



# Búsqueda de vida en otros planetas

---

Antígona Segura Peralta  
Instituto de Ciencias Nucleares  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Virtual Planetary Laboratory, NASA  
Astrobiology Institute.



# Definición de astrobiología

---

- Es el estudio del origen, evolución, distribución y futuro de la vida en el universo
- Exobiología es usado como equivalente aunque estrictamente no lo es.
- La astrobiología incluye el estudio de la vida en la Tierra como un ejemplo de vida en el universo.

# Algo de historia

---

La Astrobiología se establece formalmente a partir de entender que la presencia de vida en la Tierra está enlazada con eventos astronómicos y que la vida es un fenómeno que podría ocurrir en otros planetas:

- Cometas: Aportan agua y material orgánico a la Tierra primitiva
- Asteroides: Forman a la Tierra y le dan los materiales que requiere para el inicio de la vida (C, N, O, metales)
- Vida en Marte: Misión Vikingo (1976)
- La astrobiología florece en el momento en que se inicia el apoyo económico para estudiarla por parte de la NASA.
- La iniciativa comienza en el NASA Ames Research Center a mediados de los 90.
- En 1997 se funda el NASA Astrobiology Institute.





# Panorama de la astrobiología

---

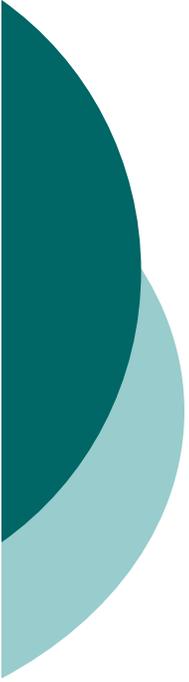
- La astrobiología requiere de casi todas las áreas de la ciencia y las combina dándoles una nueva perspectiva.
- Biología:
  - ¿Cuáles son las características de lo vivo?
  - ¿Cómo se origina?
  - ¿Qué condiciones requiere para originarse y evolucionar?
  - ¿Cómo modifica su ambiente?
  - ¿Cómo puede detectarse?
  - ¿Cuáles son los límites de los organismos vivos?



# Panorama de la astrobiología

---

- Geofísica
  - ¿Cómo evoluciona un planeta?
  - ¿Qué lo hace tener vulcanismo, placas tectónicas, campo magnético, etc?
  - ¿Qué hace diferente a la Tierra del resto de los planetas conocidos?
  - ¿Cuáles son los ciclos y procesos geológicos de un planeta?
- Astronomía:
  - ¿Cómo se forman los planetas?
  - La presencia de planetas ¿depende las características de la estrella alrededor de la cual giran?
  - ¿Qué tan frecuentes son los planetas alrededor de otras estrellas?
  - ¿Es especial el sistema solar con respecto a otros sistemas planetarios?



# Panorama de la astrobiología

---

- Matemáticas, ingeniería, filosofía, ciencias sociales:
  - ¿Cuál es la probabilidad de encontrar mundos habitables o inteligencias extraterrestres?
  - ¿Cómo nos comunicamos con inteligencias extraterrestres?
  - ¿Qué instrumentos se requieren para detectar vida en planetas en nuestro sistema solar y alrededor de otras estrellas?
  - ¿Qué significaría encontrar mundos habitables para la humanidad?
  - ¿Qué es la vida?
  - ¿Cuánto puede durar una civilización tecnológica?

# Sociedad Mexicana de Astrobiología (SOMA)

---



SOMA es una sociedad civil sin fines de lucro dedicada al estudio y difusión de la astrobiología.

Está conformada por investigadores, divulgadores, estudiantes y en general, por personas que se interesan en la visión científica sobre el origen de la vida, su evolución y la posibilidad de que exista vida en otros lugares del Universo.

[www.nucleares.unam.mx/soma](http://www.nucleares.unam.mx/soma)

# Vida: carbono y agua líquida

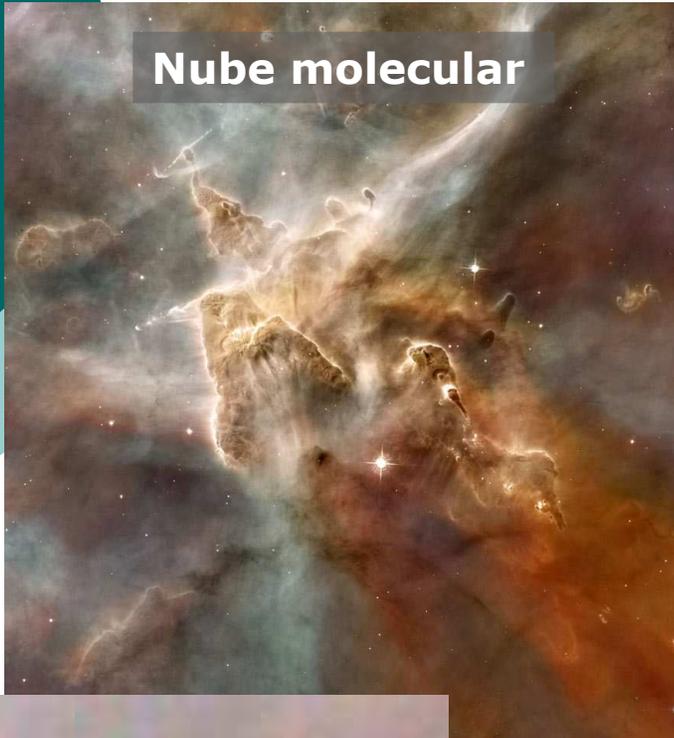
---

- La vida que conocemos: química del carbono y agua líquida.
- Habitabilidad (requisito más general): agua líquida
- Para planetas tipo terrestre alrededor de otras estrellas, un planeta es habitable cuando puede mantener agua líquida en su superficie.



# El agua y el carbono

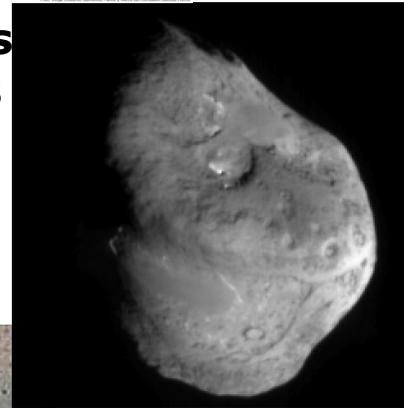
**Nube molecular**



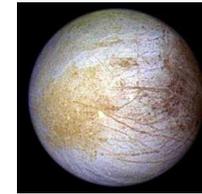
Allende, la roca que vio el origen del Sistema Solar



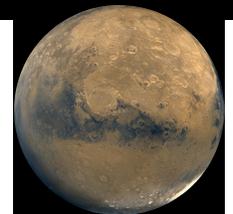
**Asteroides  
y cometas**



Titan  
© Copyright 1998 by Calvin J. Hamilton

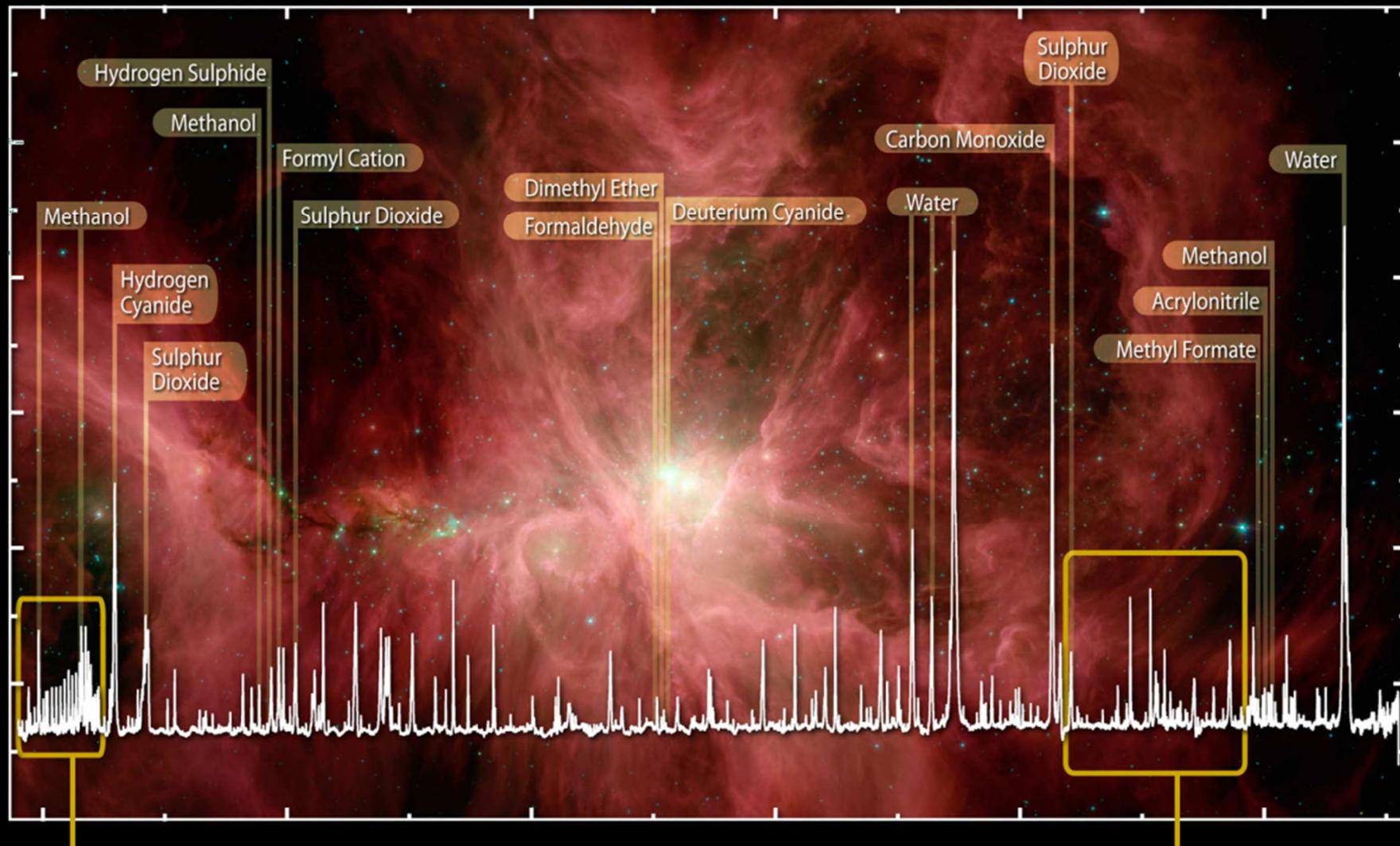


**Planetas**



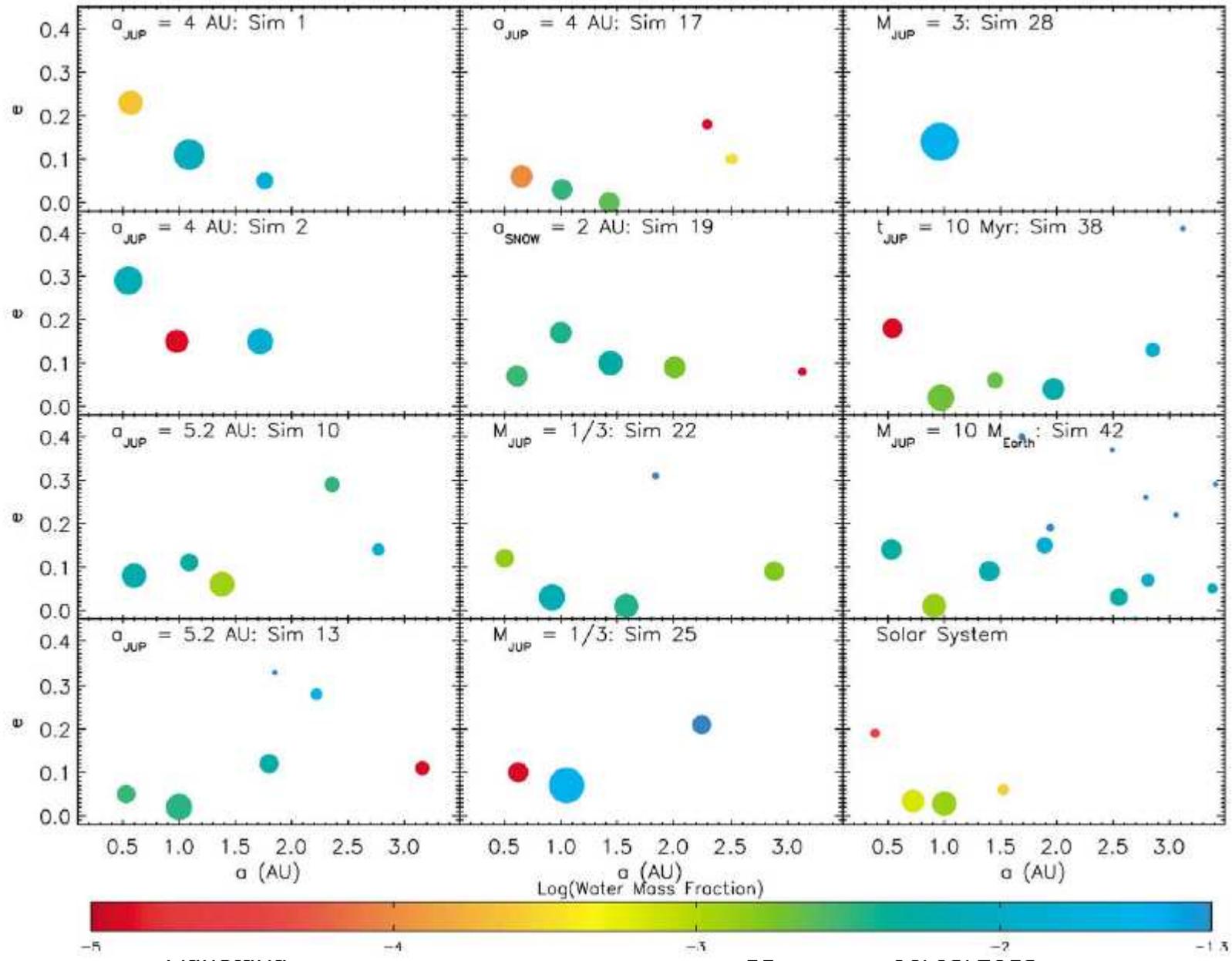
**Disco  
protoplanetario**





HIFI Spectrum of Water and Organics in the Orion Nebula

© ESA, HEXOS and the HIFI consortium  
E. Bergin



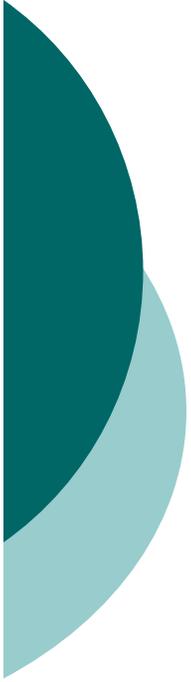
Raymond et al. 2004



# Vida en otros mundos

---

- Sistema solar: detección directa
- Fuera del sistema solar: detección remota por:
  - Señales enviadas deliberadamente (SETI)
  - Bioseñales



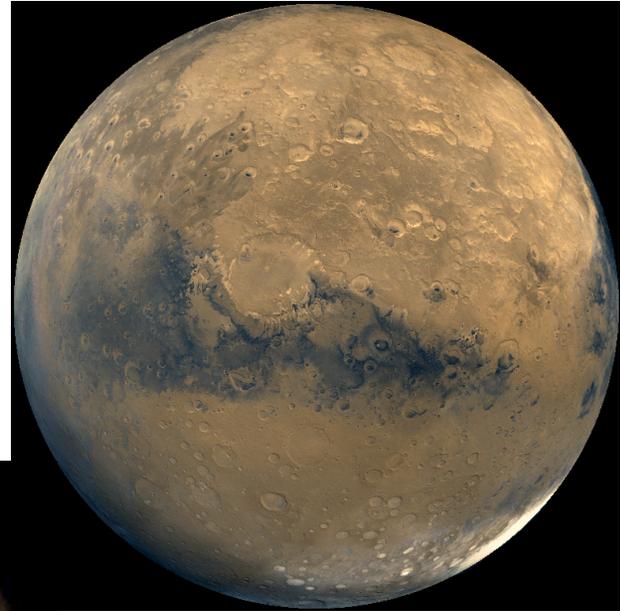
Parte 1.

