIT>=scl,scl
<ATMOSPHERE-ASIZE>1,1
<ATMOSPHERE-ASUNIT>=scl,scl
<ATMOSPHERE-LAYERS>45
<ATMOSPHERE-LAYER-1>6.7048e-03,2.2596e+02,0.0000e+00,9.6396e-01,1.6786e-02,1.2827e-03,6.8297e-04,1.2524e-04,1.2443e-08,6.8495e-06,1.0000e-30,1.7717e-06,1.0000e-30
<ATMOSPHERE-LAYER-2>6.6920e-03,2.2408e+02,2.1965e-02,9.6396e-01,1.6786e-02,1.2827e-03,6.8297e-04,1.2524e-04,1.2485e-08,6.8334e-06,1.0000e-30,1.7708e-06,1.0000e-30
<ATMOSPHERE-LAYER-3>6.6578e-03,2.2296e+02,8.0595e-02,9.6396e-01,1.6786e-02,1.2827e-03,6.8297e-04,1.2524e-04,1.2503e-08,6.8122e-06,1.0000e-30,1.7696e-06,1.0000e-30
<ATMOSPHERE-LAYER-4>6.5834e-03,2.2200e+02,2.0840e-01,9.6396e-01,1.6786e-02,1.2827e-03,6.8297e-04,1.2523e-04,1.2482e-08,6.7867e-06,1.0000e-30,1.7681e-06,1.0000e-30
<ATMOSPHERE-LAYER-5>6.4459e-03,2.2070e+02,4.4726e-01,9.6396e-01,1.6786e-02,1.2827e-03,6.8297e-04,1.2523e-04,1.2437e-08,6.7657e-06,1.0000e-30,1.7669e-06,1.0000e-30
<ATMOSPHERE-LAYER-6>6.2204e-03,2.1878e+02,8.4734e-01,9.6396e-01,1.6786e-02,1.2827e-03,6.8297e-04,1.2522e-04,1.2374e-08,6.7594e-06,1.0000e-30,1.7663e-06,1.0000e-30
<ATMOSPHERE-LAYER-7>5.8839e-03,2.1606e+02,1.4659e+00,9.6396e-01,1.6786e-02,1.2827e-03,6.8297e-04,1.2521e-04,1.2254e-08,6.7619e-06,1.0000e-30,1.7660e-06,1.0000e-30
<ATMOSPHERE-LAYER-8>5.4231e-03,2.1280e+02,2.3606e+00,9.6396e-01,1.6786e-02,1.2827e-03,6.8297e-04,1.2522e-04,1.2035e-08,6.7616e-06,1.0000e-30,1.7646e-06,1.0000e-30
<ATMOSPHERE-LAYER-9>4.8449e-03,2.1294e+02,3.5898e+00,9.6396e-01,1.6792e-02,1.2832e-03,6.8317e-04,1.2638e-04,1.8232e-08,6.7292e-06,1.0000e-30,1.7531e-06,1.0000e-30
<ATMOSPHERE-LAYER-10>4.1767e-03,2.1236e+02,5.2059e+00,9.6396e-01,1.6771e-02,1.2816e-03,6.8229e-04,1.3338e-04,8.7096e-09,6.4989e-06,1.0000e-30,1.7489e-06,1.0000e-30
<ATMOSPHERE-LAYER-11>3.4651e-03,2.1019e+02,7.2291e+00,9.6408e-01,1.6722e-02,1.2777e-03,6.8013e-04,1.4627e-04,7.1941e-09,6.4349e-06,1.0000e-30,1.7398e-06,1.0000e-30
<ATMOSPHERE-LAYER-12>2.7635e-03,2.0646e+02,9.6482e+00,9.6414e-01,1.6688e-02,1.2750e-03,6.7841e-04,1.6121e-04,5.8821e-09,5.7181e-06,1.0000e-30,1.6787e-06,1.0000e-30
<ATMOSPHERE-LAYER-13>2.1184e-03,2.1068e+02,1.2436e+01,9.6415e-01,1.6687e-02,1.2745e-03,6.7765e-04,1.5080e-04,4.8664e-09,4.2661e-06,1.0000e-30,1.5379e-06,1.0000e-30
<ATMOSPHERE-LAYER-14>1.5060e-03,1.9556e+02,1.5560e+01,9.6413e-01,1.6722e-02,1.2767e-03,6.7810e-04,1.0295e-04,4.4207e-09,2.8007e-06,1.9400e-31,1.3420e-06,3.4978e-31
<ATMOSPHERE-LAYER-15>1.0945e-03,1.8792e+02,1.8970e+01,9.6410e-01,1.6745e-02,1.2781e-03,6.7841e-04,7.8791e-05,4.3142e-09,1.9931e-06,4.5079e-10,1.2065e-06,1.9077e-05
<ATMOSPHERE-LAYER-16>7.5057e-04,1.7960e+02,2.2645e+01,9.6406e-01,1.6773e-02,1.2800e-03,6.7908e-04,6.3764e-05,4.7782e-09,1.4314e-06,4.0231e-07,1.0838e-06,5.0510e-06
<ATMOSPHERE-LAYER-17>4.8932e-04,1.7241e+02,2.6544e+01,9.6402e-01,1.6805e-02,1.2821e-03,6.7994e-04,3.1651e-05,7.3388e-09,6.6570e-07,8.8250e-06,9.3221e-07,3.9415e-06
<ATMOSPHERE-LAYER-18>3.0556e-04,1.6639e+02,3.0683e+01,9.6397e-01,1.6840e-02,1.2845e-03,6.8092e-04,1.4596e-05,1.3317e-08,2.4970e-07,9.2532e-06,7.9156e-07,3.0094e-06
<ATMOSPHERE-LAYER-19>1.8230e-04,1.5979e+02,3.5063e+01,9.6390e-01,1.6873e-02,1.2869e-03,6.8214e-04,6.5082e-06,2.1828e-08,6.3079e-08,8.4856e-06,6.2667e-07,2.5641e-06
<ATMOSPHERE-LAYER-20>1.0267e-04,1.5164e+02,3.9647e+01,9.6394e-01,1.6964e-02,1.2899e-03,6.8431e-04,2.9449e-06,2.7409e-08,5.2913e-09,6.9523e-06,3.2022e-07,2.6856e-06
<ATMOSPHERE-LAYER-21>5.6854e-05,1.4266e+02,4.4260e+01,9.6376e-01,1.6936e-02,1.2945e-03,6.8805e-04,3.6489e-06,2.3594e-08,6.5053e-11,2.3954e-06,5.3797e-08,2.7019e-06
<ATMOSPHERE-LAYER-22>3.0554e-05,1.3521e+02,4.8790e+01,9.6366e-01,1.6976e-02,1.3027e-03,6.9757e-04,4.7155e-06,1.5125e-08,1.6190e-10,3.2177e-07,1.4200e-08,2.8472e-06
<ATMOSPHERE-LAYER-23>1.5898e-05,1.3324e+02,5.3402e+01,9.6347e-01,1.7053e-02,1.3216e-03,7.1748e-04,5.2639e-07,5.816e-09,2.1100e-15,5.8693e-09,1.9587e-07,1.4032e-06
<ATMOSPHERE-LAYER-24>8.0357e-06,1.4347e+02,5.8373e+01,9.6300e-01,1.7204e-02,1.3590e-03,7.2007e-04,5.7446e-06,9.0237e-09,1.2639e-13,1.0000e-30,2.4402e-07,1.0000e-30
<ATMOSPHERE-LAYER-25>3.9932e-06,1.6306e+02,6.4025e+01,9.6205e-01,1.7363e-02,1.3929e-03,7.1631e-03,5.7186e-06,8.5087e-09,1.3069e-14,1.0000e-30,1.9445e-07,1.0000e-30
<ATMOSPHERE-LAYER-26>1.9860e-06,1.6346e+02,7.0806e+01,9.6126e-01,1.7419e-02,1.4017e-03,5.1589e-03,5.3084e-06,5.1785e-09,6.7773e-16,1.0000e-30,1.0792e-07,1.0000e-30
<ATMOSPHERE-LAYER-27>9.8622e-07,1.5524e+02,7.6020e+01,9.6049e-01,1.7488e-02,1.4022e-03,1.8594e-03,4.9903e-06,3.7016e-09,4.3144e-17,1.0000e-30,6.2295e-08,1.0000e-30
<ATMOSPHERE-LAYER-28>4.8974e-07,1.4632e+02,8.1669e+01,9.5942e-01,1.7629e-02,1.4094e-03,2.2378e-03,4.7665e-06,1.9384e-09,7.5092e-19,1.0000e-30,3.3373e-08,1.0000e-30
<ATMOSPHERE-LAYER-29>2.4320e-07,1.3746e+02,9.2302e+01,9.5328e-01,1.8062e-02,1.4985e-03,3.9728e-03,4.3886e-06,4.1119e-10,6.3658e-21,1.0000e-30,2.7567e-08,1.0000e-30
<ATMOSPHERE-LAYER-30>1.2077e-07,1.3746e+02,9.5328e-01,1.8062e-02,1.4985e-03,3.9728e-03,4.3886e-06,4.1119e-10,6.3658e-21,1.0000e-30,2.7567e-08,1.0000e-30
<ATMOSPHERE-LAYER-31>5.9972e-08,1.3462e+02,9.7467e+01,9.4813e-01,2.0482e-02,1.5856e-03,5.1934e-03,4.2257e-06,1.7096e-10,6.6092e-21,1.0000e-30,2.7557e-08,1.0000e-30
<ATMOSPHERE-LAYER-32>2.9781e-08,1.2788e+02,1.0248e+02,9.3916e-01,2.3045e-02,1.7801e-03,7.3599e-03,4.1106e-06,8.5915e-11,5.4244e-21,1.0000e-30,2.7557e-08,1.0000e-30
<ATMOSPHERE-LAYER-33>1.4789e-08,1.1717e+02,1.0719e+02,9.2492e-01,2.7589e-02,1.5717e-03,1.0427e-02,4.2352e-06,5.1664e-11,4.4404e-21,1.0000e-30,2.7557e-08,1.0000e-30
<ATMOSPHERE-LAYER-34>7.3439e-09,1.0727e+02,1.1155e+02,9.0256e-01,3.5244e-02,1.8481e-03,1.5019e-02,4.7320e-06,3.2395e-11,2.2552e-21,1.0000e-30,2.7557e-08,1.0000e-30
