

PLANETARIA

LOS TERREMOTOS EN MARTE (MARTEMOTOS).

LA SONDA INSIGHT

José Fenollar

jfenoll2@xtec.cat

La sismología es una rama de la geofísica que se encarga de estudiar los terremotos y la propagación de las ondas sísmicas que se originan en el interior y en la superficie de la Tierra. Gracias a los avances científicos y tecnológicos se ha lanzado el módulo de aterrizaje InSight (<https://mars.nasa.gov/insight/>) (Interior exploration using Seismic investigations, geodesy and heat transport), en español, exploración Interior utilizando investigaciones Sísmicas, geodesia y transmisión de calor; de la NASA, que aterrizó en Marte en noviembre de 2018, el cual lleva instalado un sismógrafo, un aparato para estudiar los martemotos (marsquakes) de Marte

INTRODUCCIÓN

La sismología es una rama de la geofísica que se encarga de estudiar los terremotos y la propagación de las ondas sísmicas que se originan en el interior y en la superficie de la Tierra. Es una ciencia relativamente nueva ya que sus métodos e instrumentos de observación se desarrollaron durante el siglo XX. La sismología busca conocer la estructura interna de la Tierra para así descubrir las causas que provocan los terremotos y poder prevenir daños sísmicos. Además, también estudia otros fenómenos relacionados con los movimientos sísmicos como los maremotos y las vibraciones previas a las erupciones volcánicas.

TERREMOTOS

Un terremoto o sismo es un fenómeno natural que se produce en el interior de la Tierra cuando la energía acumulada se libera a través de ondas sísmicas que provocan una o varias sacudidas en la corteza terrestre. Las rocas de la corteza se pueden comportar elásticamente y acumular tensiones (energía) hasta el punto que supera el límite del material y se fractura. Los terremotos más comunes se producen cuando se libera energía potencial elástica acumulada en la deformación gradual de las rocas contiguas al plano de una

falla activa, aunque también pueden darse por otras causas como el choque entre dos placas tectónicas, los procesos volcánicos, los impactos de asteroides, etc. Incluso, el ser humano los puede crear realizando prácticas nucleares, por ejemplo. El punto donde se origina un terremoto se llama hipocentro y su proyección a la superficie se llama epicentro (figura 2). Para medir la energía liberada se utilizan diferentes escalas.

Ondas primarias (P), secundarias (S) y las ondas superficiales

Un sismógrafo es un instrumento usado para medir movimientos de la Tierra. Consiste de un sensor que detecta el movimiento de tierra, el cual se denomina sismómetro y está conectado a un sistema de registro. Un sismograma (figura 1) es un registro de movimiento de tierra llevado a cabo por un sismógrafo. La energía medida en un sismograma resulta de fuentes naturales como son los sismos (o terremotos), o de fuentes artificiales como son los explosivos (sismos inducidos).

La mayoría de terremotos y sobre todo los de mayor magnitud se producen en zonas de límites de placas, aunque también se producen en el interior de los continentes debido a reajustes de

esfuerzos a través del movimiento de fallas.

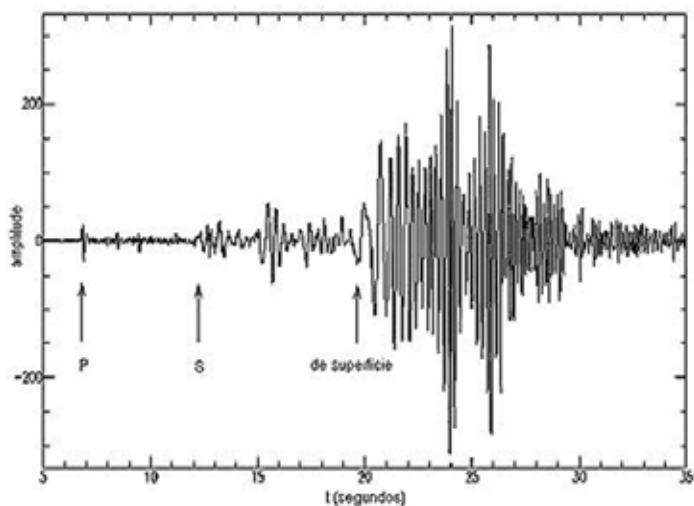


FIGURA 1. REGISTRO DE UN TERREMOTO CON LAS CORRESPONDIENTES ONDAS. PRIMERO LAS ONDAS PRIMARIAS (P), DESPUÉS SECUNDARIAS (S) Y FINALMENTE LAS ONDAS SUPERFICIALES (IMAGEN DE [HTTP://WWW.OBSEBRE.ES/CA/SISMICA-INSTRUMENTS-I-METODOLOGIA](http://www.obsebre.es/ca/sismica-instruments-i-metodologia)).

Los terremotos se suelen producir en los primeros kilómetros de la corteza terrestre (aunque también hay terremotos muy profundos asociados a zonas de subducción). El punto donde se produce la “ruptura” se llama foco o hipocentro, mientras que este mismo punto proyectado en superficie se denomina epicentro (figura 2).