# **VIDA EN EL SISTEMA SOLAR. SEGUIR EL AGUA**

# Habitabilidad en el Sistema Solar

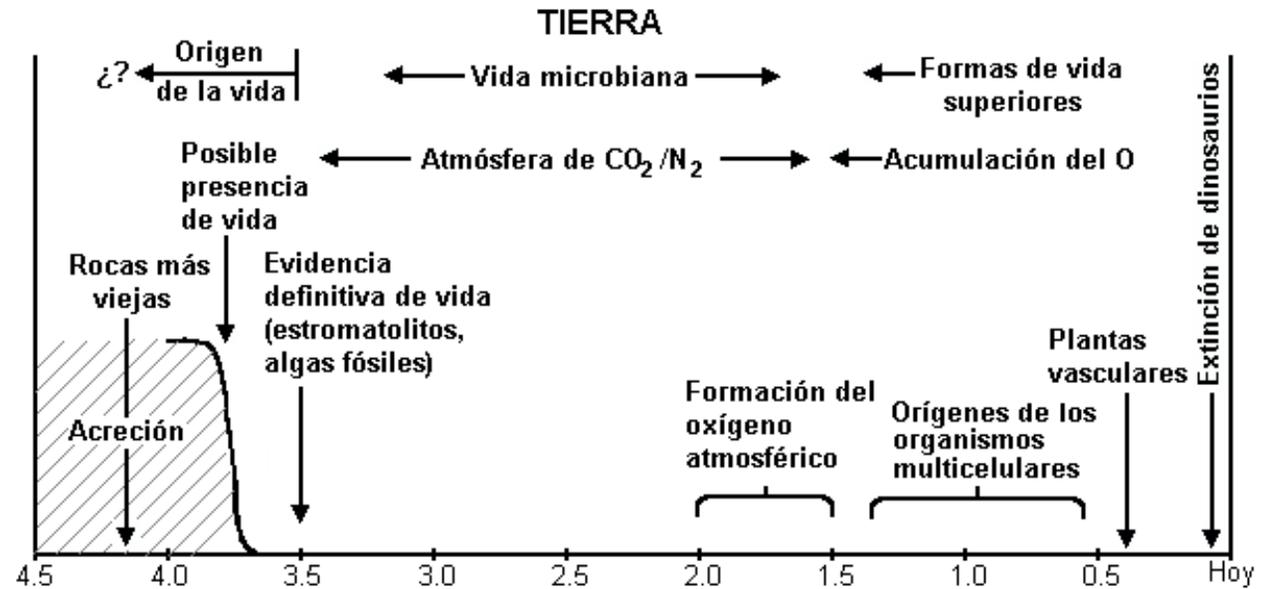
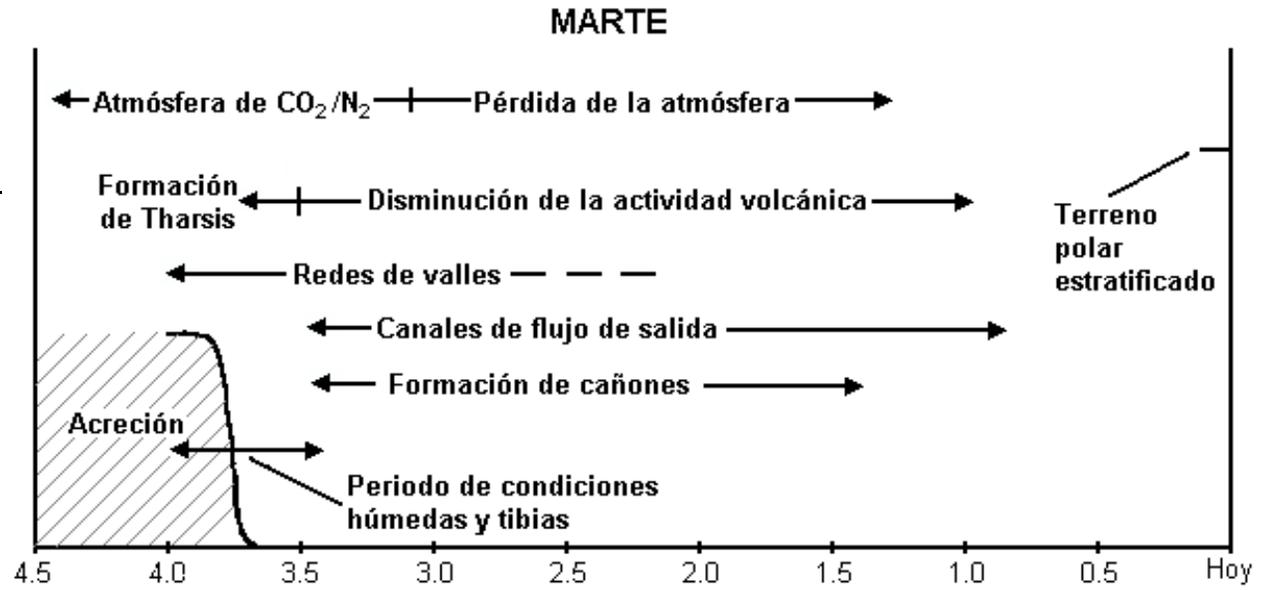
---

- Marte
- Europa (Júpiter)
- Titán (Saturno)





# Marte

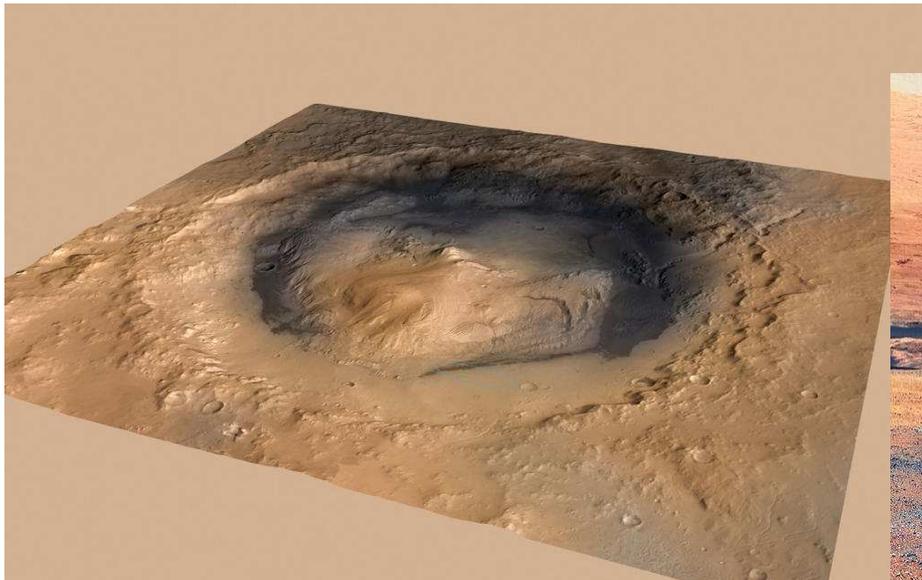


# Marte



# Marte: Mars Science Laboratory

- Aterrizó el 5 de agosto del 2012
- Sitio de aterrizaje: Crater Gale, 3.5-3.8 Ga, superficie sedimentaria.
- Duración de la misión 687 días.

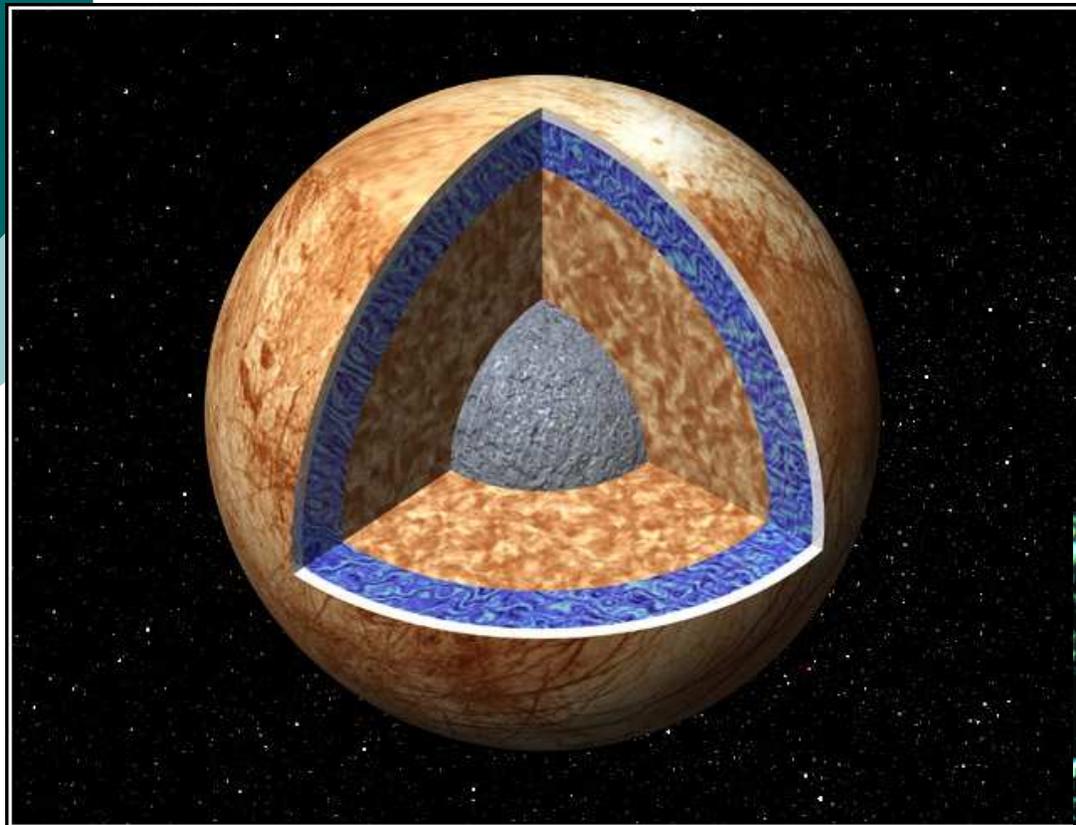


# Europa



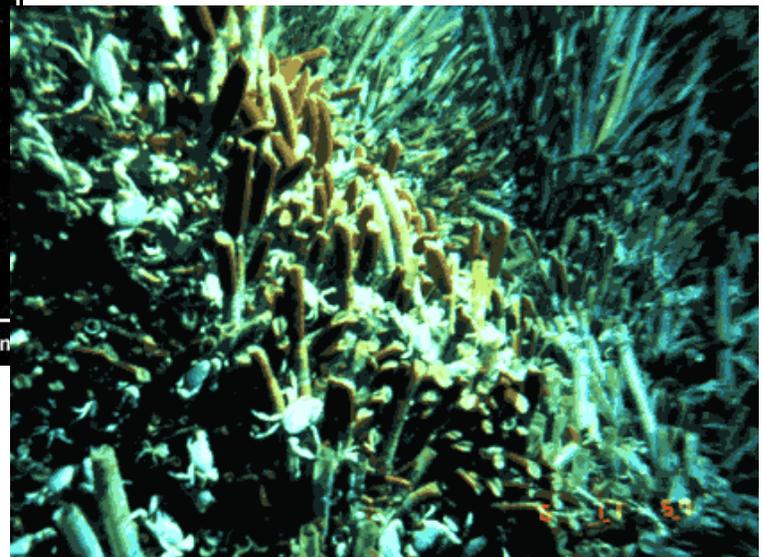
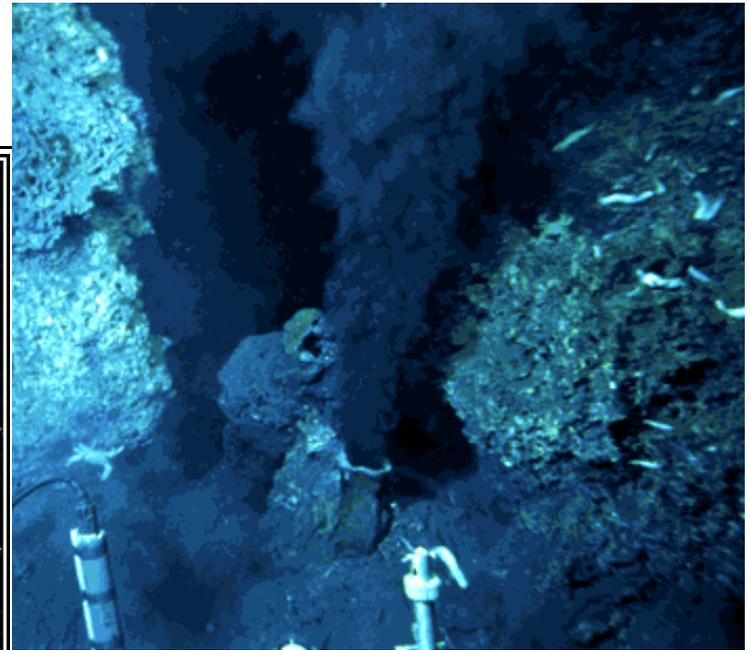
**Credit & Copyright:** [Calvin J. Hamilton](#), [Voyager](#) Team, [NASA](#) <http://apod.nasa.gov/apod/ap010116.html>

# Europa



The Interior of Europa

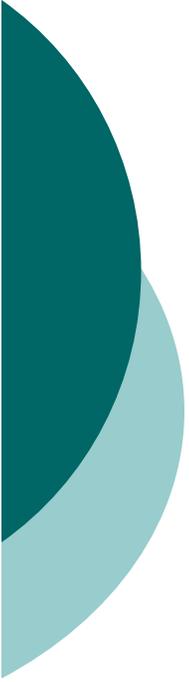
© Copyright 1999 by Calvin J. Hamilton





Parte 1.