<ATMOSPHERE-LAYER-35>3.6469e-09,1.0580e+02,1.1573e+02,8.7111e-01,4.6246e-02,5.9834e-03,2.1936e-02,5.7907e-06,1.5776e-11,4.5192e-22,1.0000e-30,2.7557e-08,1.0000e-30
<ATMOSPHERE-LAYER-36>1.8110e-09,1.1910e+02,1.2020e+02,8.3765e-01,5.8139e-02,5.4004e-03,3.0773e-02,7.2702e-06,4.7646e-12,1.5936e-24,1.0000e-30,2.7557e-08,1.0000e-30
<ATMOSPHERE-LAYER-37>8.9931e-10,1.4165e+02,1.2547e+02,8.0504e-01,7.0261e-02,6.8567e-03,4.0761e-02,9.2560e-06,1.1479e-12,2.0495e-27,1.0000e-30,2.7557e-08,1.0000e-30
<ATMOSPHERE-LAYER-38>4.4659e-10,1.6327e+02,1.3175e+02,7.7074e-01,8.3639e-02,2.2309e-03,5.1480e-02,1.2067e-05,2.9905e-13,1.0000e-30,2.7557e-08,1.0000e-30
<ATMOSPHERE-LAYER-39>2.177e-10,1.7874e+02,1.3897e+02,7.3080e-01,9.9753e-02,5.5712e-03,6.3322e-02,1.6261e-05,9.4499e-14,1.0000e-30,1.0000e-30,2.7557e-08,1.0000e-30
<ATMOSPHERE-LAYER-40>1.1013e-10,1.8791e+02,1.4695e+02,6.8014e-01,1.1896e-01,1.0095e-02,7.6544e-02,1.2478e-05,3.6696e-14,1.0000e-30,1.0000e-30,2.7557e-08,1.0000e-30
<ATMOSPHERE-LAYER-41>5.4687e-11,1.9281e+02,1.5556e+02,6.1901e-01,1.4086e-01,1.2145e-02,9.1074e-02,3.1526e-05,1.7241e-14,1.0000e-30,1.0000e-30,2.7557e-08,1.0000e-30
<ATMOSPHERE-LAYER-42>2.7157e-11,1.9525e+02,1.6479e+02,5.4537e-01,1.6421e-01,1.3208e-01,1.0627e-01,4.4341e-05,9.3787e-15,1.0000e-30,1.0000e-30,2.7557e-08,1.0000e-30
<ATMOSPHERE-LAYER-43>1.3486e-11,1.9640e+02,1.7474e+02,4.5928e-01,1.8660e-01,1.3899e-02,1.2064e-01,6.1890e-05,5.6016e-15,1.0000e-30,1.0000e-30,2.7557e-08,1.0000e-30
<ATMOSPHERE-LAYER-44>6.968e-12,1.9693e+02,1.8560e+02,3.6344e-01,2.0402e-01,1.3979e-02,1.3165e-01,8.4800e-05,3.4715e-15,1.0000e-30,1.0000e-30,2.7557e-08,1.0000e-30
<ATMOSPHERE-LAYER-45>3.3255e-12,1.9717e+02,1.9767e+02,2.6424e-01,2.1117e-01,1.3205e-02,1.3592e-01,1.1266e-04,2.0626e-15,1.0000e-30,1.0000e-30,2.7557e-08,1.0000e-30
<ATMOSPHERE-LAYER-46>1.6514e-12,1.9728e+02,2.1135e+02,1.7163e-01,2.0289e-01,1.1468e-02,1.3023e-01,1.4305e-04,1.1459e-15,1.0000e-30,1.0000e-30,2.7557e-08,1.0000e-30
<ATMOSPHERE-LAYER-47>8.2007e-13,1.9733e+02,2.2708e+02,9.6315e-02,1.7705e-01,8.9371e-01,1.1333e-01,1.7094e-04,5.4631e-16,1.0000e-30,1.0000e-30,2.7557e-08,1.0000e-30
<ATMOSPHERE-LAYER-48>4.0723e-13,1.9735e+02,2.4535e+02,4.5109e-02,1.3713e-01,6.0877e-03,8.7566e-02,1.8883e-04,2.1566e-16,1.0000e-30,1.0000e-30,2.7557e-08,1.0000e-30
<ATMOSPHERE-LAYER-49>2.0223e-13,1.9738e+02,2.6706e+02,1.7215e-02,9.1534e-02,3.5209e-03,5.8342e-02,1.8735e-04,6.8960e-17,1.0000e-30,1.0000e-30,2.7557e-08,1.0000e-30
<ATMOSPHERE-TEMPERATURE>210.0000
<ATMOSPHERE-TAU>0.07,0.07,0.07,0.07,0.07,0.07,0.07
<ATMOSPHERE-IMAX>G
<ATMOSPHERE-IMAX>G0
<ATMOSPHERE-CONTINUUM>Rayleigh,Refraction,CIA_all,UV_all
<SURFACE-ALBEDO>0.2000
<SURFACE-EMISSIVITY>0.8000
<SURFACE-TEMPERATURE>264.5000
<SURFACE-NSURF>1
<SURFACE-SURF>Mars
<SURFACE-TYPE>Albedo_GSFC
<SURFACE-ABUN>100
<SURFACE-UNIT>pct
<SURFACE-THICK>1
<SURFACE-MODEL>Lambert

```

Figura 15: Ejemplo de archivo de configuración en formato TXT del sol 380 para PSG.

El último paso de la construcción de los modelos atmosféricos es el de ajustar el número de pares de rayos y el número de Polinomios de Legendre usados para el cálculo de la función de fase (ver Apartados 3.1 y 3.2), indicados por los parámetros  $NMAX$  y  $LMAX$  respectivamente. Evidentemente, a mayor número de pares de rayos y de polinomios mayor tiempo de cálculo será necesario. Sin embargo, se debe encontrar un equilibrio pues no necesariamente aumentar  $NMAX/LMAX$  otorga mejores resultados. Durante el desarrollo de este trabajo, los mejores valores de aproximación han resultado ser  $NMAX = 6$  y  $LMAX = 60$ . A menos que se indique lo contrario, estos son los valores usados en todos y cada uno de los retrievals realizados posteriormente. Es importante señalar que, dado que no ha sido mencionada, la última de las ventanas ("Surface") no ha sido alterada en ninguno de los casos, manteniendo siempre el del modelo base del MCD dado en PSG.

## 4 Resultados

Mediante el uso de los modelos atmosféricos presentados, se procede a caracterizar la atmósfera de Marte mediante el programa PSG. Para ello, los modelos establecidos se disponen con dos observaciones diferentes, una en ángulo alto y otra en bajo, con el fin de realizar el ratio entre ambas observaciones y poder así observar las líneas de absorción de interés. Este apartado se apoya en el trabajo de McConnochie et al.[12] (2017) siguiendo la misma línea de análisis atmosférico. Se realizan procesos de retrieval mediante el PSG con el fin de obtener, basándose en los datos proporcionados por ChemCam, las abundancias correspondientes del polvo atmosférico y así poder caracterizarlo observando su evolución a lo largo de los cinco soles seleccionados.

En la Tabla 3 se muestran los cinco soles escogidos y los ángulos de elevación alto y bajo de ChemCam durante las observaciones. Se debe recordar que estos ángulos deben ser introducidos correctamente en la interfaz "Change Object" del PSG previamente a realizar los retrievals. En definitiva, se realizan dos retrievals por sol, uno con la elevación alta y otro con la elevación baja<sup>9</sup>

Sol	Ls	Elevación alta	Elevación baja
380	15	72.0445 <sup>o</sup>	20.0068 <sup>o</sup>
473	58.5	72.0023 <sup>o</sup>	20.0405 <sup>o</sup>
617	124.5	72.0102 <sup>o</sup>	20.2044 <sup>o</sup>
793	223.6	65.0086 <sup>o</sup>	20.0194 <sup>o</sup>
2140	229.9	65.0422 <sup>o</sup>	20.0148 <sup>o</sup>

Tabla 3: Elevaciones del instrumento ChemCam para cada sol.

Para caracterizar bien la atmósfera, se trabaja continuamente en el rango de longitud de onda desde  $480nm$  hasta los  $900nm$ , por lo que se especifica ese rango en la interfaz de instrumento del PSG.