FIGURA 2. CUANDO SE REGISTRA UN TERREMOTO, LAS ONDAS SÍSMICAS SE PROPAGAN EN TODAS LAS DIRECCIONES DESDE EL HIPOCENTRO. EL ESTUDIO DE LAS ONDAS REGISTRADAS PERMITE LOCALIZAR EL EPICENTRO Y LA PROFUNDIDAD A LA QUE SE HA ORIGINADO EL TERREMOTO (IMAGEN DE [HTTP://WWW.OBSEBRE.ES/CA/SISMICA-INSTRUMENTS-I-METODOLOGIA](http://www.obsebre.es/ca/sismica-instruments-i-metodologia)).

Las ondas sísmicas son un tipo de onda elástica que se propagan desde el hipocentro del terremoto o movimiento sísmico a través de un medio material elástico. También se puede decir que son paquetes de energía de deformación elástica que se propagan hacia fuera desde una

fuente sísmica, como puede ser un terremoto o una explosión. Existen dos tipos de ondas sísmicas:

Las ondas secundarias (ondas S) (figura 4) son ondas transversales o de corte, es decir, se desplazan perpendicularmente a la dirección de propagación de la onda. Este tipo de onda sólo puede viajar en medios sólidos ya que los medios líquidos no pueden soportar los esfuerzos de corte. La velocidad de las ondas S (de 4 a 6 km / s aproximadamente) es menor a la de las primarias (P) (figura 3), aunque estas causan más daños.

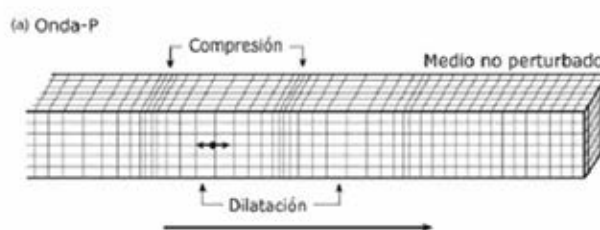


FIGURA 3. ONDA P (STRAHLER, 2004).

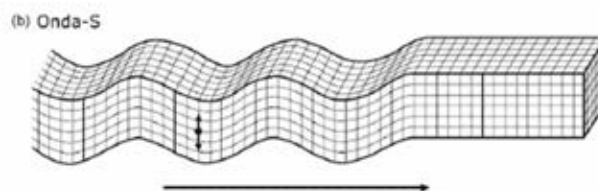


FIGURA 4. ONDA S (STRAHLER, 2004).

Las ondas superficiales: cuando las ondas internas llegan a la superficie se crean las ondas superficiales que se propagan a través de la interfase de la superficie (tierra-agua, tierra-aire). Son las ondas que tienen menos velocidad de propagación, pero son las que provocan más daños. Además, sólo aparecen con terremotos con magnitudes e intensidades considerables. Existen dos tipos de ondas superficiales:

Las ondas de Love (ondas L) (figura 6) son ondas superficiales que tienden a producir un tipo de movimiento horizontal de corte en la superficie. Estas se generan sólo cuando un medio elástico se encuentra estratificado (separado por capas), situación que se cumple en nuestro planeta ya

que se encuentra formado por capas de diferentes características físicas y químicas.

Las ondas Rayleigh (ondas R) (figura 5), también denominadas ground roll, son ondas superficiales que producen un movimiento elíptico retrógrada del suelo. Cuando un sólido posee una superficie libre, como la superficie de la tierra, se pueden generar ondas que viajan a lo largo de la superficie, estas ondas tienen su máxima amplitud en la superficie libre, lo que decrece exponencialmente con la profundidad. Su velocidad es de un 90% menos que las ondas S.

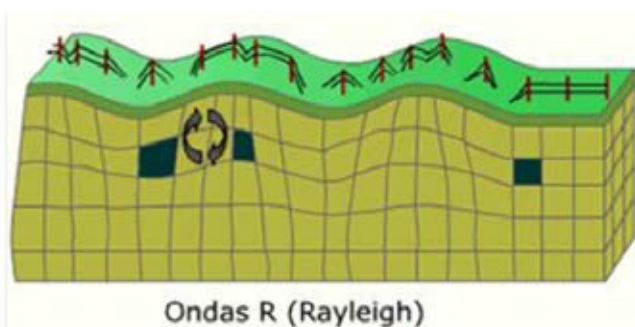


FIGURA 5. ONDAS R (RAYLEIGH) (STRAHLER, 2004).

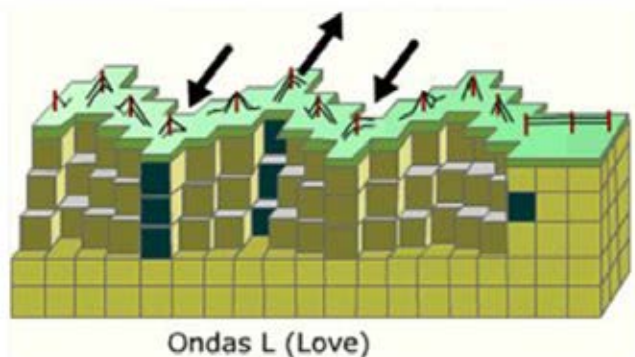


FIGURA 6. ONDAS L (LOVE) (STRAHLER, 2004).

