

Unitat 2

Estructura i composició de la Terra.

Els mètodes d'estudi.

1. Mètodes d'estudi
2. Estructura interna de la Terra
3. Variació de les propietats físiques a l'interior de la terra.
4. Composició i característiques de les capes terrestres

1. Mètodes d'estudi

Podem accedir al coneixement dels materials que existeixen a l'interior de la Terra mitjançant mètodes **d'observació directa** (sondejos, estudi dels materials expulsats pels volcans) i mitjançant **mètodes indirectes** (permeten deduir la composició i propietats dels materials profunds a partir d'altres dades). Els mètodes indirectes més utilitzats són els mètodes geofísics, basats en principis de la física i en càlculs complexos a partir de les dades que proporcionen instruments molt sensibles.

- Mètodes directes
 - Sondejos
 - Materials expulsats pels volcans

- Mètodes indirectes
 - Estudi de la densitat terrestre
 - Estudis de laboratori
 - Estudi dels meteorits
 - Mètodes geofísics:
 - Estudis geotèrmics
 - Anàlisis de les anomalies magnètiques
 - Anàlisis de les anomalies gravitatòries
 - Mètode sísmic

Sondejos

Les dades que aporten són poc significatives pel que fa a l'estudi de l'interior terrestre ja que només afecten a la part més superficial de la terra (la màxima profunditat aconseguida és d'uns 13 km)

Estudi dels materials expulsats pels volcans

Els volcans expulsen materials formats a partir de magmes de regions profundes. L'anàlisi d'aquests materials ens pot donar idea de la composició química d'aquestes regions, tot i que hi ha algunes limitacions com el cas dels processos de *diferenciació magmàtica* que fan que la composició de la lava expulsada no sigui representativa del magma original, ja que aquest magma pot haver anat cristal·litzant a mesura que ascendia i per tant la seva composició química i mineralògica serà diferent a l'original.

Estudi de la densitat de la Terra

Càlculs molt exactes duts a terme sobre la densitat de la terra a partir del seu volum i de la seva massa, donen a la terra una densitat mitjana de $5,5 \text{ g/cm}^3$. Aquesta densitat mitjana és molt més alta que la de les roques superficials a les que tenim accés de manera directa (granit 2,7; basalt 3; peridotita 3,3) Això ens indica que a l'interior terrestre ha d'haver materials i roques de molta més densitat que els materials i roques de la superfície.

Estudis de laboratori

S'han dut a terme experiments sobre el comportament dels materials geològics sotmesos a altes pressions i temperatures comparables a les existents a centenars i inclús milers de quilòmetres de profunditat. El seu objectiu és proporcionar dades sobre els canvis de densitat, estat físic o composició mineralògica dels materials en aquestes condicions.

Estudi dels meteorits

La creença de que els meteorits que cauen a la Terra, procedents del cinturó d'asteroides situat entre mart i Júpiter, tenen el seu origen en un planeta que no va arribar a formar-se, fa pensar que aquests tenen una composició semblant a la de la resta de planetes interiors, la qual cosa desperta un gran interès a l'hora d'establir hipòtesis sobre la composició interna de la terra.

Estudis geotèrmics

S'anomena *gradient geotèrmic* l'increment de temperatura que s'experimenta a mesura que augmenta la profunditat en el subsòl. Aquest gradient, mesurable en pous, mines i sondejos, presenta un valor mitjà al voltant dels 3°C cada 100 metres. L'existència d'aquest gradient dona fe de que la terra té fonts internes d'energia calorífica. Aquest gradient geotèrmic presenta grans diferències entre regions "fredes" on és significativament inferior i regions "calentes" on pot arribar a ser molt superior (per exemple en dorsals oceàniques o zones volcàniques). Aquesta irregularitat pot estar relacionada amb una distribució irregular de les fonts de calor intern o amb mecanismes de transmissió tèrmica no uniformes.

Estudi de les anomalies magnètiques

S'anomena *anomalia magnètica* la diferència entre el magnetisme teòric i l'observat en un punt determinat. Les anomalies poden ser causades per minerals i roques amb propietats magnètiques, capaços d'alterar significativament els valors d'intensitat i direcció del camp magnètic. L'anàlisi de les anomalies magnètiques pot, doncs, subministrar dades referents a la composició mineralògica del subsòl.

Estudi de les anomalies gravitatòries

S'anomena *anomalia gravitatòria* la diferència entre el valor teòric de la gravetat ($9,8 \text{ m/s}^2$) i el valor obtingut en un punt de la superfície terrestre. Per a que aquest valor sigui significatiu, s'han de fer dues correccions: una per eliminar els efectes sobre g de les diferències per la distància al centre de la terra, i l'altra per eliminar els efectes sobre g de la diferent quantitat de massa sobre aquest fins al centre de la terra. Un cop realitzades les correccions pertinents, el valor aconseguit s'anomena *anomalia gravitatòria residual*, que és la que ens interessa i que es atribuïble tan sols a diferències de densitat.

Estudiant aquestes anomalies s'ha observat l'existència d'*anomalies gravitatòries positives* (valor de g superior al teòric) en els fons oceànics i d'*anomalies gravitatòries negatives* (valors de g inferiors al teòric) en zones continentals i molt especialment en grans serralades. Això portarà a pensar en l'existència de materials de més densitat sota els fons oceànics i de materials més lleugers sota els continents i serralades.

Mètode sísmic

Es basa en l'estudi de la propagació de les ones sísmiques produïdes pels terratrèmols naturals o bé per explosions controlades. És el mètode d'estudi més important de l'interior terrestre.