### 4.1 Caracterización del polvo atmosférico

El objetivo entonces es caracterizar, mediante los modelos de los cinco soles marcianos obtenidos con PSG, el polvo atmosférico de Marte el cual actúa como aerosol de scattering. Para ello, se usa la ya mencionada herramienta "Retrievals" presente en el PSG y cuyo funcionamiento ya ha sido descrito en el Apartado 3.2. Para cada uno de los soles y sus correspondientes dos elevaciones se realizan retrievals alterando en cada uno el tamaño de las partículas de polvo mediante los archivos de configuración (ver Apartado 3.4). Este es un proceso lento, pues requiere de actualizar manualmente cada archivo de configuración para después realizar los retrievals, que debido al número de pares de rayos y polinomios de Legendre especificados para el scattering, cada uno de los cálculos conlleva un tiempo no desdeñable. Las pruebas realizadas con los tamaños de partícula iniciales parten desde tamaños de  $0,50\mu m$  hasta  $2,50\mu m$ , en espacios de  $0,10\mu m$ . A partir de las  $2,50\mu m$  los intervalos otorgados por MOPSMAP pasan a ser de  $0,50\mu m$  hasta las  $3,50\mu m$ . No se considera una mayor precisión en el tamaño de las

<sup>9</sup>Se debe tener cuidado pues el ángulo de elevación en PSG se indica partiendo del cénit.

partículas para tamaños superiores a  $2,50\mu m$  puesto que estos tamaños de partícula no son comunes en la atmósfera de Marte y basta con una primera aproximación al tamaño en este caso para la radiancia.

Con el fin de caracterizar correctamente el aerosol se realiza un retrieval indicando en la interfaz del instrumento una resolución de  $5nm$  en longitud de onda, es decir, baja resolución. El resultado de interés es poder determinar la abundancia del aerosol, por lo que la baja resolución es suficiente para lograr este objetivo. A continuación se presentan los resultados obtenidos de cada uno de los retrievals en la mejor aproximación a los datos de radiancia espectral obtenidos por ChemCam.

Elevación alta					
Sol	Ls	Ángulo de elevación ( $^{\circ}$ )	$r_{eff}$ ( $\mu m$ )	$\tau$	
380	15	72.0445	3	0,11	
473	58.5	72.0023	2,5	0,06	
617	124.5	72.0102	2,4	0,01	
793	223.6	65.0086	3	1	
2140	229.9	65.0422	3,5	1,7	

Tabla 4: Retrieval de la profundidad óptica ( $\tau$ ) y el radio efectivo ( $r_{eff}$ ) del polvo de Marte para cada sol en elevación alta.

Elevación baja					
Sol	Ls	Ángulo de elevación ( $^{\circ}$ )	$r_{eff}$ ( $\mu m$ )	$\tau$	
380	15	20.0068	1,5	0,3	
473	58.5	20.0405	2,5	0,08	
617	124.5	20.2044	1,5	0,08	
793	223.6	20.0194	1,5	1,37	
2140	229.9	20.0148	2	2,24	

Tabla 5: Retrieval de la profundidad óptica ( $\tau$ ) y el radio efectivo ( $r_{eff}$ ) del polvo de Marte para cada sol en elevación baja.

Las Tablas 4 y 5 presentan los resultados del retrieval de las profundidades ópticas,  $\tau$ , del aerosol obtenidas mediante la ecuación (9) (ver Apartado 3.3) y el tamaño de las partículas de polvo, donde el ajuste de cada uno puede verse en las figuras superiores (Figuras 16 y 17). Estas últimas han sido obtenidas mediante Python[23] en la plataforma de computación Jupyter Notebook[8], un entorno de programación de Python basado en web. Todos los gráficos presentes en este texto han sido realizados de igual forma y los códigos están disponibles bajo solicitud si se requieren.

Las figuras presentadas muestran el ajuste del modelo del retrieval del PSG de cada caso a las observaciones de ChemCam para las mismas elevaciones. Los parámetros resultantes del retrieval son recogidos en la Tabla 6 donde se comparan en cada caso con la profundidad óptica detectada por ChemCam[10]. En el caso de no disponer datos de

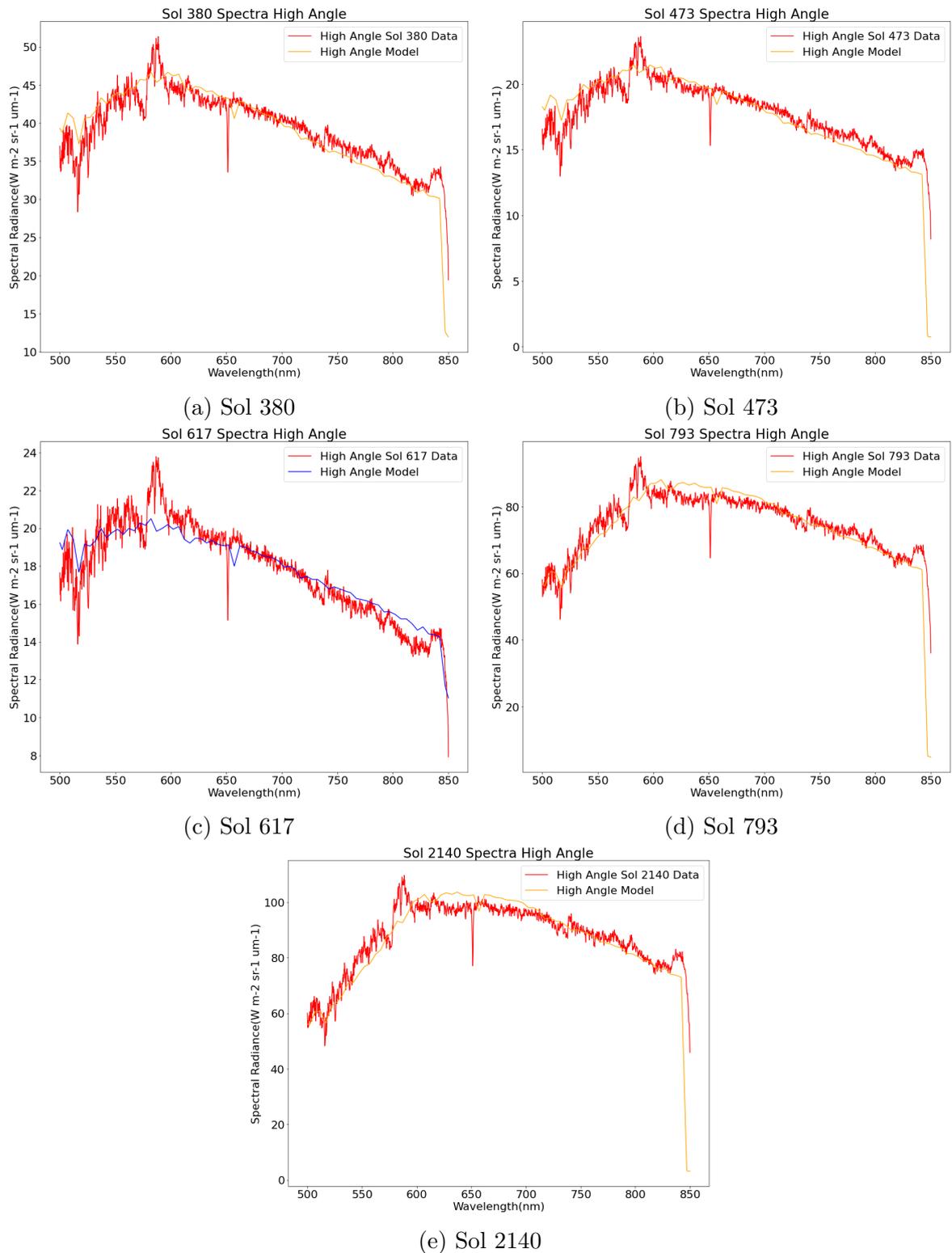


Figura 16: Ajustes de los modelos del PSG a los datos de ChemCam en observaciones de Ángulo Alto para: (16a) sol 380; (16b) sol 473; (16c) sol 617; (16d) sol 793; (16e) sol 2140

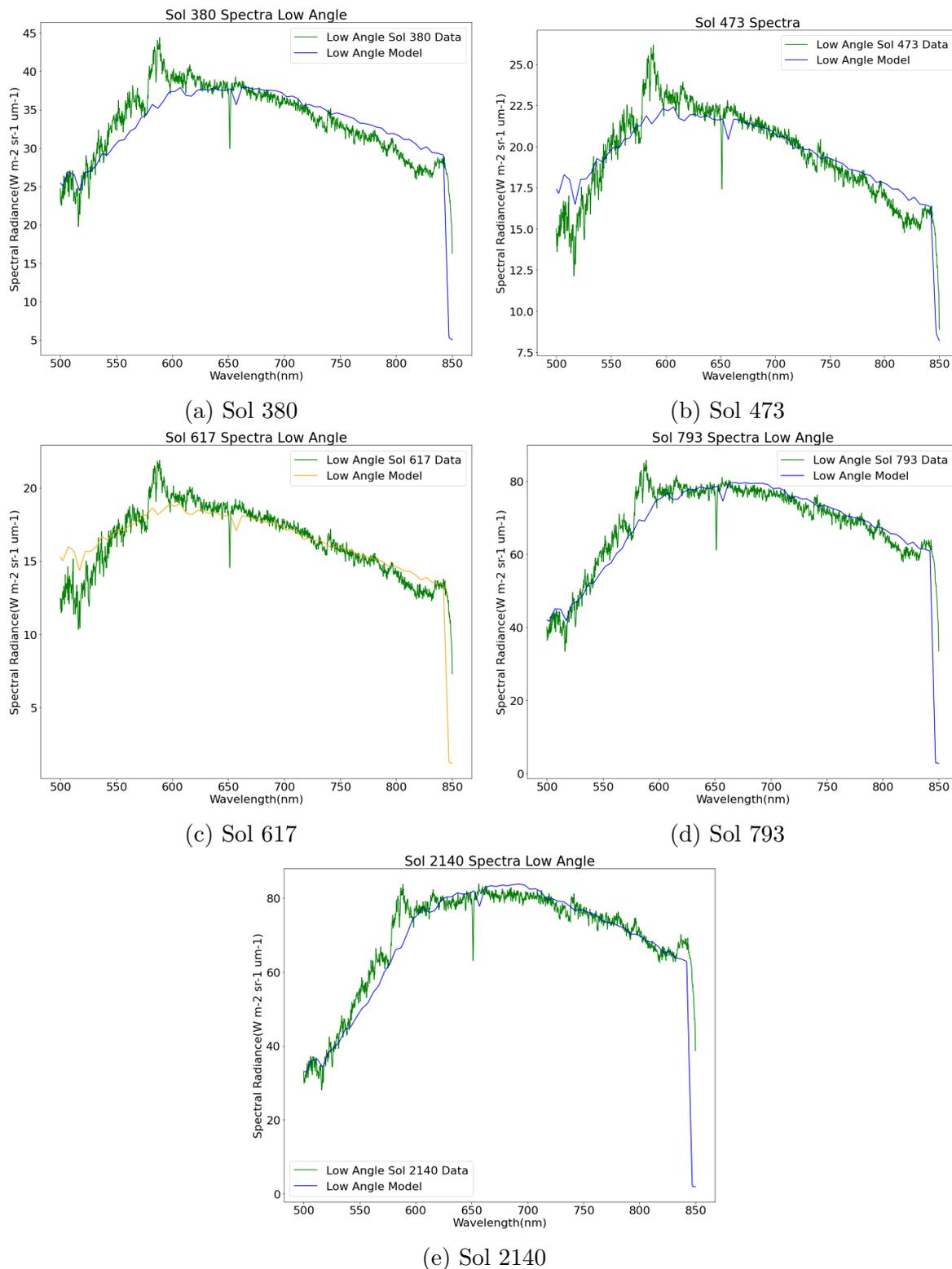


Figura 17: Ajustes de los modelos del PSG a los datos de ChemCam en observaciones de Ángulo Bajo para: (17a) sol 380; (17b) sol 473; (17c) sol 617; (17d) sol 793; (17e) sol 2140

la profundidad óptica para algún sol en particular, los datos serán aproximados al sol más cercano con el fin de poder comparar con los resultados del modelo. Recuérdese también que la desviación cuadrática  $\chi^2$  hace referencia a la reducida (dividiendo por el número de grados de libertad).

