

## RESUMEN

En este trabajo de tesis se propone un modelo tridimensional de velocidades por debajo de la zona norte de la provincia ígnea de la Sierra Madre Occidental (SMO) utilizando la metodología de trazado de rayos. La SMO es la provincia ígnea terciaria que abarca a la Mesa Central, parte de Chihuahua oriental y a la provincia fisiográfica del occidente de México caracterizada por un altiplano con una elevación promedio de más de 2 km y aproximadamente 1 200 km de largo por 200-400 km de ancho que se extiende desde la frontera con Estados Unidos hasta la Faja Volcánica Transmexicana y que se encuentra limitada al oeste por el Golfo de California y al este por el Altiplano Central (o Mesa Central).

Se utilizó el programa Ray3D, el cual resuelve las ecuaciones cinemáticas de rayo sísmico y obtiene la trayectoria seguida por el mismo al propagarse en un medio homogéneo, para obtener las trayectorias y tiempo de viaje de cuatro eventos sísmicos que ocurrieron en el lapso comprendido entre Marzo de 2007 y Agosto de 2009 en el Mar de Cortés. Los sismos fueron registrados en las estaciones CGIG, HPIG y HSIIG de la red de banda ancha del Servicio Sismológico Nacional mexicano.

El modelo de velocidades obtenido consta de cinco capas principales que son continuas a lo largo de la estructura. Las dos capas superficiales, con velocidades de 6.2 km/s y 6.6 km/s, definen la estructura cortical por debajo de la zona de estudio. El espesor de la corteza varía de 36 km a 40 km en el límite occidental y de 20 km a 28 km en el borde oriental de la zona estudiada. Las tres capas más profundas, cuyas altas velocidades de 7.8 km/s, 8.0 km/s y 8.2 km/s, podrían ser indicativas de la presencia de manto litosférico e incluso manto astenosférico a lo largo de la estructura de la SMO. El modelo de velocidades derivado de este estudio sugiere adicionalmente la existencia de dos capas discontinuas, las capas se localizan entre la corteza y el manto y sus velocidades son 7.0 km/s y 7.9 km/s respectivamente. La capa de 7.0 km/s que se encuentra a 38 km de profundidad en Ciudad Delicias, Chihuahua y de aproximadamente 5 km de espesor, puede indicar la presencia de corteza oceánica subducida.

El modelo de velocidades para la SMO derivado de este estudio presenta, como característica morfológica principal, adelgazamiento cortical en sus extremos poniente y oriente, el adelgazamiento es más evidente a lo largo del borde oriental, en las proximidades del mar de Cortés. Esta característica es congruente con el patrón general de deformación documentado para la zona con técnicas geofísicas y geológicas.

# INTRODUCCIÓN

Una onda sísmica se propaga en la Tierra debido a que el material del cual se constituye, pensemos en un sólido, puede sufrir deformación interna. Como resultado, los terremotos y otras alteraciones generan ondas sísmicas que proporcionan información tanto de la fuente que las originó como del material a través del cual viajaron. La deformación que sufre la Tierra sólida causa desplazamientos, en función del tiempo y del espacio, que pueden ser caracterizados por la ecuación de onda; la ecuación de onda es una ecuación diferencial parcial lineal de segundo orden que cuyas soluciones describen la manera en que una onda sísmica se propaga en el espacio tridimensional.

La teoría de rayos permite obtener una solución de la ecuación de onda, y su principal ventaja es que la ecuación diferencial parcial es sustituida por un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias, las cuales generalmente son más fáciles de resolver. Las trayectorias seguidas por las ondas sísmicas propagándose están dadas por las trayectorias de rayos o los vectores normales al frente de onda y es posible calcularlas utilizando métodos de trazado de rayos. En muchos problemas de sismología no es necesario encontrar una solución completa de la ecuación de onda, es suficiente conocer el comportamiento de los rayos sísmicos que constituyen a la onda.

Los métodos de trazado de rayos han sido utilizados extensivamente en sismología y en sísmica de exploración para estudiar la propagación de una onda sísmica viajando a través de un medio estratificado. Representan una metodología sencilla y económica entre cuyas aplicaciones, que se han extendido en pocos años, se encuentran la generación de sismogramas sintéticos, el cálculo de atributos sísmicos para la migración en profundidad, la estimación de la cantidad de perturbación en tomografía sísmica, la modelación de estructuras de velocidades sísmicas, el modelado numérico de campos de ondas sísmicas y la exploración sísmica, algunos de los autores que han hecho trabajos basados en el trazado de rayos son: Cerveny (1988), Psencik (1998), Bucha (2003), Rodriguez (2007), Gjøystdal (2007), solo por mencionar algunos. En comparación con otros métodos, el trazado de rayos ofrece las ventajas de poseer una gran eficiencia computacional y la posibilidad de simular la propagación de ondas elementales.