Durante un terremoto se generan varias ondas sísmicas (figura 1), unas viajan por el interior (ondas internas) de la Tierra: son las primarias P y secundarias S, y otras lo hacen por la superficie como las ondas Rayleigh y Love. Las ondas internas viajan a través del interior, son las más rápidas. Siguen caminos curvados debido a la variada densidad y composición del interior de la Tierra. Este efecto es similar al de refracción de las ondas de luz. Cuando las ondas internas llegan a la superficie, se generan las ondas L (Love), que se propagan por la superficie de discontinuidad

de la interfase de la superficie terrestre (tierra-aire y tierra-agua). Son las causantes de los daños producidos por los sismos en las construcciones.

Dado que las ondas P (figura 3) se propagan a mayor velocidad que otros tipos de ondas, son las primeras en ser registradas en un sismograma.

Después llegan las ondas S (figura 4) y por fin las ondas superficiales (ondas Rayleigh y ondas Love) (figuras 1, 5 y 6).

En un sismograma podemos ver que las ondas P tienen una amplitud de onda muy pequeña mientras que las ondas superficiales tienen la amplitud de onda más grande (figura 1).

El estudio de los sismogramas permite conocer la distancia a la que se ha producido un determinado terremoto. La diferencia de tiempo entre la llegada de la onda P y S nos informa del próximo o lejano que ha sido este terremoto (ver el apartado "Determinación de la magnitud de un terremoto"). Para definir correctamente el epicentro de un terremoto es necesario un mínimo de 3 estaciones sísmicas que lo registren.

Determinación de la magnitud de un terremoto
Mediante un sismograma (figuras 1 y 7) sabiendo la amplitud de la onda y la diferencia del tiempo de llegada de las ondas P y las ondas S (método que se utiliza para determinar el epicentro) podemos determinar la magnitud de un terremoto (ver ejemplo de la figura 7).

Cuando se produce un terremoto las ondas sísmicas P (primarias) y S (secundarias) generadas, se dispersan en todas las direcciones. Por sus características de propagación, estas ondas viajan a diferentes velocidades, siendo la onda P más veloz que la S, con lo cual la onda P se va alejando poco a poco de la onda S a medida que nos apartamos del epicentro. Por lo tanto, cuanto más lejos se encuentra una estación del epicentro del terremoto, mayor será la diferencia

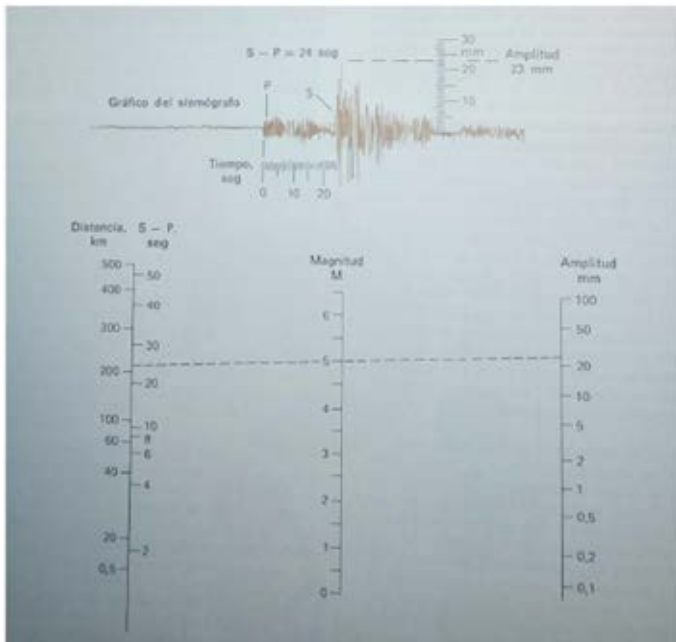


FIGURA 7. GRÁFICA QUE MUESTRA CÓMO DETERMINAR LA MAGNITUD DE UN TERREMOTO SABIENDO LA AMPLITUD DE ONDA Y LA DIFERENCIA DEL TIEMPO DE LLEGADA DE LAS ONDAS P Y LAS ONDAS S (MÉTODO QUE SE UTILIZA PARA DETERMINAR EL EPICENTRO). LOS DATOS SE EXTRAEN DE UN SISMOGRAMA (STRAHLER, 2004).

de tiempo de llegada entre la onda P y la onda S; de manera que esta diferencia de tiempo (S-P) proporciona una medida de cómo de distante está el epicentro del lugar de medición.

MÓDULO DE ATERRIZAJE INSIGHT EN MARTE

El módulo de aterrizaje InSight (figuras 8 y 9) (<https://mars.nasa.gov/insight/>) (Interior exploration using Seismic investigations, geodesy and heat transport), en español, exploración Interior utilizando investigaciones Sísmicas, geodesia y transmisión de calor, de la NASA, aterrizó en Marte en noviembre de 2018, lleva instalado un sismógrafo (figura 9), un aparato pensado para estudiar los martemotos (marsquakes) y ayudarnos a comprender mejor la estructura geológica de Marte. Protegido por un escudo contra el viento y los cambios de temperatura, este instrumento mide las vibraciones del terreno causadas por el clima, pero también es capaz de detectar movimientos originados en las profundidades del planeta, los llamados martemotos.