Sol	Ls	$r_{eff_{high}}$ ( $\mu m$ )	$\tau_{high}$	$r_{eff_{low}}$ ( $\mu m$ )	$\tau_{low}$	$\tau_{ChemCam}$	$\chi_{high}^2$	$\chi_{low}^2$
380	15	3	0,11	1,5	0,3	$\approx 0,5$	2,01	3,20
473	58.5	2,5	0,06	2,5	0,08	$\lesssim 0,5$	3,86	1,78
617	124.5	2,4	0,01	1,5	0,08	0,38	1,20	3,90
793	223.6	3	1	1,5	1,37	1,29	3,34	3,66
2140	229.9	3,5	1,7	2	2,24	2,37	3,97	4,41

Tabla 6: Datos del retrieval y profundidades ópticas del polvo de Marte dadas por ChemCam ( $\tau_{ChemCam}$ ). Los subíndices *high* y *low* hacen referencia a las elevaciones alta y baja del instrumento respectivamente.

A continuación se presentan de forma gráfica las profundidades ópticas modelizadas de la Tabla 6 junto a las profundidades ópticas detectadas frente a los soles y la longitud solar. El objetivo de estas figuras (18) es analizarlas en el próximo apartado y tener así una representación visual de la evolución del polvo atmosférico.

En los casos particulares de sol 473 y sol 617, tal y como puede apreciarse los valores de las profundidades ópticas detectadas por ChemCam  $\tau_{ChemCam}$  son muy bajas lo que indica, evidentemente, una época de baja opacidad por aerosol en la atmósfera. Esto, además de ser indicativo de que existe mucho menos polvo atmosférico en ese momento, supone un problema a la hora de realizar el retrieval. Debido a la baja cantidad del aerosol, PSG no es capaz de realizar una convergencia en el retrieval (Figura 11) y obtener un resultado en "scaler" lo suficientemente pequeño como para representar las radiancias. Debido a ello, es necesario ajustar también otros gases en la atmósfera. En ambos casos, parece que la mejor solución pasa por ajustar también el aerosol de hielo de agua ("WaterIce"). Evidentemente, al igual que ocurre con el polvo atmosférico, el tamaño y la profundidad óptica del hielo afecta a la radiancia que se detecta. Mientras que la media del tamaño de estas partículas suele estar entre las  $2 - 3,5\mu m$ [17], PSG vuelve a ajustar el tamaño según el modelo al mínimo de  $2\mu m$ , por lo que solo se modifica la abundancia. Los resultados de la profundidad óptica del hielo para cada sol quedan recogidos en la Tabla 7.

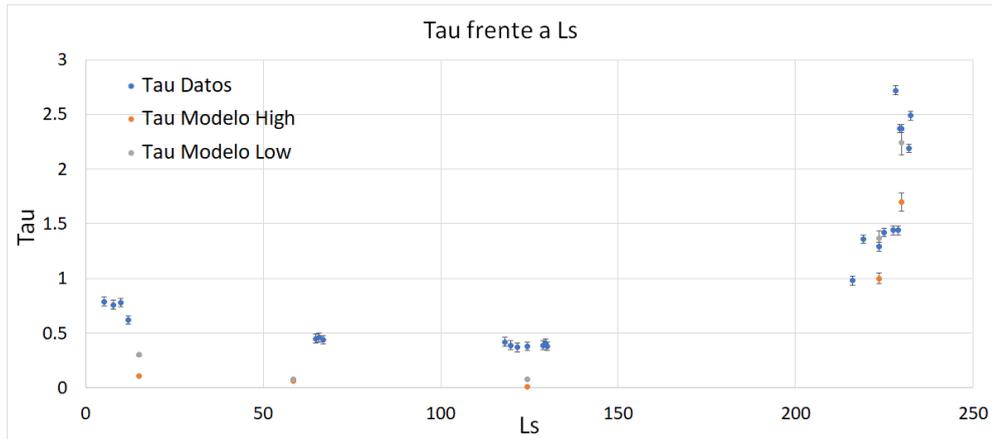
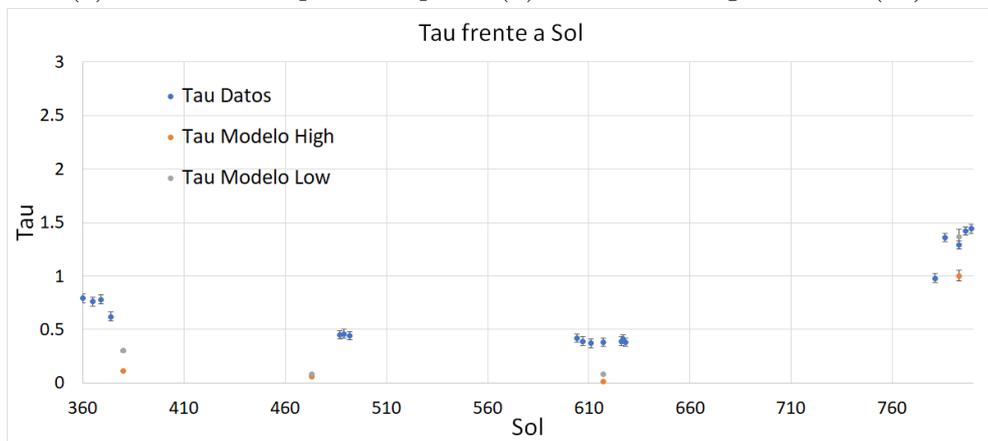
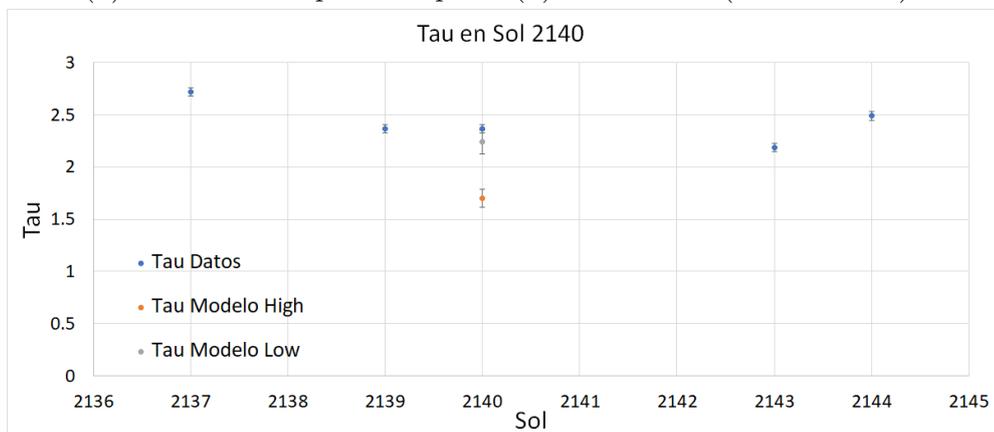
(a) Profundidad óptica del polvo ( $\tau$ ) frente a la longitud solar (Ls).(b) Profundidad óptica del polvo ( $\tau$ ) frente al sol (día en Marte).(c) Profundidad óptica del polvo ( $\tau$ ) en los soles cercanos al sol 2140.

