



GRADO EN FÍSICA

Creación de un Índice de Habitabilidad Exoplanetaria

Presentado por:

JOSEP BALLESTER

Dirigido por:

JAVIER PÉREZ

CURSO ACADÉMICO 2024-2025

“If we find lots of planets like ours... We’ll know it’s likely that we aren’t alone, and that someday we might be able to join other intelligent life in the universe”

William Borucki, investigador principal de la misión Kepler de la NASA

AGRADECIMIENTOS

A Javier Pérez Pérez, doctor en Física y profesor de la Universidad Europea de Valencia, por haberme dirigido este trabajo, por su paciencia y su ayuda.

A todos los profesores del claustro de la Universidad Europea por su dedicación y acompañamiento a lo largo de estos cuatro años.

Índice

1	Palabras clave	4
2	Resumen	4
3	Abstract	4
4	Introducción	5
5	Objetivos	5
6	Marco Teórico	6
6.1	Definición de exoplaneta habitable y nomenclatura	6
6.2	Métodos de detección de exoplanetas	6
6.2.1	Velocidad radial	6
6.2.2	Tránsito	7
6.2.3	Microlentes gravitacionales	8
6.2.4	Astrometría	8
6.2.5	Temporización de púlsares	9
6.2.6	Observación Directa	10
6.2.7	Resumen	10
6.3	Factores que afectan a la habitabilidad planetaria	10
6.3.1	Características planetarias	10
6.3.2	Características estelares	16
6.3.3	Efectos del sistema planetario	20
6.4	Índices ya existentes	20
6.4.1	Índice de similitud con la Tierra (ESI)	20
6.4.2	Planetary Habitability Index (PHI)	22
6.4.3	Habitable Zone Distance (HZD)	22
6.4.4	Biological Complex Index (BCI)	23
6.4.5	Habitability Index for Transiting Exoplanets (HITE) . . .	23
6.4.6	Cobb Douglas habitability score (CD-HPF)	23
6.4.7	Statistical-likelihood Exo-Planetary Hability Index (SEPHI) .	24
6.4.8	Nuevo Índice de similitud con la Tierra (NESI)	24
6.4.9	Rock Similarity Index (RSI)	24
7	Metodología	25
7.1	Fuentes de datos	25
7.2	Software y librerías	26
7.3	Procesado de datos	26

7.3.1 Tratamiento de nulos	27
7.4 Premisas y Parámetros para el cálculo del índice	27
7.4.1 Parámetros planetarios	28
7.4.2 HZD	30
7.4.3 Parámetros estelares	30
7.5 Análisis de los datos	31
7.6 Cálculo del índice	35
8 Resultados	42
8.1 Planetas del Sistema Solar	42
8.2 Exoplanetas	42
8.2.1 Estudio descriptivo de los exoplanetas	42
8.2.2 Resultados Del Índice Aplicado a los Exoplanetas	46
9 Discusión	47
9.1 Discusión de los resultados	47
9.2 Comparación de TOASHI con el ESI	49
9.3 Impacto económico y sostenibilidad (ODS)	49
9.4 Futuras vías de desarrollo	50
10 Conclusiones	50
11 Bibliografía	51
12 Tablas	56
13 Anexo	57
13.1 Cálculo ESI para los planetas rocosos del sistema solar	57
13.2 Resultados de los subíndices	58
13.2.1 Planetas del Sistema Solar	58
13.2.2 Exoplanetas	59

Índice de tablas

1 Tipos de exoplanetas	11
2 Clasificación de exoplanetas por densidad	11
3 Clasificación de Morgan-Keenan	17
4 Parámetros de evaluación del ESI	21
5 Valor del ESI en los planetas rocosos del sistema solar	21
6 Parámetros de evaluación del NESI	24
7 Parámetros de evaluación del RSI	25

8	Catálogos de exoplanetas	25
9	Parámetros planetarios físicos	28
10	Parámetros planetarios orbitales	29
11	Parámetros planetarios atmosféricos	29
12	Parámetro HZD	30
13	Parámetros estelares	31
14	Resultados del índice Venus, la Tierra y Marte	42
15	Tipos de estrella de los exoplanetas	44
16	Resultados del índice de habitabilidad de los exoplanetas	47
17	Resumen métodos de detección de exoplanetas	56
18	Resultados del subíndice Telúrico (T) para los planetas del sistema solar	58
19	Resultados del subíndice Órbita (O) para los planetas del sistema solar	58
20	Resultados del subíndice Atmósfera (A) para los planetas del sistema solar	58
21	Resultados del subíndice Estelar (S) para los planetas del sistema solar	58
22	Resultados del subíndice HZD (H) para los planetas del sistema solar	59
23	Resultados del subíndice Telúrico (T) para los exoplanetas	59
24	Resultados del subíndice Órbita (O) para los exoplanetas	59
25	Resultados del subíndice Atmósfera (A) para los exoplanetas	60
26	Resultados del subíndice Estelar (S) para los exoplanetas	60
27	Resultados del subíndice HZD (H) para los exoplanetas	61

Índice de figuras

1	Diagrama de la velocidad radial.	7
2	Procesos atmosféricos en función de la presión.	14
3	Nasa Exoplanet Archive	26
4	Parámetros planetarios para el cálculo del índice	29
5	Parámetros HZD para el cálculo del índice	30
6	Parámetros estelares para el cálculo del índice	31
7	Función del parámetro x	35
8	Gráficas de la función para los parámetros telúricos	37
9	Gráficas de las funciones para los parámetros orbitales	38
10	Gráfica de la velocidad de escape	39
11	Gráficas de las funciones para los parámetros estelares	41
12	Gráfica del HZD	41
13	Porcentaje de exoplanetas telúricos	43
14	Valores del subíndice telúrico de los exoplanetas	43

15	Planetas con acoplamiento de marea (rojo) y los que no (azul claro) .	44
16	Edad estelar de los exoplanetas	45
17	Metalicidad estelar	45
18	Magnetismo estelar	46
19	Gráfica HZD	46
20	Comparación entre TOASHI y el ESI	49

PALABRAS CLAVE

Exoplaneta, habitabilidad planetaria, índice de habitabilidad, parámetros estelares, parámetros planetarios

RESUMEN

En este trabajo se propone crear un índice de habitabilidad planetaria para exoplanetas. Antes de describir el índice, se han estudiado los métodos de detección de exoplanetas y los diferentes factores, tanto planetarios como estelares, que influyen en su habitabilidad. Se han revisado otros índices propuestos en la bibliografía y se han evaluado cinco subíndices que incluyen aquellos parámetros que se consideraron más relevantes para el cálculo del índice. La habitabilidad es una medida de un potencial para poder albergar vida y ello está condicionado a la presencia de agua líquida en la superficie del planeta. Este nuevo índice de habitabilidad se concibe como un índice multiparamétrico obtenido a partir de la media geométrica de la combinación de diversas características: las propiedades geofísicas del planeta; aspectos de su órbita, como el período orbital, la excentricidad y el acoplamiento de marea; factores de su estrella, tales como la edad estelar; el grado de metalicidad y el campo magnético; y, finalmente, la ubicación del planeta en la zona habitable de su anfitriona. Debido a las limitaciones técnicas actuales en el estudio de los exoplanetas, no se disponen de todos los parámetros que se incluyen en este índice para todos los exoplanetas confirmados. Para el cálculo del índice solo se han considerado aquellos exoplanetas de que se disponen de todos los parámetros, por ello el número de exoplanetas se ha reducido a 588 de los 5868 confirmados en la actualidad por la NASA. El índice propuesto comprende un rango de valores entre 0 y 1. El valor máximo, de 1, se corresponde con el de la Tierra. Este índice ha permitido encontrar 9 exoplanetas con un índice superior a 0, es decir, potencialmente habitables.

ABSTRACT

In the present study, the creation of a planetary habitability index for exoplanets is proposed. Prior to defining the index, exoplanet detection methods were thoroughly reviewed and the various factors influencing habitability, both planetary and stellar, were analysed. Existing indexes found in the literature were examined, which led to the evaluation of five subindexes incorporating the parameters considered most relevant for assessing habitability. Habitability is defined as the potential of a planet to support life, a prospect that largely depends on the presence of liquid water on its surface. The proposed index is conceived as a multiparametric measure calculated as the geometric mean of several characteristics. These characteristics

include the geophysical properties of the planet; orbital aspects, such as the orbital period, eccentricity, and tidal effects; and stellar factors, including the age of the host star, metallicity, and magnetic field. Additionally, the location of the planet within the habitable zone of its host star is considered. Due to current technical limitations in exoplanet research, the complete set of parameters required for the index is not available for every confirmed exoplanet. Therefore, only those exoplanets with a full complement of parameters were included in the calculation, reducing the sample size from the 5,868 exoplanets confirmed by NASA to 588. The resulting index is defined on a scale ranging from 0 to 1, with a value of 1 corresponding to that of Earth. Furthermore, the application of the index has resulted in the identification of nine exoplanets with values above 0, indicating their potential for habitability.

INTRODUCCIÓN

Solo han pasado cinco siglos desde la primera revolución astronómica con la aceptación del modelo heliocéntrico propuesto por Nicolás Copérnico y solo hace cuatro décadas del descubrimiento del primer exoplaneta: 51 Pegasi b por Michel Mayor y Didier Queloz, actualmente bautizado como Dimidio. Actualmente ya se han descrito más de 5.000 exoplanetas. Una vez sabemos de la existencia de planetas que orbitan otras estrellas, nos debemos cuestionar si en alguno de estos exoplanetas existen unas condiciones que permitan la vida y que sean habitables.

Para contestar a esta pregunta, se estudiarán las condiciones que, a priori, son imprescindibles para la habitabilidad planetaria y formular un índice que nos permita discriminar cuales de estos exoplanetas tienen una mayor posibilidad de ser habitables.

Para la realización de este trabajo se han considerado unos apartados de conocimientos previos. En primer lugar, se realizará un resumen de los diferentes métodos para la detección de exoplanetas. En segundo lugar, se plantean las características de los planetas, de su estrella y de la galaxia en la que se encuentran que son necesarias para que la habitabilidad sea posible. En tercer lugar, se revisan los índices ya descritos en la literatura de habitabilidad planetaria.

A partir de aquí se estudiarán los exoplanetas confirmados por la NASA (North American Space Agency) y con los resultados se desarrollará un índice de habitabilidad planetaria.

OBJETIVOS

El objetivo principal es crear un nuevo índice para conocer la habitabilidad de los exoplanetas a partir de unos parámetros planetarios y estelares.

Para ello, se ha realizado una revisión bibliográfica de los distintos métodos de detección de los exoplanetas, de los factores que afectan la habitabilidad planetaria y se han revisado los índices más importantes descritos en la literatura de habitabilidad planetaria. Con esta información se valoran aquellos factores principales para la habitabilidad planetaria y se creará un nuevo índice para discriminar cuales de los exoplanetas confirmados hasta la actualidad tienen un valor del índice más elevado y por tanto serían aquellos potencialmente habitables.

Antes de aplicar el índice a los exoplanetas, se aplicaría a Venus, a la Tierra y a Marte. El índice tendrá que tener un valor de como mínimo de 0,95 cuando se aplique a la Tierra.

MARCO TEÓRICO

Definición De Exoplaneta Habitable Y Nomenclatura

Un exoplaneta es un planeta situado fuera de nuestro sistema solar que orbita una estrella. Si nos centramos en la definición de exoplaneta habitable, éste debe contener agua en estado líquido en su superficie.

La forma de nombrar los exoplanetas es en primer lugar el nombre de la estrella seguido en minúscula de una letra, empezando a partir de la letra b, y en orden alfabético desde su descubrimiento. Si se descubren de manera simultánea la b es el más cercano y a medida que se alejan es c, d, etc. Algunos exoplanetas ya han sido bautizados con un nombre.

Métodos De Detección De Exoplanetas

Los principales métodos de detección son los indirectos. A continuación se describen cada uno de ellos.

Velocidad Radial

La velocidad radial se define como la magnitud del componente de la velocidad con la que una estrella se aleja o se aproxima a lo largo de la línea de visión desde la Tierra. El fundamento de este método radica en el efecto producido por la influencia gravitatoria del planeta sobre el movimiento orbital de la estrella.

Las variaciones en la velocidad radial de la estrella se manifiestan en modificaciones en el espectro de emisión de su luz. Dichas velocidades pueden determinarse mediante el efecto Doppler. Dado que la luz es una onda electromagnética caracterizada por su longitud de onda, es posible cuantificar sus variaciones utilizando un espectrómetro. En consecuencia, cuando la fuente de luz se acerca a la Tierra se reduce la longitud de onda, lo que se conoce como desplazamiento hacia el azul

(blueshift); de igual forma, cuando se aleja se produce un desplazamiento hacia el rojo (redshift).

La habilidad para detectar exoplanetas con este método depende de la masa del planeta, de la inclinación de su periodo orbital y de la excentricidad (Wright, 2018).

$$K \approx \left(\frac{2\pi G}{P M_*^2} \right) \frac{M_{\text{planeta}} \sin i}{\sqrt{1 - e^2}} \quad (1)$$

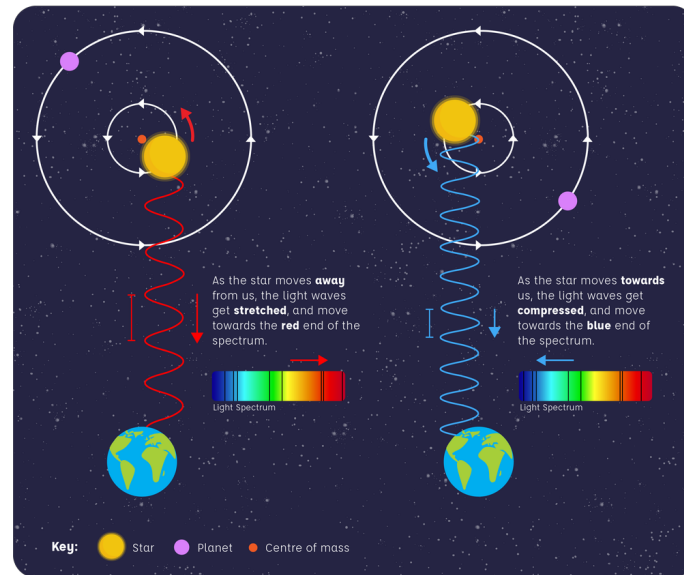
Siendo P el periodo orbital, e la excentricidad de la órbita, i la inclinación del plano de la órbita con respecto al plano del cielo, G es la constante de Newton y K las variaciones de la semiamplitud.

De las medidas de las velocidades radiales se obtiene una gráfica en función del tiempo y en ella pueden verse variaciones en su velocidad. Fue el primer método de detección de exoplanetas, con este método se descubrió Dimidio. Las medidas se pueden hacer desde la Tierra y actualmente se dispone de un instrumento muy eficaz que es el espectrógrafo HARPS (High Accuracy Radial Velocity Planet Searcher).

Este es un buen método para exoplanetas grandes y medir las masas y órbitas de los exoplanetas. No es un buen método para encontrar exoplanetas de pequeño tamaño ni para la medición de diámetros.

Figura 1

Diagrama de la velocidad radial.



Nota. Fuente: Alice Hopkinson, LCO.

Tránsito

El método de tránsito es el que ha permitido el descubrimiento del mayor número de exoplanetas con telescopios espaciales. Este método se basa en la de-

tección de exoplanetas mediante la monitorización de la luminosidad de estrellas durante periodos que bloquean de forma temporal la luz de la estrella. Cuando el planeta pasa por delante de la estrella su flujo disminuye una fracción denominada ΔF . Este método solo funciona para sistemas estrella-planeta cuyas órbitas estén alineadas. Este método permite conocer el radio del planeta, así como la composición atmosférica de los mismo cuando se aplica la espectrometría de transmisión.

$$\Delta F \approx \left(\frac{R_p}{R_s} \right)^2 = k^2 \quad (2)$$

Siendo ΔF el diferencial del flujo, R_p el radio del planeta, R_s el radio de la estrella y k es la relación del radio.

Microlentes Gravitacionales

Las microlentes gravitacionales constituyen un método para la detección de exoplanetas derivado de la teoría de la relatividad de Einstein. Dicho método se fundamenta en la observación de la distorsión y curvatura de la luz emitida por una estrella de fondo, ocasionada por la masa de un planeta que transita frente a ella.