# DETECCIÓN DE PLANETAS



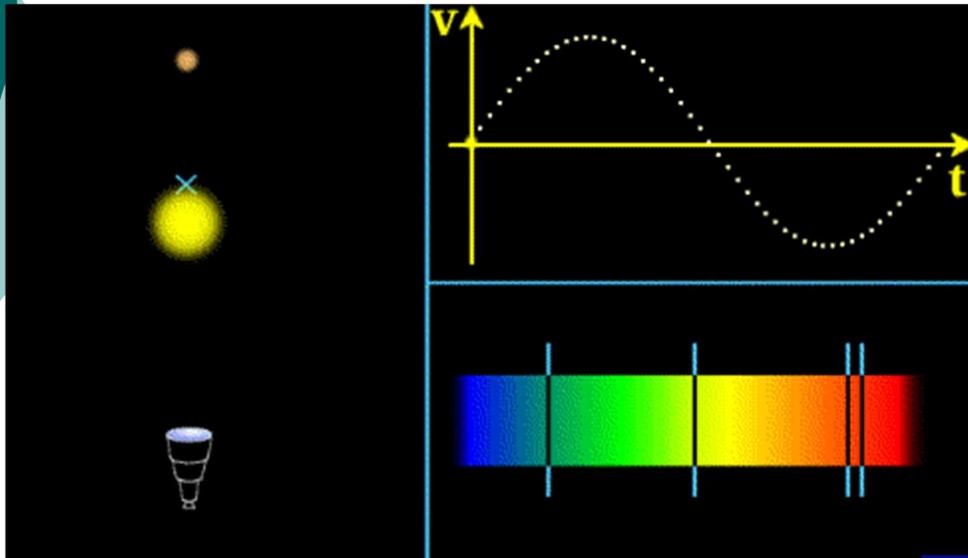
# Detección de exoplanetas

---

Método	Planetas	Estrellas con planetas	Sistemas múltiples (+ de un planeta)
Velocidad radial	490	381	80
Tránsito	286 (+2,326)	231	36
Micro lente gravitacional	16	15	1
Imagen directa	31	27	2
Total	838	661	125

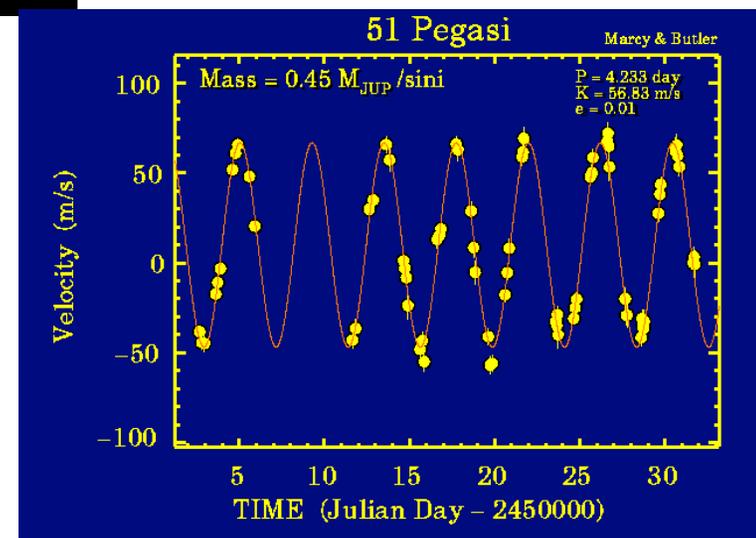
Datos obtenidos el 26 de septiembre del 2012 en la página:  
<http://exoplanet.eu>

# Velocidad radial

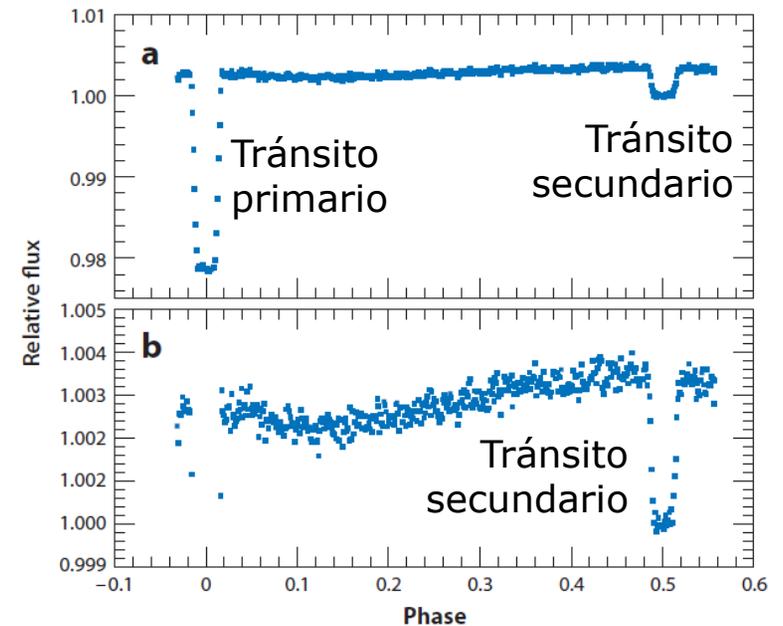
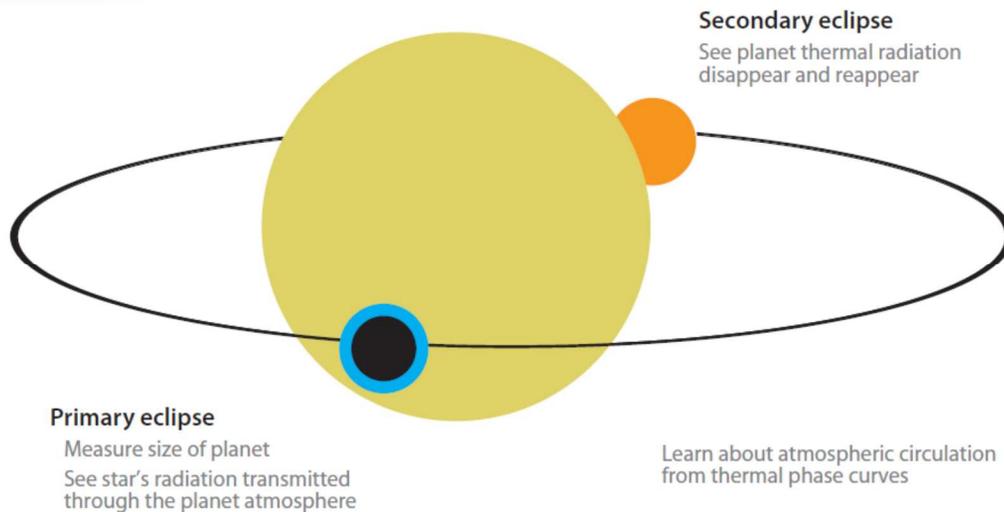


- Detecta un límite mínimo para la masa del planeta ( $m_p \text{ sen } i$ )
- Se puede derivar la distancia estrella-planeta (semieje de la órbita)
- Sesgado a planetas masivos y cercanos a su estrella

- Primer planeta descubierto alrededor de una estrella semejante al Sol. (Mayor and Queloz, Nature 1995)
- $0.47 M_J$ ,  $0.05 \text{ UA}$

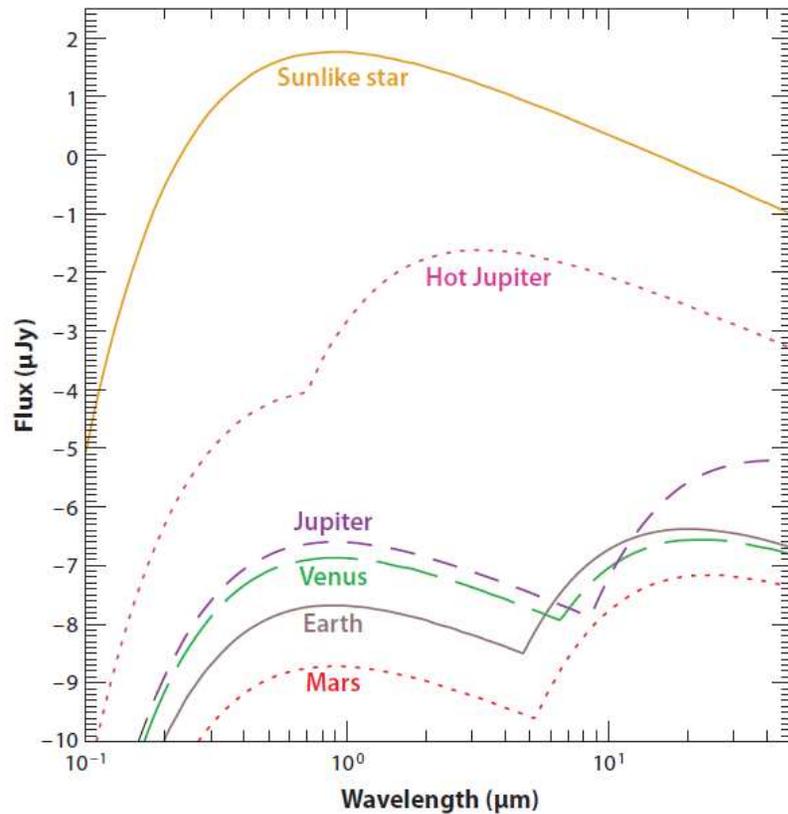


# Tránsito

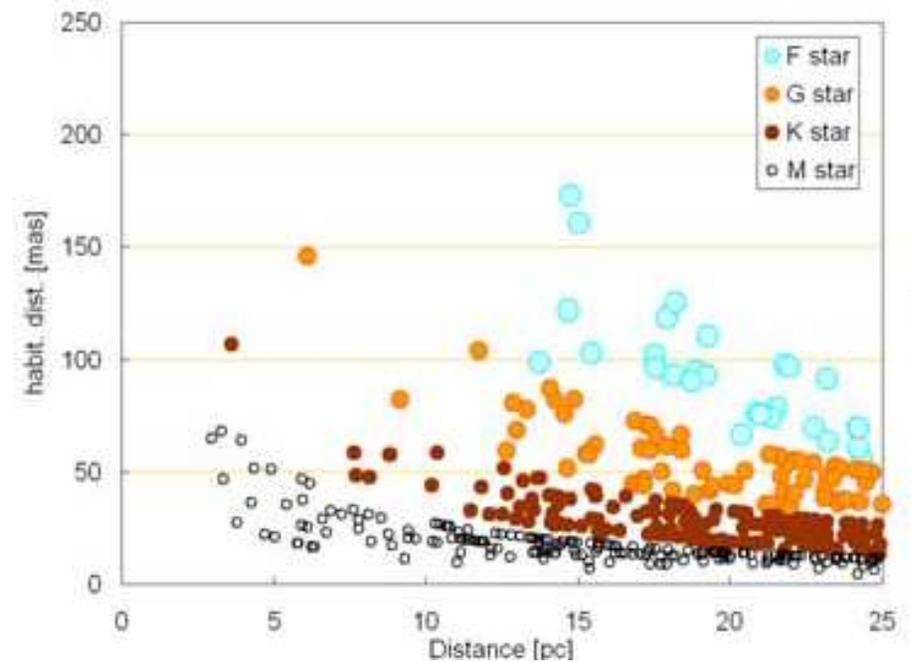


- Mide el radio del planeta ( $R_p$ ) y el periodo orbital ( $P$ )
- El primer eclipse se denomina tránsito. En este momento se puede medir el espectro de transmisión de la atmósfera del planeta (por ahora esto es posible sólo para planetas tipo Júpiter caliente).
- Este método está sesgado hacia planetas grandes cercanos a su estrella.
- Las observaciones deben ser confirmadas por otro método.

# Imagen directa



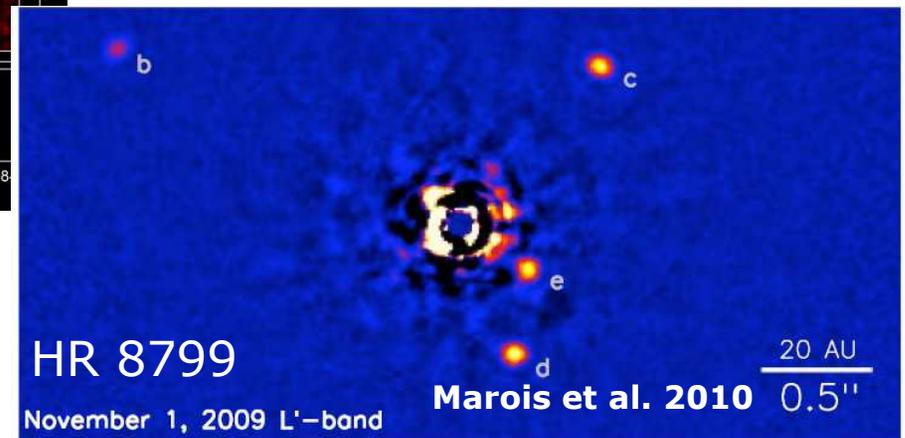
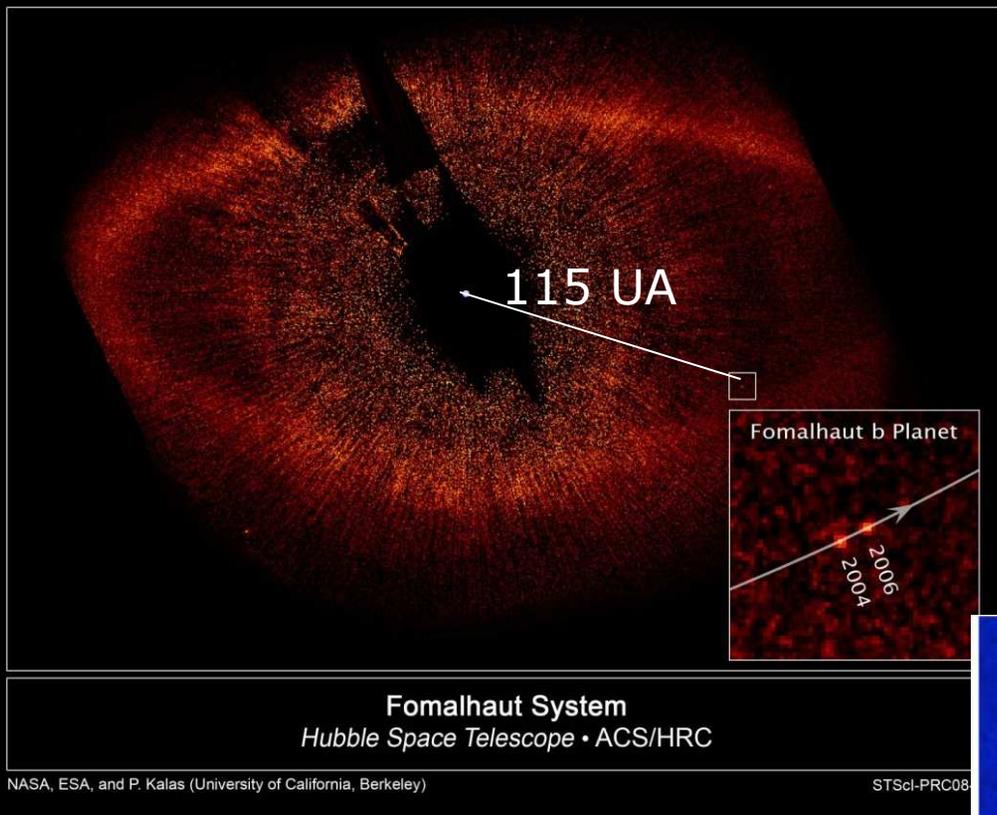
Emisión de cuerpo negro para planetas del sistema solar, el Sol y un Júpiter caliente, vistos a 10 parsecs (Seager y Deming, 2010)



Separación en milisegundos de arco entre un planeta en la zona habitable y su estrella (Kaltenegger et al . 2006)

# Imagen directa

- Detección por coronografía e interferometría.
- Sesgado hacia planetas masivos lejanos a su estrella.



Sol - Tierra: 1 UA  
Sol - Júpiter: 5 UA  
Sol - Neptuno: 30 UA  
Sol - Plutón: 40 UA

# Nuestra Galaxia

100 mil años luz

Los exoplanetas  
que podemos  
detectar están  
dentro del círculo

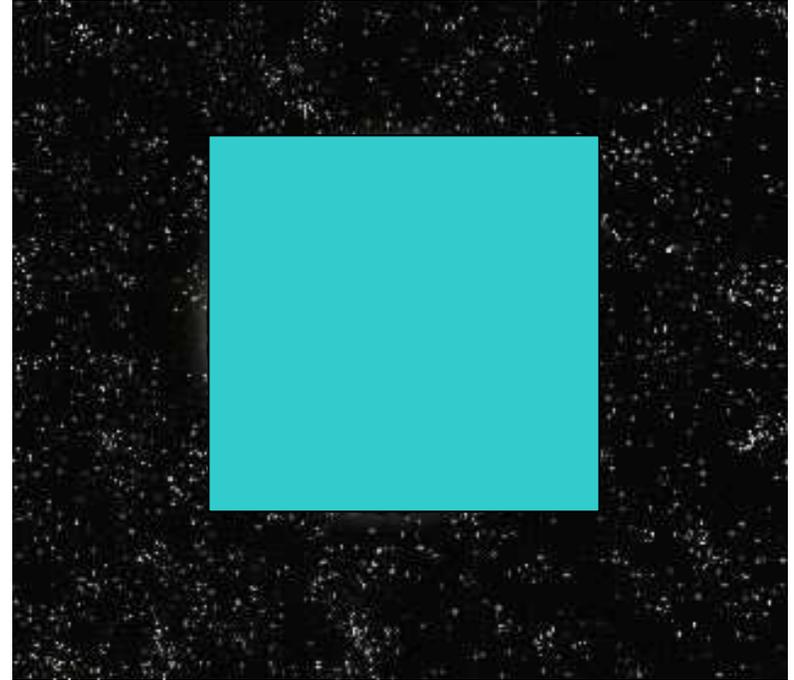
Usted está  
aquí

# ¿Qué es lo que podremos detectar?

---

## Actualmente:

- Masa del planeta (Doppler)
  - Radio del planeta (Tránsito)
  - Distancia a su estrella
  - Planetas alrededor de estrellas en un radio de ~3000 años luz
- En el futuro:
    - Composición atmosférica promedio, es decir, de TODO el planeta
    - Con suerte: presencia de nubes, tipos de superficies
    - ¿vida?
    - Sólo si esta produce una señal global



El planeta no podrá ser resuelto espacialmente, no podemos tener detalles de él, sólo propiedades globales o una mezcla de propiedades particulares



Parte 2.