Figura 18: Gráficos de las profundidades ópticas ( $\tau$ ) de los soles seleccionados en elevaciones alta (color naranja) y baja (color Gris) y los datos de ChemCam (color Azul).

Sol	Ls	$\tau_{Hielo}$
380	15	0.1
473	58.5	0.0095
617	124.5	0.0095
793	223.6	0.075
2140	229.9	0.05

Tabla 7: Retrieval de la profundidad óptica del hielo para cada sol.

Por supuesto, los resultados de los soles mencionados destacan por ser los más bajos. Esto es debido a que la abundancia de los mismos en los retrievals también ha sido reducida para ajustar los espectros. Mientras que en el resto de soles, tal y como ya se ha mencionado anteriormente, el scaler de la abundancia<sup>10</sup> se ha situado en 1, en los soles 473 y 617 las abundancias se han ajustado en scaler a  $S_{417} = 0,5$  y  $S_{617} = 0,74$ <sup>11</sup>.

## 4.2 **Discusión de los resultados**

A continuación se evaluarán los resultados obtenidos en el apartado anterior y se analizará la caracterización realizada de la atmósfera. Después, se mostrarán cálculos del ratio entre las observaciones de elevación alta y baja en analogía al trabajo de McConnochie et al. (2017)[12] para caracterizar las bandas de absorción de los gases más importantes.

### 4.2.1 **Ajustes de los modelos de radiancia**

Se analizarán los resultados de los modelos obtenidos en las Figuras 16 y 17, centrando la atención primero en los casos de alta elevación y después los casos de baja elevación<sup>12</sup>. Se debe recordar que los ajustes de estos modelos han sido realizados mediante los datos del polvo atmosférico extraídos de la base de datos de MOPSMAP[5], por lo que si se desea reproducir dichas gráficas se deberán introducir los datos de los aerosoles de forma manual tal y como se explicó en el Apartado 3.4. Recuérdese también que los modelos han sido realizados a baja resolución ( $5nm$ ) puesto que el objetivo de interés es caracterizar el polvo (abundancia y radio efectivo) y sólo es necesario un ajuste simple. De hecho, si la resolución es aumentada en PSG lo único que se consigue es una mejor indicación de las líneas a costa de un mayor tiempo de computación pero el ajuste general es el mismo, luego la caracterización del aerosol también lo es.

Una simple observación de las Figuras 16 y 17 revela una característica importante en los modelos. Como puede verse, los datos de ChemCam muestran una clara línea alrededor de la longitud de onda  $650nm$ . En todos los modelos realizados, esta misma línea (por supuesto, a baja resolución) también queda presente, pero desplazada ligeramente hacia una mayor longitud de onda. Esto se debe a que, al realizar los retrievals en PSG los datos son devueltos, como ya se ha indicado anteriormente (ver Apartado 3.2), en formato de columnas. Puesto que el modelo se encuentra a una resolución de

<sup>10</sup>Scaler define el porcentaje del perfil vertical (1 = 100%).

<sup>11</sup>Ambas son resultado de la media entre las elevaciones alta y baja.

<sup>12</sup>Consúltese la Tabla 3 para la información sobre los ángulos de elevación de cada sol.

5nm, es decir, un valor cada 5 nanómetros en longitud de onda, los datos disponibles son mucho menores que los de ChemCam. Por ende, a la hora de realizar una representación de los mismos y para un posterior uso, los modelos son interpolados modificándolos ligeramente. Esto no tiene efecto alguno sobre la caracterización del polvo y está hecho exclusivamente con el objetivo de estudios posteriores.

### **Alta elevación**

Se comienza pues con las Figuras 16, donde queda patente en cada una los datos de ChemCam (descritos en las mismas como "Data") y el modelo (descritos en las mismas como "Model"). Es inmediato ver que en los soles 380 y 473 el ajuste del modelo con respecto a los datos es mejor en el rango de longitud de onda 600 – 800nm, mientras que a longitudes de onda más baja el ajuste se pierde ligeramente. Por otro lado, el ajuste de los soles 793 y 2140 es muy parecido en ambos casos siendo más preciso a muy bajas y muy altas longitudes de onda (500 – 570nm y 700 – 820nm) encontrando las mayores discrepancias entre esos rangos. Finalmente, el sol 617 presenta el peor ajuste de modelo de todos los presentados, apenas siendo mayoritariamente correcto en los rangos intermedios. Las iteraciones del radio efectivo del polvo de los modelos a los datos en cada caso siempre han compartido estas características, siendo las gráficas presentadas el tamaño del aerosol mejor ajustado.

### **Baja elevación**

Las Figuras 17 muestran, al igual que en el caso anterior, los ajustes de los modelos de baja resolución a los datos de ChemCam. Esta vez, los modelos de los soles 380 y 473 son los que tienen un peor ajuste en todo el rango de longitudes de onda. A pesar de tratar de mejorar los resultados en las iteraciones con distintos tamaños de partícula, no se ha conseguido una mejor representación de los modelos. Por otro lado, el sol 617 presenta un mejor acoplamiento a las observaciones que su contraparte de alta elevación en rangos de longitud de onda intermedios. Finalmente, los soles 793 y 2140 vuelven a comportarse de forma parecida, con un mejor ajuste a longitudes de onda bajas y altas e incluso mejorando las longitudes de onda intermedias en comparación a la alta elevación.

#### **4.2.2 Radio efectivo del polvo**

En la Tabla 8 se recogen los valores del radio efectivo de las partículas de polvo observadas y aquellas obtenidas por las iteraciones de los modelos de MOSPMAP con PSG.

Sol	Ls	$r_{eff_{ob}}$ ( $\mu m$ )	$r_{eff_{high}}$ ( $\mu m$ )	$r_{eff_{low}}$ ( $\mu m$ )
380	15	$\gtrsim 1,8$	3	1,5
473	58.5	1,15	2,5	2,5
617	124.5	0,35	2,4	1,5
793	223.6	1,30	3	1,5
2140	229.9	2,35	3,5	2

Tabla 8: Radios efectivos de las partículas de polvo observadas ( $r_{eff_{ob}}$ ) y los modelos iterados en PSG para la alta elevación ( $r_{eff_{high}}$ ) y baja elevación ( $r_{eff_{low}}$ ). No existen datos de observación del sol 380, por lo que se asumen datos en base a datos de soles posteriores de igual longitud solar, en este caso, del sol 1049[12].

Los radios efectivos del polvo atmosférico para los modelos de baja elevación son los más cercanos a las observaciones realizadas por McConnochie et al. de los mismos. Era de esperar cierta diferencia en los tamaños debido a las elevaciones, ya que la diferencia entre los ángulos es de unos  $50^\circ$  y la distribución del polvo en la atmósfera, a pesar de las aproximaciones, puede no ser homogénea en las alturas que se manejan en dichos ángulos. La mayor discrepancia de los retrievals a los datos se dan, una vez más, en los soles 473 y 617, los cuales se debe recordar que sus espectros de radiancia eran muy bajos para PSG (la herramienta no era capaz de realizar un retrieval únicamente reduciendo la abundancia del polvo, teniendo que ser modificada la del hielo según la Tabla 7). Debido a ello, se esperaba que los resultados del tamaño de las partículas no fuesen acordes con los tamaños reales de las mismas.

De forma general, los errores cometidos en la selección iterativa de los radios efectivos son menores que el 15 % de los valores de observación, exceptuando los soles 473 y 617, para los modelos de elevación baja. Por otro lado, en el caso de la elevación alta los errores cometidos superan con creces el margen asumible (como ejemplo, el radio modelizado del sol 793 es más del doble del observado). Por ende, los ajustes de baja elevación para la caracterización del tamaño de las partículas de polvo entra dentro de las expectativas de error asumibles y se considera que sus resultados son acordes a las observaciones.

### 4.2.3 Evaluación del espesor óptico del polvo

Tras determinar que los modelos de baja elevación concuerdan con los datos disponibles, se analiza la validez de las conclusiones sobre las profundidades ópticas del polvo atmosférico de Marte. La Tabla 6 muestra los valores obtenidos mediante los retrievals y las observaciones, así como las desviaciones cuadráticas reducidas (ver Apartado 3.3) las cuales dan cuenta de la validez de los retrievals conseguidos. Tal y como puede verse, las profundidades ópticas de las elevaciones bajas en general entran dentro de un margen de error asumible de un 20 % de máxima, a excepción, de nuevo, de los soles 473 y 617. Por otro lado, los ajustes de los retrievals de alta elevación, una vez más, no entran dentro de un margen asumible de error. Debido a ello, se puede considerar que los resultados de las bajas elevaciones son los que caracterizan mejor la atmósfera de Marte.

Conviene detenerse en los casos especiales de los soles 473 y 617. Es evidente que la elección de ambos soles para la caracterización de la atmósfera de Marte, en vista de los

resultados obtenidos, no ha sido acertada puesto que han supuesto un problema mayor no solo en los retrievals sino en la caracterización misma de los tamaños de partícula del polvo y de la profundidad óptica. Estas fechas se corresponden a épocas de muy poco polvo atmosférico, lo cual dificulta el análisis del mismo cuando se trabaja en un entorno con poca abundancia del aerosol. La modificación del aerosol hielo para tratar de solventar el problema del retrieval en PSG ha afectado de forma negativa al mismo, por lo que no deberían considerarse los resultados obtenidos como correctos en estos casos y no serán considerados como tal. Pese a ello, los modelos conseguidos aportan una idea aproximada de la profundidad óptica del polvo, pues indican un valor muy bajo en comparación con el resto de soles. Esto era de esperar, pues se trataban de épocas de baja abundancia de polvo.

