

FUNDAMENTOS CONCEPTUALES Y DIDÁCTICOS

LAS ONDAS SÍSMICAS Y LA ESTRUCTURA INTERNA DE LA TIERRA: UNA APROXIMACIÓN DESDE LA HISTORIA DE LA CIENCIA *Seismic waves and the Earth interior structure: an approach from the science's history*

Myriam Llarena (*), Adela Cattapan (**) y Adriana De Luca (***)

RESUMEN

En este artículo se realiza una reconstrucción del proceso de evolución de los conocimientos que contribuyeron a inferir la estructura interna de la Tierra. Nos interesa centrar la atención en la incidencia que tuvo en el mismo los avances en el estudio del comportamiento de las ondas sísmicas, en tanto brinda al alumno una puerta de acceso al conocimiento desde lo que conoce: los terremotos. El recorrido se realiza desde la Historia de la Ciencia dado que es allí en donde se encuentran los distintos elementos que contribuyen al desarrollo de un concepto, es ella la que muestra las distintas etapas que marcan puntos de inflexión en el desarrollo del mismo, los obstáculos epistemológicos y / o tecnológicos que debieron ser superados como así también sus condicionantes sociales.

ABSTRACT

This article shows a reconstruction of science evolution and technological development that contributed to the knowledge of the Earth interior structure, underlining the science history significance. We are interested in showing how studies on seismic waves contributed to knowledge of earth interior. We go over the science history where we can find the different topics that contribute to concept's development. History shows the different stages that will distinguish inflection points of science evolution, epistemological obstacles and technological progress that worked together for concept's improvement, furthermore social conditions.

Palabras clave: Enseñanza de la Geofísica, Historia de la Ciencia, Epistemología, Estructura del Interior de la Tierra.

Keywords: Geophysics teaching, History of Science, Epistemology, Earth interior Structure

INTRODUCCIÓN

A pesar de vivir en una zona de frecuentes sismos, como es San Juan en la República Argentina, advertimos a través encuestas realizadas a niños, jóvenes y docentes universitarios, de áreas ajenas a la temática, el desconocimiento generalizado acerca de que las ondas sísmicas producidas por los terremotos -aquellos fenómenos que asociamos sólo a destrucción y muerte- permiten realizar inferencias sobre la estructura interna de la tierra.

Planteamos entonces algunos interrogantes a tener en cuenta cuando organizamos y planificamos el proceso de Enseñanza-Aprendizaje en relación con esta temática.

- ¿En qué momento histórico, social y cultural, se comienza a vislumbrar que las ondas sísmicas pueden brindarnos información acerca del interior de nuestro planeta? ¿Por qué sucede en ese momento y no antes?
- ¿Cómo se explicaba la estructura interna de la tierra antes de utilizar las ondas sísmicas? ¿Se plantearon distintas hipótesis? ¿Qué argumentos sustentaron la formulación de las mismas?
- ¿Qué criterios de validación se utilizaron en cada caso?

da caso?

Desde nuestro enfoque de Didáctica de la Ciencia, consideramos que abordar esta temática desde una visión histórica permitirá responder a los interrogantes planteados y al mismo tiempo comprender la paradoja que plantea la relación **ondas sísmicas - estructura interna de la tierra**: lo que destruye -sismos- construye conocimiento.

Considerando lo señalado por Kant, “la filosofía de la ciencia sin historia es vacía, la historia de la ciencia sin filosofía de la ciencia es ciega”, el abordaje histórico se realiza desde un análisis epistemológico. Éste permite investigar cómo se fueron construyendo los conceptos, las condiciones de acceso a los mismos, los métodos utilizados, el rol que desempeñó en cada momento la observación, la experiencia, el razonamiento, como así también el papel de la tecnología en los distintos momentos considerados. A través de la Epistemología podemos detectar los momentos críticos en el avance del conocimiento que evidencian cambios de rumbo producidos por supuestos ontológicos, nuevos marcos teóricos y / o innovaciones tecnológicas que permiten explicar el estado de conocimiento en cada uno de los momentos considerados.

Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales-Univ. Nacional de San Juan. Av. Ignacio de la Roza y Meglioli. Rivadavia (CP 5407) San Juan. Argentina E-mail: (*) mllarena@iinfo.unsj.edu.ar (**) acatapan@iinfo.unsj.edu.ar (***) adeluca@iinfo.unsj.edu.ar

Desde una concepción del conocimiento como proceso, se realiza un *análisis diacrónico* y teniendo en cuenta que el objeto de estudio pertenece a una ciencia con referencia empírica distante, en dicho análisis se consideran los aportes que desde la matemática, la física y la tecnología permitieron *transformaciones controladas* de ese objeto.

