

Tema 02

Estructura y composición de la Tierra. Los métodos de estudio.

Alberto Viñuela Miranda

Última edición: 8 de enero de 2023

Introducción

1

El chiste de la pared impenetrable

1.1

Existe un **chiste** en el mundo anglosajón que reza algo así como:

—Y usted, ¿En que trabaja?

—En Geofísica.

—¿Y eso en qué consiste?

—¿Puede usted imaginar una pared enorme, de espesor kilométrico, imposible de atravesar, rodear o saltar? Pues bien: Yo estudio lo que hay al otro lado.

Ciertamente, no es muy gracioso; Pero **resume** muy bien la **enorme dificultad y complejidad** que supone el **estudio del interior de la Tierra**.

Métodos de estudio directos e indirectos

1.2

Tradicición en los libros de texto

1.2.1

Es tradición, en los **libros de texto**, hablar de **métodos directos e indirectos** cuando se trata del estudio de la Tierra.

Referencias históricas

1.2.2

Para distinguir entre unos y otros basta acudir a las **dos obras seminales** del pensamiento científico moderno:

- **Métodos directos** serán aquellos que se basen en la **observación** y el **análisis**, y utilicen un enfoque **inductivo** y **experimental**, como propuso **Francis Bacon** en su obra de 1620 "**Novum Organum**".
- **Métodos indirectos** serán aquellos que se basen en el **cálculo** y el **razonamiento**, y utilicen un enfoque **deductivo** y **teórico**, como propuso **Galileo Galilei** en su obra de 1600 "**Le Meccaniche**".

Los métodos directos

1.2.3

En el caso que nos ocupa, **métodos directos** serán aquellos que impliquen los campos de la **Mineralogía** y la **Petrología**, así como los de la **Vulcanología** y la **Estratigrafía**.

Los métodos indirectos

1.2.4

Los **métodos indirectos** implicarán tres campos principales: La **Geodesia**, la **Sismología** y el **Geomagnetismo**.

Estructuración del texto

1.2.5

Abordaremos pues el tema **desglosando los hallazgos y conclusiones de cada una de estas áreas científicas**; muchas veces entrelazadas, hasta tal punto que establecer la completa red de conexiones resulta complicado en tan poco espacio; discúlpe-se si solo llego a explicitar unas pocas.

Desarrollo: Métodos directos

2

Comencemos por los **métodos directos**.

Mineralogía y Petrología

2.1

La **Mineralogía** y la **Petrología** se pueden considerar una única disciplina en el contexto que nos ocupa. Resultará más **útil distinguir entre el trabajo de campo y el de laboratorio**.

Trabajo de campo

2.1.1

Minas y sondeos

2.1.1.1

El **trabajo de campo** aprovecha dos tipos de labores: la **minería** y los **sondeos**. El problema es que ninguna de ellas apenas logra arañar la superficie del planeta.

Usando la anterior **metáfora** de la pared, solo nos permiten saber algo de la pintura y de la pátina que la recubre.

La **mina más profunda** del mundo, la **mina de oro de Mponeng**, "solo" llega a 4km de profundidad, y el **Pozo Superprofundo de Kola**, no pudo superar, por limitaciones técnicas, los **12km**.

Conclusiones del trabajo de campo en Mineralogía y Petrología

2.1.1.2

En definitiva, se tratan de **vías de estudio casi totalmente agotadas** que, aun así, permiten concluir:

- Que se pueden distinguir **dos tipos de corteza, continental y oceánica**, de **distinta petrología y grosor**, cuya diferenciación es explicada por la Tectónica de Placas –más allá del ámbito de esta redacción–.
- Que la **corteza continental** está compuesta por una enorme **diversidad de materiales**, resultado de la **interacción con otros sistemas** como el **Ciclo del Agua**, el **Ciclo del Carbono** o el **clima**.
- Que existe un **gradiente geotérmico** que indica que el interior de la Tierra está muy caliente.

Única mención de la metáfora en **métodos directos**, sólo se vuelve a nombrar en sismología.

No hace falta mencionar el **SAFDO**, ya que solo penetra 3,2km, y el **LVDP** no tiene mucho sentido nombrarlo aquí

En realidad unos 20km si se tiene en cuenta la erosión del cratón/escudo

¡Importantisimo mencionarlo aquí para no enredarse más adelante con la Tectónica de Placas!

Aquí es el momento de nombrarlo y darlo por soslayado.

Trabajo de laboratorio

2.1.2

El **trabajo de laboratorio** resulta mucho más fructífero.

