

## La Tierra vista como exoplaneta

**Antígona Segura**

Instituto de Ciencias Nucleares, Universidad Nacional Autónoma de México  
Circuito Exterior C.U. A. Postal 70-543 04510 México D.F. México.  
antigona@nucleares.unam.mx

### RESUMEN

*La Tierra, como único ejemplo de planeta habitable, nos da los primeros elementos para caracterizar el espectro de planetas de tipo terrestre alrededor de otras estrellas que podrían ser detectados en el transcurso de la próxima década gracias a misiones como CoRoT y Kepler y caracterizados por las misiones Terrestrial Planet Finder y Darwin. En este artículo se compendian los estudios que utilizan a la Tierra para determinar las posibles características de mundos habitables alrededor de otras estrellas. A partir de comparar las características de la Tierra con las de los demás planetas terrestres del Sistema Solar se ha determinado que, en principio, un planeta habitable debe tener atmósfera, agua líquida y el tamaño adecuado para retener dicha atmósfera y mantener actividad tectónica por periodos de tiempo geológicamente largos. Un planeta habitado podría ser reconocido como tal a partir de la detección de bioseñales en su espectro. Simulaciones de atmósferas similares a la Tierra presente y pasada, así como el conocimiento de la evolución geológica de nuestro planeta indican que el oxígeno (O<sub>2</sub>) resulta una excelente señal de vida, en especial si está acompañado de compuestos como el metano o el óxido nitroso. Los pigmentos usados por organismos fotosintéticos también pueden generar una señal en el espectro de un planeta, la cual sería similar a la absorción de la clorofila en la Tierra. Las observaciones del brillo de la Tierra permiten analizar el espectro promediado del disco de nuestro planeta y determinar los cambios de las bioseñales dadas diferentes condiciones de iluminación y geometría. A partir de estas observaciones y modelos que generan espectros promediados del disco terrestre, se ha encontrado que la presencia de nubes en una atmósfera es el mayor reto para reconocer bioseñales y, en general, las características de la superficie planetaria. La concentración atmosférica de los compuestos producidos por la vida depende de la cantidad de radiación ultravioleta que recibe el planeta, pues ésta controla buena parte de la química atmosférica. Esta radiación depende del tipo de estrella alrededor de la cual gira el planeta. La caracterización de planetas de tipo terrestre requiere conocer las propiedades de la estrella alrededor de la cual se buscan planetas (edad, temperatura superficial, radiación emitida del ultravioleta al infrarrojo), así como construir bibliotecas de espectros planetarios que permitan reconocer los mundos habitables de los que no lo son.*

*Palabras clave: Astrobiología, exoplanetas, planetas habitables, bioseñales.*

## ABSTRACT

*Earth, as the only example of a habitable world, offers the first elements to characterize the spectra of terrestrial planets around other stars. Those planets may be detected in the next decade by missions like CoRoT and Kepler, and characterized by Terrestrial Planet finder and Darwin. In this paper, I reviewed the research that uses Earth to determine the possible characteristics of habitable worlds around other stars. Comparing Earth's characteristics with those of the terrestrial planets in the Solar System, the main properties of a habitable world have been determined. A habitable planet must have atmosphere, liquid water and the right size to keep that atmosphere and to maintain tectonic activity for long geologic periods. A habitable world could be recognized as such by the detection of biosignatures on its spectrum. Simulations of past and present Earth-like atmospheres and the knowledge of the geological evolution of our planet indicate that oxygen (O<sub>2</sub>) is an excellent signature of life, in particular if it comes along with compounds like methane and nitrous oxide. Also, the pigments used by photosynthetic organisms could generate a signature in a planet's spectrum. This signature may be similar to the chlorophyll absorption on Earth. Earthshine observations help to analyze the disk average spectrum of our planet and to determine the changes of the biosignatures given certain conditions of illumination and geometry. From such observations and models that generate disk averaged spectra of Earth it has been found that clouds are the biggest challenge to identify biosignatures and characteristics of the planetary surface in general. The atmospheric abundance of the compounds produced by life depends on the amount of ultraviolet radiation received by the planet as it drives most of the atmospheric chemistry. This radiation depends on the stellar type of the planet's parent star. The characterization of terrestrial planets requires the knowledge of the target star properties (age, effective temperature, radiation emitted from the ultraviolet to the infrared), as well as to build spectra libraries that allow recognizing habitable worlds from those that are not.*

*Key words: Astrobiology, exoplanets, habitable planets, biosignatures.*

## INTRODUCCIÓN

Desde el descubrimiento del primer planeta alrededor de una estrella similar al Sol (Mayor y Queloz, 1995) se han abierto muchas posibilidades para la detección de vida en otros mundos. En principio, el descubrimiento de planetas fuera del Sistema Solar (exoplanetas) nos permite verificar y restringir los modelos de formación planetaria. Si bien la mayoría de los planetas encontrados son del tamaño de Júpiter (Udry y Santos, 2007), los modelos de formación y evolución de planetas nos indican que es muy probable que también haya planetas de tipo terrestre incluso en sistemas donde los planetas de tipo joviano se hallan muy cerca de su estrella (Raymond *et al.*, 2006). Por planetas terrestres nos referimos a aquellos cuerpos que giran alrededor de una estrella, están constituidos principalmente por roca y cuya masa no excede las 10 M<sub>⊕</sub>. Una nueva generación de proyectos y misiones que se encuentran actualmente en desarrollo nos permitirá detectar planetas terrestres y obtener sus características para determinar si pueden ser habitables.

En el presente artículo se muestra lo que hemos aprendido de nuestro planeta para extrapolarlo a los posibles mundos habitables alrededor de otras estrellas. En la primera sección se describen las características que hacen de la Tierra un planeta habitable. En la segunda sección se presentan los resultados de diversas investigaciones que han estudiado a la Tierra con la finalidad de buscar características para la detección de vida en otros mundos. La última sección presenta brevemente las misiones más relevantes para la detección y caracterización de planetas habitables.

## LA TIERRA, UN MUNDO HABITABLE

De los cuatro planetas terrestres del sistema solar (Mercurio, Venus, Tierra y Marte), el nuestro es el único con la evidente capacidad de mantener vida. Así que el primer paso para determinar lo que hace habitable a nuestro mundo es comparar sus características con las de sus similares en el Sistema Solar (Tabla 1). Mercurio es un planeta rocoso, muy similar a nuestra Luna, sin atmósfera y muy cercano al Sol. Debido a esto, la diferencia de temperatura entre su hemisferio iluminado y el nocturno es de unos 600 °C. Venus, con una masa similar a la de la Tierra, tiene una atmósfera densa de CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub> con una presión superficial de 90 bares. Su temperatura es relativamente uniforme alcanzando los 480 °C en la superficie. Marte, en cambio, tiene una atmósfera tenue (~10 milibares) de CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub> con una temperatura superficial promedio de -63 °C. La Tierra por su parte tiene una temperatura promedio de 15 °C, una atmósfera de O<sub>2</sub> y N<sub>2</sub> de un bar de presión superficial. Mercurio y Venus son planetas sin agua, mientras que en Marte la evidencia geológica indica que hubo agua líquida en su superficie (*e.g.*, McEween *et al.*, 2007) y de acuerdo con las mediciones de la sondas *Odyssey* y *Mars Global Surveyor*, existe una reserva de agua congelada en el subsuelo marciano (*e.g.*, Mitrofanov *et al.*, 2007). Por razones que no revisaremos aquí, el agua es considerada como un compuesto primordial para el surgimiento y evolución de la vida (para análisis sobre el agua como sustancia primordial para la formación y evolución ver Chyba y McDonald, 1995).

Así pues, la primera característica sobresaliente de la Tierra como planeta habitable es que tiene la capacidad de

Tabla 1. Características de los planetas terrestres del Sistema Solar.

Planeta	Radio (km)	Masa (kg)	Distancia al Sol (UA)	Atmósfera		Temperatura (K) <sup>a</sup>	
				Compuestos princ.	Presión (bar)	Superficial	Efectiva
Mercurio	2440	$3.30 \times 10^{23}$	0.387	H, Na	$10^{-15}$	433	430
Venus	6051	$4.87 \times 10^{24}$	0.723	CO <sub>2</sub>	90	745	240
Tierra	6378	$5.97 \times 10^{24}$	1.000	N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub>	1	275	235
Marte	3397	$6.42 \times 10^{23}$	1.524	CO <sub>2</sub>	0.01	220	210

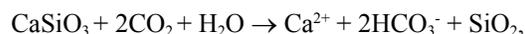
<sup>a</sup>Datos de Lewis y Prinn (1984), p. 97.

contener agua líquida en su superficie. Para ello requieren la presión y temperatura adecuadas. Ambas están relacionadas con la presencia de la atmósfera, la cual mantiene la presión necesaria para que el agua no se evapore pero además guarda parte del calor recibido por el Sol por el proceso llamado efecto invernadero. Este efecto sucede cuando hay especies químicas en la atmósfera planetaria que permiten el paso de la radiación visible proveniente del Sol pero absorben la radiación infrarroja emitida por la superficie del planeta, elevando así la temperatura atmosférica. La diferencia entre la temperatura de cuerpo negro de un planeta (temperatura efectiva) y su temperatura superficial se debe al efecto invernadero causado por la presencia de su atmósfera (Tabla 1). Esta diferencia depende de la masa atmosférica y de su composición, pues gases como el CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y CH<sub>4</sub> incrementan el efecto invernadero.

