

LA TEORÍA DE RAYOS Y SUS APLICACIONES

Juan A. Madrid

Depto. de Sismología, División de Ciencias de la Tierra, CICESE,
Km. 107, Carret. Tijuana- Ensenada, Ensenada, B.C.

"If you are dropping pebbles into a pond and do not watch the spreading rings, your occupation should be considered as useless.

Kuzma Prutkoff
(filósofo ruso)

INTRODUCCIÓN

El hombre tiene la necesidad imperiosa de penetrar y escudriñar las entrañas de los medios que le rodean para saber cómo están formados y qué es lo que contienen. Necesita hurgar en el océano en busca de alimento, conocimiento y riquezas; necesita penetrar los aires tanto por el transporte y el comercio, como por el clima y la defensa, y necesita adentrarse en la tierra sólida para encontrar, entre las cosas que ella atesora, el combustible que es sustento de su civilización. Pero también necesita sondear cosas pequeñas, como los huesos y las pirámides; medianas, como los campos geotérmicos; grandes, como la tierra misma; o gigantescas, como la galaxia. Esta gran necesidad se da en razón de su salud, de su subsistencia, de su civilización y de un mayor conocimiento de su habitat en el cosmos, lo cual le ayuda a comprenderlo mejor, a explotar mejor sus recursos y a elaborar mejores hipótesis sobre su origen y su destino final, y definitivamente, se da en busca de su futuro.

Para poder internarse en cada uno de esos medios, necesita los "ojos" y la "luz" adecuados. Para Euclides, en el siglo III A.C., la visión era posible porque los ojos enviaban luz hacia el objeto de la vista. Esto no es cierto en tanto se refiere al ojo humano, pero es totalmente cierto en cuanto se refiere a algunas formas de investigar el océano, la atmósfera, la tierra firme, o el hielo. La "luz", en cada caso, es una forma de radiación (electromagnética o sonido) emitida por algún tipo de "linterna" (fuente) que tiene la capacidad de "canalizar" esta radiación, creando un fuerte efecto direccional al iluminar el medio (un haz). Ésto es todo lo que la teoría de rayos necesita para operar. En ocasiones, la "linterna" es natural y el sondeo del medio es pasivo. Ejemplos de observación de fuentes "naturales" son los arreglos de radiotelescopios diseñados para sondear el espacio en la búsqueda de señales de vida inteligente en el universo, y la escucha submarina del eco del océano. La teoría de rayos, nuestro tema central, se aplica a una variedad de actividades relacionadas con el sondeo del planeta y del espacio exterior. Existen aplicaciones en otros campos, por ejemplo, en el diseño de objetos tridimensionales por computadora, o la más tradicional, en el diseño y calibración de instrumentos ópticos. En este trabajo no tocaremos este tema, ya que existen excelentes exposiciones del mismo a muchos niveles. Por falta de espacio, nos restringiremos a los que consideramos más

importantes y con los que estamos más relacionados. Para llegar a la teoría de rayos, daremos una idea abreviada de lo que es una onda, sin profundizar en los detalles físicos o matemáticos. Usaremos para ello uno de los ejemplos más simples, ilustrativos y fáciles de encontrar: las ondas superficiales que se forman en un estanque lleno de agua al caer en él una piedra del tamaño de la mano. Este ejemplo es especial porque podemos *ver* cómo evolucionan las ondas en la superficie. Estas se propagan en el agua (o en cualquier otro líquido) debido a la acción de dos fuerzas: la gravedad y la tensión superficial.Cuál de ellas predomina depende de la velocidad de propagación y de la frecuencia de la onda. Las ondas oceánicas están gobernadas por la gravedad, mientras que en un estanque como el de nuestro ejemplo, están gobernadas por la tensión superficial o por una combinación de las dos fuerzas. Para la teoría de rayos esto no es importante. Lo único que interesa es que la longitud de onda sea corta, es decir, que los frentes de onda estén bien definidos en relación a las dimensiones lineales del estanque.

FENÓMENOS ONDULATORIOS.

En la naturaleza existen fenómenos ondulatorios que podemos observar sin necesidad de equipo especial. Una piedra que cae en un estanque lleno de agua, produce una onda que se propaga de tal manera que *vemos* en la superficie un conjunto de círculos concéntricos cuyos radios crecen mientras el tiempo pasa (Figura 1). Si hay obstáculos, los frentes de onda interaccionan con ellos *reflejándose, refractándose y difractándose* para formar esquemas geométricos caprichosos. Muchas preguntas surgen de inmediato: Eso que se mueve, ¿implica transporte de materia? ¿hay una transferencia de energía entre el punto en que se producen las ondas y cualquier otro punto que alcanzan? ¿esas figuras son círculos perfectos? ¿Es posible que en otro estanque no se formen círculos, sino alguna otra figura geométrica?

Si observamos de cerca, vemos una ola pequeña, con crestas y depresiones, semejante a la Figura 1(c), que se propaga de manera que su altura decrece en tamaño conforme se aleja del punto donde se formó. Estas observaciones nos estimulan más preguntas: ¿Qué tiene que ver la altura de la cresta (la amplitud) con la distancia (el radio)? ¿Por qué no aumenta la amplitud

con la distancia, en lugar de hacerse más pequeña? Podemos pensar en muchas más preguntas que nos llevarían a los libros de física o a los especialistas. Al contestarlas, descubriríamos la teoría de ondas, y como una alternativa, la teoría de rayos.

