

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS**

DEPARTAMENTO DE FÍSICA DE LA TIERRA Y ATROFÍSICA



**TRABAJO DE FIN DE GRADO**

Código de TFG: FTA06

Perspectiva física del origen y evolución de la Tierra

Physics view on the origin and evolution of the Earth

Supervisora: Ana M. Negrodo Moreno

**Nazaret González Balsera**

Grado en Física

Curso académico 2023-2024

Convocatoria Julio

Calificación: 9,4

## **Resumen:**

Este trabajo aborda, mediante una revisión bibliográfica, algunas cuestiones abiertas sobre el origen del sistema solar y la habitabilidad planetaria, recogiendo las hipótesis más aceptadas en la actualidad. Se proporciona una visión general de los requisitos necesarios para la existencia de vida en un planeta, centrándose principalmente en la existencia de agua líquida. Además, se incluyen modelos cuantitativos que reflejan la relación entre las características intrínsecas y extrínsecas de un planeta y la posible existencia de agua líquida. Se representa la evolución de la temperatura superficial a lo largo del tiempo para la Tierra y para Venus, sirviendo esta representación para discutir la presencia o no de agua líquida en estos planetas en una edad temprana. Por último, se realiza una revisión del conocimiento actual sobre los exoplanetas descubiertos hasta la fecha y su posible habitabilidad.

## **Abstract:**

This work addresses, through a literature review, some open questions about the origin of the Solar System and planetary habitability, gathering the most widely accepted hypotheses today. It provides an overview of the necessary requirements for existence of life on a planet, focusing primarily on the presence of liquid water. Additionally, quantitative models are included that show the relationship between the intrinsic and extrinsic characteristics of a planet and the possible existence of liquid water. The evolution of surface temperature over time is represented for Earth and Venus, serving this representation to discuss the presence or absence of liquid water on these planets in their early ages. Lastly, a review of the current knowledge about the exoplanets discovered to date and their potential habitability is conducted.

# Índice

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Introducción y objetivos</b>                               | <b>2</b>  |
| <b>2. Origen del planeta Tierra</b>                              | <b>2</b>  |
| <b>3. Habitabilidad</b>  | <b>3</b>  |
| 3.1. Concepto de habitabilidad . . . . .                         | 3         |
| 3.2. Zona de habitabilidad y presencia de agua líquida . . . . . | 4         |
| 3.3. Modelos de radiación . . . . .                              | 5         |
| 3.3.1. Modelo de radiación de energía . . . . .                  | 5         |
| 3.3.2. Reajuste del modelo de radiación . . . . .                | 7         |
| 3.4. Efecto de los gases en la habitabilidad . . . . .           | 11        |
| <b>4. Exoplanetas: Detección y posible habitabilidad</b>         | <b>13</b> |
| 4.1. Detección de exoplanetas . . . . .                          | 14        |
| 4.1.1. Imágenes directas . . . . .                               | 14        |
| 4.1.2. Velocidad radial o técnica Doppler . . . . .              | 14        |
| 4.1.3. Fotometría de tránsitos . . . . .                         | 15        |
| 4.1.4. Microlentes gravitacionales . . . . .                     | 15        |
| 4.1.5. Astrometría . . . . .                                     | 15        |
| 4.2. Características y clasificación de exoplanetas . . . . .    | 15        |
| 4.3. Habitabilidad en exoplanetas . . . . .                      | 16        |
| <b>5. Discusión</b>  | <b>17</b> |
| 5.1. Origen del planeta Tierra . . . . .                         | 17        |
| 5.2. Habitabilidad . . . . .                                     | 17        |
| 5.3. Exoplanetas . . . . .                                       | 18        |
| <b>6. Conclusiones</b>   | <b>19</b> |
| <b>7. Referencias</b>  | <b>19</b> |

## 1. Introducción y objetivos

El origen y la naturaleza de la Tierra han sido objeto de estudio para el ser humano y la comunidad científica durante mucho tiempo. Son muchos los interrogantes que rodean a este tema y existen varias hipótesis acerca de su formación, aún así, a pesar de los continuos avances, las distintas hipótesis sobre la formación de nuestro planeta no pueden ser totalmente confirmadas. El objetivo de este trabajo es, en primer lugar, explicar el origen de la Tierra y tratar algunas de las cuestiones abiertas relativas a las condiciones necesarias para la habitabilidad planetaria, centrándonos principalmente en la existencia de agua líquida. Por último, hablaremos de los exoplanetas y su detección, así como del conocimiento actual sobre su posible habitabilidad.

Para el estudio del origen de la Tierra, se ha realizado una revisión bibliográfica que recoge el conocimiento actual de las hipótesis de formación estelar y formación de los planetas.

Para abordar el tema de la habitabilidad, se combinará la revisión bibliográfica de libros y artículos y la realización de cálculos para cuantificar algunos procesos para la Tierra y Venus. Además, se realizará una representación de la temperatura en estos planetas, desde su origen hasta la actualidad, analizando la habitabilidad en ambos planetas.

Por último, mediante una revisión bibliográfica, se recoge información relativa a los exoplanetas descubiertos y su posible habitabilidad.

## 2. Origen del planeta Tierra

Existen varias hipótesis sobre la formación del sistema solar. Entre las más conocidas destacan la Captura Estelar, la Hipótesis de la Supernova y la Hipótesis Nebular, siendo esta última la que explicaré a continuación por ser la más aceptada por la comunidad científica hasta la fecha.

Las rocas más primitivas del sistema solar, cuya antigüedad viene determinada por la datación isotópica de meteoritos mediante sistemas como el de rubidio-estroncio, son de hace 4.56 mil millones de años (Lunine, 2013). Para entender cómo el material de esas nubes de gas y polvo de hace varios miles de millones de años evolucionó hacia el sistema que conocemos hoy, formado por el Sol y los demás planetas, debemos centrarnos en el proceso de formación de las estrellas a partir de la Hipótesis Nebular, según la cual, las estrellas se forman a partir del colapso de grandes nubes moleculares de gas y polvo.

La mayor parte del gas de estas nubes es hidrógeno y helio, aunque el 0.1 % de los átomos en las moléculas que componen el gas y el polvo constituyen elementos más pesados que el helio (Lunine, 2013). Una nube interestelar comienza a contraerse cuando las fuerzas de la gravedad superan las fuerzas de presión internas y la nube se vuelve gravitacionalmente inestable. Sin embargo, hay factores como la turbulencia y el campo magnético que influyen en el colapso y controlan la formación de estrellas (Maeder, 2009).

En estas nubes hay regiones de alta densidad, cúmulos densos y fríos, que son gravitacionalmente inestables y pueden colapsar. Estos se crean debido a que las nubes moleculares tienen altos niveles de turbulencia interna que hacen que el disco se fragmente y cree estos cúmulos de material más denso (Lunine, 2013). Sin embargo, no todos estos cúmulos pueden colapsar. La presencia de campos magnéticos en la nube atrae partículas cargadas que se desplazan a lo largo de las líneas de fuerza magnéticas. Cuando estas partículas chocan de forma aleatoria con las partículas neutras, ejercen

una presión a todo el gas y esto contrarresta el colapso, y, por tanto, obstaculiza la formación estelar. Sin embargo, este proceso no evita el colapso en cúmulos más densos. Estas partículas cargadas surgen debido a que las partículas neutras absorben fotones ultravioletas que provienen de estrellas incrustadas en la nube. Estos iones se mantienen durante un tiempo determinado hasta que capturan electrones libres y vuelven a ser neutros de nuevo.

En las regiones más densas, los fotones UV penetran menos, por lo que estas regiones de la nube tienen menos átomos cargados (Lunine, 2013). Si hay menos iones, menor es la presión que ejerce el campo magnético sobre el gas y, por tanto, el campo magnético es menos efectivo para inhibir el colapso de los fragmentos más densos de la nube.

La nube se encuentra en un estado de equilibrio inestable donde, si se forma un cúmulo de gas de suficiente densidad como para que la atracción gravitacional mutua del gas y el polvo haga que el material se acerque más entre sí y se vuelva más denso, la nube perderá su población de iones (por tanto, el soporte debido al campo magnético) y comenzará a colapsar formando un núcleo más y más denso (Lunine, 2013). Este núcleo colapsando es el comienzo de la formación de estrellas.

Lunine (2013), además, afirma que, debido al colapso de este núcleo, el material cae cada vez más al centro. Además, los choques de las partículas producen calor y la temperatura y la presión aumentan de forma que se dan las condiciones para iniciar la fusión del hidrógeno en helio, liberando energía. Esta liberación de energía crea una presión hacia afuera del núcleo que es compensada con la presión hacia el interior debida a la materia que tiende hacia el centro del núcleo. Por tanto, este núcleo equilibrado en el que se está produciendo la fusión del hidrógeno en helio, está rodeado de gas y polvo cayendo y constituye una estrella que acaba de formarse.