# PLANETAS HABITABLES

# Habitabilidad

---

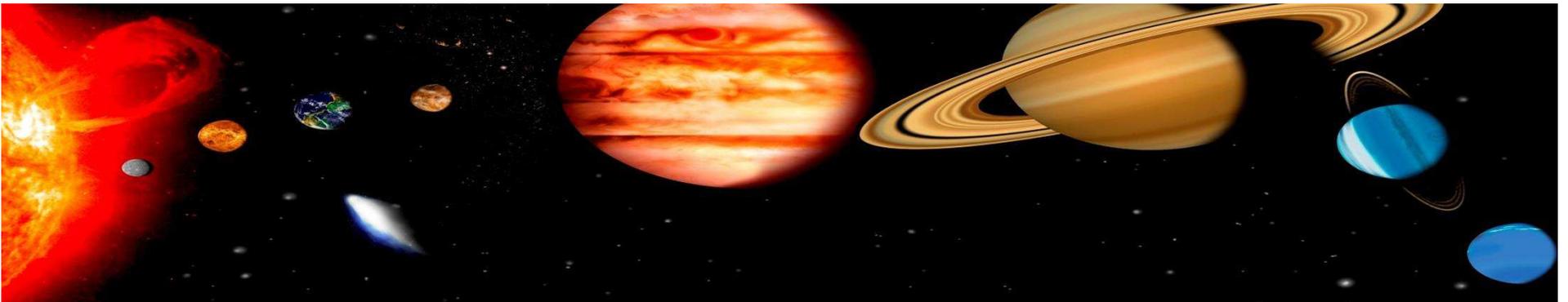
- Depende de la presencia de agua líquida
- Para planetas fuera del sistema solar la superficie del planeta debe ser habitable para poder caracterizarlo.

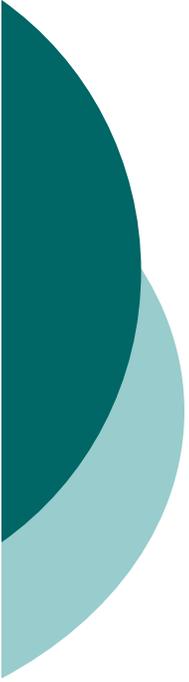


# Planetas habitables

---

- Planetas terrestres:
  - Planetas hechos de silicatos (Si and O) pueden tener núcleos de Fe-Ni,
  - Atmósferas de CO<sub>2</sub> or H<sub>2</sub> dependiendo de la masa del planeta.
- Planetas gaseosos: H/He
- Planetas helados: CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>





# Habitabilidad planetaria

---

- Para que un planeta pueda mantener agua en la superficie se requiere:
  - Que la superficie del planeta se encuentre por arriba del punto de congelación del agua.
  - Que el planeta tenga una atmósfera para que la presión atmosférica mantenga al agua en estado líquido.
- La atmósfera también es indispensable para mantener la temperatura de la superficie (efecto invernadero).
- Estos dos criterios son usados para definir la Zona Habitable de una estrella

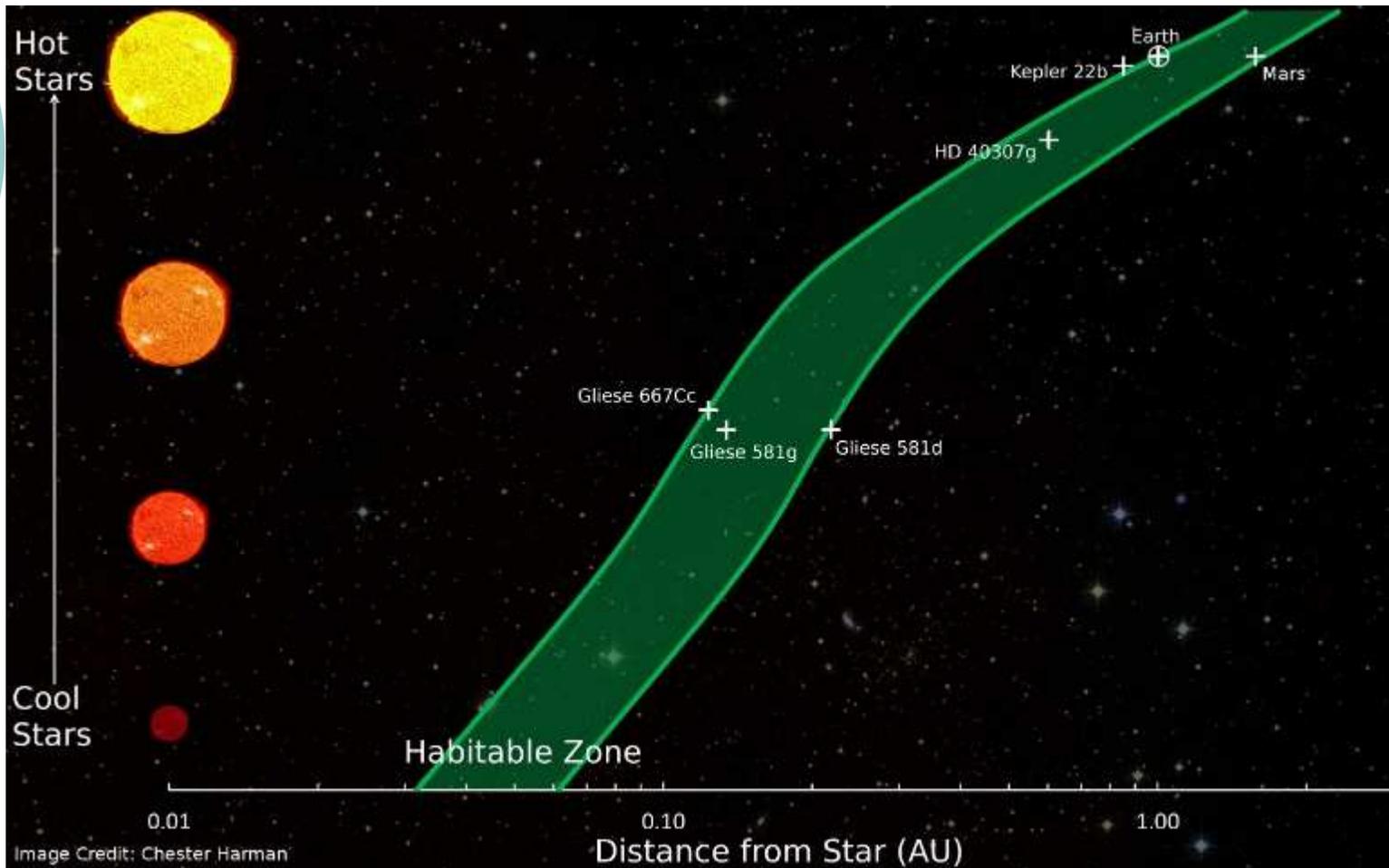


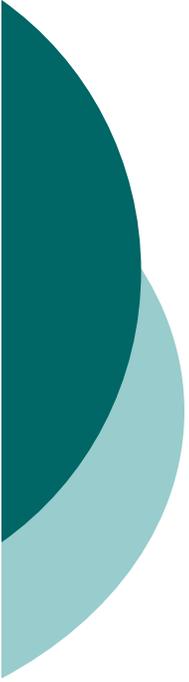
# Zona habitable

---

- La zona habitable circunestelar es la región alrededor de una estrella donde un planeta CON ATMÓSFERA puede mantener agua líquida en la superficie.
- El cálculo de la ZH requiere modelos numéricos y la suposición de una determinada composición atmosférica (con gases de invernadero) y una presión superficial.
- La ZH clásica (Kasting et al. 1993, Kopparapu, 2013) fue calculada para atmósferas de  $\text{CO}_2$ - $\text{H}_2\text{O}$ - $\text{N}_2$

# Zona habitable





# Atmósferas de planetas terrestres

---

- Se forma a partir de:
  - Gases liberados durante los impactos sufridos en las etapas finales de la formación del planeta.
  - Degasamiento de los gases atrapados en el interior del planeta (vulcanismo).
  - Gases liberados por impactos después de la formación del planeta.
- La composición de los gases depende de la composición de los cuerpos que impactan.
- El  $H_2$  se escapa en planetas con masas como la de la Tierra y otros gases como el  $CH_4$  se descomponen por la radiación ultravioleta proveniente de la estrella que hospeda al planeta.



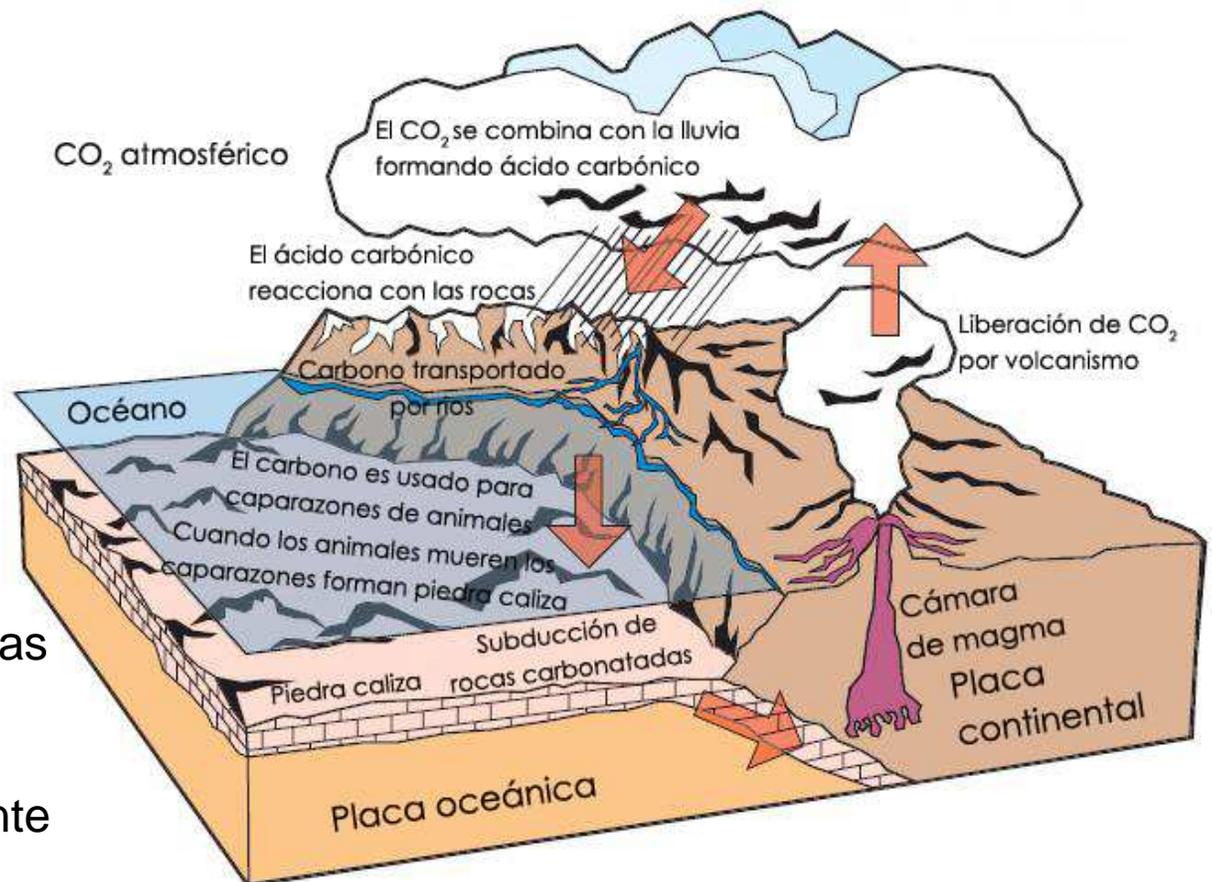
# Atmósferas de planetas terrestres

---

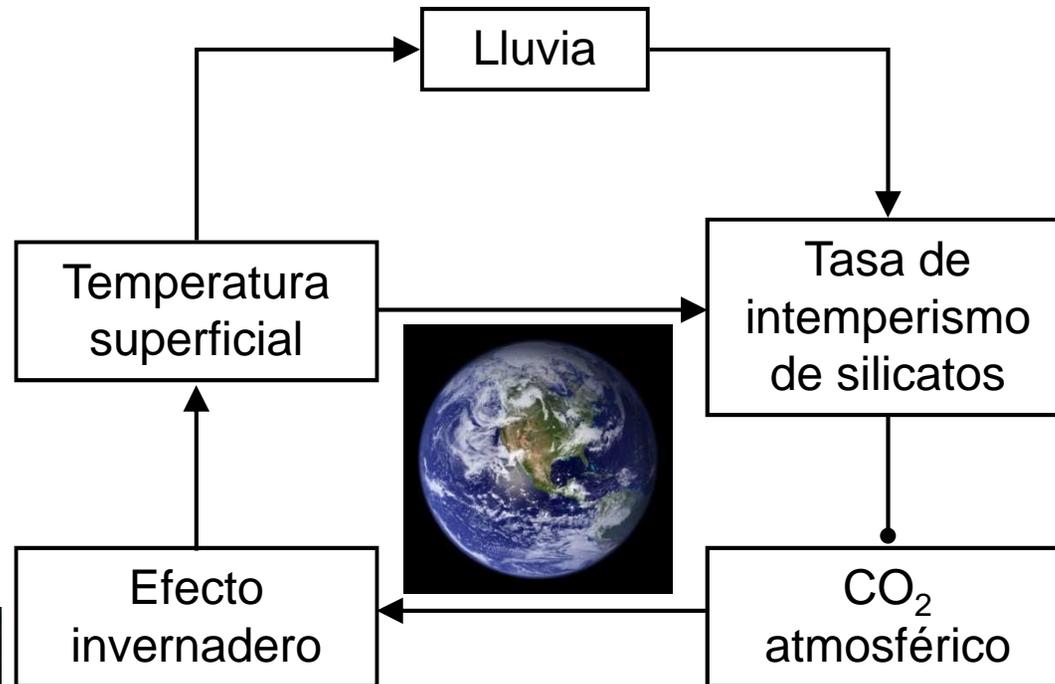
- Los gases más estables y que pueden mantenerse en la atmósfera son:  $N_2$ ,  $CO_2$  y  $H_2O$ .
- Con el tiempo, la atmósfera de un planeta puede perderse por escape al espacio o reacciones con la superficie.
- La composición atmosférica puede cambiar con el tiempo dependiendo de los procesos geológicos (o biológicos) del planeta.