Los investigadores creen que estos fenómenos se producen con una frecuencia 1.000 veces menor que en la Tierra. Sin embargo, pueden

ser cruciales para recopilar información sobre la actividad en el centro de Marte, de forma que podamos deducir el grosor de la corteza o el punto donde está la unión entre manto y núcleo.

También podría servir de ayuda para entender si hay agua líquida en el subsuelo o plumas volcánicas activas, además de proporcionar información valiosísima sobre la formación planetaria hace miles de millones de años. El sismógrafo también puede captar los impactos de meteoritos sobre la superficie, y estudiar su frecuencia.

En un momento determinado la sonda empezó a captar otros sonidos de la cotidianidad marciana: ráfagas de viento, los movimientos del brazo robótico del módulo e incluso los sonidos internos que el mismo sismógrafo produce cuando cambia la temperatura. También se ha confirmado que en la Tierra las ondas sísmicas viajan mucho más rápido porque los procesos geológicos activos rellenan los huecos de la corteza terrestre. En Marte, en cambio, todo parece estar lleno de rincones y grietas que interrumpen el flujo de ondas sísmicas a lo largo y ancho del planeta.

El módulo de aterrizaje InSight tiene como objetivo primario determinar por primera vez si hay actividad sísmica en Marte, la cantidad de calor que emana de su interior, y estimar el tamaño de su núcleo y si este es líquido o sólido.

El objetivo secundario de la misión es estudiar la geofísica, la actividad tectónica, y el impacto de meteoritos en Marte. En el interior contiene un micrófono que graba la actividad que se genera alrededor: se llama SEIS, (Seismic Experiment for Interior Structure), en español, Experimento Sísmico para Estructura Interior (Lognonné et al., 2019). La corteza de Marte es una mezcla entre la Tierra y la Luna: esos eventos sísmicos duran más que en nuestro planeta, pero son más cortos que en la superficie lunar ya que duran aproximadamente un minuto. El sismógrafo está

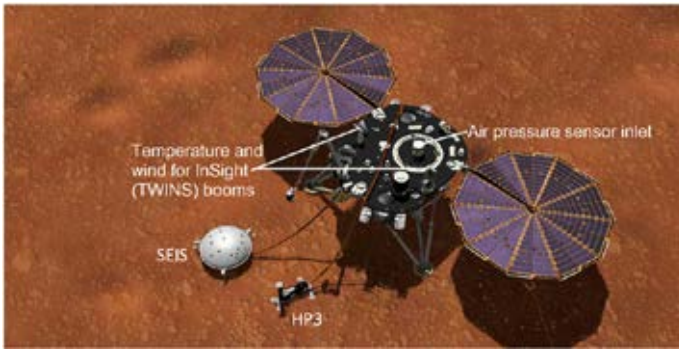


FIGURA 8. InSight con sus sensores: TEMPERATURE AND WIND (TEMPERATURA Y VIENTO), AIR PRESSURE SENSOR (SENSOR DE LA PRESIÓN DE AIRE), SEIS (EXPERIMENTO SÍSMICO PARA ESTRUCTURA INTERIOR) Y HP3 (SONDA DE FLUJO DE CALOR) (IMAGEN DE [HTTPS://INSIGHT.OCA.EU/FR/ACCUEIL-INSIGHT](https://insight.oca.eu/fr/accueil-insight)).



FIGURA 9. SISMÓGRAFO DEL MÓDULO DE ATERRIZAJE InSight EN MARTE. IMAGEN DE LA NASA.

ayudando a que los científicos sepan más de Marte, sobre todo por debajo de la superficie.

Martemoto

Un martemoto (marsquake) es un temblor, similar al terremoto del planeta Tierra, que se produce en la corteza del planeta Marte como resultado de la repentina liberación de energía en el interior del planeta como consecuencia del movimiento de las placas tectónicas o por puntos calientes como el Monte Olimpo o los Montes Tharsis. La detección y el análisis de los martemotos podrían proporcionar información para explorar

la estructura interior de Marte, así como para identificar si alguno de los muchos volcanes de Marte continúa siendo volcánicamente activo o no.

Esos eventos fueron observados por primera vez en la Luna, donde fueron observados y documentados.

También hay evidencias de antiguos terremotos en Venus pero en Marte nunca se había detectado ninguno, y las estimaciones indicaban que podría tratarse de un evento extremadamente raro en ese planeta con una probabilidad de que ocurriera una vez cada varios millones de años. No obstante, se han encontrado evidencias de que Marte antiguamente fue sísmicamente activo principalmente en la zona del sur.

DATOS

En la web <http://philippe.cosentino.free.fr/productions/marsview/?lang=en> se encuentra la interfaz para leer y analizar los sismogramas de Marte.