La atmósfera también puede tener un efecto negativo para la presencia de agua y Venus es el mejor ejemplo de esto. Actualmente este planeta no contiene agua y no se sabe si la tuvo en algún momento de su historia. Si el agua estuvo presente en Venus debió haberse evaporado. Existen dos hipótesis sobre la evaporación del agua en Venus, la primera propone que el agua se evaporó en lo que se llama el efecto invernadero desbocado (*runaway greenhouse effect*) (Kasting y Pollack, 1983). El efecto comienza cuando las altas temperaturas del planeta, generadas por el CO<sub>2</sub> en la atmósfera, evaporan el agua de la superficie. El vapor de agua incrementa el efecto invernadero, elevando aún más la temperatura, lo que genera una mayor evaporación de agua. La estratosfera del planeta se vuelve húmeda y el efecto termina cuando toda el agua líquida del planeta es evaporada. La otra propuesta es que Venus perdió su agua por un efecto invernadero húmedo, en cuyo caso también se genera una estratosfera húmeda pero parte del agua se mantiene líquida en la superficie (Kasting *et al.*, 1984). En ambos casos, el agua se fotoliza en las capas altas de la atmósfera, es decir, es dividida en H<sub>2</sub> y O por radiación ultravioleta y el H<sub>2</sub> escapa de la atmósfera de Venus hasta que el planeta queda seco. En el caso de Marte, las evidencias geológicas indican que contuvo agua líquida en su superficie y por lo tanto una atmósfera más masiva que la presente (p. ej., McKay y Stoker, 1989). Sin embargo, esta atmósfera se perdió debido a la gran cantidad de impactos de asteroides y cometas recibidos durante la época del bombardeo pesado en los primeros mil millones de años después de su formación (Owen, 1992). Todos los planetas estuvieron sujetos a este

mismo bombardeo, pero en el caso de Marte su tamaño no le permitió retener gravitacionalmente la atmósfera evaporada por los impactos. Así pues, además de contener agua, un planeta habitable debe tener una atmósfera que no sea ni muy densa ni muy tenue.

Un planeta con atmósfera puede perderla no sólo por impactos sino también por la interacción de ésta con la superficie del planeta. El CO<sub>2</sub> de una atmósfera se combina con las rocas de la superficie planetaria a través de la reacción:



por lo que en presencia de agua, el bióxido de carbono es retirado de la atmósfera y para poder restituirlo se requiere de la tectónica de placas. El tectonismo es el resultado de la liberación de la energía de formación del planeta que es guardada en su núcleo, en un proceso en el que la corteza del planeta se haya dividida en placas tectónicas que se forman y se subducen continuamente. El reciclaje de la atmósfera se produce a través del vulcanismo originado por la subducción de las placas, las cuales liberan fluidos y funden al entrar en contacto con el manto. Si bien el CO<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub>O son liberados por el vulcanismo asociado a la formación de placas y a los llamados puntos calientes que ascienden directamente del manto, sólo el vulcanismo de subducción permite el reciclaje del CO<sub>2</sub> secuestrado de la atmósfera. Entre los planetas terrestres, nuestro mundo es el único con tectónica de placas activa. En Venus hay volcanes pero su mecanismo de erupción se debe a los llamados puntos calientes, zonas en las que el material del manto asciende directamente a la superficie sin necesidad de tectónica de placas. Este mismo proceso dio origen a las islas de Hawai y mantiene activo el vulcanismo en esta zona. Por lo que otra característica de un mundo habitable es poseer una tectónica de placas activa.

Tanto la presencia y retención de una atmósfera como la actividad tectónica dependen del tamaño del planeta. Un planeta poco masivo no retiene su atmósfera ni tiene suficiente energía como para mantener procesos tectónicos. Un planeta muy grande retiene demasiada atmósfera, lo que resulta contraproducente para la vida. Hay pocos estudios detallados sobre la masa de un planeta habitable (p. ej., Ikoma y Genda, 2006) pero en general se considera un rango de 1 a 10 M<sub>⊕</sub> (p. ej., Catanzarite *et al.*, 2006).

Otras características de la Tierra han sido considera-

das importantes para su habitabilidad, y entre ellas las más relevantes son la presencia de la Luna (Laskar *et al.*, 1993; Williams y Kasting, 1997) y de un campo magnético (p. ej., van Thienen *et al.*, 2007). La Luna ha restringido la precesión del eje de rotación terrestre lo que ayuda a que no haya cambios climáticos severos. Sin embargo, otros procesos han dado lugar a que la Tierra se congele completamente en lo que se ha llamado la Tierra Bola de Nieve (*Snowball Earth*) y esto no ha terminado con su habitabilidad. El campo magnético protege a la Tierra del viento solar, partículas cargadas muy energéticas provenientes de la atmósfera solar, que podrían erosionar la atmósfera de un planeta (Dehant *et al.*, 2007). El campo magnético de un planeta es el resultado de corrientes eléctricas producidas en la zona externa del núcleo planetario. Al igual que la tectónica de placas, el campo magnético de un planeta es el resultado de procesos complejos que serían difíciles de detectar remotamente en planetas alrededor de otras estrellas. Por lo que en principio un planeta con agua y atmósfera sería el lugar para comenzar a buscar vida. Por supuesto, cuando consideramos a la Tierra como ejemplo de planeta habitable, estamos dejando de lado otras posibilidades como vida en un océano cubierto de hielo como se ha propuesto que podría suceder en la luna de Júpiter, Europa, o metabolismos distintos a los de la Tierra en ambientes como el de la luna de Saturno, Titán. Marte, por otro lado, podría mantener vida en el subsuelo donde los organismos tendrían acceso al agua y estarían protegidos de la radiación letal que penetra libremente la atmósfera de este planeta. Sin embargo, si existe vida en esas condiciones aún no sabemos cómo detectarla remotamente. Existen investigaciones sobre planetas que no son del tipo terrestre y sobre otras posibilidades para la química de la vida, pero en este trabajo nos enfocaremos en lo que hemos aprendido del planeta Tierra como un mundo habitable.

### La Tierra en el tiempo

En los 4,500 millones de años que han transcurrido desde la formación de nuestro planeta, éste ha sufrido muchos cambios. El más relevante para el propósito de la detección de vida, es el cambio en su composición atmosférica. Hace cuatro mil millones de años la atmósfera terrestre estaba compuesta principalmente de CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub> (p. ej., Kasting y Catling, 2003), mientras que hoy en día hay sólo trazas de CO<sub>2</sub> (335 partes por millón por volumen, ppmv), 21% de O<sub>2</sub> y 78% de N<sub>2</sub>. Este cambio de composición se debe a la presencia de vida en la Tierra. El O<sub>2</sub> (oxígeno libre) en la atmósfera fue generado por bacterias fotosintéticas llamadas cianobacterias que respiran CO<sub>2</sub> y liberan el O<sub>2</sub>. La producción de oxígeno por fotosíntesis puede ser descrita en general por la siguiente reacción:



Hace unos 2400 millones de años el nivel de oxígeno

libre en la Tierra comenzó a elevarse; la explicación más sencilla sería que en este momento aparecieron los organismos capaces de producirlo, sin embargo las evidencias geológicas muestran que los organismos capaces de realizar la fotosíntesis oxigénica aparecieron hace 2700 millones de años. La razón por la cual la elevación del nivel de oxígeno libre en la atmósfera terrestre no fue contemporánea a la aparición de estos organismos está aún en debate (p. ej., Kump y Barley, 2007). Lo que nos indica la evidencia geológica es que el O<sub>2</sub> continuó incrementándose de manera no lineal hasta el nivel presente.

Otros compuestos generados por la vida han cambiado su concentración a lo largo de la historia de nuestro planeta. El metano (CH<sub>4</sub>) y el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) son dos compuestos que han sido considerados como indicadores de vida. El metano es producido en la Tierra tanto por procesos geológicos como biológicos. Hoy en día la fuente principal de este compuesto es la vida (Wuebbles y Hayhoe, 2002), pero para la Tierra primitiva (3800 millones de años) no sabemos si dominaron los procesos geológicos o biológicos en la producción de este compuesto (ver Kasting y Catling, 2003). El óxido nitroso, en cambio, sólo es producido por organismos vivos; la única fuente abiótica conocida es la energía liberada por relámpagos, pero su tasa de producción es muy reducida (Nna-Mvondo *et al.*, 2001, 2005). El N<sub>2</sub>O apareció en la Tierra al mismo tiempo que el oxígeno libre, debido a que los organismos que lo producen respiran O<sub>2</sub>.