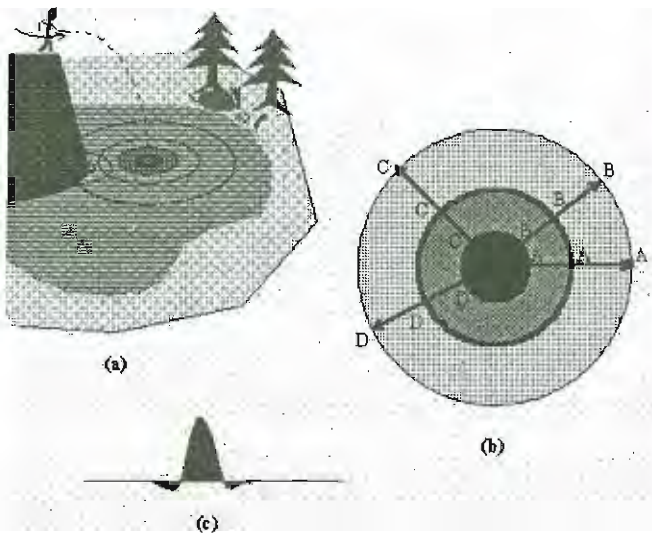


Figura 1. (a) Una piedra cae en un estanque produciendo ondas que se propagan formando círculos concéntricos. (b) Frentes de onda y rayos vistos desde arriba. (c) Desplazamiento de las partículas de agua (amplitud de la onda).

El comportamiento descrito en este ejemplo es característico de las ondas, pero son muy pocos los casos donde es posible observarlo directamente. Las ondas producidas por un terremoto se propagan por el interior de la Tierra, del mar, o de ambos y no podemos verlas; la luz visible es una onda electromagnética cuyos detalles no podemos observar; el sonido, aún dentro del rango audible, también nos es inalcanzable en ese sentido. *Sólo sentimos sus efectos* (Figura 2).

UNA ONDA ES UNA PERTURBACIÓN QUE SE PROPAGA

Una onda es una perturbación que se propaga (Ingard y Kraushaar, 1960; Crawford, 1963). En nuestro ejemplo, podemos hacer el siguiente experimento: pongamos un pequeño barco de papel en el agua, y dejemos caer la piedra. Un tiempo después de que la piedra toca el agua una ola alcanza al barquito, que ejecuta un movimiento aproximadamente circular con la frecuencia de la onda *alrededor de su posición original*, mientras la ola (onda) pasa. Si hubiese acarreo de material en la dirección de propagación, el barquito se desplazaría en esa dirección. Puesto que lo que ocurre es más bien un movimiento de boya; se concluye que lo que se propaga es una perturbación. Antes de que la onda llegue a un punto dado, la superficie del agua se encuentra en reposo. Cuando la onda llega, perturba a las partículas de agua, y cuando ya ha pasado, el agua queda otra vez en reposo, hasta que una nueva ola la alcance. Examinando

el movimiento del barquito, podemos determinar que la onda está caracterizada por una cierta frecuencia o periodo y una cierta longitud de onda, que es el producto de la velocidad de propagación por el periodo.

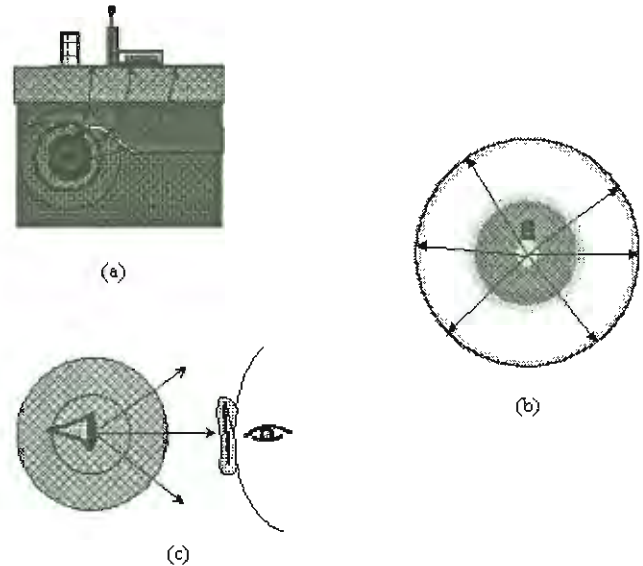


Figura 2. Ejemplos de frentes de onda circulares y sus rayos. En (a) (terremoto) los rayos son curvos porque se refractan en las capas internas de la Tierra, a veces de manera continua. En (b) (luz visible) y (c) (sonido) los rayos son rectos porque los medios respectivos tienen velocidad de propagación constante.

La primera ola que llega a un lugar determinado divide a la superficie del agua en dos regiones: una interior al círculo correspondiente (región perturbada) y una exterior (región no perturbada). Esta frontera entre las dos regiones se denomina "frente de onda" (Figuras 1 y 2). Para ondas en medios materiales, la perturbación es el desplazamiento de las partículas del medio y la onda es sonido. Cuando la onda es electromagnética, la existencia del medio no es necesaria y la perturbación es el campo electromagnético mismo.

LA ONDA SE PROPAGA CON UNA VELOCIDAD CARACTERÍSTICA

Si medimos la distancia que se expande el frente de onda en una dirección radial durante un segundo, obtendremos su velocidad de propagación. Si repetimos el experimento usando otros líquidos, encontramos, en general, una velocidad diferente, demostrando que la velocidad de propagación de la onda es característica del material. Esta velocidad depende de la densidad del material y de otras propiedades del mismo, conocidas como los "módulos elásticos", que describen cosas como su rigidez, su grado de plasticidad, o su viscosidad. Estos conceptos tienen una interpretación intuitiva bastante clara, por ejemplo: los fluidos (líquidos, gases) tienen una rigidez casi nula, mientras que la mayor parte de los sólidos tienen alta rigidez.

Hemos visto que hay dos tipos de movimiento en una onda. Uno es una perturbación y ocurre en la vecindad de un punto fijo (movimiento de partícula o campo electromagnético), el otro es la propagación de esa perturbación. Podemos ahora preguntarnos qué tan rápido es el desplazamiento de la partícula, y qué tan rápido se propaga. En el primer caso, hablamos de la velocidad de partícula (o de la variación del campo) y en el segundo, de la "velocidad de propagación" de la onda. Esta velocidad puede depender de si el estanque es profundo, somero, o somero y de profundidad variable, etc. Éstas son algunas de las posibilidades reales en el mar. Las observaciones efectuadas en el mar nos dicen que donde la profundidad es pequeña, la velocidad de propagación depende de ella; en regiones donde la profundidad es muy grande, no depende de ella y, en lugares donde la profundidad es pequeña y variable (como, por ejemplo, cerca de las costas), no sólo depende de ella, sino que además, los frentes de onda ya no son necesariamente circulares. En el mar existen factores que lo apartan del estanque ideal, como las mareas, las corrientes y las variaciones de salinidad y temperatura, que afectan a la propagación.

