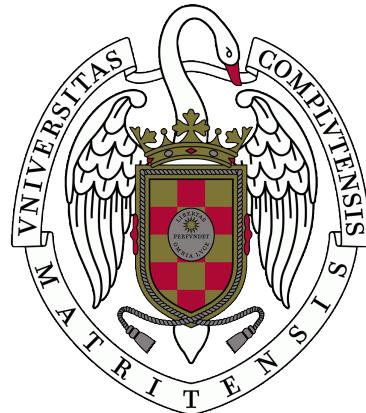


UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

Máster en Astrofísica



TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

Modelado numérico de la atmósfera del exoplaneta Trappist-1 e
Numerical modeling of the atmosphere of exoplanet Trappist-1 e

Sergio Turrado Prieto

Supervisado por:

Dr. Daniel Viúdez Moreiras (CAB, INTA-CSIC)

Dr. María Rosa Zapatero Osorio (CAB, CSIC-INTA)

Curso académico 2023-2024



UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID

Declaración responsable sobre autoría y uso ético de herramientas de Inteligencia Artificial (IA)

Yo,

con DNI/NIE/PASAPORTE:

declaro de manera responsable que el/la presente (seleccionar opción):

Trabajo Fin de Grado (TFG)

Trabajo Fin de Máster (TFM)

Tesis Doctoral

titulado/a

es el resultado de mi trabajo intelectual personal y creativo, y ha sido elaborado de acuerdo con los principios éticos y las normas de integridad vigentes en la comunidad académica y, más específicamente, en la Universidad Complutense de Madrid.

Soy, pues, la persona autora del material aquí incluido y, cuando no ha sido así y he tomado el material de otra fuente, lo he citado o bien he declarado su procedencia de forma clara —incluidas, en su caso, herramientas de inteligencia artificial—. Las ideas y aportaciones principales incluidas en este trabajo, y que acreditan la adquisición de competencias, son mías y no proceden de otras fuentes o han sido reescritas usando material de otras fuentes.

Asimismo, aseguro que los datos y recursos utilizados son legítimos, verificables y han sido obtenidos de fuentes confiables y autorizadas. Además, he tomado medidas para garantizar la confidencialidad y privacidad de los datos utilizados, evitando cualquier tipo de sesgo o discriminación injusta en el tratamiento de la información.

En Madrid, a

FIRMA

Abstract

Trappist-1 e is among the most promising exoplanets in terms of habitability. With the new generation of telescopes such as the JWST and the ELT, preciser than ever transmission spectroscopy observations of this exoplanet are imminent. Numerical simulations of its climate and atmosphere are crucial tools to inform and guide these observations. The goal of this Master's Thesis is to reproduce, discuss, and add to the results of the Trappist-1 e atmosphere numerical simulations carried out by the THAI collaboration (Fauchez et al. 2020), by independently importing and running Met Office's ROCKE-3D General Circulation Model (Way et al. 2017). For this purpose, preprocessing Matlab software has been written, and public postprocessing Python software developed by THAI has been modified and expanded upon. The results we obtain are extremely close to those of the THAI collaboration (Turbet et al. 2022, Sergeev et al. 2022a) in all simulated scenarios, with the only differences being minimal, and most likely due to the exclusion of marginally important input files that caused runtime errors. Moreover, we have obtained new physically meaningful diagnosis outputs of the Trappist-1 e atmosphere that are absent in the THAI results papers.

Resumen

Trappist-1 e es uno de los planetas más prometedores en cuanto a habitabilidad. Con la nueva generación de telescopios como el JWST y el ELT, se tendrán observaciones en espectroscopía de transmisión de este exoplaneta más precisas que nunca. Las simulaciones numéricas de su clima y atmósfera son herramientas cruciales a la hora de informar y guiar estas observaciones. El objetivo de este Trabajo de Fin de Máster es reproducir, discutir y expandir los resultados de las simulaciones de la atmósfera de Trappist-1 e llevadas a cabo por la colaboración THAI (Fauchez et al. 2020), mediante la importación y ejecución independiente del Modelo de Circulación General ROCKE-3D (Way et al. 2017) de la Met Office. Para ello, se ha escrito software de preprocesado en Matlab, y se ha modificado y ampliado software público de postprocesado de THAI en Python. Los resultados obtenidos son muy similares a los de la colaboración THAI (Turbet et al. 2022, Sergeev et al. 2022a) en todos los escenarios simulados. Las diferencias existentes son mínimas, y seguramente provienen de la exclusión de archivos de entrada no cruciales que causaban errores al correr las simulaciones. Además, se han obtenido nuevos diagnósticos físicamente significativos de la atmósfera de Trappist-1 e que no se encuentran en los artículos de resultados de THAI.

1. Introducción y Objetivos

Alrededor del 75 % de todas las estrellas observadas se catalogan como enanas de tipo M (Henry et al. 2004). Además, se estima que el 15 % de los objetos astronómicos en la vecindad solar son enanas ultrafrías (Cantrell et al. 2013), que, debido a su pequeño tamaño, incrementan la profundidad de tránsito de sus posibles exoplanetas, los cuales además suelen encontrarse en órbitas cercanas. La gran cantidad de este tipo de estrellas, su largo tiempo de vida y la facilidad para la detección de sus posibles exoplanetas hacen que estos últimos sean candidatos idóneos para estudios de habitabilidad, más aún si cabe teniendo en cuenta la nueva generación de telescopios como el James Webb Space Telescope (JWST) o el Extremely Large Telescope (ELT), que tienen resolución suficiente para observar las atmósferas de exoplanetas en transmisión y emisión en el infrarrojo, donde se encuentran las líneas características de diferentes moléculas relacionadas con la vida.

Trappist-1 es una estrella activa de tipo M, dentro de la clase de las enanas rojas ultrafrías ($T_{\text{eff}} = 2566 \pm 26$ K, Agol et al. 2021) a unos 12 pc de distancia del Sistema Solar, en la que se han confirmado siete planetas rocosos (Gillon et al. 2017), representados en la Figura 1. De entre ellos, Trappist-1 e, f y g se encuentran en la zona habitable de la estrella (Kopparapu et al. 2016), donde el flujo estelar permite atmósferas con condiciones de presión y temperatura adecuadas para la existencia de agua líquida en la superficie planetaria.

Las masas encontradas en el análisis de variación de tiempo de tránsito (TTV) de Grimm et al. (2018) sugieren que los planetas b, d, f y g deberían tener un contenido elevado en especies volátiles para poder explicar las densidades promedio obtenidas a partir de estas masas y los valores de los radios planetarios obtenidos previamente (esto puede conseguirse suponiendo un océano superficial profundo o una atmósfera densa). De ser así, una historia de formación común del sistema apuntaría a un enriquecimiento general en volátiles de los siete planetas, debido a que la proximidad de sus órbitas sugiere que se habrían podido formar en regiones próximas del disco protoplanetario. La Tabla 1 muestra los parámetros planetarios principales del sistema Trappist-1 encontrados por Agol et al. (2021), donde se aprecia la mencionada proximidad entre las órbitas. El primer intento de caracterización de las atmósferas de los planetas de Trappist-1 fue mediante el Telescopio Espacial Hubble (HST), con el cual se observaron las atmósferas de los seis planetas más internos (de Wit et al. 2016, de Wit et al. 2018). Dichas observaciones descartaron la presencia de atmósferas sin nubes ni neblinas dominadas por H_2 a niveles de confianza $\geq 10 \sigma$ para los planetas b y c, y a 8σ , 6σ y 4σ (respectivamente) para d, e, y f, como cabría esperar de planetas rocosos sin la masa suficiente para acretar gas del disco protoplanetario durante su formación. El análisis posterior de los mismos datos de HST realizado por Moran et al. (2018) descarta también atmósferas dominadas por H_2 con nubes o neblinas para los planetas b, c, d, e y f. En cuanto a la próxima generación de telescopios, se han observado por espectroscopía de transmisión las atmósferas de Trappist-1 b, c y g con JWST (propuesta 2589, Ciclo 1). Los primeros análisis de estos datos encuentran una gran contaminación por emisión de Trappist-1 (Lim et al. 2023), y un contenido en volátiles menor del esperado para algunos planetas (Zieba et al. 2023), lo cual pone en entredicho la posibilidad de los planetas del sistema para retener atmósferas ricas en volátiles si su historia de formación es común.

	b	c	d	e	f	g	h
R [R_\oplus]	$1.116^{+0.014}_{-0.012}$	$1.097^{+0.014}_{-0.012}$	$0.788^{+0.011}_{-0.010}$	$0.920^{+0.013}_{-0.012}$	$1.045^{+0.013}_{-0.012}$	$1.129^{+0.015}_{-0.013}$	$0.755^{+0.014}_{-0.014}$
M [M_\oplus]	1.374 ± 0.069	1.308 ± 0.056	0.388 ± 0.012	0.692 ± 0.022	1.039 ± 0.031	1.321 ± 0.038	0.326 ± 0.020
ρ [ρ_\oplus]	$0.987^{+0.048}_{-0.050}$	$0.991^{+0.040}_{-0.043}$	$0.792^{+0.028}_{-0.030}$	$0.889^{+0.030}_{-0.033}$	$0.911^{+0.025}_{-0.029}$	$0.917^{+0.025}_{-0.029}$	$0.755^{+0.059}_{-0.055}$
g [g_\oplus]	1.102 ± 0.052	1.086 ± 0.043	0.624 ± 0.019	0.817 ± 0.024	0.951 ± 0.024	1.035 ± 0.026	0.570 ± 0.038
S [S_\oplus]	$4.153^{+0.161}_{-0.159}$	$2.214^{+0.086}_{-0.085}$	$1.115^{+0.043}_{-0.043}$	$0.646^{+0.025}_{-0.025}$	$0.373^{+0.015}_{-0.014}$	$0.252^{+0.010}_{-0.010}$	$0.144^{+0.006}_{-0.006}$
a [au]	0.01154 ± 0.00010	0.01580 ± 0.00013	0.02227 ± 0.00019	0.02925 ± 0.00025	0.03849 ± 0.00033	0.04683 ± 0.00040	0.06189 ± 0.00053

Tabla 1: Parámetros de los planetas del sistema Trappist-1, según Agol et al. (2021). R es el radio del planeta, M es su masa, ρ es su densidad promedio, g es la aceleración de la gravedad en la superficie, a es el semieje mayor de la órbita, y S es la insolación en una órbita circular de radio a . Valores terrestres: $R_\oplus = 6371.0084 \pm 0.0001$ km, $M_\oplus = (5.97217 \pm 0.00028) \cdot 10^{24}$ kg, $\rho_\oplus = 5.5134 \pm 0.0003$ g cm $^{-3}$ (estos tres tomados de Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, NASA), $g_\oplus = 9.820 \pm 0.001$ m s $^{-2}$, $S_\oplus = 1361.0 \pm 0.1$ W m $^{-2}$, 1 au = $(149.598 \pm 0.001) \cdot 10^6$ km (estos tres últimos tomados de Earth Fact Sheet, NASA).

Hasta ahora, Trappist-1 e es el planeta más prometedor del sistema Trappist-1 en lo que a habitabilidad se refiere. Como se observa en la Figura 1, de los tres planetas del sistema en la zona de habitabilidad (e, f, g), Trappist-1 e es el más cercano al borde interno (Kopparapu et al. 2016), lo que aumenta la probabilidad de que haya sido azotado por vientos estelares en períodos de alta actividad de su estrella anfitriona; sin embargo, también es el que presenta una insolación más cercana a la terrestre (Tabla 1). Además de estar en la zona habitable, Trappist-1 e tiene un radio y masa similares

a los terrestres (Tabla 1), con un Earth Similarity Index (ESI, Schulze-Makuch et al. 2011) de 0.85 (UPR Arecibo). Aunque la elevada actividad estelar de Trappist-1 dificulta la retención de atmósfera, es posible que Trappist-1 e haya retenido agua superficial local o globalmente en función del contenido inicial de la misma, y esto para un amplio abanico de configuraciones atmosféricas (Bolmont et al. 2016, Bourrier et al. 2017). Con una propuesta de tiempo abierto de JWST para observar la atmósfera de Trappist-1 e ya aprobada, la simulación numérica de su atmósfera planetaria es esencial como soporte para la interpretación de los consiguientes datos observacionales. Respecto al sistema Trappist-1, se han realizado numerosos esfuerzos de modelado. En el proyecto THAI (*TRAPPIST-1 Habitable Atmosphere Intercomparison*, Fauchez et al. 2020) se describe un protocolo para comparar las simulaciones del clima de Trappist-1 e entre cuatro modelos de circulación general (GCMs) considerados estado del arte. Los resultados de esta intercomparación se muestran secuencialmente en Turbet et al. (2022), Sergeev et al. (2022a) y Fauchez et al. (2022) de la manera siguiente: los escenarios en que Trappist-1 e no tiene océano se muestran en Turbet et al. (2022), mientras que Sergeev et al. (2022a) describe los resultados de simulaciones con océano superficial, y Fauchez et al. (2022) muestra los espectros de transmisión teóricos que resultarían de las simulaciones anteriores. El objetivo de este Trabajo de Fin de Máster es reproducir los resultados de las simulaciones numéricas del clima de Trappist-1 e en Sergeev et al. (2022a) y Fauchez et al. (2022), siguiendo el protocolo descrito en Fauchez et al. (2020), y haciendo uso de la versión Planet 1.0 del modelo de circulación general ROCKE-3D (derivado del NASA GISS ModelE; Way et al. 2017), con una importación e instalación propias.