En este proceso, la interacción entre sujeto y objeto de conocimiento está mediatizada por el contexto de descubrimiento. Por ello se realiza además, un *análisis sincrónico*, para determinar los condicionantes que delimitan la capacidad común de objetividad de los sujetos de una determinada etapa histórica.

En la evolución del conocimiento bajo análisis se reconocen dos etapas, cuyo punto de inflexión está dado por el rol que desempeña en el mismo la información brindada por el registro de ondas sísmicas.

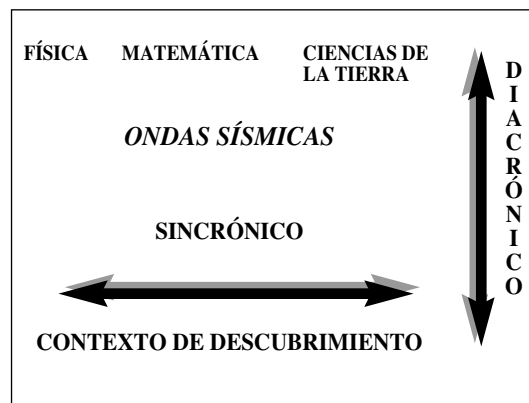
Siguiendo la clasificación de Bachelard (1948), estos momentos corresponden desde el punto de vista epistemológico, a un primer período de búsqueda de causas de terremotos en el que se realizan inferencias analógicas y otro, el denominado período científico, en el que contando con el marco teórico y la tecnología adecuada, es posible la realización de inferencias no analógicas que pueden ser constatadas.

El primer período comprende desde la Antigüedad y hasta el siglo XIX, en el que se pueden reconocer por sus características dos momentos epistemológicos:

- **Estado precientífico**, que se extiende desde la Antigüedad Clásica, hasta la revolución científica iniciada en el siglo XVII por Galileo.
- **Estado científico en preparación**, hasta fines del siglo XIX, en el cual se fueron desarrollando el marco conceptual y la tecnología que van a permitir realizar el trabajo científico de los sismólogos del siglo XX.

En el segundo período, que comienza a partir del siglo XX; la Sismología como una rama de la Geofísica, tiene como objeto de estudio la física del interior de la tierra, basándose en ondas sísmicas. Las investigaciones son realizadas por los sismólogos desde una perspectiva conceptual, que determinará qué investigar y delimitará criterios para especificar cuáles son las soluciones adecuadas a los interrogantes planteados. Perspectiva que además dará las bases para el desarrollo y utilización de la tecnología que permitirá *realizar experiencias controladas*.

Se destaca en cada una de las instancias referidas, los mecanismos de evolución de las nociones y el papel que en el desarrollo de los mismos, desempeñó el contexto social y tecnológico, este último como se verá, de fundamental importancia para nuestro objeto de estudio, ya que es el que permitirá *pasar de la realización de inferencias analógicas a inferencias constatables*, es decir que posibilitará la constatación en el campo empírico de las hipótesis o relaciones enunciadas en un cuerpo teórico.



Esquema general de análisis.

PERÍODO PRE-CIENTÍFICO: DE EXPLICACIONES ANTROPOMÓRFICAS A LA FORMULACIÓN DE LA PRIMERA HIPÓTESIS SOBRE LA CONSTITUCIÓN INTERNA DE NUESTRO PLANETA.

Los pueblos en la Edad Antigua y hasta el siglo VI AC, se caracterizan porque su interés está centrado en explicar la causa de los terremotos. Estos movimientos y en general las catástrofes provenientes de las misteriosas fuerzas de la naturaleza, les provoca desconcierto y miedo. La causa generalmente es un Dios o un demonio, *que funciona o actúa como lo hace el ser humano*. Atribuyen vida a todo lo que se mueve, por esto interpretan los *sucesos naturales como sucesos personales*, es decir, son realizados por alguien con más poder y por analogía con sus experiencias, suponen que responderá en forma intencional con reacciones propias de los seres humanos. Para realizar sus explicaciones recurren al mito o la magia.

PERIODO	ÉPOCA	ESTADO DEL CONOCIMIENTO
• Precientífico	<i>Desde Antigüedad hasta siglo XVII</i>	<i>Inferencias Analógicas</i>
• Científico en preparación	<i>Siglos XVIII y XIX</i>	<i>Desarrollo de marco conceptual que da fundamentos teóricos a la Sismología</i>
• Científico	<i>Siglo XX</i>	<i>Inferencias Constatables</i>

Algunos relatos mitológicos, se centran en la creencia que un ser sostiene la tierra y de vez en cuando la sacude. Así la leyenda griega, habla de Atlas que soporta el mundo en sus espaldas, que a veces se tambalea debido a su gran peso. En las leyendas Japonesas, es un gran pez dentro de la tierra el que con sus movimientos produce los terremotos; mientras en algunas regiones de Siberia, es un Dios que viaja con su trineo por debajo de la superficie.