En materiales sólidos pueden existir dos tipos diferentes de onda: las de movimiento longitudinal, o paralelo a la dirección de propagación, llamadas ondas P (primarias) porque llegan primero debido a que su velocidad es mayor, y las de movimiento transversal, llamadas ondas S (secundarias); éstas últimas no se propagan en medios fluidos. Explicar estas posibilidades está fuera de nuestro propósito, pero la teoría de rayos vale para todas.

LA TEORÍA DE RAYOS

La teoría de rayos (Kline y Kay, 1965; Luneburg, 1966; Cerveny y Ravindra, 1971) es una técnica matemática que nos permite resolver problemas de física de ondas de una manera aproximada, pero correcta y con la precisión suficiente como para que sea útil. Se le identifica con la óptica geométrica, ya que las soluciones que se obtienen mediante su uso coinciden con las de ésta. La idea central de la teoría es la de "rayo".

Las propiedades de los rayos no son obvias. Fueron necesarios más de 1700 años tan sólo para llegar a la ley de Snell (ver caja 1) y aunque todos estamos en contacto frecuente con la luz, es difícil darse cuenta de cuándo un haz de rayos de luz se difracta, cuándo forma una cáustica, o cuándo interfiere constructiva o destructivamente. Estos fenómenos se pueden observar sin necesidad de instrumentos especiales o de un laboratorio sólo en algunos casos, pero la fenomenología de los rayos se encuentra presente en todos los procesos ondulatorios de altas frecuencias.

La teoría de rayos es relativamente nueva, y la mayoría de sus aplicaciones lo son aún más. Ésto se debe, en parte, al muy reciente desarrollo de las computadoras y de las técnicas de computación numérica. En lo que sigue, expondremos de una manera intuitiva sus bases, para terminar con una sección en la que veremos algunas de sus aplicaciones.

CAJA 1

Breve Historia de la Ley de Snell

En el año 62 A. C., un inventor, escritor y científico griego, Herón de Alejandría, reportaba que cuando la luz se refleja en una superficie, lo hace a un ángulo igual al de incidencia y hacía intentos por estudiar la refracción, motivado, tal vez, por la observación de remos sumergidos en el agua, aparentemente rotos. Más tarde, en 140 D. C., Ptolomeo, a la sazón curador de la biblioteca de Alejandría, observó que los rayos de luz se desviaban al pasar de un medio a otro, y sugirió que los ángulos de refracción y de incidencia podrían ser proporcionales, lo cual es cierto para ángulos pequeños. A partir de estas ideas, señaló que la luz de una estrella podría refractarse al entrar a la atmósfera, haciendo que se vea en una posición aparente.

Tanto Herón y Ptolomeo, como Euclides siglos antes, sostenían la teoría de que la vista es posible porque los ojos emiten rayos de luz hacia el objeto de la misma. A principios del siglo XI, el rabe Alhazen (Alí Al-Hasan Ibn Al-Haytham) de Basora, escribió un libro llamado "El Tesoro de la Óptica", donde se opuso a la teoría de Euclides y Ptolomeo, y afirmó que "...más bien es la forma del objeto percibido la que pasa hacia adentro del ojo y es transmutada por su "cuerpo transparente". Alhazen examinó la refracción de la luz y llegó muy cerca de una exposición teórica sobre los lentes de aumento, algo que ocurrió hasta varios siglos después.

En 1604, Kepler reportó sus mediciones de los rayos incidentes y reflejados en casos especiales, pero no pudo llegar a una ley general. Fue hasta 1621 que el holandés Willebrord Snell tuvo éxito al formular su famosa ley:

$$\frac{\sin i_1}{V_1} = \frac{\sin i_2}{V_2}$$

Los fenómenos ondulatorios están gobernados por alguna de una clase de ecuaciones llamadas "ecuaciones de onda". Es trabajo de los físicos resolver este tipo de ecuaciones, y es precisamente la forma de la velocidad V la que determina si se pueden resolver. Una vez obtenida una solución, es posible aplicarla de diferentes maneras. Para medios con velocidades simples (por ejemplo, medios de velocidad constante), la solución completa se puede obtener y la teoría de rayos no es necesaria. Para medios con distribuciones de velocidad complejas una solución analítica completa no es posible. La estrategia a seguir en este caso es representar el medio usando un mosaico de regiones donde la solución es conocida, y aplicar la teoría de rayos. Esto consiste en dos pasos: primero, trazar los rayos necesarios, y luego determinar la amplitud de la onda en cualquier punto de ellos. El primer paso equivale a obtener la solución de una ecuación llamada la "eiconal", y el segundo equivale a obtener la solución de una tercera ecuación, llamada "de transporte". Salvo por la fase, y para altas frecuencias, lo que se ha hecho es sustituir la ecuación completa por dos ecuaciones equivalentes.

RAYOS Y FRENTE DE ONDA

Si encendemos una lámpara, vemos que la luz se esparce en todas direcciones en línea recta. Cada una de esas líneas rectas es un rayo. En el caso del estanque, podemos pensar en el punto donde cae la piedra como si fuera un foco que produce "luz". La analogía nos lleva a considerar las líneas radiales que emergen de ese punto en todas direcciones como los correspondientes rayos. Encontramos entonces que los rayos y los frentes de onda son perpendiculares entre sí. Éste es un resultado muy importante, aunque no es el caso más general. Un material que exhibe este comportamiento se llama "isotrópico".