En cuanto a la formación de planetas, las hipótesis se basan en el giro intrínseco de la nube de gas. La fuente de formación es el momento angular de esta nube. A medida que el gas colapsa y se vuelve más compacto, por conservación del momento angular, gira más rápido (Lunine, 2013). Antes de alcanzar la máxima contracción (cuando el núcleo alcance el tamaño típico de una estrella como el Sol), la velocidad de rotación ha aumentado demasiado como para permitir un colapso continuo y, por tanto, la materia que está girando alrededor del núcleo comienza a estar en órbita alrededor de la protoestrella (disco protoplanetario). En el caso de nuestro sistema solar, este disco es llamado Nebulosa Solar. A partir de este momento, son las colisiones entre partículas las que originan la formación de los planetas.

Las colisiones entre partículas hacen que el material caiga hacia el interior, por lo que la mayor parte se concentra en la protoestrella. Una parte del polvo se va uniendo durante la colisión y este material acaba creciendo, formando cuerpos más grandes llamados planetesimales. Estos planetesimales atraen material y se aglomeran para formar protoplanetas que continúan atrayendo más material y eventualmente forman planetas más grandes.

El sistema solar tardó aproximadamente 10 millones de años en formarse, aunque la formación de los planetas terrestres, como la Tierra, se extendió hasta los 100 millones de años (Lunine, 2013).

### **3. Habitabilidad**

#### **3.1. Concepto de habitabilidad**

Se define la habitabilidad como el conjunto de requisitos mínimos necesarios para sustentar y perpetuar en el tiempo la actividad de uno o más organismos (Butturini et al., 2020). Estos requi-

sitos mínimos se resumen en: energía, un medio solvente, condiciones físico-químicas ambientales y materia. Estos requisitos no son independientes, están muy relacionados entre sí. Un lugar se define como habitable si cumple los requisitos mencionados anteriormente, pero es estéril. Un lugar se define como hábitat si, además de cumplir los requisitos, es colonizado por organismos.

El estudio de la habitabilidad se realiza, inevitablemente, desde un punto de partida geocéntrico. La única vida conocida hasta ahora está necesariamente vinculada al agua y, por este motivo, se considera que el único requisito indispensable es el agua líquida. Cabe destacar que el concepto de habitabilidad está continuamente expuesto a ser reformulado debido a una serie de factores como, observaciones que revelan nuevos detalles de la superficie y el interior de planetas y satélites o la detección de exoplanetas. Esta información obtenida de las observaciones es comparada con la Tierra, lo que provoca que el concepto de habitabilidad esté en continuo dinamismo.

### 3.2. Zona de habitabilidad y presencia de agua líquida

Se puede definir la zona de habitabilidad como la región alrededor de una estrella en la que un planeta rocoso puede mantener agua líquida en su superficie (Kasting et al., 2013). La presencia de agua líquida depende de las condiciones de presión y temperatura. El agua líquida (destilada) a 1 bar puede tener una temperatura entre los 0° y los 100°C.

Dada la definición de habitabilidad anterior y su fuerte dependencia con el agua líquida, es posible calcular la distancia a la que debe situarse un objeto para tener una temperatura compatible con la existencia de agua líquida a partir de un modelo de radiación. Este modelo consiste en hacer un balance energético de un objeto que se encuentra a una determinada distancia de una fuente de energía radiante. Sin embargo, hay que tener en cuenta diversos factores que influyen en la posibilidad de un objeto de albergar agua líquida. Entre estos factores podemos destacar factores extrínsecos (características de la fuente de energía radiante, temperatura efectiva y tamaño de la misma, distancia entre esta y el objeto considerado) e intrínsecos (características quimicofísicas o tamaño del objeto).

En cuanto a las características de la fuente de energía radiante (estrella), es importante mencionar que su luminosidad no es constante. Las estrellas no son eternas y su brillo sufre variaciones ya que están sometidas a un proceso de combustión nuclear interno que condiciona su potencia radiante. Este hecho condiciona la habitabilidad, puesto que, la distancia a la que se debe encontrar la estrella del objeto para que este albergue agua líquida, se verá afectada por la luminosidad. Durante la secuencia principal, es decir, la fase madura de una estrella, cuando comienza a fusionar hidrógeno, las estrellas incrementan su luminosidad de forma gradual al aumentar su tamaño mediante la ecuación de Stefan-Boltzmann:

$$L_{\star} = 4\pi R_{\star}^2 \sigma T_{ef}^4$$

donde  $R_{\star}$  es el radio de la estrella,  $T_{ef}$  su temperatura efectiva<sup>1</sup> y  $\sigma = 5,67010^{-8} W m^{-2} K^{-4}$  es la constante de Stefan-Boltzmann. En el caso del Sol, estas magnitudes toman unos valores de  $R_{\star}=695.508$  km y  $T_{ef}= 5778$  K.

La secuencia principal termina cuando se agota el hidrógeno del núcleo y en ese momento, el núcleo se contrae (Maeder, 2009). El hidrógeno sigue fusionándose en una capa ancha. A medida que el núcleo se contrae, las capas externas se expanden significativamente, resultando en un aumento

---

<sup>1</sup>La temperatura efectiva de una estrella es la temperatura de un cuerpo negro que emite la misma energía por unidad de superficie y tiempo de la estrella.

del radio de la estrella. Debido a la expansión, la superficie de la estrella se enfría y, por tanto, su temperatura efectiva disminuye. Sin embargo, el aumento del radio es más significativo que la disminución de temperatura, lo que resulta en un aumento de la luminosidad de la estrella. La salida de una estrella de su secuencia principal, implica cambios importantes en su luminosidad, estructura y, por tanto, en la radiación que emite. Esto tiene importantes consecuencias en la habitabilidad, puesto que, debido a este aumento de luminosidad, la temperatura de los planetas que orbitan esta estrella puede aumentar significativamente y podrían estar expuestos a una radiación extrema, resultando en un lugar inhóspito para la vida.

El incremento de la luminosidad hace que la habitabilidad sea transitoria, pues, puede hacer que un objeto que al principio reunía los requisitos para la existencia de agua líquida deje de cumplirlos. Según Butturini et al. (2020), en términos de la habitabilidad, son de interés las estrellas que permanezcan en la secuencia principal el tiempo suficiente para que una biosfera pueda surgir, consolidarse y evolucionar hacia formas de vida más complejas. A menor masa, las estrellas tienen un ritmo más lento del incremento de luminosidad. En las estrellas más escasas y masivas, la etapa en la secuencia principal es muy corta, sin embargo, las estrellas más abundantes (con masas entre  $0,1$  y  $1,5M_{sol}$ ), que son las estrellas tipo F, G, K y M, tienen periodos en la secuencia principal que pueden variar entre  $2,5$  y  $3000$  Ga. En nuestro caso, el Sol, en la etapa de secuencia principal, con una masa de  $1,99 \cdot 10^{30}$  kg y una temperatura de  $5778K$ , es un prototipo de estrella tipo G.

En cuanto a los factores intrínsecos, se verá más adelante la importancia de incluirlos en el modelo de radiación para obtener unos resultados consistentes con lo observado. Un modelo de radiación que no incluya estos factores proporcionará unas temperaturas de equilibrio de los planetas que difieren de las temperaturas observadas.

### 3.3. Modelos de radiación

Existen diversos modelos de radiación que proporcionan diferentes límites de la franja de habitabilidad, en función de los factores intrínsecos que se tengan en cuenta. Este trabajo se centrará en analizar las diferencias existentes entre un modelo de radiación de energía en el que no se reflejan características intrínsecas del objeto estudiado y un modelo de radiación de energía en el cual se tiene en cuenta la presencia de la atmósfera. Este último, por tanto, incluye la contribución del efecto invernadero y del albedo.

#### 3.3.1. Modelo de radiación de energía

En este modelo se describe el balance energético de un objeto irradiado por una fuente energética. Se tratará el objeto como un cuerpo negro, por tanto, su radiación dependerá únicamente de su temperatura. Una vez alcanzado el equilibrio radiativo entre la fuente y el objeto (en nuestro caso, una estrella y un planeta), el objeto llega a su temperatura de equilibrio,  $T_{eq}$ . En este estado, la energía radiante reemitida al exterior por el objeto,  $E_{sal}$ , es igual a la recibida de la fuente,  $E_{ent}$ :

$$E_{ent} = E_{sal} \quad (1)$$

Podemos expresar la energía que llega de la fuente como:

$$E_{ent} = \pi R_{ob}^2 S_{\star} \quad [W] \quad (2)$$

siendo  $R_{ob}$  el radio del objeto y  $S_{\star}$  el flujo radiante que emite la fuente y llega al objeto por unidad de superficie y tiempo.