Reproducción escultórica de Atlas levantando el mundo (British Museum of Natural History).

En el Etna, la leyenda de Encélado, aquel osa-do Titán a quién derribó Minerva con su cuadriga y Júpiter sujetó para siempre con la mole del cerro. Cuando Encélado se agita bajo el peso enorme que lo comprime y cuando respira, la montaña se estre-mece y surgen nubes de humo y fuego y lava por sus bocas. (Harrington, 1944)

El sadismo utilizado en estas explicaciones analógicas, en las que se apela al antropomorfis-mo, aumenta en las zonas en donde la intensidad de los terremotos y violencia de los volcanes es mayor.

Con la revolución del pensamiento en las colo-nias Griegas del Asia Menor, se pasa de la explica-ción de la realidad basada en *factores sobrenatura-les a una explicación racional de la misma*, buscando elementos naturales e impersonales que permitan explicar los fenómenos. Las explicaciones

en un principio están basadas en la búsqueda de un único elemento (agua, tierra, aire o fuego), siendo la combinación de estos cuatro elementos el patrón vigente desde Aristóteles y hasta la Edad Media. La causa de los terremotos es asignada a los obstáculos que estos elementos encuentran en la búsqueda de su lugar natural.

En estas explicaciones causales, las analogías no solo tienen características animistas- Aristóteles considera que todo lo que está en movimiento tiene vida- sino también hay un fuerte *sustancialismo*; es la sustancia la que tiene la propiedad de promover o evitar fenómenos, acciones... Supone la existencia de un núcleo de fuego en el interior de la tierra y afirma que vientos subterráneos que se calentarían por fricción, serían los responsables de las explosio-nes que producen los terremotos.

Coherente con su posición, esta explicación muestra que una sustancia, el aire, debido a los obs-táculos que encuentra en busca de su lugar natural, origina explosiones que producen los movimientos que percibimos.

El 13 de enero de 1915 un catastrófico terremoto afectó Italia. Varios pueblos de la región de los Abruzzos desaparecieron y la tragedia se saldó con un balance de más de 30.000 muertos.

En una edición del 31 de enero de 1915, el diario *La Ilustración* relata las tristes consecuencias del temblor sísmico y la visita del Rey Victor Manuel a las zonas afectadas. En una reciente reproduc-ción facsímil de la noticia, el periódico español *El Mundo* en su sección "El Diario del Siglo XX" nos permite conocer el profundo dolor que con-movió Italia. El periodista se hace eco de la catás-trofe e incluye algunas hipótesis explicativas sob-re el origen de los terremotos que reflejan el saber popular de la época.

"(...)¿Qué terrible misterio ocúltase en las entra-ñas de ese bello suelo de Italia, de esa tierra lumi-nosa cuya periferia con tantas galas nos brinda?"

¿Son, al decir de los primeros físicos como Talco y Acaminandro, las grandes infiltraciones de agua que las lluvias, los ríos y las tempestades del mar depositan en la tierra llegando a formar, con los años, grandes canales que van socavando la corteza terrestre?

¿Son, al decir de otros sabios de la antigüedad, Anaságoras y sus precursores, grandes mares de fuego interno, los que devorando las materias que más próximas tienen, acaban por provocar des-prendimientos que convulsionan la superficie?

¿Es la violencia de los vientos o la expulsión de aires contenidos en el interior de la Tierra que se debe el fenómeno terrible, como pensaron los pe-ripatéticos Arquelaos y Teofrasto?

La ciencia moderna no está aún de completo acuerdo acerca de la causa fundamental de los terremotos. (...) "

LA ILUSTRACIÓN, 31 de enero de 1915

En las descripciones acerca del origen de los terremotos que se realizan durante la Edad Media- período caracterizado por que la vida y las instituciones se rigen dentro de un marco religioso y trascendentalista- se perciben las dos tendencias filosóficas que se dan en el seno del cristianismo. Por un lado las *explicaciones de carácter místico* que asignan como única causa posible el cólera divina, y por otro explicaciones que muestran la influencia de Aristóteles.

En estas últimas el esquema conceptual que subyace es la *búsqueda de una explicación causal* que permita determinar el agente y su acción: el aire se mueve en busca de su lugar natural; es la sustancia la que determina como suceden los fenómenos.

Se observa una actitud diferente frente al objeto de estudio, respecto de lo que caracterizó el período anterior ya que no solamente se indican las causas y sustancias que “provocan los terremotos”, sino que hay una *búsqueda de condiciones* que permitirán hacer más comprensible el fenómeno y un intento de *sistematización* del mismo.