Un rayo es una trayectoria, es el camino que sigue un punto fijo sobre un frente de onda. Para entender mejor esto, volvamos al ejemplo (Figura 1): si marcamos un punto particular sobre un frente de onda en un círculo cada vez más grande, estaremos siguiendo (trazando) el rayo "A". Conforme el tiempo pasa, el frente de onda se convierte en un círculo cada vez más grande, formado por una infinidad de puntos B, C, D, etc., todos ellos semejantes a A. Cada uno de estos puntos traza un rayo, y en este caso particular, una línea recta. Si la velocidad de propagación no fuera constante los rayos serían curvos, como sucede en el caso de un terremoto profundo (Figura 2(a)). En muchos problemas de interés, la velocidad varía tan lentamente con la distancia en una dirección particular, que podemos simular el medio usando capas de velocidad constante. Ésto es válido para algunas regiones de la Tierra, ya sea sólida, o en el mar, pero en otras regiones esta suposición no es aceptable y necesitamos trazar rayos curvos.

Los métodos que encuentran las trayectorias de la energía acarreada por las ondas en los diferentes tipos de modelos se conocen con el nombre genérico de "trazado de rayos". Solamente las formas más simples de velocidad han sido resueltas analíticamente en el trazado de rayos. Las soluciones así obtenidas se usan en modelos compuestos de capas planas o de celdas triangulares o rectangulares, como se ve en la Figura 3, dentro de las cuales podemos trazar los rayos correctamente.

Existen dos clases de trazado de rayos: (Julian y Gubbins, 1972) el llamado "problema de dos puntos" y el llamado "por disparo" (ver Figura 3). En el primero, estamos interesados en encontrar el rayo correcto que parte de una fuente y llega a un punto específico. Este método funciona bajo el *Principio de Fermat*, que dice que el rayo correcto es aquel cuyo tiempo de tránsito es mínimo o máximo. En el segundo, nos interesa generar un conjunto de rayos que parten de una fuente, independientemente de sus puntos finales. Este método usa soluciones que satisfacen el Principio de Fermat. Cuál de los problemas escojamos resolver depende del propósito de nuestro trabajo, pero en general, lo que queremos es poder determinar el *tiempo de recorrido y la amplitud (y la fase)* de la onda en el o los puntos finales o ir viendo con qué chocan, o por dónde se van, los rayos.

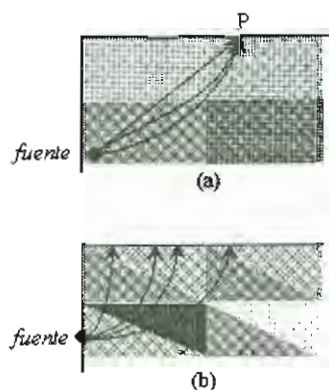


Figura 3. Trazado de rayos. (a) Problema de dos puntos: la fuente y el receptor están fijos. El rayo correcto es el de tiempo mínimo (Principio de Fermat); (b) Método del disparo, aquí solo la fuente está fija.

El trazado de rayos se basa en los procesos de reflexión y refracción. Estos procesos ocurren cuando las ondas interaccionan con fronteras entre medios con velocidad diferente. La reflexión es un rebote de las ondas en una frontera, sin cambiar de medio. La refracción es la transmisión de la onda a través de la frontera. Un ejemplo claro de refracción lo tenemos cuando vemos un bastón sumergido en un líquido. La luz cambia del aire al líquido, y al revés, y el efecto visual es que el bastón parece estar quebrado. La reflexión y la refracción se pueden sumarizar mediante la llamada "ley de Snell", (caja 1) que dice que cuando un rayo cambia de medio, el plano de los dos rayos contiene a la normal a la superficie, y los senos de los ángulos de incidencia y de refracción están en una razón constante (Figura 4) llamada el índice refractivo.

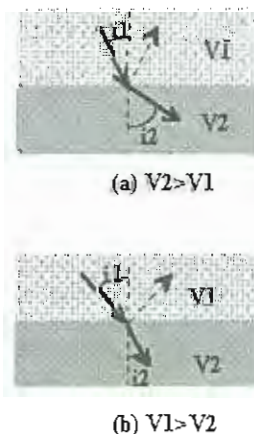


Figura 4. En (a) el rayo se aleja de la normal a la superficie porque $V_2 > V_1$; en (b) sucede lo contrario.

El hecho de que el barquito oscile nos indica que la onda transfiere energía. En la teoría de rayos, los rayos forman "tubos" y se supone que la energía contenida en un tubo permanece siempre dentro del mismo, es decir, no hay fugas de energía hacia los lados. Esta suposición, que en muchos casos es prácticamente cierta, nos permite determinar la amplitud de la

onda en cualquier punto a lo largo de los rayos, pero no nos dice nada de la fase. Esta es una de las debilidades de la teoría de rayos que debe ser suplementada por otros medios.

Una vez que los rayos se han trazado, las cantidades de la onda se evalúan a lo largo de ellos. Para entender este paso, que es la solución de la ecuación de transporte, considérense los frentes de onda A y B de la Figura 5 (a) en un medio de densidad y velocidad homogéneas, a un cierto tiempo. En un tiempo dado, A se expande a A' y B a B'. Puesto que la velocidad de propagación es la misma, el área del anillo AA' es menor que la del anillo BB', pero la energía contenida en ambos es la misma. Esto nos permite relacionar las amplitudes en las dos regiones, de modo que, sabiendo la amplitud en la región interior, podemos conocer la de la exterior, es decir, podemos "transportar" la solución a lo largo de los rayos. En el ejemplo mostrado en la Figura 5(a), la amplitud de la onda es menor en el segundo intervalo (BB') que en el primero (AA') si la superficie del segundo, como se ilustra, es mayor que la del primero (es decir, si el frente de onda se expande) y la velocidad V tiene un valor adecuado. Esto es lógico si pensamos que la misma energía está contenida en un volumen mayor. Bajo este argumento, es también lógico pensar que, si el medio pudiera hacer que los rayos no se separen, como en la Figura 5(b), sino que se junten, es decir, que el frente de onda no se expanda, sino que se contraiga, la amplitud podría aumentar. Esto es posible y correcto, y existen sospechas de que un mecanismo de este tipo puede ser responsable de las grandes amplitudes registradas en algunos terremotos altamente destructivos.

Análogamente a la ley de Snell, que conecta geoméricamente los rayos en las fronteras entre medios, es posible encontrar coeficientes de reflexión y de transmisión que conectan a las amplitudes.