Aunque la luz viaja en línea recta en condiciones normales, en presencia de una deformación del espacio-tiempo—fenómeno que se produce en las cercanías de un objeto masivo, como una estrella—su trayectoria se curva. En cada alineación estrecha de dos estrellas desde la perspectiva del observador, la luz proveniente de la estrella más lejana se desvía al transitar por el espacio-tiempo deformado en torno a la estrella que se encuentra en primer plano.

Si la alineación es especialmente cercana, la estrella más cercana actúa como una lente cósmica natural, magnificando la luz de la estrella de fondo. Los planetas que orbitan alrededor de la estrella lente pueden producir un efecto similar a menor escala.

Las microlentes es el único método conocido capaz de descubrir planetas a distancias realmente lejanas de la Tierra. Mientras que las búsquedas por velocidad radial buscan planetas en nuestro vecindario galáctico inmediato (hasta 100 años luz de la Tierra), las microlentes puede encontrar planetas que orbitan estrellas cerca del centro de la galaxia, a miles de años luz de distancia.

Este método no determina el periodo orbital del planeta pero permite descubrir planetas errantes.

Astrometría

La astrometría fue la primera técnica que se utilizó para buscar planetas. Desde hace cientos de años se usa para poder encontrar la posición de los planetas

del Sistema Solar, y de las estrellas en general. Según la NASA Exoplanet Archive solo se han descubierto cinco planetas con este método.

Parámetros Planetarios Y Orbitales. Las variaciones del movimiento propio de la estrella debidas al movimiento reflejo se escalan como

$$\alpha \approx \left(\frac{M_P}{M_*} \right) \left(\frac{a}{d} \right) \quad (3)$$

Donde M_P es la masa del planeta, M_* la masa de la estrella, a el semieje mayor y d la distancia de la Tierra.

De la reconstrucción de la órbita se puede obtener el periodo orbital (P), el semieje mayor (a), la excentricidad (e) y la inclinación del plano orbital (i).

La astrometría tiene una ventaja sobre otros métodos dado que puede determinar con mayor precisión los parámetros orbitales de un exoplaneta. Ni el método del tránsito ni el de la velocidad radial proporcionan parámetros físicos completos de un planeta y ambos métodos tienen el sesgo de detectar principalmente planetas cercanos a la estrella central.

Por el contrario, el método de astrometría puede proporcionar una caracterización tridimensional de la órbita de un planeta y tiene la ventaja de detectar planetas alejados de su estrella.

Temporización De Púlsares

Los púlsares son productos finales de la evolución estelar de estrellas en el rango de masa (de 11 a 25 $M_\odot$) que explotan como una supernova, dejando una estrella de neutrones como un remanente del colapso de su núcleo.

Un planeta en órbita va acompañado de la oscilación del período de la posición de la estrella anfitriona alrededor del baricentro del sistema.

Si la estrella también posee firmas periódicas regulares propias, entonces estas pueden proporcionar una ruta alternativa a la detección dinámica de planetas en órbita a través del cambio en el período medido debido al tiempo de viaje de la luz.

El cambio del tiempo de llegada está relacionado con el desplazamiento de la estrella central a lo largo de la línea de visión

$$T_P = \frac{1}{c} \frac{a \sin i M_P}{M_*} \quad (4)$$

Donde T_P es el periodo del púlsar, c es la velocidad de la luz, a el semieje mayor, i la inclinación, M_P la masa del planeta y M_* la masa de la estrella.

El método consiste en buscar variaciones en la hora de llegada (TOA) de los pulsos, debido a perturbaciones del movimiento de la estrella de neutrones inducidas

por un planeta en órbita. Al medir pequeñas variaciones en los tiempos de llegada del pulso, se pueden descubrir la presencia de compañeros planetarios y determinar sus propiedades con una precisión notable.

Ofrece ventajas únicas en el estudio de ciertos tipos de sistemas planetarios, en particular los que orbitan estrellas de neutrones y complementa a otras técnicas de detección.

Observación Directa

La detección de exoplanetas por métodos o observación directa con telescopios terrestres y espaciales son actualmente muy limitados con la tecnología actual. A pesar de estas limitaciones ya se detectado algunos de ellos por este método. Este método utiliza longitudes de onda infrarrojas. Este método funciona para detectar planetas situados muy lejos de su estrella pero no funciona para medir de forma directa la masa del planeta. También nos permite a partir del espectro obtener información del diámetro del planeta y de la temperatura superficial.

Resumen

En la tabla 17 vemos de forma resumida el número de exoplanetas confirmados detectados por los distintos métodos según la NASA Exoplanet Archive en febrero de 2025. Así como las principales ventajas y desventajas de cada método.

Factores Que Afectan A La Habitabilidad Planetaria

La habitabilidad es una medida de un potencial para albergar vida y ello está relacionado con la presencia de agua líquida en la superficie. El hecho que un exoplaneta sea capaz de mantener agua líquida en la superficie es consecuencia de una interacción compleja entre las características del planeta, de su estrella y del sistema planetario al que pertenece. A continuación, se describen estas características y como influyen en la habitabilidad planetaria.

Características Planetarias

Masa, Radio Y Densidad Del Planeta. Para que un planeta sea rocoso es necesario que tenga una masa determinada. Las planetas de gran tamaño son gaseosos porque están compuestos de hidrógeno (H) y de helio (He) (Mercy et al., 2014). En cambio, los planetas más pequeños son rocosos. Los distintos estudios consideran que los planetas rocosos son aquellos que tienen hasta 1,5 radios el de la Tierra ($R_{\oplus}$).

Según la NASA (n.d.) los planetas se clasifican en función de su radio y masa en Terrestres (de 0,5 a 2 masas terrestres ($M_{\oplus}$) o entre 0,8 y 1,5 radios terrestres

($R_{\oplus}$)), Supertierras (máximo de $10 M_{\oplus}$ y como mínimo $2 M_{\oplus}$), Neptunianos (entre 10 y $20 M_{\oplus}$ o entre 4 y $6 R_{\oplus}$) y gigantes gaseosos (más de $50 M_{\oplus}$ o más de $6 R_{\oplus}$)

Tabla 1

Tipos de exoplanetas

Variable	Terrestres	Supertierras	Nepuntianos	Gigantes Gaseosos
Radio ($R_{\oplus}$)	entre 0,8 y 1,5	entre 1,5 y 4	entre 4 y 6	> 6
Masa ($M_{\oplus}$)	entre 0,5 y 2	entre 2 y 10	entre 10 y 20	> 20

La densidad media del planeta (ρ_p) se define como

$$\rho_p = \frac{M_p}{\frac{4}{3}\pi R_p^3} \quad (5)$$

Donde M_p es la masa del planeta, y R_p es el radio del planeta.

Odrzywolek et al. (2016) clasificaron 424 exoplanetas en función de su densidad en tres grupos:

Tabla 2

Clasificación de exoplanetas por densidad

Tipo	Densidad ($\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$)
Rocosos o de hierro	entre 3,6 y 13,4
Hielo o gas	entre 0,3 y 2,1
Degenerados	de 25 a 34

El grupo más numeroso (80 %) pertenecía al segundo (hielo y gas) y el 19 % pertenecía a los rocosos, solo el 1,5 % pertenecían al grupo de degenerados.

La densidad de un planeta crece linealmente con el radio hasta $1,5 R_{\oplus}$ y partir de este límite su densidad va disminuyendo por la presencia de gases.

Rotación, Órbita Y Excentricidad. La rotación planetaria tiene influencia en la temperatura, la atmósfera y el clima. Así mismo controla el periodo diurno y nocturno del planeta. Encontramos planetas cuya rotación no se encuentra sincronizada con su estrella que es lo que se conoce como acoplamiento de marea.

La excentricidad (ε) se mide en una escala de 0 a 1, considerándose una órbita perfectamente circular la que tiene una excentricidad de 0 y la elíptica entre 0 y 1. Se ha relacionado la masa planetaria (Bashi et al., 2024), la metalicidad estelar (An et al., 2023) y la multiplicidad planetaria (Van Eylen et al., 2018) como factores determinantes en la excentricidad planetaria. Para evitar fluctuaciones importantes

de temperatura y conseguir una buena estabilidad climática los planetas habitables deberían de tener una excentricidad baja. Los planetas con alta excentricidad puede presentar cambios drásticos en la superficie debido a la diferencia de la radiación estelar desde el perihelio hasta el afelio. Esto condicionaría periodos sin posibilidad de agua líquida en la superficie y limitaría la habitabilidad planetaria.

Dressing et al. (2010) los clasifica de baja, moderada y alta excentricidad con $\varepsilon \leq 0,35$ de baja excentricidad, $0,35 < \varepsilon < 0,65$ de excentricidad moderada y $\varepsilon \geq 0,65$ de alta excentricidad respectivamente.

Acoplamiento Por Marea. En el acoplamiento por marea o rotación sincrónica, la resonancia orbital es de 1:1, esto significa que el periodo rotacional es igual al periodo orbital. Para planetas que orbitan estrellas tipo M y posiblemente algunas K, las regiones donde encontramos planeta anclados por marea se superponen en zonas habitables. Las características de clima inestable de estos planetas los hacen potencialmente poco habitables. Las diferencias de temperatura también hace que estos planetas solo pueden ser habitables en el crepúsculo ya que en la cara diurna presentan temperaturas muy altas y en la nocturna presenta temperaturas muy bajas.

Hanslmeier (2018) propuso calcular el acoplamiento por marea a partir de las siguientes ecuaciones

$$t_{\text{lock}} \approx \frac{\omega a^6 I \Omega}{3 G m_s^2 k_2 R^5} \quad (6)$$

Siendo ω la velocidad del espín inicial expresado en radianes por segundo, a es el semieje mayor del planeta $I \approx 0,4 m_p R^2$ el momento de inercia y m_p la masa del planeta, R el radio de la estrella, Q la función de disipación de Rayleigh, G la constante gravitatoria, m_s la masa de la estrella y k_2 el número de marea de Love del planeta. Generalmente Q y k_2 son muy poco conocidos. Para una estimación realmente aproximada se toma $Q \approx 100$ y

$$k_2 \approx \frac{1,5}{1 + \frac{19\mu}{2\rho g R}} \quad (7)$$

Siendo ρ la densidad del planeta, g la gravedad superficial del planeta y μ la rigidez del satélite.

En múltiples ocasiones no se pueden saber muchos de estos parámetros y las formulas anteriores se pueden simplificar, se toma $k_2 \ll 1$, $Q = 100$ y el tiempo para quedarse en acoplamiento de marea queda así

$$t_{\text{lock}} \approx 6 \frac{a^6 R \mu}{m_p m_s^2} \cdot 10^{10} \quad (8)$$

El tiempo se expresa en años, las masas en kilogramos (kg), las distancias en metros (m) y μ en N/m^2 , se puede determinar si un planeta sufre aco-
plamiento de marea comparando la edad del planeta con el tiempo necesario
para que ocurra dicho fenómeno. Hanslmeier (2018) propone, para satélites
rocosos, el valor de $\mu = 3 \cdot 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$.

Atmósfera. La atmósfera es el conjunto de gases que rodean un planeta
retenido por su fuerza de gravedad. Se origina durante la formación del planeta por
la emisión de gases y por la retención de su nebulosa por el efecto de la gravedad.
La atmósfera del planeta condiciona que haya agua en fase líquida y es necesario
este medio líquido para que las moléculas precursoras de la vida puedan reaccionar
entre ellas. Actúa regulando la temperatura y la presión y por tanto, permitiendo
que haya agua en fase líquida y la densidad atmosférica controla la entrada de luz
procedente de la estrella y regula el clima planetario.

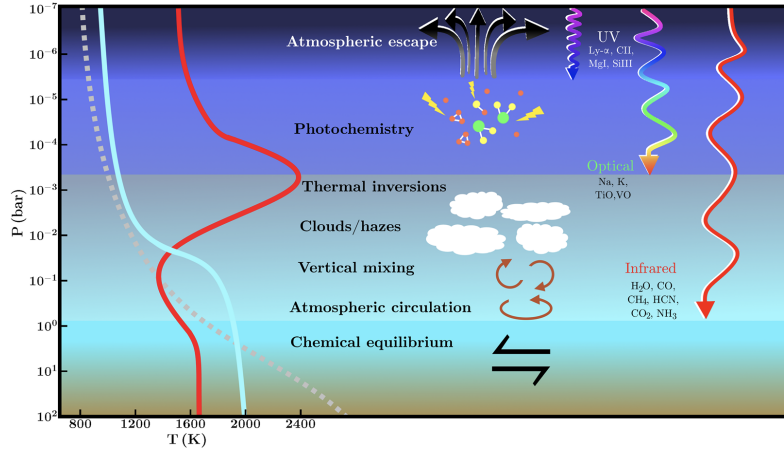
Desde el 2002 se conocen composiciones atmosféricas de los exoplanetas,
cuando el telescopio Hubble detectó sodio en el HD 209458b. Sin embargo, nos
encontramos con limitaciones técnicas que hacen que sólo se conozcan composicio-
nes atmosféricas de los planetas gigantes. La composición de la atmósfera de un
planeta puede ser deducida a partir del estudio del espectro electromagnético de su
luz.

Métodos Observacionales. Los principales son 3 métodos de espectro-
metría. El tránsito, el Doppler de alta resolución y la imagen directa por espectros-
copia.

Dinámicas Atmosféricas. La temperatura, la estructura y la circulación
de una atmósfera influyen críticamente en la evolución de la superficie y la atmósfera
de un planeta, así como en su posible habitabilidad (Kasting 1993). Por ejemplo, el
espectro de emisión de un planeta está determinado por la distribución vertical de
la temperatura de su atmósfera, mientras que las curvas de fase térmica y óptica
del planeta están determinadas por su gradiente de temperatura día-noche y los
patrones de nubes (Seager y Deming 2009).

Figura 2

Procesos atmosféricos en función de la presión.



Nota. Fuente: Madhusudhan, N. (2019).

La principal fuerza de conducción de la circulación atmosférica se debe a la diferencia de calentamiento entre el ecuador y los polos. El tipo de circulación atmosférica y la eficiencia del transporte de calor entre el ecuador y los polos son claves para un clima potencialmente benigno y con probabilidad de vida.

Para de la circulación atmosférica se han utilizado diferentes modelos siendo los más interesantes aquellos que se basan en variaciones del ratio de rotación. Vamos a destacar el número térmico de Rossby ($\mathcal{R}_{OT}$).

$$\mathcal{R}_{OT} = \frac{U_T}{\Omega a} \quad (9)$$

$$U_T = \frac{R\Delta\theta_h}{\Omega a} \quad (10)$$

$$\mathcal{R}_{OT} = \frac{R\Delta\theta_h}{\Omega^2 a^2} \quad (11)$$

Donde R es una constante del gas, $\Delta\theta_h$ es el diferencial de temperatura, a el radio del planeta, Ω el ratio de rotación y U_T es el viento térmico. Los planetas con valores de $\mathcal{R}_{OT} < 1$ se consideran rotadores rápidos (como la Tierra o Marte) y aquellos planetas con $\mathcal{R}_{OT} \gg 1$ se consideran rotadores lentos (como Venus).

Composición Atmosférica. Las diferentes técnicas de espectroscopía han podido determinar especies químicas y diferentes moléculas en diferentes exoplanetas. La detección de biosignaturas en dichas atmosferas es el factor más prometededor para la habitabilidad planetaria. A pesar que no existe una molécula considerada biosignatura única, sabemos que las más importantes en la atmosfera de la Tierra son O_2 , O_3 , N_2O y CH_4 .

Retención De Atmósfera. Según Rodríguez-Mozos et al. (2019) las características que hacen que los exoplanetas no sean capaces de retener una atmósfera son aquellos que sufran acoplamiento de marea, aquellos que orbiten estrellas saturadas y planetas que orbitan cercanos a la estrella que permitan un viento estelar en el régimen de sub-Alfvénico.

Magnetosfera. La magnetosfera actúa protegiendo la atmósfera del viento solar. Sin ella la atmósfera se escaparía del planeta y no podría haber agua líquida. A Marte le ocurrió una cosa similar en el pasado.