El flujo tiene a su vez dependencia con la luminosidad de la estrella:

$$S_{\star} = \frac{L_{\star}}{4\pi a^2} \quad [Wm^{-2}] \quad (3)$$

donde  $a$  es la distancia que separa el objeto de la fuente radiante.

La luminosidad, energía emitida por unidad de tiempo por la fuente, se define como:

$$L_{\star} = 4\pi R_{\star}^2 \sigma T_{ef}^4 \quad [W] \quad (4)$$

siendo  $\sigma$  la constante de Stefan-Boltzmann<sup>2</sup>,  $T_{ef}$  la temperatura efectiva<sup>3</sup> de la fuente y  $R_{\star}$  su radio.

En cuanto a la energía que el objeto reemite al exterior, esta es directamente proporcional a la cuarta potencia de su temperatura de equilibrio, multiplicada por su superficie:

$$E_{sal} = 4\pi R_{ob}^2 \sigma T_{eq}^4 \quad [W] \quad (5)$$

Donde se ha asumido que toda la superficie del objeto contribuye en la irradiación de la energía radiante  $E_{sal}$ .

En la Figura 1, he realizado un diagrama de los flujos energéticos existentes entre el espacio y la superficie del planeta para facilitar la comprensión del balance radiativo.

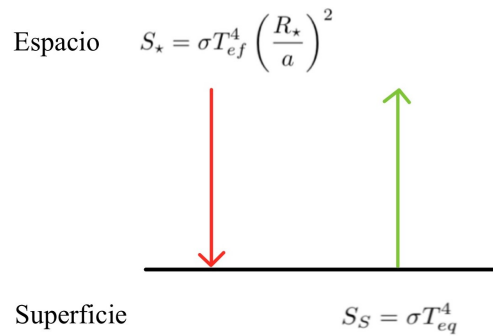


Figura 1: Esquema de flujos energéticos

Sustituyendo la ecuación (4) en (3) y la ecuación (3) en (2) y haciendo uso de la igualdad (1), hallamos la temperatura de equilibrio:

$$T_{eq} = T_{ef} \sqrt{\frac{R_{\star}}{2a}} \quad [K] \quad (6)$$

<sup>2</sup> $\sigma = 5,6710^{-8} Wm^{-2} K^{-4}$

<sup>3</sup>El producto  $\sigma T^4$  describe la ley de Stefan-Boltzmann, que afirma que la potencia radiante que emite un cuerpo negro es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura.

Esta expresión permite calcular la temperatura de un planeta en función de la temperatura efectiva y el radio de la estrella y la distancia entre el planeta y la estrella. Mediante esta expresión, podemos determinar la distancia a la que debería encontrarse un planeta respecto al Sol para que su superficie tenga entre  $0^{\circ}\text{C}$  y  $100^{\circ}\text{C}$ . Esta distancia constituye la franja de habitabilidad planetaria. Tras unos sencillos cálculos, esta distancia oscila entre 0,56 UA y 1,04 UA.

La Tierra se encuentra en el límite, a 1 UA (Butturini et al., 2020). Además, de acuerdo con el modelo, la Tierra (situada a unos 149.597.870,7 km del Sol) debería tener una temperatura de equilibrio,  $T_{eq}$ , de  $5,4^{\circ}\text{C}$ . Sin embargo, la temperatura promedio medida en la superficie de la Tierra es  $15^{\circ}\text{C}$ , por lo que habría un error de  $9,6^{\circ}\text{C}$  respecto a la obtenida a partir del modelo.

Por otro lado, si hacemos lo mismo para Venus (situada a unos 108.000.000,2 km del Sol), el planeta debería tener una temperatura de equilibrio,  $T_{eq}$ , de  $55^{\circ}\text{C}$ . De nuevo, este dato difiere en gran medida de la temperatura promedio medida en la superficie de Venus, que es aproximadamente  $460^{\circ}\text{C}$ .

Estos errores evidencian la necesidad de tener en cuenta otros factores en el modelo de radiación que afectan al balance radiativo y que, por tanto, condicionan la habitabilidad planetaria.

### 3.3.2. Reajuste del modelo de radiación

Como hemos podido observar en los cálculos anteriores, para ambos casos, Tierra y Venus, sus temperaturas medidas son mayores que las de equilibrio. Esta diferencia es debida a la existencia de las atmósferas. Los flujos energéticos entrantes y salientes del planeta experimentan variaciones cuantitativas al atravesar la atmósfera.

Desde la segunda mitad del siglo XIX, sabemos que algunos gases tienen la capacidad de interceptar y reemitir energía radiante y así acumular calor en la superficie del planeta. De esta forma, la temperatura de la superficie del planeta aumenta por encima de la temperatura de equilibrio,  $T_{eq}$ . Este efecto se conoce como efecto invernadero y su cuantificación se introduce en el balance radiativo mediante un coeficiente,  $\varepsilon$ . El coeficiente  $\varepsilon$ , oscila entre 0 (efecto invernadero nulo) y 2 (efecto invernadero desbocado) como se verá más adelante.

Además, una parte importante de la energía radiante solar se refleja hacia el exterior. Se le denomina albedo a la fracción de radiación solar incidente que es reflejada por la Tierra hacia el exterior (Stephens et al., 2015). El albedo limita la cantidad de energía radiante estelar que absorbe el planeta. En los próximos cálculos vendrá representado por  $A$  y su valor oscila entre 0 y 1.

Por tanto, es conveniente llevar a cabo un reajuste de la franja de habitabilidad incluyendo estos parámetros en el balance radiativo. Consideramos un nuevo sistema formado por el espacio, la atmósfera y la superficie del planeta, en el cuál, la atmósfera refleja una fracción de la radiación entrante (albedo,  $A$ ) y absorbe una parte de la radiación que emite la superficie (efecto invernadero,  $\varepsilon$ ). Cabe destacar que en la descripción de este modelo se asume una atmósfera estática y con una temperatura homogénea.

La Figura 2 ilustra la distribución de los flujos energéticos entre el espacio, la atmósfera y la superficie del planeta.

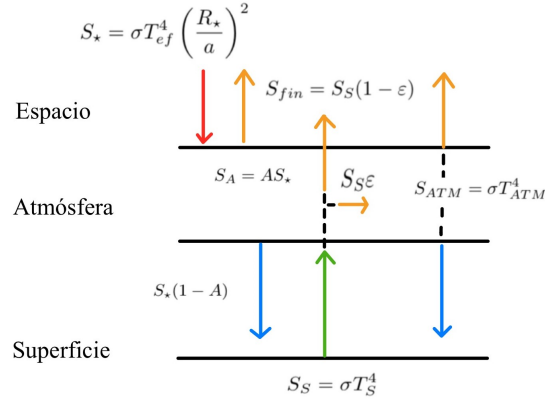


Figura 2: Esquema de flujos energéticos

Siguiendo el esquema, la fuente radiante emite un flujo que viene dado por:

$$S_* = \sigma T_{ef}^4 \left(\frac{R_*}{a}\right)^2 \quad (7)$$

La atmósfera refleja parte de esa radiación entrante al exterior,  $S_A = AS_*$  y otra parte alcanza la superficie,  $S_*(1 - A)$ . Además, la atmósfera emite un flujo energético hacia el exterior y hacia la superficie que es igual en ambas direcciones, puesto que se ha asumido que la atmósfera es isotrópica. Este flujo viene dado por:  $S_{ATM} = \sigma T_{ATM}^4$ .

Por otro lado, la superficie del planeta emite un flujo radiativo debido a su temperatura,  $S_S = \sigma T_S^4$ . Parte de esta radiación emitida por la superficie es absorbida por la atmósfera como consecuencia del efecto invernadero,  $S_S \epsilon$ , y otra parte escapa al efecto invernadero y es emitida hacia el exterior:  $S_f = S_S(1 - \epsilon)$ .

Una vez comprendidas todas las emisiones reflejadas en el esquema, dividimos el balance radiativo en dos partes.