En la Sección 2 se detallan las especificaciones técnicas de ROCKE-3D, los escenarios atmosféricos simulados y la configuración de parámetros de simulación para cada uno de ellos, de acuerdo con Fauchez et al. (2020). En la Sección 3 se muestran los resultados obtenidos, comparando los de este trabajo con los de Sergeev et al. (2022a) y Fauchez et al. (2022). Asimismo, se presentan resultados adicionales no mostrados previamente para la atmósfera planetaria de Trappist-1 e. Por último, se presentan las conclusiones en la Sección 4.

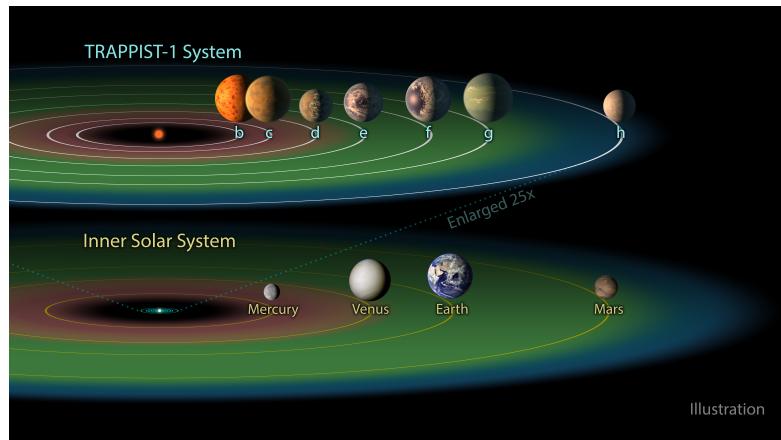


Figura 1: Representación artística del sistema Trappist-1 y su zona de habitabilidad (Kopparapu et al. 2016). Imagen de ESA/Hubble.

2. Métodos

En esta sección se presenta el modelo climático a utilizar, así como los escenarios contemplados en el protocolo THAI (Fauchez et al. 2020) y reproducidos en este trabajo con ROCKE-3D.

2.1. ROCKE-3D

Los modelos de circulación general (GCMs) son hasta ahora la mejor herramienta disponible para el estudio tridimensional de las atmósferas de exoplanetas. En este contexto, Resolving Orbital and Climate Keys of Earth and Extraterrestrial Environments with Dynamis (ROCKE-3D, Way et al. 2017) es un software público que nació como una adaptación del modelo terrestre NASA GISS ModelE para la simulación de climas exoplanetarios.¹ ROCKE-3D está constituido por un conjunto de columnas unidimensionales que representan celdas atmosféricas (es decir, regiones de la atmósfera limitadas en latitud y longitud) y que se comunican entre sí mediante un núcleo dinámico (*coupler*), de manera que en cada paso temporal las columnas realizan simulaciones 1D de transporte radiativo, convección, advección, precipitación e interacción de la atmósfera con la superficie a través de la capa límite (PBL, *Planet Boundary Layer*). Estos cálculos constituyen la física interna de cada celda (o física *subgrid*). Tras cada paso temporal, el núcleo dinámico toma los datos de todas las celdas y resuelve las ecuaciones hidrodinámicas tridimensionales para toda la atmósfera del planeta, teniendo en cuenta su rotación. Finalmente, calcula el transporte de calor y momento entre cada celda por circulación atmosférica. La estructura del modelo es *en estrella* (ver Figura 2). En este tipo de estructura, cada uno de los cinco componentes del modelo (atmósfera, océano, tierra, hielo terrestre y hielo oceánico) es independiente del resto y realiza sus propios cálculos, comunicándose con el resto solamente a través de los datos de salida que comparte con el núcleo dinámico. Dentro del módulo atmosférico, se hacen llamadas periódicas al módulo de transporte radiativo. La configuración empleada en las simulaciones, detallada en los siguientes apartados, proviene de la descrita en los artículos relativos al protocolo THAI (Fauchez et al. 2020, Turbet et al. 2022, Sergeev et al. 2022a).

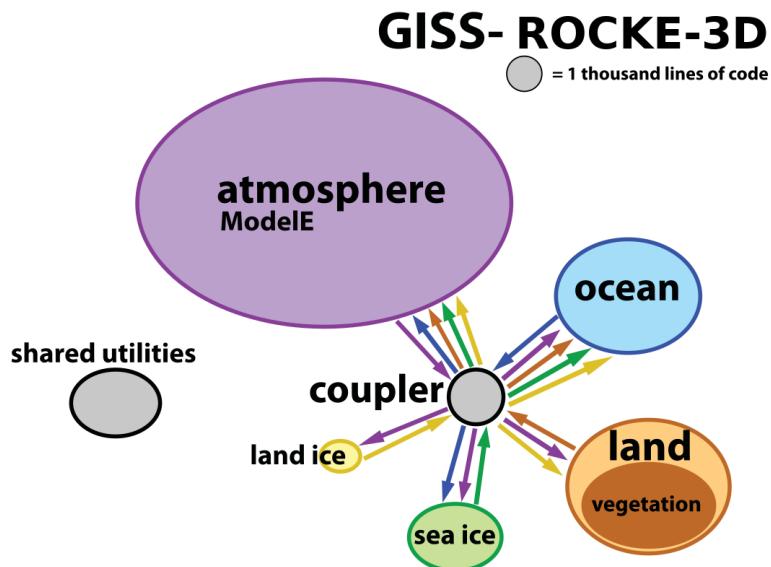


Figura 2: Estructura del código de ROCKE-3D. Las flechas representan el flujo energético y másico de unos componentes del modelo a otros, y su color indica el módulo de origen. El tamaño relativo de los módulos es proporcional al número de líneas de código que contienen. Modificación de la figura 3 de Alexander & Easterbrook (2015).

¹El código de ROCKE-3D está disponible públicamente para instalación a través de <https://simplex.giss.nasa.gov/snapshots/>.

2.1.1. Núcleo dinámico

El núcleo dinámico de ROCKE-3D utiliza un método numérico de diferencias finitas para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes. En cuanto a la subdivisión en celdas, se utiliza una resolución de longitud \times latitud de 72×46 celdas, de manera que cada celda abarca 5° de longitud y 4° de latitud. La resolución vertical de cada celda es de 40 capas atmosféricas, con presiones desde $P = 1000$ hPa en la superficie hasta $P \simeq 0.1$ hPa en la capa más alta, que en adelante se llamará TOA (*top of atmosphere*).

2.1.2. Transporte radiativo

El mencionado módulo de transporte radiativo es el *Suite Of Community RAdiative Transfer codes based on Edwards and Slingo* (SOCRATES) de la Met Office, que sigue el método descrito en Edwards & Slingo (1996). SOCRATES alimenta al GCM con la información necesaria para definir el problema de transporte radiativo a través de los llamados archivos espectrales (*Spectral files*), que incluyen información sobre las especies gaseosas presentes en la atmósfera: sus coeficientes de fotoabsorción y absorción inducida por colisión, su profundidad óptica en el continuo y en las líneas espectrales, los coeficientes de dispersión Rayleigh y dispersión en las nubes o el número de intervalos espectrales. SOCRATES toma los coeficientes de absorción de cada especie gaseosa de la base de datos HITRAN 2012 (Rothman et al. 2013).² Los archivos espectrales tienen un rango de trabajo en longitudes de onda de 0.2 μm a 10000 μm , y están adaptados a diferentes estrellas emisoras. Para enanas ultrafrías como es el caso con Trappist-1, la emisión en el IR es dominante. La Figura 3 muestra el espectro de emisión de Trappist-1 que utiliza ROCKE-3D. Este se ha obtenido por el método de BT-Settl (Allard 2013), y se encuentra disponible en la base de datos de SOCRATES (Way et al. 2017). Se trata de un modelo de emisión constante, que no tiene en cuenta los períodos de actividad ni las posibles llamaradas de Trappist-1. En la Figura 3 se ha incluido también espectro del Sol disponible en SOCRATES a modo de referencia, para comparar una enana M ultrafría como Trappist-1 con una estrella de tipo espectral G como el Sol. En el caso de Trappist-1, se aprecia la presencia de las líneas de absorción de óxido de vanadio (VO), óxido de titanio (TiO) y vapor de agua (H_2O) propias de estrellas ultrafrías.

2.1.3. Hidrología

La convección atmosférica de vapor de agua gobierna la formación de nubes de cúmulo, y, por tanto, la precipitación de H_2O . Para las configuraciones planetarias Hab 1 y Hab 2 (ver Subsección 2.2) con vapor de agua en su atmósfera, la convección a escalas mayores que la resolución espacial de las celdas del modelo se calcula siguiendo Schmidt et al. (2014). ROCKE-3D utiliza para la hidrología una estrategia diagnóstico-prognóstica (Schmidt et al. 2014, Way et al. 2017) en la que el modelo calcula de forma prognóstica (dinámica) la formación de cúmulos y una sola variable para el contenido de agua en las nubes, y su fase (sólida, líquida o gaseosa) es diagnosticada *a posteriori*, a partir de las condiciones de presión y temperatura, y corregida por la precipitación de capas superiores (la precipitación también es tratada de manera diagnóstica). Sin embargo, aunque el cálculo del contenido de vapor de agua en las nubes es dinámico, la fracción en volumen de nubes no lo es, sino que se diagnostica a partir de la humedad relativa en función de la altura, y las nubes no son arrastradas por los vientos de escala planetaria ni por la turbulencia atmosférica. A escalas por debajo de la resolución de las celdas, el modelo de columna 1D calcula la convección, de forma que la altura de la capa inferior de un cúmulo formado se calcula imponiendo la condición de estabilidad convectiva (los cúmulos están en equilibrio hidrostático con el medio en su capa más baja).

²Los archivos espectrales se pueden encontrar en el repositorio web de ROCKE-3D: https://portal.nccs.nasa.gov/GISS_modelE/ROCKE-3D/spectral_files/.

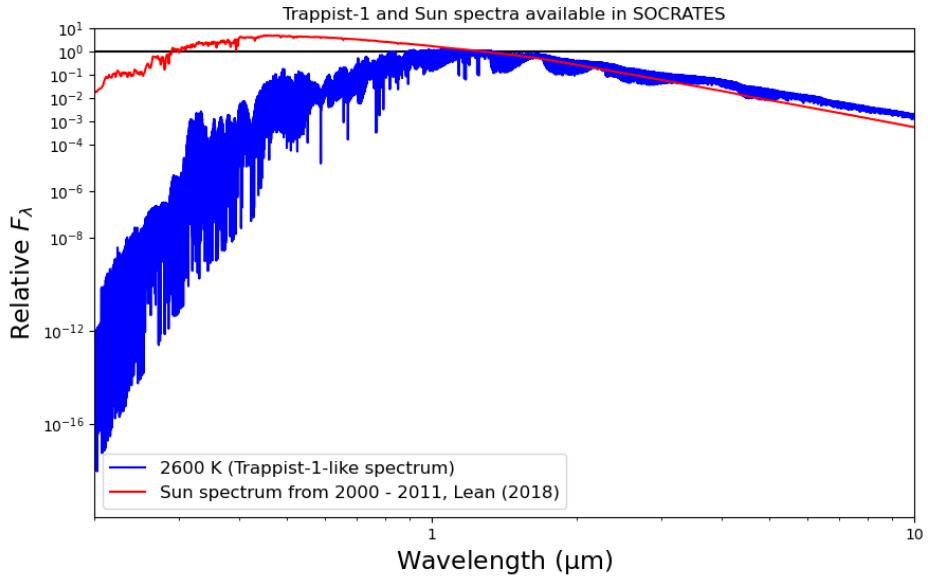


Figura 3: Espectros de emisión constantes utilizados por SOCRATES. Azul: región de [0, 10] μm del espectro de Trappist-1, siguiendo el modelo de BT-Settl (Allard 2013) con $T_{\text{eff}} = 2600 \text{ K}$, $\log g = 5 \text{ cm s}^{-2}$, $Z = 0$ y sin enriquecimiento en elementos α . Rojo: región de [0.125, 10] μm del espectro del Sol, siguiendo Lean (2018), con datos del período decenal de 2000 - 2011. Ambos espectros han sido normalizados al valor de la mediana del flujo F_{λ} el rango de [1.26, 1.30] μm .

2.2. Casos simulados y protocolos de simulación

Con el fin de abarcar los diversos escenarios posibles de composición superficial y atmosférica de Trappist-1 e (Bolmont et al. 2016, Bourrier et al. 2017), y entender cómo afectan al clima global por un lado la composición atmosférica, y por otro, la presencia de un océano superficial de agua líquida, se proponen los siguientes cuatro escenarios resumidos en la Tabla 2, siguiendo Fauchez et al. (2020):

El caso Benchmark 1 (Ben 1) se caracteriza por una atmósfera similar a la terrestre, de 28 g mol^{-1} de masa molecular, y presión superficial $P_{\text{sup}} = 1 \text{ bar}$. Esta atmósfera está compuesta de N_2 con 400 ppm de CO_2 , sin océano superficial. El caso Benchmark 2 (Ben 2) consta de una atmósfera de 44 g mol^{-1} de masa molecular, compuesta de 1 bar de CO_2 puro, de nuevo sin océano. El caso Habititable 1 (Hab 1) tiene un océano superficial de 100 m de profundidad y la misma atmósfera de Ben 1, es decir 1 bar de N_2 y 400 ppm de CO_2 (28 g mol^{-1}). Por su parte, el caso Habititable 2 (Hab 2) presenta un océano superficial de 100 m de profundidad con una atmósfera de 1 bar de CO_2 y 44 g mol^{-1} (la misma atmósfera de Ben 2). Por lo tanto, los cuatro casos son simétricos dos a dos respecto de la presencia de océano superficial y la composición atmosférica. En la Tabla 2 se muestra un resumen de las condiciones de los casos simulados. Los planetas-desierto (Ben 1 y Ben 2) presentan una subsuperficie de 6 capas de arena que llega hasta los 3.5 m de profundidad, de albedo bolométrico constante $A_{\text{Ben}} = 0.3$. Por su parte, los planetas con agua (Hab 1 y Hab 2) tienen un océano de 100 m de profundidad cubriendo toda su superficie (excepto el polo sur, ver Subsubsección 2.3.3). Este océano está compuesto por 13 capas diferentes con distinta inercia térmica, y no considera el flujo horizontal de calor. Su albedo superficial bolométrico es de $A_{\text{liq}} = 0.06$ para el agua líquida (cuando la temperatura de la superficie esté por encima de 273 K), y $A_{\text{ice}} = 0.25$ cuando la superficie se hiele (lo cual ocurrirá por debajo de 273 K de temperatura superficial). Todos los casos simulados parten de condiciones

iniciales de atmósfera y superficie isoterma con $T = 300$ K, y se simulan hasta que se alcance la condición de equilibrio radiativo en la parte superior de la atmósfera (TOA). Se considerará que se ha alcanzado el equilibrio TOA cuando la radiación estelar absorbida neta (ASR, incidente – reflejada, de forma que es positiva cuando el planeta absorbe radiación) y la radiación térmica emitida (OLR) promediadas para todas las celdas difieran en la capa superior de la atmósfera menos de 1 W m^{-2} . Una vez alcanzado el equilibrio, se toman datos de salida del promedio de 10 órbitas adicionales para Ben 1 y Ben 2, y 100 órbitas adicionales para Hab 1 y Hab 2. Esto es debido a que en los casos con hidrología hay más variaciones regulares en el clima planetario de escalas de varias órbitas, lo cual hace necesario promediar en períodos mayores para reducir la posible influencia de estos efectos periódicos sobre los datos de salida del modelo.