Por ejemplo, Galesius señala al Demonio y Porfirio como causantes de los terremotos a raíz de algún enojo. Indica que los terremotos se deben a las exhalaciones que se producen desde el interior por la interacción del aire, fuego, tierra y agua, que en forma de vientos ascienden a la superficie y en su recorrido se encuentran con obstáculos de diferentes tipos. La tierra se mueve con violencia dependiendo de la clase de obstáculos y la resistencia que a su paso van recibiendo. Su análisis continúa: “*Las zonas más frías de la tierra como los Polos, así como las más cálidas, son raramente sometidas a la acción de estas fuerzas devastadoras, porque el intenso frío de las primeras previene contra las exhalaciones desde el interior y el calor intenso de las zonas tórridas purifica las exhalaciones, por lo que pasan a través del aire encontrando poca resistencia a su paso. Las zonas templadas son aquellas en las que los terremotos se suceden más frecuentemente.*” (Adams, 1938)

Galesius clasifica los terremotos según su origen: en naturales y sobrenaturales; según la causa que los produce: de causas definidas o indefinidas, extrínsecas o provenientes del interior de la tierra, y según la dirección del movimiento que se percibe: “Vibratio”, que indica movimiento de un lado a otro, “Elatio”, movimiento hacia arriba, “Pulsus”, movimiento hacia abajo y hacia arriba etc.

Con la sistematización de lo observable, se reduce el papel de la fantasía y con esto se marcha hacia un mayor nivel de objetividad.

A pesar de estas aportaciones, el carácter místico de la patrística también se evidencia cuando recomienda “remedios para los terremotos”, tales como colocar estatuas de Mercurio y Saturno en las cuatro bases de cada construcción o rezar a Dios y pedir su misericordia.

De acuerdo con una concepción ampliamente reconocida durante toda la Edad Media, que encuentra sus raíces en Platón, y es retomada por los Neoplatónicos, el mundo es considerado como penetrado por un espíritu viviente. Se establecen todo

tipo de analogías entre el funcionamiento del macrocosmos y el del microcosmos. Así, la Tierra se compara con el cuerpo humano; cuando su funcionamiento es normal, la sangre circula por venas y arterias en forma natural, pero cuando este proceso se altera de alguna manera comienzan los *problemas y las enfermedades*. El cuerpo humano se utiliza como un modelo de funcionamiento de otros elementos del macrocosmos, las catástrofes naturales son vistas como enfermedades de la Tierra.

La explicación de los terremotos por analogía con ciertas funciones de los organismos vivos, en especial el ser humano fue una práctica generalizada que se mantuvo hasta el siglo XVIII dado que proporciona cierta seguridad al sujeto.

En esta época la Geología comienza su *etapa experimental*, se desarrolla independientemente de la Física y Matemática. Los fenómenos biológicos son utilizados como *modelos que guían la experiencia*. Así por ejemplo, en la siguiente descripción de Lémery (1700), los procesos de digestión y fermentación son usados como modelo para analizar como se producen los terremotos, volcanes y tormentas de truenos:... “*Tomo una mezcla de partes iguales de hierro y sulfuro en polvo, con ellos hago una pasta con agua y la dejo realizar la digestión durante 2 ó 3 horas, sin fuego; en ese lapso fermenta y leva con una temperatura considerable, la fermentación quiebra la pasta en diversos lugares, y por las rendijas salen vapores, que son bastante calientes si la masa es pequeña, pero cuando es más grande, de unos 30 a 40 libras, una verdadera llama emerge de ella. Este único experimento, me parece suficiente para explicar a la manera de la fermentación, los shocks y estremecimientos que se producen en el interior de la tierra, como sucede en el Vesubio, Etna y otros diversos lugares. ...*” (Adams, 1938)

Para concluir, destacamos que las aproximaciones al objeto de estudio se realizan apelando a las explicaciones causales realizando *inferencias analógicas*, con niveles de objetividad creciente. Se pasa de una analogía con tendencia animista en donde se busca explicaciones mágicas cargadas de fantasía, a una búsqueda de las causas en factores naturales con los que la analogía adopta tendencias animistas y sustancializadoras.

Finalmente son las funciones del cuerpo humano las que se utilizan como modelos orientadores de las experiencias destinadas a la explicación de este fenómeno.