- **Balance energético entre el espacio y la atmósfera**

Siguiendo el esquema, se puede expresar el balance energético entre el espacio y la atmósfera de la siguiente manera:

$$S_* = S_A + S_f + S_{ATM} \rightarrow S_* = AS_* + S_f + S_{ATM}$$

Por tanto:

$$S_*(1 - A) = S_f + S_{ATM} \quad [Wm^{-2}] \quad (8)$$

- **Balance energético entre la superficie y la atmósfera**

De la misma forma, igualando la radiación que entra en la superficie con la radiación que esta emite, se tiene:

$$S_S = S_{ATM} + S_*(1 - A) \quad [Wm^{-2}] \quad (9)$$

Despejando  $S_{ATM}$  de (9) y sustituyendo en (8) se obtiene:

$$S_*(1 - A) = S_S(1 - \epsilon) + S_S - S_*(1 - A) \quad (10)$$

$$2S_{\star}(1 - A) = \sigma T_S^4(2 - \varepsilon) \quad [Wm^{-2}] \quad (11)$$

$T_S$  es la temperatura de la superficie del objeto alterada por el efecto invernadero. Como se menciona en el modelo anterior, el flujo radiado por la estrella viene dado por la siguiente expresión:

$$S_{\star} = \sigma T_{ef}^4 \left( \frac{R_{\star}}{a} \right)^2 \quad [W m^{-2}] \quad (12)$$

Por tanto, tenemos que:

$$S_{\star}(1 - A) = \sigma T_{ef}^4 \left( \frac{R_{\star}}{a} \right)^2 (1 - A) \quad [Wm^{-2}] \quad (13)$$

Por último, sustituyendo la ecuación (13) en la (11) se obtiene una expresión que permite calcular  $T_S$  :

$$T_S^4 = \frac{2}{2 - \varepsilon} T_{ef}^4 \left( \frac{R_{\star}}{2a} \right)^2 (1 - A) = \frac{2}{2 - \varepsilon} T_{eq}^4 (1 - A) \quad [K^4] \quad (14)$$

Siendo  $T_{eq}$  la temperatura de equilibrio del objeto, mencionada en el modelo anterior.

En la siguiente tabla muestro los valores de  $\varepsilon$  estimados para que la temperatura  $T_S$  calculada mediante la expresión (14) sea igual a la temperatura medida de cada planeta,  $T_{med}$ . Además, tal y como se recoge en Butturini et al. (2020), en la tabla se refleja el valor del albedo tomado para cada planeta:

| Planeta | $T_{eq}(^{\circ}C)$ | $T_S(^{\circ}C)$ | A    | $\varepsilon$ |
|---------|---------------------|------------------|------|---------------|
| Venus   | 55                  | 460              | 0,75 | 1,98          |
| Tierra  | 5                   | 15               | 0,3  | 0,78          |

Cuadro 1: Valores de  $\varepsilon$  estimados para Venus y la Tierra.

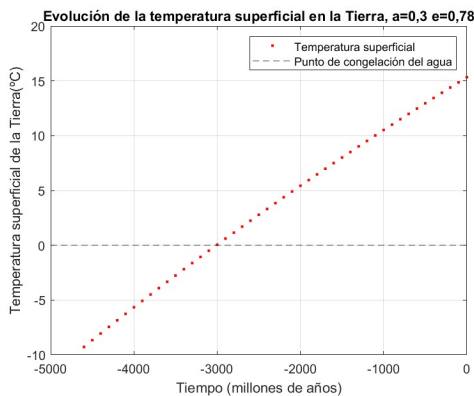
Como puede observarse, el efecto invernadero en Venus es muy elevado para justificar tan altas temperaturas en su superficie. La causa principal del elevado efecto invernadero en este planeta es la alta presión atmosférica de  $CO_2$  (aproximadamente 90 bares) (Butturini et al., 2020). Una alta presión atmosférica significa una alta densidad de  $CO_2$ , por tanto, al haber una gran cantidad de este gas, la atmósfera atrapa gran parte de la radiación infrarroja reirradiada por la superficie. Esta radiación calienta la atmósfera y eleva aún más la temperatura de la superficie del planeta. En la Tierra, el principal causante del efecto invernadero es el vapor de agua, aportando entre un 50-75 %, seguido del  $CO_2$  con un aporte del 10-20 %.

Se puede comprobar mediante la expresión (14) que si  $\varepsilon=0$ , no hay efecto invernadero y la atmósfera es completamente transparente a la radiación emitida por la superficie del objeto. Si  $\varepsilon=2$ , la atmósfera es totalmente opaca a la radiación emitida por el objeto, el efecto invernadero se desboca y la temperatura de la superficie del objeto tiende al infinito.

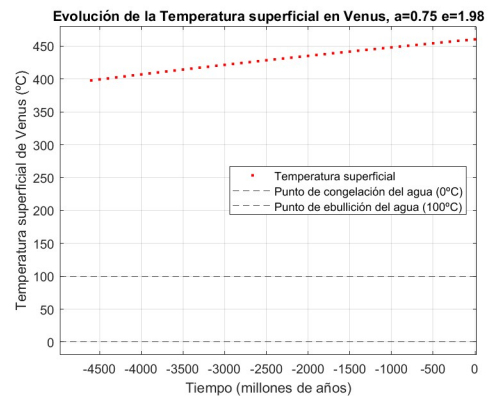
Es importante señalar que casi dos tercios del albedo de la Tierra son producidos por las nubes y los aerosoles. Sin embargo, en la Tierra, las nubes también desempeñan un papel importante en la absorción de la radiación infrarroja que emite la superficie, lo que contribuye al efecto invernadero. Objetos cubiertos por una capa de hielo, como Encélado y Europa, tiene albedos más elevados, mientras que los más bajos suelen corresponder a objetos rocosos sin atmósferas. No obstante, existen algunas excepciones, como Io, con un albedo muy elevado a pesar de ser rocoso y casi sin atmósfera. Los objetos rocosos con atmósfera y los gaseosos tienen albedos comprendidos entre 0,3

y 0,4 (a excepción de Venus). En la Tierra y en Marte, la fracción de luz reflejada,  $A$ , es alrededor de un 0,35 y 0,25 respectivamente, mientras que en Venus alcanza el 0,75.

Retomando lo comentado unas páginas atrás, la luminosidad solar ha variado a lo largo del tiempo. Fuentes como Feulner (2012) recogen que la luminosidad del Sol en la edad temprana de la Tierra, en el eón Hádico, era de aproximadamente el 70 % del valor actual. El eón Hádico abarca el período entre la formación de la Tierra, hace 4,56 Ga, y 3,8 Ga. Teniendo en cuenta esta variación de la luminosidad, realizando una interpolación, es posible representar cómo ha variado la temperatura en la superficie de la Tierra y de Venus a lo largo del tiempo. Además, puesto que la existencia de agua líquida es posible entre los  $0^{\circ}\text{C}$  y los  $100^{\circ}\text{C}$ , se puede estudiar la posible habitabilidad en ambos planetas a lo largo del tiempo. Para cada planeta, se ha tomado el valor de albedo y de efecto invernadero recogido en el *Cuadro 1*.



(Figura 3a) Evolución de la temperatura en la superficie de la Tierra.



(Figura 3b) Evolución de la temperatura en la superficie de Venus.

En lo que respecta a la Tierra, observando la Figura 3a, se puede ver que hay un período de tiempo, desde la formación de la Tierra hace 4600 millones de años hasta aproximadamente 3000 millones de años, en el que la temperatura está por debajo del punto de congelación del agua. Por tanto, cabría esperar que en este período no hubiese agua líquida en la superficie del planeta, resultando imposible la vida en esas condiciones. Es decir, la superficie de la Tierra en ese intervalo habría pasado por una intensa edad de hielo (Feulner, 2012). Además, esta reducción en la radiación solar emitida podría tener efectos significativos en el clima del planeta debido a que el aumento de hielo produce un incremento del albedo, que conduce a un mayor enfriamiento. Sin embargo, Harrison (2009) afirma que existen evidencias que indican que existió agua líquida en la superficie de la Tierra temprana. Estas evidencias se basan en el estudio del circón ( $ZrSiO_4$ ) preservado del Hádico en rocas más jóvenes. El circón es un mineral duradero que conserva mucha información de las condiciones ambientales de la Tierra temprana, por lo que muchos de los elementos que el circón incorpora en su estructura, revelan información sobre las condiciones en las que se formó. Entre estas condiciones, se revela que el circón se formó en presencia de agua líquida a bajas temperaturas.

En lo referido a Venus, observando la Figura 3b, la temperatura en la superficie de este planeta, a pesar de ser menor a una edad más temprana, parece haber sido siempre muy elevada, impidiendo la presencia de agua líquida. El elevado efecto invernadero en este planeta no habría hecho posible la existencia de agua líquida en ningún período de la historia. Sin embargo, la presencia o no de agua líquida en la superficie primitiva de Venus es un tema de debate y gran interés científico actualmente. Existen algunas hipótesis que sugieren unas temperaturas superficiales en Venus más templadas en una edad más temprana, que permitirían la existencia de océanos de agua líquida. Según Chaffin et al. (2024), Venus habría tenido una cantidad de agua similar a la de la Tierra,

pero, un aumento significativo del efecto invernadero elevó la temperatura superficial, despojando al planeta de todos sus océanos. El motivo de esta pérdida de océanos no puede deberse únicamente a una evaporación, pues el planeta continúa perdiendo agua en el espacio. Podría deberse a un proceso llamado “recombinación disociativa de  $HCO^+$ ”. Este proceso consiste en la combinación del  $H_2O$  y  $CO_2$  en la atmósfera, formando el ion  $HCO^+$ . Los electrones en la atmósfera se recombinan con estos iones, dividiéndolos en dos. Mediante este proceso, el hidrógeno puede escapar al espacio, privando a Venus de uno de los dos componentes del agua.