Caso	Ben 1	Ben 2	Hab 1	Hab 2
Atmósfera				
Composición	1 bar N ₂ + 400 ppm CO ₂	1 bar CO ₂	1 bar N ₂ + 400 ppm CO ₂	1 bar CO ₂
Masa molecular del aire seco (g mol ⁻¹)	28	44	28	44
Superficie				
Tipo	Planeta desierto	Planeta desierto	Planeta océano	Planeta océano
Profundidad (m)	3.5	3.5	100	100
Composición	Arena	Arena	Océano de agua	Océano de agua
Capacidad calorífica (J m ⁻³ K ⁻¹)	0.85×10^6	0.85×10^6	4×10^6	4×10^6
Albedo bolométrico	0.3	0.3	Agua líquida: 0.06 Hielo: 0.25	Agua líquida: 0.06 Hielo: 0.25

Tabla 2: Resumen de los casos simulados en este trabajo para la atmósfera de Trappist-1 e, siguiendo Fauchez et al. (2020). La profundidad de la superficie se refiere a la del suelo en los casos Ben 1 y Ben 2, y a la del océano superficial en los casos Hab1 y Hab 2.

2.3. Configuración de las simulaciones

Con el fin de asegurar la reproducibilidad de los resultados obtenidos, en esta subsección se detalla la parametrización utilizada en el archivo de configuración de simulación de ROCKE-3D para cada uno de los casos descritos en la Subsección 2.2.

2.3.1. Archivos Espectrales

Los casos Ben 1 y Hab 1, al tener una atmósfera de N₂, utilizan archivos espectrales (ver Subsubsección 2.1.2) compatibles con la atmósfera terrestre. Para reproducir los resultados del caso Ben 1 en Turbet et al. (2022), se han necesitado archivos espectrales adaptados a la atmósfera de la Tierra en el eón Arcaico. Estos archivos incluyen absorción inducida por colisión (CIA) N₂-N₂, pero no incluyen CIA N₂-CO₂ ni CIA CO₂-CO₂. Por su parte, el caso Hab 1 presenta archivos espectrales basados en la atmósfera terrestre actual, que tienen mayor precisión en la absorción en el IR del vapor de agua, lo cual es conveniente por ser Hab 1 un planeta océano, y por la elevada emisión de Trappist-1 en el infrarrojo (Figura 3). En cuanto a Ben 2 y Hab 2, sus atmósferas de CO₂ puro permiten utilizar archivos espectrales diseñados para la atmósfera marciana actual. La absorción del CO₂ en Ben 2 y Hab 2 se trata siguiendo Wordsworth et al. (2010), con líneas de perfil sub-Lorentziano (Perrin & Hartmann 1989) hasta 500 cm⁻¹, autoensanchamiento de las líneas de CO₂, corrección por CIA CO₂-CO₂ y dispersión Rayleigh generalizada. Los detalles de los archivos espectrales utilizados se encuentran en la Tabla 3. Los archivos espectrales se dividen en una parte de longitud de onda corta

(SW) y otra de longitud de onda larga (LW), donde la distinción entre SW y LW depende de cada archivo espectral. Los archivos espectrales de longitud de onda corta están adaptados a la emisión estelar, y de ahí que el nombre de la estrella aparezca en el título de estos archivos. Por su parte, los de longitud de onda larga controlan la emisión térmica del planeta. En el caso de Trappist-1, la fuerte emisión infrarroja de la estrella hace que haya solapamiento espectral entre las bandas SW y LW (Tabla 3).

	Ben 1	Hab 1	Ben 2, Hab 2
Spectral files			
SW	43 bandas de 0.2 μm a 20 μm CO_2, N_2 <i>sp_sw_43_dsa_ar10bar_trappist1</i>	21 bandas de 0.2 μm a 20 μm $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$ <i>sp_sw_21_dsa_trappist1</i>	42 bandas de 0.2 μm a 20 μm $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$ (solo Hab 2) <i>sp_sw_42_dsa_mars_trappist1</i>
LW	15 bandas de 0.4348 μm a 4.1494 μm CO_2, N_2 <i>sp_lw_15_dsa_ar10bar</i>	12 bandas de 0.25 μm a 4.9505 μm $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$ <i>sp_lw_12_dsa</i>	17 bandas de 5 μm a 40 μm $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$ (solo Hab 2) <i>sp_lw_17_dsa_mars</i>

Tabla 3: Diferencias entre los archivos espectrales de los casos simulados descritos en la Tabla 2. En cada celda se muestran, de arriba a abajo, el número de bandas consideradas y su rango espectral, las especies consideradas en el problema de transporte radiativo, y, en cursiva, el nombre en SOCRATES de los archivos espectrales. Las longitudes de onda han sido redondeadas al cuarto decimal.

2.3.2. Parámetros planetarios

La Tabla 4 muestra los valores de los parámetros planetarios utilizados en este trabajo, comparados con los de Grimm et al. (2018) y Agol et al. (2021). La oblicuidad del eje de rotación de Trappist-1 es desconocida. Si bien se espera que los planetas en acoplamiento de marea tengan una inclinación del eje (i) cercana a cero, la proximidad de las órbitas del sistema Trappist-1 (Tabla 1) puede generar efectos de marea que produzcan oblicuidades no nulas, lo cual tiene consecuencias directas en el clima (Hammond & Komacek 2024 y sus referencias). En cualquier caso, por simplicidad, tanto en el protocolo THAI como en este trabajo se ha tomado la oblicuidad como cero. Por otro lado, Hirano et al. (2020) encuentra que las órbitas de los planetas deberían estar alineadas con el eje de rotación de la estrella. En cuanto a la excentricidad de la órbita (e), el análisis de TTV de Agol et al. (2021) (figuras 21, 22, 23, 24 de dicho trabajo) encuentra una excentricidad muy pequeña para Trappist-1 e , con lo que tanto en el protocolo THAI como en estas simulaciones se ha tomado como nula. El período de rotación y traslación de Trappist-1 e se ha tomado como $P_{\text{rot}} = P_{\text{orb}} = 527039.999$ s, o 6.1 días terrestres (d), siguiendo Fauchez et al. 2020. Esta medida es ligeramente inferior al valor de (6.101013 ± 0.000035) d de Agol et al. (2021), y ligeramente superior al valor de (6.099615 ± 0.000011) d de Grimm et al. (2018). En cuanto a la insolación, la colaboración THAI utiliza un valor de $S = 900 \text{ W m}^{-2}$, siguiendo Gillon et al. (2017). En este trabajo, además de dicho valor, se ha utilizado también $S = 881 \text{ W m}^{-2}$, más en línea con el valor de Agol et al. (2021). Sin embargo, véase que $S = 900 \text{ W m}^{-2}$ se encuentra dentro de la incertidumbre de la medida de Agol et al. 2021 (ver Tabla 4). De acuerdo con Fauchez et al. 2020 (Tabla 1), se ha tomado la gravedad superficial de Trappist-1 e como $g = 9.12 \text{ m s}^{-2}$, o un 93 % (redondeando al segundo decimal) del valor de la gravedad superficial terrestre media de $g_{\oplus} = 9.80665 \text{ m s}^{-2}$ que utiliza ROCKE-3D. Esta medida sigue el valor encontrado en Grimm et al. 2018 (Tabla 2 de dicho trabajo). El análisis posterior de Agol et al. (2021) presenta un valor notablemente diferente de $g = (8.01 \pm 0.24) \text{ m s}^{-2}$ (Tabla 6 de dicho trabajo), que es el que se muestra en este trabajo en la Tabla 1. Esta diferencia radica en las diferentes masas de Trappist-1 e encontradas en ambos trabajos, que difieren en más de un 10 %. De nuevo siguiendo Fauchez et al.

(2020), se ha tomado el radio de Trappist-1 e como $R = 5798000$ m, o un 91 % del radio terrestre (Grimm et al. 2018) para $R_{\oplus} \simeq 6371000$ m (de acuerdo con Moritz 1980), redondeando al kilómetro. Los resultados de Turbet et al. (2022) y Sergeev et al. (2022a), sin embargo, no hacen este redondeo y toman $R = 5797610$ m. Asimismo, para los casos Ben 1 y Hab 1 con atmósfera de N₂, se ha fijado la presión parcial de este último gas como $p_{N_2} = 0.9995$ (redondeada al cuarto decimal), de manera que el peso molecular del dinitrógeno que utiliza ROCKE-3D de 28.0134 g mol⁻¹ resulte en un peso molecular de la atmósfera de exactamente 28 g mol⁻¹. Sin embargo, los resultados de Turbet et al. (2022) y Sergeev et al. (2022a) utilizan las masas moleculares del aire y presiones parciales mostradas en la Tabla 4, si bien las diferencias respecto a los valores usados en este trabajo son pequeñas. De manera análoga, en los casos Ben 2 y Hab 2, con atmósferas de CO₂, se ha tomado la masa molecular del aire como 44 g mol⁻¹, de acuerdo con el protocolo experimental THAI (Tabla 2 de Fauchez et al. 2020), y una presión parcial de CO₂ de $p_{CO_2} = 1$. La presión en TOA, que también es un parámetro planetario, se ha tomado como $p_{TOA} = 150$ mb en todos los casos, coincidiendo con la colaboración THAI. El coeficiente de adiabaticidad γ , definido como el cociente entre las capacidades caloríficas del aire a presión constante y volumen constante, $\gamma = \frac{C_p}{C_V}$, se ha tomado como $\gamma_1 = 1.401$ para Ben 1 y Hab 1, de acuerdo con su valor para la Tierra actualmente, y como $\gamma_2 = 1.293$ para Ben 2 y Hab 2, como corresponde al CO₂ puro a 300 K (Dean & Lange 1999).

	Este trabajo	Colaboración THAI	Agol et al. (2021)	Grimm et al. (2018)
R [m]	5798000	5797610	$5868000^{+82000}_{-75000}$	$5797610^{+165646}_{-172017}$
g [m s ⁻²]	9.12	9.12	8.01 ± 0.24	$9.1201845^{+0.6668522}_{-0.61781895}$
S [W m ⁻²]	881 y 900	900	879 ± 34	Ø
e	0	0	Ø	Ø
i	0	0	Ø	Ø
p_{N_2} (Ben 1, Hab 1)	0.9995	0.9996	Ø	Ø
p_{CO_2} (Ben 2, Hab 2)	1	1	Ø	Ø
p_{sup} [mb]	1000	1000	Ø	Ø
p_{TOA} [mb]	150	150	Ø	Ø
γ_1 (Ben 1, Hab 1)	1.401	1.401	Ø	Ø
γ_2 (Ben 2, Hab 2)	1.2930	1.2930	Ø	Ø

Tabla 4: Comparación de los parámetros del archivo de configuración de simulación. Se muestran los parámetros utilizados en las simulaciones de Trappist-1 e de este trabajo y en la colaboración THAI, así como en Agol et al. (2021) y Grimm et al. (2018), cuando proceda. R es el radio del planeta, g es la gravedad superficial, S es la insolación recibida por el planeta, e es la excentricidad de la órbita, i la inclinación del eje de rotación, p_{N_2} es la presión parcial de dinitrógeno en los casos Ben 1 y Hab 1 (redondeada al cuarto decimal), p_{sup} es la presión superficial, p_{TOA} es la presión en la última capa atmosférica del modelo, y $\gamma = \frac{C_p}{C_V}$ es la constante de adiabaticidad de la atmósfera.