La Figura 18 muestra de forma comparativa las profundidades ópticas obtenidas mediante el retrieval con aquellas registradas por ChemCam. Todas ellas concuerdan en que los resultados de baja elevación son los mejores a considerar en la caracterización del aerosol, sin embargo, también muestran de forma cualitativa la evolución del polvo atmosférico en la atmósfera con cada época. A longitudes solares (Ls) bajas la abundancia del aerosol es bastante más reducida que a mayores longitudes. Esto muestra una evolución en la misma, donde el polvo pasa entre épocas de poca abundancia y épocas de alta abundancia de forma periódica. Destacar, por supuesto, las enormes tormentas de polvo (tales como las del sol 2140) que cubren el planeta aumentando así la profundidad óptica de forma drástica. Estas suelen ocurrir en épocas de verano marciano, donde el planeta se encuentra más cerca del Sol debido a su órbita excéntrica, y la radiación que llega es mayor. La evolución queda patente no solo en los datos de ChemCam, sino también en los retrievals obtenidos.

En vista de los resultados obtenidos, la caracterización del polvo atmosférico se logra a partir de las observaciones de baja elevación. Sin embargo, las desviaciones cuadráticas reducidas revelan un problema con los retrievals conseguidos. En todos y cada uno de los casos analizados, la desviación cuadrática reducida es superior a 1, lo cual puede ser indicativo de desviaciones en el modelo (ver Apartado 3.3)[2]. Mejores ajustes pueden conseguirse modificando con mayor rigor los perfiles verticales de los modelos atmosféricos y considerando distintos gases en las interpretaciones de los retrievals. Sin embargo, esto último requiere mayor tiempo de computación de las síntesis de los espectros. En definitiva, para poder realizar mejores medidas en los modelos, es necesario realizar retrievals con más parámetros a ajustar y considerando modelos atmosféricos acordes a los soles a analizar. A pesar de todo, considerando parámetros generales se ha conseguido caracterizar el polvo atmosférico en múltiples soles con diferentes abundancias.

### **4.3 Ratio de los espectros de radiancia de los modelos**

Por último, en analogía al desarrollo del trabajo de McConnochie et al. 2018 [12], y apoyándose en las observaciones pasivas del cielo de ambas elevaciones, se realiza el ratio entre los espectros de radiancia de la alta y la baja elevación con el fin de eliminar fuentes secundarias de ruido. Por supuesto, este proceso se usa en el artículo original sobre los resultados de los espectros observados. Sin embargo, puesto que se tiene acceso a dichos datos, se realiza el mismo proceso con los espectros modelizados

y se comparan con los datos para su análisis.

En el estudio original, tras obtener el ratio preliminar entre ambas observaciones se realiza un proceso de eliminación del continuo ("continuum removal") con el fin de centrar el ajuste. Este proceso requiere de dos iteraciones, por lo que en el caso de este estudio también será llevado a cabo con dos iteraciones. El continuo del modelo es eliminado mediante un ajuste polinómico en dos iteraciones, usando polinomios de orden 5 y 8 respectivamente. Es de interés observar las líneas de absorción de elementos importantes o abundantes en la atmósfera, por lo que se restringen estos ratios a la ventana de 700–850 nm, donde estas líneas y bandas de interés aparecen. El resultado de este ratio entre modelos se encuentra en la Figura 20, donde se realiza primero el ratio entre el modelo de alta elevación y baja elevación del sol 380 (visto en el apartado anterior) y después dos iteraciones de eliminación del continuo mediante dos ajustes polinómicos.

En comparación, se pueden observar las líneas de absorción vistas en estas tres ventanas en la atmósfera de Marte en las Figuras 19[12].

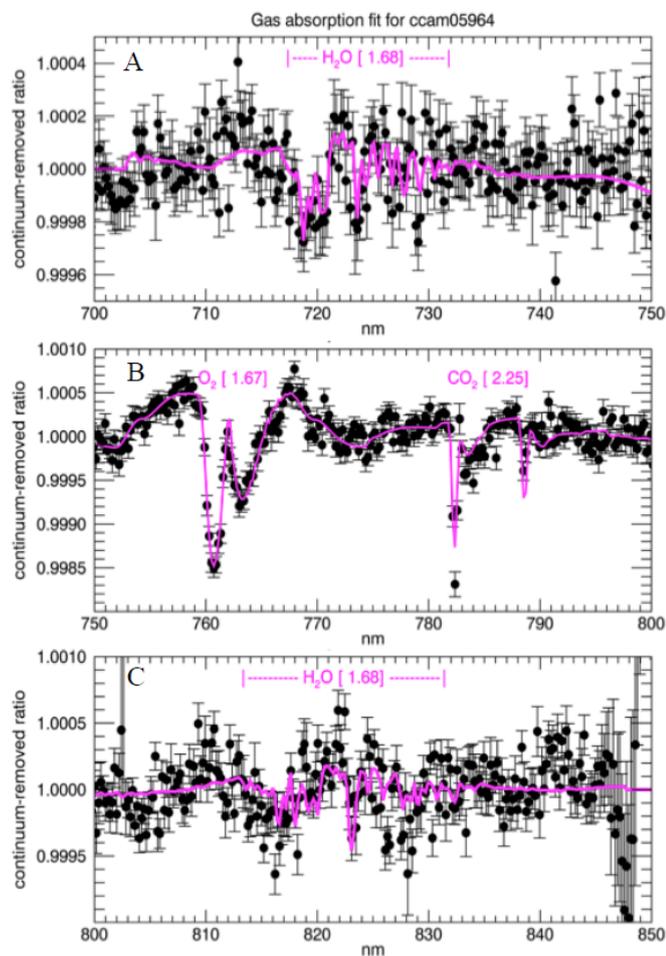
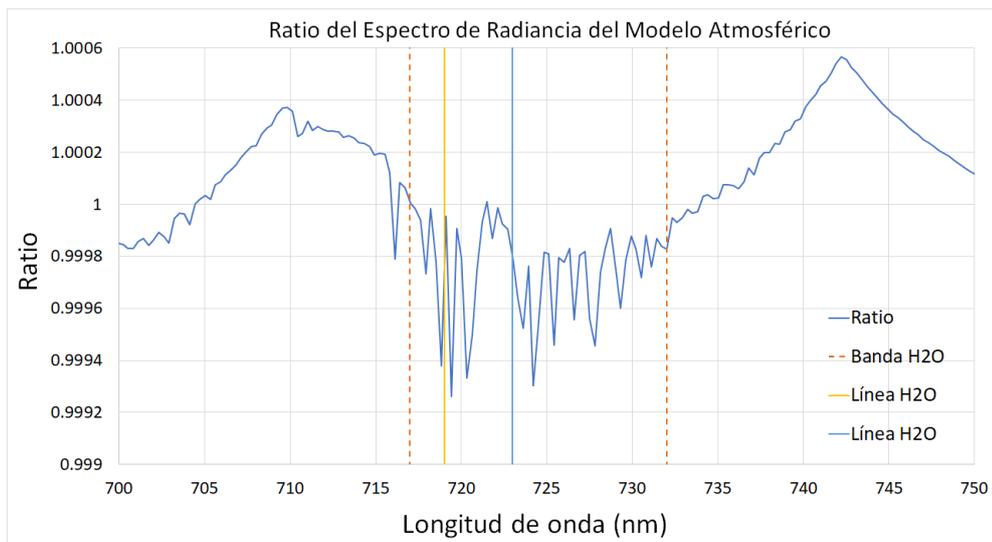
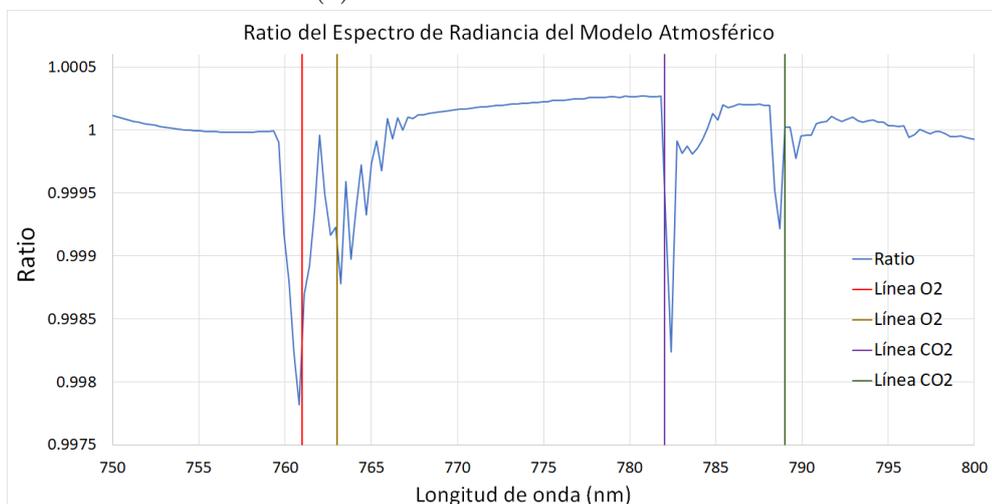


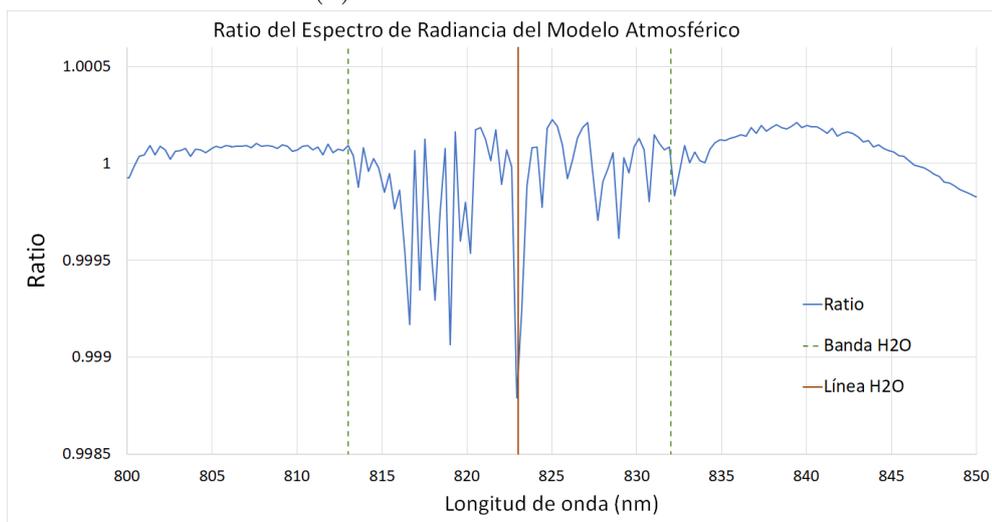
Figura 19: Ratio sin continuo entre los datos de observación de la alta y la baja elevación realizada por el instrumento ChemCam. La línea magenta indica el mejor ajuste posible. Figura extraída de [12].