### La zona habitable

Además de poseer atmósfera, agua y el tamaño adecuado para retener ambas, nuestro planeta tiene otra característica que lo hace habitable: está en el lugar ideal. La energía emitida por una estrella se diluye de manera cuadrática con la distancia, por lo que un planeta más cercano a su estrella recibe mayor energía que uno que se encuentra más lejos. Así pues hay una zona anular alrededor de una estrella en la que la energía es ideal para que un planeta con atmósfera mantenga agua líquida en su superficie. Esta zona es llamada la zona habitable. La determinación de la zona habitable de una estrella requiere de modelos climáticos que determinen la temperatura superficial de un planeta localizado a cierta distancia de su estrella, con una composición y presión atmosféricas específicas. Desde que fue propuesto el concepto de zona habitable (Huang 1959, 1960) sus límites han variado de autor en autor, dependiendo del modelo climático usado. Hoy en día los límites más aceptados son los calculados por Kasting *et al.* (1993) para planetas con atmósferas ricas en CO<sub>2</sub>. Para el Sol, estos límites se encuentran entre los 0.84 y 1.67 UA, aunque han cambiado con el paso del tiempo debido a que el Sol ha incrementado su luminosidad (Iben, 1967). De esta forma se define la zona continuamente habitable como aquella región alrededor de una estrella en la que un planeta puede tener agua líquida en su superficie en un periodo de tiempo determinado. La

zona habitable, en cambio, se define para un momento específico en el tiempo. Como es lógico pensar, la zona habitable varía además dependiendo de la luminosidad de la estrella (Kasting *et al.*, 1993).

## IDENTIFICACIÓN DE MUNDOS HABITABLES: LAS LECCIONES DE LA TIERRA

### Bioseñales

Las bioseñales son características cuya presencia, o su abundancia, sólo puede ser debida a la vida. Existen varios tipos de bioseñales (Meadows, 2006), pero las más relevantes para la detección remota de vida en planetas alrededor de otras estrellas son las atmosféricas y las superficiales. La vida en la Tierra produce una gran variedad de compuestos que son liberados a la atmósfera, entre los cuales algunos, como el oxígeno y el óxido nítrico, son producidos únicamente por la vida, mientras que otros, como el metano y el bióxido de carbono, son también producidos por procesos geológicos. La mejor bioseñal sería la detección simultánea de dos compuestos producidos por la vida, por ejemplo el metano y el oxígeno (DesMarais *et al.*, 2002).

Existen una gran variedad de superficies en nuestro planeta: arena, hielo, agua, suelo volcánico, por mencionar algunas. Si bien estas superficies no son de origen biológico, cada una de ellas tiene una reflectividad diferente por lo que su presencia hará variar el albedo de un planeta. Así pues, la superficie sobre la cual se encuentra una atmósfera incide en la detectabilidad de las posibles bioseñales atmosféricas (p. ej., Tinetti *et al.*, 2006a).

Los pigmentos de los organismos fotosintéticos son utilizados para capturar fotones por lo que son absorbedores eficientes en determinadas regiones del espectro electromagnético. En particular, la absorción de la clorofila, el pigmento más usado por los organismos fotosintéticos, puede ser detectada desde el espacio entre los 0.6 y 0.8  $\mu\text{m}$  si el instrumento es enfocado en un área cubierta por plantas, como el Amazonas (Sagan *et al.*, 1993). La absorción de la clorofila produce una pendiente entre la zona roja del visible y el cercano infrarrojo ( $\sim 0.7 \mu\text{m}$ ) en el espectro reflejado por los organismos fotosintéticos. El punto de inflexión de esta pendiente es llamado “borde rojo” y se le considera una bioseñal superficial. El borde rojo varía dependiendo del tipo de organismo: las plantas terrestres tienen un borde rojo entre los 0.746 y 0.765  $\mu\text{m}$ , las plantas acuáticas entre los 0.730 y 0.745  $\mu\text{m}$  y los líquenes, musgos y algas poseen un borde rojo entre los 0.720 y 0.733  $\mu\text{m}$  (Kiang *et al.*, 2007a).

### El espectro terrestre

El espectro de la Tierra presenta características particulares que lo distinguen de los otros planetas. Visto en el

infrarrojo medio (5–20  $\mu\text{m}$ ), la Tierra muestra la absorción del agua y el ozono ( $\text{O}_3$ ), mientras que en los espectros de Venus y Marte sólo es evidente la presencia de  $\text{CO}_2$  (Figura 1). El ozono es formado por la fotólisis del  $\text{O}_2$ , por lo que la detección de  $\text{O}_3$  indica la presencia de  $\text{O}_2$  en una atmósfera planetaria. En la región visible del espectro, la luz reflejada por Venus, Marte y la Tierra también presenta rasgos muy distintos. El vapor de agua está presente en varias bandas centradas en 0.72, 0.82, 0.94, 1.13 y 1.41  $\mu\text{m}$ . El oxígeno tiene una absorción prominente a 0.76  $\mu\text{m}$  (banda A). El oxígeno y el ozono son pues, las señales más evidentes de vida en el espectro de nuestro planeta.

Así como la composición de la atmósfera terrestre ha cambiado desde su formación hasta el presente, su espectro también se ha modificado. La Figura 2 presenta espectros de la Tierra en el visible, infrarrojo cercano e infrarrojo medio simulados para tres periodos diferentes. La Tabla 2 lista la composición de la atmósfera terrestre empleada para simular cada uno de esos periodos. Para el Arcaico se utilizó la radiación de la estrella similar al Sol, EK Draconis (EK Dra / HD 129333, tipo espectral G1.5V). EK Dra es una estrella

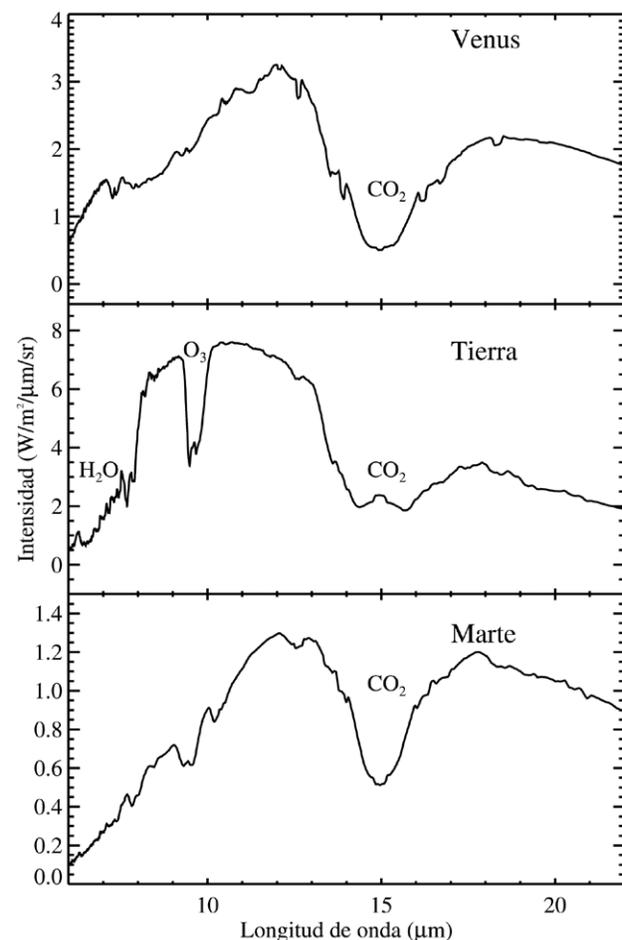


Figura 1. Espectros sintéticos de Venus, Tierra y Marte en el visible e infrarrojo cercano generados por el Virtual Planetary Laboratory (VPL) (Fuente: V.S. Meadows, U. Washington).

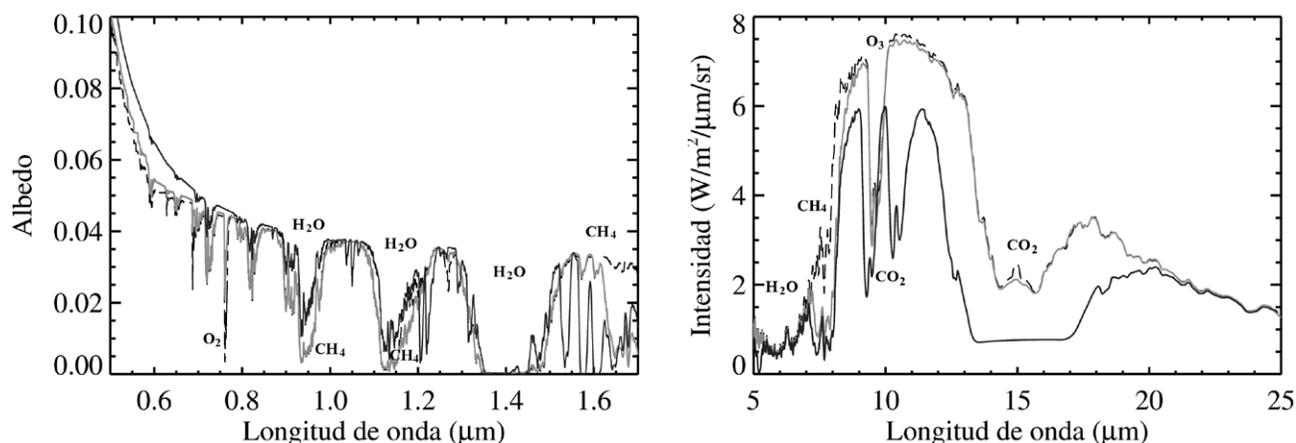


Figura 2. Espectros de la Tierra en el visible e infrarrojo cercano (a) y en el infrarrojo medio (b) simulados para tres periodos geológicos. Presente: línea discontinua; Proterozoico Medio: línea gris; Arcaico: línea negra continua. Datos de Segura *et al.* (2003, 2007). Las bandas de absorción de los compuestos más relevantes se indican en cada figura con el nombre del compuesto.