2.3.3. Archivos de entrada

Las simulaciones de ROCKE-3D utilizan archivos externos para controlar variables que no pueden ser fijadas mediante un parámetro escalar, como por ejemplo la topografía o las condiciones iniciales de la atmósfera. Las distintas variables del archivo de configuración que apuntan a los archivos de entrada que incluye cada caso se encuentran en la Tabla 5. Los archivos de entrada genéricos se han obtenido del repositorio público de ROCKE-3D.³ Asimismo, se ha desarrollado un programa

³Los archivos de entrada genéricos de ROCKE-3D se pueden encontrar en https://portal.nccs.nasa.gov/GISS_modelE/modelE_input_data/, mientras que los archivos de entrada, archivos de configuración y rutinas propias que usó la colaboración THAI se encuentran en https://portal.nccs.nasa.gov/GISS_modelE/ROCKE-3D-publication-supplements/Fauchez2020GMD13-THAI-motivations-protocol-version-1.0/.

de preprocessado en Matlab para poder modificar estos archivos de entrada genéricos fácilmente. Este programa se encuentra en <https://github.com/sert20/ROCKE3D-auxiliary-software>. Los cambios más notables son los siguientes: el archivo genérico de condiciones iniciales de la atmósfera se ha modificado para tener condiciones isotermas de 300 K (variable AIC del archivo de configuración). El archivo del contenido de gases de efecto invernadero (variable GHG) se ha modificado para contener 400 ppm de CO₂ en los casos Ben 1 y Hab 1, y 10⁶ ppm (un 100 %) de CO₂ en los casos Ben 2 y Hab 2, con todas las demás especies eliminadas. En Ben 1 y Ben 2, el archivo de la variable VEG (que dictamina el albedo superficial) se ha modificado para tener un albedo constante de 0.3, y el archivo de topografía (variable TOPO) se ha modificado a una superficie donde todas las celdas son de un único tipo, en este caso, de tierra (no hay océanos, lagos ni glaciares). Por su parte, la colaboración THAI (y también este trabajo, con el fin de reproducir sus mismos resultados) toma en los casos Hab 1 y Hab 2 una superficie completamente cubierta por océano, excepto en el polo sur, donde hay un único continente, y todas las celdas de latitud más baja son de tierra. En cuanto al albedo para este continente, la colaboración THAI lo ha tomado de 0.2, y en este trabajo se ha hecho lo mismo. El archivo que dictamina la longitud de rugosidad de momento (*roughness length*), esto es, la escala por encima de la superficie a la que los vientos se ven afectados por la rugosidad de ésta, se ha modificado de manera que tenga un valor de 0.01 m en Ben 1 y Ben 2 (variable ROUGHL). Las condiciones iniciales de la tierra son controladas para Ben 1 y Ben 2 por la variable SOILIC. El archivo al que apunta se ha modificado para corresponder a un contenido de agua nulo y una temperatura inicial de 300 K. Hab 1 y Hab 2 controlan ciertas condiciones de su océano a través de variables del archivo de configuración. Notablemente, el archivo correspondiente a la variable OCNML se ha modificado para que la profundidad del océano sea uniformemente de 100 m, y la variable RVR define las celdas de océano en las que se acumula el agua procedente de la precipitación (está pensada para indicar las celdas de océano en las que desembocan ríos muy caudalosos en la Tierra). Los archivos de entrada correspondientes a las variables de la Tabla 5 que no se han mencionado en esta sección se han dejado como los originales del repositorio de ROCKE-3D, excepto, notablemente, el archivo correspondiente a la variable de entrada RADN8, que la colaboración THAI utiliza, y que en este trabajo no se ha conseguido hacer funcionar por errores en el momento de correr la simulación.

	Ben 1, Ben 2	Hab 1, Hab 2
Archivos de entrada exclusivos	SOILIC, ROUGHL	RADN2 (solo Hab 2), RADN4, RADN5, RADN9, RADNE, OHT, OCNML, GLMELT, RVR, NAMERVR, OSTRAITS, ZSIFAC, GIC, CDN, SOILCARB_global, ZVAR (solo Hab 2)
Archivos de entrada comunes		AIC, GHG, RH_QG_Mie, ISCCP, RADN1, RADN3, TOPO, TOP_INDEX, SOIL, VEG, MSU, REG

Tabla 5: Diferencias entre los archivos externos que se han usado para cada caso. AIC, GHG, RH_QG_MIE, ISCCP, RADN1, RADN2, RADN4, RADN5, RADN9 y RADNE corresponden al módulo atmosférico y/o de transporte radiativo. TOPO contiene la topografía del terreno y define las líneas de costa y los lagos. TOP_INDEX, SOIL, VEG, SOILIC, ROUGHL, GIC, CDN, SOILCARB_global y ZVAR están relacionados con el módulo de tierra. Por último, OHT, OCNML, GLMELT, RVR, NAMERVR, OSTRAITS y ZSIFAC son leídos por el módulo oceánico.

3. Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones de los diferentes casos de la Tabla 2. En adelante, las figuras con título THAI-I se referirán a figuras obtenidas a partir de

los datos presentados en Turbet et al. (2022), mientras que las figuras con título THAI-II se referirán a aquellas que muestren los resultados de Sergeev et al. (2022a). Para todos los casos de la Tabla 2, se han realizado dos simulaciones diferentes: una con una insolación de $S = 900 \text{ W m}^{-2}$, siguiendo el protocolo THAI (Fauchez et al. 2020), y otra con una insolación menor, de $S = 881 \text{ W m}^{-2}$, más en línea con los parámetros actualizados del sistema Trappist-1 de Agol et al. 2021 (Tabla 4). Para todos los casos, la única diferencia apreciable en las simulaciones al variar la insolación es la intensidad de equilibrio radiativo en la parte superior de la atmósfera (TOA). El equilibrio se considera alcanzado cuando la radiación estelar absorbida (ASR) y la radiación térmica emitida por el planeta (OLR) difieren menos de 1 W m^{-2} , adoptando en cada caso simulado los valores de la Tabla 6.

	Ben 1	Ben 2	Hab 1	Hab 2
$S = 900 \text{ W m}^{-2}$	164	184	174	186
$S = 881 \text{ W m}^{-2}$	160	180	171	182

Tabla 6: Intensidades de equilibrio ($\text{W m}^{-2} \pm 1$) entre radiación estelar absorbida (ASR) y radiación térmica emitida por el planeta (OLR) en la parte más alta de la atmósfera para los diferentes casos simulados.

Las simulaciones se han realizado por entero en un ordenador portátil personal *Dell Inspiron 16 5630*, cuyas características se encuentran en la Tabla 8 del Anexo, y utilizando 12 hilos de cálculo en paralelo. En cuanto al tiempo de simulación, se han necesitado aproximadamente 538 horas totales, repartidas en cada simulación como se muestra en la Tabla 9 del Anexo. Este tiempo se ha obtenido a partir del número de órbitas total simulado, con una equivalencia aproximada de 8h de tiempo real por cada 100 órbitas simuladas. Recuérdese que en todos los casos se ha dejado correr la simulación desde condiciones iniciales de atmósfera y superficie isotermas a $T = 300 \text{ K}$, hasta alcanzar equilibrio radiativo en TOA. A partir de este momento, se han simulado 10 órbitas adicionales para los casos Ben 1 y Ben 2, y 100 órbitas adicionales para los casos Hab 1 y Hab 2 (ver Tabla 2). Para el postprocesado de los datos y la obtención de las figuras, se ha implementado el software de python de la colaboración THAI.⁴ No obstante, ha sido necesario realizar modificaciones, a causa de estar utilizando solamente un modelo de circulación general (ROCKE-3D), así como escribir los scripts para obtener las figuras del albedo de Bond (Figura 14), el efecto invernadero (Figura 8) y los perfiles verticales en los terminadores (Figura 9), que no se muestran en la trilogía THAI. Aunque a continuación se discuten solamente los aspectos más importantes de cada simulación, el conjunto completo de figuras obtenido para cada uno de los casos de la Tabla 2 y para ambos valores de la insolación se puede consultar en el repositorio <https://github.com/sert20/Masters-Thesis-Figures/tree/main>.

3.1. Ben 1

El caso Ben 1 corresponde a un mundo desierto con una atmósfera de 1 bar de N_2 y 400 ppm de CO_2 . Para este caso, se han llevado a cabo dos simulaciones diferentes. La primera de ellas, de acuerdo con la configuración utilizada en Turbet et al. (2022), ha utilizado una insolación de $S = 900 \text{ W m}^{-2}$, y los archivos espectrales de la Tierra del eón Arcaico (ver Tabla 3). Los resultados obtenidos para esta simulación son extremadamente próximos a los de Turbet et al. (2022), como se observa, por ejemplo, para la temperatura superficial en la Figura 4. Puesto que los casos Ben 1 y Hab 1 comparten composición atmosférica, excepto por la presencia de agua de Hab 1, la segunda simulación ha empleado los mismos archivos espectrales que Hab 1 (Tabla 3), y una insolación de

⁴Este software está disponible públicamente en https://github.com/projectcuisines/thai_trilogy_code. Los datos de THAI se han obtenido de <https://ckan.emac.gsfc.nasa.gov/organization/thai>, un repositorio de datos del Sellers Exoplanet Environments Collaboration (SEEC), financiado parcialmente por el NASA Planetary Science Divisions Internal Scientist Funding Model.

$S = 881 \text{ W m}^{-2}$, más en línea con el valor que encuentra Agol et al. (2021) para Trappist-1 e. Esta segunda simulación recibirá el nombre de Ben 1*, mientras que la primera será simplemente Ben 1. Las diferencias entre ambas simulaciones se encuentran en la Tabla 7.

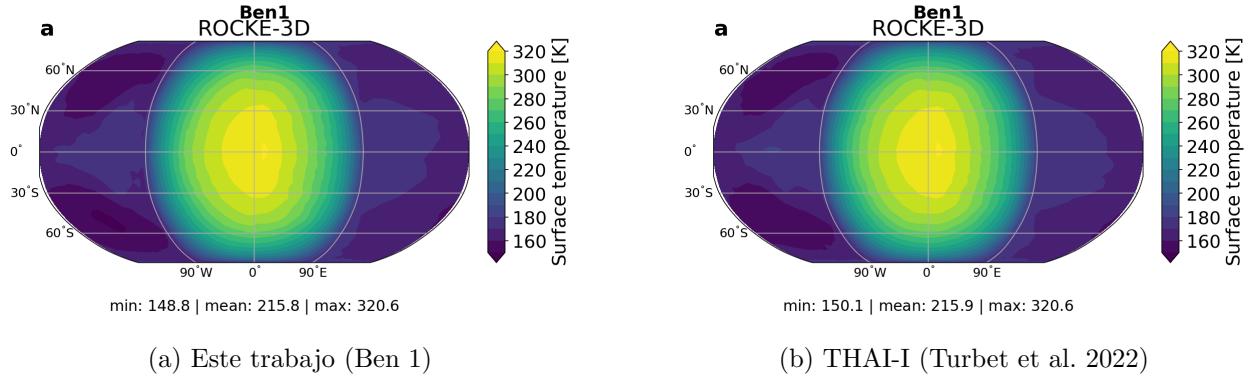


Figura 4: Media temporal en 10 órbitas de la temperatura media superficial (K) de la simulación Ben 1.

	Ben 1	Ben 1*
$S \text{ [W m}^{-2}\text{]}$	900	881
Spectral files		
SW	43 bandas de 0.2 μm a 20 μm CO_2, N_2 <i>sp_sw_43_dsa_ar10bar_trappist1</i>	21 bandas de 0.2 μm a 20 μm CO_2 <i>sp_sw_21_dsa_trappist1</i>
LW	15 bandas de 0.4348 μm a 4.1494 μm CO_2, N_2 <i>sp_lw_15_dsa_ar10bar</i>	12 bandas de 0.25 μm a 4.9505 μm CO_2 <i>sp_lw_12_dsa</i>

Tabla 7: Diferencias entre la insolación y los archivos espectrales del caso Ben 1 y los del caso Ben 1*. Las longitudes de onda han sido redondeadas al cuarto decimal. La estructura de los datos es la misma que la de la Tabla 3.

La mayor diferencia entre Ben 1 y Ben1* se encuentra en el régimen de circulación planetario encontrado. En la Figura 5 se observa que la simulación Ben 1 (de acuerdo con Turbet et al. 2022) presenta un régimen de circulación de rotador intermedio o de Rhines (Haqq-Misra et al. 2018). Este régimen se caracteriza por tener dos vórtices rotando en sentido horario en las latitudes intermedias del hemisferio delantero (*leading*) del planeta, circulación vertical en este mismo hemisferio, y un jet prógrado en el ecuador (Figura 5a). Por su parte, Ben1* (Figura 5c) presenta un régimen de circulación de rotador rápido, con dos jets prógrados en latitudes intermedias. Esta ambivalencia de regímenes de circulación de las simulaciones de clima de Trappist-1 e ya fue descrita en Sergeev et al. (2022b), donde se encuentra que los parámetros planetarios de Trappist-1 e lo sitúan muy cerca de la zona de transición entre ambos regímenes globales de circulación. Sin embargo, Sergeev et al. (2022b) realiza su estudio con el GCM *Met Office Unified Model* (UM), con lo que este trabajo con ROCKE-3D corrobora la ambivalencia de regímenes circulatorios con un modelo de circulación general diferente. Otra diferencia notable entre Ben1 y Ben1* se encuentra en la periodicidad de variación de la temperatura media superficial. En la Figura 6 se observa una fuerte periodicidad de período 1 órbita para Ben 1 (que también se observa en Turbet et al. 2022, Figura 8), que en Ben 1* está ausente. Asimismo, en Ben 1 hay una fuerte periodicidad de período aproximado de 10 órbitas de

la temperatura superficial, como se puede observar en la Figura 7. Esta periodicidad no aparece en Turbet et al. (2022), pues en ese trabajo únicamente se muestra la variación del clima del caso Ben 1 durante 10 órbitas.