(a) Ventana de 700 – 750 nm



(b) Ventana de 750 – 800 nm



(c) Ventana de 800 – 850 nm

Figura 20: Representación gráfica del ratio sin continuo (eliminación mediante iteración de 2 polinomios) entre la elevación alta y baja de los modelos del PSG del sol 380. Ventanas de: (a) 700 – 750 nm; (b) 750 – 800 nm; (c) 800 – 850 nm.

Según el modelo obtenido, es posible distinguir las bandas del agua y las líneas más importantes del oxígeno molecular y el dióxido de carbono, caracterizando así su presencia en la atmósfera de Marte.

## 5 Conclusiones

### 5.1 Análisis de PSG

A lo largo del texto se ha podido comprobar la utilidad del programa Planetary Spectrum Generator y su facilidad de uso para el usuario. La herramienta posee muchas ventajas a la hora de modelizar atmósferas planetarias y de generar los esperados espectros de radiancia en cualquier unidad deseada. Gracias a su interfaz online no son necesarios conocimientos sobre computación aunque, tal y como se ha visto, la herramienta es tan potente que permite modificarse hasta los detalles más mínimos si así se requiere mediante los archivos de configuración. Por añadido, PSG otorga los datos que han sido necesarios durante la síntesis de los modelos atmosféricos (tales como el "Airmass" y transmitancias) con una gran base de datos de modelos disponibles entre los que elegir. El programa es de extrema utilidad cuando el objetivo es modelizar atmósferas y espectros de radiancia no solo de planetas del sistema solar, también extrasolares e incluso cuerpos menores como asteroides.

En cuanto a la resolución de los objetivos se refiere, PSG ha proporcionado una forma sencilla y de alta calidad para generar los retrievals necesarios para la caracterización de la atmósfera de Marte. Partiendo de soles con diferentes longitudes solares con el fin de abarcar varias épocas del año en Marte, PSG ha modelizado las atmósferas de cada uno en base a los datos de MCD[13] de forma correcta y las cuales han permitido obtener la información necesaria de los aerosoles de scattering. Por otro lado, la posibilidad de introducir información sobre aerosoles propios ha sido vital para la iteración de los tamaños de partícula ya que la base de datos integrada en PSG[28] no permitía cambiar dichos tamaños. Se debe tener cuidado pues si se inicializa el programa online de nuevo los datos del nuevo aerosol deberán ser reintroducidos puesto que PSG no los guarda.

Por supuesto, la potencia de la herramienta también conlleva ciertos aspectos negativos. Tal y como se ha mencionado varias veces a lo largo del texto, si se desea realizar algunas modificaciones más precisas es necesario actuar de forma directa sobre los archivos de configuración para después integrarlos en PSG. Aún así, la modificación de los mismos no es complicada y las características que aparecen estos se encuentran perfectamente ordenadas en forma de filas para su fácil revisión. Uno de los aspectos que ha afectado ligeramente de forma negativa a este estudio es que, a pesar de la enorme base de datos de los que se disponen, PSG no poseía aquellas que permitían la modificación del tamaño de partículas, por lo que fue necesario introducir manualmente una base de datos externa. Esto no es un punto negativo per se, pero deja patente que si sólo se pretende usar este programa puede haber características las cuales no podrán ser alteradas. Por otro lado, uno de los mayores inconvenientes a tratar durante la realización de los modelos atmosféricos ha sido la iteración de los valores de NMAX y LMAX (ver Apartado 3.2). Puesto que estos describen el número de pares de rayos y los polinomios de Legendre a incluir en la computación, cabría pensar que a mayor número mejores resultados. Sin embargo, tal y como ya se indicó, aumentar mucho sus valores (en particular el del número de pares de rayos NMAX) conlleva un aumento drástico del tiempo de computación, lo cual puede volverse inasumible rápidamente. El equilibrio necesario entre ambos se ha obtenido realizando iteraciones y comprobando cuales otorgaban mejores resultados, lo cual consume tiempo de computación

(asimismo, si es usada la versión pública del programa, PSG sólo permite generar un máximo de 100 espectros).

A pesar de sus inconvenientes, no se puede negar que PSG es una herramienta extremadamente útil y sencilla para generar espectros de radiancia y modelos atmosféricos. Además, la opción de obtener retrievals de cualquier característica la vuelve perfecta para caracterizar las atmósferas de cualquier cuerpo celeste, incluso aquellos que sean especificados por el usuario. PSG se encuentra en constante cambio y mejora e incluso durante la realización de este texto ha sido actualizado de nuevo, añadiendo nuevas opciones. Para aquellos que deseen realizar estudios incluso más completos, el manual[25] ofrece información de todo tipo y, al igual que el propio programa, se actualiza con regularidad.

## 5.2 Evaluación de los objetivos

A continuación se evaluarán los objetivos impuestos durante la introducción de este texto y cómo se ha llegado a su cumplimiento. En primer lugar, tal y como se vio en el Apartado 3, es esencial conocer y entender las bases de la teoría del transporte radiativo y como la luz se transmite por la atmósfera, esto es, por absorción, emisión y scattering. Al trabajar con la herramienta de PSG es importante saber cómo funciona la Ecuación de Transporte Radiativo (ETR) y su implementación en el sistema, así como la convergencia de este a los resultados. Tal y como se ha visto, puesto que se trabaja en escalas muy grandes, la atmósfera del planeta puede aproximarse a un conjunto estratificado de placas paralelas, aproximación que el propio PSG utiliza. Tal y como se ha indicado en el apartado anterior, PSG es una herramienta muy potente que permite realizar cálculos y síntesis muy precisas de cualquier atmósfera que se pueda modelizar y su base de datos tan extensa la convierte en programa online que incluso aquellos no tan familiarizados con las atmósferas planetarias pueden aprender a usar en poco tiempo.

El objetivo más importante a desarrollar ha sido el de obtener los retrievals de las observaciones atmosféricas realizadas por ChemCam, pues la caracterización de Marte se consigue a través de este sistema. Cabe destacar que en otros muchos estudios esta misma caracterización mediante retrievals ya ha sido realizada con un mayor índice de éxito, tal es el caso del estudio de McConnochie et al. de 2018 [12], que obtuvieron las caracterizaciones de las columnas de vapor de agua de la atmósfera en base a los retrievals de las mismas observaciones de ChemCam pero usando un conjunto más extenso y distinto de soles que los usados en este texto. El objetivo aquí era el de usar la herramienta online de PSG para obtener dichos retrievals y comprobar su viabilidad para futuros trabajos, hecho que se ha comprobado. Puesto que el polvo atmosférico de Marte representa uno de los componentes cruciales de la radiación de scattering en la atmósfera del planeta y tiene un efecto directo en el espectro de radiancia detectado, se quería observar su evolución. Se han desarrollado primero los modelos atmosféricos necesarios para cada sol, ajustando el tamaño del polvo atmosférico de forma manual. Este hecho ha dificultado la iteración de los resultados y obtener buenos retrievals, pues el tamaño efectivo de las partículas tiene una relación con la profundidad óptica[3] y, evidentemente, el espectro de radiancia. También cabe destacar que los gases de la atmósfera en los modelos atmosféricos podrían haber sido ajustados mejor con

sucesivos retrievals en PSG usando un valor a priori ajustado al perfil vertical de los mismos. Sin embargo, durante la realización del estudio se trató de obtener estos retrievals y ajustes mejorados de las abundancias de los elementos en la atmósfera pero jamás se conseguía una convergencia de la desviación cuadrática reducida. En otras palabras, PSG no lograba obtener una convergencia adecuada de las abundancias de los gases atmosféricos (recuérdese los componentes de la atmósfera de Marte). Por ello, en todos los modelos atmosféricos usados, las abundancias de dichos gases se mantienen iguales al modelo de Mars Climate Database del sol especificado, lo que puede explicar las ciertas discrepancias en los ajustes de los modelos vistos en las Figuras 16 y 17. Por supuesto, estas abundancias no deberían tener un efecto tan significativo más allá de ajustes en las líneas de absorción, puesto que el efecto mayoritario de los espectros viene regido por el scattering de los aerosoles de polvo y el vapor de agua. De nuevo, este vapor de agua tampoco ha podido ser ajustado mediante pruebas a priori del retrieval salvo en los casos de baja radiancia (sol 473 y 617) y se desconoce el motivo de esta falta de convergencia. De nuevo, es posible que se deba a la incapacidad de ajustar los tamaños de partícula, pero a falta de más pruebas no ha sido posible determinar la causa.