joven que, al igual que se piensa sucedió con nuestro sol, emite mayor radiación en el UV que una estrella con sus mismas características pero más vieja. La emisión UV de EK Dra es un límite superior de la cantidad de radiación que pudo haber recibido nuestra atmósfera en épocas tempranas (más detalles en Segura *et al.*, 2007). Durante el Arcaico, el espectro de nuestro planeta estaba dominado por el CO<sub>2</sub>, particularmente en el infrarrojo medio, donde cualquier posible absorción de ozono (9.7 μm) se vería opacada por dos prominentes bandas del CO<sub>2</sub>. Tanto en el infrarrojo como en el visible puede apreciarse la absorción del agua y el metano. En el caso mostrado en la Figura 2, el metano presente en la atmósfera es producido abióticamente. Es muy probable que ya hubiera producción de metano biológico hace unos 3 mil millones de años (p. ej., Kasting y Catling, 2003), pero éste no resultaría una buena bioseñal dado que observado en otro planeta no podríamos saber la fuente de dicho compuesto. En el proterozoico medio ya está presente la absorción del O<sub>2</sub> y el O<sub>3</sub>, así como también la del CH<sub>4</sub>, por lo que éste sería el periodo ideal para la detección de vida en la Tierra pues contiene dos bioseñales. En el presente, el CH<sub>4</sub> no es detectable, pero la presencia de agua y oxígeno y ozono serían un buen indicativo de la presencia de vida.

### El caso del oxígeno

La vida existió en la Tierra unos mil millones de años antes de que el oxígeno comenzara a elevarse en la atmósfera de nuestro planeta (p. ej., Catling y Claire, 2005), por lo que es posible que la vida surja en otros planetas sin que se desarrolle una atmósfera rica en oxígeno. Pero en el caso de que se detectara oxígeno en un exoplaneta ¿sería posible que éste fuera producido por un proceso no biológico? De hecho sí. Marte por ejemplo contiene 0.1 % de O<sub>2</sub> en su atmósfera producido para la fotólisis de CO<sub>2</sub>, sin embargo, si detectáramos un planeta así sería descartado como planeta habitable por su evidente falta de agua. También es posible que un planeta desarrolle una atmósfera rica en O<sub>2</sub> como resultado de la fotólisis del agua, para lo cual se requiere que el planeta esté en el límite interno de la zona habitable y que se encuentre en un proceso de evaporación catastrófica producido por un efecto de invernadero húmedo o el caso extremo, un efecto de invernadero desbocado. Este sería un caso como el de Venus que se explicó anteriormente. De suceder esto, la presencia del O<sub>2</sub> sería sólo por un corto periodo geológico (del orden de 10<sup>8</sup> años) y el planeta resultaría “sospechoso” por encontrarse en el límite interno de la zona habitable.

Tabla 2. Composición atmosférica de la Tierra usada para simular los espectros de tres periodos geológicos (ver Figura 2).

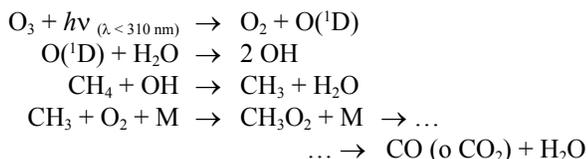
Periodo	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>		O <sub>3</sub> (cm <sup>-2</sup> )	CH <sub>4</sub>	
	Abundancia por volumen	Abundancia por volumen <sup>a</sup>	(cm <sup>-2</sup> )		Flujo superficial <sup>b</sup>	Abundancia por volumen
Arcaico <sup>c</sup>	2.00×10 <sup>-1</sup>	1.67×10 <sup>-13</sup> ; 2.13×10 <sup>-3</sup>	3.63×10 <sup>19</sup>	6.79×10 <sup>14</sup>	0.033	4.1×10 <sup>-5</sup>
Proterozoico Medio	3.35×10 <sup>-4</sup>	2.10×10 <sup>-2</sup>	4.65×10 <sup>23</sup>	7.16×10 <sup>18</sup>	8.300	1.0×10 <sup>-4</sup>
Presente	3.35×10 <sup>-4</sup>	2.10×10 <sup>-1</sup>	4.65×10 <sup>24</sup>	8.61×10 <sup>18</sup>	1.000	1.6×10 <sup>-6</sup>

Todas las atmósferas tienen 1 bar de presión atmosférica. <sup>a</sup> Para el Arcaico la cantidad de O<sub>2</sub> varía de la superficie (mínimo presentado en la tabla) a los 65 km, la altura más alta alcanzada por el modelo (valor máximo en la tabla). Para el Proterozoico Medio y el Presente la abundancia de O<sub>2</sub> es constante en toda la atmósfera (0–65 km). <sup>b</sup> Flujo superficial normalizado al flujo en el presente (5.54×10<sup>14</sup> gr/año, Houghton *et al.* 1995). <sup>c</sup> En este caso se usó la radiación de la estrella EK Draconis (ver texto).

Simulaciones numéricas han mostrado que un planeta en la zona habitable con agua y una atmósfera rica en CO<sub>2</sub> contendría oxígeno producido por la fotólisis de agua y CO<sub>2</sub> en cantidades mínimas que no serían detectables en su espectro (Segura *et al.*, 2007). Esto significa que si detectáramos un planeta en la zona habitable de su estrella y el planeta mostrara en su espectro la presencia de agua, bióxido de carbono y oxígeno, este último compuesto sólo podría provenir de procesos biológicos.

### El caso del metano

La presencia simultánea de metano y oxígeno se considera una buena bioseñal debido a que el O<sub>2</sub> promueve la destrucción del metano, por lo que se requiere la producción continua y abundante de éste para que pueda sobrevivir en una atmósfera rica en oxígeno. En el caso de la Tierra, la producción biológica de metano es ~30 veces superior a la producción por procesos geológicos (ver Segura *et al.*, 2007 y las referencias citadas ahí). En la Tabla 2 se presentan las abundancias de CH<sub>4</sub> de los casos graficados en la Figura 2, así como los flujos superficiales que producen esas cantidades, normalizados al flujo presente de metano. Puede verse que una producción reducida de metano en el caso que ilustra la Tierra primitiva es suficiente para que este compuesto sea detectable en el espectro terrestre. Durante este periodo, el principal proceso de destrucción del CH<sub>4</sub> atmosférico fue la fotólisis por lo que su abundancia dependió de la luz ultravioleta recibida por el planeta. La aparición del oxígeno en la atmósfera dio lugar a un nuevo mecanismo de destrucción del metano:



En el presente, esta serie de reacciones son el mecanismo más importante para la destrucción del CH<sub>4</sub> en la troposfera de la Tierra. Tanto para una atmósfera rica en CO<sub>2</sub> como una rica en O<sub>2</sub> no hay procesos atmosféricos que produzcan metano. En la Tabla 2 puede verse que aún con

una mayor producción de CH<sub>4</sub> en el presente, su abundancia atmosférica es mucho menor al caso de la Tierra primitiva; esto se debe a que las reacciones descritas anteriormente son muy efectivas para eliminar metano de la atmósfera.

En un planeta rico en CO<sub>2</sub> donde también se detectaran agua y metano sería difícil discernir si éste último proviene de fuentes biológicas o geológicas pues hasta el momento desconocemos cuáles son los límites posibles en la producción de metano para cada una de estas fuentes.

### La Tierra alrededor de otras estrellas

Se considera que los mejores candidatos para buscar planetas a su alrededor son las llamadas estrellas de la secuencia principal (p. ej., Porto-de Mello *et al.*, 2006). La característica de éstas es que su núcleo quema hidrógeno y su evolución durante este periodo es relativamente libre de cambios drásticos en su luminosidad. De entre las estrellas de la secuencia principal, las más masivas evolucionan rápidamente mientras que las menos masivas permanecen mucho más tiempo en su etapa de quemado de hidrógeno. Por esto, la búsqueda de planetas habitables se enfoca a estrellas que vivan al menos unos dos mil millones de años, que es el tiempo que posiblemente requeriría la vida para surgir en un planeta alrededor de esa estrella (p. ej., Gould *et al.*, 2003). Dependiendo de su temperatura superficial, las estrellas se dividen en tipos espectrales, siendo relevantes para la búsqueda de exoplanetas habitables los de tipo F, G, K y M. El Sol es una estrella G. Si la Tierra presente girara alrededor de alguna estrella con un tipo espectral diferente al del Sol, ésta presentaría algunas características diferentes en su espectro como lo muestran las simulaciones que se resumen a continuación.