DIFRACCIÓN Y CÁUSTICAS

La estructura del medio puede ser tal que algunas regiones del mismo no son iluminadas, es decir, a esas regiones no llegan rayos. Sin embargo, la experiencia nos indica que aún ahí existen amplitudes. Esto se puede observar con luz visible proyectando la sombra de la arista de un cuerpo sólido sobre una pantalla. Si la luz fuera transmitida sólo a lo largo de rayos, la división entre la región iluminada y la de sombra sería abrupta, como en la Figura 6(a). En vez de eso, encontramos una zona de penumbras. Esta zona se explica diciendo que la luz se "difracta" en la arista.

La superficie que divide la región iluminada de la no iluminada, se denomina una "cáustica". La cáustica es un rayo límite o un lugar de convergencia de rayos (una envolvente) como se ilustra en la Figura 6(b). Se puede observar en casa si iluminamos un vaso de vidrio con cualquier clase de luz visible, como una proyección de zonas muy brillantes bordeadas de zonas de fuertes sombras y penumbras. En la Tierra, las ondas producidas por grandes terremotos forman cáusticas debido a que el material que forma el núcleo difiere en velocidad de

propagación de onda del material que forma el manto (ver Figura 10). En las regiones donde se forman las envolventes, los sismos exhiben mayores amplitudes. Por ejemplo, en la vecindad del punto A de la Figura 6 (b) los rayos convergen, y el frente de onda se contrae, dando amplitudes mayores. El argumento no vale para rayos difractados. Esta es otra de las fallas críticas de la teoría de rayos.

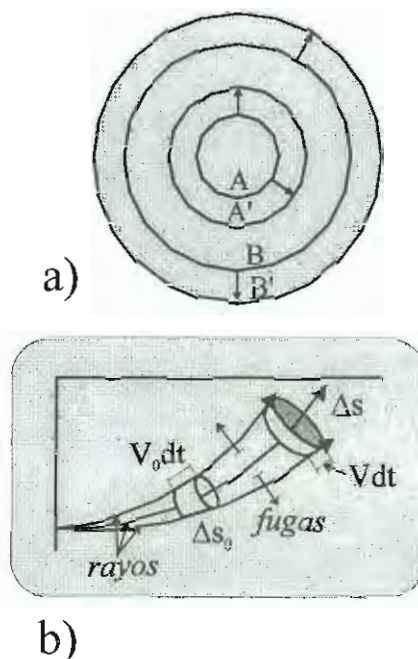


Figura 5(a) La cantidad de energía en el volumen expandido AA' es la misma que en el volumen expandido BB'. Puesto que el volumen BB' es mayor que el volumen AA', la amplitud en el primero tiene que ser mayor que en el segundo; 5(b) un tubo de rayos está formado por una infinidad de rayos como los que se ilustran. La suposición básica es que no hay fugas en dirección perpendicular a la del tubo. Entonces la energía se conserva íntegra dentro del tubo. Ésto nos permite calcular la amplitud de la onda en cualquier punto.

APLICACIONES DE LA TEORÍA DE RAYOS

Las aplicaciones de la teoría de rayos son numerosas, y pueden ser pasivas o activas. Las activas son verdaderas "linternas" que usan la onda más adecuada para hacer un barrido del medio (sonido en el mar y en tierra sólida, radiación electromagnética en la atmósfera, en el espacio, y en tierra sólida) e interpretan los ecos. Las pasivas reciben la radiación producida por otras fuentes. Entre las activas, destaca el radar (Singer, 1959). "Radar" es una abreviación de la frase "*radio detecting and ranging*" (Figura 7 (a)). Este instrumento está compuesto por un potente transmisor y un receptor de ondas de radio que, una vez emitidas, se reflejan en objetos dentro de un cierto radio de detección. Una pequeña fracción de la energía emitida regresa como un eco al receptor, que usualmente se encuentra en el mismo lugar que el emisor. Ahí, el eco recibido se procesa para determinar las propiedades del objeto que lo causó, en particular su distancia y su velocidad.

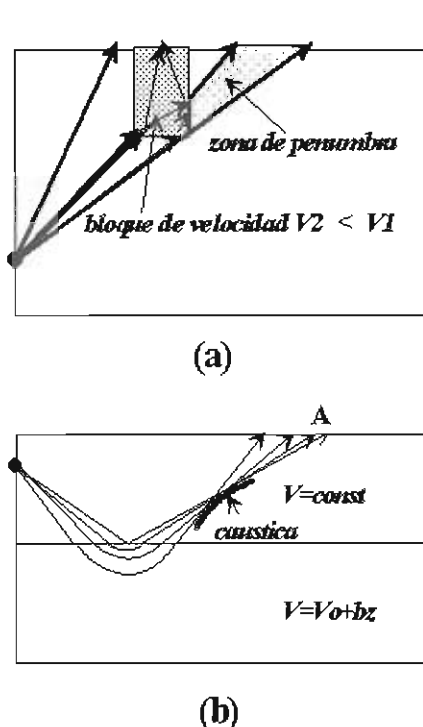


Figura 6. Formación de cáusticas. En (a) el haz de rayos ilumina un bloque de menor velocidad que el medio que lo rodea. La cáustica es uno de los rayos del haz. En (b) el modelo consiste de una capa de velocidad constante sobre una capa con una velocidad que varía con la profundidad. La cáustica es la envolvente de los primeros rayos transmitidos.

Existen varios sistemas de radar que hacen uso de diferentes propiedades del eco recibido, pero el más común es el de "pulso", llamado así porque el transmisor envía "paquetes" de ondas o pulsos muy intensos y breves, separados por un intervalo de tiempo relativamente largo, de manera de poder evaluar la distancia de un objeto reflector según sea la posición de su eco dentro del intervalo.