Se considera la magnetosfera como una parte del espacio que está dominado por el campo magnético del planeta y la magnetopausa como la capa exterior de la magnetosfera. El campo magnético es la barrera física que sella el planeta del entorno estelar, pero la presencia de un campo magnético fuerte no necesariamente protege el planeta de perder la atmósfera (Rodríguez-Mozos et al. 2019).

Lammer et al. (2007) propusieron que el radio mínimo de la magnetosfera para proteger de forma eficiente la atmósfera debería ser

$$\left[\frac{r}{R_P} \right]_{min} = 2 \quad (12)$$

$$\alpha_0 = \arcsin \left| \left(\frac{R_P}{r_M} \right)^{\frac{1}{2}} \right| \quad (13)$$

En cuyo caso correspondería a una apertura auroral de $\alpha_0 \approx 45$. Vidotto et al. (2013) describieron el ángulo en función del radio de la magnetopausa del planeta.

Campo Magnético. Brain et al. (2024) consideran como el campo magnético de un planeta determina como se produce la interacción con el espacio envolvente y como influencia la atmósfera del planeta, en concreto como interfiere en el escape de partículas y la evolución en la rotación y la órbita. La primera evidencia de un campo magnético en un exoplaneta se observó por el Hubble en el planeta HAT-P-11b en el 2021 con el método de tránsito.

Diferentes autores han realizado estimaciones del momento magnético planetario, entre ellos, destacaré la estimación de Sano (1993) en que se valoraba la densidad del planeta y la frecuencia angular.

$$\mathcal{M} = \rho^{\frac{1}{2}} R_P^{\frac{1}{2}} \Omega \quad (14)$$

Siendo $\mathcal{M}$ el momento magnético del planeta, ρ la densidad del planeta, R_P el radio

del planeta y Ω la frecuencia angular.

Para aquellos planetas que no sufren acoplamiento de marea, su momento magnético es dipolar e independiente de la velocidad angular rotacional.

Planeta Ubicado En Zona Habitable. La zona de habitabilidad planetaria (ZH) alrededor de una estrella se define como el rango de distancias orbitales donde un planeta puede tener agua líquida en su superficie. La existencia de agua líquida en la superficie es fundamental como prerequisite para la vida dado que es el principal disolvente para las reacciones bioquímicas. Esta zona no es estática ni en el tiempo ni en el espacio dado que sus límites variarán en función de la evolución estelar a lo largo del tiempo. Esta zona se sitúa en zonas comprendidas de temperaturas entre $273,15\text{ K}$ y $373,15\text{ K}$ en su superficie.

Habitable Distance Zone (HZD). Este índice descrito en el Planetary Habitability Laboratory (2011) mide la distancia en unidades de zona habitable (HZU) entre el exoplaneta y su estrella. Los planetas situados en la zona habitable se ubican en un rango entre -1 y 1 HZU y el valor de 0 corresponde al centro de la zona habitable. El valor positivo representa zonas alejadas de la estrella y el valor negativo zonas más cercanas a la estrella. El límite interior de esta zona dependería del mecanismo de feedback agua - vapor de agua y la zona exterior estaría controlada por las dinámicas del ciclo carbono-silicatos (Kasting et al, 1993) La anchura de esta región es directamente proporcional al tamaño de la estrella, de manera que estrellas tipo enanas rojas su amplitud es más reducida de hasta 0,3 UA y en cambio, en las estrellas tipo F esta zona puede extenderse a 2 UA.

Características Estelares

Tipos De Estrellas. Las estrellas se clasifican según el sistema de Morgan-Keenan en función de su espectro con las letras del alfabeto y el principal factor de clasificación es la temperatura. Las estrellas más calientes y que emiten más luminosidad son las A, B y O y las más frías y que emiten menos luminosidad son las denominadas enanas rojas como las M y algunas K.

Nuestro Sol es una estrella del tipo G (desde 5200 K hasta 6000 K de temperatura superficial de media). También forman parte del grupo de estrellas con temperaturas de media de las nanas naranjas o amarillas que son del tipo K y F. Las estrellas del tipo G como la nuestra son poco frecuentes en nuestra galaxia y son pocos los exoplanetas descubiertos que orbitan estrellas de este tipo. El 75 % de las estrellas de nuestra galaxia pertenecen al tipo M.

A pesar de que actualmente se conocen exoplanetas en sistemas planetarios muy diferentes de nuestra estrella, se consideran exoplanetas habitables los que

orbitan estrellas del tipo F (desde 6000 K hasta 7500 K), G, K (desde 3500 K hasta 5200 K) y M (desde 2000 K hasta 3500 K).

Temperatura. Las estrellas en la clasificación de Morgan-Keenan se clasifican en función de la temperatura y se dividen en M, K, G, F, A, B y O.

Tabla 3

Clasificación de Morgan-Keenan

Tipo de estrella	Rango de temperaturas (K)
M	≤ 3700
K	entre 3700 y 5200
G	entre 5200 y 6000
F	entre 6000 y 7500
A	entre 7500 y 10.000
B	entre 10.000 y 30.000
O	≥ 30.000

El Sol es una estrella tipo G.

Masa. La masa es una de las características que determina la evolución estelar. Para mantener el balance entre presión y gravedad las estrellas de mayor masa deben generar más energía y vacían su combustible de forma más rápida. La masa influye en el proceso de formación del planeta.

Irradiancia. La irradiancia es el flujo estelar a una distancia dada de una estrella

$$F \propto \frac{L}{a^2} \quad (15)$$

Siendo F el flujo estelar, L la luminosidad de la estrella y a el semieje mayor del exoplaneta. También sabemos que la luminosidad estelar es

$$L \propto R_S^2 T_{eff}^4 \quad (16)$$

Siendo R_S el radio estelar y T_{eff} la temperatura efectiva de la estrella

Metalicidad Estelar. La metalicidad tiene un rol importante en la arquitectura del sistema planetario y en la formación planetaria. La formación planetaria precisa de un mínimo de metalicidad. Para la determinación de la composición estelar el único parámetro disponible para la mayoría de las estrellas es la relación

$\left[\frac{Fe}{H}\right]$ que a su vez nos aporta información sobre la metalicidad de la estrella y que se refiere a la abundancia relativa de hierro respecto a la del Sol.

$$\left[\frac{Fe}{H}\right] = \log_{10} \frac{\left(\frac{Fe}{H}\right)}{\left(\frac{Fe}{H_{\odot}}\right)} \quad (17)$$

El ratio de la evolución estelar y el cambio en la T_{eff} y L dependen de la composición de oxígeno y hierro. Johnson et al. (2012) definieron el límite inferior crítico de metalicidad para la formación de un planeta como

$$\left[\frac{Fe}{H}\right]_{crit} \approx -1,5 + \log\left(\frac{r}{1 \text{ UA}}\right) \quad (18)$$

La relación obtenida entre la metalicidad crítica es una función de r con una dependencia casi lineal. Siendo r la distancia del planeta a la estrella en unidades astronómicas.

Edad. La importancia de la edad de una planeta para la detección de vida se debe a que para producirse la reacción de fotosíntesis el planeta debe tener una edad mínima para poder haber generado una biosfera. La edad del planeta se estima desde la edad de su estrella. Se valora un planeta como joven si tiene menos de 2 Ga (gigaaños) y se considera un periodo de 4 Ga el tiempo necesario para generar vida compleja (Safonova et al. 2016). La masa estelar es el factor más importante que determina la edad de la estrella y en segundo lugar la metalicidad dado que influye en la tasa de pérdida de masa provocada por vientos estelares.

Actividad Magnética. El magnetismo estelar tiene efectos en la pérdida de masa planetaria, en su habitabilidad y en las magnetosferas de los exoplanetas. Los campos magnéticos de las estrellas se debilitan con los años. Vidotto (2017) mostró que la intensidad del campo magnético es una función del tiempo

$$B \propto t^{-0,66 \pm 0,05} \quad (19)$$

Se considera la superficie de Alfvén la localización donde se produce la transición del viento estelar del sub-Alfvénico al super-Alfvénico.

La superficie estelar Alfvén es considerada actualmente un parámetro clave para definir la habitabilidad planetaria. De manera que si un planeta orbita dentro de dicha superficie se produciría una conexión directa entre el campo magnético del planeta y su estrella provocando una pérdida atmosférica y promoviendo la radiación de la superficie planetaria por lo que su habitabilidad sería muy poco probable.

La actividad magnética superficial se debe a la interacción entre la rotación, la convección y el campo magnético. Para el estudio de la actividad magnética, el número de Rossby estelar es clave. Este número es el ratio entre el periodo de rotación de la estrella y el tiempo de rotación convectiva.

$$R_O = \frac{P_{\text{rot}}}{\tau_c} \quad (20)$$

Siendo P_{rot} el periodo rotacional de la estrella y τ_c el tiempo de rotación convectiva.

El tiempo de rotación convectiva (τ_c) mide el tiempo que tarda una burbuja de plasma en desplazarse de la base de la zona convectiva de una estrella hasta la superficie.

Atkinson et al. (2024) propusieron un criterio para el cálculo de la habitabilidad en relación con la superficie Alfvén.

$$\frac{a_p}{R_A} \gg 1 \quad (21)$$

Donde a_p es la órbita periastro y R_A es el radio de Alfvén.

El R_A se calcula a partir del número de Rossby estelar (R_O)

$$R_A = c_0 R_O^{0.22 \pm 0.19} \quad (22)$$

Siendo c_0 una constante y R_O el número de Rossby estelar

Viento Solar. El viento solar es un flujo de partículas cargadas que son expulsadas desde la corona del sol hacia el espacio. Cuando interactúan con el campo magnético de un planeta pueden causar auroras. Un planeta sin o con una magnetosfera débil puede erosionar la atmósfera de un planeta.

Las interacciones entre vientos estelares, la magnetosfera y la atmósfera del planeta incluye múltiples procesos como la aceleración de partículas, el calentamiento de las capas superiores de la atmósfera y procesos de la pérdida atmosférica.

Radio De Alfvén. El radio de Alfvén es clave para entender la velocidad del viento estelar. Este radio es la distancia radial desde la estrella donde la energía magnética es igual a la energía cinética del viento estelar. En el interior de este radio se transporta la mayor parte del momento angular. Según Sadeghi et al. (2017) el radio de Alfvén se puede obtener

$$\frac{r_A}{R_*} = \sqrt{\left| \frac{3 \frac{dJ}{dt}}{2M\Omega_*} \right|} \quad (23)$$

Siendo R_* el radio de la estrella, r_A el radio de Alfvén, $\frac{dJ}{dt}$ es la pérdida del momento angular, M es la masa de la estrella y Ω_* es la velocidad angular.

Efectos Del Sistema Planetario

La galaxia a la que pertenece el planeta influye en la habitabilidad planetaria de diferentes maneras tal que veremos en las siguientes consideraciones. Por ejemplo, aquellas regiones muy pobres en metales o aquellas en gran parte desprovistas de átomos más masivos que H y He, son incapaces de formar planetas habitables. Por otro lado, en las regiones galácticas centrales la habitabilidad planetaria sería difícil por tener supernovas cercanas, estallidos de rayos gamma (GRB) y lluvias frecuentes de cometas.

Otro efecto de la galaxia, se vería en aquellos planetas que residen dentro de sistemas estelares binarios muy amplios dado que las perturbaciones gravitacionales locales de la galaxia pueden aumentar la excentricidad del sistema binario hasta desestabilizar los planetas que alberga.

González et al. (2001) introdujeron el concepto de zona galáctica habitable (GHZ) considerando la zona de la galaxia donde el desarrollo de vida compleja sería posible y que dependería de la posición temporal y espacial.

Índices Ya Existentes

Tras el descubrimiento de miles de nuevos exoplanetas, la siguiente cuestión es plantearnos si existe alguno de ellos habitable. Se entiende que partimos de las condiciones de habitabilidad que conocemos, es decir, las de nuestro planeta.

La respuesta a esta compleja pregunta por ahora difícil y no respondida se basará en la combinación de diferentes parámetros que hagan posible la habitabilidad del planeta. Desde el 2011 con el trabajo de Schulze et al. diferentes autores han publicado índices para acercarnos a encontrar la respuesta.

A continuación, describiremos brevemente los índices publicados en orden cronológico y su forma matemática.

Índice De Similitud Con La Tierra (ESI)

El índice más importante de habitabilidad es el índice de similitud con la Tierra (conocido por sus siglas en inglés ESI) es una herramienta matemática que nos permite conocer el grado de similitud de un exoplaneta con la Tierra. Fue descrito por Schulze-Makuch et al. (2011) y es el índice más utilizado para comparar otros índices. Tiene un rango entre 0 (sin similitud con la Tierra) y 1 (muy similar a la Tierra). Los planetas que tienen un valor entre 0,8 y 1 significa que son planetas que tienen más probabilidades de ser similares a la Tierra. Su fórmula es la media

geométrica de 4 parámetros físicos del planeta: el radio, la densidad, la temperatura superficial y la velocidad de escape. La Tierra tiene un valor de 1. Este índice cuenta con 2 fórmulas distintas.

ESI Para Planetas Del Sistema Solar. La ecuación para calcular el ESI para planetas del sistema solar es

$$ESI = \prod_{i=1}^n \left(1 - \left| \frac{x_i - x_{io}}{x_i + x_{io}} \right| \right)^{\frac{w_i}{n}} \quad (24)$$

Donde x_i es una propiedad planetaria de las mencionadas anteriormente, x_{io} es el valor de referencia con la Tierra, n es el numero de propiedades planetarias y w_n es un exponente de peso. Se expresan en Unidades Terrestres. En la tabla 4 se describen que unidades y pesos tiene cada variable.

Tabla 4

Parámetros de evaluación del ESI

Propiedad planetaria	Valor de referencia	Peso del exponente w_n
Radio	1 $R_{\oplus}$	0,57
Densidad	1 $\rho_{\oplus}$	1,07
Velocidad de escape	11,19 m/s	0,70
Temperatura superficial	288 K	5,58

El valor del ESI de los planetas rocosos del sistema solar son los que se muestran en la tabla 5 (los cálculos están desarrollados en el anexo).

Tabla 5

Valor del ESI en los planetas rocosos del sistema solar

Planeta	ESI
Mercurio (☿)	0,593
Venus (♀)	0,849
Tierra (⊕)	1
Marte (♂)	0,697

Vemos que en el ESI Venus tiene un valor mayor que Marte a pesar de que Marte es más probable de tener vida que Venus.

ESI Para Exoplanetas. Para el cálculo del ESI en este caso en lugar de usar la temperatura superficial se utiliza el flujo estelar (S) dado que no hay

información de la temperatura superficial del planeta. La ecuación para calcular el ESI para los exoplanetas es:

$$ESI = 1 - \sqrt{\frac{1}{2} \left[\left(\frac{S - S_{\oplus}}{S + S_{\oplus}} \right)^2 + \left(\frac{R - R_{\oplus}}{R + R_{\oplus}} \right)^2 \right]} \quad (25)$$

Cuando no se sabe el radio del planeta se aproxima a $M = R^{1/3}$.

Planetary Habitability Index (PHI)

Este índice fue propuesto por Schulze-Makuch et al. en el 2011. Valora la posibilidad de un planeta de desarrollar y mantener vida.

Proponen una media geométrica de 4 parámetros: Un sustrato (S) que se basa a su vez en unos subparámetros de sólido, atmósfera y magnetosfera; una energía (E) con otros subparámetros de luz, calor, reacciones redox; unos compuestos químicos (C) como el nitrógeno, azufre y potasio y agua en forma líquida (L).

$$PHI = (S \cdot E \cdot C \cdot L)^{\frac{1}{4}} \quad (26)$$

Estudiaron los planetas del sistema solar, 6 lunas de él y 7 exoplanetas, de ellos 5 pertenecientes a GJ 581. Del cálculo se obtiene un rango entre 0 y 1. La Tierra tiene un valor de 0,96.

Habitable Zone Distance (HZD)

Este índice mide la distancia en unidades de zona habitable (HZU) entre el exoplaneta y su estrella. Los planetas situados en la zona habitable se ubican en un rango entre -1 y 1 HZU y el valor de 0 corresponde al centro de la zona habitable. El valor positivo representa zonas alejadas de la estrella y el valor negativo zonas más cercanas a la estrella.