El objetivo de este trabajo de tesis es obtener una estructura de velocidades por debajo de la Sierra Madre Occidental (SMO) utilizando el programa de trazado de rayos 'Ray3D', rutina escrita originalmente por Rob Comer, Willie Lee y Franklin Luk y modificada ampliamente por Carlos Valdés y Willie Lee en 1989.

La Sierra Madre Occidental (SMO) es la provincia ígnea más grande del Cenozoico y una de las más grandes del mundo, se extiende desde la frontera de México con Estados Unidos hacia el sur hasta intersectarse con el Cinturón Volcánico Trasmexicano. El conocimiento que se tiene del subsuelo en la zona noroeste de la República Mexicana es escaso, de ahí nace la necesidad de ampliarlo construyendo un modelo de velocidades para la zona.

Un modelo de velocidades para la zona permitirá, entre otras cosas, localizar de manera más adecuada los hipocentros de sismos ocurridos en la región, hacer correcciones de tiempo de viaje de telesismos, entender con mayor claridad la propagación de ondas sísmicas a través de la estructura, hacer una reconstrucción parcial de la historia tectónica y geológica que afectó el noroeste de México, etc.

El área de estudio se encuentra en el noroeste de la República Mexicana y es un rectángulo paralelo a la línea de costa del Mar de Cortés, los vértices del rectángulo son los puntos de coordenadas geográficas A) 28°28'13.19"N, 113°51'59.24"O, B) 31°58'13.89"N, 108°46'17.58"O, C) 26°39'18.73"N, 104° 1'3.41"O, y D) 23°16'16.61"N, 109° 2'49.79"O. Las dimensiones del área de estudio son, 650 km de largo y 600 km de ancho.

En el primer capítulo se explican los rasgos geológicos más importantes de la SMO, se hace énfasis en la historia geológica y tectónica de la provincia ígnea. La morfología y el tectonismo documentados en la SMO obedecen al patrón de migración de un arco volcánico hacia el continente y su posterior regreso a la zona de subducción. La explicación de este fenómeno es la subducción de la Placa Farallón por debajo de la Placa de Norteamérica hasta su total desaparición, lo que además trajo como consecuencia la apertura del Golfo de California.

El capítulo segundo es una recopilación de los conceptos básicos que explican la propagación de ondas sísmicas y la teoría de trazado de rayos. Se explican el Principio de Huygens, el Principio de Fermat, la Ley de Snell, la ecuación de onda y la obtención de las ecuaciones cinemáticas de la trayectoria del rayo sísmico para un medio homogéneo a partir de esta.

En el tercer capítulo se describe la metodología seguida en el procesamiento de la información. La estructura que sirve como modelo inicial en la construcción del modelo propuesto es producto de la recopilación de diversos estudios que proponen ya sea la profundidad del Moho y/o la velocidad Pn por debajo de la corteza en zonas específicas de la zona de estudio. Se presenta el modelo final de velocidades obtenido con el programa Ray3D, el programa encuentra la trayectoria de un rayo sísmico que se propaga a través de un modelo de tierra conocido, la tarea es construir y modificar este modelo hasta obtener aquél que mejor ajuste al modelo real de velocidades.

En el cuarto capítulo se describe detalladamente el modelo de velocidades obtenido. Se trata de un modelo cuya característica principal es el acortamiento en sus extremos, el acortamiento se acentúa en la zona cercana al Golfo de California y es menos evidente en la zona cercana a la provincia '*Basin and range*' mexicana. La interpretación se hace asociando los valores de velocidad obtenidos con aquellos que son característicos de determinados tipos de rocas, por ejemplo, el valor de 6.6 km/s característico de rocas de la corteza inferior, el valor de 7.0 km/s representativo de corteza oceánica, 7.8 km/s propio del manto superior, etc. Además se hace una interpretación geológica que puede ser refinada con más información geológica al respecto.

El quinto capítulo está destinado a las conclusiones del trabajo, las ventajas, las desventajas, las bondades y limitantes tanto de la metodología utilizada como del trabajo realizado.