# Ciclo de carbonatos-silicatos

- Depende de la temperatura
- Este ciclo controla el clima a escalas geológicas
- El  $\text{CO}_2$  se recicla en periodos de unos 200 millones de años
- Para que haya subducción de las placas tectónicas se requiere agua en el manto y energía interna suficiente para que el manto sea convectivo



# Ciclo de carbonatos-silicatos



Tierra: CO<sub>2</sub> en la corteza

CO<sub>2</sub> en la corteza y congelado en los polos

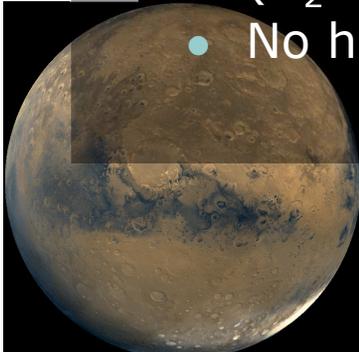


CO<sub>2</sub> en la atmósfera



# Criterios de habitabilidad: MASA

- Los planetas más pequeños que  $1 M_{\oplus}$  pierden rápidamente su atmósfera.
- Más allá de las  $10 M_{\oplus}$ , los planetas son capaces de agregar grandes cantidades de gas:
  - Este tipo de planetas liberan energía interna que alimenta fuertes vientos (500-1500 km/hr).
  - Su composición química es principalmente H y He con trazas de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), agua, fosfina ( $\text{PH}_3$ ), acetileno ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ), etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ).
  - No hay evidencia de compuestos más complejos



# Condiciones de habitabilidad superficial

---



G. Chin (GSFC)

- La distancia adecuada de su estrella (Zona Habitable): Permite mantener una temperatura adecuada si el planeta tiene...
- Atmósfera: Mantiene un clima estable en el planeta y la presión para que el agua se mantenga líquida
- Masa planetaria: Sirve para retener la atmósfera, mantener actividad tectónica y campo magnético (1 a 10 veces la masa de Tierra)
- Agua: Abundante en el universo, con propiedades que lo hacen muy buen solvente

# Súper Tierras



1 masa terrestre

1 radio terrestre

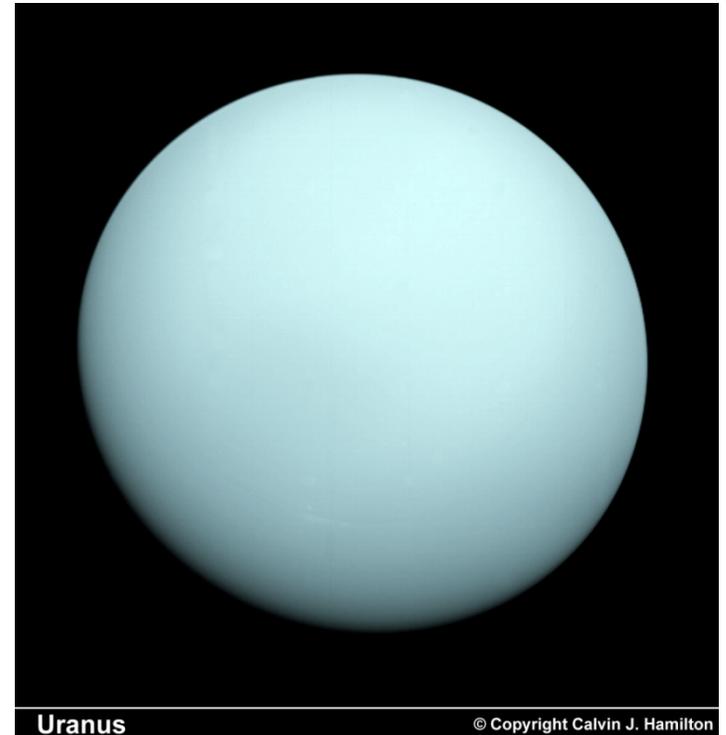
Roca

Densidad: 5.5 gr/cm<sup>3</sup>

## Súper Tierras

¿Roca?  
¿líquido?  
¿gas?

**Mini  
Neptunos**



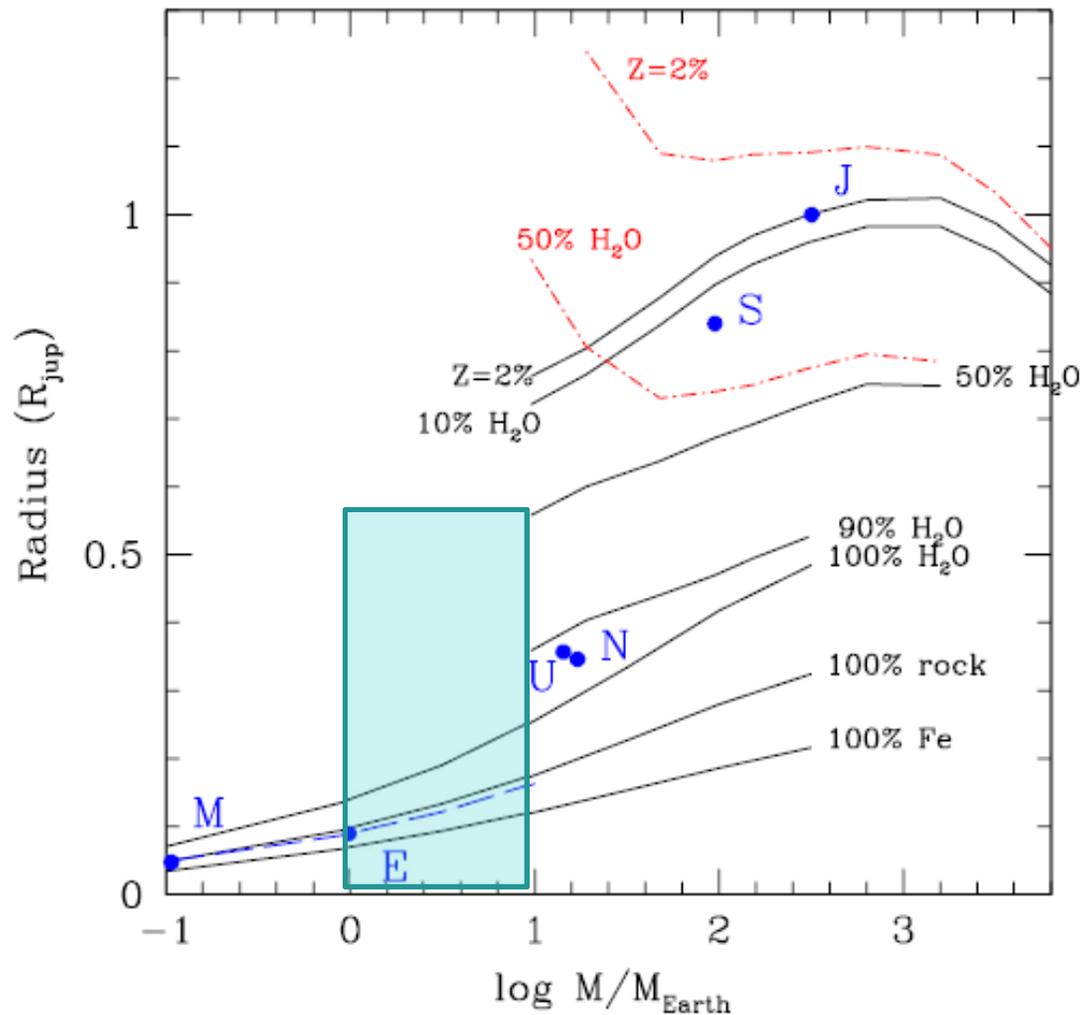
15 masas terrestres

4 radios terrestres

Hielo

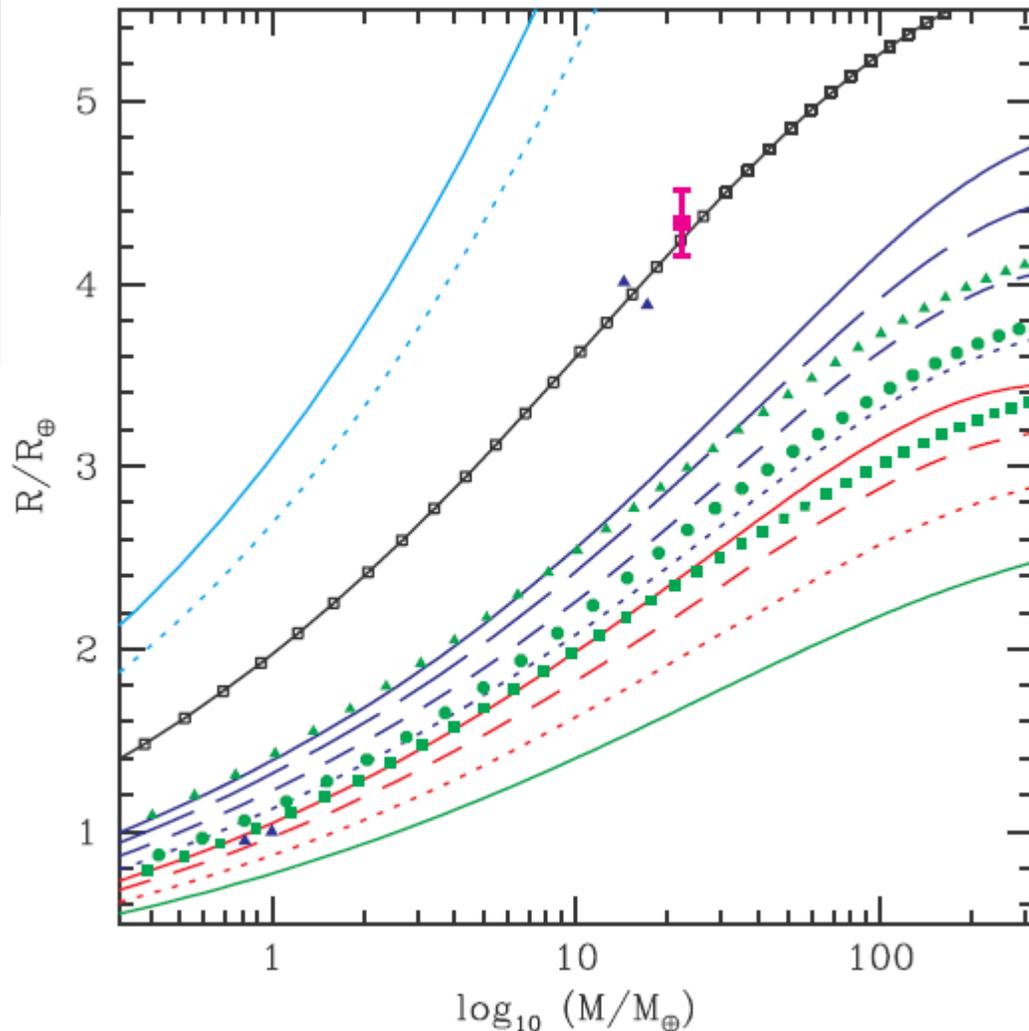
Densidad: 1.3 gr/cm<sub>40</sub><sup>3</sup>

# Súper Tierras



Los planetas con masas entre 1 y 10  $M_{\oplus}$ , pueden ser planetas océano o planetas rocosos o planetas de carbono

# Planetas de carbono y planetas de silicatos



Agua

CO

Carbono

Grafito + núcleo Fe

SiC+núcleo Fe

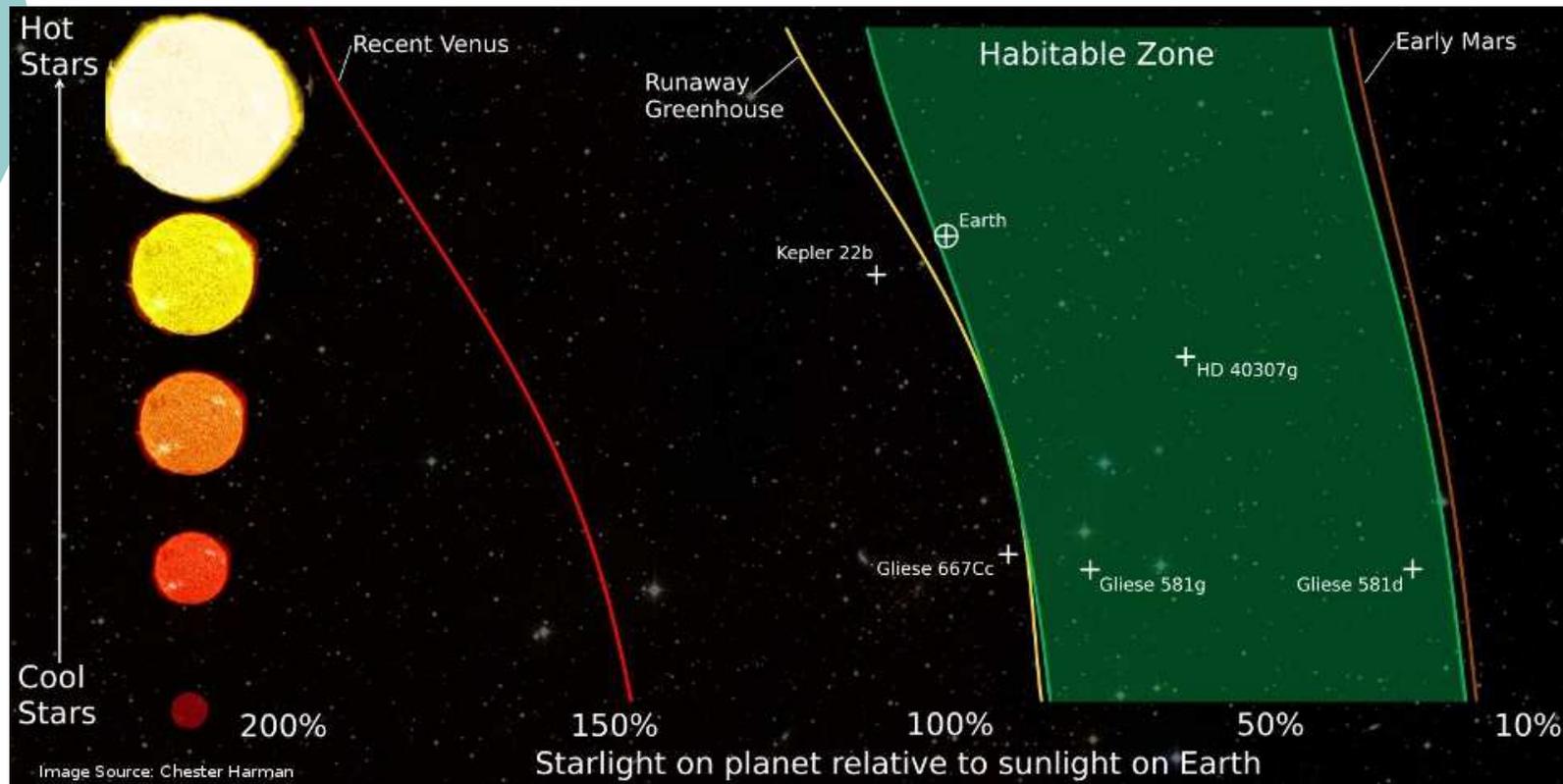
Silicatos

Hierro

Con la relación masa-radio no podríamos distinguir un planeta de carbono de uno de silicatos.