Por otro lado, resulta sencillo calcular a qué distancia debería situarse Venus para que pudiera ser un planeta habitable con una temperatura de  $15^\circ\text{C}$ , a partir de las expresiones (6) y (14). En primer lugar, mediante la ecuación (14) se calcula la temperatura de equilibrio  $T_{eq}$ , imponiendo que la temperatura de la superficie del planeta,  $T_S$ , sea igual a la de la Tierra ( $T_S=15^\circ\text{C}=288\text{ K}$ ) y un albedo y un efecto invernadero igual al de Venus actualmente ( $A=0,75$  y  $\varepsilon=1,98$ ).

Obtenemos una temperatura de equilibrio:

$$T_{eq}= 128,8\text{ K.}$$

Una vez calculada esta temperatura, con la ecuación (6), es posible calcular la distancia,  $a$ , a la que tendría que situarse el planeta Venus respecto del sol.

Se obtiene una distancia:

$$a= 4,6\text{ UA.}$$

Con este cálculo, podría concluirse que, si Venus se situase a una distancia de 4,6 UA del Sol, sería un planeta habitable. Sin embargo, este sencillo modelo de radiación, de nuevo, no contempla detalles muy importantes para la habitabilidad, como, por ejemplo, el cambio de fase de los gases. De esta forma, para ser útil, este modelo debería incluir las propiedades químicas y físicas de las atmósferas, puesto que, como se explicará en el siguiente apartado, estas tendrán un importante efecto en la posible habitabilidad planetaria.

### 3.4. Efecto de los gases en la habitabilidad

En este apartado se tratará la importancia de los gases de efecto invernadero y cómo influyen en la habitabilidad planetaria, especialmente en lo referido a sus cambios de fase.

Como se ha mencionado anteriormente, es necesario incluir en un modelo radiativo las características de las atmósferas. Un ejemplo de modelos que incluyen estas propiedades, serían los radiante-convectivos, que consisten en modelos más sofisticados en los que se incluyen las características de cada tipo de atmósfera, la cobertura de las nubes, el tamaño, la excentricidad, la oblicuidad y la velocidad de rotación del planeta, etc. Cada caso concreto tendrá un efecto invernadero y un albedo característico y, por tanto, cada tipo de planeta-atmósfera tendrá una franja de habitabilidad propia.

Sirviendo de ejemplo el caso expuesto con anterioridad, el planeta Venus, se obtuvo una distancia respecto al Sol a la que la temperatura del planeta le permitiría ser habitable de 4,6 UA. Sin embargo, si tenemos en cuenta el comportamiento de los gases, a esa distancia, el  $CO_2$  estaría a  $-200^\circ\text{C}$ , por lo que este gas se solidificaría (Butturini et al., 2020). Como consecuencia de la solidificación, parte de este  $CO_2$  precipitaría a la superficie del planeta, modificando su albedo y efecto invernadero. El planeta Venus, a esta distancia, sería incapaz de conservar su atmósfera de  $CO_2$ , produciéndose una glaciación irreversible que impediría la habitabilidad de este planeta. Otra

manera de entender el efecto de estos gases es estudiando cómo afecta su mayor o menor presencia en las atmósferas. De esta forma, una menor cantidad de vapor de agua en la atmósfera significaría un albedo menor, debido a la menor presencia de nubes, y un efecto invernadero menos intenso.

Teniendo en cuenta la influencia de los gases en la habitabilidad, se puede establecer el límite inferior y exterior de la franja de habitabilidad en función del comportamiento de estos gases. Kasting et al. (1993) estimó dos límites inferiores para la zona de habitabilidad. En primer lugar, el conocido como “invernadero húmedo”, dado por la distancia a la que la estratosfera de un planeta se humedece (es decir, el vapor de agua alcanza esta capa). Este vapor de agua, susceptible a la fotodisociación, provoca una pérdida de agua debido al escape de hidrógeno al espacio. Este proceso de fotodisociación consiste en la descomposición de las moléculas de agua ( $H_2O$ ) en la atmósfera superior, debido a la absorción de radiación ultravioleta, en sus componentes más simples, hidrógeno,  $H_2$  y oxígeno,  $O_2$ . El hidrógeno, al ser un gas muy ligero, puede escapar al espacio resultando en una disminución del agua del planeta, como se explicará más adelante. Un límite inferior más estricto es el llamado “límite de invernadero fuera de control”, dado por la distancia a la cuál, la temperatura es tan elevada, que el vapor de agua satura la troposfera y llega a la estratosfera. Un calentamiento adicional a las altas temperaturas, debido a estas cantidades de vapor de agua, puede llevar a un efecto invernadero descontrolado que haría del planeta un lugar inhabitable. Por otro lado, el límite exterior queda fijado en aquella distancia para la cuál, las bajas temperaturas provocan la condensación del  $CO_2$ , debilitando el efecto invernadero, enfriando el planeta y aumentando el albedo debido a la formación de nubes de  $CO_2$ . El planeta sufriría una descontrolada glaciación si sobrepasara este límite exterior. En cambio, Forget y Pierrehumbert (1997) no consideraba este límite exterior como válido porque las nubes de  $CO_2$  podían calentar la superficie del planeta.

No obstante, es preciso destacar que ambos gases,  $CO_2$  y vapor de agua, aunque parecen no interactuar entre sí, están estrechamente vinculados en términos de su impacto en la temperatura planetaria. Un calentamiento inicial ocasionado por la presencia de dióxido de carbono (por el efecto invernadero) provoca un aumento de vapor de agua que, por un lado, puede potenciar aún más el efecto invernadero causado por el  $CO_2$ , aumentando el calentamiento inicial producido por este. Sin embargo, una mayor cantidad de vapor de agua también puede tener un efecto contrario, pues una mayor formación de nubes aumenta el albedo, produciendo un enfriamiento del planeta. Como puede verse, estos gases se relacionan entre sí a través de un vínculo muy estrecho y complejo.

Un factor adicional que debe considerarse respecto a la influencia de los gases en la habitabilidad es la posibilidad de que estos gases escapen de la atmósfera. Este fenómeno, conocido como fuga atmosférica, puede modificar la composición atmosférica, causando una pérdida de masa del sistema y, por tanto, afectando a la capacidad del planeta para mantener condiciones habitables. Los mecanismos que dan lugar a estas fugas son muy complejos pero, suelen clasificarse en dos grupos: térmicos y no térmicos (Butturini et al., 2020). Estas fugas suceden en la parte más externa de la termosfera. Para que una partícula pueda escapar de la atmósfera, deben cumplirse una serie de condiciones. La fuga se producirá cuando la partícula, una vez que ha llegado a la capa más externa de la atmósfera y se ha fragmentado en los elementos que la componen, alcanza una energía cinética ( $E_C$ ) y una velocidad ( $V_c$ ) lo suficientemente elevadas como para vencer la fuerza gravitacional del planeta. Esta fuga finaliza si la partícula no colisiona con otras que puedan frenarla.

Esa energía mínima necesaria para que una molécula de gas escape de la atmósfera, se puede expresar como:

$$E_C = \frac{mV_C^2}{2} = \frac{GMm}{R} \quad (15)$$

$V_C$  es la velocidad de la molécula.  $M$  es la masa del planeta que se está estudiando y  $m$  la masa de la partícula.  $R$  es la distancia entre el centro del planeta y la capa más externa de la ionosfera (exobase) y, por último,  $G$  es la constante de gravitación universal ( $G = 6,6710^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}$ ).

En relación con los procesos térmicos, estos son los procesos por los que la radiación X-EUV (combinación de rayos X y radiación ultravioleta extrema, con longitud de onda corta, por debajo de los 200nm) emitida por la estrella, es absorbida por una molécula en la ionosfera, que se calienta y aumenta su velocidad y energía cinética. Para escapar de la atmósfera, estas moléculas deben superar la velocidad crítica, pero solo una parte del gas suele conseguirlo. Sin embargo, si la absorción es general, muchas moléculas consiguen alejarse del centro de gravedad, por lo que el gas puede escapar en masa con menor velocidad de escape. En este contexto, es posible una corriente masiva de partículas ligeras con la capacidad de arrastrar átomos más pesados como el nitrógeno, el carbono y el oxígeno. Butturini et al. (2020) consideran que la pérdida de hidrógeno en la Tierra actual está muy vinculada a este mecanismo, aunque no es el único.