### La Tierra alrededor de estrellas F, G, K y M: simulaciones

El espectro de las estrellas utilizadas para estas simulaciones fue obtenido por Martin Cohen (U. de California, Berkeley) a partir de modelos y observaciones. Las estrellas usadas y sus características principales son listadas en la Tabla 3. Los planetas fueron colocados en la zona habitable

Tabla 3. Características de estrellas F, G, K y M consideradas en la simulación de espectros de planetas como la Tierra (ver Figura 3).

Estrella	Tipo espectral	Temperatura efectiva (K)	Edad (años)	Distancia (parsecs)	Eje semi mayor del planeta (UA)
Sol	G2V	5600	5 × 10 <sup>9</sup>	0.0	1.00
σ Bootis <sup>a</sup>	F2V	6700	2 × 10 <sup>9</sup>	12.0	1.69
ε Eridani <sup>a</sup>	K2V	5100	5 × 10 <sup>8</sup>	3.2	0.53
AD Leo <sup>b</sup>	M3.5V	3400	Joven	4.9	0.16
Modelo <sup>c</sup>	M5V	3100			0.07

<sup>a</sup> Los espectros fueron compuestos a partir de las mediciones del International Ultraviolet Explorer (IUE) y espectros sintéticos de Kurucz ajustados a diversas observaciones (detalles en Segura *et al.*, 2003). <sup>b</sup> Espectro a partir de IUE y los modelos NextGen (detalles en Segura *et al.*, 2005). <sup>c</sup> Modelo NextGen tomado de BaSeL ([www.astro.mat.uc.pt/BaSeL/](http://www.astro.mat.uc.pt/BaSeL/)).

de su estrella de manera que su temperatura superficial fuera de 288 K (Segura *et al.*, 2003, 2005). Para las estrellas M fueron elegidas dos estrellas: AD Leo y una estrella obtenida a partir de un modelo fotosférico. AD Leo es una de las estrellas más activas que se han observado, constantemente lanza llamaradas (ráfagas) que emiten altas dosis de radiación que va desde el visible hasta los rayos X. En momentos de quietud, su espectro en el ultravioleta está dominado por la parte de la atmósfera estelar llamada cromosfera. La emisión de la otra estrella M, identificada de aquí en adelante por su temperatura superficial ( $T_{\text{eff}} = 3100\text{K}$ ), proviene totalmente de la fotosfera. Probablemente todas las estrellas M tengan alguna actividad cromosférica por lo que el flujo emitido por esta estrella representa un límite mínimo para la radiación UV que podría recibir un planeta.

Las atmósferas de los planetas simulados contenían, en fracción por volumen, 0.21  $\text{O}_2$ , 0.78  $\text{N}_2$ , 0.1 Ar y 355 ppmv de  $\text{CO}_2$  y se consideró para ellas una presión superficial de 1 bar. Los compuestos biogénicos ( $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , CO y  $\text{CH}_3\text{Cl}$ ) fueron incluidos con las mismas tasas de producción superficial que se requieren para generar la abundancia medida en la Tierra presente alrededor del Sol. Esto implica trasladar a la Tierra a otra estrella de manera que la bioproducción se mantenga igual. Esta condición fue modificada para el planeta alrededor de la estrella M ( $T_{\text{eff}} = 3100\text{K}$ ) en la que se consideró una cantidad fija para el metano de 500 ppmv.

Las simulaciones fueron realizadas utilizando dos códigos acoplados de una dimensión. Uno de ellos es un modelo radiativo/convectivo y el otro un modelo fotoquímico. La temperatura y cantidad de agua troposférica generadas por el modelo radiativo/convectivo fueron introducidas al modelo fotoquímico que calculaba las abundancias de 55 especies químicas, y de éstas, el ozono y el agua estratosférica eran transferidos al modelo radiativo/convectivo. Se iteró entre los dos modelos hasta obtener una solución convergente. Los espectros de los planetas simulados se obtuvieron usando el modelo de transferencia radiativa SMART (Meadows and Crisp, 1996; Crisp, 1997). SMART utilizó los perfiles de temperatura y las concentraciones de agua, metano, oxígeno, ozono, clorometano y óxido nítrico calculados por los modelos descritos anteriormente.

### La Tierra alrededor de estrellas F, G, K y M: resultados

La Figura 3 presenta las bandas más relevantes de los espectros de la Tierra alrededor de estrellas con diferentes tipos espectrales. Las bandas de absorción del agua y el oxígeno prácticamente no varían de un planeta a otro por lo que sólo se presentan las bandas del metano, ozono, óxido nítrico y bióxido de carbono. El ozono producido en cada planeta depende de la radiación ultravioleta proveniente de su estrella. De manera directa puede decirse que una mayor radiación ultravioleta produce más ozono (Tabla 4), sin embargo una mayor abundancia de  $\text{O}_3$  no implica una absorción mayor. En la Figura 3 puede apreciarse que la banda de  $\text{O}_3$  con menor absorción es justamente la del planeta alrededor

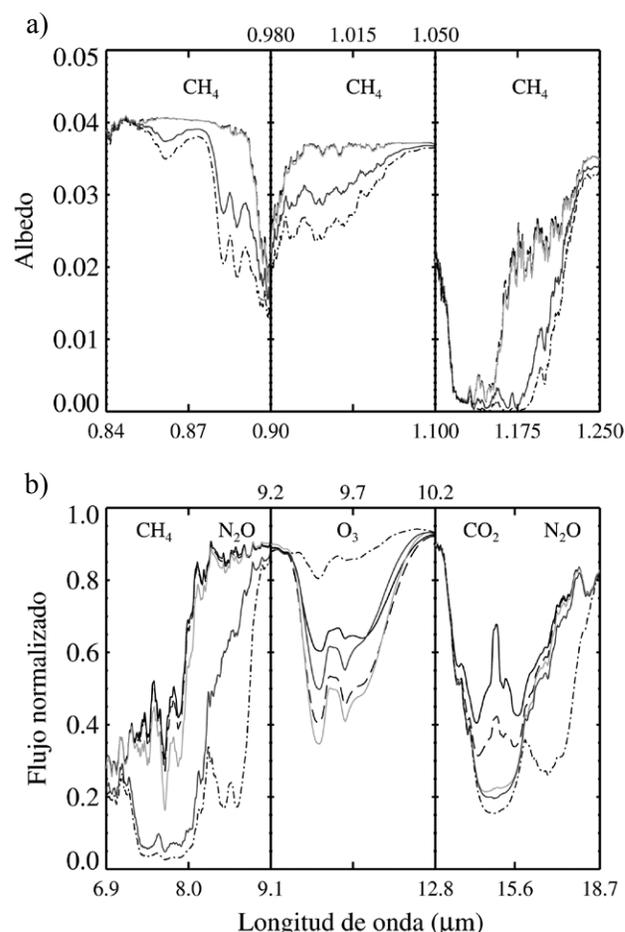


Figura 3. Bandas prominentes de  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_3$ , y  $\text{CO}_2$  en el infrarrojo cercano (a) y el infrarrojo medio (b) en espectros simulados de planetas como la Tierra alrededor de estrellas F, G, K y M. El espectro en el infrarrojo medio está normalizado a un cuerpo negro con temperatura de 288 K. Planeta alrededor de la estrella F: línea negra continua; planeta alrededor de la estrella G: línea negra discontinua; planeta alrededor de la estrella K: línea gris claro; planeta alrededor de la estrella M (AD Leo): línea gris oscuro; planeta alrededor de la estrella M (3100K): punto-rama negra. Datos de Segura *et al.* (2003, 2005)

de la estrella F, el que contiene mayor abundancia de  $\text{O}_3$ . Esto se debe a la estructura de temperatura de la atmósfera que en el caso del planeta alrededor de la estrella F presenta una zona caliente ( $\sim 340\text{K}$ ) en su estratosfera alrededor de los 50 km producida por la absorción de  $\text{O}_3$ ; como comparación, la temperatura máxima alcanzada en la estratosfera por la Tierra alrededor del Sol es de  $\sim 270\text{K}$  y las estratosferas de los planetas simulados alrededor de las otras estrellas (K y M) están por debajo de esta temperatura. En general, la detección de los compuestos en el IR depende no sólo de su abundancia sino también del perfil de temperatura de la atmósfera. Una primera aproximación al perfil de temperatura puede obtenerse de la banda de  $\text{CO}_2$  ( $15\ \mu\text{m}$ ), que en su centro muestra una estructura de emisión para los planetas alrededor de las estrellas F y G, lo que indica zonas calientes en la estratosfera de estos planetas.