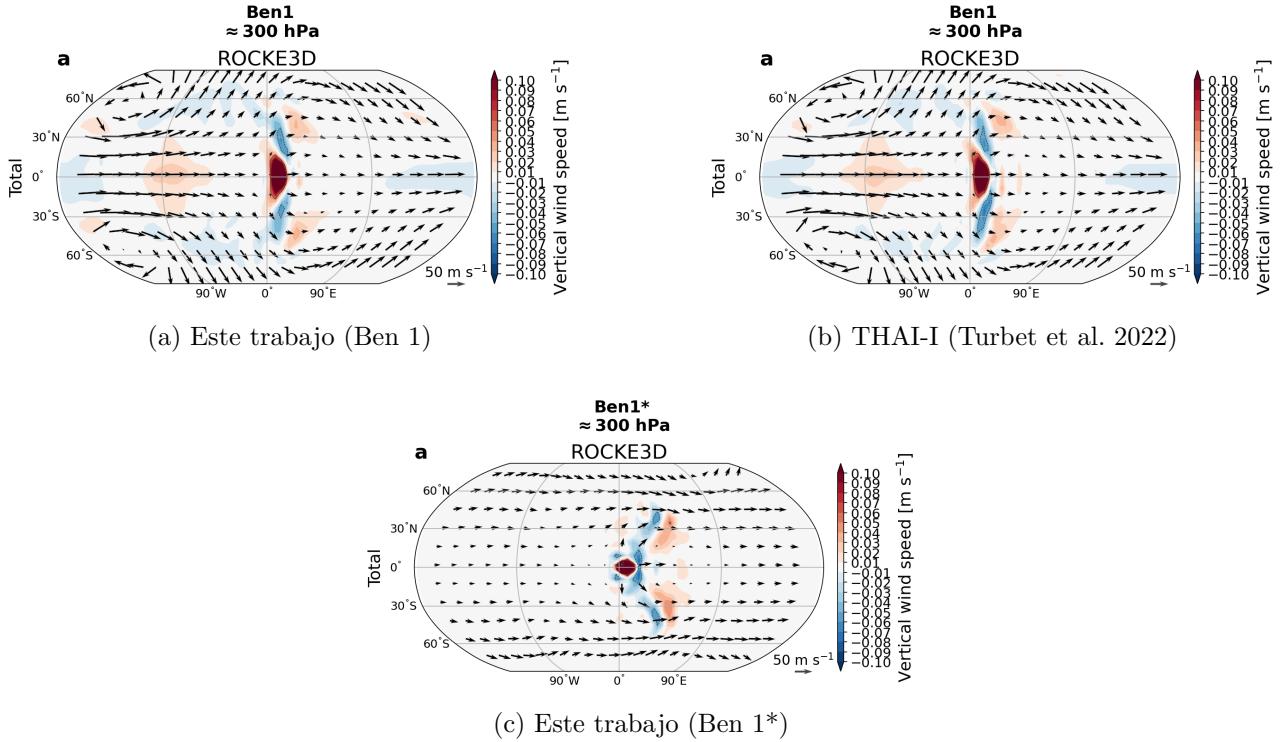
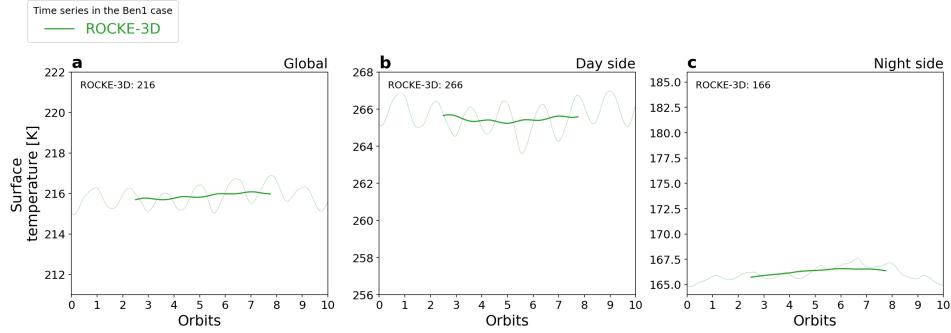


Figura 5: Viento horizontal (zonal y meridional) a 300 hPa en las simulaciones Ben 1 y Ben 1* (flechas), y comparación con Turbet et al. (2022). También se muestra con colores la velocidad de la componente vertical del viento (m s^{-1}). La línea de contorno negro representa los puntos donde el módulo de la velocidad es de 0.05 m s^{-1} .

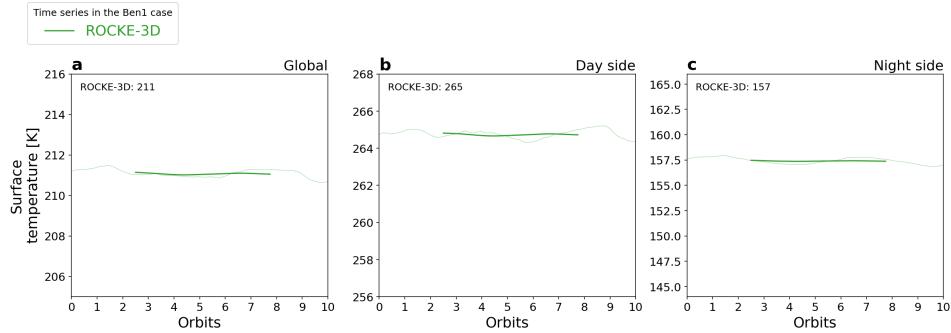
3.2. Ben 2

La simulación Ben 2 corresponde a un planeta desierto con una atmósfera de 1 bar de CO₂ (ver Tabla 2). Los resultados de las simulaciones para $S = 900 \text{ W m}^{-2}$ (y para $S = 881 \text{ W m}^{-2}$, que no se muestra) son extremadamente similares a los de Turbet et al. (2022), como se puede observar en el perfil vertical de temperatura en el punto subestelar y los terminadores a latitud 0° (Figura 9), el viento total (Figura 10), y la sección vertical del viento zonal medio (Figura 11). En la Figura 9c se observa en el punto subestelar un gradiente negativo de temperatura desde los 1000 hPa de la superficie hasta una presión de 100 hPa, y sucesivas inversiones de temperatura en capas superiores. Notablemente, en el punto subestelar (Figura 9c) las inversiones de temperatura hacia un gradiente positivo son más pronunciadas que en los terminadores (Figura 9a y Figura 9b), por tratarse del punto más caliente de la superficie. La Figura 10 y la Figura 11 muestran un régimen de circulación de rotador de Rhines, con un jet prógrado ecuatorial en la capa baja de la atmósfera y dos vórtices en las latitudes intermedias del hemisferio delantero a 300 hPa. Destaca asimismo la aparición entre 10 hPa y 100 hPa de dos jets retrógrados en latitudes intermedias y un jet prógrado ecuatorial en la parte más alta de la atmósfera. Atendiendo a su período rotacional de $P_{\text{rot}} = 6.1 \text{ d} = 527040 \text{ s}$ y a su radio (Tabla 1), la velocidad lineal de rotación de la superficie de Trappist-1 e en el ecuador es de

$$v_{\text{rot}} = 59.918 \text{ m s}^{-1}, \quad (1)$$



(a) Ben 1



(b) Ben 1*

Figura 6: Variación temporal de la temperatura superficial (K) de las simulaciones Ben 1 y Ben 1* para 10 órbitas. Las columnas muestran el promedio de la temperatura superficial global (a), en el hemisferio iluminado (b) y en el hemisferio no iluminado (c). Las líneas sólidas muestran la media cada 2.5 órbitas.

por lo que, de acuerdo con las velocidades de la Figura 11, ninguno de estos jets presenta superrotación. La superrotación es un fenómeno en el cual la atmósfera de un planeta circula alrededor de él en el mismo sentido de la rotación planetaria, pero a una velocidad mayor que la velocidad lineal de rotación de la superficie del planeta en el ecuador (Imamura et al. 2020). Con respecto a Ben 1, cuya atmósfera era principalmente de N₂, el mayor efecto invernadero de la atmósfera de 1 bar de CO₂ produce una temperatura superficial mayor, con la mayor diferencia en el hemisferio iluminado, como se observa en la Figura 8. El efecto invernadero (GHE) se ha calculado como la diferencia entre la temperatura de la superficie del planeta (T_{sup}) y la que tendría un cuerpo negro radiando como la capa más alta (TOA) del planeta (T_{bb}), asumiendo que sigue la ley de Steffan-Boltzman (Berger & Tricot 1992). De esta manera, se tiene

$$\text{GHE} = T_{\text{sup}} - T_{\text{bb}} = T_{\text{sup}} - \left(\frac{F_{\text{OLR}}}{\sigma_B} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (2)$$

donde F_{OLR} es el flujo de radiación térmica emitido por el planeta en TOA, y σ_B es la constante de Steffan-Boltzmann. Atendiendo a (2), GHE puede ser negativo si la temperatura en la superficie es menor que la que corresponde a un cuerpo negro radiando como lo hace el planeta en la capa superior de la atmósfera de esa celda. En planetas fríos (como Ben 1 y Ben 2), si la circulación atmosférica del planeta es eficiente, las celdas del lado no iluminado pueden tener GHE negativo debido al calentamiento convectivo de la parte superior de la atmósfera, que provoca mayor emisión térmica y mayor T_{bb} en (2).

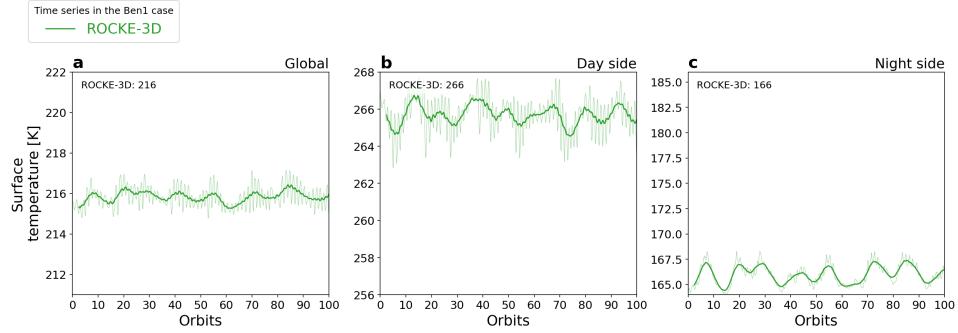


Figura 7: Variación temporal de la temperatura superficial (K) de la simulación Ben 1 para 100 órbitas. Las columnas muestran el promedio de la temperatura superficial global (a), en el hemisferio iluminado (b) y en el hemisferio no iluminado (c). Las líneas sólidas muestran la media de 10 órbitas.

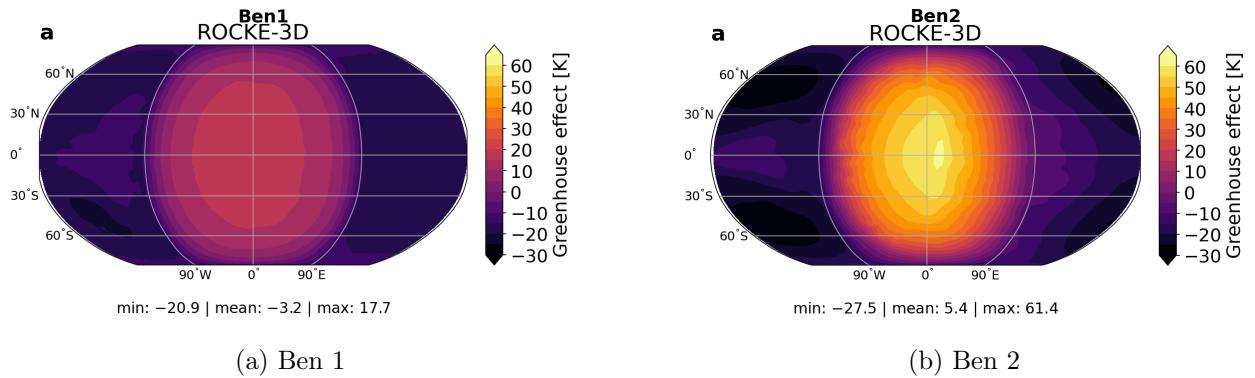


Figura 8: Comparación del efecto invernadero (K) en las simulaciones Ben 1 (izquierda) y Ben 2 (derecha). El efecto invernadero (*Greenhouse effect*) se ha calculado según (2).