Los factores que tiene en cuenta este índice son la distancia del planeta a la estrella, la luminosidad y la temperatura de la estrella. La Tierra tiene un valor de -0,5. Su forma matemática es la siguiente:

$$\begin{aligned} r_i &= \left[r_{is} - a_i (T_{eff} - T_{\odot}) - b_i (T_{eff} - T_{\odot})^2 \right] \sqrt{L} \\ r_o &= \left[r_{os} - a_o (T_{eff} - T_{\odot}) - b_o (T_{eff} - T_{\odot})^2 \right] \sqrt{L} \end{aligned} \quad (27)$$

$$HZD = \frac{2r - r_o - r_i}{r_o - r_i} \quad (28)$$

Siendo r la distancia del exoplaneta a la estrella en unidades astronómicas (UA); L la luminosidad estelar en unidades solares; T_{eff} la temperatura efectiva de la estrella; $T_{\odot}$ la temperatura del Sol; $a_i = 2,7619 \cdot 10^{-5}$; $b_i = 3,8095 \cdot 10^{-5}$; $a_o = 1,3786 \cdot 10^{-4}$; $b_o = 1,4286 \cdot 10^{-9}$; $r_{is} = 0,72$; $r_{os} = 1,77$. El valor se da en unidades HZU.

Biological Complex Index (BCI)

Este índice valora la probabilidad relativa de vida de organismos complejos. Este índice fue descrito por Irwin et al. (2014). Entendiendo como organismos complejos no solo los microorganismos sino también los macroorganismos. Los parámetros del planeta que valora el sustrato (S), la energía (E), la temperatura (T), la geofísica (G) y la edad (A). Cada factor se subclasifica y se pondera de forma diferente. La escala de valores es entre 0 y 1 y la Tierra tiene un valor de 0,97.

La fórmula para calcular este índice es una media geométrica de los parámetros descritos anteriormente

$$BCI = (S \cdot E \cdot T \cdot G \cdot A)^{\frac{1}{5}} \quad (29)$$

Donde S es el sustrato, E es la energía, T la temperatura, G la geofísica y A es la edad.

Habitability Index For Transiting Exoplanets (HITE)

Barnes et al. (2016) describieron este índice. Este índice se basa en los planetas descubiertos por tránsito y analiza que el planeta sea rocoso y que tenga una atmósfera. Los parámetros que se analizan son 6 como el periodo orbital, la duración del tránsito y la profundidad, radio estelar, la temperatura estelar y la gravedad de la superficie estelar. A partir de estos datos, se decide si el planeta es rocoso y si se halla en su zona habitable. Es el primer índice que introduce el término probabilístico H con una función continua de verosimilitud que asigna un número entre 0 y 1 para cada planeta.

Cobb Douglas Habitability Score (CD-HPF)

Bora et al. (2016) lo publicaron a partir de los cuatro mismos parámetros del ESI y aplicaron una función de Cobb-Douglas para calcular su índice. Utilizaron un algoritmo KNN (K-Nearest Neighbour) para clasificar los exoplanetas en 6 grupos. Se consideró a los pertenecientes al grupo 6 como los potencialmente habitables.

Statistical-Likelihood Exo-Planetary Hability Index (SEPHI)

Rodriguez-Mozos et al. (2017) describieron este índice, en él se valoraran 4 factores, que el planeta sea rocoso, que tenga una atmosfera y una gravedad, que tenga agua en su superficie e incorpora que tenga campos magnéticos. Utiliza funciones de verosimilitud gaussianas para el cálculo del índice. También utiliza para el cálculo final una media geométrica de los 4 subíndices.

Nuevo Índice De Similitud Con La Tierra (NESI)

Es un índice descrito por Kashap et al. (2017) que añade al ESI dos nuevos parámetros físicos del planeta: el periodo orbital y la gravedad superficial. Los valores de referencia y el exponente utilizado para el cálculo del radio, densidad, velocidad de escape y temperatura son los mismos que en la ESI. En la tabla 6 se describen que unidades y pesos tiene cada variable.

Tabla 6

Parámetros de evaluación del NESI

Propiedad planetaria	Valor de referencia	Peso del exponente w_n
Radio	1 $R_{\oplus}$	0,57
Densidad	1 $\rho_{\oplus}$	1,07
Velocidad de escape	11,19 m/s	0,70
Temperatura superficial	288 K	5,58
Gravedad	9,81 m/s	0,13
Periodo orbital	365,25 días	0,7

Rock Similarity Index (RSI)

Este índice fue propuesto por Kashyap et al. (2020). Describieron un índice para planetas rocosos con condiciones físicas que permitían el crecimiento y la reproducción de microorganismos extremófilos. Este índice es una medie geométrica de seis parámetros: radio, densidad, velocidad de escape, temperatura superficial, periodo orbital y presión superficial. Utiliza los mismos valores de referencia que el ESI y el NESI pero cambia el peso de los exponentes para el cálculo de la temperatura.

Tabla 7*Parámetros de evaluación del RSI*

Propiedad planetaria	Valor de referencia	Peso del exponente w_n
Radio	$1 R_{\oplus}$	0,57
Densidad	$1 \rho_{\oplus}$	1,07
Velocidad de escape	11,19 m/s	0,70
Temperatura superficial	288 K	2,26
Gravedad	9,81 m/s	0,13
Periodo orbital	365,25 días	0,7
Presión superficial	1 atm	0,022

Su fórmula matemática es la siguiente:

$$RSI = \prod_{i=1}^n \left(1 - \left| \frac{x_i - x_{io}}{x_i + x_{io}} \right| \right)^{\frac{w_i}{n}} \quad (30)$$

METODOLOGÍA

Fuentes De Datos

Los datos para el cálculo del índice se obtendrán de los catálogos online. Existen tres catálogos online todos ellos actualizados de forma periódica. Estos tres catálogos son la Exoplanet Encyclopedia, la NASA Exoplanet Archive y el Open Exoplanet Catalog. Lo que diferencia estos tres catálogos son el criterio de inclusión del exoplaneta y de su fuente. Christiansen (2018) lo resumió en la tabla 8 que está actualizada al 11 de abril del 2025.

Tabla 8*Catálogos de exoplanetas*

Catálogo	Criterio de masa	Información de los datos	Nº planetas
Exoplanet Encyclopedia	$M_p - 1\sigma < 60M_{\oplus}$	Artículos publicados o conferencias	7441
NASA Exoplanet Archive	$M_p < 30M_{\oplus}$	Artículos aceptados	5868
Open Exoplanet Catalog	No hay criterio	Código abierto	5288

Se utilizará el catálogo de la NASA como principal fuente de obtención de los datos. Este catálogo fue creado en 2011 y sus datos provienen de las misiones Kepler, K2 y TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite). De estas bases de datos se pueden extraer parámetros físicos del planeta, de su órbita y su atmósfera y asimismo parámetros estelares. Aquellos parámetros de interés para el cálculo del

índice que no están referenciados en dichos catálogos serán calculados tal como se comentará en el apartado de parámetros.

Figura 3

Nasa Exoplanet Archive

Planet Name	Host Name	Number of Stars	Number of Planets	Discovery Method	Discovery Year	Discovery Facility	Controversial Flag	Orbital Period (days)	Orbit Semi-Major Axis [au]	Planet Radius [Earth Radius]	Planet Radius [Jupiter Radius]
11 Com b	11 Com	2	1	Radial Velocity	2007	Xinglong Station	0	323.21 ^{+0.06} _{-0.05}	1.178±0.000	12.2	1.09
11 UMi b	11 UMi	1	1	Radial Velocity	2009	Thuringer Lande	0	516.21997±3.20000	1.53±0.07	12.3	1.09
14 And b	14 And	1	1	Radial Velocity	2008	Okayama Astroph	0	186.76 ^{+0.11} _{-0.12}	0.775±0.000	13.1	1.16
14 Her b	14 Her	1	2	Radial Velocity	2002	W. M. Keck Obser	0	1765.03890 ^{+1.87709} _{-1.87256}	2.774 ^{+0.109} _{-0.120}	12.6	1.12
16 Cyg B b	16 Cyg B	3	1	Radial Velocity	1996	Multiple Observat	0	798.50000±1.00000	1.66±0.03	13.5	1.2
17 Sco b	17 Sco	1	1	Radial Velocity	2020	Lick Observatory	0	578.38 ^{+2.01} _{-2.09}	1.45±0.02	12.9	1.15
18 Del b	18 Del	2	1	Radial Velocity	2008	Okayama Astroph	0	982.85 ^{+1.06} _{-0.92}	2.47±0.002	12.5	1.12
1RXS J160929.1-210524 b	1RXS J160929.1-	1	1	Imaging	2008	Gemini Observat	0		330	18.647	1.664
24 Boo b	24 Boo	1	1	Radial Velocity	2018	Okayama Astroph	0	30.33 ^{+0.00} _{-0.01}	0.194±0.000	13.9	1.24
24 Sex b	24 Sex	1	2	Radial Velocity	2010	Lick Observatory	0	452.8 ^{+2.1} _{-4.5}	1.333 ^{+0.004} _{-0.009}	13.4	1.19
24 Sex c	24 Sex	1	2	Radial Velocity	2010	Lick Observatory	0	883.0 ^{+32.4} _{-13.8}	2.08 ^{+0.05} _{-0.02}	13.9	1.24
2M0437 b	2MASS J0437217	1	1	Imaging	2021	Subaru Telescope	0		118.0±1.3	13	1.16
2MASS J01033563-5515561 AB b	2MASS J0103356	2	1	Imaging	2013	Paranal Observat	0		84	12.3	1.1
2MASS J01225093-2439505 b	2MASS J0122509	1	1	Imaging	2013	W. M. Keck Obser	0		52±6	11	1.0
2MASS J02192210-3925225 b	2MASS J0219221	1	1	Imaging	2015	Cerro Tololo Inter-	0		156±10	16.1±0.3	1.44±0.03
2MASS J0249-0557 c	2MASS J0249-05	2	1	Imaging	2018	Mauna Kea Obser	0		1950±200	12.4	1.11
2MASS J03590986+2009361 b	2MASS J0359098	1	1	Imaging	2024	European Space /	0		572±7	12.2	1.08
2MASS J04414489+2301513 b	2MASS J0441448	1	1	Imaging	2010	Hubble Space Tel	0		15.0	12.6	1.13
2MASS J11011926-7732383 b	2MASS J1101192	1	1	Imaging	2024	European Space /	0		266±8	11.9	1.06
2MASS J11550485-7919108 b	2MASS J1155048	1	1	Imaging	2024	European Space /	0		587±2	12.1	1.08

Nota. Fuente: exoplanetarchive.ipac.caltech.edu

Software Y Librerías

Se creará una base de datos en Python a partir de datos obtenidos de la NASA Exoplanet Archive como el radio y la masa del planeta, la masa estelar, el radio de la estrella y el periodo orbital. Otros datos de interés para el índice serán calculados e introducidos en la base de datos. Dentro de este grupo de datos se encontrarán la velocidad de escape, el acoplamiento por marea, el número de Rossby estelar, el radio de Alfvén y el tiempo de rotación convectiva.

Se utilizarán las librerías de Python Pandas y NumPy para el procesamiento de los datos que son fundamentales para la manipulación de los datos y el Matplotlib para la creación de gráficas.

Procesado De Datos

Los valores de los diferentes parámetros serán referidos respecto a la Tierra y al Sol.

Tratamiento De Nulos

Los valores nulos serán aquellos valores que no están registrados en los catálogos ni publicados en la literatura. Los valores nulos serán tratados en función del parámetro.

En el caso de que no se tenga ni el radio ni la masa del planeta se elimina el exoplaneta de la base de datos. Pero, si falta uno de los dos, se aproximará al cálculo del ESI aplicando la relación $M = R^{\frac{1}{3}}$. Para el cálculo de la densidad se aplicará la ecuación (5).

Los parámetros para el cálculo de la órbita que son imprescindibles como el periodo orbital o el semieje mayor, si ambos son nulos se eliminará el exoplaneta porque no será posible calcular el acoplamiento por marea. Si tampoco se dispone del radio estelar se eliminará el exoplaneta.

Para el cálculo del periodo orbital o el semieje mayor de aquellos planetas sin uno de estos datos, la excentricidad se considerará 0 y se aplicará la 3ª ley de Kepler para una órbita circular

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM}a^3 \quad (31)$$

Siendo T el periodo orbital en segundos, $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$ la constante gravitatoria en $m^3kg^{-1}s^{-2}$, M la masa de la estrella en kg y a el semieje mayor del planeta en metros. Después se pasarían a las unidades de la base de datos donde T está en días, a en unidades astronómicas y M en $M_{\odot}$.

En cuanto a los parámetros estelares, en el caso de desconocimiento de la edad estelar y/o su metalicidad se anula el exoplaneta de la base de datos. En el caso que no se obtenga la luminosidad de la estrella ni la masa estelar se eliminará el exoplaneta. Si falta uno de estos valores se realizará el cálculo de la ecuación (32) para aproximar el valor, asumiendo que pueden haber errores para estrellas de masa muy pequeña.

$$M = L^{\frac{1}{3.5}} \quad (32)$$

Siendo M la masa de la estrella en unidades solares ($M_{\odot}$) y L la luminosidad de la estrella en unidades solares ($L_{\odot}$).

Premisas Y Parámetros Para El Cálculo Del índice

Para el cálculo del índice, nos basaremos en las siguientes premisas para el planeta y su estrella:

1. Que el planeta sea rocoso o telúrico. Para ello, analizaremos la masa, el radio y la densidad de los exoplanetas.

2. Que el planeta tenga parámetros orbitales, tales como el periodo orbital y la excentricidad, que lo hagan lo más habitable posible. Otro punto clave es que no presente anclaje por marea.
3. Que tenga una atmósfera y una gravedad capaces de retenerla. Consideramos la velocidad de escape como indicador de su capacidad para conservar una atmósfera.
4. Que su estrella posea características determinadas. Estas incluyen que el planeta tenga una edad mínima que le permita haber tenido tiempo suficiente para desarrollar vida, que cuente con una metalicidad adecuada para la formación planetaria y un magnetismo mínimo para proteger su atmósfera del viento solar y de rayos cósmicos.
5. Que el planeta se encuentre ubicado en la zona habitable de su estrella, de forma que pueda existir agua líquida en su superficie.

Los parámetros que vamos a utilizar para el cálculo del índice los clasificaremos en dos grupos principales: los parámetros planetarios y los estelares. A su vez a cada uno de estos grupos principales pertenecerán otros parámetros como describiremos a continuación.

Parámetros Planetarios

Los parámetros planetarios se clasificarán en físicos, orbitales y atmosféricos.

Los parámetros físicos que a tener en cuenta son el radio, la masa y la densidad. Los valores de cada uno de estos parámetros los obtendremos de la base de datos de la NASA Exoplanet Archive y sus valores de referencia van a ser aquellos descritos en la literatura. Los valores de referencia se pueden ver en la tabla 9.

Tabla 9

Parámetros planetarios físicos

Parámetro	Valores	Valor unidad	Fuente
Radio	entre 0,5 y 1,9	$R_{\oplus}$	Schulze et al. (2011), Kashyap et al. (2020)
Masa	entre 0,1 y 10	$M_{\oplus}$	Schulze et al. (2011)
Densidad	entre 0,7 y 1,5	$\rho_{\oplus}$	Schulze et al. (2011), Kashyap et al. (2020)

Los parámetros orbitales que se van a considerar para el cálculo de índice son el periodo orbital, la excentricidad y el acoplamiento de marea. Para el periodo orbital se utilizarán los rangos descritos por Schulze et al. (2011). Para la excentricidad consideraremos que para la habitabilidad planetaria el planeta debe tener

una excentricidad baja. Para definir la excentricidad como baja se considerará el límite descrito por Dressing et al. (2010) que sería inferior a 0,35. Para considerar un planeta acoplado por marea se aplicará la ecuación (8) propuesta por Hanslmeier (2018) y se considerará el resultado como binario: 0,1 como acoplado y 1 como no acoplado.