A fines del siglo XVIII, a partir de la teoría cosmogónica de Laplace, se plantea la primera hipótesis sobre la constitución del interior de la Tierra que se aleja de la descripción basada en lo que se “ve y percibe” o en analogías con modelos biológicos. Laplace argumenta que el Sol es una estrella que un día explotó y quedó envuelta en una nebulosa. Al principio sometida a una temperatura muy elevada y dotada de un movimiento giratorio, pero que paulatinamente comienza a perder calor y a enfriarse. Este gradual enfriamiento, provoca su contracción aumentando su velocidad de rotación, que produce una se-

paración centrífuga en anillos que dan lugar a nebulosas secundarias más pequeñas, a las que llama nebulosa planetaria. Los gases de estas nebulosas al enfriarse progresivamente, comienzan a condensarse en forma de gotas líquidas, que por acción de la gravedad son atraídas hacia el centro. De esta manera, se origina un núcleo líquido rodeado de una atmósfera o envoltura gaseosa. La corteza se formaría al continuar el enfriamiento, por cristalización del líquido interno.

El prestigio de Laplace como matemático, permite que sus supuestos sean aceptados por la mayoría de astrónomos y geólogos de la época. Esta conjetura sobre la nebulosa y el conocimiento que se posee acerca del aumento de la temperatura con la profundidad, que puede comprobarse al ingresar a una mina y por observaciones tales como la extrusión de lavas volcánicas, da lugar a que en esa época se postule la hipótesis que considera **la Tierra constituida por una delgada corteza y un interior líquido sometido a altas temperaturas.**

Esta es la primera hipótesis formulada sobre la constitución interna, que cuenta con el respaldo de una teoría y que además es apoyada por observaciones.

LA REVOLUCIÓN CIENTÍFICO - EPISTEMOLÓGICA DEL SIGLO XVIII Y EL CONOCIMIENTO DEL INTERIOR DE LA TIERRA.

Durante el periodo referenciado como científico en preparación -siglos XVIII y XIX-, se fue desarrollando el marco conceptual de la teoría matemática de la elasticidad que dará fundamento teórico a la sismología.

Desde Platón y Aristóteles la Matemática no puede aplicarse a la Física. Para Platón *la Matemática es el paradigma de lo perfecto* y la Física muy alejada de su pureza y verdad abstracta. Aristóteles subestima su valor para el conocimiento de la naturaleza, ya que sus abstracciones no permiten encontrar las causas de los fenómenos.

La ciencia moderna que comienza en el siglo XVII con Galileo, Descartes y luego con Newton y Huygens, se diferencia de la anterior ya que el hombre se aleja de las descripciones cualitativas, que surgen de lo que percibe y que sólo constituye una serie de relaciones que no puede controlar; en busca de una organización y jerarquización de dichas relaciones. Esta primera organización realizada por medio de modelos geométricos, lo conducirá a la determinación de variables a relacionar, las que luego podrán ser cuantificadas. La Matemática con toda su idealización, es considerada una herramienta importante para la descripción de la naturaleza. Desde esta época ambas ciencias comienzan a nutrirse entre sí, se está a mitad de camino entre lo concreto y lo abstracto.

La Geometría Analítica de Descartes del siglo XVII, que permite representar curvas mediante ecuaciones, hace posible el pasaje del modelo geométrico como la principal herramienta de explicación, a la formulación de las leyes físicas en forma

matemática, utilizando el álgebra y la geometría. Comienza a transitarse entonces por un largo camino que conducirá -recién iniciado el siglo XX- al planteo matemático del comportamiento de las ondas sísmicas que dará lugar a la relación y manipulación de variables.

Las variables matemáticas representadas mediante funciones, permiten ciertas posibilidades de variación que de otra manera podrían haber sido ignoradas y son las ecuaciones las que darán origen a las posteriores transformaciones.

Los desarrollos del cálculo de Newton y Leibnitz, son utilizados en la teoría de la elasticidad, de manera que la noción de cuerpo elástico, que en un principio fue considerada como un dato empírico y directamente perceptivo, se enfoca analizando la variación de distancias a partir de posiciones de equilibrio (Timoshenko, 1953).

Las matemáticas y la Física se entrelazaron en tal forma durante este periodo que el progreso en una, era difícilmente distinguible del progreso en la otra (Arons, 1970)

El aporte de Fresnel al concebir en el siglo XIX la luz como ondas transversales, despierta el interés de algunos matemáticos, como Poisson, que comienzan a estudiar la transmisión de los dos tipos de ondas *en medios elásticos que están sobre la tierra: las ondas longitudinales que producen variación de volumen y las ondas transversales que producen distorsión, sin cambio de volumen.* (Timoshenko, 1953).

Los avances en los conocimientos físicos y matemáticos, sumados a la construcción de los primeros sismógrafos permitirán *inferir el comportamiento de los materiales que están en el interior, ante la perturbación de una onda sísmica.*

LA TECNOLOGÍA Y EL TRABAJO DE LOS SISMÓLOGOS DEL SIGLO XX.