3.3. Hab 1

La simulación Hab 1 corresponde a un planeta océano con una atmósfera de 1 bar de N₂ y 400 ppm de CO₂. Los resultados obtenidos son similares a los de THAI (Sergeev et al. 2022a), como se observa en la Figura 13 o en la Figura 14. En ambas figuras destaca la forma característica de las nubes sobre el punto subestelar. Estas nubes impiden que llegue radiación estelar a la superficie (Figura 13), y reflejan la luz por su hielo en suspensión, aumentando el albedo (Figura 14). Las simulaciones de este trabajo y las de Sergeev et al. (2022a) (Figura 2, (d) de dicho trabajo) muestran que, en Hab 1, alrededor del 80 % del océano superficial se encuentra congelado, quedando agua líquida únicamente en la región en torno al punto subestelar. Esto se puede apreciar indirectamente en la Figura 12, donde se observa que la proporción de la superficie planetaria con temperatura superficial que permite un océano de agua líquida ($T_{\text{surf}} \geq 273$ K) es relativamente pequeña y está centrada en el punto subestelar. Asimismo, en la Figura 16 se observa una distribución de fracción en volumen de nubes muy centrada en la latitud 0°, que es la latitud del punto subestelar. La región del punto subestelar es la única que presenta un océano líquido donde puede haber evaporación, y por lo tanto la formación de nubes en esa región será muy alta, aunque la Figura 16 muestra que también hay nubes hacia el este de la longitud 0°. Esto se debe a la convección de las partículas de agua por los vientos zonales en el sentido de rotación del planeta. Hab 1 se encuentra en un régimen de circulación de tipo rotador rápido (Figura 17), en el que destaca en la Figura 18 la presencia de dos jets prógrados en latitudes intermedias de la capa baja de la atmósfera, con su máximo de velocidad a 300 hPa. Estos jets presentan superrotación, ya que superan la velocidad lineal de rotación de la superficie de Trappist-1 e en el ecuador (1), si bien

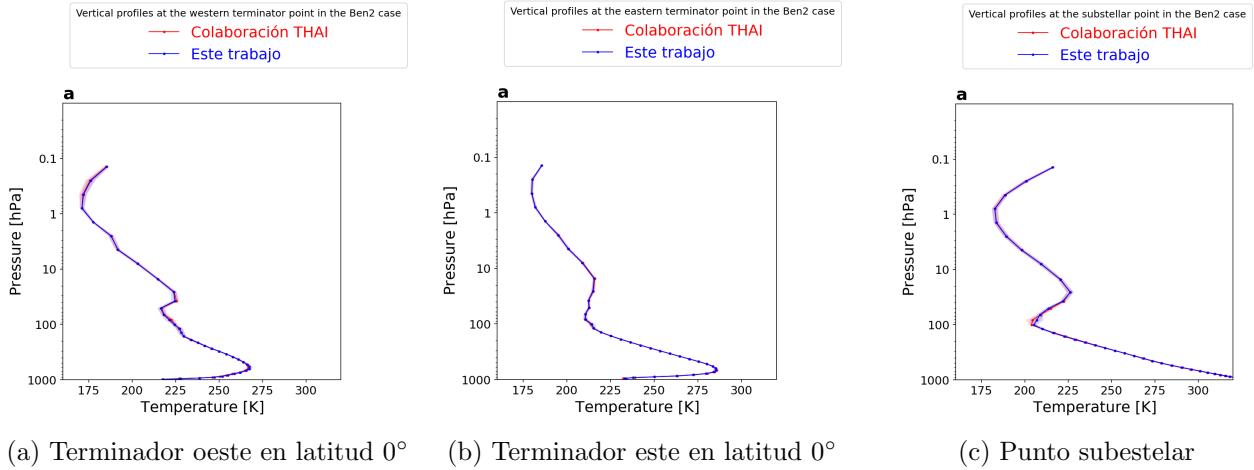


Figura 9: Perfiles verticales de temperatura en el punto subestelar (derecha), el terminador este en latitud 0° (centro) y el terminador oeste en latitud 0° (izquierda) para la simulación Ben 2. Los puntos unidos mediante líneas sólidas representan el promedio temporal para 10 órbitas, mientras que las sombras muestran las desviaciones 1 σ respecto de la media.

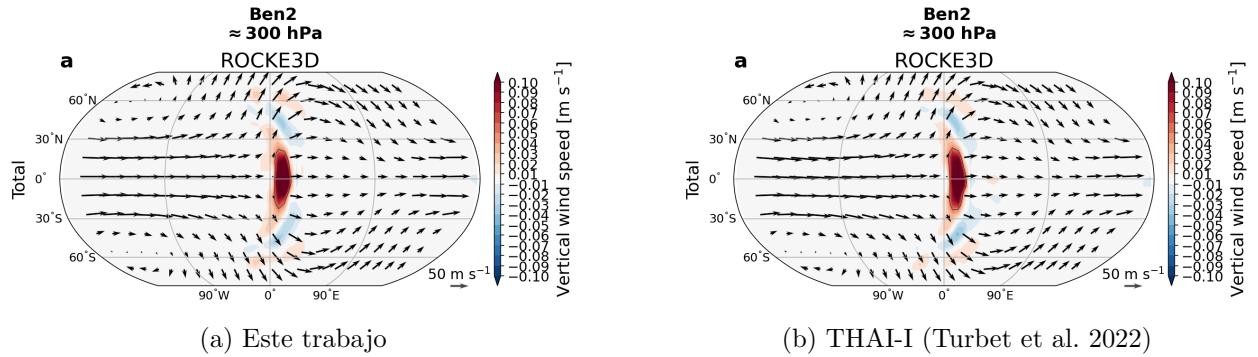
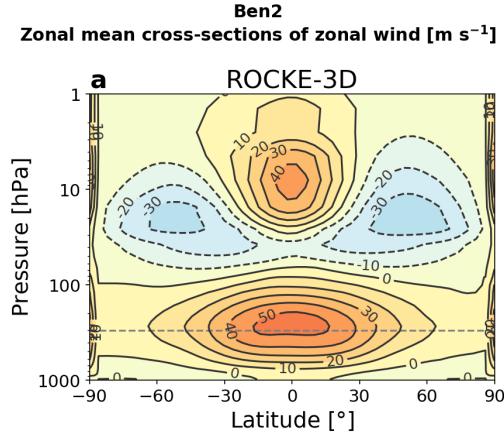
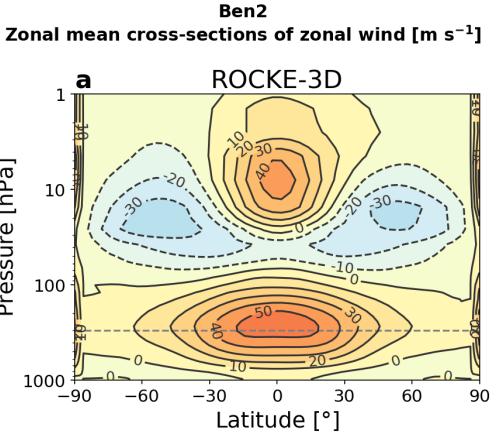


Figura 10: Viento horizontal (zonal y meridional) a 300 hPa en la simulación Ben 2 (flechas). También se muestra con colores la velocidad de la componente vertical del viento ($m s^{-1}$). La línea de contorno negro representa los puntos donde el módulo de la velocidad es de $0.05 m s^{-1}$.

en la simulación de este trabajo (Figura 18a) se alcanzan velocidades del jet ligeramente mayores que en Sergeev et al. (2022a) (Figura 18b). Una diferencia respecto a Sergeev et al. (2022a) es que en este trabajo se ha obtenido una convección atmosférica del aire seco ligeramente mayor en las latitudes altas, como se observa en la distribución de velocidad de la componente vertical del viento (Figura 17, código de colores). No obstante, la diferencia más destacada respecto a los resultados de Sergeev et al. (2022a) se observa en la Figura 15, donde el ritmo de calentamiento por absorción de radiación de Trappist-1 a 300 hPa sobre el punto subestelar (Figura 15, izquierda) es significativamente menor en este trabajo que en Sergeev et al. (2022a), y, por consiguiente, también es menor el ritmo de enfriamiento térmico (Figura 15, derecha). Esto no ocurre en los terminadores (no mostrado), donde los perfiles verticales son prácticamente coincidentes. Esta discrepancia se puede deber a que en este trabajo se obtiene una fracción en volumen de nubes en el punto subestelar ligeramente mayor que en Sergeev et al. 2022a (Figura 16), lo que provocaría una mayor dispersión de la radiación estelar, y por tanto menor absorción de la radiación, explicando el menor ritmo de calentamiento visto en Figura 15 (izquierda). Estas diferencias solo pueden estar provocadas por la no inclusión del fichero de entrada correspondiente a la variable RADN8, como se apuntó en la Subsubsección 2.3.3.

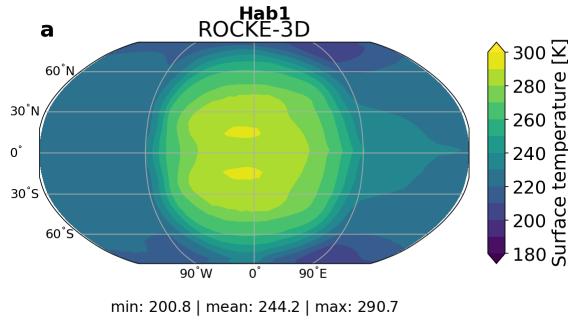


(a) Este trabajo

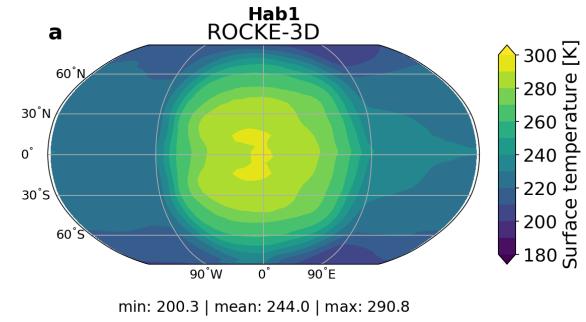


(b) THAI-I (Turbet et al. 2022)

Figura 11: Sección vertical del viento zonal medio promediado en longitud para el caso Ben 2 (m s^{-1}). La línea gris horizontal punteada marca la presión de 300 hPa.



(a) Este trabajo

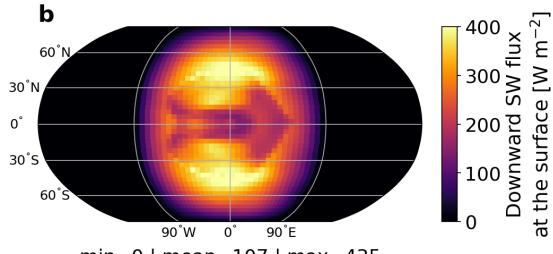


(b) THAI-II (Sergeev et al. 2022a)

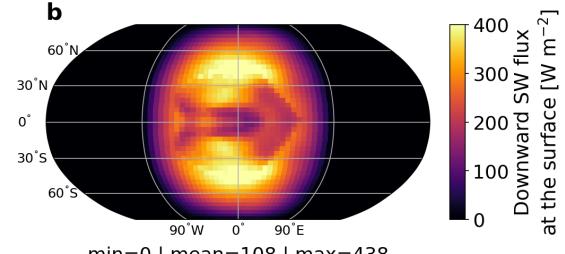
Figura 12: Media temporal de la temperatura superficial (K) de la simulación Hab 1 en 100 órbitas.

3.4. Hab 2

Hab 2 es una simulación correspondiente a un mundo océano con una atmósfera de 1 bar de CO₂ (Tabla 2). Hab 2 es la simulación más cálida de todas, de acuerdo con Sergeev et al. (2022a). Esto es debido al fuerte efecto invernadero (Figura 20) que propician la presencia del vapor de agua y la atmósfera enteramente compuesta por CO₂. En este caso, la fracción de océano congelado de la superficie del planeta es del 23 %, valor notablemente menor al 80 % de Hab 1 (Subsección 3.3). En la Figura 19 se presenta el mapa en latitud y longitud para la temperatura superficial de esta simulación y su comparación con Sergeev et al. (2022a). En dicha figura se aprecia que la región del planeta con $T_{\text{sup}} \geq 273$ K, donde hay un océano de agua líquida, es mayor en extensión que la de la simulación Hab 1 (Figura 12). El límite donde el océano pasa de ser líquido a estar congelado se aprecia en la Figura 21. En dicha figura se distingue una banda en la superficie del planeta donde hay una fuerte absorción térmica en la superficie (Figura 21, en azul). Esta es la zona de transición entre el océano de agua sólida y líquida, donde el hielo está en equilibrio de fase con el agua líquida y se absorbe calor latente de fusión. Hab 2 presenta un régimen de circulación de rotador rápido, con una circulación más rápida que Hab 1 (comparar Figura 22 con Figura 18). Los resultados obtenidos en la simulación de Hab 2 son similares a los de Sergeev et al. (2022a), aunque este es el caso en el que se presentan las diferencias más notables. La primera diferencia ocurre en la circulación atmosférica, como se observa

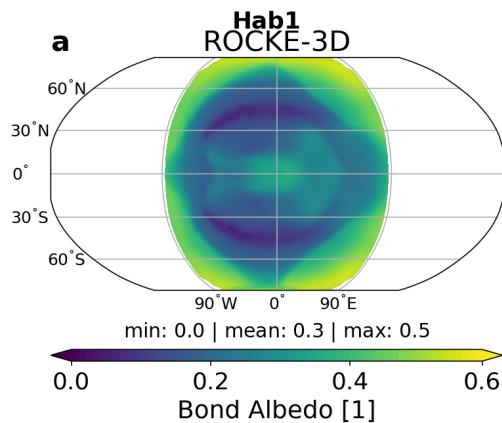


(a) Este trabajo

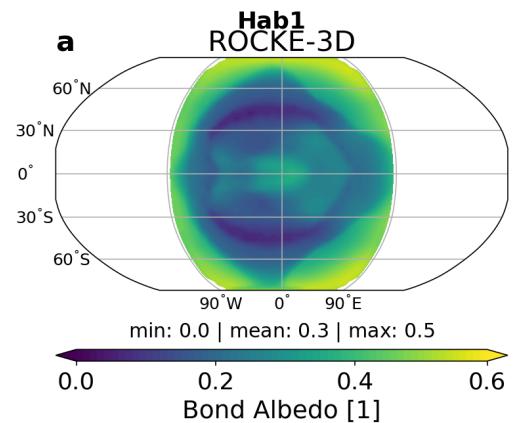


(b) THAI-II (Sergeev et al. 2022a)

Figura 13: Flujo de longitud de onda corta (SW, rango dependiente del archivo espectral) en la superficie (W m^{-2}) para la simulación Hab 1. El signo es positivo cuando la superficie absorbe energía.