Tabla 10

Parámetros planetarios orbitales

Parámetro	Valores	Valor unidad	Fuente
Periodo orbital	entre 0,61 y 1,88	365,25 días	Schulze et al. (2011)
Excentricidad	hasta 0,35-0,65	-	Dressing et al. (2010)
Acoplamiento de marea	Binario: 0 o 1	ecuación (8)	Hanslmeier (2018)

Los parámetros atmosféricos son los más difíciles de obtener dado que sólo disponemos de espectrografía de 142 atmósferas de los 7417 exoplanetas (aproximadamente un 2 %) según el catálogo de exoplanet.eu. Por ello, como medida indirecta de la atmósfera utilizaremos la velocidad de escape como han empleado otros autores (Schulze et al. (2011), Rodríguez-Mozos et al. (2017) y Kashyap et al. (2020)).

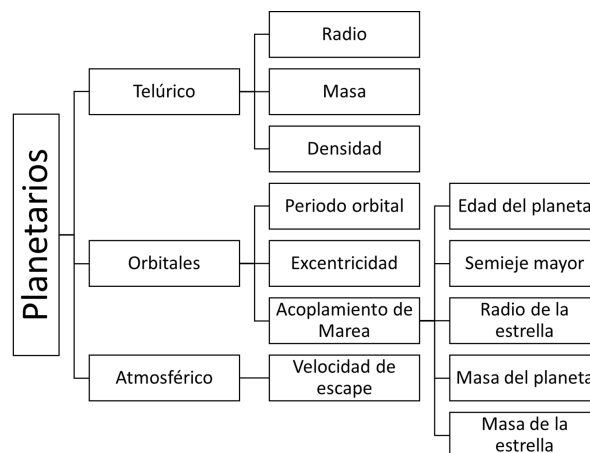
Tabla 11

Parámetros planetarios atmosféricos

Parámetro	Valores	Valor unidad	Fuente
Velocidad de escape	entre 0,4 y 1,4	$V_{esc,\oplus}$	Schulze et al. (2011), Kashyap et al. (2020)

Figura 4

Parámetros planetarios para el cálculo del índice



HZD

Vamos a considerar el HZD como un apartado dado que para su cálculo requiere tanto datos del planeta como de su estrella. Para considerar si el exoplaneta se encuentra en la zona habitable de la estrella vamos a calcular el HZD. Este índice incorpora tres parámetros estelares que son: la distancia del planeta a la estrella, la luminosidad y la temperatura estelar. Según el índice y su ecuación (28) los planetas situados en la zona habitable tienen un valor del índice entre -1 y 1.

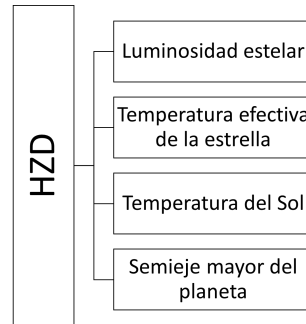
Tabla 12

Parámetro HZD

Parámetro	Valores	Valor unidad	Fuente
HZD	entre -1 y 1	HZU	Méndez et al. (2012)

Figura 5

Parámetros HZD para el cálculo del índice



Parámetros Estelares

Los parámetros estelares a tener en cuenta para el cálculo del índice van a ser tres: la edad de la estrella, la metalicidad y el magnetismo estelar.

La edad estelar la obtendremos de las bases de datos y se considera el límite inferior de 2 Ga y el óptimo entre de 4 ± 1 Ga.

La metalicidad se obtiene con la relación $\left[\frac{Fe}{H}\right]$ a partir de la base de datos de la NASA considerando como $\left[\frac{Fe}{H}\right] \geq -1$ dex y aplicaremos la ecuación (18) que nos estima la metalicidad mínima para la formación de un planeta a una distancia r de su estrella. La metalicidad crítica será más elevada en aquellos planetas más alejados de su estrella y serán aquellos planetas situados fuera de su zona habitable. Serán estrellas con ratios $>0,5$ dex (decimal exponent).

El magnetismo estelar juega un rol fundamental para la habitabilidad planetaria debido al efecto protector que ejerce sobre su atmosfera. Para el cálculo del magnetismo estelar se ha aplicado la relación $\frac{a_p}{R_A} \gg 1$ propuesta por Atkinson et

al. (2024) en la relación con la superficie de Alfvén. El periodo de rotación de una estrella es relativamente fácil de medir con observaciones fotométricas y se ha podido medir para estrellas observadas con el Kepler. El cálculo del número de Rossby estelar es más complejo y precisamos previamente del cálculo del tiempo de rotación convectiva.

Para el cálculo del tiempo de rotación convectiva se ha utilizado el método empírico de Wright et al. (2018) y Atkinson et al. (2024) a partir de la masa estelar. Debemos comentar que este método es válido para masas solares entre 0,08 y 1,36 $M_{\odot}$. A partir del tiempo de rotación convectiva podremos calcular el número de Rossby (ecuación (20)) y con el número de Rossby, el radio de Alfvén (22).

$$\log \tau_c = 2,33_{-0,05}^{+0,06} - 1,50_{-0,20}^{+0,21} M_{\text{star}} + 0,31_{-0,17}^{+0,16} M_{\text{star}}^2 \quad (33)$$

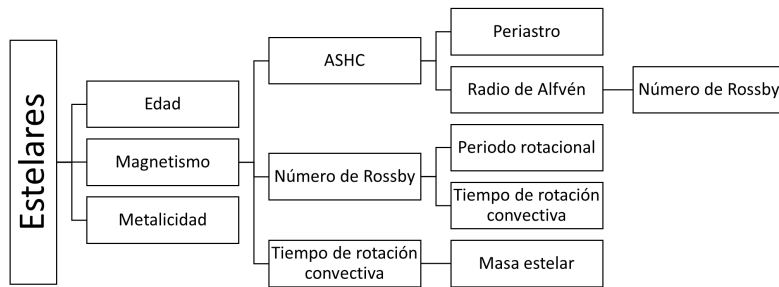
Tabla 13

Parámetros estelares

Parámetro	Valores	Valor unidad	Fuente
Edad	>2 Ga, óptimo: 4 ± 1	Ga	Safonova et al. (2016)
Metalicidad	entre -0,1 y 0,5	dex	Johnson et al. (2012)
Magnetismo	$\frac{a_p}{R_A} \gg 1$	-	Atkinson et al. (2024)

Figura 6

Parámetros estelares para el cálculo del índice



Análisis De Los Datos

Para el análisis de los datos de las variables continuas se ha realizado una función de verosimilitud con una distribución gaussiana normalizada. Esta distribución nos ha parecido la más adecuada dado que se basa en el Teorema del límite central.

Vamos a trabajar con una variante de la distribución gaussiana centrada en un valor óptimo que será el de la Tierra o aquel que consideremos según la variable o un rango de valores que consideremos óptimos. Para la estimación de la función determinaremos sus límites con unos valores de cut-off mínimos y máximos que son los descritos en el apartado anterior. Fuera de estos valores cut-off la función tendrá un valor de 0.

Para conseguir estos resultados aplicaremos una modificación sobre la función gaussiana normalizada con una función polinómica de tercer grado entre x_{min} y $x_{opt,min}$ o x_{opt} , si solo hay un valor óptimo que será de subida a 1, y otra función de bajada que será entre $x_{opt,max}$ o x_{opt} y x_{max} . Para ello, se ha creado una función que posteriormente se aplicará en Python para poder aplicar a los parámetros con variables continuas y que cumplirá las siguientes condiciones:

$$\begin{cases} ax_{min}^3 + bx_{min}^2 + cx_{min} + d = 0 \\ ax_{opt}^3 + bx_{opt}^2 + cx_{opt} + d = 1 \\ 3ax_{min}^2 + 2bx_{min} + c = 0 \\ 3ax_{opt}^2 + 2bx_{opt} + c = 0 \end{cases} \quad (34)$$

$$\begin{cases} ax_{max}^3 + bx_{max}^2 + cx_{max} + d = 0 \\ ax_{opt}^3 + bx_{opt}^2 + cx_{opt} + d = 1 \\ 3ax_{max}^2 + 2bx_{max} + c = 0 \\ 3ax_{opt}^2 + 2bx_{opt} + c = 0 \end{cases} \quad (35)$$

Quedando la función final

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq x_{min} \\ a_1x^3 + b_1x^2 + c_1x + d_1 & \text{si } x_{min} < x < x_{opt,min} \\ 1 & \text{si } x_{opt,min} \leq x \leq x_{opt,max} \\ a_2x^3 + b_2x^2 + c_2x + d_2 & \text{si } x_{opt,max} < x < x_{max} \\ 0 & \text{si } x \geq x_{max} \end{cases} \quad (36)$$

Donde:

$$\left\{ \begin{array}{l}
a_1 = \frac{2}{x_{min}^3 - 3x_{min}^2 x_{opt,min} + 3x_{min} x_{opt,min}^2 - x_{opt,min}^3} \\
a_2 = \frac{2}{x_{opt,max}^3 - 3x_{opt,max}^2 x_{max} + 3x_{opt,max} x_{max}^2 - x_{max}^3} \\
b_1 = -\frac{3x_{min} + 3x_{opt,min}}{x_{min}^3 - 3x_{min}^2 x_{opt,min} + 3x_{min} x_{opt,min}^2 - x_{opt,min}^3} \\
b_2 = -\frac{3x_{opt,max} + 3x_{max}}{x_{opt,max}^3 - 3x_{opt,max}^2 x_{max} + 3x_{opt,max} x_{max}^2 - x_{max}^3} \\
c_1 = \frac{6x_{min} x_{opt,min}}{x_{min}^3 - 3x_{min}^2 x_{opt,min} + 3x_{min} x_{opt,min}^2 - x_{opt,min}^3} \\
c_2 = \frac{6x_{opt,max} x_{max}}{x_{opt,max}^3 - 3x_{opt,max}^2 x_{max} + 3x_{opt,max} x_{max}^2 - x_{max}^3} \\
d_1 = \frac{x_{min}^3 - 3x_{min}^2 x_{opt,min}}{x_{min}^3 - 3x_{min}^2 x_{opt,min} + 3x_{min} x_{opt,min}^2 - x_{opt,min}^3} \\
d_2 = \frac{x_{opt,max}^3 - 3x_{opt,max}^2 x_{max}}{x_{opt,max}^3 - 3x_{opt,max}^2 x_{max} + 3x_{opt,max} x_{max}^2 - x_{max}^3}
\end{array} \right. \quad (37)$$

En el caso de $x_{opt,min} = x_{opt,max} = x_{opt}$:

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq x_{min} \\
a_1 x^3 + b_1 x^2 + c_1 x + d_1 & \text{si } x_{min} < x < x_{opt} \\
1 & \text{si } x = x_{opt} \\
a_2 x^3 + b_2 x^2 + c_2 x + d_2 & \text{si } x_{opt} < x < x_{max} \\
0 & \text{si } x \geq x_{max} \end{cases} \quad (38)$$

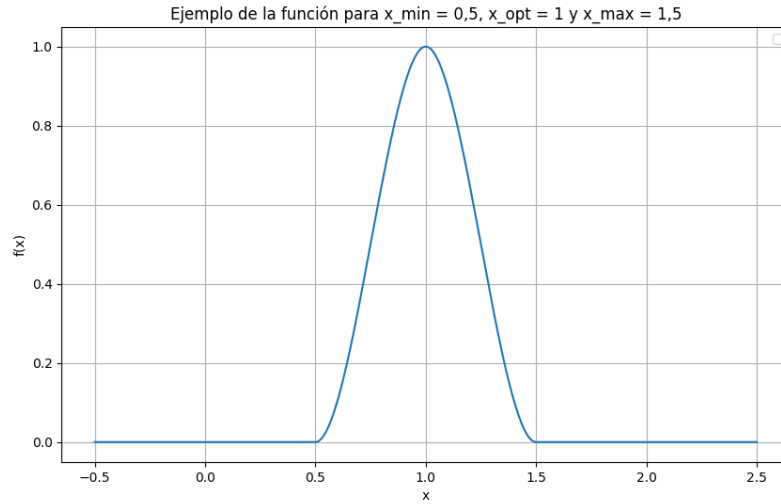
Donde:

$$\left\{ \begin{array}{l}
a_1 = \frac{2}{x_{min}^3 - 3x_{min}^2x_{opt} + 3x_{min}x_{opt}^2 - x_{opt}^3} \\
a_2 = \frac{2}{x_{opt}^3 - 3x_{opt}^2x_{max} + 3x_{opt}x_{max}^2 - x_{max}^3} \\
b_1 = -\frac{3x_{min} + 3x_{opt}}{x_{min}^3 - 3x_{min}^2x_{opt} + 3x_{min}x_{opt}^2 - x_{opt}^3} \\
b_2 = -\frac{3x_{opt} + 3x_{max}}{x_{opt}^3 - 3x_{opt}^2x_{max} + 3x_{opt}x_{max}^2 - x_{max}^3} \\
c_1 = \frac{6x_{min}x_{opt}}{x_{min}^3 - 3x_{min}^2x_{opt} + 3x_{min}x_{opt}^2 - x_{opt}^3} \\
c_2 = \frac{6x_{opt}x_{max}}{x_{opt}^3 - 3x_{opt}^2x_{max} + 3x_{opt}x_{max}^2 - x_{max}^3} \\
d_1 = \frac{x_{min}^3 - 3x_{min}^2x_{opt}}{x_{min}^3 - 3x_{min}^2x_{opt} + 3x_{min}x_{opt}^2 - x_{opt}^3} \\
d_2 = \frac{x_{opt}^3 - 3x_{opt}^2x_{max}}{x_{opt}^3 - 3x_{opt}^2x_{max} + 3x_{opt}x_{max}^2 - x_{max}^3}
\end{array} \right. \quad (39)$$

La función gaussiana modificada con la función polinómica a trozos presentará la distribución de la figura 7.

Se aplicará para cada parámetro esta función y obtendremos un valor a partir de la curva gaussiana. El valor obtenido de la función será el que aplicaremos para el cálculo del índice.

Figura 7
Función del parámetro x



Cálculo Del índice

El cálculo del índice será una media geométrica de 5 subíndices en relación con el cumplimiento de las premisas que se ha planteado. Primero, que el planeta sea telúrico (T); segundo, que sus parámetros orbitales lo hagan habitable (O); tercero, que tenga una atmósfera (A); cuarto, que su estrella presente unas características determinadas (S); y quinto, que el planeta esté ubicado en la zona habitable de su estrella (H). El índice constará de un total de 18 variables referidos tanto a parámetros planetarios como estelares. El cálculo del índice lo haremos aplicando la ecuación (40).

$$\boxed{\text{Índice} = \sqrt[5]{TOASH}} \quad (40)$$

A continuación se detallará el cálculo para cada uno de estos subíndices. Para cada parámetro se le aplicará la distribución gaussiana modificada en función de unos límites mínimos y máximos que se especificarán para cada parámetro.

1. Telúrico (T)

Uno de los principales requerimientos para la habitabilidad planetaria y para la existencia de vida es que el planeta sea rocoso o telúrico. Para considerar un planeta rocoso tendremos en cuenta los parámetros de radio, masa y densidad del planeta. Para valorar los rangos óptimos mínimos y máximos para cada uno de ellos utilizaremos los descritos en otros índices como el ESI, el NESI, el SEPHI y el RSI.

Como hemos comentado previamente en la descripción de estos índices se consideraba el valor de referencia el de la Tierra, es decir, 1 EU y a partir

de unos límites superiores e inferiores para cada parámetro se utilizaba un exponente.