El principio del radar tiene aplicación en la meteorología, en la cartografía y en la observación del espacio exterior a través de grandes radiotelescopios. Recientemente se han desarrollado técnicas de radar capaces de operar en medios sólidos (Enciclopedia Británica, bajo RADAR), como el hielo o la Tierra. Estas técnicas, conocidas genéricamente como GPR (*ground penetrating radar*) emplean ondas de radio a frecuencias de entre uno y mil MHz para sondear la estructura del suelo y sus posibles anomalías o detectar objetos enterrados. Estas técnicas usan los mismos métodos que la exploración petrolera (ver siguientes párrafos). El modo de operación más común consiste de la obtención de perfiles de reflexión simple con variaciones en el arreglo de las antenas (Figura 7(b)).

Aunque la idea de usar ondas de radio para sondear la estructura interna del suelo no es nueva, la aplicación de las técnicas GPR se considera aún en pañales. En tierra, los trabajos con GPR se iniciaron por los 1970, y conforme las capacidades y debilidades del método se fueron conociendo, éste se amplió

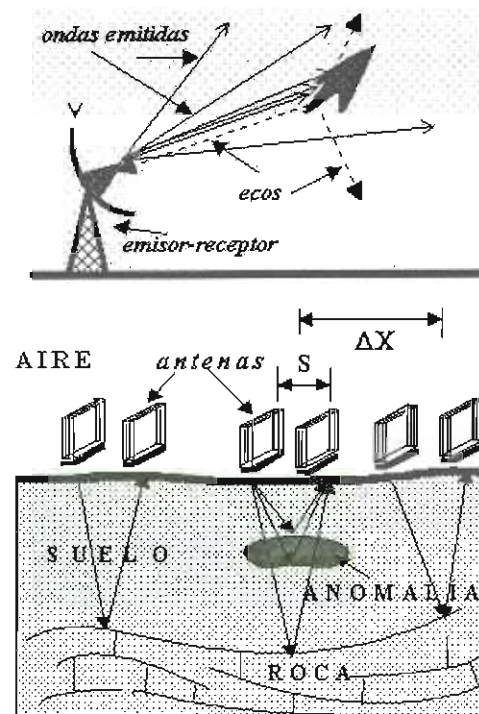


Figura 7. (a) Radar. Sus usos abarcan muchos campos; (b). Aplicaciones del radar en tierra firme.

hacia otras áreas. Entre los trabajos más importantes realizados hasta ahora, se encuentra la determinación del espesor de las capas de hielo en el Ártico y en la Antártida. Estas técnicas de radar están encontrando importantes aplicaciones dentro de la ingeniería civil o sísmica, en el sondeo no destructivo de estructuras no metálicas.

En años recientes la importancia del radar ha crecido al encontrarse más aplicaciones en oceanografía y meteorología. Una variedad de radar llamado "sobre el horizonte" (*over the horizon*) u OTH, que fué construido durante la guerra fría para detectar blancos militares más allá del horizonte óptico, usa ondas de radio de entre 5 y 28 Mhz que se reflejan en la ionósfera, cubriendo hasta 3,500 km en un "salto". Actualmente, seis de estos radares, residuos de un proyecto militar, cubren 90 millones de kilómetros cuadrados de océano abierto en un continuo monitoreo de sus características dinámicas. Una celda de resolución en la superficie del océano puede tener una área mínima de hasta 10 km cuadrados.

Otra variedad de radar llamado "radar de ondas de superficie" (SWR), porque usa ondas difractadas que viajan por la superficie curva del océano, es capaz de discriminar entre ecos de posibles blancos y el eco del mar, usando el llamado efecto Doppler. Sus rangos de alcance son grandes (hasta 500 km) debido a que usa ondas electromagnéticas polarizadas de alta frecuencia (3-30 Mhz) que sufren muy baja atenuación al propagarse por la superficie del mar. Una versión acuática (sonar (Davis y Annan, 1989), ecosonda, Figura 8) del mismo instrumento, que usa ondas acústicas en el rango audible o en el de ultrasonido incide en actividades de importancia

CAJA 2

El desarrollo del radar

El desarrollo del radar ocurrió simultáneamente en varios países bajo el nombre de "detección por radio", durante los años anteriores a la II Guerra. En la década de los 1870, James Clerk Maxwell había publicado sus trabajos sobre la naturaleza de la luz y de la radiación, y diez años más tarde, Heinrich H. Hertz, buscando comprobación a las teorías de Maxwell, producía ondas de radio en el laboratorio, demostrando que podían reflejarse en objetos metálicos de la misma manera que la luz se refleja en los espejos. Estos descubrimientos fueron el punto de partida de una serie de exitosas investigaciones en radiocomunicación, pero el interés por la radio-detección habría aún de esperar.

En 1900, el famoso experimentador Nicola Tesla escribió en el Century Magazine que "por medio de las ondas de radio, un objeto en movimiento podría ser detectado y localizado".

En 1904 un ingeniero alemán, Christian Hülsmeyer, desarrolló una forma simple de radar para evitar colisiones entre barcos. Su invento obtuvo patentes en varios países, pero no había interés en el momento por tales dispositivos.

En 1925 el llamado "principio del pulso" fue desarrollado en Carnegie, Washington, D. C., por G. Breit y M. A. Tuve, mientras trabajaban con radioondas en la ionósfera. En la década de los treinta, los alemanes ya habían producido excelentes radiodetectores de barcos y aviones.

El desarrollo subsecuente del radar estuvo fuertemente ligado a la guerra. La necesidad de producir haces muy enfocados de gran energía era especialmente importante para la aviación, debido a la posibilidad de que la energía reflejada del suelo o del mar oscureciera los ecos, mucho más débiles, de los blancos buscados. Los haces muy concentrados de radiación se producen por medio de antenas muy grandes o de ondas de muy alta frecuencia. Puesto que los aviones no pueden llevar grandes antenas, se optó por la otra posibilidad, buscando un radio transmisor que produjera pulsos de muy alta potencia a longitudes de onda de unos cuantos centímetros.