En la siguiente tabla (tabla I) se presentan algunos de los terremotos detectados en Marte

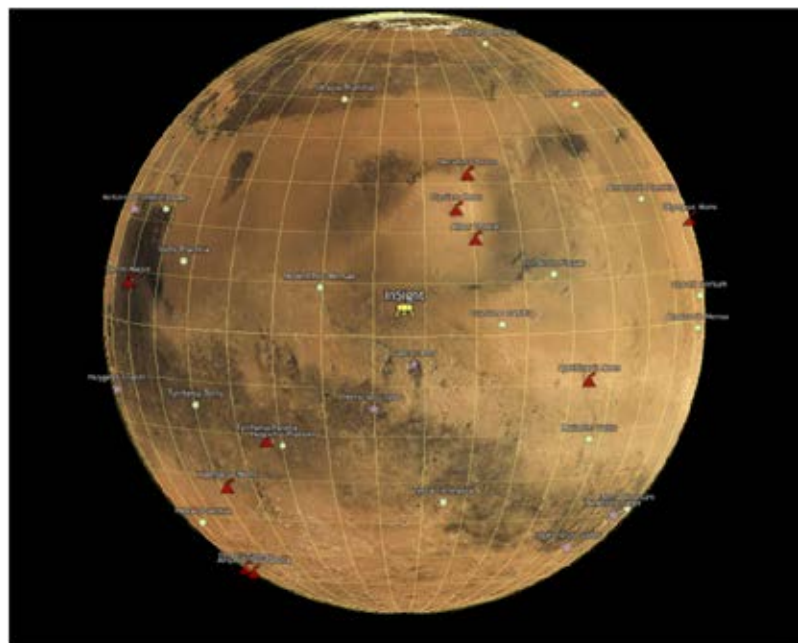


FIGURA 10. SITUACIÓN DEL MÓDULO DE ATERRIZAJE InSight EN LA SUPERFICIE DE MARTE (IMAGEN DE [HTTP://PHILIPPE.COSENTINO.FREE.FR/PRODUCTIONS/MARSVIEW/?LANG=EN](http://philippe.cosentino.free.fr/productions/marsview/?lang=en)).

Fecha	Hora	Latitud	Longitud	Magnitud
07-04-2019	09:31:52 UTC	43.767	74.596	3.7
23-05-2019	02:19:33 UTC	3.45	164.68	3.7
26-07-2019	12:16:15 UTC	10.99	160.95	3.3
21-09-2019	03:15:42 UTC	14.49	163.38	3.5

Tabla I. Tabla de los TERREMOTOS DETECTADOS EN MARTE DESDE ABRIL A SEPTIEMBRE DE 2019.
DATOS DE [HTTPS://INSIGHT.OCA.EU/FR/DATA-INSIGHT](https://insight.oca.eu/fr/data-insight).

En las siguientes figuras (de la figura 11 hasta la figura 14) se muestran los diferentes sismogramas, espectros (gráfica donde se representa la frecuencia (Hz) en función del tiempo (s)) y hodochrone (es un método de cálculo de la propagación de ondas sísmicas se representa el tiempo (s) en función de la distancia (km)) de los terremotos que se detectaron en Marte.

Sismogramas, espectros y hodochrones de Marte

07-04-2019 09:31:52 UTC

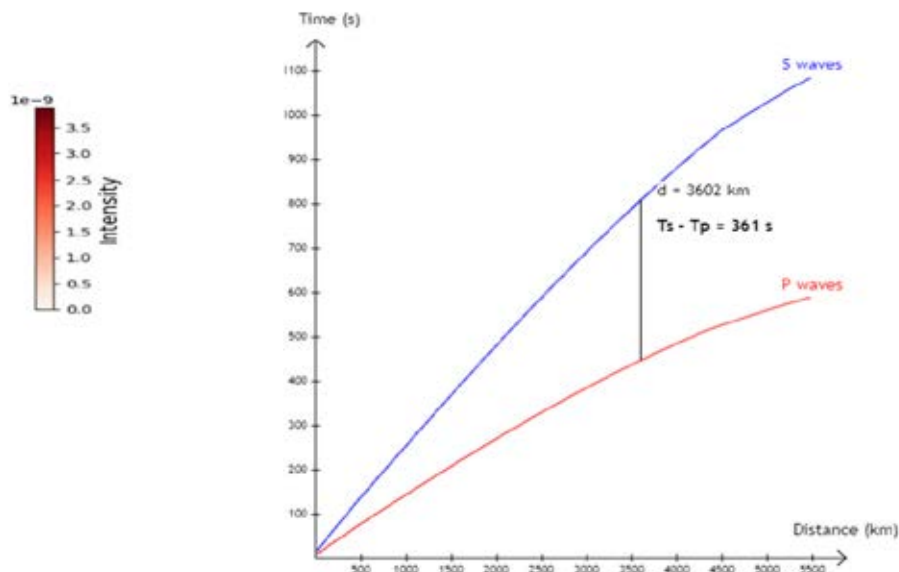
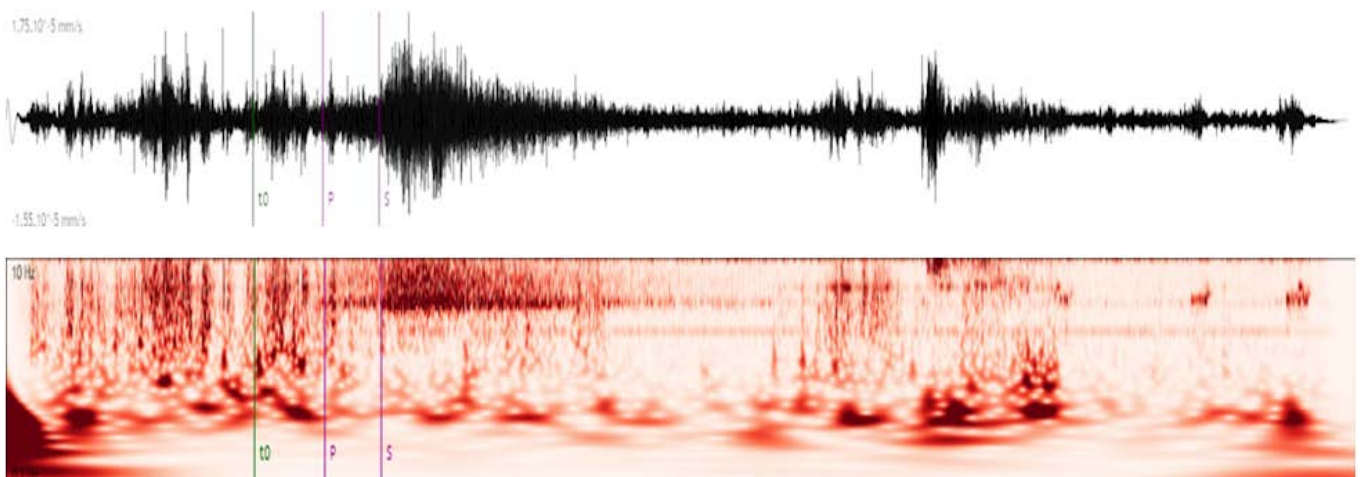