Seager et al. 2007

# Planetas potencialmente habitables



# Current Potential Habitable Exoplanets

Compared with Earth and Mars and Ranked in Order of Similarity to Earth



Earth  
1.00



Mars  
0.66

#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
Earth Similarity Index						
0.92	0.85	0.81	0.79	0.77	0.73	0.72
						
Gliese 581 g*	Gliese 667C c	Kepler-22 b	HD 40307 g*	HD 85512 b	Gliese 163 c	Gliese 581 d
Discovery Date						
Sep 2010	Nov 2011	Dec 2011	Nov 2012	Sep 2011	Sep 2012	Apr 2007

\*unconfirmed planets

CREDIT: PHL @ UPR Arcibo (phl.upr.edu) Nov 7, 2012

Estrella	M1.5V	G5V	K2.5V	K5V	M3.5V	M2.5V
$M_p$ o $R_p$	4.5 $M_{\oplus}$	2.4 $R_{\oplus}$	7 $M_{\oplus}$	3.6 $M_{\oplus}$	6.9 $M_{\oplus}$	7 $M_{\oplus}$
$a$ (UA)	0.12	0.85	0.6	0.26	0.12	0.22
$d$ (años luz)	22	619	42	36	50	20

# SÓLO sabemos su radio o su masa

## GJ 1214b

The second transiting  
super Earth

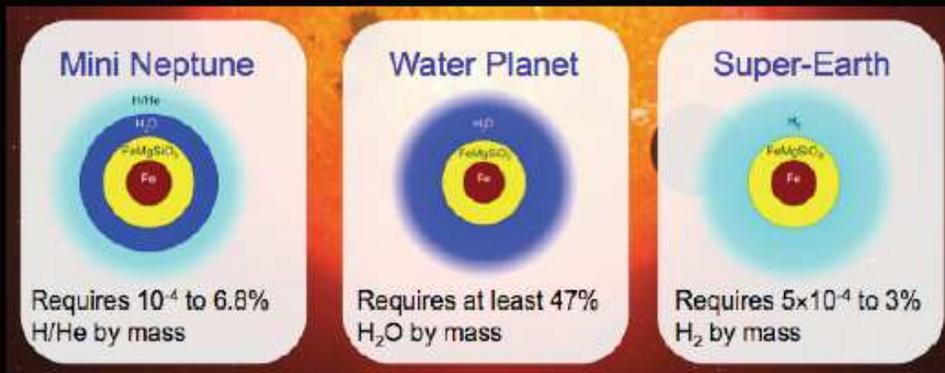
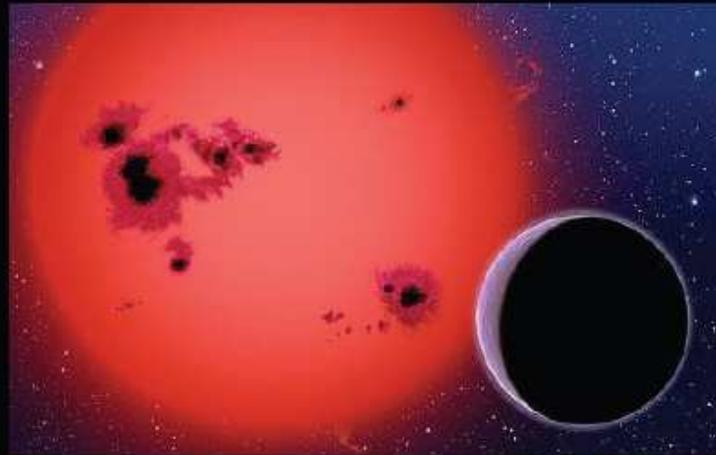
$$R = 2.68 \pm 0.13 R_{\oplus}$$

$$M = 6.6 \pm 0.8 M_{\oplus}$$

$$P = 1.58 \text{ days}$$

$$a = 0.014 \text{ AU}$$

$$T < \sim 550 \text{ K}$$



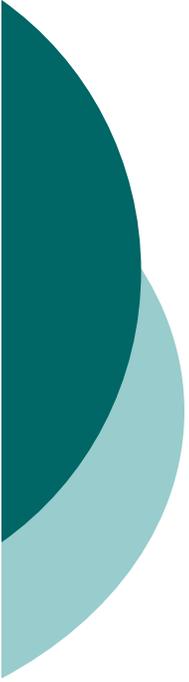
GJ 1214b by Charbonneau et al. 2009

Interpretation by Rogers and Seager 2010a



Parte 3.

# BIOSEÑALES



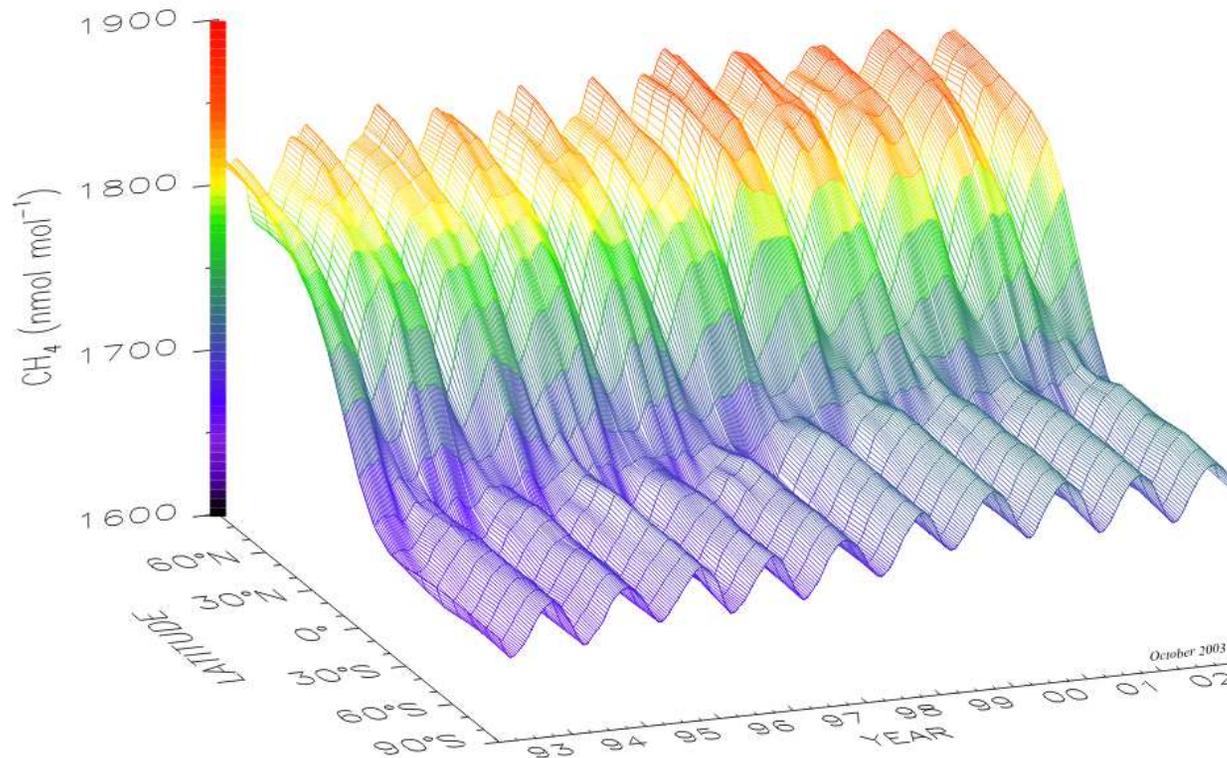
# Detección remota de vida

---

- Habitabilidad: Agua y bióxido de carbono
- Bioseñales: Son características que pueden ser detectadas de manera remota y cuya abundancia o presencia sólo pueden ser producidas por la vida (DesMarais et al. 2002).
- Meadows (2006) identifica tres tipos de bioseñales: atmosféricas, superficiales y temporales.

# Bioseñales temporales

**Global Distribution of Atmospheric Methane**  
NOAA CMDL Carbon Cycle Greenhouse Gases

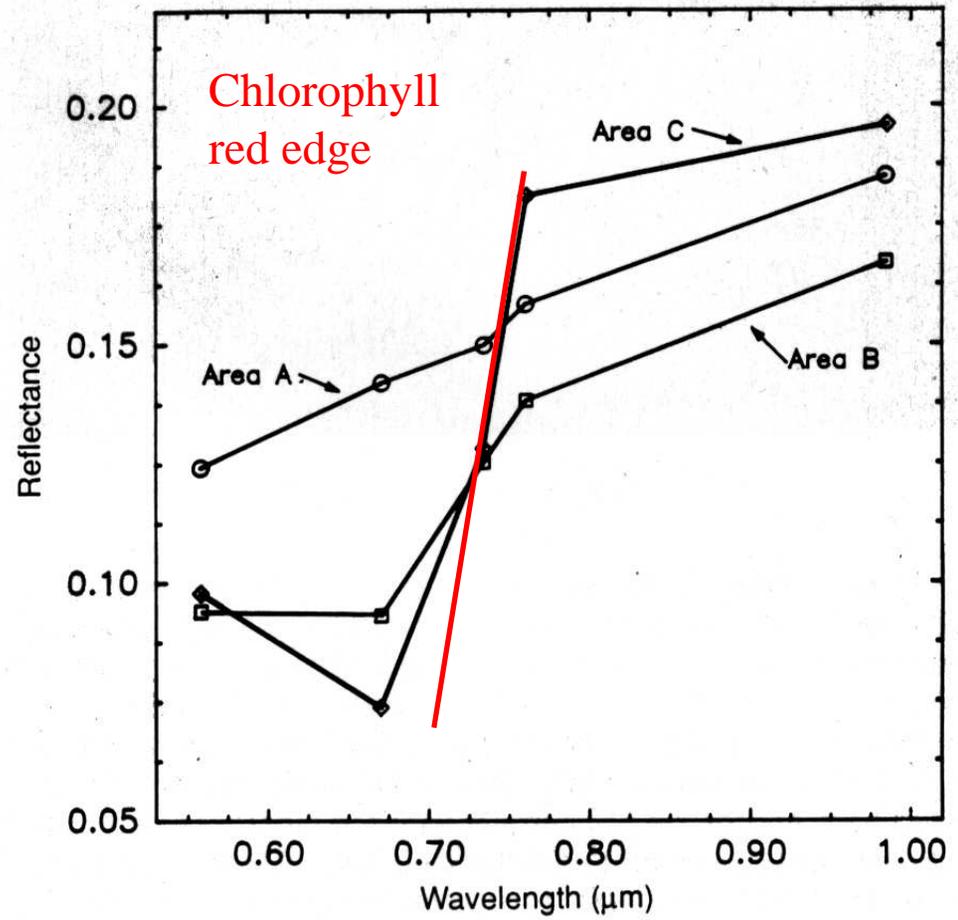


Variaciones periódicas en la abundancia de un compuesto en tiempos relativamente cortos no atribuibles procesos geológicos o atmosféricos.