Por otro lado, los procesos no térmicos son aquellos mediante los cuáles, los gases de la atmósfera escapan debido a interacciones que no están directamente relacionadas con el calentamiento por radiación. Están asociados a la aceleración de, por una parte, moléculas que han sufrido algún tipo de cambio en su estructura química, como pérdida de electrones, disociación y recombinación, o, por otra parte, moléculas que han chocado con electrones más energéticos. En cuanto a la pérdida de electrones, las moléculas pueden sufrir esta pérdida debido a la radiación ultravioleta extrema y rayos X o a colisiones con partículas energéticas, convirtiéndose en iones. Si estos iones se recombinan con electrones, el proceso puede proporcionarles energía suficiente para escapar de la atmósfera. Por otro lado, debido a la absorción de radiación ultravioleta extrema o al choque con partículas energéticas, las moléculas pueden disociarse en átomos o fragmentos más simples. Estos átomos o fragmentos pueden recombinarse formando nuevas moléculas y debido a la energía liberada en el proceso podrían escapar de la atmósfera. En lo referente a choques con electrones más energéticos, las colisiones entre moléculas y electrones acelerados por procesos magnéticos o eléctricos, pueden también transferir energía suficiente a las moléculas para que se produzca el escape.

De esta manera, la concentración de los gases de efecto invernadero afecta de manera significativa a la capacidad de un planeta para mantener una temperatura en la superficie que le permita albergar agua líquida, un requisito indispensable, como ya se ha comentado. Además, la fuga atmosférica puede alterar, con el tiempo, la composición de las atmósferas, produciendo variaciones en la concentración de gases de efecto invernadero y, por tanto, modificando la temperatura del planeta, hecho que puede condicionar significativamente la habitabilidad. Por otro lado, la fuga de hidrógeno puede conducir a una disminución de la cantidad de agua disponible en el planeta.

En resumen, es necesario un análisis exhaustivo de la composición atmosférica y del comportamiento de los gases para el estudio de la habitabilidad de un planeta. Estos factores no solo influyen en la temperatura, sino que también afectan a la capacidad del planeta para preservar su atmósfera y sostener condiciones que puedan sustentar la vida.

## 4. Exoplanetas: Detección y posible habitabilidad

Se puede definir un exoplaneta como un planeta que se encuentra fuera de nuestro sistema solar. Es decir, un planeta que orbita una estrella diferente al Sol.

A fecha de junio de 2024, se han detectado un total de 5671 exoplanetas (NASA Exoplanet Archive, s.f.). Estas observaciones proporcionan información esencial para estudiar la posibilidad de existencia de vida en otros lugares del universo. Entre los datos obtenidos de estas observaciones se incluyen datos relativos a las estrellas que orbitan estos planetas (luminosidad, tamaño, temperatura superficial, densidad, edad, etc) y datos relativos a los sistemas planetarios (si están formados por una o dos estrellas, distancia, excentricidad de las órbitas, periodo) y en función del método de detección se obtiene información sobre algunas características del planeta como su masa, radio y densidad. Además, aunque solo en algunos casos, se obtiene información relativa a sus atmósferas (Butturini et al., 2020).

## 4.1. Detección de exoplanetas

Existen grandes dificultades tecnológicas que impiden detectar todos los planetas que existen, y es por esto que la información obtenida de las observaciones está inclinada hacia grandes planetas que orbitan cerca de sus estrellas. Butturini et al. (2020) afirman que el 90% de los exoplanetas registrados se sitúan a una distancia menor de 2 UA de sus estrellas. Existen diversas técnicas para la detección de exoplanetas entre las que destacan, por un lado, el método de obtención de imágenes directas, y, por otro lado, métodos indirectos que pueden clasificarse en: método de velocidad radial, fotometría de tránsitos, microlentes gravitacionales y astrometría.

### 4.1.1. Imágenes directas

Este método consiste en capturar imágenes del planeta de forma directa y diferenciarlo visualmente de la estrella a la que orbita. Para ello, se emplean coronógrafos y telescopios de alta resolución que bloquean la luz estelar. Este método es efectivo en la detección de planetas con órbitas amplias, es decir, que se encuentran alejados de la estrella cercana. Además, con este método es posible un análisis de la composición atmosférica mediante espectroscopía (Fischer et al., 2014).

### 4.1.2. Velocidad radial o técnica Doppler

Este método se basa en la interacción gravitacional que existe entre un planeta y su estrella más cercana que hace que esta última oscile ligeramente (Fischer et al., 2014). El movimiento de la estrella provoca un desplazamiento Doppler en las líneas espectrales, que permite medir la velocidad radial de la estrella. La velocidad radial de la estrella es la componente de su velocidad medida a lo largo de la línea visual del observador. Este método, detecta la presencia de exoplanetas observando cambios en el espectro de la estrella y midiendo su velocidad. Dado que la fuerza gravitacional es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, esta fuerza es mayor cuanto más cerca se encuentra un planeta de su estrella, por tanto, este método es más efectivo para detectar planetas cercanos a la estrella. Además, los planetas más masivos producen amplitudes de velocidad radial mayores, por lo que se observan desplazamientos mayores en las líneas espectrales, resultando este método más efectivo.

La semiamplitud de velocidad radial, que es una medida de la variación máxima en la velocidad radial de la estrella, viene dada por la siguiente expresión:

$$K_* = 8,95 \text{ cm/s} \sqrt{1 - e^2} \left( \frac{M_P \sin i}{M_\oplus} \right) \left( \frac{M_* + M_P}{M_\odot} \right)^{-2/3} \left( \frac{P}{\text{yr}} \right)^{-1/3} \quad (16)$$

En esta fórmula,  $e$  es la excentricidad de la órbita,  $M_P$  es la masa del planeta (desconocida),  $\sin(i)$  es el seno del ángulo de inclinación del planeta,  $M_{\oplus}$  es la masa de la Tierra,  $M_*$  es la masa de la estrella,  $M_{\odot}$  es la masa del Sol y  $P$  es el periodo orbital del planeta. Conocidos todos los parámetros, se puede obtener la masa mínima del planeta, dada por  $M_P \sin(i)$ , mediante la ecuación (16). La masa real del planeta no es conocida porque está modulada por la inclinación, también desconocida mediante este método.

A través de este método se han detectado el 19 % de los exoplanetas descubiertos (Butturini et al., 2020).

#### 4.1.3. Fotometría de tránsitos

Este método se basa en la disminución de la luz que se observa cuando un objeto se interpone entre la estrella y nuestra línea de visión (Vázquez, 2021). Cuando el planeta pasa por delante de la estrella, se produce un oscurecimiento leve del disco de luz estelar. Mediante este método es posible calcular el semieje y la inclinación de la órbita y, como consecuencia, el radio del planeta. Obtenida la inclinación, sería posible obtener la masa del planeta como se ha comentado en el método de velocidad radial. Con este método se han realizado el 76 % de los descubrimientos de exoplanetas (Butturini et al., 2020).

#### 4.1.4. Microlentes gravitacionales

Esta técnica está basada en el aumento temporal del tamaño aparente de una estrella (que se considera fuente) debido a la presencia de un cuerpo masivo (que actúa como lente), entre el observador y la fuente (Vázquez, 2021). Este cuerpo masivo consiste en otra estrella con o sin planeta. Debido a la influencia gravitacional de un cuerpo masivo, la luz sufre una curvatura que provoca el aumento del tamaño aparente de la estrella. Esta técnica permite detectar tanto la estrella intermedia como cualquier planeta que orbite a su alrededor.

#### 4.1.5. Astrometría

Según Vázquez (2021), en la búsqueda de exoplanetas, la astrometría consiste en la detección de variaciones sinusoidales en el movimiento propio de una estrella, causadas por la presencia de otro cuerpo a su alrededor. Estas variaciones sinusoidales reflejan el movimiento de la estrella debido a la interacción gravitatoria que existe entre la estrella y el planeta.

### 4.2. Características y clasificación de exoplanetas

Del total de exoplanetas detectados, el 71 % tiene un semieje mayor de su órbita menor que Mercurio (menor que 0,38 UA) y el 13 % mayor que 1 UA (Butturini et al., 2020). Solo el 9 % de los planetas se encuentran entre 0,38 y 1 UA. Además, la mayoría de este 71 % de planetas es igual o mayor que Júpiter. También cabe destacar que se han detectado sistemas planetarios muy compactos, con distancias muy pequeñas entre planetas.