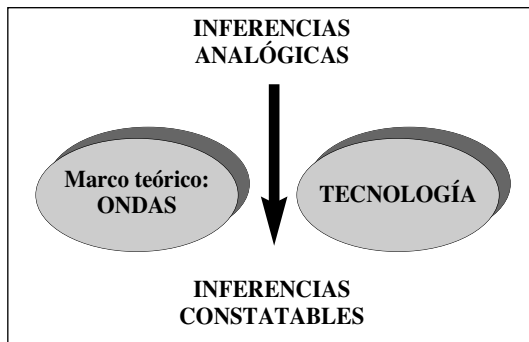
Los numerosos terremotos que afectan a Europa entre 1750 y 1760, son aprovechados por los científicos para realizar estudios respecto de los sismos. Los primeros sismógrafos construidos a fines del siglo XIX, permiten pasar de una explicación de lo que se ve o percibe a la explicación de lo no visible. La conjunción de teoría y tecnología permite a los investigadores realizar operaciones controladas.

Con el uso de sismógrafos se registran los dos tipos de ondas a las que Poisson hacía referencia y se infiere que la tierra, ante la perturbación producida por un sismo se comporta como un cuerpo elástico. Las ondas longitudinales o compresivas, reciben en sismología el nombre de **ondas P** y las ondas transversales o de cortadura se conocen como **ondas S**.

De esta manera, el interés del estudio de terremotos, limitado hasta esta época a determinar elementos cualitativos y visibles, se traslada a precisar lo que ocurre en el interior de la tierra, en lo que no es directamente perceptible. Las investigaciones

son realizadas por los sismólogos del siglo XX desde una perspectiva conceptual, que les permite no solo *diseñar experiencias para transformar su objeto de estudio*, sino también desarrollar la tecnología adecuada para la contrastación de las distintas hipótesis propuestas.

El trabajo de los sismólogos consiste, en líneas generales, en la formulación de hipótesis sobre la posible constitución interna, que pueden ser contrastadas empíricamente, analizando los datos de las ondas sísmicas registrados en distintas estaciones sismológicas. Las hipótesis se van reformulando y se proponen distintos modelos, que son sometidos a verificaciones y modificados a medida que aparecen nuevos instrumentos, nuevas técnicas, nuevos datos.



Los datos obtenidos son sistematizados mediante curvas de propagación, llamadas curvas dromocrónicas, en las que se registran tiempos de llegadas de las ondas para distintas distancias epicentrales. Estos representan valores medios mundiales, que se obtienen a partir de la observación de los miles de terremotos producidos en regiones sísmicas activas.

Entre las primeras tablas de tiempo de las ondas sísmicas, se encuentran las de Oldham, quien identifica los dos tipos de ondas en los registros sismográficos, 70 años después de la formulación matemática de la teoría, realizada por Poisson.

Si la Tierra fuera completamente sólida, tanto las ondas P como las ondas S producidas por un terremoto de gran magnitud, deberían transmitirse por toda la Tierra y podrían registrarse en sismógrafos situados en lugares ubicados en forma diametralmente opuesta al epicentro. Oldham observa que a 180° de donde se originan, las ondas arriban más tarde de lo esperado. Por lo que supone la existencia de un núcleo de *menor velocidad* de 2550 km, cuyo radio es casi la mitad del radio terrestre, comprobando empíricamente la existencia del núcleo. Análisis posteriores de los sismogramas permiten inferir que *el núcleo además de ser una zona de baja velocidad, se comporta como un fluido*.

El sismólogo Mohorovicic en 1909, analizando las ondas de un fuerte terremoto que se produce en Croacia, descubre la discontinuidad que hoy lleva su nombre. Infiere que a cierta profundidad deben existir rocas a través de las cuales, las ondas sísmi-

cas se propagan a mayor velocidad que cuando lo hacen junto a la superficie. Determina que el espesor de la corteza es de aproximadamente 50 Km, para lo cual utiliza modelos matemáticos, ***bajo los supuestos de una Tierra plana y velocidad del medio constante.***

A partir de las tablas presentadas en 1914, Gutenberg utilizando un nuevo tipo de sismógrafo, determina la profundidad a la cual se encuentra el núcleo (2900 km) y calcula un radio de aproximadamente 3470 km. Esto despierta interés en conocer las características del material que se encuentra en la extensa región comprendida entre él y la corteza superficial, comenzando el estudio de ***la variación de la velocidades de las ondas con la profundidad***, lo cual requiere métodos matemáticos mas complejos, nuevos supuestos y el tratamiento de nuevas variables.