FIGURA II. SISMOGRAMA (AMPLITUD (MM/S) EN FUNCIÓN DEL TIEMPO (S)), ESPECTRO (FRECUENCIA (HZ) EN FUNCIÓN DEL TIEMPO (S)) Y HODOCHRONE (EL TIEMPO(S) EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA (KM)) DEL DÍA 7 DE ABRIL DE 2019 A LAS 09:31:52 UTC. EN LAS IMÁGENES SE MUESTRAN LAS ONDAS S, P Y EL TIEMPO DE INICIO (t_0).

MEDIANTE EL HODOCHRONE PODEMOS CALCULAR LA DIFERENCIA DE TIEMPO ENTRE LAS ONDAS T_s Y T_p Y CALCULAR LA DISTANCIA d . CON LA GRÁFICA DE LA FIGURA 7 Y LA AMPLITUD DE ONDA DEL SISMOGRAMA SE PUEDE ESTIMAR LA MAGNITUD DEL TERREMOTO OCURRIDO EN MARTE.

23-05-2019 02:19:33 UTC

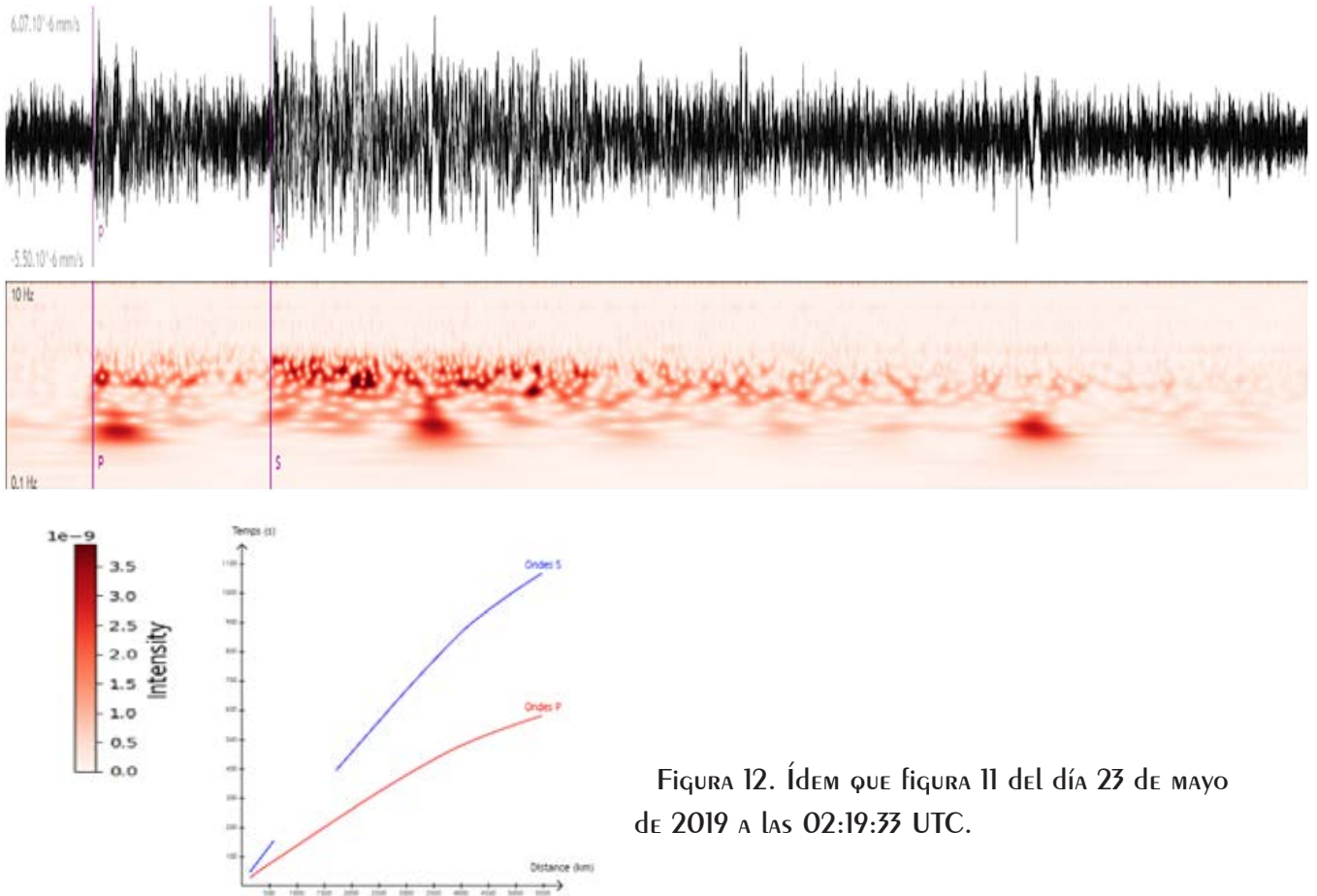


FIGURA 12. ÍDEM QUE FIGURA 11 DEL DÍA 23 DE MAYO DE 2019 A LAS 02:19:33 UTC.

26-07-2019 12:16:15 UTC

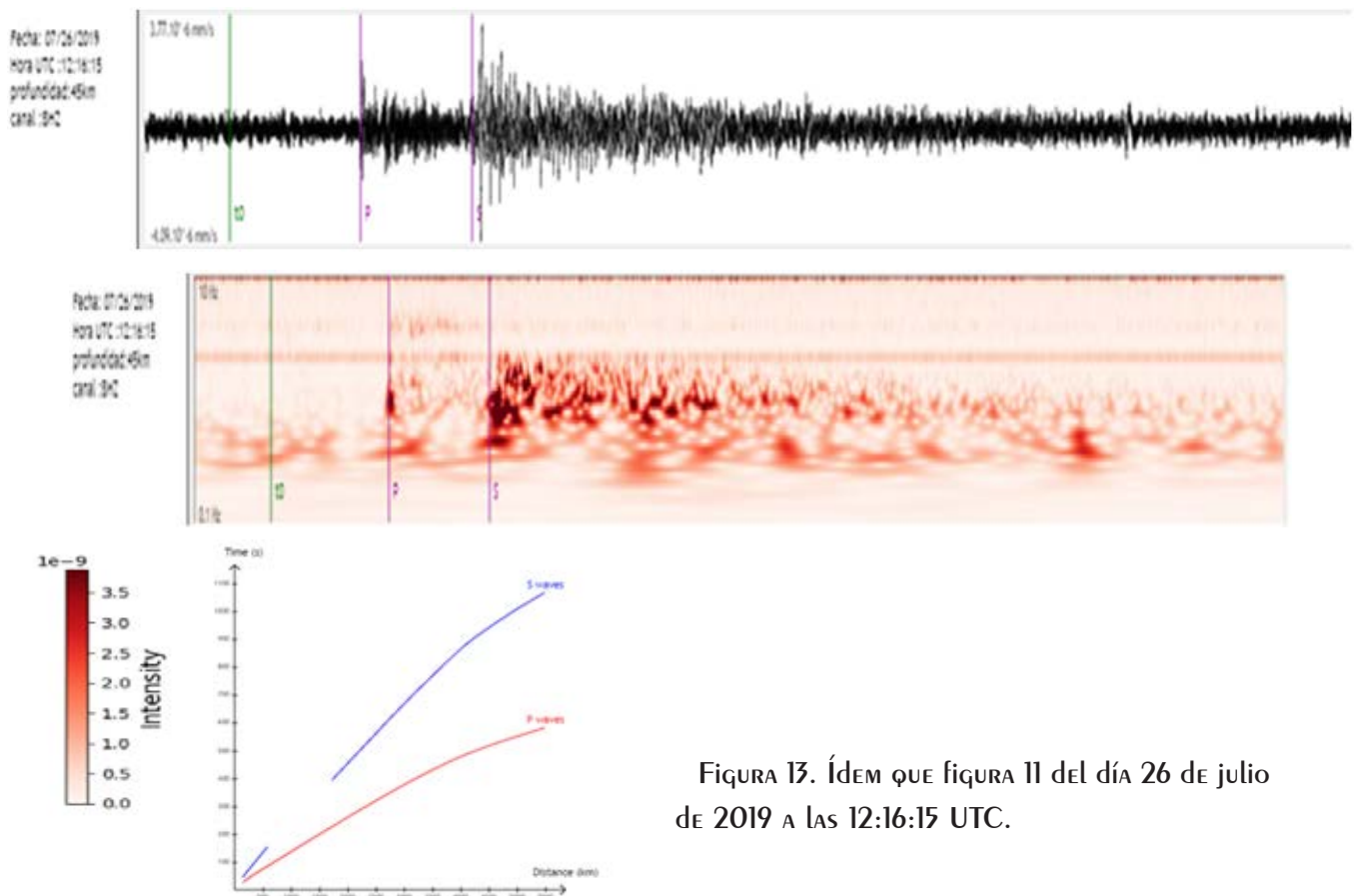


FIGURA 13. ÍDEM QUE FIGURA 11 DEL DÍA 26 DE JULIO DE 2019 A LAS 12:16:15 UTC.