En este trabajo se ha el parámetro óptimo el relativo a la Tierra y los límites superiores e inferiores los descritos en estos índices previos. Se tiene la información detallada en la tabla 9.

a) Radio (R)

Se va a considerar el radio del exoplaneta entre rangos de 0,5 y 1,9 el $R_{\oplus}$ y como óptimo el de la Tierra porque es la única evidencia que conocemos de planeta habitable. Siendo $R_{\oplus} = 6371$ km

$$\begin{cases} R_{min} = 0,5 R_{\oplus} \\ R_{opt} = 1 R_{\oplus} \\ R_{max} = 1,9 R_{\oplus} \end{cases} \quad (41)$$

b) Masa (M)

Para la masa se va a considerar el rango entre 0,1 y 10. Siendo $M_{\oplus} = 5,972 \cdot 10^{24}$ kg

$$\begin{cases} M_{min} = 0,1 M_{\oplus} \\ M_{opt} = 1 M_{\oplus} \\ M_{max} = 10 M_{\oplus} \end{cases} \quad (42)$$

En el caso de desconocer el radio o la masa aplicaremos la aproximación de $M = R^{\frac{1}{3}}$.

c) Densidad (ρ)

La densidad es otro parámetro descrito en la literatura para clasificar el tipo de exoplaneta y también se va a considerar el rango situado entre 0,7 y 1,5. Son límites normalizado con la Tierra (entre 4,4 y 8,3 $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$) Siendo $\rho_{\oplus} = 5,5 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$

$$\begin{cases} \rho_{min} = 0,7 \rho_{\oplus} \\ \rho_{opt} = 1 \rho_{\oplus} \\ \rho_{max} = 1,5 \rho_{\oplus} \end{cases} \quad (43)$$

Fórmula de subíndice (T)

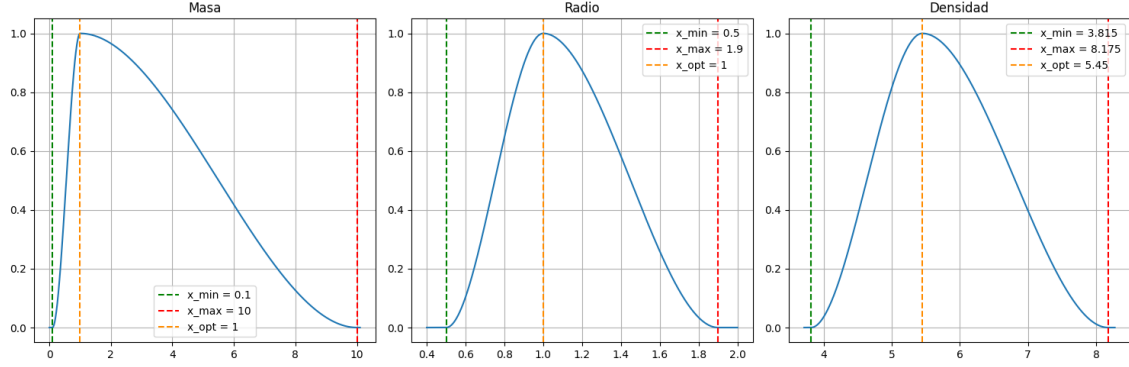
A partir de los valores obtenidos para cada uno de estos 3 parámetros aplicando la función de Gauss modificada se puede calcular el primer componente del

índice. Se denominará como subíndice T y será una media geométrica entre los tres parámetros. Sus valores comprenderán un valor entre 0 y 1.

$$T = \sqrt[3]{RM\rho} \quad (44)$$

Figura 8

Gráficas de la función para los parámetros telúricos



2. Órbita (O)

Para el cálculo del subíndice órbita se van a tener en cuenta tres parámetros: Periodo orbital, excentricidad y el acoplamiento por marea.

a) Periodo orbital (T_O)

Para la determinación de los mínimos y los máximos para el periodo orbital se ha tenido en cuenta los valores mínimos y máximos descritos en otros índices como el NESI y el RSI. Se ha obtenido un valor para cada uno de los exoplanetas aplicando la función de Gauss modificada.

$$\begin{cases} T_{O,min} = 0 \text{ años} \\ T_{O,opt} = 1 \text{ año} \\ T_{O,max} = 1,9 \text{ años} \end{cases} \quad (45)$$

Siendo un año 365,25 días

b) Excentricidad (ϵ)

La excentricidad se ha considerado según los parámetros descritos en la tabla 9. Se ha obtenido un valor para cada uno de los exoplanetas aplicando la función de Gauss modificada.

$$\begin{cases} \epsilon_{min} = \text{No aplicable} \\ \epsilon_{opt,min} = 0 \\ \epsilon_{opt,max} = 0,35 \\ \epsilon_{max} = 0,65 \end{cases} \quad (46)$$

c) Acoplamiento de marea (T_L)

Para el cálculo del acoplamiento por marea se ha precisado de otros parámetros: la edad del planeta (años), el semieje mayor del planeta (m), el radio de la estrella (m) y la masa de la estrella (kg) y del planeta (kg). A partir de estos parámetros se ha aplicado la ecuación (8) considerando 0,1 si no lo está y 1 lo está. En este caso el resultado es binario.

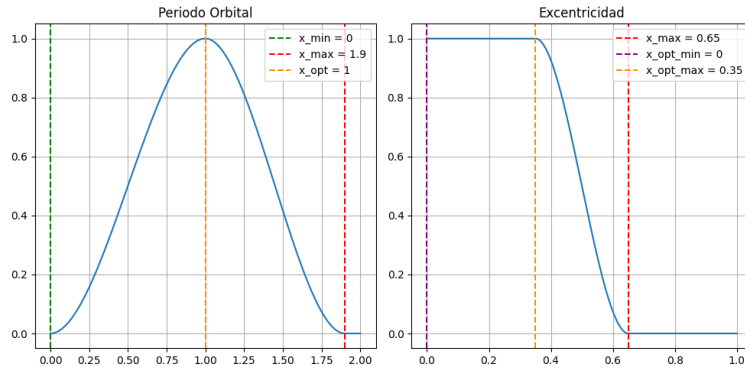
$$\begin{cases} 0,1 & \text{si lo está} \\ 1 & \text{si no lo está} \end{cases} \quad (47)$$

Fórmula de subíndice (O)

$$O = \sqrt[3]{T_O \epsilon T_L} \quad (48)$$

Figura 9

Gráficas de las funciones para los parámetros orbitales



3. Atmósfera (A)

Como medida de la capacidad de un planeta para retener la atmósfera se ha utilizado la velocidad de escape relativa a la tierra tal como la han utilizado otros autores para el cálculo de otros índices como el ESI, el NESI, el SEPHI, y el RSI. Sabemos que la velocidad de escape es una función que depende de la gravedad y del radio del planeta.

$$v_{esc} = \sqrt{\frac{2GM}{R^2}} \quad (49)$$

Tal como se describe en el ESI y que se utiliza en los otros índices los límites de esta velocidad de escape son entre 0,4 y 1,4 $v_{esc,\oplus}$. Como describen Schulze et al. (2011) para el cálculo del ESI estos valores corresponden a la velocidad de escape térmico en la temperatura de equilibrio de la Tierra de -18°C (255 K); 0,4 representa 6 veces la velocidad del nitrógeno atómico y 1,4 la velocidad del hidrógeno atómico.

$$\begin{cases} v_{esc,min} = 0,4 v_{esc,\oplus} \\ v_{esc,opt} = 1 v_{esc,\oplus} \\ v_{esc,max} = 1,4 v_{esc,\oplus} \end{cases} \quad (50)$$

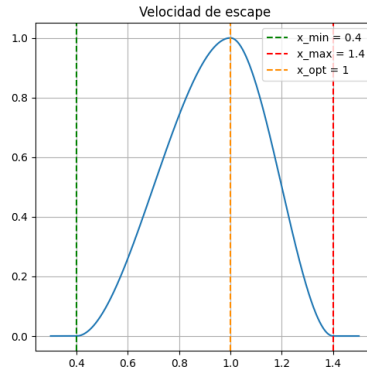
Siendo $v_{esc,\oplus} = 11,19 \frac{\text{km}}{\text{s}}$

Fórmula de subíndice

$$A = v_{esc} \quad (51)$$

Figura 10

Gráfica de la velocidad de escape



4. Estelares (S)

Para el cálculo del subíndice estelar se tendrá en cuenta la edad de la estrella, la metalicidad y el magnetismo estelar.

a) Edad (E)

La edad del planeta óptima se considerará de 4 ± 1 Ga. Se aplicará una función gaussiana modificada para cada valor de los diferentes exoplanetas y se le asignará un valor de la función.

$$\begin{cases} E_{min} = 2 \text{ Ga} \\ E_{opt,min} = 3 \text{ Ga} \\ E_{opt,max} = 5 \text{ Ga} \\ E_{max} = 6 \text{ Ga} \end{cases} \quad (52)$$

b) Metalicidad (M_t)

La metalicidad se obtiene con la relación $[\frac{\text{Fe}}{\text{H}}]$ y se realizará el mismo procedimiento descrito para las otras variables.

$$\begin{cases} M_{t,min} = -0,1 \text{ dex} \\ M_{t,opt} = 0 \text{ dex} \\ M_{t,max} = 0,5 \text{ dex} \end{cases} \quad (53)$$

c) Magnetismo (M_g)

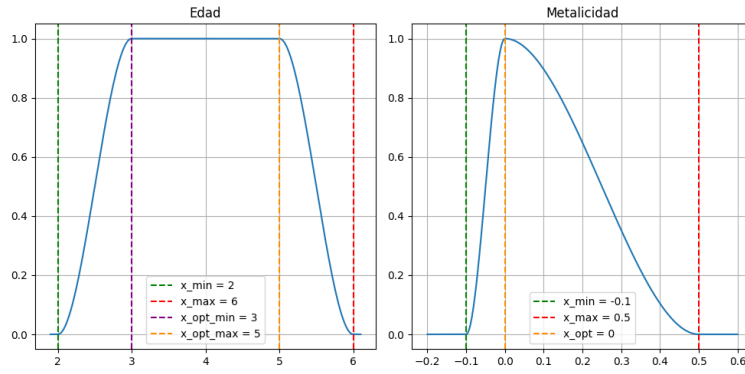
Para el cálculo del magnetismo se realizarán los cálculos previos de tiempo de rotación convectiva, cálculo del número de Rossby estelar y el cálculo del radio de Alfvén. Tal como se ha descrito previamente en el trabajo se considerará un valor mínimo para que el planeta sea habitable. En este caso consideraremos como una variable binaria 1 o 0.

$$\begin{cases} 1 \text{ si } \frac{a_p}{R_a} > 1 \\ 0 \text{ si no cumple con la condición anterior} \end{cases} \quad (54)$$

Fórmula de subíndice

En el cálculo de este subíndice se utilizará una media aritmética en lugar de una geométrica para flexibilizar el subíndice dado que sino sería una condición más restrictiva.

$$\boxed{S = \frac{E + M_t + M_g}{3}} \quad (55)$$

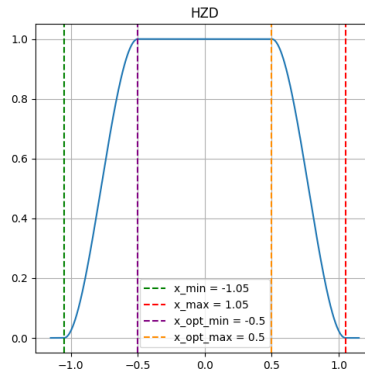
Figura 11*Gráficas de las funciones para los parámetros estelares*

5. HZD

Las características de este parámetro basadas en la luminosidad estelar, distancia planeta estrella y temperatura estelar han sido discutidas en apartados anteriores. Los valores que se considerarán son los siguientes:

$$\begin{cases} \text{HZD}_{min} = -1,05 \text{ HZU} \\ \text{HZD}_{opt,min} = -0,5 \text{ HZU} \\ \text{HZD}_{opt,max} = 0,5 \text{ HZU} \\ \text{HZD}_{max} = 1,05 \text{ HZU} \end{cases} \quad (56)$$

El mínimo y el máximo se sitúan un poco por encima del valor habitable (y el mínimo un poco por debajo) para mejorar la clasificación de la distancia dado que la zona habitable empieza a -1 HZU y acaba a 1 HZU .

Figura 12*Gráfica del HZD*

RESULTADOS

Los resultados se presentarán en tres partes: en primer lugar, la aplicación del índice en los planetas de nuestro sistema solar; en segundo lugar, el estudio descriptivo de los exoplanetas analizados; y, en tercer lugar, la aplicación del índice en los exoplanetas.

Planetas Del Sistema Solar

Para valorar los resultados en primer lugar se ha aplicado el cálculo del índice en los planetas del sistema solar.

Tabla 14

Resultados del índice Venus, la Tierra y Marte

Planeta	T	O	A	S	H	Índice
Venus (♀)	0,930	0,875	0,958	1	0,029	0,470
Tierra (⊕)	1	1	1	1	1	1
Marte (♂)	0,002	0,110	0,018	1	0,990	0,086

Se puede observar que la Tierra tiene un índice de 1.

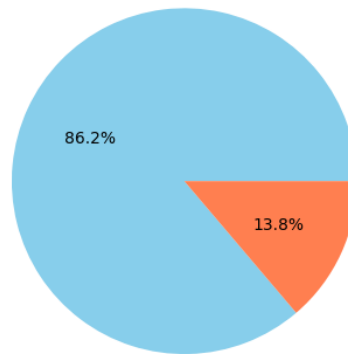
Exoplanetas

De los 5.867 exoplanetas incluidos inicialmente en la base de datos, se han seleccionado 588, ya que son aquellos que disponen de todos los parámetros necesarios para el cálculo del índice. La mayoría de estos exoplanetas, el 62 %, han sido descubiertos por el método de tránsito. Antes de entrar en la aplicación directa del índice se realizará un estudio descriptivo de estos exoplanetas.

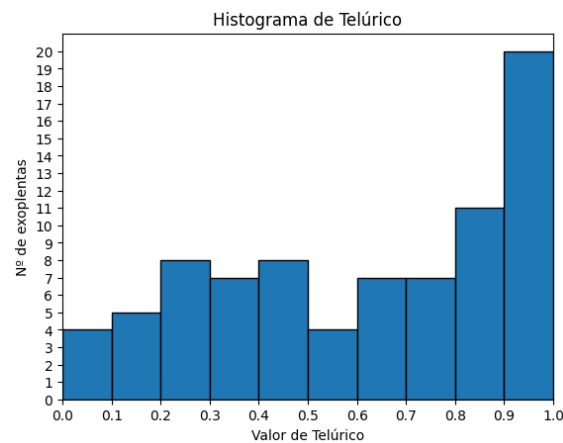
Estudio Descriptivo De Los Exoplanetas

Telúricos. El 14 % de los exoplanetas estudiados para el cálculo de nuestro índice son telúricos, tal y como se ve en la figura 13. Esto se debe a que la mayoría de los exoplanetas descubiertos son del tipo gaseoso, iguales o más masivos que Júpiter debido a que los métodos de detección de exoplanetas son más sensibles a encontrar exoplanetas de mayor tamaño.

De los 588 exoplanetas sólo 81 (14 %) de ellos cumplen los tres criterios requeridos en este trabajo para ser considerados como terrestres. En las figuras 13 y 14 se ven reflejados los resultados de los valores obtenidos de este subíndice.

Figura 13*Porcentaje de exoplanetas telúricos*

Nota. Los planetas telúricos son los representados en color naranja

Figura 14*Valores del subíndice telúrico de los exoplanetas*

Nota. Solo están representados los que tienen un valor mayor que 0 en este parámetro

Órbita. La mayoría de exoplanetas tienen una excentricidad más alta (por ejemplo, $0,124 \pm 0,16$, donde el valor a la izquierda del símbolo $\pm$ corresponde a la media y el valor a la derecha a la desviación estándar) que los planetas de nuestro sistema solar. Por otro lado, los planetas que se encuentran más próximos a sus estrellas presentan periodos orbitales menores y acoplamiento de marea junto a su anfitriona.

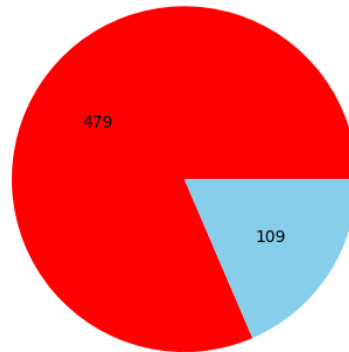
En cuanto a los periodos orbitales, éstos varían considerablemente, desde pocas horas (KOI-1843.03 con 4,25 horas) hasta millones de años (GJ 900 b con 1.265.634,4 años). Estas disparidades se deben al tipo espectral de la estrella, a la distancia entre el planeta y su anfitriona, y al tipo de sistema estelar (único versus

múltiple).

El fenómeno del acoplamiento por marea se produce en la gran mayoría de los exoplanetas estudiados, especialmente en aquellos más próximos a su estrella (figura 15).