A principios de 1940, los británicos desarrollaron el magnetrón de multicavidades, una válvula electrónica que entrega pulsos de 10 kilowatts de potencia, abriendo paso a una nueva época en la investigación y el uso del radar: la del radar de microondas.

económica, como lo son la pesca de cardúmenes, la cartografía del suelo oceánico (ecosonda) y la tristemente célebre caza de ballenas. El interior del mar es un mal transmisor de ondas electromagnéticas, en tanto que es un transmisor relativamente bueno de ondas de sonido. Esto ha permitido, a pesar de ser más difícil producir un haz de rayos acústicos que de luz o de ondas de radio, el desarrollo de un instrumento análogo al radar. El haz se logra haciendo la longitud de onda suficientemente pequeña (alta frecuencia) comparada con las dimensiones de la fuente. El sonar se puede usar pasivamente para detectar fuentes de sonido, tales como submarinos, ballenas o barcos, o puede enviar, como el radar, una señal para recoger su eco. De esta manera se utiliza en la detección de ballenas, objetos hundidos y cardúmenes.

El problema de abastecimiento de combustible es de la mayor importancia económica y está íntimamente relacionado al conocimiento de la geología (Burn, 1972). Para poder extraer petróleo del subsuelo es menester perforarlo, lo cual es costoso, ya que típicamente se deben perforar varios miles de metros.

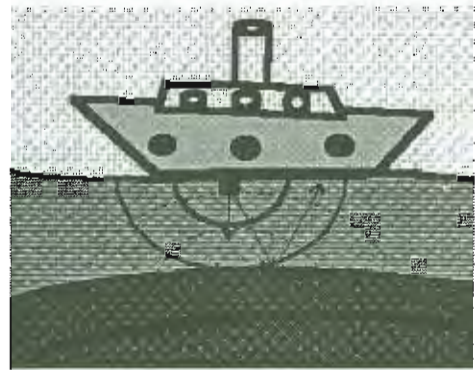


Figura 8. Sonar, la versión acuática del radar.

Lo ideal entonces es perforar el mínimo de veces posible. La selección de los sitios de perforación se basa en estudios geológicos y geofísicos, en algunos de los cuales la teoría de rayos es una de las principales herramientas. La Figura 9 muestra una técnica de exploración petrolera en el mar. Las ondas se generan en un dispositivo neumático colocado en el barco, y las reflexiones o ecos se registran en un sistema de sensores (hidrófonos) que son arrastrados por el barco para grabar reflexiones casi verticales. En esta aplicación, la teoría de rayos se combina con otros métodos como la teoría de inversión (Herman, *et al*, 1987) de datos o la migración de trazas sísmicas para producir una imagen (modelo) del medio capaz de explicar las observaciones (tiempo de tránsito y amplitudes) cuando se usa para resolver el problema directo. Esta imagen se logra después de modificar el modelo el número de veces necesario para que los datos reales y los resultados del modelo se parezcan. Éstos se comparan en cada cambio de modelo para tomar una decisión respecto a suspender el proceso o continuarlo.

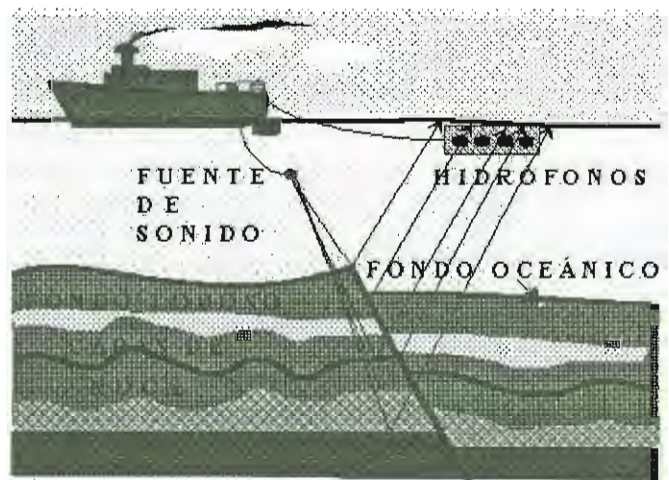
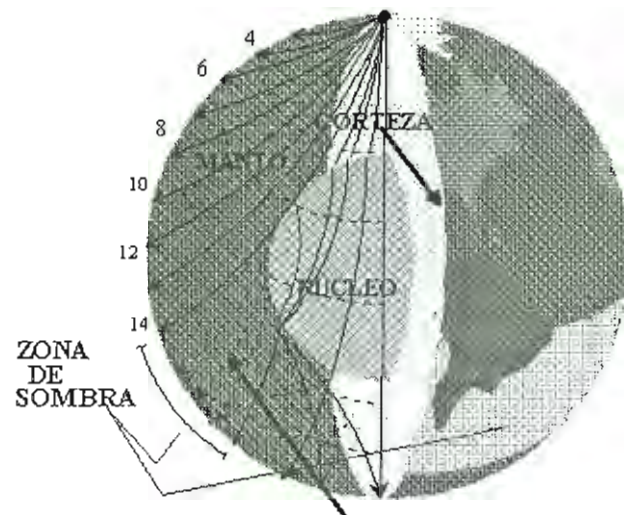


Figura 9. Exploración petrolera en la plataforma oceánica.

Para la década de los cincuenta, la estructura del interior de la Tierra (Figuras 10 y 11) ya era bastante conocida gracias al trabajo de muchos geofísicos, quienes compararon las observaciones de tiempos de recorrido y las amplitudes de grandes terremotos con los resultados obtenidos usando la teoría de rayos en modelos de la Tierra. Al principio, estos modelos eran de capas de velocidad constante, y se modificaban mediante

la técnica de ensayo y error. Aunque esta forma de trabajo es lenta y difícil, los resultados obtenidos fueron muy satisfactorios. Pronto, se planteó la necesidad de refinar tanto las observaciones como la teoría, lo que llevó al uso de modelos más realistas, al diseño de nuevos instrumentos y a la investigación de nuevas metodologías de trabajo.

La Figura 10 presenta la distribución de rayos y frentes de la onda P para un terremoto cuyo foco está situado en el polo Norte. Nótese los rayos difractados en la zona de sombra, y las refracciones en la frontera núcleo-manto. Nótese también que la zona de sombras comienza en el rayo que pasa rasando el núcleo. La Figura 11 muestra un procedimiento estándar para la investigación sismológica de la corteza y del manto superior usando los tiempos de recorrido de las ondas P producidas por explosiones.