(a) Este trabajo



(b) THAI-II (Sergeev et al. 2022a)

Figura 14: Albedo de Bond en el hemisferio iluminado de la simulación Hab 1.

en la Figura 22. La simulación de este trabajo presenta dos jets prógrados en latitudes intermedias con vientos más rápidos que los de Sergeev et al. 2022a, y que alcanzan mayor altitud. Atendiendo a (1), ambos son superrotantes. Sin embargo, la circulación en el ecuador (latitud 0°) es menor que la de la colaboración THAI, excepto en la capa más alta de la atmósfera. La segunda diferencia importante ocurre en el contenido de nubes en el hemisferio delantero (*leading*) del planeta. Como se aprecia en la Figura 24, hay un déficit respecto a los resultados de Sergeev et al. (2022a) en la fracción integrada de nubes en latitudes intermedias en torno al terminador oeste. Esta diferencia puede deberse al diferente contenido de agua líquida en la atmósfera a presiones en torno a 800 hPa y a una latitud de -90° (terminador oeste), como se aprecia en la Figura 25. El menor contenido de agua líquida de este trabajo en el terminador oeste propiciaría la menor formación de nubes que se observa en la Figura 24. Por último, una tercera diferencia se encuentra en los perfiles verticales de temperatura en el punto subestelar, como se aprecia en la Figura 23. Tanto en este punto como en los terminadores este y oeste a latitud 0° (no mostrados) se encuentran resultados similares. En este trabajo, el perfil vertical de temperatura (Figura 23) es similar al de Sergeev et al. (2022a) hasta los 100 hPa, pero la atmósfera se vuelve más caliente que la de Sergeev et al. (2022a) desde los 100 hPa hasta los 1 hPa. Desde 1 hPa hasta el TOA, la atmósfera de este trabajo es más fría. Las diferencias en el patrón de circulación, el contenido de nubes y el perfil de temperatura solo pueden deberse a las pequeñas diferencias de parámetros planetarios de la Tabla 4, o bien al hecho de no haber utilizado la variable RADN8 en el archivo de configuración (Tabla 5). En la Subsección 3.3 se vio que la ausencia de RADN8 también afectaba a la similitud de los resultados de Hab 1 con Sergeev et al. (2022a).

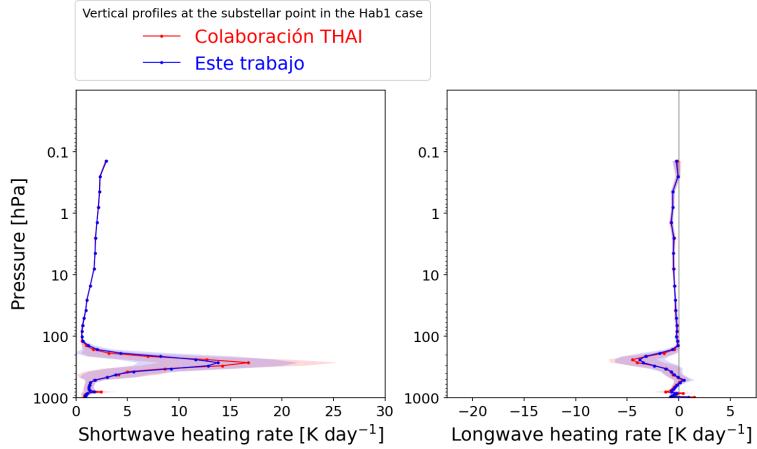


Figura 15: Perfiles verticales en el punto subestelar para la simulación Hab 1 de (izquierda) ritmo de calentamiento de cada capa por absorción de longitudes de onda corta (SW) debido a la absorción del flujo estelar, y (derecha) ritmo neto de calentamiento de cada capa en longitudes de onda largas (LW) por el balance entre la emisión térmica de las capas adyacentes y la superficie. Los puntos unidos mediante líneas sólidas representan el promedio temporal para 10 órbitas, mientras que las sombras muestran las desviaciones 1σ respecto de la media.

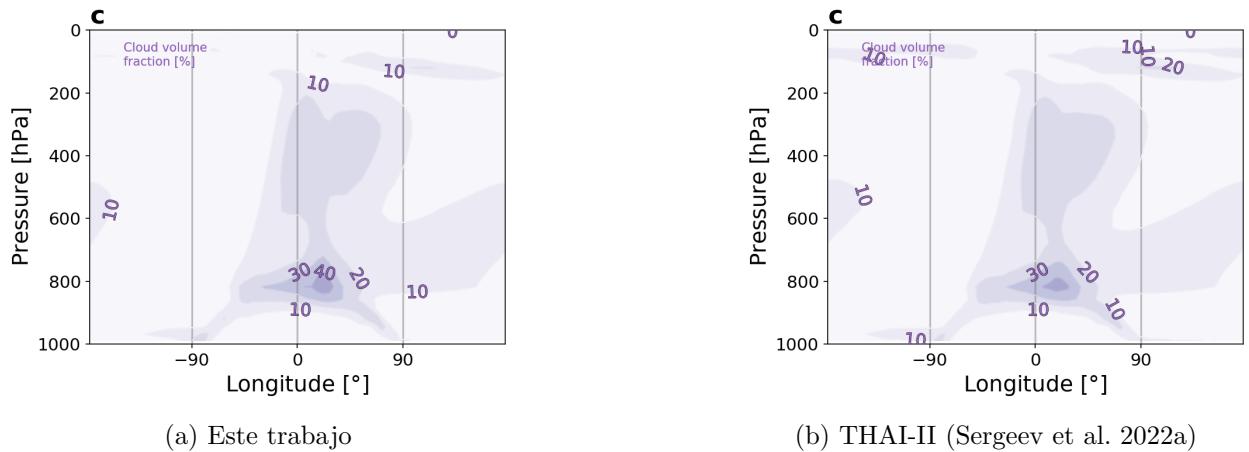
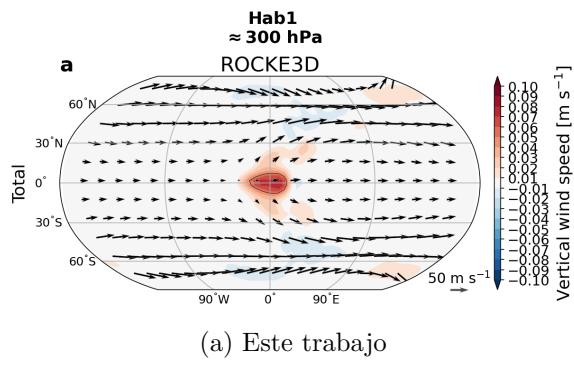
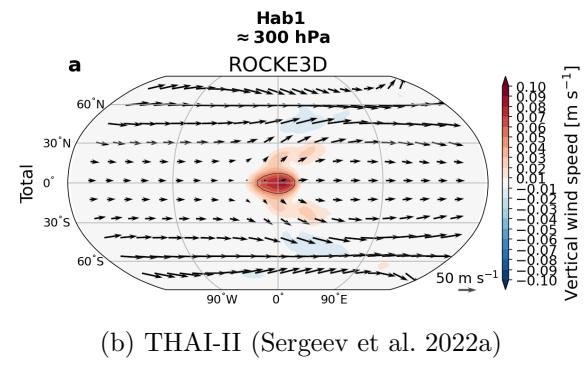


Figura 16: Sección vertical promediada en latitud en el caso Hab 1 de la fracción en volumen de nubes (%).

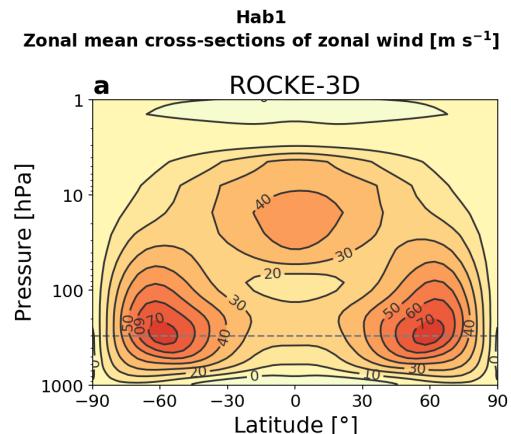


(a) Este trabajo

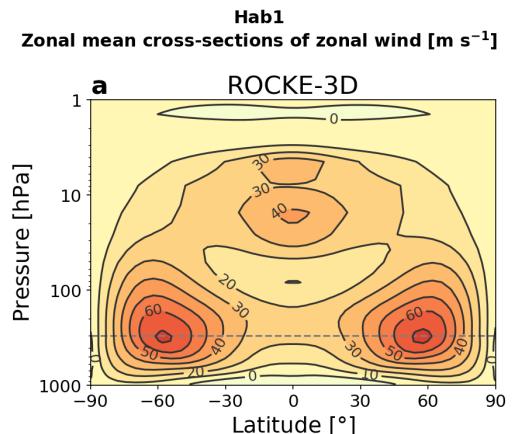


(b) THAI-II (Sergeev et al. 2022a)

Figura 17: Viento horizontal (zonal y meridional) a 300 hPa en la simulación Hab 1 (flechas). También se muestra con colores la velocidad de la componente vertical del viento (m s^{-1}). La línea de contorno negro representa los puntos donde el módulo de la velocidad es de 0.05 m s^{-1} .

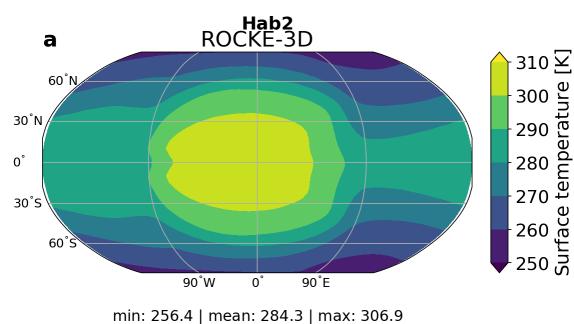


(a) Este trabajo

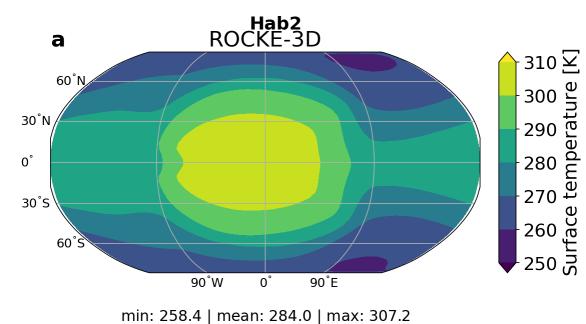


(b) THAI-II (Sergeev et al. 2022a)

Figura 18: Sección vertical del viento zonal medio promediado en longitud para el caso Hab 1 (m s^{-1}). La línea gris horizontal punteada marca la presión de 300 hPa.



(a) Este trabajo



(b) THAI-II (Sergeev et al. 2022a)

Figura 19: Media temporal de la temperatura superficial (K) de la simulación Hab 2 en 100 órbitas.

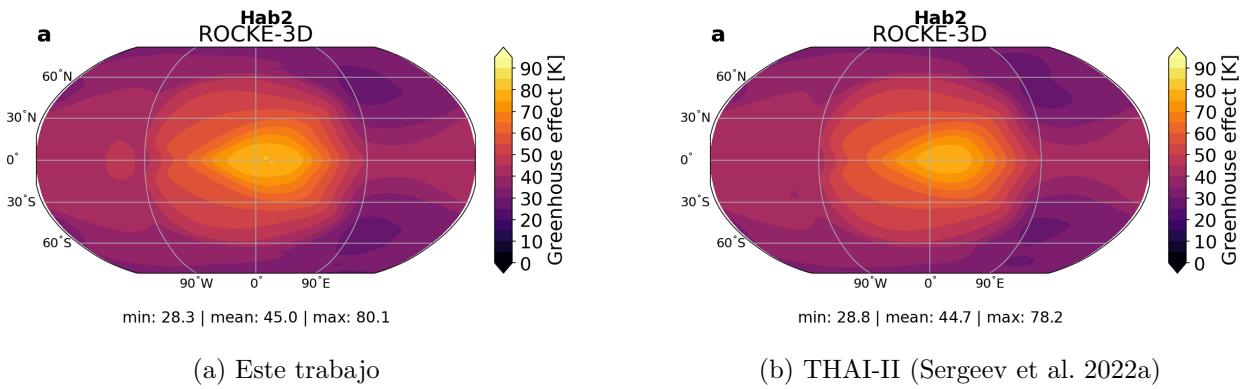


Figura 20: Efecto invernadero en la simulación Hab 2 (K). Calculado según (2).

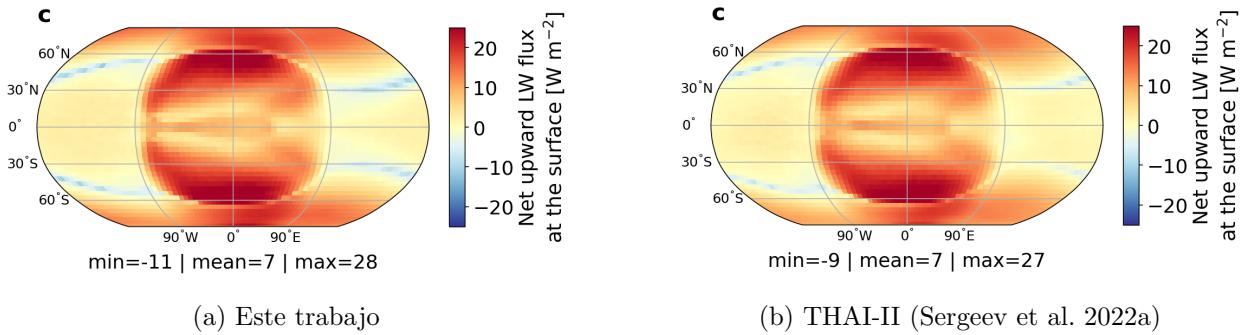


Figura 21: Flujo neto de radiación térmica (longitud de onda larga, LW) en la superficie para el caso Hab 2, positivo hacia arriba (W m^{-2}).