Figura 15

Planetas con acoplamiento de marea (rojo) y los que no (azul claro)



Atmósfera. La mayor parte de los exoplanetas estudiados presentan una velocidad de escape ($4,45 \pm 4,38 v_{esc,\oplus}$, donde el valor a la izquierda del símbolo $\pm$ corresponde a la media y el valor a la derecha a la desviación estándar) superior a la Tierra debido a que la mayoría son gigantes gaseosos.

Estelares. El 70 % de las estrellas de la Vía Láctea son enanas rojas tipo M, es decir, más frías y menos brillantes que el Sol. La distribución del tipo espectral en nuestra serie se muestra en la tabla 15.

Tabla 15

Tipos de estrella de los exoplanetas

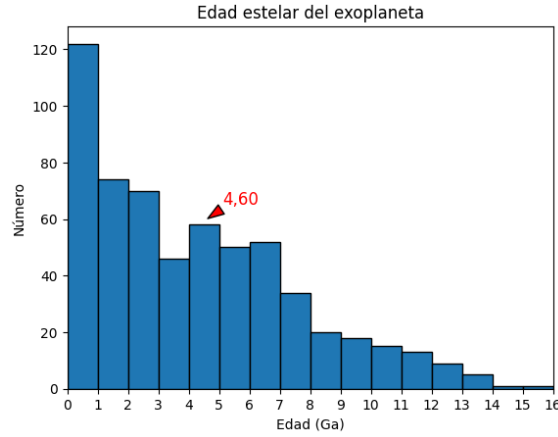
Tipo	Número de exoplanetas
M	111
K	187
G	205
F	83
A	2
B	0
O	0

También en nuestra serie se observan edades estelares dispares entre ellas, la más joven (V830 Tau con 2 Ma) y la más veterana (TOI 260 con 15,9 Ga). En la

figura 16 se ven reflejadas la distribución por edades y está marcado en rojo la edad del Sol (4,6 Ga). La mayoría de estas estrellas son más jóvenes que nuestra estrella, por lo que penalizará el índice de habitabilidad.

Figura 16

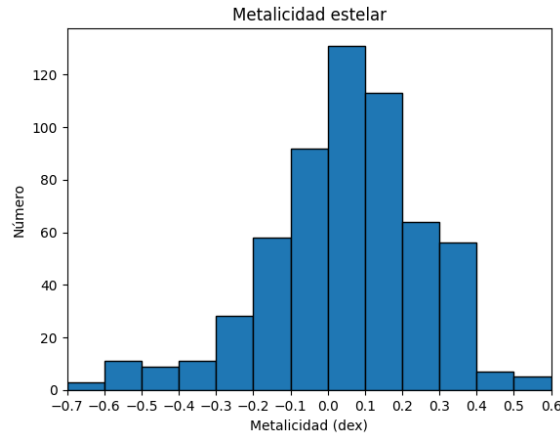
Edad estelar de los exoplanetas



La metalicidad observada en este grupo de exoplanetas presentan una metalicidad discretamente más elevada que el Sol (0 dex). Una de las posibles explicaciones puede residir en que las nebulosas con más alto contenido en metales favorecen la formación de planetas (Rebolo, 2011).

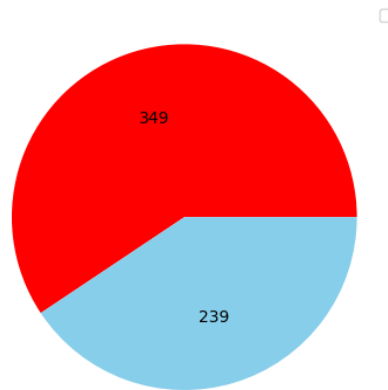
Figura 17

Metalicidad estelar



Respecto al magnetismo estelar, 239 presentaban un ratio $\frac{a_p}{R_A} > 1$, es decir, están situados en la zona protegida por el radio de Alfvén

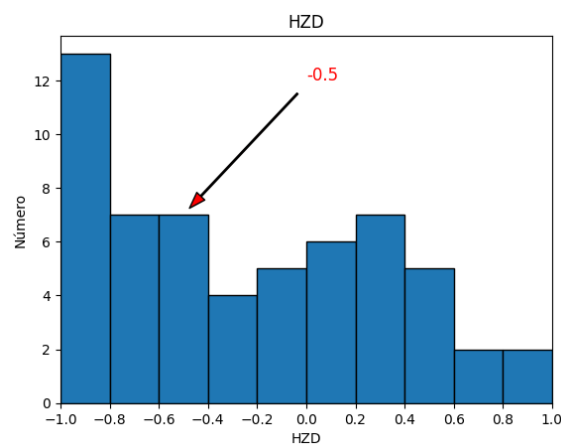
Figura 18
Magnetismo estelar



Nota. Los que están en rojo no cumplen el requisito y los que esta en azul claro si lo cumplen

Zona De Habitabilidad. Solo un 12 % de la serie de exoplanetas se encuentra en la zona de habitabilidad. Se puede observar que los exoplanetas ubicados en la zona de habitabilidad se encuentran más próximos a su estrella respecto a la Tierra (-0,5 HZU). Una de las explicaciones plausibles es debida al sesgo de los métodos observacionales para detectar los exoplanetas.

Figura 19
Gráfica HZD



Nota. Solo están aquellos que están entre -1 y 1 HZU

Resultados Del Índice Aplicado A Los Exoplanetas

En la tabla 16 se presentan los nueve exoplanetas con un índice superior a cero, es decir, planetas que podrían ser habitables considerando los criterios empleados para este índice.

Los nueve planetas cumplen las premisas requeridas para la habitabilidad planetaria que han sido comentadas previamente. Se trata de planetas tipo Tierra que orbitan una única estrella del tipo M, excepto los Kepler que orbitan una estrella K y que constituyen sistemas planetarios comprendidos entre 1 único planeta (Ross 128) y un máximo de 7 (Trappist-1). Por tanto, se tratan de planetas que orbitan estrellas más pequeñas y frías que el Sol. Las órbitas de este grupo habitable presentan a diferencia de las órbitas de los exoplanetas gaseosos una excentricidad baja, con periodos orbitales cortos y están acoplados por marea debido a la proximidad a su anfitriona. Respecto a los parámetros estelares, presentan una metalicidad elevada y se ubican fuera del radio de Alfvén estelar.

Se trata de un índice que busca una similitud con nuestro planeta, por lo que las premisas requeridas para ser habitables, desde la similitud geofísica con la Tierra hasta las características orbitales y estelares son exigentes. Los valores obtenidos del índice han sido bajos y el subíndice que más ha penalizado la habitabilidad de los exoplanetas ha sido el referido a los parámetros orbitales, en concreto, al acoplamiento por marea.

En la tabla 16 se reflejan los valores de los subíndices y del índice para cada uno de los nueve exoplanetas. En el anexo se describen los resultados desglosados para el cálculo de cada uno de los subíndices (tablas 23, 24, 25, 26 y 27).

Tabla 16

Resultados del índice de habitabilidad de los exoplanetas

Exoplaneta	T	O	A	S	H	Índice
TOI-700 d	0,991	0,143	0,899	0,406	0,997	0,553
TRAPPIST-1 f	0,938	0,057	1,000	0,661	1	0,513
TRAPPIST-1 g	0,930	0,069	0,893	0,661	0,641	0,476
TRAPPIST-1 e	0,794	0,044	0,874	0,661	1	0,457
Kepler-1512 b	0,935	0,096	0,422	0,549	0,831	0,445
TOI-700 e	0,933	0,118	0,958	0,406	0,398	0,443
Kepler-1229 b	0,778	0,243	0,049	0,784	0,956	0,370
Ross 128 b	0,980	0,060	0,776	0,632	0,157	0,340
TRAPPIST-1 d	0,340	0,033	0,504	0,327	0,570	0,254

DISCUSIÓN

Discusión De Los Resultados

El descubrimiento del primer exoplaneta a finales del siglo XX representó una revolución en la astrofísica. El conocimiento de los exoplanetas nos ha permitido

una mayor comprensión del universo y de la formación y evolución de los sistemas estelares. En las últimas décadas se ha producido un crecimiento exponencial en el descubrimiento de exoplanetas, gracias al desarrollo de técnicas que engloban tanto observatorios terrestres como espaciales. Como consecuencia, ha surgido la necesidad de clasificarlos y el reto de encontrar alguno que sea habitable.

En la actualidad, los principales métodos empleados para la detección de exoplanetas son el de tránsito y el de velocidad radial. Estos métodos han permitido identificar numerosos exoplanetas y conocer algunas de sus características; sin embargo, aún presentan limitaciones para detectar aquellos planetas de menor tamaño, los que se encuentran más alejados de su estrella, y para determinar ciertas propiedades, incluida la composición de sus atmósferas. Esto genera la principal fuente de sesgos en los estudios sobre exoplanetas.

En este trabajo se ha desarrollado un índice multiparamétrico, basado en parámetros planetarios y estelares, para evaluar la habitabilidad de un planeta. Encontrar un planeta habitable es, en la actualidad, un reto sumamente ambicioso.

De un total de casi 6000 exoplanetas confirmados se han estudiado un total 18 parámetros que se han subagrupado en cinco subíndices que obedecen a la rocosidad del exoplaneta, a unos parámetros orbitales, a una atmósfera, a una estrella con unas condiciones y que el planeta se encuentre en la zona de habitabilidad de su estrella. Como ya se ha comentado, el número de exoplanetas con todos los parámetros necesarios para el cálculo del índice se ha limitado a 588 planetas, de los cuales sólo 9 presentan un índice de habitabilidad superior a cero.

El estudio de los exoplanetas nos ha permitido conocer sus características diferenciales con los planetas de nuestro Sistema Solar. Se ha visto que la mayoría de ellos son gaseosos, con excentricidades más altas que los planetas de nuestro sistema solar, con periodos orbitales muy dispares y con velocidades de escape superiores. También la mayoría de ellos presentan acoplamiento por marea. Todas estas propiedades dificultan la habitabilidad planetaria y en este sentido, se puede decir que nuestro sistema solar es peculiar respecto al resto. Por otro lado, las estrellas anfitrionas de estos exoplanetas son del tipo M, G y K aunque en los planetas con un índice superior a cero son la mayoría del tipo M, es decir, del tipo espectral dominante en la Vía Láctea. Otros datos interesantes respecto a la estrellas de los exoplanetas es que estas son muy jóvenes, y por tanto, no podrán haber tenido suficiente tiempo para desarrollar vida.

Al aplicar el índice, sólo 9 de ellos son potencialmente habitables y a diferencia de la mayoría de los exoplanetas estudiados presentan unas características diferenciales acordes con las premisas impuestas en cada subíndice.

Este índice es multiparamétrico en comparación con otros índices publicados, ya que incluye un total de 18 parámetros, lo que lo convierte, a fecha de hoy, en

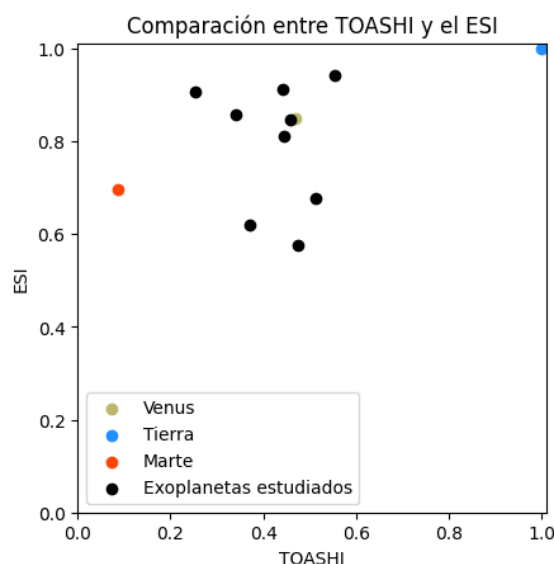
el índice de habitabilidad que cuenta con el mayor número de parámetros analizados. Los principales índices descritos se han limitado a parámetros geofísicos de los planetas, como sucede en el ESI. Este nuevo índice pretende ser más ambicioso al incluir parámetros estelares que son clave para la habitabilidad, tales como la edad, la metalicidad y el magnetismo estelar, evaluado mediante el radio de Alfvén y el número de Rossby. Es evidente que quedan muchos otros parámetros a valorar, como la composición atmosférica y la presencia de biomarcadores, conocimientos actualmente limitados a pocos exoplanetas, y que deberían incluirse en futuros índices de habitabilidad.

Comparación De TOASHI Con El ESI

Se ha comparado el índice con el ESI que es el más utilizado en los estudios. Los valores obtenidos del índice propuesto son más bajos que los obtenidos para el ESI. El motivo principal es que el ESI sólo incluye 4 parámetros geofísicos y el TOASHI abarca hasta 18 parámetros como ya se ha referido previamente. Al comparar el TOASHI con el ESI se han obtenido unos valores inferiores como era de esperar por el tipo y número de parámetros incluidos en estos dos índices.

Figura 20

Comparación entre TOASHI y el ESI



Nota. Solo se muestra en la figura los exoplanetas que tienen un valor del TOASHI superior a 0

Impacto Económico Y Sostenibilidad (ODS)

Este trabajo está alineado con los ODS 9 y 13.

ODS 13 – Acción por el Clima: Las condiciones de habitabilidad resultan

excepcionales, ya que, entre los planetas estudiados, únicamente nueve presentan un valor distinto de 0 en el índice desarrollado. Esto evidencia que lograr un entorno propicio para la vida es realmente raro en el universo. En nuestro caso, la Tierra alcanza el valor óptimo (1) del índice, lo que la convierte en el único planeta con condiciones ideales conocidas hasta el momento. La singularidad de la Tierra y la inexistencia de “Plan B” refuerzan la urgencia de cuidar el clima y de luchar contra el cambio climático.

ODS 9 – Industria, Innovación e Infraestructura: El avance tecnológico que se emplea en el estudio de exoplanetas es fundamental para ampliar nuestro conocimiento del universo. La implementación de nuevos métodos de detección, algoritmos de análisis de datos y modelos de simulación no solo permite evaluar la habitabilidad de otros mundos, sino que también impulsa innovaciones con potencial aplicación en múltiples áreas. Por ejemplo, las técnicas desarrolladas en astrofísica pueden adaptarse para optimizar procesos en la ingeniería planetaria y de la gestión eficiente de recursos en sectores como la energía y el medio ambiente.

Futuras Vías De Desarrollo

Como futuras líneas de investigación derivadas de este trabajo se propone:

1. Incluir otros subíndices como la zona de habitabilidad galáctica. Este concepto hace referencia a una zona de la galaxia donde el desarrollo de vida compleja sería posible.
2. Modificar el componente atmosférico del índice a partir de su composición y de biosignaturas como identificadores de vida a medida que las próximas generaciones de telescopios nos aporten más información de la atmósfera de planetas tipo Tierra o Supertierras.
3. Incluir planetas hichanos. En este índice se han valorado como habitables los planetas rocosos. Los planetas hichanos son calientes, oceánicos y con una atmósfera rica en hidrógeno. Madhusudhan et al. (2025) han descrito la posibilidad de actividad biológica en K2-18 b.
4. Estudio de exolunas y su habitabilidad. En la inmensidad del universo, cabe plantear la posibilidad de que otros cuerpos celestes, como las exolunas, sean una alternativa para albergar vida. Teachey et al. (2018) describieron el primer candidato a exoluna, orbitando el exoplaneta Kepler-1625b, un satélite del tamaño de Neptuno.

CONCLUSIONES

El descubrimiento de los exoplanetas ha representado un avance significativo en el campo de la astrofísica. A partir de dicho descubrimiento se ha derivado un conocimiento más profundo del Universo y de sus dinámicas. La respuesta a la cuestión de si estamos solos en el Universo o si existe otro planeta habitable constituye un importante reto para la humanidad. Los índices de habitabilidad planetaria pretenden contribuir a resolver esta pregunta, pese a las limitaciones técnicas existentes. En el presente trabajo se ha desarrollado un nuevo índice de habitabilidad exoplanetaria multiparamétrico, el cual puede emplearse como herramienta para investigar la potencial habitabilidad de un exoplaneta. Asimismo, se espera que dicho índice pueda perfeccionarse y complementarse con los avances científicos futuros, conforme las misiones espaciales permitan el descubrimiento de nuevos exoplanetas, especialmente aquellos de naturaleza rocosa, y se facilite un conocimiento más detallado de sus propiedades, composición atmosférica y la identificación de biosignaturas en su atmósferas.