Butturini et al. (2020), clasifican los exoplanetas detectados en función de su densidad, basándose en los planetas del sistema solar. Los exoplanetas con densidades menores a  $1,6g/cm^3$  se consi-

deran gaseosos. Por otro lado, los exoplanetas con densidades mayores a  $3g/cm^3$  son rocosos, hasta un límite en  $8g/cm^3$ . A partir de esta densidad, los planetas son considerados “metálicos”. Por último, los planetas con densidades comprendidas entre 1,6 y  $3g/cm^3$  son gaseosos con un núcleo rocoso y atmósferas densas. Sin embargo, a pesar de esta clasificación, es importante señalar que, en la gran mayoría de planetas detectados, la densidad es desconocida. Solo se ha podido estimar la densidad en aproximadamente el 20 % de los planetas. Entre los planetas con densidad conocida ha podido clasificarse el 59 % de ellos como gaseosos, el 10 % como gaseosos con núcleo rocoso y atmósfera densa, el 17 % como rocosos y el resto como “metálicos”.

Debido a la dificultad para clasificar al resto de planetas con densidades desconocidas, se clasifican como rocosos aquellos planetas con masa mínima (estimada mediante el método de velocidad radial) menor de  $3 M_{\oplus}$  (Butturini et al., 2020). Por encima de este valor, pueden ser rocosos o gaseosos. Si lo que conocemos es el radio (mediante el método de tránsitos), planetas con un radio menor a  $1,6 R_{\oplus}$  son considerados rocosos. Para radios mayores, los planetas serían gaseosos.<sup>4 5</sup>

### 4.3. Habitabilidad en exoplanetas

Para estudiar la habitabilidad de los exoplanetas, podemos comprobar cuáles se sitúan dentro de la franja de habitabilidad descrita con el modelo radiativo del apartado 3.3.1. Sin embargo, esto es únicamente una guía para determinar si los exoplanetas son potencialmente habitables o no, pero no garantiza su habitabilidad. Como se explicó con anterioridad, cada tipo de planeta-atmósfera tendría su propia franja de habitabilidad y en lo relativo a la presencia y composición de las atmósferas, la información es muy escasa para los exoplanetas.

Según Butturini et al. (2020), estimando la temperatura de equilibrio, mediante la ecuación (8), de los exoplanetas catalogados como potencialmente habitables, solo en cuatro casos la temperatura se encuentra entre los 0 y los  $100^{\circ}C$ . Estos exoplanetas son Kepler-138c, TRAPPIST-1c, TRAPPIST-1d y Tau Ceti e. Para el resto de exoplanetas sería necesario un efecto invernadero para que pudiesen ser habitables. Cabe destacar que muchos de los exoplanetas potencialmente habitables se encuentran en órbitas en el límite de la rotación sincronizada y es probable que muestren únicamente una cara a la estrella que orbitan, por lo que la temperatura de equilibrio de la cara expuesta a la estrella será significativamente más alta. La rotación sincronizada es el fenómeno por el cual un cuerpo rota sobre su eje en el mismo período de tiempo que tarda en orbitar a otro cuerpo.

El interés actual en referencia a la habitabilidad en exoplanetas reside en poder detectar moléculas o compuestos en la atmósfera que pudiesen dar indicios de condiciones compatibles con la existencia de vida (Butturini et al., 2020). Mediante el método de los tránsitos se puede obtener algo de información sobre la estructura y la composición de las atmósferas y una estimación del albedo. Cuando el planeta pasa por delante de la estrella, una fracción de la radiación estelar que atraviesa la atmósfera del planeta es absorbida, por lo que el espectro de luz incidente es modificado, obteniéndose un espectro de transmisión que permite analizar las propiedades de la atmósfera. Además, se puede obtener información relativa al albedo mediante los eclipses secundarios, cuando el planeta se oculta detrás de la estrella. Durante el eclipse se observan cambios en la luz solar. Al estar el planeta oculto tras la estrella, la luz reflejada por él y observada desde la Tierra será menor, por lo que se puede detectar una disminución en la luz total emitida por el sistema estelar que permite estimar el albedo.

---

<sup>4</sup>  $M_{\oplus} = 5,9710^{24} kg$  es la masa de la Tierra.

<sup>5</sup>  $R_{\oplus} = 6371 km$  es el radio de la Tierra.

En resumen, la habitabilidad en exoplanetas es un tema relevante en la actualidad que despierta un gran interés. Existen modelos radiante-convectivos que simulan la composición de las atmósferas para diferentes condiciones climáticas y para exoplanetas de distinta composición y tamaño. Sin embargo, sin un conocimiento más detallado de las atmósferas de los exoplanetas o de su albedo, estos modelos suponen una simple especulación. Por este motivo, los avances y mejoras en instrumentación son imprescindibles para obtener un conocimiento más exhaustivo de estos planetas y su posible habitabilidad.

## 5. Discusión

### 5.1. Origen del planeta Tierra

El origen de nuestro planeta es un debate de gran interés científico que ha sido estudiado por numerosos científicos a lo largo de los años. En cuanto a la formación de estrellas, a pesar de existir diferentes hipótesis, la hipótesis de la nube molecular es la más aceptada debido a que las observaciones apoyan la existencia de estas nubes en muchas regiones del espacio. Además, telescopios como el telescopio espacial de Hubble han podido capturar protoestrellas y discos de acreción, evidenciando las primeras fases de la formación de estrellas. Cabe destacar que algunos detalles sobre la formación estelar aún se desconocen, como, por ejemplo, el detonante del colapso inicial de la nube molecular. Algunas fuentes como Maeder (2009) sugieren que este colapso pudo originarse a partir de una perturbación producida por una onda de choque de una supernova o el paso por una estrella cercana.

En cuanto a la formación de los planetas, la teoría más aceptada es la que sostiene que los planetas se formaron por acreción a partir del material del disco protoplanetario. Sin embargo, esta propuesta, a día de hoy sigue siendo una hipótesis apoyada en la observación de otros sistemas estelares.

### 5.2. Habitabilidad

El estudio de la habitabilidad ha sido motivo de interés para el ser humano a lo largo de la historia del conocimiento. Hasta la fecha, la única certeza de vida conocida, es la vida en nuestro planeta. Por este motivo, el estudio de la habitabilidad planetaria se ha fundamentado en las condiciones físicas y químicas terrestres, trazando paralelismos con otros cuerpos celestes.

Este trabajo se ha centrado en la importancia de la existencia de agua líquida, planteando un modelo de radiación que incluía factores extrínsecos (distancia a la estrella, temperatura efectiva de la estrella, tamaño de la estrella) y factores intrínsecos del planeta (geofísica de los planetas, propiedades de las atmósferas). Como se comentó con anterioridad, para ser preciso, un modelo radiativo debe incluir por completo las propiedades físicas y químicas de las atmósferas, puesto que factores como el cambio de fase de los gases afectan enormemente a la potencial habitabilidad. Es importante señalar que en este trabajo no hemos considerado algunos requisitos indispensables para la habitabilidad de un planeta, como la presencia de un campo magnético que proteja las atmósferas de los vientos estelares, o la influencia de la tectónica de placas en la regulación del clima. De esta forma, para realizar un análisis completo de la habitabilidad planetaria, es necesario tener en cuenta todos los factores geofísicos y geológicos del planeta y entender como interaccionan entre ellos.

Por otro lado, la representación realizada de la evolución de la temperatura en la Tierra, sugiere que hubo una época en la que no era posible la existencia de agua líquida en nuestro planeta. Sin embargo, como se comentó en ese apartado, existen evidencias de la existencia de agua líquida en una edad temprana. Este enigma del agua líquida en un ambiente acompañado por un sol más débil (menos luminoso) se conoce como “Problema del Sol joven y débil” (Ulrich, 1975). La Tierra ha experimentado grandes cambios a lo largo de su historia. Fuentes como Feulner (2012), consideran que puede no ser acertado suponer, en los primeros años de la Tierra, unos parámetros climáticos como el albedo y el efecto invernadero similares a los valores actuales. Una representación más fiel podría ser aquella que tomase unos valores de albedo y efecto invernadero más ajustados a los valores esperados en una época temprana.

Algunos estudios como el de Kasting (1993), tratan de explicar un clima cálido en la Tierra primitiva, a pesar de un Sol más débil, mediante un mayor efecto invernadero. En primer lugar, se centró en las concentraciones de  $CO_2$ , pero la atmósfera arcaica habría requerido entre 100 y 1000 veces más  $CO_2$  que la concentración actual para contrarrestar un Sol más débil. El autor afirma que la atmósfera primitiva probablemente tendría menos cantidad de la requerida para compensar el efecto del débil Sol. Posteriormente se propuso que este mayor efecto invernadero podría deberse al metano,  $CH_4$ . Sin embargo, el conjunto de concentraciones de  $CH_4$  y  $CO_2$  forman una neblina de hidrocarburos que bloquea la luz solar, corriendo el riesgo esta atmósfera de autoenfriarse (efecto “anti-invernadero”)(Trainer et al., 2006). Por tanto, un efecto invernadero de  $CH_4$  y  $CO_2$  pudo existir, pero en grandes concentraciones no sería factible. Otros modelos centraron su atención en el nitrógeno,  $N_2$ , puesto que un aumento de este gas aumenta la presión atmosférica (debido a la proporción en la que se encuentra este gas en la atmósfera terrestre), que a su vez aumenta la capacidad de absorción de radiación del  $CH_4$  y del  $CO_2$  (Goldblatt et al., 2006).