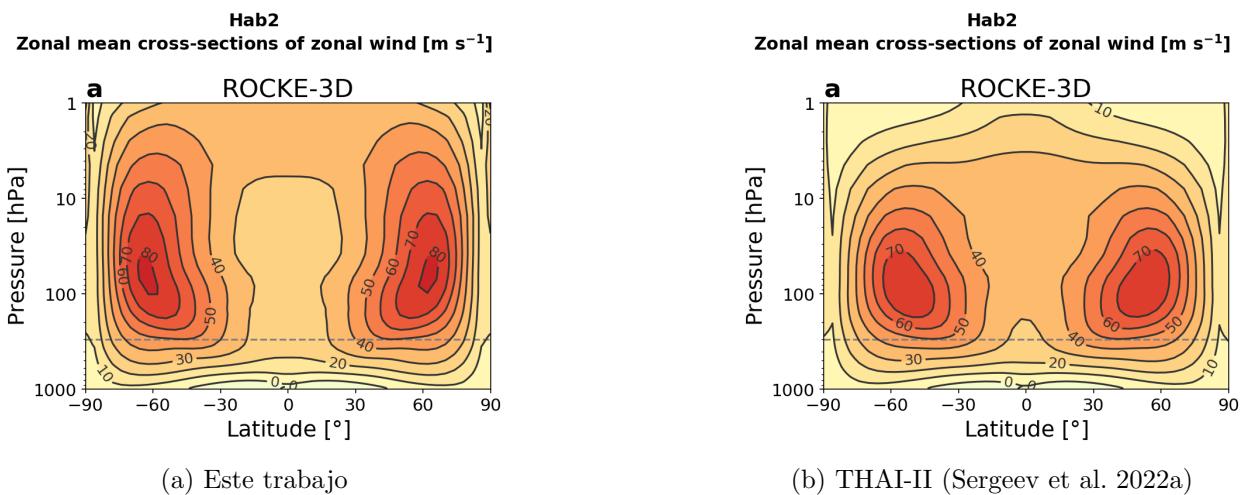


Figura 22: Sección vertical del viento zonal medio promediado en longitud para el caso Hab 2 (m s^{-1}). La línea gris punteada marca la presión de 300 hPa.

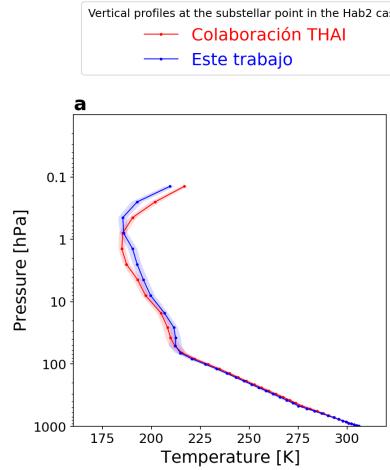


Figura 23: Perfil vertical de temperatura en el punto subestelar para la simulación Hab 2. Los puntos unidos mediante líneas sólidas representan el promedio temporal para 10 órbitas, mientras que las sombras muestran las desviaciones 1 σ respecto de la media.

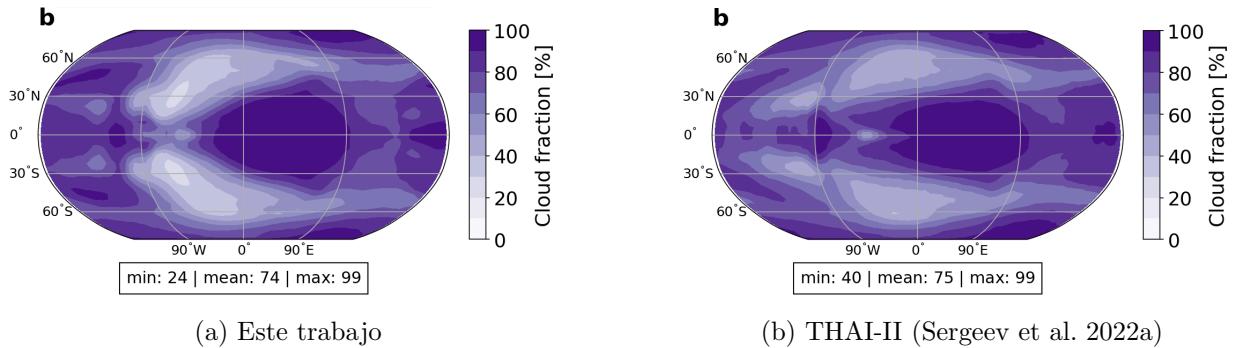


Figura 24: Mapas en latitud y longitud para la simulación Hab 2 de la fracción en volumen de nubes, integrada verticalmente (%).

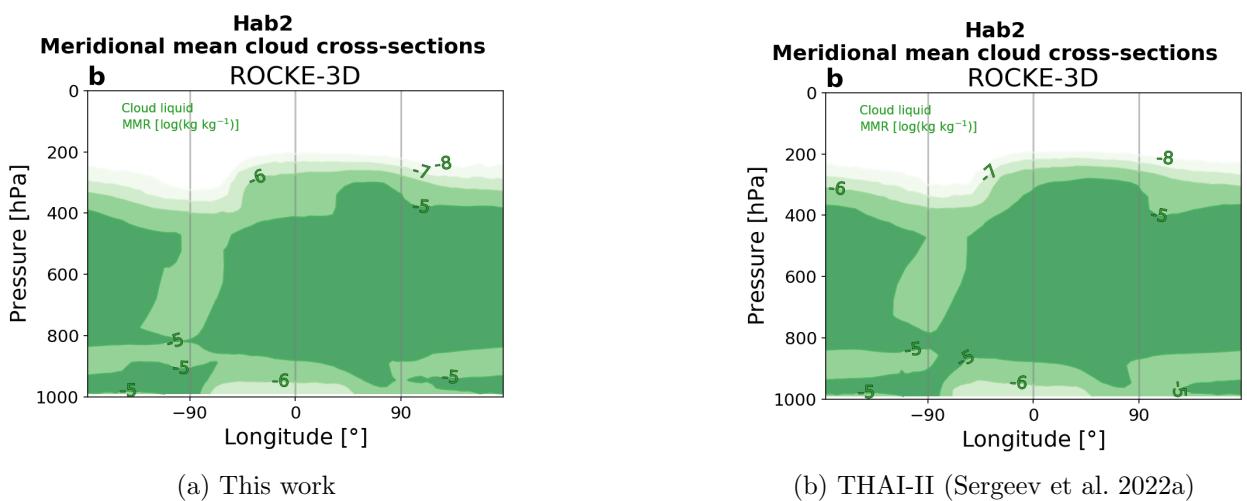


Figura 25: Sección vertical promediada en latitud en el caso Hab 2 del ratio de mezcla en masa (MMR) de partículas de agua líquida en las nubes ($\log [\text{kg kg}^{-1}]$).

4. Conclusiones

- I. Se ha conseguido importar e instalar correctamente el modelo de circulación general (GCM) ROCKE-3D de la NASA.
- II. Se ha elaborado software de preprocesado de datos y de archivos de entrada en Matlab extensamente, de manera que se puedan modificar a voluntad la configuración de parámetros y archivos de entrada que utiliza ROCKE-3D para sus simulaciones. Este software se encuentra en <https://github.com/sert20/ROCKE3D-auxiliary-software>.
- III. Se ha corroborado la ambivalencia de regímenes circulatorios de las simulaciones de clima de Trappist-1 e descrita en Sergeev et al. (2022b), con un GCM diferente al de dicho trabajo.
- IV. Se ha logrado reproducir en buen acuerdo los resultados de Turbet et al. (2022) y Sergeev et al. (2022a), siguiendo el protocolo de la colaboración THAI (Fauchez et al. 2020). Los resultados al completo se pueden consultar en <https://github.com/sert20/Masters-Thesis-Figures>.
- V. Se han conseguido mostrar figuras propias que no aparecen en Sergeev et al. (2022a) ni Fauchez et al. (2022). En particular, el albedo de Bond (Figura 14), el efecto invernadero (Figura 8) y los perfiles verticales en los terminadores (Figura 9).

Referencias

- Agol, E., Dorn, C., Grimm, S. L., et al. 2021, Refining the transit timing and photometric analysis of TRAPPIST-1: Masses, radii, densities, dynamics, and ephemerides
- Alexander, K. & Easterbrook, S. M. 2015, Geoscientific Model Development, 8, 1221
- Allard, F. 2013, Proceedings of the International Astronomical Union, 8, 271–272
- Berger, A. & Tricot, C. 1992, Surveys in Geophysics, 13, 523
- Bolmont, E., Selsis, F., Owen, J. E., et al. 2016, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 464, 3728–3741
- Bourrier, V., Wit, J. d., Bolmont, E., et al. 2017, The Astronomical Journal, 154, 121
- Cantrell, J. R., Henry, T. J., & White, R. J. 2013, The Astronomical Journal, 146, 99
- de Wit, J., Wakeford, H., Gillon, M., et al. 2016, Nature, 537, 69
- de Wit, J., Wakeford, H. R., Lewis, N. K., et al. 2018, Nature Astronomy, 2, 214–219
- Dean, J. & Lange, N. 1999, Lange's Handbook of Chemistry, Lange's handbook of chemistry No. v. 15 (McGraw-Hill)
- Earth Fact Sheet, NASA. 2024, Earth Fact Sheet, NASA, <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html>, visitado en: 2024-07-09
- Edwards, J. M. & Slingo, A. 1996, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 122, 689
- ESA/Hubble. 2018, The habitable zone in the TRAPPIST-1 system, <https://esahubble.org/images/heic1802d/>, visitado en: 2024-08-04
- Fauchez, T. J., Turbet, M., Wolf, E. T., et al. 2020, Geoscientific Model Development, 13, 707–716

- Fauchez, T. J., Villanueva, G. L., Sergeev, D. E., et al. 2022, PSJ, 3, 213
- Gillon, M., Triaud, A. H. M. J., Demory, B.-O., et al. 2017, Nature, 542, 456–460
- Grimm, S. L., Demory, B.-O., Gillon, M., et al. 2018, Astronomy & Astrophysics, 613, A68
- Hammond, T. & Komacek, T. 2024, The Coupled Impacts of Atmospheric Composition and Obliquity on the Climate Dynamics of TRAPPIST-1e
- Haqq-Misra, J., Wolf, E. T., Joshi, M., Zhang, X., & Kopparapu, R. K. 2018, The Astrophysical Journal, 852, 67
- Henry, T. J., Subasavage, J. P., Brown, M. A., et al. 2004, The Astronomical Journal, 128, 2460–2473
- Hirano, T., Gaidos, E., Winn, J. N., et al. 2020, The Astrophysical Journal Letters, 890, L27
- Imamura, T., Mitchell, J., Lebonnois, S., et al. 2020, , 216, 87
- Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, NASA. 2019, Planetary Physical Parameters, https://ssd.jpl.nasa.gov/planets/phys_par.html, visitado en: 2024-07-09
- Kopparapu, R. k., Wolf, E. T., Haqq-Misra, J., et al. 2016, The Astrophysical Journal, 819, 84
- Lean, J. L. 2018, Earth and Space Science, 5, 133
- Lim, O., Benneke, B., Doyon, R., et al. 2023, Atmospheric Reconnaissance of TRAPPIST-1 b with JWST/NIRISS: Evidence for Strong Stellar Contamination in the Transmission Spectra
- Moran, S. E., Hörst, S. M., Batalha, N. E., Lewis, N. K., & Wakeford, H. R. 2018, The Astronomical Journal, 156, 252
- Moritz, H. 1980, Journal of Geodesy, 74, 128
- Perrin, M. & Hartmann, J. 1989, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 42, 311
- Rothman, L. S., Gordon, I. E., Babikov, Y., et al. 2013, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 130, 4
- Schmidt, G. A., Kelley, M., Nazarenko, L., et al. 2014, Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 6, 141
- Schulze-Makuch, D., Méndez, A., Fairén, A. G., et al. 2011, Astrobiology, 11, 1041
- Sergeev, D. E., Fauchez, T. J., Turbet, M., et al. 2022a, PSJ, 3, 212
- Sergeev, D. E., Lewis, N. T., Lambert, F. H., et al. 2022b, Bistability of the atmospheric circulation on TRAPPIST-1e
- Turbet, M., Fauchez, T. J., Sergeev, D. E., et al. 2022, PSJ, 3, 211
- UPR Arecibo. 2024, HABITABLE WORLDS CATALOG, A Database of Potentially Habitable Worlds, <https://phl.upr.edu/hwc>, visitado en: 2024-07-10
- Way, M. J., Aleinov, I., Amundsen, D. S., et al. 2017, The Astrophysical Journal Supplement Series, 231, 12
- Wordsworth, R., Forget, F., & Eymet, V. 2010, Icarus, 210, 992
- Zieba, S., Kreidberg, L., Ducrot, E., et al. 2023, Nature, 620, 746–749

Anexo

Memoria RAM 16 GB	Nº de procesadores 12	Características de los procesadores <i>Intel Core i7-1360P, 13^a generación</i>
Nº de hilos de cálculo 16	Disco duro 1 TB	Batería 56 Wh

Tabla 8: Características del ordenador portátil personal donde se han realizado las simulaciones.

Caso	$S = 900 \text{ W m}^{-2}$			
	Ben 1	Ben 2	Hab 1	Hab 2
Nº órbitas	220	132	1012	1950
t [h]	17.6	10.56	80.96	156
$S = 881 \text{ W m}^{-2}$				
Caso	Ben 1	Ben 2	Hab 1	Hab 2
Nº órbitas	200	150	832	2229
t [h]	16	12	66.56	178.32

Tabla 9: Número de órbitas total simulado, y tiempo aproximado de simulación de cada caso (t), para una insolación de $S = 900 \text{ W m}^{-2}$ (los resultados comentados en la Sección 3), y para $S = 881 \text{ W m}^{-2}$, que solo se ha comentado en el caso Ben 1* de la Subsección 3.1. Este último caso Ben 1* corresponde en esta tabla con el caso Ben 1 para $S = 881 \text{ W m}^{-2}$. La equivalencia aproximada es de 8h de tiempo real por cada 100 órbitas simuladas. Los valores de esta tabla se han obtenido con un equipo con las características de la Tabla 8, simulando con 12 hilos de cálculo en paralelo.