# Bioseñales superficiales

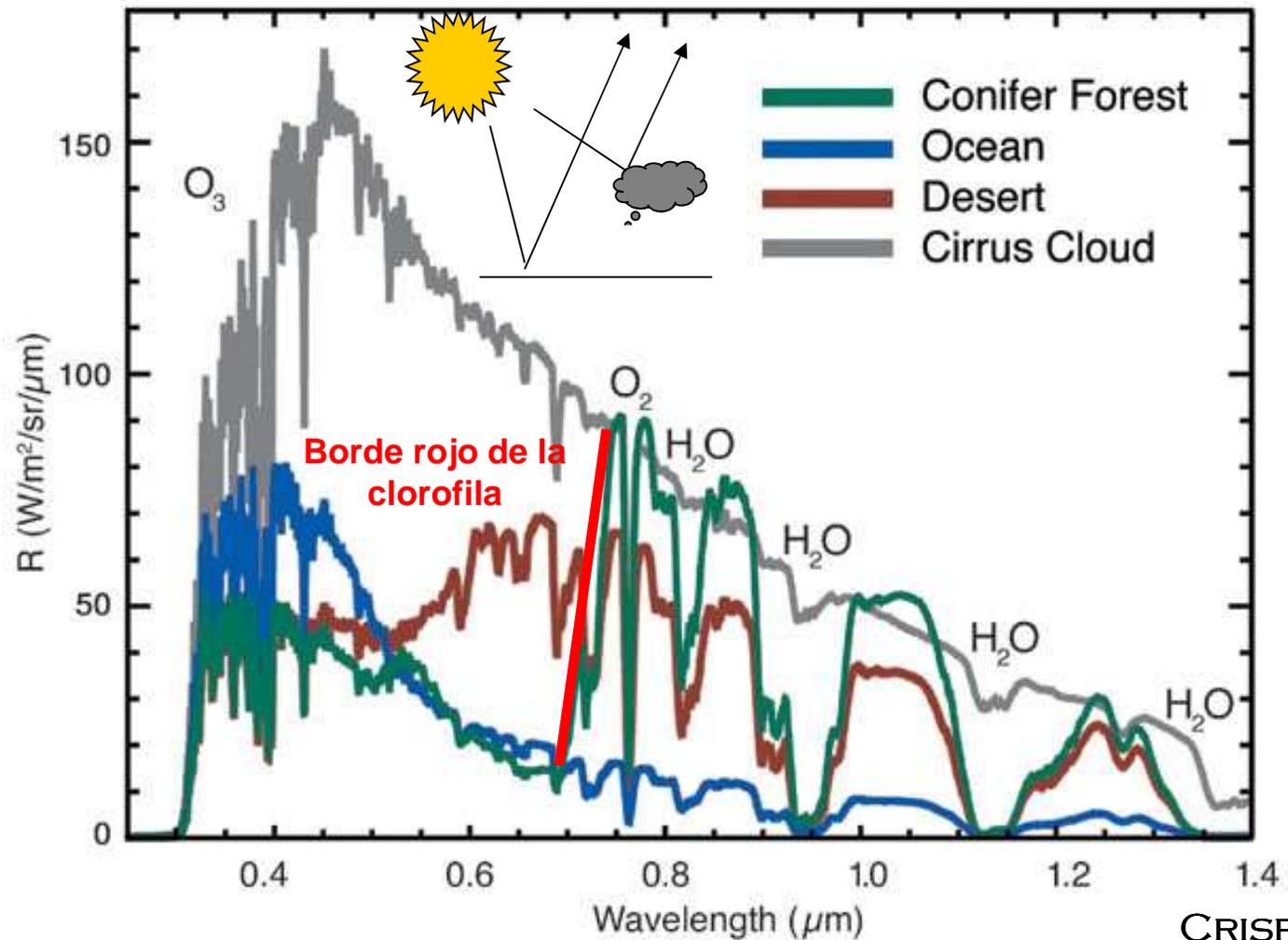


Experimento Galileo



*Sagan et al. (1993)*

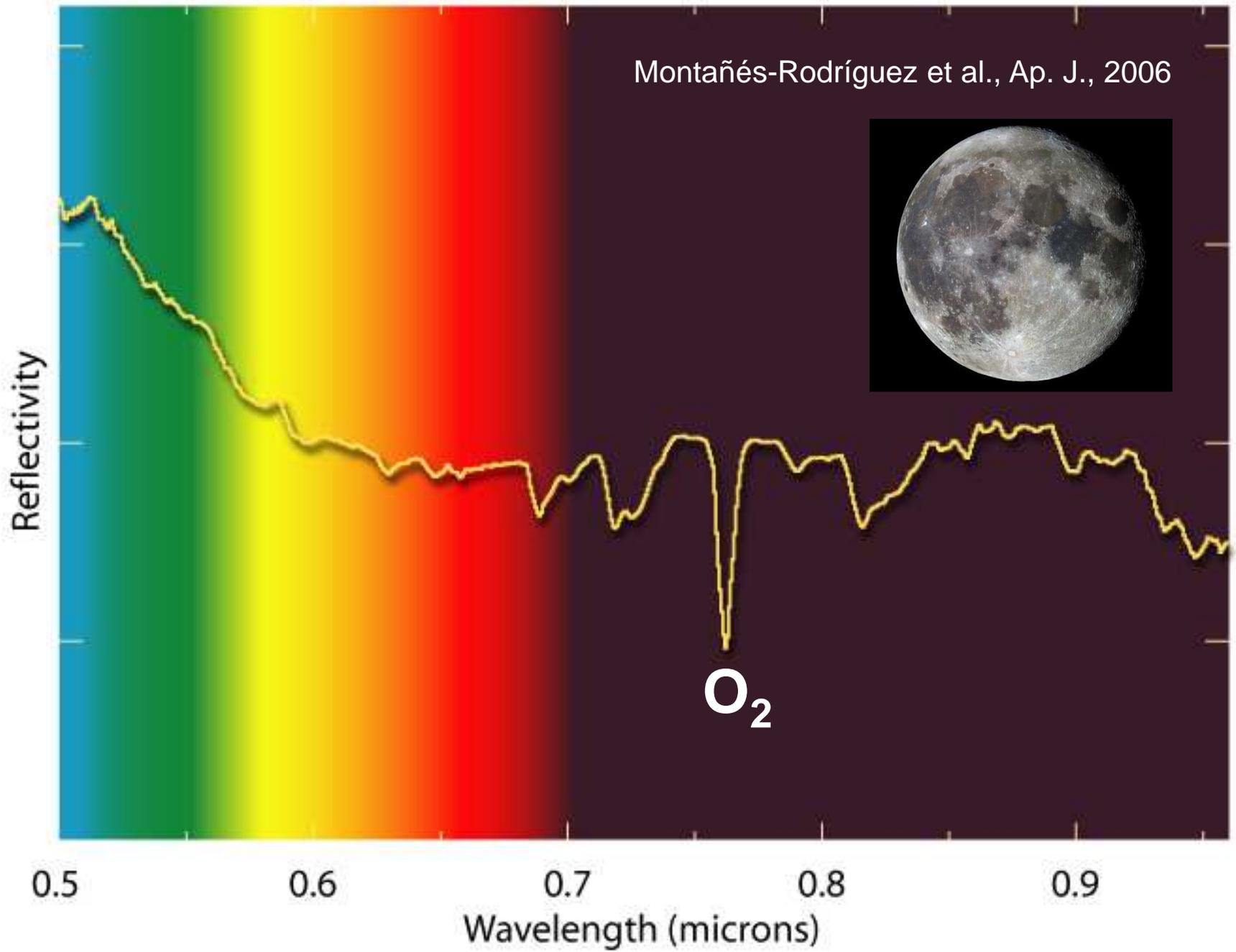
# Bioseñales superficiales



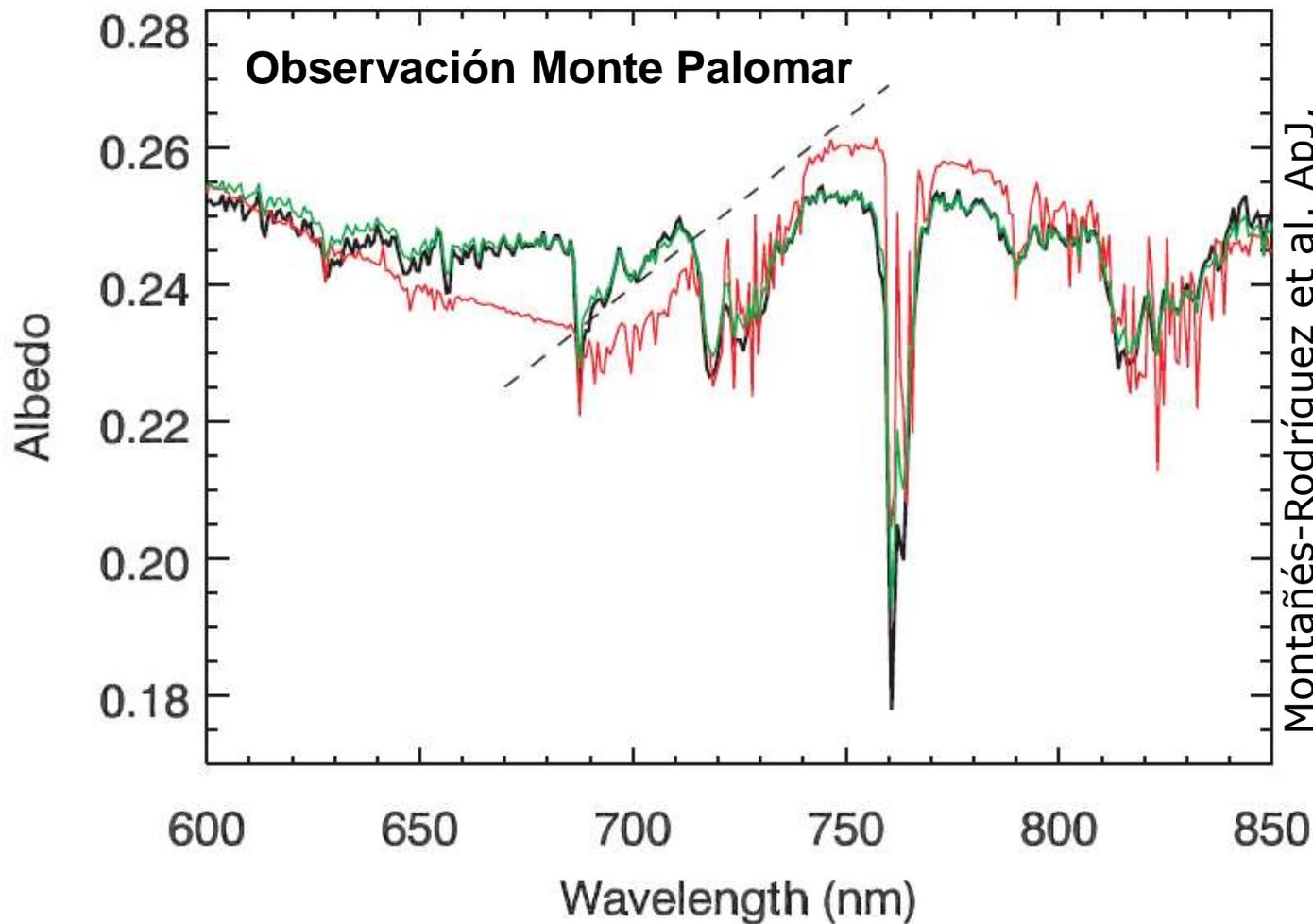
CRISP,  
MEADOWS

# Earthshine Spectrum

Montañés-Rodríguez et al., Ap. J., 2006



# Brillo de la Tierra: detección del borde rojo de la clorofila



**Observación  
y modelo**



**Modelo**





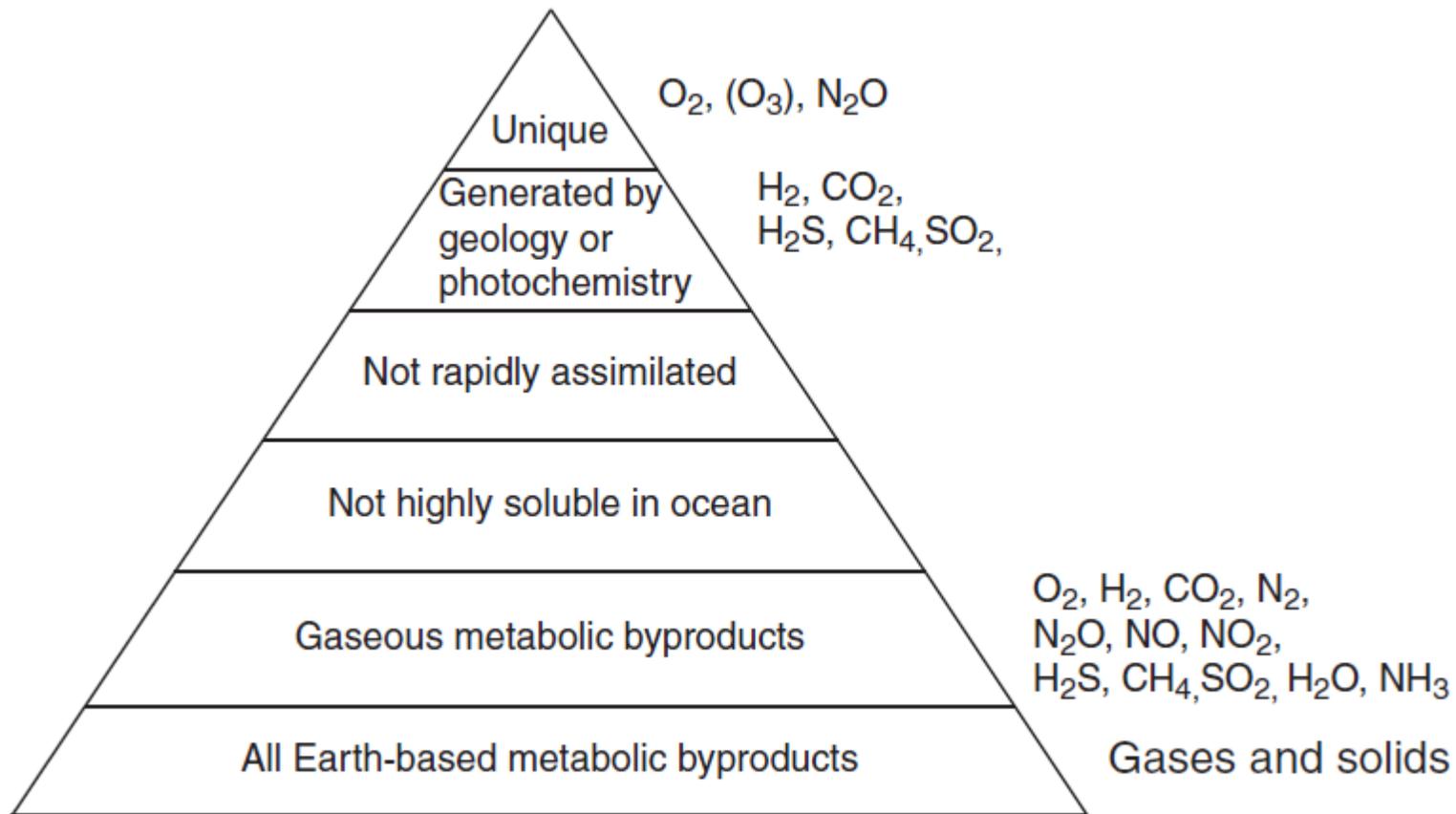
# Bioseñales atmosféricas

---

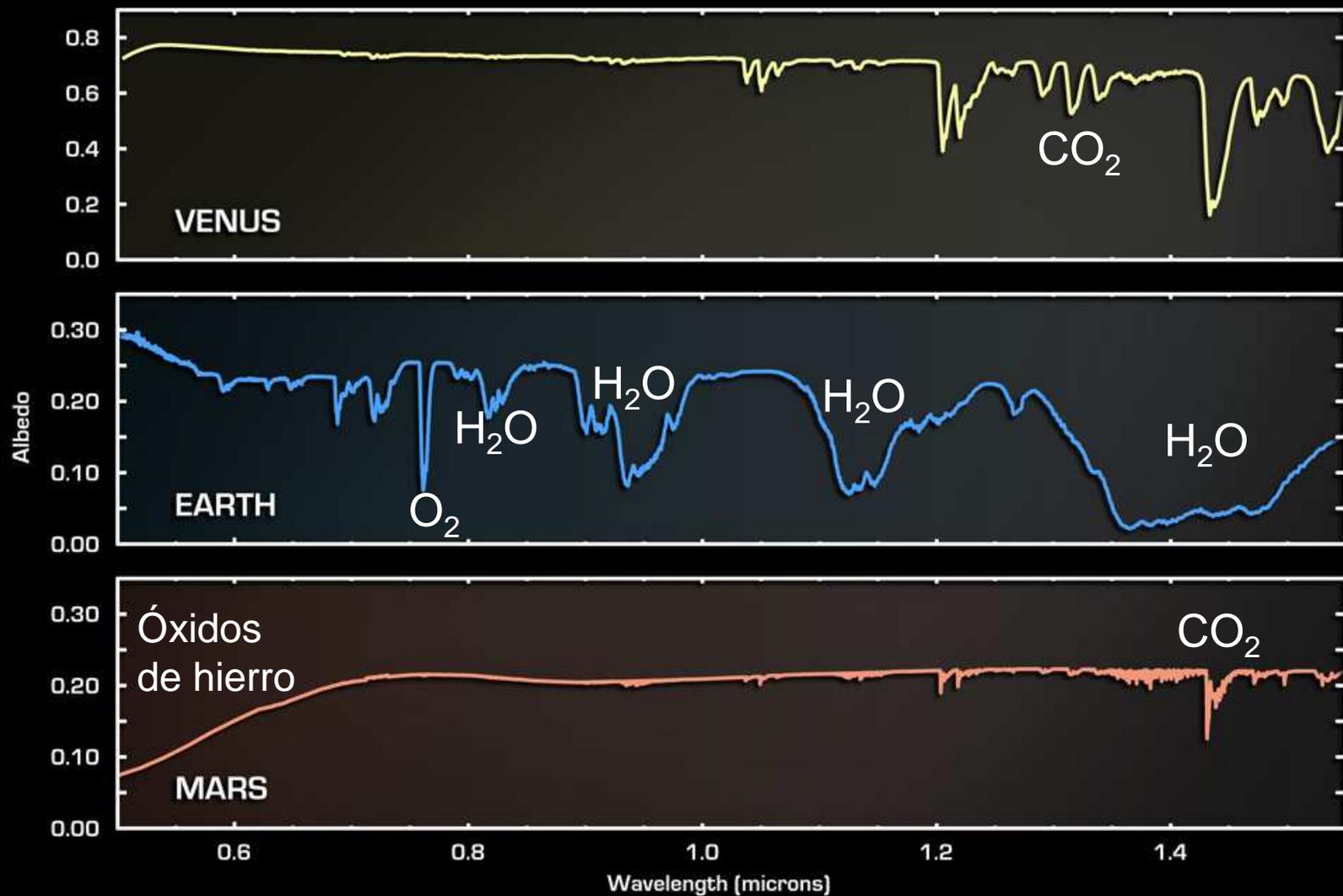
- Se basan en lo que la vida “hace”
  - Son productos metabólicos
  - Son independientes de la “maquinaria” involucrada
- Tipos de bioseñales atmosféricas (Seager et al. 2012):
- Química redox:
    - Utiliza desequilibrios químicos en el ambiente para obtener energía.
    - Convertir compuestos químicos del ambiente en biomasa
  - Productos metabólicos secundarios: no se correlacionan con la energía química de las reacciones o la cantidad de biomasa, por ejemplo, las hormonas.