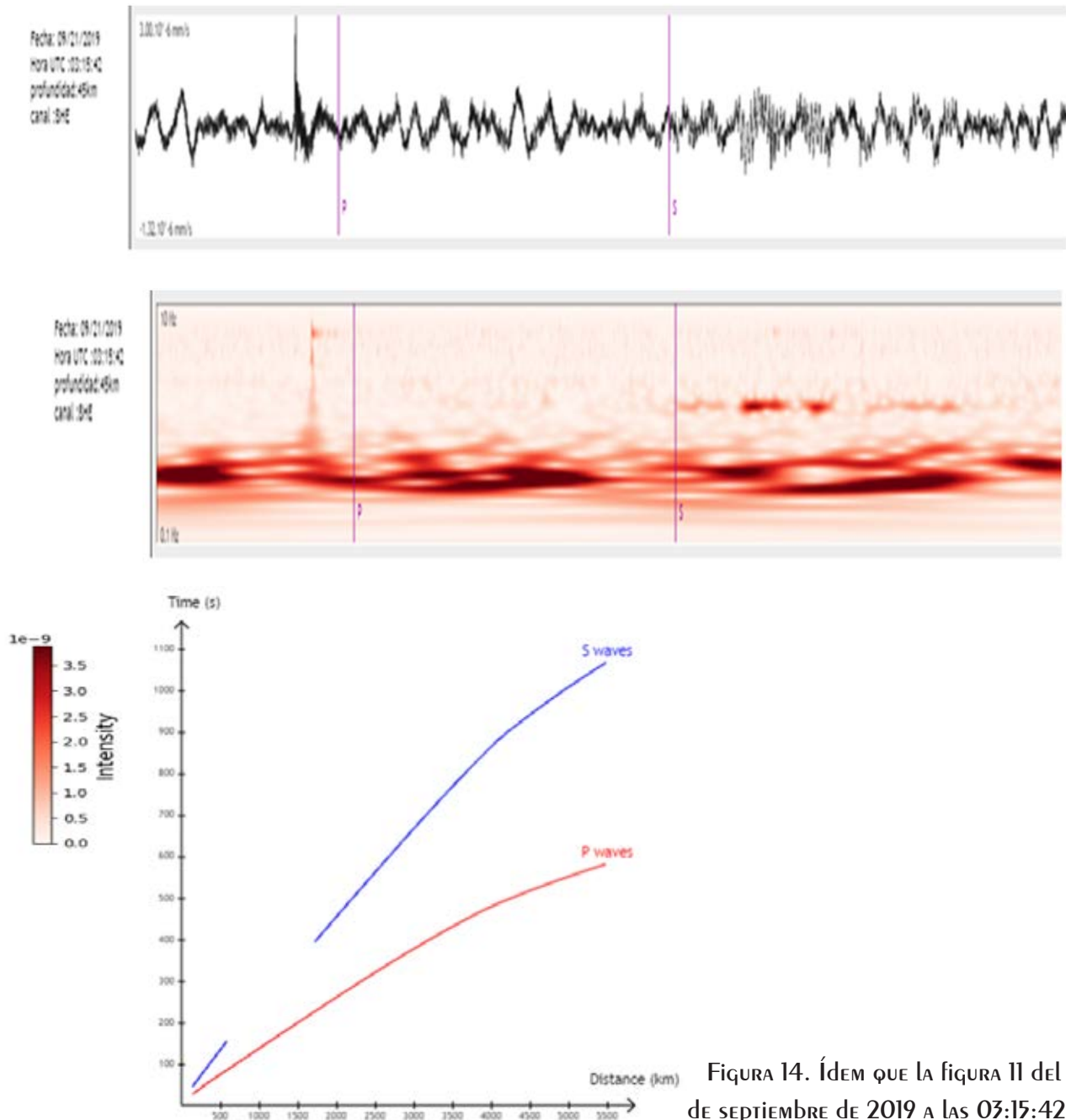


FIGURA 14. ÍDEM QUE LA FIGURA 11 DEL DÍA 21 DE SEPTIEMBRE DE 2019 A LAS 03:15:42 UTC.

CONCLUSIONES

Gracias a la sismología se ha podido conocer la estructura interna de la Tierra para así descubrir las causas que provocan los terremotos y poder prevenir daños sísmicos.

Además, también estudia otros fenómenos relacionados con los movimientos sísmicos como los maremotos y las vibraciones previas a las erupciones volcánicas. Con los avances científicos y tecnológicos se ha podido enviar el módulo InSight de la NASA a otro planeta como Marte para detectar los posibles martemotos que se pueden producir en el planeta rojo. Se

han podido detectar varios martemotos con una cierta magnitud.

REFERENCIAS

Strahler, A. N. (2004). Geología Física: Capítulo 8 (Los terremotos y el interior de la Tierra). Ediciones Omega.

Lognonné, P., Banerdt, W.B., Giardini, D. et al. (2019). SEIS: Insight's Seismic Experiment for Internal Structure of Mars. Space Sci Rev 215, 12. <https://doi.org/10.1007/s11214-018-0574-6>.