Ciencia de Materiales

2.1.2.1

Concepto de Reodo

2.1.2.1.1

La **Ciencia de Materiales** nos proporciona el concepto de **reodo**, etimológicamente, “*sólido que fluye*”. Describe aquellas sustancias que comportándose como **sólidos ante esfuerzos instantáneos**, responden de **modo viscoso dada una ventana de tiempo** lo suficientemente amplia. Este estado es propio de **materiales cercanos a su punto de fusión**, como es de esperar en el interior terrestre.

No repetir “fluido”.

El yunque de diamante

2.1.2.1.2

El **yunque de diamante** es un instrumento sofisticado que permite estudiar el comportamiento de los materiales a las **presiones y temperaturas** esperables en el **interior terrestre**.

Así se descubrieron **polimorfos del olivino** como la **wadsleyita**, la **ringwoodita** y la **bridgmanita**, minerales, suponemos, constituyentes del manto.

Análisis químicos

2.1.2.2

Composición de Meteoritos

2.1.2.2.1

Es precisamente el **análisis químico de meteoritos** el que nos ha permitido deducir:

- En el caso de los **rocosos**, que el **olivino** es el mineral predominante en el manto, además de piroxenos y anfíboles.
- En el caso de los **metálicos**, la presencia de **NiFe** –aleación de níquel y hierro– en el núcleo terrestre.

Cantidad de Plomo en zircones

2.1.2.2.2

Además, el **análisis** de la **proporción uranio/plomo en zircones** nos ha permitido deducir la **edad de la Tierra**, de unos **4.500Ma** –millones de años–.

1956 Clair Cameron Patterson

Vulcanología

2.2

La **Vulcanología** no solo confirma la **predominancia de silicatos** y de las **elevadas temperaturas** en el interior terrestre.

Aclarar siempre el significado de la abreviatura la primera vez que se use.

Xenolitos

2.2.1

Los **xenolitos**, rocas inusuales que a veces se encuentran en el interior de rocas ígneas, aportan información de primera mano sobre los **materiales mantélicos**.

Estratigrafía

2.3

La **Estratigrafía** nos proporciona información abundante, tanto por la **secuencia de deposición** de los estratos, como por los **fósiles** que podemos encontrar en ellos. Esto nos permite **reconstruir la evolución de la corteza** terrestre a lo largo de los eones y, quizás más esencial:

Escala temporal de los fenómenos

2.3.1

- Aceptar la existencia de un **Tiempo Profundo** como **marco cronológico**.
- Adoptar un **paradigma gradualista** –que no **uniformista**– a la hora de interpretar los resultados de todos los demás hallazgos.

Desarrollo: Métodos Indirectos

3

Los métodos directos, por sus limitaciones intrínsecas no dan mucho más de sí. Serán los **métodos indirectos** los que nos proporcionen el **grueso de la información**.

Geodesia

3.1

La **Geodesia**, o “División de la Tierra” es un concepto acuñado por **Aristóteles**. Al igual que la minería en la prehistoria, su intención original fue pragmática, utilitarista y de aplicación local. No obstante, su **aplicación a escala global** es extremadamente jugosa en cuanto a sus hallazgos.

Ramas de la Geodesia

3.1.1

Es importante distinguir entre las ramas de la Geodesia.

Geodesia práctica

3.1.1.1

Existe una **geodesia práctica**, “geográfica”, centrada en la **Topografía** y la **Cartografía**. No debe ser despreciada en nuestro contexto, ya que técnicas como la **triangulación** o instrumentos como el **LIDAR** o el **GPS** son de enorme utilidad científica.

Geodesia teórica

3.1.1.2

También existe una **geodesia teórica**, que se puede dividir en:

- **Geodesia Matemática** o geometría *sensu stricto*, implicada en el estudio del **tamaño y la forma de la Tierra**.
- **Geodesia Física**, que estudia sobre todo el **campo gravitatorio terrestre** y las **mareas**.

Enfoque histórico

3.1.1.2.1

Nos centraremos en los hallazgos de la geodesia teórica desde un punto de vista histórico.

Geodesia matemática

3.1.2

La **Geodesia Matemática** se centró originalmente en el problema de medir la **circunferencia de la Tierra** y, posteriormente, el **meridiano**.