En esta época, desde la sismología se refuta la hipótesis de una capa delgada que cubre el interior líquido, que ya había sido rechazada con otros argumentos en el siglo XIX, por Hopkins (1839) y Kelvin (1862). Este logro es en gran medida posible gracias al perfeccionamiento de los sismógrafos, el sismógrafo de Wiechert permitió registrar las ondas del sismo completo. Los sismógrafos anteriores comenzaban a sacudirse después de los primeros registros, esta saturación impedía contar con los datos correspondientes a las ondas que se propagaban por las capas más profundas de la tierra.

Los datos sísmicos obtenidos, sugieren la propuesta de un nuevo modelo para explicar la constitución de la Tierra: ***Corteza, a continuación otra zona conocida con el nombre de manto y un núcleo interno sometido a altas temperaturas.***

Este modelo estará vigente hasta 1936, año en que la sismóloga Lehmann, basándose en el comportamiento de las ondas, supone ***la existencia de un núcleo interno de composición distinta dentro del núcleo terrestre***. Se asiste nuevamente, a un momento donde la teoría está exigiendo una profundización de las investigaciones, con el objeto de intentar explicar las observaciones que no se corresponden con el modelo propuesto.

Esta hipótesis no es refutada y no solo va a ser sostenida posteriormente por los sismólogos, sino también apoyada con argumentos procedentes de otros campos de investigación. Desde la Cosmoquímica se indica que meteoritos metálicos compuestos básicamente de hierro y níquel, estarían asociados al núcleo; la Gravimetría determinó valores que permiten especificar la distribución de la densidad en la tierra, los valores obtenidos indican que las densidades mayores se encuentran hacia el interior de la misma, desde la Geotermia se concluyó la posibilidad de la existencia de un núcleo sólido dentro de uno líquido, ya que el punto de fusión para los materiales del interior aumenta más rápidamente que la temperatura a la que se encuentra (Gershnik, 1996).

Cabe destacar que el modelo que se encuentra vigente, ya era conocido a mediados de siglo y re-

sultó de experiencias debidas a terremotos naturales, en donde no todas las variables consideradas en los algoritmos podían ser controladas, como el foco y la hora del sismo. Los desarrollos tecnológicos a partir de la década del 50, tales como las explosiones nucleares permitieron controlar la precisión de los métodos usados para estimar la posición del epicentro, la profundidad del sismo, etc. La explosión de Nevada del año 60 permite comprobar la existencia del núcleo interior sólido, conjeturada veinte años antes.

La tecnología digital comienza a utilizarse ampliamente en Sismología en la década del 80, no sólo en la construcción de nuevos sismógrafos, sino también en el desarrollo de nuevas técnicas de trabajo y de algoritmos teóricos que pueden controlar mayor número de variables y que por su complejidad no podían implementarse con los métodos anteriores. Permite que los sismógrafos sean utilizados como antenas receptoras conectados a computadoras; facilitando tanto el proceso de manipulación de datos para evaluar los modelos teóricos como así también, el registro de ondas con una mayor banda de frecuencia. El almacenamiento de las señales digitales en cintas magnéticas, permite el procesamiento de los datos a gran velocidad.

Ya se pueden implementar modelos matemáticos que involucran algoritmos computacionales y análisis estadísticos, en los que nuevas variables pueden ser incluidas y que hasta el momento, si bien se conocían sus fundamentos teóricos, era imposible llevar a la práctica.

Los microprocesadores y las tareas de multiprocesamiento, permiten utilizar métodos tridimensionales en Sismología, como la tomografía sísmica que facilita la obtención de una imagen del subsuelo, que logra no solo variaciones de la velocidad sísmica con la profundidad, sino variaciones laterales de la misma.

El trabajo interactivo, la conexión vía Internet, la abundancia de información, permite un mejor manejo de datos; la composición de diferentes imágenes y la incorporación de color, transparencias, brillos y contrastes en las mismas, favorecen una mayor interacción con el objeto de estudio. De este modo, se observa mayor consistencia en la interpretación de los resultados, ya que un mismo producto es compatible con una gran diversidad de información.

En la actualidad, continúa vigente la hipótesis sobre la estructura interna: ***En un esquema amplio, la Tierra está constituida por una corteza, un manto, un núcleo exterior líquido y un núcleo interno sólido.***

Como sabemos, el conocimiento es siempre inacabado. Las investigaciones continúan. ¿Permitirán nuevos desarrollos tecnológicos refutar esta hipótesis? ¿Cómo es la constitución dentro de cada capa? ¿Podremos “ver” usando nueva tecnología, aquello que veían los científicos de principios de siglo con los “ojos de la razón”?