La absorción del metano y óxido nítrico es evidente

sólo para los planetas alrededor de las estrellas M en donde la abundancia de OH es menor que la de la Tierra en cinco órdenes de magnitud. Esto se debe a que la fotólisis de O<sub>3</sub> disminuye con respecto a los planetas alrededor de las otras estrellas que reciben mayor radiación UV en las longitudes de onda que fotolizan el ozono (170–350 nm). Esto implica una menor producción de O(<sup>1</sup>D) y por ello una disminución en la cantidad de OH. Para el caso de la estrella M(T<sub>eff</sub> = 3100 K), la radiación UV es tan baja que se requirió fijar la cantidad de metano en su planeta para evitar un problema numérico en los modelos. El flujo superficial de metano requerido para producir 500 ppmv en este planeta es 21 % el de la Tierra alrededor del Sol.

### ***El borde “rojo” en planetas alrededor de otras estrellas***

Kiang *et al.* (2007a) exploraron las posibles razones por las que los organismos que realizan fotosíntesis oxigénica producen un borde rojo y utilizan a la clorofila como pigmento principal para convertir fotones en energía química. En general, los organismos fotosintéticos usan una gran variedad de pigmentos, cada uno de ellos con picos de absorción que pueden ir de los 0.4 a las 1.07 μm. Los organismos que producen oxígeno (fotosíntesis oxigénica) utilizan fotones con longitudes entre 0.40 y 0.72 μm. Esto tiene implicaciones para la búsqueda de oxígeno en planetas habitables alrededor de otras estrellas, pues si la estrella no tiene muchos fotones en esta región del espectro (como sucede con las estrellas M), es menos probable que se desarrollen organismos que produzcan oxígeno, que es una de las principales bioseñales.

El estudio de una gran variedad de plantas mostró que (1) su borde rojo se encuentra entre las dos bandas de absorción del O<sub>2</sub> (0.688 y 0.761 μm); (2) su máximo de absorción coincide con el máximo de fotones provenientes del Sol que llegan a la superficie terrestre (0.685 μm). Con base en estas observaciones, Kiang *et al.* (2007b) proponen que los organismos fotosintéticos que habiten planetas alrededor de otras estrellas podrían usar pigmentos para absorber en los rangos de longitud de onda donde la estrella emita mayor cantidad de fotones. Así, en el caso de los organismos en un planeta alrededor de una estrella F, las plantas podrían tener colores que van del morado al infrarrojo, mientras que en planetas alrededor de estrellas M los organismos fotosintéticos tendrían mayor cantidad de fotones en la región infrarroja del espectro electromagnético.

## **BÚSQUEDA DE MUNDOS HABITABLES**

### **Las misiones**

Hasta la fecha (mayo 2010) se han encontrado más de 450 planetas y la lista crece semana a semana. La mayoría de ellos son planetas similares a Júpiter (Udry y Santos, 2007) y por lo tanto no son considerados como posibles planetas habitables. La razón por la que no se han detectado

Tabla 4. Cantidad de ozono en planetas como la Tierra alrededor de estrellas F, G, K y M (datos de Segura *et al.* 2003, 2005).

<b>Planeta alrededor de</b>	<b>O<sub>3</sub> cm<sup>-2</sup></b>
Sol	$8.4 \times 10^{18}$
F2V	$1.6 \times 10^{19}$
K2V	$6.6 \times 10^{18}$
AD Leo	$4.4 \times 10^{18}$
M 3100	$1.2 \times 10^{18}$

planetas más pequeños es puramente tecnológica, pues las simulaciones de formación de sistemas planetarios nos indican que puede haber planetas terrestres en la zona habitable de sus estrellas. El mayor problema para detectar planetas de tipo terrestre es el brillo de la estrella, el cual es mayor que la luz reflejada y emitida por el planeta en 10<sup>10</sup>–10<sup>11</sup> veces en el visible y 10<sup>6</sup>–10<sup>7</sup> veces en el infrarrojo medio. A esto se le agrega la separación angular de los sistemas estrella-planeta que es de 0.1 segundos de arco para un número limitado de estrellas en la vecindad solar (un radio de ~20 pc alrededor del Sol). La combinación de estas dos condiciones hace que la detección de planetas con masas menores que 10 M<sub>⊕</sub> esté limitada a estrellas de baja masa (tipo espectral M, ~0.5 M<sub>⊙</sub>). La detección de exoplanetas terrestres requiere instrumentos en el espacio. Actualmente hay dos misiones en órbita para llevar a cabo este fin: CoRoT y Kepler. Ambas utilizan el llamado método de tránsito que consiste en detectar cambios en la luminosidad de la estrella debidos al paso de un planeta frente a ella.

CoRoT es un telescopio de 27 cm que fue lanzado en diciembre del 2006. Sus objetivos son el estudio de oscilaciones estelares (sismología estelar) y la detección de planetas extrasolares alrededor de estrellas con tipos espectrales K y M (Bordé *et al.*, 2003). La misión está administrada por el Centro Nacional de Estudios Espaciales de Francia y en ella participaron varios países de Europa y Brasil. Kepler es una misión de la NASA que consiste en un telescopio espacial de 95 cm que fue lanzado en el 2009 para detectar planetas en una muestra de unas 100,000 estrellas cercanas (Basri *et al.*, 2005).

Misiones subsecuentes serán necesarias para necesarias para determinar si los planetas terrestres encontrados por CoRoT y Kepler pueden ser habitables. Actualmente se encuentran bajo estudio dos misiones, Darwin de la Agencia Espacial Europea (Cockell *et al.*, 2009) y Terrestrial Planet Finder (TPF) de la NASA (planetquest.jpl.nasa.gov/TPF), cuya finalidad es caracterizar exoplanetas tipo terrestre. Darwin consistirá en un interferómetro en el infrarrojo (6–20 μm) que usará la técnica de interferometría de anulación para “ocultar” la luz de la estrella y observar planetas a su alrededor. Darwin será capaz de obtener el espectro del planeta observado con una resolución ( $\lambda/\Delta\lambda$ ) de ~25 y un cociente de señal a ruido entre 5 y 10. La misión TPF consiste en dos instrumentos, uno será similar a Darwin

llamado TPF-I (Lawson y Doodley, 2005). El otro instrumento, TPF-C, será un coronógrafo que obtendrá espectros de los planetas observados la región visible y del cercano infrarrojo (0.5–1.1  $\mu\text{m}$ ). La resolución planeada para TPF-C es de 70 con una razón de señal a ruido de entre 5 y 10 (Levine *et al.*, 2006).

### Detectabilidad de las bioseñales

En las Figuras 1, 2 y 3 se presentan espectros de planetas en alta resolución que permiten ver claramente todas las bandas de absorción debidas a varios de los compuestos atmosféricos y en todos los casos la atmósfera está libre de nubes. En realidad, los instrumentos para la caracterización de exoplanetas tendrán una baja resolución y es probable que un planeta que contenga agua también tenga nubes. Además, los instrumentos no lograrán resolver espacialmente el planeta, lo que detectarán será un promedio de la luz emitida por todo un hemisferio del planeta.

Tinetti *et al.* (2006a) realizaron un estudio sobre la variación del espectro promediado del disco de la Tierra en diferentes condiciones de iluminación y geometría. Sus resultados muestran que el mayor problema para la caracterización de la atmósfera y superficie planetarias son las nubes que disminuyen la columna atmosférica observada debido a su alta reflectividad. Las variaciones en la luz reflejada por el planeta durante su rotación diaria podrían indicar características superficiales, aunque las nubes también afectarían estas observaciones ya que presentan sus propios patrones de rotación (Ford *et al.*, 2001). En la Figura 4 se presentan los espectros de la Figura 2 en las resoluciones planeadas para TPF y Darwin.

En el caso del borde rojo y la absorción de la clorofila, sabemos que estas señales son fácilmente distinguibles cuando el instrumento apunta a una zona con alta densidad de plantas (Sagan *et al.*, 1993), sin embargo esto no es algo que podremos hacer con planetas extrasolares donde contaremos con información promediada del disco planetario. En este sentido, las observaciones del brillo de la Tierra (*Earthshine*) son particularmente útiles. El brillo de la Tierra es el reflejo de la luz de nuestro planeta en la región oscura de la Luna. El análisis de este reflejo ha permitido calibrar modelos numéricos que producen espectros sintéticos promediados del disco de la Tierra y analizar la detectabilidad del borde rojo de la clorofila (Tinetti *et al.*, 2006a, 2006b; Montañés-Rodríguez *et al.*, 2006). A partir de su modelo, Tinetti *et al.* (2006b) concluyen que la plantas pueden incrementar el albedo de un planeta hasta en un 50 %, y que el borde rojo de la clorofila puede ser detectable bajo ciertas condiciones de geometría e iluminación o bien si las plantas cubren al menos el 20 % de la superficie observada y la atmósfera está libre de nubes.