La medición de la Circunferencia de la Tierra

3.1.2.1

sIII a.C.: Eratóstenes de Cirene

3.1.2.1.1

El primero en realizar una medición precisa del tamaño de la Tierra fue el griego **Eratóstenes de Cirene** en el **siglo III a.C.** Tras comprobar que el **ángulo del sol al mediodía** difería en 7° entre las ciudades de Alejandría y Siena, separadas 800km, dedujo

correctamente que la **circunferencia terrestre** medía unos **250.000 estadios griegos** –unos 180m–, obteniendo un valor sorprendentemente preciso de unos **42.000km**.

sI a.C.: Posidonio de Apamea

3.1.2.1.2

En el **siglo I a.C.**, **Posidonio de Apamea** repitió el cálculo midiendo la **diferencia de latitud de la estrella Canopus** entre Rodas y Alejandría, obteniendo un resultado **algo menor**.

sI d.C.: Ptolomeo

3.1.2.1.3

Desgraciadamente, **Ptolomeo de Alejandría** asumió el resultado de de Eratóstenes, pero usando el estadio romano, bastante menor. Su cálculo quedó en **solo 29.000km**.

Su autoridad hizo que esta medida fuera aceptada hasta tiempos de **Cristobal Colón**, hasta el punto de que este **creyó inicialmente** que efectivamente había llegado hasta las Indias, y no a un nuevo continente.

Solo a medida que se exploró el Nuevo Mundo hubo un reconocimiento gradual de haber encontrado un nuevo continente.

Principios del sXVII: Snell

3.1.2.1.4

La **primera medición de la era científica** la realizó **Willebrord Snell** en **1615**, **triangulando la posición entre dos campanarios** en Holanda. Obtuvo unos **39.000km**.

Finales del sXVII: La medición del Meridiano

3.1.2.2

A partir de las **deducciones** de **Sir Isaac Newton (1687)** y **Christian Huygens (1690)** de que la Tierra estaba **achatada a causa de su rotación**, nació el **concepto de Elipsoide de Referencia**.

No confundir con el Geoide, ligado a la gravimetría: hablar después de él

Expedición Hispano-Francesa

3.1.2.2.1

La **primera coordinación científica internacional**, la célebre **Expedición Hispano-Francesa**, tuvo como objeto confirmar, con éxito, esta predicción.

Gracias a ella, en **1793** se definió el **metro como unidad de medida**, equivalente a la diezmillonésima parte de la distancia entre el polo norte y el ecuador.

Geodesia física

3.1.3

Gravímetros

3.1.3.1

La **Geodesia Física** tiene como instrumentos principales los distintos tipos de **gravímetro**, **absolutos** y **relativos**.

Inicialmente contruidos con péndulos y resortes, hoy en día, proyectos **satelitales** como **GRACE** y **GRACE-FO** hacen uso de la **interferometría láser** para realizar medidas ultraprecisas.

Gravímetro Absoluto: Mide el valor absoluto de la aceleración terrestre.

Gravímetro relativo: Permite medir y comparar diferencias locales. Los más exactos, los **gravímetros superconductores** usan una esfera de niobio suspendida en equilibrio por un campo magnético generado por una corriente cuya intensidad es medible. Alcanzan el nanogal de precisión.

1798: Henry Cavendish y el gradiente de densidad

3.1.3.1.1

El **primer gravímetro, de torsión**, fabricado en **1798** por **Henry Cavendish**, permitió deducir que la **densidad media del planeta** era de unos **5.5 g/cm³**.

Dado que la **densidad media de la corteza superior** es de **2.7 g/cm³**, Cavendish dedujo correctamente la **existencia de un gradiente de densidad vertical** análogo al de temperatura.

Desviación de la vertical en plomadas

3.1.3.1.2

Con anterioridad a Cavendish ya se conocía la **existencia de gradientes de densidad horizontales**, pues se había medido la **desviación de la plomada en la vecindad de montañas**.

1738 Experimento **Chimborazo**
1774 Experimento **Schiehallion**

Concepto de Geoide

3.1.3.2

La existencia de estos gradientes multidireccionales condujo al **concepto de Geoide**, o **forma real** de la Tierra. El modelo más avanzado actualmente se conoce como **"Patata Gravitatoria de Potsdam"**.

Sismología

3.2

La **Sismología** es el **método indirecto** que más información proporciona sobre la **estructura en capas** de la Tierra, mediante el **análisis de la propagación de las ondas** causadas por los **terremotos**.

Aquí es el momento de volver a mencionar la pared, tras la última mención en "métodos directos".

Volviendo a la **metáfora** inicial de la pared, podríamos hacer Sismología con ella escuchando atentamente como suena al golpearla en distintos puntos.