RAYOS Y FRENTES DE ONDA DIFRACTADOS

Figura 10. La estructura de la Tierra y los rayos P asociados con ella.

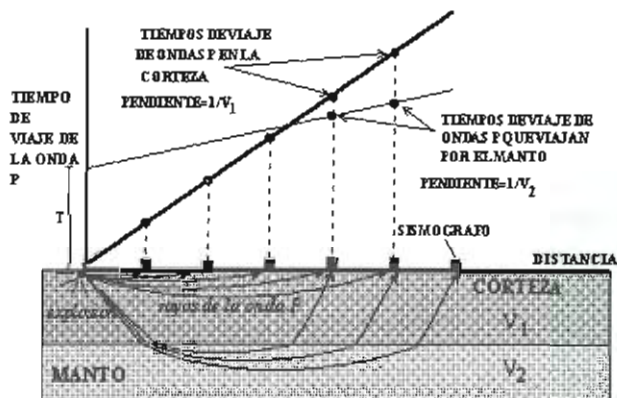


Figura 11. Investigación de la estructura de la corteza y el manto usando los tiempos de tránsito de las ondas P producidas por explosiones.

CONCLUSIONES

Cuando es aplicable, la Teoría de rayos consiste en la sustitución de una ecuación "completa" (la ecuación de onda) por dos ecuaciones que constituyen una aproximación de alta frecuencia a la solución de la primera. Resolviendo la ecuación eiconal se obtiene el tiempo de tránsito de la onda y los rayos, y la solución de la ecuación de transporte da las cantidades de la onda (amplitud, energía, etc.) en cualquier punto a lo largo de los rayos. Mientras mayor es la frecuencia, más se parece la solución de estas dos ecuaciones a la solución de la ecuación completa. Esto permite dos cosas: (1) crear las condiciones para que la solución sea aplicable en diferentes medios físicos y (2) habilitar esa solución para medios muy complejos, donde no es posible obtener la solución completa. En instrumentos como el radar, estas condiciones se logran generando señales de muy alta frecuencia y barriendo el medio para introducir un efecto direccional, como si se tratara de una linterna intermitente en rotación continua, con una velocidad de rotación adecuada para registrar respuestas dentro de un radio dado. En general, estas señales deben ser de gran potencia.



Figura 12. Dos ejemplos de imágenes creadas usando trazado de rayos.

La teoría de rayos ha sido superada por otros métodos en algunas de las aplicaciones aquí mencionadas, pero han surgido nuevas aplicaciones, tales como el diseño y la manipulación de objetos en tres dimensiones. El trazado de rayos y la programación por objetos se combinan en esa área para crear imágenes fotorrealistas. Dichas imágenes son indistinguibles de fotografías de muy alta calidad (Figura 12), y se pueden generar en computadoras personales ordinarias. Esta aplicación del trazado de rayos consiste en describir un mundo virtual de formas geométricas, colores, texturas, efectos de iluminación y una "cámara" (o un ojo) que registra lo que se ve y como se ve en el mundo virtual, incluyendo tantas fuentes de luz como sean necesarias y todos los efectos que sufren los rayos de luz al incidir sobre los objetos del mundo. La programación por objetos facilita la tarea para, con un conjunto de objetos básicos, generar prácticamente cualquier objeto. La Figura 12 presenta dos ejemplos de imágenes que pueden elaborarse con trazado de rayos.

Entre las metodologías que surgieron durante el desarrollo de la Geofísica (aunque ya conocida en otras áreas) encontramos la antes mencionada "Teoría de Inversión". Al desarrollarse ésta, fue necesario hacer una distinción básica entre el problema directo y el problema inverso. Aunque ambos tienen el mismo objetivo, que es conocer el medio de interés (o la fuente, o ambas), las estrategias son diferentes. En el problema directo el medio y la fuente se suponen conocidos y se predicen las observaciones. Estas son cantidades asociadas con la teoría: el tiempo de tránsito de la onda, su amplitud, etc.. En el problema inverso se pretende inferir la estructura del medio (o la fuente, o ambos) a partir de las observaciones. En general, este procedimiento consiste de algún tipo de minimización de las diferencias entre las observaciones y los resultados de un modelo. Desde su aparición y sistematización, la teoría de inversión ha experimentado un continuo e importante desarrollo y se ha convertido en un tópico altamente especializado, hasta el grado de existir una revista específicamente para ella. Trataremos este tema de una manera amplia en otro artículo.

REFERENCIAS

- Burn, C. A., 1972, Global Tectonics and world resources, The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, Vol. 56, pp. 79-78.
- Cerveny, V., and Ravindra, R., 1971, Theory of seismic headwaves. University of Toronto Press, Toronto.
- Crawford, F.S., 1963, Waves and oscillations. Vol. III del *Curso de Física de la Universidad de California*. Berkeley.
- Davis, J. L. and Annan, A.P., 1989, Ground Penetrating Radar for High-Resolution Mapping of soil and Rock Stratigraphy. *Geophysical Prospecting* 37 531-551, 1989.
- Enciclopedia Britanica, bajo RADAR.
- Herman, G.T., Tuy, H.K., Langenberg, K.J. and Sabatier, P.C., 1987. Basic Methods of Tomography and Inverse Problems. Ed. P. C. Sabatier, Adam Hilger, Bristol y Filadelfia.
- Ingard, U. and Kraushaar, W.L., 1960, Introduction to mechanics, matter and waves. Addison-Wesley, Massachussets.
- Julian, B.R. and Gubbins, Db., 1972, Three dimensional seismic ray tracing, *Journal of Geophysical Resesarch*, Vol. 77, pp. 95-113.
- Kline, M. and Kay, I.W., 1965, Electromagnetic theory and geometrical optics. Series on pure and applied mathematics, Interscience Publishers.
- Luneburg, R.K., 1966, Mathematical theory of optics. University of California Press, Berkeley y Los Angeles.