La caracterización de mundos habitables presenta además el reto de distinguir entre posibles falsos positivos y falsos negativos. La Tierra, por ejemplo, no sería reconocida

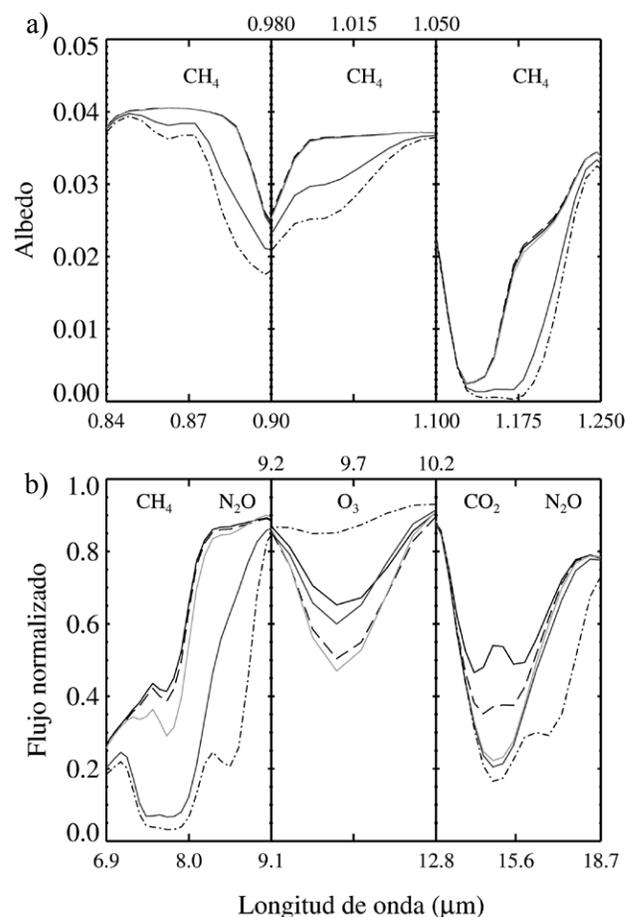


Figura 4. Bandas prominentes de  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_3$  y  $\text{CO}_2$  en espectros de planetas como la Tierra alrededor de estrellas F, G, K y M con las resoluciones planeadas para TPF y Darwin: 70 para el visible e infrarrojo cercano (panel superior) y 25 para el infrarrojo medio (panel inferior). El espectro en el infrarrojo medio está normalizado a un cuerpo negro con temperatura de 288 K. Clave: planeta alrededor de la estrella F: línea negra continua; planeta alrededor de la estrella G: línea negra discontinua; planeta alrededor de la estrella K: línea gris claro; planeta alrededor de la estrella M (AD Leo): línea gris oscuro; planeta alrededor de la estrella M(3100K): punto-rayo negra.

como un mundo habitado (aunque sí habitable) durante sus primeros dos mil millones de años. Hasta la fecha ninguno de los compuestos que se piensa estuvieron presentes en su atmósfera durante esa época resulta una buena bioseñal. Este sería el caso de un falso negativo. En el otro extremo están aquellos planetas no habitados donde un proceso biológico genere una característica semejante a una bioseñal. Esto sucedería en un planeta cuya agua se evaporara de manera catastrófica, como se piensa que sucedió en Venus (ver sección *El caso del oxígeno*), donde se generaría una gran cantidad de  $\text{O}_2$  por la fotólisis del agua y sin la intervención de ningún proceso biológico (Segura *et al.*, 2007).

Un caso interesante sería el de un planeta completamente congelado que se hallara dentro de la zona habitable. La Tierra ha pasado al menos tres periodos de glaciación global a los que se les denomina “Tierra Bola de Nieve” (*Snowball Earth*). Se cree que estos periodos duraron unas

decenas de millones de años o menos. Estos eventos son geológicamente cortos en duración debido a que la acumulación de CO<sub>2</sub> en la atmósfera acaba revirtiendo la glaciación. Durante estas épocas es posible la acumulación en la atmósfera de O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub> generados por procesos abióticos (Segura *et al.*, 2007). Un planeta como éste presentaría además señales de vapor de agua y CO<sub>2</sub> en su atmósfera. Sería posible determinar que un planeta está congelado globalmente debido a la alta reflectividad del hielo en el espectro visible y la determinación de la temperatura efectiva del planeta usando la emisión en el infrarrojo medio. Sin embargo, no podría determinarse si se trata de un planeta congelado que no está habitado o, como sucedió en la Tierra, un planeta habitado que pasa por una glaciación global.

## COMENTARIOS FINALES

La Tierra, como nuestro único ejemplo de mundo habitado, nos da las bases para identificar planetas semejantes alrededor de otras estrellas. No sabemos qué otras formas de vida podrían existir, pero el entender los procesos geológicos, químicos y físicos de nuestro planeta y del resto de los planetas terrestres es un primer paso para distinguir entre aquellas características que pueden tener fuentes no biológicas y las que sólo pueden ser explicadas por la presencia de organismos vivos.

Las investigaciones realizadas hasta ahora sobre nuestro planeta como un mundo habitable nos indican que:

1. Los organismos unicelulares son capaces de generar bioseñales distribuidas globalmente y por lo tanto potencialmente detectables con instrumentos en órbita alrededor de nuestro planeta.

2. El oxígeno en el espectro visible y el ozono en el infrarrojo medio, resultan excelentes bioseñales debido a que para un planeta en la zona habitable de su estrella, con agua y una atmósfera de CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>, la producción de oxígeno y ozono por procesos abióticos es mínima y no produce una señal en el espectro del planeta.

3. Los pigmentos de los organismos fotosintéticos podrían originar una bioseñal si cubren al menos el 20 % de la superficie observada.

4. Las variaciones orbitales y diurnas pueden ofrecer pistas sobre las superficies que componen al planeta.

5. Las nubes son el mayor reto a enfrentar en el análisis de espectros de planetas pues limitan la columna atmosférica observable.

6. La radiación ultravioleta recibida por el planeta domina buena parte de la química atmosférica.

7. En el infrarrojo medio, las señales generadas por los compuestos de la atmósfera planetaria dependen no sólo de su abundancia sino también del perfil de temperatura de la atmósfera.

8. La detección simultánea de dos bioseñales, por ejemplo O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub> y CH<sub>4</sub> o N<sub>2</sub>O, sería una evidencia convincente de la presencia de vida en un planeta.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue realizado bajo el Apoyo Complementario para la Consolidación de Grupos de Investigación, modalidad Repatriación del CONACYT No. 51715 y los proyectos CONACYT 79744 y PAPIIT IN119709-3. Agradezco a Alejandro Esquivel por su ayuda para desentrañar los misterios de graficar con IDL, a Lisa Kaltenecker por su ayuda con la descripción de las misiones de detección de planetas terrestres, a Nancy Kiang por introducirme en el mundo de la fotosíntesis, a David Crisp quien creó y actualiza constantemente el programa usado para generar los espectros planetarios, a Victoria Meadows con quien aprendí el análisis de espectros planetarios y especialmente a James Kasting con quien me inicié en el conocimiento de las bioseñales y la detección remota de vida en planetas alrededor de otras estrellas.

## REFERENCIAS

- Bordé, P., Rouan, D., Léger, A., 2003, Exoplanet detection capability of the COROT space mission: *Astronomy and Astrophysics*, 405, 1137-1144.
- Basri, G., Borucki, W.J., Koch, D., 2005, The Kepler Mission: A wide-field transit search for terrestrial planets: *New Astronomy Reviews*, 49(7-9), 478-485.
- Catanzarite, J., Shao, M., Tanner, A., Unwin, S., Yu, J., 2006, Astrometric detection of terrestrial planets in the habitable zones of nearby stars with SIM PlanetQuest: *The Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 118(847), 1319-1339.
- Catling, D.C., Claire, M., 2005, How Earth's atmosphere evolved to an oxidic state: a status report: *Earth and Planetary Science Letters*, 237(1-2), 1-20.
- Chyba, C.F., McDonald, G.D., 1995, The origin of life in the Solar System: Current issues: *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences*, 23, 215-249.
- Cockell, C.S., Léger, A., Fridlund, M., Herbst, T.M., Kaltenecker, L., Absil, O., Beichman, C., Benz, W., Blanc, M., Brack, A., Chelli, A., Colangeli, L., Cottin, H., Coudé du Foresto, F., Danchi, W.C., Defrère, D., den Herder, J.-W., Eiroa, C., Greaves, J., Henning, T., Johnston, K.J., Jones, H., Labadie, L., Lammer, H., Launhardt, R., Lawson, P., Lay, O. P., LeDuigou, J.-M., Liseau, R., Malbet, F., Martin, S.R., Mawet, D., Mourard, D., Moutou, C., Mugnier, L.M., Ollivier, M., Paresce, F., Quirrenbach, A., Rabbia, Y.D., Raven, J.A., Rottgering, H.J.A., Rouan, D., Santos, N.C., Selsis, F., Serabyn, E., Shibai, H., Tamura, M., Thiébaud, E., Westall, F., White, G.J., 2009, Darwin — A mission to detect and search for life on extrasolar planets: *Astrobiology*, 9(1), 1-22.
- Crisp, D., 1997, Absorption of sunlight by water vapor in cloudy conditions: a partial explanation for the cloud absorption anomaly: *Geophysical Research Letters*, 24(5), 571-574.
- Dehant, V., Lammer, H., Kulikov, Y.N., Grießmeier, J.M., Breuer, D., Verhoeven, O., Karatekin, Ö., van Hoolst, T., Korabely, O., Lognonné, P., 2007, Planetary magnetic dynamo effect on atmospheric protection of early Earth and Mars: *Space Science Reviews*, 129(1-3), 279-300.
- DesMarais, D.J., Harwit, M.O., Jucks, K.W., Kasting, J.F., Lin, D.N.C., Lunine, J.I., Schneider, J., Seager, S., Traub, W.A., Woolf, N.J., 2002, Remote sensing of planetary properties and biosignatures on extrasolar terrestrial planets: *Astrobiology* 2(2), 153-181.
- Ford, E., Seager, S., Turner, E.L., 2001, Characterization of extrasolar terrestrial planets from diurnal photometric variability: *Nature*, 412(6850), 885-887.
- Gould, A., Ford, E.B., Fischer, D.A., 2003, Early-type stars: Most favorable