Historia de la Sismología

3.2.1

Edad Antigua

3.2.1.1

El **primer sismoscopio**, que no sismógrafo, fue fabricado por **Zhang Heng** en el **año 132 en China**. Llegó a detectarlos a 600km de distancia.

1755: Terremoto de Lisboa

3.2.1.2

En la **Ilustración**, el interés científico por los terremotos nació a partir del devastador **seísmo de Lisboa de 1755**, que se llegó a sentir en toda la península.

1842: Primer sismógrafo

3.2.1.3

Pero no fue hasta **1842** que **James David Forbes** inventó el **primer sismógrafo moderno**.

1906: Terremoto de San Francisco

3.2.1.4

El **primer terremoto estudiado exhaustivamente** fue el de **San Francisco en 1906**. Gracias a él, **Richard Dixon Oldham** descubrió las **ondas P y S**, y en 1910 **Harry Fielding Reid** propuso el modelo de **rebote elástico** como causa de los seísmos.

Principales hallazgos de la Sismología

3.2.2

La Sismología es la **disciplina que más información aporta** sobre el interior de la Tierra.

Estructura en capas de la Tierra

3.2.2.1

Del **análisis de las ondas P y S** se pudo deducir la **existencia de discontinuidades** y de la **estructura en capas** del planeta. Anteriormente se creía que el gradiente de densidad interno era continuo.

Zona de sombra

3.2.2.2

La existencia de una **Zona de Sombra** sirvió para determinar la existencia de un **núcleo denso**.

Existencia de capas internas líquidas

3.2.2.3

Además, el comportamiento de las **ondas S** determinó que **el núcleo externo es líquido**.

Existencia de placas tectónicas

3.2.2.4

La **localización de los terremotos**, tanto geográfica como en profundidad, permitió determinar los límites de las **placas tectónicas**.

Existencia de estructuras mantélicas

3.2.2.5

Actualmente sabemos que existen **estructuras mantélicas** gracias a la **Tomografía Sísmica**.

Geomagnetismo

3.3

El último de los métodos indirectos, el **Geomagnetismo**, no es el más reciente.

Historia de la Brújula

Historia del geomagnetismo

3.3.1

sIII a.C.: Brújula Geomántica

3.3.1.1

Ya en el **siglo III a.C.**, la **Dinastía Han**, en China, utilizaba **brújulas geománticas** para buscar la mejor orientación de sus construcciones.

sXI: Brújula de Navegación

3.3.1.2

La **Dinastía Song** en el **siglo XI** inventó la **brújula de navegación**, siendo poco después mencionada en textos europeos.

1600: William Gilbert

3.3.1.3

Pero fue el visionario inglés **William Gilbert** quien propuso ya en su libro de **1600 De Magnete** que **la Tierra es un gran imán**. Es de recibo señalar que en su tiempo los fenómenos magnéticos eran más conocidos que los eléctricos, y que no fue hasta **1820** que el danés **Hans Christian Ørsted** los relacionó.

1919: Sir Joseph Larmor

3.3.1.4

No obstante, la primera **explicación convincente** para el magnetismo terrestre fue aportada por el británico **Sir Joseph Larmor** con su **Hipótesis de la Dinamo Autoexcitada**, que propone el flujo del núcleo externo, **NiFe en estado líquido**, como causante.

Hallazgos del geomagnetismo

3.3.2

Las **contribuciones del Geomagnetismo** son importantísimas.

Anomalías Magnéticas

3.3.2.1

La **medición de las anomalías magnéticas**, cuando **globales**, permiten estudiar la **dinámica del núcleo externo**; cuando **locales**, el **subsuelo**.

Paleomagnetismo

3.3.2.2

Asimismo, el descubrimiento de las **inversiones geomagnéticas**, por su **registro en las rocas**, ha sido esencial para la **Paleogeografía**, pues ha permitido reconstruir la **deriva de los continentes**.

Recapitulación

4

Repasados los principales métodos de estudio y sus hallazgos a veces aislados, a veces interconectados, llega el momento de **recapitular** todo lo anterior.

Geometría de la Tierra

4.1

Tamaño y forma

4.1.1

La Tierra es un **planeta rocoso**, con **6.371km** de diámetro medio, **achatado por los polos** a causa de su rotación. Las **irregularidades superficiales son mínimas** respecto a su tamaño.