Como resultado de no encontrar evidencias claras acerca de estas propuestas de un mayor efecto invernadero, también existen estudios centrados en un menor valor del albedo. Esta disminución en el albedo habría permitido un calentamiento de la Tierra primitiva, contrarrestando el Sol débil (Rosing et al., 2010). El albedo durante el Eón Arcaico podría haber sido menor, puesto que, las nubes eran más transparentes y, por tanto, menos reflectantes. En una etapa más temprana, no había tanta abundancia de núcleos de condensación de nubes, CNN, es decir, de partículas o superficies sólidas en las que el vapor de agua se condensa para la formación de nubes. Esto se debe a que el 50 % de estos CNN son formados mediante la oxidación de gases sulfúricos liberados por las plantas y algas eucariotas a la atmósfera (Kreidenweis & Seinfeld, 1988). Rosing et al. (2010) sugiere que en el Arcaico, previamente a la evolución de las eucariotas, no había suficiente gas sulfúrico biogénico para la formación de nubes. Por tanto, por este motivo, las nubes no eran tan densas y reflectantes como en la actualidad y la Tierra primitiva tendría un albedo menor.

Por último, con respecto a Venus y la posible pérdida de sus océanos, anteriormente se ha mencionado el proceso de “recombinación disociativa de  $HCO^+$ ” propuesto por Chaffin et al. (2024). Esta propuesta, sin embargo, no ha podido aún confirmarse, dado que este ion no ha sido detectado por ningún instrumento de observación hasta la fecha. Se tiene la esperanza de que en un futuro puedan realizarse misiones con instrumentos adecuados que alumbren más información sobre este planeta.

### 5.3. Exoplanetas

El principal obstáculo en el estudio de la habitabilidad en exoplanetas reside en la dificultad que aún existe para detectarlos y obtener información relevante de ellos. Como se comentó ante-

riormente, es importante señalar el sesgo que existe en los descubrimientos de exoplanetas debido a que la detección es más complicada cuanto más pequeños sean y más lejos estén. Por este motivo, la mayoría de los descubrimientos se basan en planetas muy grandes que orbitan cerca de las estrellas anfitrionas.

Como se ha comprobado en este trabajo, la habitabilidad depende de múltiples factores como la geología y la geofísica del planeta, la química de las atmósferas y la información relativa a la estrella que orbitan. Para la mayoría de los planetas detectados se tiene muy poca información sobre las propiedades de sus atmósferas, hecho que dificulta enormemente el estudio de su habitabilidad. Los exoplanetas se encuentran a distancias muy grandes de la Tierra, por lo que es necesaria una mejora en la resolución de los telescopios e instrumentos de observación para detectar las débiles señales que se reciben de estos planetas. Con el inminente avance tecnológico de los últimos años, se espera poder superar las limitaciones en la observación de estos planetas y así obtener información relevante de ellos.

## 6. Conclusiones

En la actualidad, disponemos de numerosos estudios, modelos, e hipótesis sobre el origen y evolución de nuestro planeta y de las condiciones que quizás posibilitaron la vida en él. No obstante, aún existen interrogantes acerca de cómo surgió la vida en la Tierra. Conocemos la importancia del agua y cómo esta no es solo un medio, pues es también materia y además condiciona las condiciones ambientales. Se ha comprobado que hay muchos factores que influyen en la temperatura media de un planeta, que está necesariamente vinculada a la presencia de agua líquida, y que para realizar un estudio completo de la habitabilidad es necesario tener en cuenta todos estos factores y conocer en profundidad cómo se relacionan entre ellos. Pero, podría suceder que se tuvieran todos los requisitos mínimos que se esperan, pero que estos no se entremezclen en el tiempo correcto, impidiendo la habitabilidad o disponiendo de una habitabilidad efímera. Por otro lado, hay que tener en cuenta los eventos que permitieron que todos estos requisitos se juntasen y conformaran la Tierra tal y como la conocemos.

En resumen, en referencia al estudio de la habitabilidad en otros planetas, aunque cada vez se dispone de más información, aún no sabemos qué probabilidad hay de que todos estos factores abordados durante el trabajo ocurran en el momento y en la intensidad apropiada para que sea posible la proliferación de algún tipo de vida.

## 7. Referencias

Butturini, A., García-Castellanos, D., Jordi, C., & Ribas, I. (2020). (In) habitabilidad planetaria: fundamentos de astrogeobiología. Marcombo.

Chaffin, M. S., Cangi, E. M., Gregory, B. S., Yelle, R. V., Deighan, J., Elliott, R. D., & Gröller, H. (2024). Venus water loss is dominated by HCO<sup>+</sup> dissociative recombination. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07261-y>

Feulner, G. (2012). The faint young Sun problem. *Reviews Of Geophysics*, 50(2). <https://doi.org/10.1029/2011rg000375>

- Fischer, D. A., Howard, A. W., Laughlin, G. P., Macintosh, B., Mahadevan, S., Sahlmann, J., & Yee, J. C. (2014). Exoplanet detection Techniques. En University of Arizona Press eBooks. [https://doi.org/10.2458/azu\\_uapress\\_9780816531240-ch031](https://doi.org/10.2458/azu_uapress_9780816531240-ch031)
- Forget, F., & Pierrehumbert, R. T. (1997). Warming Early Mars with Carbon Dioxide Clouds That Scatter Infrared Radiation. *Science*, 278(5341), 1273-1276. <https://doi.org/10.1126/science.278.5341.1273>
- Goldblatt, C., Lenton, T. M., & Watson, A. J. (2006). Bistability of atmospheric oxygen and the Great Oxidation. *Nature*, 443(7112), 683-686. <https://doi.org/10.1038/nature05169>
- Kasting, J. F. (1993). Earth's early atmosphere. *Science*, 259(5097), 920-926. <https://doi.org/10.1126/science.11536547>
- Kasting, J. F., Kopparapu, R., Ramirez, R. M., & Harman, C. E. (2013). Remote life-detection criteria, habitable zone boundaries, and the frequency of Earth-like planets around M and late K stars. *Proceedings Of The National Academy Of Sciences Of The United States Of America*, 111(35), 12641-12646. <https://doi.org/10.1073/pnas.1309107110>
- Kasting, J. F., Whitmire, D. P., & Reynolds, R. T. (1993). Habitable Zones around Main Sequence Stars. *Icarus*, 101(1), 108-128. <https://doi.org/10.1006/icar.1993.1010>
- Kreidenweis, S. M., & Seinfeld, J. H. (1988). Nucleation of sulfuric acid-water and methanesulfonic acid-water solution particles: Implications for the atmospheric chemistry of organosulfur species. *Atmospheric Environment*, 22(2), 283-296. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(88\)90034-0](https://doi.org/10.1016/0004-6981(88)90034-0)
- Lunine, J. I. (2013). *Earth: Evolution of a Habitable World* (2.a ed.). Cambridge University Press.
- Maeder, A. (2009). *Physics, Formation and Evolution of Rotating Stars*. Springer.
- NASA Exoplanet Archive. (s. f.). <http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>
- Rosing, M. T., Bird, D. K., Sleep, N. H., & Bjerrum, C. J. (2010). No climate paradox under the faint early Sun. *Nature*, 464(7289), 744-747. <https://doi.org/10.1038/nature08955>
- Stephens, G. L., O'Brien, D., Webster, P. J., Pilewski, P., Kato, S., & Li, J. (2015). The albedo of Earth. *Reviews Of Geophysics*, 53(1), 141-163. <https://doi.org/10.1002/2014rg000449>
- Trainer, M. G., Pavlov, A. A., DeWitt, H. L., Jimenez, J. L., McKay, C. P., Toon, O. B., & Tolbert, M. A. (2006). Organic haze on Titan and the early Earth. *Proceedings Of The National Academy Of Sciences Of The United States Of America*, 103(48), 18035-18042. <https://doi.org/10.1073/pnas.0608561103>
- Ulrich, R. K. (1975). Solar Neutrinos and Variations in the Solar Luminosity. *Science*, 190(4215), 619-624. <https://doi.org/10.1126/science.190.4215.619>
- Vázquez, C. (2021). *Detección, dinámica y habitabilidad de exoplanetas y exosatélites* (Tesis doctoral). Universidad de Santiago de Compostela. <http://hdl.handle.net/10347/26500>