- targets for astrometrically detectable planets in the habitable zone: *Astrophysical Journal*, 591(2), L155-L158.
- Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Bruce, J., Lee, H., Callander, B.A., Haites, E., Harris, N., Maskel, K., 1995, *Climate Change, 1994: Radiative forcing of climate change and an evaluation of the IPCC IS92 emission scenarios*: Cambridge, United Kingdom, Cambridge University Press, 339 pp.
- Huang, S.S., 1959, Occurrence of life in the universe: *American Scientist*, 47, 397-402.
- Huang, S.S., 1960, Life outside the Solar System: *Scientific American*, 202(4), 55-63.
- Iben, I.Jr, 1967, Stellar evolution within and off the Main Sequence: *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 5, 571-626.
- Ikoma, M., Genda, H., 2006, Constraints on the mass of a habitable planet with water of nebular origin: *The Astrophysical Journal*, 648, 696-706.
- Kasting, J.F., Catling, D., 2003, Evolution of a habitable planet: *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*, 41, 429-463.
- Kasting, J.F., Pollack, J.B., 1983, Loss of water from Venus. I. Hydrodynamic escape of hydrogen: *Icarus*, 53(3), 479-508.
- Kasting, J.F., Pollack, J.B., Ackerman, T.P., 1984, Response of Earth's atmosphere to increases in solar flux and implications to water loss from Venus: *Icarus*, 57(3), 335-355.
- Kasting, J.F., Whitmire, D.P., Reynolds, R.T., 1993, Habitable zones around main sequence stars: *Icarus*, 101(1), 108-128.
- Kiang, N.Y., Siefert, J., Govindjee, Blankenship, R., 2007a, Spectral signatures of photosynthesis. I. Review of earth organisms: *Astrobiology*, 7(1), 222-251.
- Kiang, N.Y., Segura, A., Tinetti, G., Govindjee, Blankenship, R., Cohen, M., Siefert, J., Crisp, D., Meadows, V.S., 2007b, Spectral signatures of photosynthesis. II. Coevolution with other stars and the atmosphere on extrasolar worlds: *Astrobiology*, 7(1), 252-274.
- Kump, L.R., Barley, M.E., 2007, Increased subaerial volcanism and the rise of atmospheric oxygen 2.5 billion years ago: *Nature*, 448, 1033-1036.
- Laskar, J., Joutel, F., Robutel, P., 1993, Stabilization of the Earth's obliquity by the Moon: *Nature*, 361(6413), 615-617.
- Lawson, R., Doodley, J.A. (eds.), 2005, *Technology Plan for the Terrestrial Planet Finder Interferometer*: Pasadena, California, National Aeronautics and Space Administration, Jet Propulsion Laboratory (JPL), California Institute of Technology, JPL Publication 05-5, 163 pp.
- Levine, M. Shaklan, S., Kasting, J. (eds.), 2006, *Terrestrial Planet Finder Coronagraph Science and Technology Definition Team (STDT) Report*: Pasadena, California, National Aeronautics and Space Administration, Jet Propulsion Laboratory (JPL), California Institute of Technology, JPL Document D-34923, 360 pp.
- Lewis, J.S., Prinn, R.G., 1984, *Planets and their Atmospheres. Origin and Evolution*: London, Academic Press, 470 pp.
- Mayor, M., Queloz, D., 1995, A Jupiter-mass companion to a solar-type star: *Nature*, 378(6555), 355-359.
- Meadows, V.S., 2006, Modelling the diversity of extrasolar terrestrial planets, *en Aime, C., Vakili F., Direct Imaging of Exoplanets: Science and Techniques, Proceedings of the International Astronomical Union, 2005*: Cambridge University Press, v.1, Colloquium C200, 25-34.
- Meadows, V.S., Crisp, D., 1996, Ground-based near infrared observations of the Venus nightside: the thermal structure and water abundance near the surface: *Journal of Geophysical Research*, 101(E2), 4595-4622.
- McKay, C.P., Stoker, C.R., 1989, The early environment and its evolution on Mars: Implications for life: *Reviews of Geophysics*, 27(2), 189-214.
- Mitrofanov, I.G., Zuber, M.T., Litvak, M.L., Demidov, N.E., Sanin, A.B., Boynton, W.V., Gilichinsky, D.A., Hamara, D., Kozyrev, A.S., Saunders, R.D., Smith, D.E., Tretyakov, V.I., 2007, Water ice permafrost on Mars: Layering structure and subsurface distribution according to HEND/Odyssey and MOLA/MGS data: *Geophysical Research Letters*, 34(18), L18102.
- Montañés-Rodríguez, P., Pallé E., Goode, P.R., 2006, Vegetation signature in the observed globally integrated spectrum of Earth considering simultaneous cloud data: Applications for Extrasolar Planets: *The Astrophysical Journal*, 651(11), 544-552.
- Nna Mvondo, D., Navarro-González, R., McKay, C.P., Coll, P., Raulin, F., 2001, Production of nitrogen oxides by lightning and coronae discharges in simulated early Earth, Venus and Mars environments: *Advances in Space Research*, 27(2), 217-223.
- Nna Mvondo, D., Navarro-González, R., Raulin, F., Coll, P., 2005, Nitrogen fixation by corona discharge on the early Precambrian Earth: Origins of Life and Evolution of the Biospheres, 35(5), 401-409.
- Owen, T., 1992, The composition and early history of the atmosphere of Mars, *en Kieffer, B.M., Jakosky, H.H., Snyder, C.W., Matthews, M.S. (eds.)*, Mars: Tucson, The University of Arizona Press, 818-834.
- Porto-de Mello, G., Fernández-del Peloso, E., Ghezzi, L., 2006, Astrobiologically interesting stars within 10 parsecs of the Sun: *Astrobiology*, 6(2), 308-331.
- Raymond, S.N., Mandell, A.M., Sigurdsson, S., 2006, Exotic Earths: Forming habitable worlds with giant planet migration: *Science*, 313, 1413-1416.
- Sagan, C., Thompson, W.R., Carlson, R., Gurnett, D., Hord, C., 1993, A search for life on Earth from the Galileo spacecraft: *Nature*, 365(6448), 715-721.
- Segura, A., Krelow, K., Kasting, J.F., Sommerlatt D., Meadows, V., Crisp, D., Cohen, M., Mlawer, E., 2003, Ozone concentrations and ultraviolet fluxes on Earth-like planets around other stars: *Astrobiology*, 3(4), 689-708.
- Segura, A., Kasting, J.F., Meadows, V.S., Cohen, M., Scalo, J., Crisp, D., Butler, R.A.H., Tinetti, G., 2005, Biosignatures from Earth-like planets around M dwarfs: *Astrobiology*, 5(6), 706-725.
- Segura, A., Meadows, V.S., Kasting, J.F., Crisp, D., Cohen, M., 2007, Abiotic formation of O<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> in high-CO<sub>2</sub> terrestrial atmospheres: *Astronomy and Astrophysics*, 472(2), 665-679.
- Tinetti, G., Meadows, V.S., Crisp, D., Kiang, N.Y., Kahn, B.H., Bosc, E., Fishbein, E., Velusamy, T., Turnbull, M., 2006a, Detectability of planetary characteristics in disk-averaged spectra II: Synthetic spectra and light curves of Earth: *Astrobiology*, 6(6), 881-900.
- Tinetti, G., Meadows, V.S., Crisp, D., Fong, W., Fishbein, E., Turnbull, M., Bibring, J.P., 2006b, Detectability of planetary characteristics in disk-averaged spectra. I: The Earth model: *Astrobiology*, 6(1), 34-47.
- Udry, S., Santos, N.C., 2007, Statistical properties of exoplanets: *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 45(1), 397-439.
- Van Thienen, P., Benzerara, K., Breuer, D., Gillmann, C., Labrosse, S., Lognonné, P., Spohn, T., 2007, Water, life, and planetary geodynamical evolution: *Space Science Reviews*, 129(1-3), 167-203.
- Williams, D.M., Kasting, J.F., 1997, Habitable planets with high obliquities: *Icarus*, 129(1), 254-267.
- Wuebbles, D.J., Hayhoe, K., 2002, Atmospheric methane and global change: *Earth-Science Reviews*, 57, 177-210.

Manuscrito recibido: Noviembre 27, 2007

Manuscrito corregido recibido: Junio 18, 2008

Manuscrito aceptado: Diciembre 5, 2008