Estructuración en capas

4.1.2

Su **composición no es homogénea, sino estructurada en capas ordenadas según su densidad**. Las capas fluidas –**Atmósfera e Hidrosfera**– se apoyan sobre el conjunto de capas sólidas o **Geosfera** e interaccionan con ella de modo hartamente complejo.

La Geosfera

4.2

Descripción química: mineralogía + petrología

4.2.1

La **Geosfera**, desde un **punto de vista químico**, se puede resumir *grosso modo* en:

¡NO poner "a" delante!

- Un **núcleo metálico** -NiFe- de unos **3.500km de radio** envuelto por
- una **Petrosfera** –término utilizado en **Planetología** para describir la **porción silíceo** de un cuerpo celeste— de unos **2.900km** de espesor, que a su vez se divide en:
 - **Manto**, rico en silicatos pesados, destacando el **olivino y sus polimorfos**.
 - **Corteza inferior u oceánica**, rica en **basalto** y otros silicatos de densidad intermedia, normalmente oculta bajo los océanos.
 - **Corteza superior o continental**, que forma parches de silicatos ligeros como el **granito** sobre la superficie: los continentes.

Descripción física: mecánica + termodinámica

4.2.2

La **Geosfera** también se puede describir desde un **punto de vista mecánico**, gracias sobre todo a la Sismología, y también **termodinámico**.

- La **Litosfera**, etimológicamente "*esfera de piedra*" por alusión a su **rigidez y fragilidad** está formada por la corteza y la parte superior del manto. En ella se **originan los terremotos** y está **dividida en placas** irregulares cuya interacción es muy compleja y que se desplazan sobre...
- La **Astenosfera**, etimológicamente "*esfera sin fuerza*", por alusión a su comportamiento **viscoso y dúctil** –reodo–. Abarca hasta la **discontinuidad de Repetti** o de los **660km**, donde el cambio en el **índice de coordinación Si:O**, de **IV a VI**, decide un cambio relevante en las propiedades mecánicas.
- La **Mesosfera**, etimológicamente "*esfera del medio*" es **especialmente rígida** por la estructura en **perovskita** que adoptan los silicatos. La **Región D'**, limitrofe

Manto superior: IC IV

α -olivino

Discontinuidad 410km

β -olivino = Wadsleyita

Discontinuidad 520km

γ -olivino = Ringwoodita

Manto inferior: IC VI

Bajo la discontinuidad 660km

= Discontinuidad de Repetti

Bridgmanita = Olivino con

estructura de Perovskita.

Perovskita: CaTiO_3

"D doble prima" o "D prima prima".

entre manto y núcleo y de unos **200km** de espesor, es turbulenta, irregular y aún muy misteriosa.

- La **Endosfera** coincide con el núcleo ferroso. El **diagrama de fases P-T** explica que exista una **endosfera externa líquida** y una **endosfera interna sólida**, ya que en la **discontinuidad de Wiechert-Lehmann**, a **5155km** de profundidad se produciría una transición de estado a causa de la enorme presión de unos **330GPa**.
 - La **fluidez del NiFe** en el **Núcleo Externo** es **similar al agua**. Sus corrientes internas son responsables de la **Magnetosfera** que protege a la Tierra del **viento solar**.
 - Del **Núcleo Interno** solo sabemos con seguridad que **no puede ser ferromagnético** y que debe **crecer en tamaño a medida que se enfría**.

Teorizada por **Emil Johann Wiechert**; descubierta en 1936 por **Inge Lehmann**

Conclusión

5

Conocimiento limitado

5.1

Llegados este punto, podría parecer por todo lo escrito –y no digamos ya por lo que ha quedado en el tintero– que la **comunidad científica posee un conocimiento bastante completo y exacto**, de nuestro planeta, y que **poco nos queda por descubrir**.

Algunos misterios por resolver

5.2

Nada más lejos de la verdad. Todavía hay **muchos misterios** por resolver, por poner unos ejemplos:

- ¿**Cuánta agua** podría haber en la **Astenosfera**?
- ¿Está la **Mesosfera** dividida en “**mesoplacas**” análogas a las litosféricas?
- ¿Qué **relación** hay entre la **Zona D** y los **fenómenos corticales**?
- ¿Por qué el **núcleo interno gira más rápido** que la corteza?
- ¿Es el **núcleo interno** un **único cristal** de hierro?

Referencia al chiste inicial

5.3

La **única certeza** que tenemos es que al **geofísico del chiste** con el que comenzamos este texto, aún le queda **mucho pared por estudiar**.