# Productos de la vida útiles como bioseñales

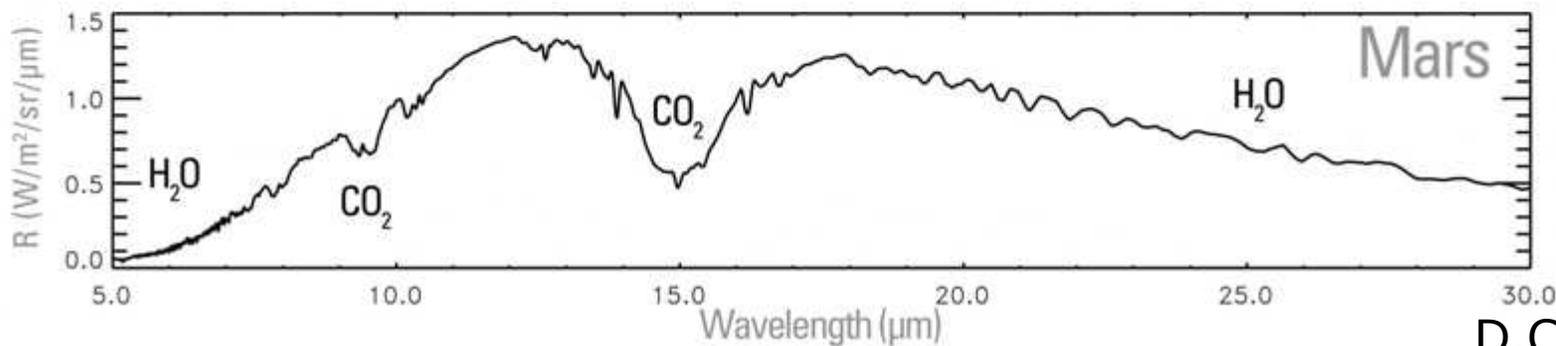
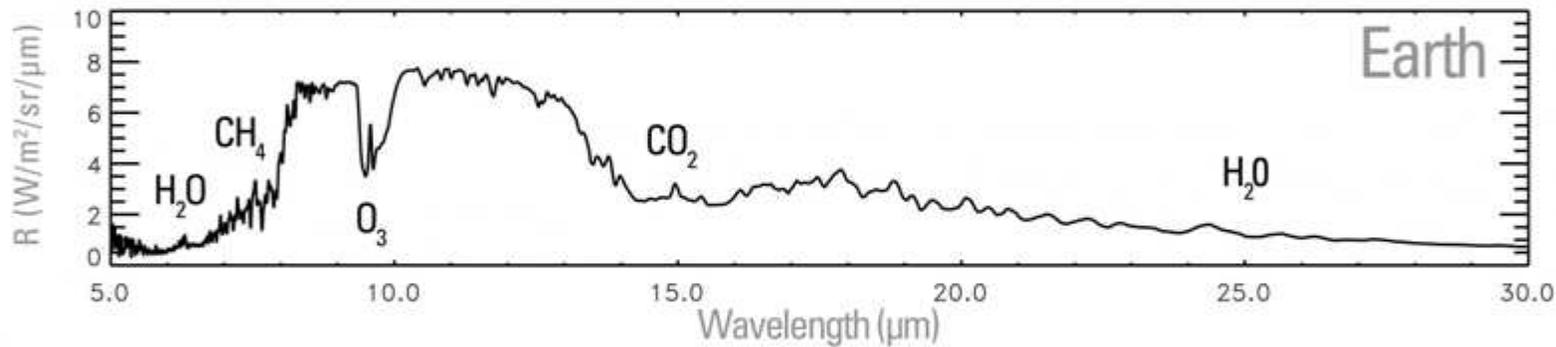
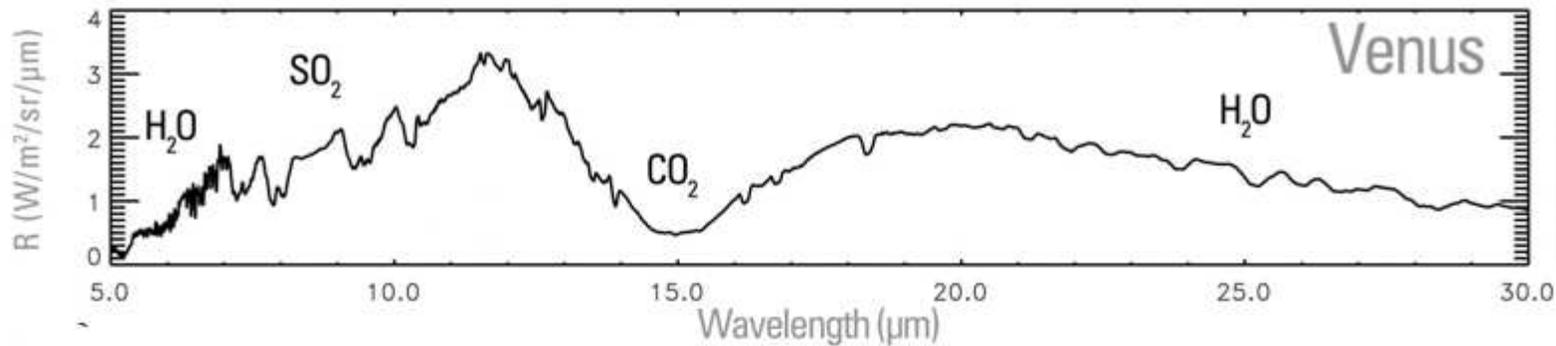
---



# Espectros de planetas terrestres: visible

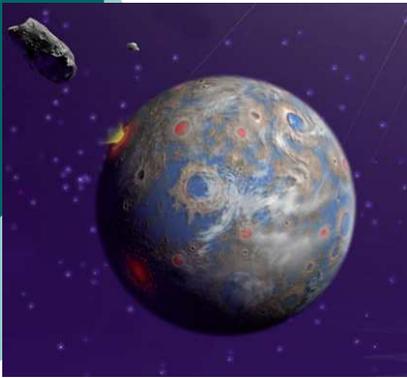


# Espectros de planetas terrestres: IR



D.Crisp (JPL)

# O<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> como bioseñales



Tierra temprana:  
Sin oxígeno (O<sub>2</sub>)  
Atmósfera: CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>

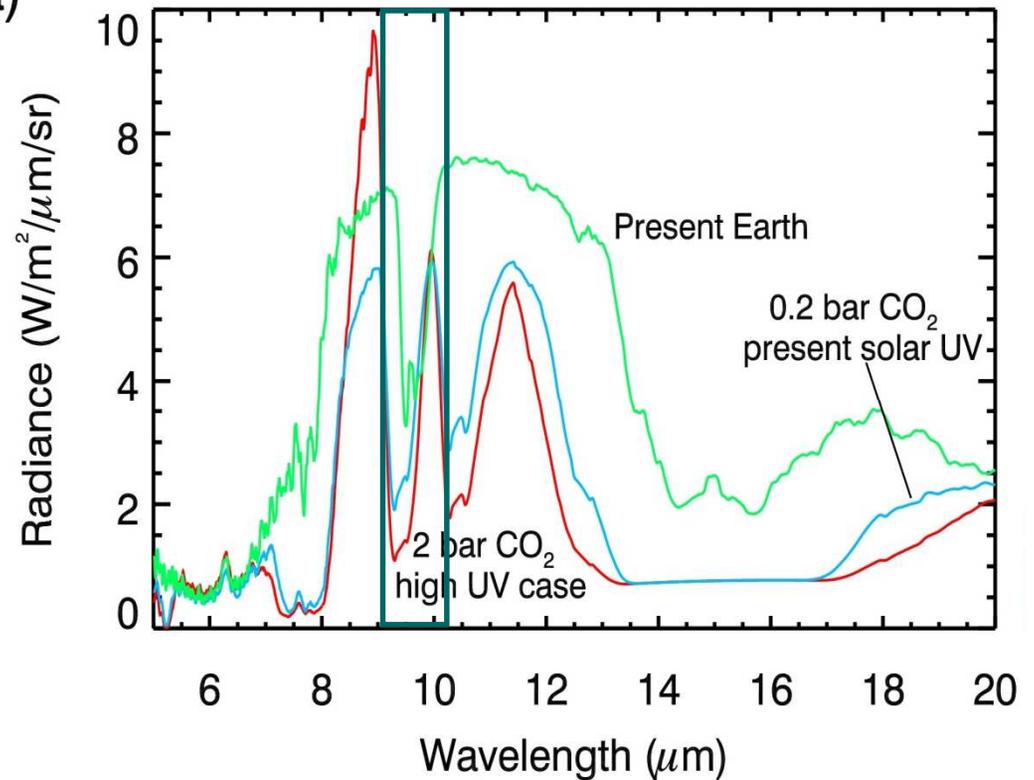
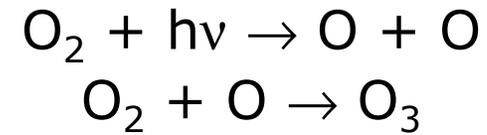
~ Hace 2.4×10<sup>9</sup> años, oxidación de la atmósfera



**Cyanobacteria**

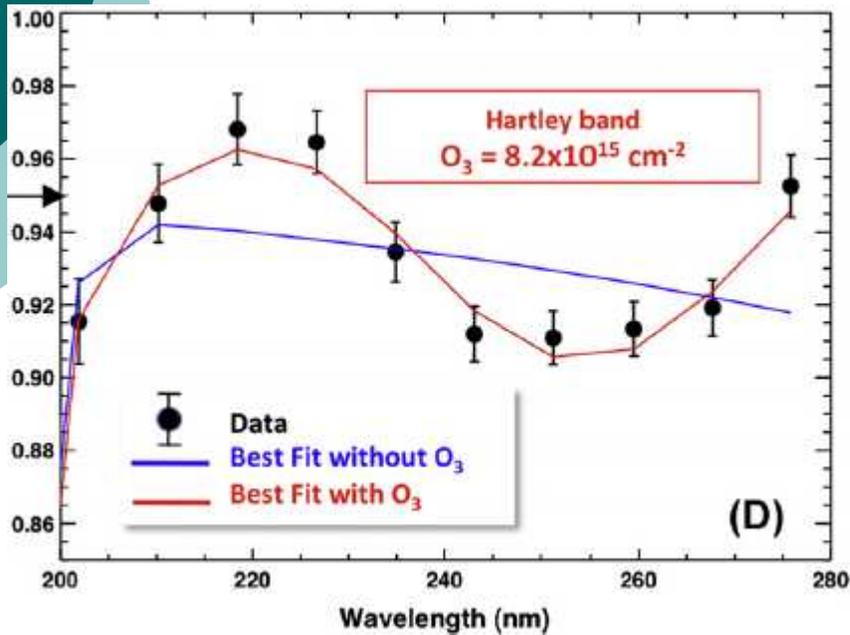


Tierra presente:  
0.21 O<sub>2</sub>



# Oxígeno y ozono

Venus



SPICAV, Venus Express  
Montmessin et al. Icarus 2011.

Mars

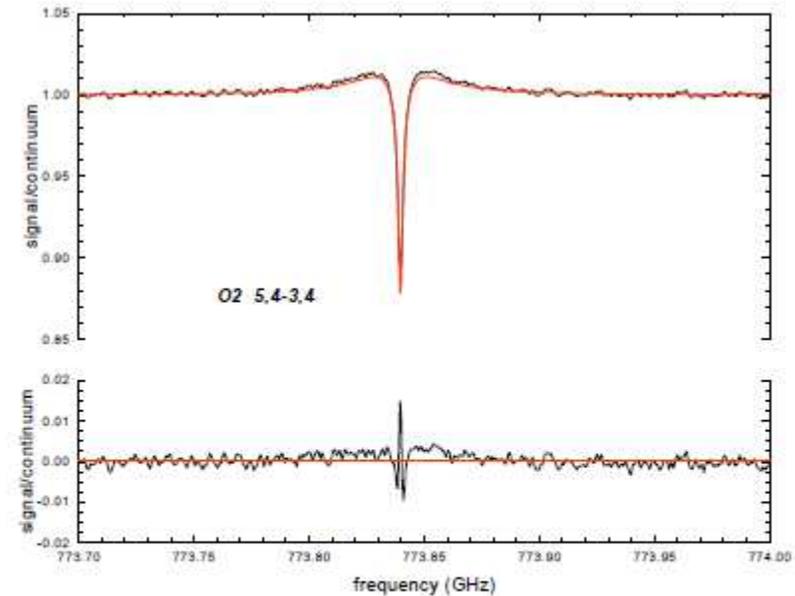


Fig. 4. Observation of O<sub>2</sub> at 774 GHz. The best fit of a constant altitude profile infers a volume mixing ratio of  $1400 \pm 120$  ppm. The lower panel shows the difference between observation and model.

Hartogh et al. A&A, 2010.

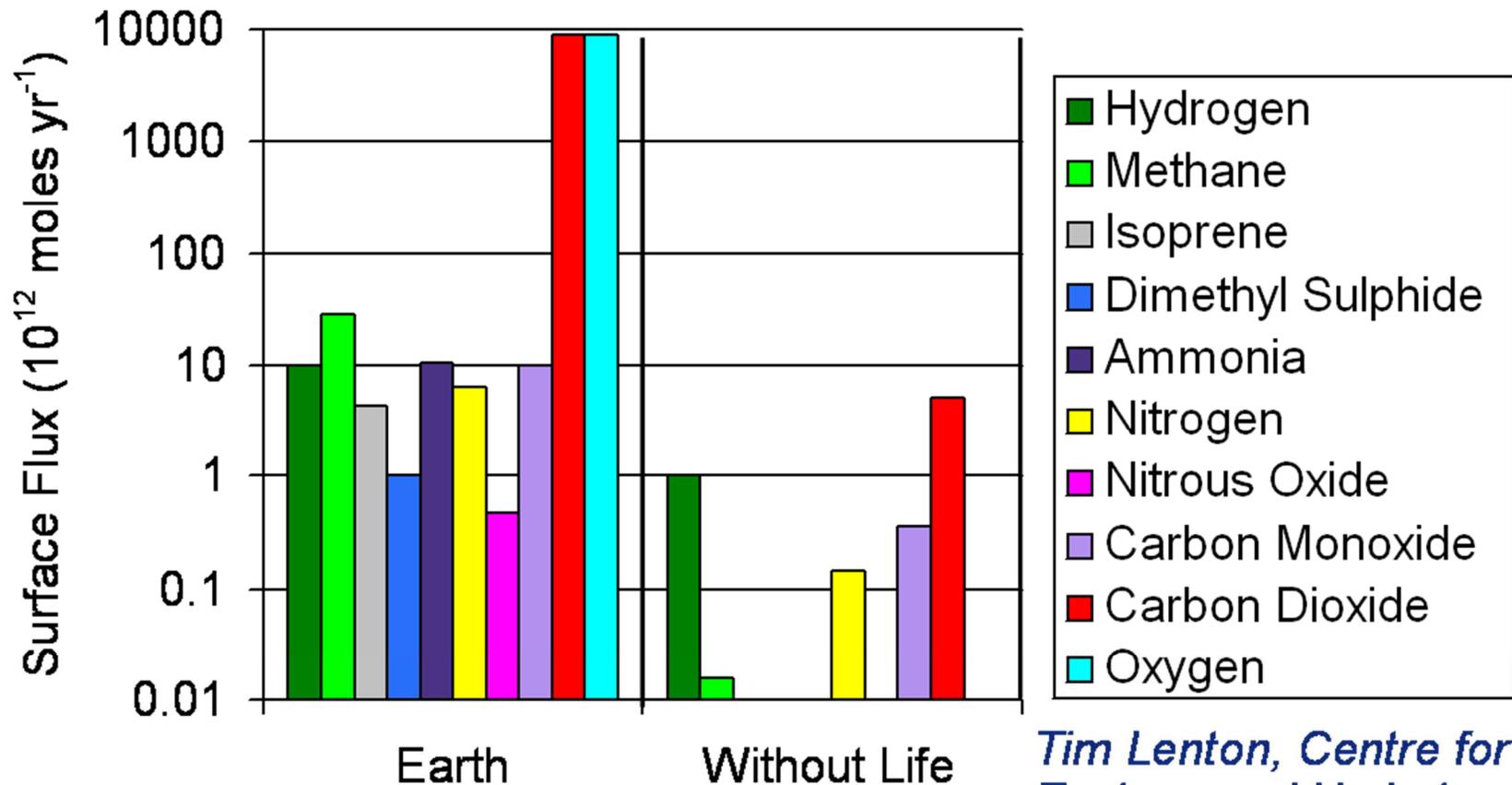


# ¿Puede producirse oxígeno abiótico?

---

- Sí, la fotólisis del agua y posterior escape del  $H_2$  al espacio es una fuente neta de  $O_2$
- En un planeta con agua líquida en su superficie (localizado en la zona habitable y con atmósfera) el  $O_2$  y el  $H_2$  se recombinan en especies químicas solubles en agua, por lo que el  $O_2$  no se acumula en niveles detectables en la atmósfera (Segura et al. 2007).
- En Marte hay  $1.3 \times 10^{-3} O_2$  que se forma a partir de la fotólisis de  $CO_2$
- **Las bioseñales dependen del contexto geológico**

# Otras bioseñales



Lo que estamos buscando son compuestos que sólo sean producidos por la vida, por ejemplo: amoniaco, óxido nitroso



# Problemas actuales en la identificación de bioseñales

---

- Para planetas ricos en CO<sub>2</sub> no tenemos bioseñales.
- La habitabilidad de los planetas alrededor de enanas M presenta muchos retos:
  - ¿es la actividad cromosférica un problema para la habitabilidad?
  - ¿cuánto tiempo dura esta actividad?
  - Caracterización del ambiente UV



# Misiones para detectar planetas habitables

---

1. Detección de planetas con masas de  $10 M_{\oplus}$  o menos (Kepler, HARPS)
2. Elegir entre ellos, los que son potencialmente habitables (localizados en la zona habitable de su estrella).
3. Observar estos planetas con instrumentos que permitan obtener el espectro del planeta: James Webb Space Telescope.