A pesar de las inconsistencias para los ajustes de los modelos de observaciones de alta elevación, los retrievals del polvo realizados para la baja elevación muestran una buena aproximación al comportamiento del polvo atmosférico con la longitud solar. Estos resultados encajan en gran medida con las observaciones que se tienen de ChemCam en la profundidad óptica que se detecta en atmósfera. Cabe señalar, sin embargo, que las inconsistencias ya señaladas de los sol 473 y 617 en el tamaño de partículas reflejan que se debió escoger otros soles con el fin de que PSG pudiese realizar las convergencias del retrieval sin problemas. Aún con todo, se ha logrado el objetivo de observar esta evolución del polvo atmosférico, aunque el uso de más soles para cubrir por completo la lista de longitud solar sería necesaria para un correcto análisis. PSG parece dar resultados muy positivos para espectros de radiancia donde el polvo es medianamente abundante.

### 5.3 Mejoras al estudio

A lo largo de este texto se ha podido comprobar que la mayor flaqueza del estudio es el poco número de soles escogidos para realizar los modelos atmosféricos y los retrievals de los espectros de radiancia. Evidentemente, la respuesta clara a este problema es el de considerar muchos más soles con longitudes solares y épocas y estaciones distintas en el planeta. En particular, se ha visto en los ciclos del polvo del Apartado 2.2.1 como las tormentas suelen ocurrir generalmente en el hemisferio sur del planeta en épocas de primavera o verano, cuando el calor generado por la radiación retroalimenta al propio polvo atmosférico provocando vientos más fuertes que a su vez introducen más polvo a la atmósfera. Teniendo esto en cuenta, podría haber sido más conveniente analizar muchos más soles en éstas épocas. Por otro lado, es necesario mejorar los registros del vapor de agua en la atmósfera, con la capacidad de cambiar también el tamaño de partícula. Asimismo, una mayor iteración de tamaños de partículas de polvo podrían haber ayudado a un mejor ajuste de los espectros del retrieval.

Los altos valores de las convergencias del  $\chi^2$  reducido reflejan que los datos que

se disponían de las abundancias de los gases atmosféricos o los parámetros de los aerosoles no estaban correctamente ajustados. Se requería una mayor precisión en la síntesis de los modelos atmosféricos con el fin de obtener mejores retrievals. Por supuesto, esto también implica mejores selecciones de parámetros como la presión superficial de Marte, temperatura, ajuste del albedo, construcción correcta del perfil vertical y otros factores que no sólo dificultan el estudio, sino que, además, aumentan el tiempo de cálculo. Todo lo mencionado es posible alterarlo a placer gracias a los archivos de configuración, pero requiere de un buen entendimiento del sistema.

## Referencias

- [1] Jeff A. Berger y col. “A global Mars dust composition refined by the Alpha-Particle X-ray Spectrometer in Gale Crater”. En: *Geophysical Research Letters* 43.1 (2016), págs. 67-75. DOI: <https://doi.org/10.1002/2015GL066675>. eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/2015GL066675>. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2015GL066675>.
- [2] Philip R Bevington y D Keith Robinson. *Data reduction and error analysis for the physical sciences; 3rd ed.* New York, NY: McGraw-Hill, 2003. URL: <https://cds.cern.ch/record/1305448>.
- [3] H Chen-Chen, S Pérez-Hoyos y A Sánchez-Lavega. “Dust particle size and optical depth on Mars retrieved by the MSL navigation cameras”. En: *Icarus* 319 (2019), págs. 43-57.
- [4] Ellen Creecy y col. “Mars’ emitted energy and seasonal energy imbalance”. En: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 119.21 (2022), e2121084119.
- [5] J. Gasteiger y M. Wiegner. “MOPSMAP v1.0: a versatile tool for the modeling of aerosol optical properties”. En: *Geoscientific Model Development* 11.7 (2018), págs. 2739-2762. DOI: 10.5194/gmd-11-2739-2018. URL: <https://gmd.copernicus.org/articles/11/2739/2018/>.
- [6] Scott D. Guzewich y col. “Mars Science Laboratory Observations of the 2018/Mars Year 34 Global Dust Storm”. En: *Geophysical Research Letters* 46.1 (2019), págs. 71-79. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018GL080839>. eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2018GL080839>. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2018GL080839>.
- [7] R.M. Haberle. “PLANETARY ATMOSPHERES — Mars”. En: *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*. Ed. por James R. Holton. Oxford: Academic Press, 2003, págs. 1745-1755. ISBN: 978-0-12-227090-1. DOI: <https://doi.org/10.1016/B0-12-227090-8/00312-2>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B0122270908003122>.
- [8] Thomas Kluyver y col. “Jupyter Notebooks – a publishing format for reproducible computational workflows”. En: *Positioning and Power in Academic Publishing: Players, Agents and Agendas*. Ed. por F. Loizides y B. Schmidt. IOS Press, 2016, págs. 87-90.
- [9] Jasper F Kok y col. “The physics of wind-blown sand and dust”. En: *Reports on Progress in Physics* 75.10 (sep. de 2012), pág. 106901. DOI: 10.1088/0034-4885/75/10/106901. URL: <https://doi.org/10.1088/0034-4885/75/10/106901>.
- [10] M. T. Lemmon y col. “Large Dust Aerosol Sizes Seen During the 2018 Martian Global Dust Event by the Curiosity Rover”. En: *Geophysical Research Letters* 46.16 (2019), págs. 9448-9456. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019GL084407>. eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2019GL084407>. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2019GL084407>.
- [11] Kuo-Nan Liou. *An introduction to atmospheric radiation*. Vol. 84. Elsevier, 2002.

- [12] Timothy H McConnochie y col. "Retrieval of water vapor column abundance and aerosol properties from ChemCam passive sky spectroscopy". En: *Icarus* 307 (2018), págs. 294-326.
- [13] E. Millour y col. "The Mars Climate Database (version 5.3)". En: *From Mars Express to ExoMars*. Feb. de 2018, 68, pág. 68.
- [14] NASA. *Mars Sample Return Campaign*. 2022. URL: <https://mars.nasa.gov/msr/>.
- [15] NASA/JPL-Caltech. *Mars Science Laboratory Landing*. URL: [http://www.jpl.nasa.gov/news/press\\_kits/MSSLanding.pdf](http://www.jpl.nasa.gov/news/press_kits/MSSLanding.pdf).
- [16] NASA/JPL-Caltech/MSSSS. *Mars 2018 Global Dust Storm*. 2018. URL: <https://svs.gsfc.nasa.gov/30983>.
- [17] K.S. Olsen y col. "Retrieval of the water ice column and physical properties of water-ice clouds in the martian atmosphere using the OMEGA imaging spectrometer". En: *Icarus* 353 (2021). From Mars Express to Exomars, pág. 113229. ISSN: 0019-1035. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.03.006>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001910351830438X>.
- [18] Howard Perko, John Nelson y Jacklyn Green. "REVIEW OF MARTIAN DUST COMPOSITION, TRANSPORT, DEPOSITION, ADHESION, AND REMOVAL". En: ene. de 2002.
- [19] Clive D Rodgers. *Inverse methods for atmospheric sounding: theory and practice*. Vol. 2. World scientific, 2000.
- [20] Agustin Sanchez-Lavega. *An introduction to planetary atmospheres*. CRC Press, 2010.
- [21] Michael D Smith y Scott D Guzewich. "The Mars global dust storm of 2018". En: *International Conference on Environmental Systems*. GSFC-E-DAA-TN77167. 2019.
- [22] Albert Tarantola. *Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameter Estimation*. Vol. 89. SIAM, 2005.
- [23] Guido Van Rossum y Fred L. Drake. *Python 3 Reference Manual*. Scotts Valley, CA: CreateSpace, 2009. ISBN: 1441412697.
- [24] G. L. Villanueva y col. "Planetary Spectrum Generator: An accurate online radiative transfer suite for atmospheres, comets, small bodies and exoplanets". En: 217 (sep. de 2018), págs. 86-104. DOI: [10.1016/j.jqsrt.2018.05.023](https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2018.05.023). arXiv: 1803.02008 [astro-ph.EP].
- [25] Geronimo Luis Villanueva y col. *Fundamentals of the Planetary Spectrum Generator*. 2022.
- [26] Paul Voosem. *NASA's Perseverance rover to drill first samples of martian rock*. *Science*. AAAS. 2021. URL: <https://www.science.org/content/article/nasa-s-perseverance-rover-drill-first-samples-martian-rock>.
- [27] Roger C Wiens y col. "The ChemCam instrument suite on the Mars Science Laboratory (MSL) rover: Body unit and combined system tests". En: *Space science reviews* 170.1 (2012), págs. 167-227.

- [28] MJ Wolff y col. “Wavelength dependence of dust aerosol single scattering albedo as observed by the Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer”. En: *Journal of Geophysical Research: Planets* 114.E2 (2009).