IMPLICACIONES DIDÁCTICAS

La propuesta que aquí se presenta parte de considerar el desconocimiento acerca de la influencia que han tenido las ondas sísmicas para el estudio del la estructura interna de la tierra.

Si acordamos que la Educación debe propender al desarrollo de actitud científica, no podemos desconocer el valor que adquiere en la formación de los educandos el acceso al conocimiento científico desde aquello que le genera sentido: ***en las zonas sísmicas el fenómeno de los terremotos adquiere una significación*** que la Educación no puede dejar de considerar como punto de partida para el acceso al conocimiento científico.

Esta propuesta ofrece una visión no exhaustiva del fenómeno bajo estudio pues se limita a la trilogía composicional -corteza-manto-núcleo-. Ello es así en tanto nuestro objetivo no ha sido agotar el desarrollo del mismo sino mostrar el arduo proceso a través del cual se llegó a este “aparentemente” sencillo modelo explicativo.

Creemos que de esta manera se puede favorecer en el alumno la disposición para comprender el conocimiento científico como un proceso abierto, no acabado y en permanente construcción.

Consideramos que enfoques como el que aquí se describe permitirán al alumno tomar conciencia de las vicisitudes que implica la construcción de conocimiento científico y puede constituirse en motor de aprendizaje y de investigación en tanto deja abierta la posibilidad del abordaje y profundización desde diferentes enfoques y teorías científicas.

BIBLIOGRAFÍA

- Adams, F. D. (1938). *The birth and development of the Geological Sciences*. New York.
- C.C.Albitton, Jr. (1970). *Filosofía de la Geología*. Centro Regional de Ayuda Técnica. México
- Arons, A. (1970). *Evolución de los Conceptos de la Física*. Editorial Trillas. México.
- Bachelard, G. (1948). *La Formación del Espíritu Científico*. Siglo Veintiuno Editores. México
- Bell, E. (1996). *Historia de las Matemáticas*. Fondo de Cultura Económica. México
- Bullen, K. y Bolt (1985). *An introduction to the theory of seismology*. Cambridge. Cambridge University Press
- Boido G. (1996). *Noticias del planeta Tierra. Galileo Galilei y la revolución científica*. A-Z Editora. Argentina
- Cailleux, A. (1964). *Historia de la Geología*. Argentina. Editorial Universitaria de Buenos Aires.
- Chalmers, F. (1987). *¿Qué es esa cosa llamada ciencia?. Una valoración de la naturaleza y el estatuto de la ciencia y sus métodos*. Siglo Veintiuno Editores. Madrid.
- Dampier, W. C. (1972). *Historia de la Ciencia y sus relaciones con la filosofía y la religión*. Editorial Tecnos. Madrid.
- ElleMBERGER, F. (1989). *Historia de la Geología*. Editorial Labor. Madrid.

- García Font. (1964). *Historia de la Ciencia*. Ediciones Dante. Barcelona.
- Gamow, G. (1967). *Un planeta llamado Tierra*. Espasa – Calpe. Madrid.
- Gershanik, S. (1996). *Sismología*. Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas. Universidad Nacional de La Plata. Argentina.
- Gagliardi, R. (1988). *Cómo utilizar la Historia de la ciencia en la enseñanza de la Ciencia*. Enseñanza de las Ciencias. 6. 3. 291-296.
- Gagliardi, R. y Giordan, A. (1986). *La historia de las Ciencias: Una herramienta para la enseñanza*. Enseñanza de las Ciencias Volumen 4. 3. 253-258.
- Harrington, H. J. (1944). *Volcanes y Terremotos*. Editorial Pleamar. Argentina
- Harrington, H. (1955). *Geología entre Bambalinas*. Editorial Pleamar. Argentina.
- Izquierdo, M. (1996). *Relación entre la Historia y la Filosofía de la Ciencia y la Enseñanza de las Ciencias*. Barcelona. Alambique didáctica de las Ciencias Experimentales 8:7-21-
- Pasotti, P. y Castellanos, A. (1945). *Cuatro lecciones sobre Terremotos*. Asociación Nacional de Conferencias
- Pedrinaci, E. (1994). *La historia de la Geología como herramienta didáctica*. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra. 2. 2y3 332-339.
- Piaget, J. y García, R. (1996). *Psicogénesis e Historia de la Ciencia*. Editorial Siglo XXI. México.
- Sedgwick, W. y Tyler, H. (1950). *Breve Historia de la Ciencia*. Editorial Argos. Argentina.
- Timoshenko, S. (1953). *History of Strength of Materials*. Mc Graw-Hill Book Company. New York. Toronto.
- Udías, A. y Mezcuá, J. (1986). *Fundamentos de Geofísica*. Editorial Alhambra. Madrid. ■