BIBLIOGRAFÍA

- An, D.-S., Xie, J.-W., Dai, Y.-Z., & Zhou, J.-L. (2023). Different planetary eccentricity-period (PEP) distributions of small- and giant-planets. *The Astronomical Journal*, 165(125).
- Atkinson, A. S., Alexander, D., & Farrish, A. O. (2024). Exploring the Effects of Stellar Magnetism on the Potential Habitability of Exoplanets. *The Astrophysical Journal*, 969(2).
- Barnes, R., Meadows, V. S., & Evans, N. (2015). Comparative habitability of transiting exoplanets. *The Astrophysical Journal*, 814(2).
- Bashi, D., Mazeh, T., & Faigler, S. (2024). Different planetary eccentricity-period (PEP) distributions of small and giant planets. *The Astronomical Journal*, 168(3).
- Bora, K. & Saha, S. (2016). CD-HPF: New habitability score via data analytic modeling. *Astronomy and Computing*, 17, 129–143.
- Brain, D. A., Kao, M. M., & O'Rourke, J. G. (2024). Exoplanet magnetic fields

[Preprint]. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2404.15429>

Christiansen J. (2018). Exoplanet Catalogues. In Deeg, H. J., & Belmonte, J. A. *Handbook of Exoplanets* (pp. 1933–1947) Springer.

Deeg, H. J., & Belmonte, J. A. (2018). *Handbook of Exoplanets*. Springer.

Dressing, C., Spiegel, D., Scharf, A., & Menou, K. (2010). Habitable climates: The influence of eccentricity. *The Astrophysical Journal*, 721(2), 1295-1307

Gladman, B., Quinn, D. D., Nicholson, P., & Rand, R. (1996). Synchronous locking of tidally evolving satellites. *Icarus*, 122(1), 166-192. <https://doi.org/10.1006/icar.1996.0117>

González, G., Brownlee, D., & Ward, P. (2001). The galactic habitable zone. *Icarus*, 152(1), 185–197.

Hanslmeier, A. (2018). *Planetary Habitability And Stellar Activity* (pp. 98-100). World Scientific Publishing Company.

Irwin L., Méndez A., Fairen A., & Schulze-Majuch D. (2014) Assessing the possibility of Biological Complexity on other Worlds, with an Estimate of the Occurrence of Complex Life in the Milky Way Galaxy. *Challenges* 5 : 159-174.

Johnson, J. L., & Li, H. (2012). The first planets: the critical metallicity for planet formation. *The Astrophysical Journal*, 751(2), 81. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/751/2/81>

Johnstone, C. P. (2021). Stellar winds and planetary atmospheres. *arXiv preprint arXiv:2105.11243*.

Kashyap, J. M. (2017). Quantitative indexing and Tardigrade analysis of exoplanets. *arXiv:1702.03678*.

Kashyap J. M., Rao Valluri, S., Kari, V., Kubska, K., & Kaczmarek, Ł. (2020).

- Indexing Exoplanets with Physical Conditions Potentially Suitable for Rock-Dependent Extremophiles. *Life*, 10(2), 10. <https://doi.org/10.3390/life10020010>
- Kasting, J. F., Whitmire, D. P., & Reynolds, R. T. (1993). Habitable zones around main sequence stars. *Icarus*, 101(1), 108-128.
- Lammer, H. (2007). Coronal Mass Ejection (CME) Activity of Low Mass M Stars as an Important Factor for the Habitability of Terrestrial Exoplanets. II. CME-Induced Ion Pick Up of Earth-like Exoplanets in Close-In Habitable Zones. *Icarus*, 186(2), 412-423.
- Madhusudhan, N. (2019). Exoplanetary atmospheres: key insights, challenges, and prospects. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 57, 617–663. <https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081817-051846>
- Madhusudhan, N., Constantinou, S., Holmberg, M., Sarkar, S., Piette, A. A. A., & Moses, J. I. (2025). *New constraints on DMS and DMDS in the atmosphere of K2-18 b from JWST MIRI* [Preprint]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.12267>
- Marcy, G. W. (2014). Masses, radii, and orbits of small Kepler planets: The transition from gaseous to rocky planets. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 210(2), 20-70. <https://doi.org/10.1088/0067-0049/210/2/20>
- NASA. (n.d.). *Super-Earth*. Recuperado de <https://science.nasa.gov/exoplanets/super-earth/>
- Odrzywolek, A., & Rafelski, J. (2016, December 12). *Classification of exoplanets according to density* [Preprint]. *arXiv:1612.03556v1 [astro-ph.EP]*. <https://arxiv.org/abs/1612.03556>
- Planetary Habitability Laboratory. (n.d.). *Earth Similarity Index (ESI)*.
- Planetary Habitability Laboratory. (2011). *Habitable Zone Distance (HZD): A habitability metric for exoplanets*.
- Rebolo, R. (2011). Exoplanetas. *Revista Española de Física*.

- Rodríguez-Mozos, J. M., & Moya, A. (2017). Statistical-likelihood Exo-Planetary Habitability Index (SEPHI). *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 471(4), 4628-4636.
- Rodríguez-Mozos, J. M., & Moya, A. (2019). Erosion of an exoplanetary atmosphere caused by stellar winds. *Astronomy & Astrophysics*, 630, A52. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935543>
- Sadeghi Ardestani, L., Guillot, T., & Morel, P. (2017). A semi-empirical model for magnetic braking of solar-type stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 472(3), 2590-2607.
- Safonova, M., Murthy, J., & Shchekinov, Y. A. (2015). Age aspects of habitability. *International Journal of Astrobiology*, 15(2), 93-105. <https://doi.org/10.1017/S1473550415000208>
- Sano, Y. (1993). The Magnetic Fields of the Planets: A New Scaling Law of the Dipole Moments of the Planetary Magnetism. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 45(1), 65-77. <https://doi.org/10.5636/jgg.45.65>
- Schulze-Makuch, D., Méndez, A., Fairén, A. G., von Paris, P., Turse, C., Boyer, G., Davila, A. F., António, M. R. S. de, Catling, D., & Irwin, L. N. (2011). A two-tiered approach to assessing the habitability of exoplanets. *Astrobiology*, 11(10), 1041-1052. <https://doi.org/10.1089/ast.2010.0592>
- Seager, S., & Deming, D. (2009). On the method to infer an atmosphere on a tidally locked super Earth exoplanet and upper limits to GJ 876d. *The Astrophysical Journal*, 703(2), 1884-1891. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/703/2/1884>
- Sotin, C., Grasset, O., & Mocquet, A. (2007) Mass-radius curve for extrasolar Earth-like planets and ocean planets. *Icarus*, 191:337-351
- Teachey, A., & Kipping, D. M. (2018). Evidence for a large exomoon orbiting Kepler-1625b [Preprint]. arXiv. <https://arxiv.org/abs/1810.02362>
- Van Eylen, V., Albrecht, S., Huang, X., MacDonald, M. G., Dawson, R. I., Cai,

- M. X., Foreman-Mackey, D., Lundkvist, M. S., Silva Aguirre, V., Snellen, I., & Winn, J. N. (2018). The orbital eccentricity of small planet systems. *arXiv:1807.00549*. <https://arxiv.org/abs/1807.00549>
- Vidotto, A. A. (2017). Stellar magnetic activity and exoplanets. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1705.05561>
- Vladilo, G. (2019–2020). Exoplanets: timing and astrometric methods. In *Planets and Astrobiology (2019–2020)*.
- Wright, J. T. (2018). Radial velocities as an Exoplanet Discovery. En Method H. J. Deeg, & J. A. Belmonte. *Handbook of Exoplanets* (pp. 619-631). Springer.
- Wright, N. J., Newton, E. R., Williams, P. K. G., Drake, J. J., & Yadav, R. K. (2018). The stellar rotation–activity relationship in fully convective M dwarfs. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 479(2), 2351–2360. <https://doi.org/10.1093/mnras/sty1670>

TABLAS

Tabla 17*Resumen métodos de detección de exoplanetas*

Método de detección	Nº de exoplanetas	Ventajas	Desventajas
Velocidad Radial	1100	■ Planetas de gran tamaño ■ Masa y órbitas	■ Planetas pequeños ■ Órbitas distantes ■ Diámetro
Tránsito	4342	■ Radio ■ Atmósfera	■ Planetas lejanos ■ Masa ■ No funciona si el planeta no está alineado
Microlentes Gravitacionales	235	■ Detección para planetas distantes y de su estrella ■ Exoplanetas errantes	■ Detección repetida ■ Periodo orbital
Astrometría	5	■ Detección en órbitas distantes ■ Masa ■ Parámetros orbitales	■ Diámetro del planeta ■ Planetas lejanos
Temporización de Púlsares	48	■ Masa ■ Planetas muy pequeños	■ Requiere un púlsar
Observación directa	82	■ Diámetro ■ Temperatura superficial ■ Detección de planetas muy lejanos a su estrella	■ Masa

ANEXO

Cálculo ESI Para Los Planetas Rocosos Del Sistema Solar

$$ESI_{\text{♀}} = \left(1 - \left| \frac{0,38 - 1}{0,38 + 1} \right| \right)^{\frac{0,57}{4}} \left(1 - \left| \frac{0,98 - 1}{0,98 + 1} \right| \right)^{\frac{1,07}{4}} \\ \left(1 - \left| \frac{4,25 - 11,19}{4,25 + 11,19} \right| \right)^{\frac{0,7}{4}} \left(1 - \left| \frac{440 - 288}{440 + 288} \right| \right)^{\frac{5,58}{4}} = 0,593 \quad (57)$$

$$ESI_{\text{♀}} = \left(1 - \left| \frac{0,95 - 1}{0,95 + 1} \right| \right)^{\frac{0,57}{4}} \left(1 - \left| \frac{0,95 - 1}{0,95 + 1} \right| \right)^{\frac{1,07}{4}} \\ \left(1 - \left| \frac{10,36 - 11,19}{10,36 + 11,19} \right| \right)^{\frac{0,7}{4}} \left(1 - \left| \frac{737 - 288}{737 + 288} \right| \right)^{\frac{5,58}{4}} = 0,849 \quad (58)$$

$$ESI_{\oplus} = \left(1 - \left| \frac{1 - 1}{1 + 1} \right| \right)^{\frac{0,57}{4}} \left(1 - \left| \frac{1 - 1}{1 + 1} \right| \right)^{\frac{1,07}{4}} \\ \left(1 - \left| \frac{11,19 - 11,19}{11,19 + 11,19} \right| \right)^{\frac{0,7}{4}} \left(1 - \left| \frac{288 - 288}{288 + 288} \right| \right)^{\frac{5,58}{4}} = 1 \quad (59)$$

$$ESI_{\text{♂}} = \left(1 - \left| \frac{0,53 - 1}{0,53 + 1} \right| \right)^{\frac{0,57}{4}} \left(1 - \left| \frac{0,71 - 1}{0,71 + 1} \right| \right)^{\frac{1,07}{4}} \\ \left(1 - \left| \frac{5,027 - 11,19}{5,027 + 11,19} \right| \right)^{\frac{0,7}{4}} \left(1 - \left| \frac{210 - 288}{210 + 288} \right| \right)^{\frac{5,58}{4}} = 0,697 \quad (60)$$

En la tabla 5 vemos resumido los valores del ESI para cada planeta rocoso del sistema solar:

Resultados De Los Subíndices

Planetas Del Sistema Solar

Tabla 18

Resultados del subíndice Telúrico (T) para los planetas del sistema solar

Planeta	Radio (R)	Masa (M)	Densidad (ρ)	T
Venus (φ)	0,972	0,891	0,929	0,930
Tierra ($\oplus$)	1	1	1	1
Marte (σ)	0,012	0,0002	0,006	0,002

Tabla 19

Resultados del subíndice Órbita (O) para los planetas del sistema solar

Planeta	Periodo orbital (T_O)	Excentricidad (ε)	Acoplamiento (T_L)	O
Venus (φ)	0,669	1	No	0,875
Tierra ($\oplus$)	1	1	No	1
Marte (σ)	0,001	1	No	0,110

Tabla 20

Resultados del subíndice Atmósfera (A) para los planetas del sistema solar

Planeta	Velocidad de escape (v_{esc})	A
Venus (φ)	0,958	0,958
Tierra ($\oplus$)	1	1
Marte (σ)	0,018	0,018

Tabla 21

Resultados del subíndice Estelar (S) para los planetas del sistema solar

Planeta	Edad (E)	Metalicidad (M_t)	Magnetismo (M_g)	S
Venus (φ)	1	1	1	1
Tierra ($\oplus$)	1	1	1	1
Marte (σ)	1	1	1	1

Tabla 22*Resultados del subíndice HZD (H) para los planetas del sistema solar*

Planeta	HZD	H
Venus (♀)	0,029	0,029
Tierra ($\oplus$)	1	1
Marte (♂)	0,990	0,990

Exoplanetas

En los subíndices descritos a continuación solo se exponen los resultados para aquellos exoplanetas con un TOASHI superior a 0.

Tabla 23*Resultados del subíndice Telúrico (T) para los exoplanetas*

Exoplaneta	R	M	ρ	T
TOI-700 d	0,981	0,998	0,995	0,991
TRAPPIST-1 f	0,992	1,000	0,831	0,938
TRAPPIST-1 g	0,944	0,996	0,854	0,930
TRAPPIST-1 e	0,931	0,729	0,738	0,794
Kepler-1512 b	0,896	0,980	0,930	0,935
TOI-700 e	0,976	0,894	0,932	0,933
Kepler-1229 b	0,583	0,922	0,876	0,778
Ross 128 b	0,959	0,994	0,987	0,980
TRAPPIST-1 d	0,613	0,241	0,265	0,340

Tabla 24*Resultados del subíndice Órbita (O) para los exoplanetas*

Exoplaneta	T_O	ε	T_L	O
TOI-700 d	0,029	1	Sí	0,143
TRAPPIST-1 f	0,002	1	Sí	0,057
TRAPPIST-1 g	0,003	1	Sí	0,069
TRAPPIST-1 e	0,001	1	Sí	0,044
Kepler-1512 b	0,009	1	Sí	0,096
TOI-700 e	0,017	1	Sí	0,118
Kepler-1229 b	0,143	1	Sí	0,243
Ross 128 b	0,002	1	Sí	0,060
TRAPPIST-1 d	0,0004	1	Sí	0,033

Tabla 25*Resultados del subíndice Atmósfera (A) para los exoplanetas*

Exoplaneta	v_{esc}	A
TOI-700 d	0,899	0,899
TRAPPIST-1 f	1,000	1,000
TRAPPIST-1 g	0,893	0,893
TRAPPIST-1 e	0,874	0,874
Kepler-1512 b	0,422	0,422
TOI-700 e	0,959	0,959
Kepler-1229 b	0,049	0,049
Ross 128 b	0,776	0,776
TRAPPIST-1 d	0,504	0,504

Tabla 26*Resultados del subíndice Estelar (S) para los exoplanetas*

Exoplaneta	E	M_t	M_g	S
TOI-700 d	0	0,216	1	0,406
TRAPPIST-1 f	0	0,982	1	0,661
TRAPPIST-1 g	0	0,982	1	0,661
TRAPPIST-1 e	0	0,982	1	0,661
Kepler-1512 b	0	0,648	1	0,549
TOI-700 e	0	0,216	1	0,406
Kepler-1229 b	1	0,352	1	0,784
Ross 128 b	1	0,896	0	0,632
TRAPPIST-1 d	0	0,982	0	0,327

Tabla 27*Resultados del subíndice HZD (H) para los exoplanetas*

Planeta	HZD	H
TOI-700 d	0,997	0,997
TRAPPIST-1 f	1	1
TRAPPIST-1 g	0,641	0,641
TRAPPIST-1 e	1	1
Kepler-1512 b	0,831	0,831
TOI-700 e	0,398	0,398
Kepler-1229 b	0,956	0,956
Ross 128 b	0,157	0,157
TRAPPIST-1 d	0,570	0,570