Existeixen tres classes principals d'ones sísmiques, ones P, S i L, les velocitats de propagació de les quals són diferents per a cada una d'elles i depenen de les condicions elàstiques del medi que travessen (rigidesa dels materials) i de la densitat el mateix.

Les ones P, *primàries o longitudinals*, són les de major velocitat i per tant les que es registren abans en els sismogrames. Es propaguen per tota classe de medis i la seva velocitat depèn de la compressibilitat del medi. La direcció de vibració de les partícules coincideix amb la direcció de propagació de l'ona.

Les ones *S*, *secundàries* o *transversals*, viatgen a una velocitat més petita que les *P*, amb la qual cosa es registren més tard en els sismogrames. No es propaguen per medis fluids. La direcció de vibració de les partícules és transversal a la direcció de propagació de l'ona.

Les ones *L*, *llargues* o *superficials*, són les més lentes de totes i es propaguen tan sols per la superfície del terreny. Són les que presenten una major intensitat de vibració i les responsables dels efectes catastròfics dels terratrèmols. (hi ha dos tipus, ones Love i ones Rayleigh)

Des del punt de vista de l'estudi estructural de la Terra, les ones sísmiques més importants són les *P* i *S*, ja que són les úniques que es propaguen per l'interior terrestre. Totes dues es comporten de la mateixa manera, reflectint-se o refractant-se quan troben una superfície de separació entre dos medis de densitats diferents. A mesura que aquestes ones van travessant les diferents capes de la Terra i es van trobant amb roques de naturalesa diferent veuen modificada la seva velocitat. Cada cop que es detecta una modificació de la velocitat de les ones voldrà dir que en aquell punt la naturalesa de les roques ha canviat i en conseqüència ha d'existir una discontinuïtat o separació entre dues capes.

Les variacions de la velocitat de les ones *P* i *S* amb la profunditat queda representat en un gràfic de velocitats com el següent:

Aquest gràfic resumeix l'estat actual dels nostres coneixements sobre la propagació de les ones sísmiques per l'interior del planeta i constitueix la base a partir del qual s'ha d'elaborar qualsevol model de l'estructura interna de la Terra.

L'anàlisi del gràfic posa de relleu l'existència a determinades profunditats de canvis bruscos i importants de la velocitat de propagació de les ones sísmiques, que deuen correspondre, sense cap mena de dubte, a superfícies de separació entre materials de diferent naturalesa. S'anomenen *superfícies de discontinuïtat sísmica*. Les discontinuïtats sísmiques permeten establir una divisió de l'interior del planeta en capes o zones concèntriques de diferent naturalesa.

Les **principals discontinuïtats** detectades són:

- *Discontinuitats de primer ordre*: suposen variacions de gran magnitud en la velocitat de les ones sísmiques, i representen per tant canvis molt importants en la naturalesa dels materials que les separen.
 - *Discontinuitat de MOHOROVICIC*: suposa un augment molt brusco i important de la velocitat de les ones P i S a una profunditat entre 5-10 km en zones oceàniques i 40-60 km en zones continentals.
 - *Discontinuitat de GUTEMBERG*: es localitza al voltant dels 2900 km de profunditat. Aquí es detecta un canvi brusco i fonamental en la velocitat de les ones: les ones P disminueixen la velocitat considerablement i les ones S deixen de transmetre's (no travessen la discontinuïtat), la qual cosa es indicatiu de que els materials de sota de la discontinuïtat es troben en estat fluid.
- *Discontinuitats de segon ordre*: suposen canvis de menor magnitud en la velocitat de les ones, i representen canvis menys acusats en la naturalesa dels materials que les separen.
 - *Discontinuitat de CONRAD*: detectada tan sols en alguns punts del planeta sota els continents, no es detecta sota els oceans. No queda reflectida en el gràfic, però se suposa que a uns 15 km de profunditat hi ha un lleuger augment de la velocitat de les ones sísmiques.
 - *Discontinuitat de REPETTI*: es localitza al voltant dels 700-1000 km de profunditat. Per dalt d'aquesta discontinuïtat les ones P i S augmenten la seva velocitat d'una manera constant i ràpida amb la profunditat, mentre que per sota de la discontinuïtat, tot i que la velocitat continua augmentant amb la profunditat ho fa a un ritme més lent.
 - *Discontinuitat de WIECHERT o de LEHMANN*: suposa un augment de la velocitat de les ones P a partir dels 5100 km de profunditat.

Continuant amb l'anàlisi del gràfic es detecta una franja entre els 100 - 300 km de profunditat on s'atenua considerablement la velocitat de les ones P i S per tornar-se a recuperar posteriorment. Aquesta franja es coneix amb el nom de *canal de baixa velocitat d'ona*. La disminució de la velocitat s'atribueix a una disminució de la rigidesa dels materials (sense arribar a l'estat fluid, capa semifluida).

2. Estructura interna de la Terra

Els resultats de les investigacions sismològiques al llarg de molts anys han establert dos models que descriuen l'estructura interna de la terra: el *model geoquímic* (basat en l'existència de discontinuïtats sísmiques que separen capes de diferent composició) i el *model dinàmic* (més centrat en la divisió en capes des d'un punt de vista de comportament dinàmic de la terra). Els dos models són complementaris.

El model geoquímic considera la Terra dividida en tres grans capes, separades per les discontinuïtats de primer ordre: **escorça, mantell i nucli**. Les discontinuïtats de segon ordre permeten establir subdivisions d'aquestes tres grans capes: **escorça superior i inferior**, en els continents (separades per la discontinuïtat de Conrad) **mantell superior i inferior** (separades per la discontinuïtat de Repetti) i **nucli extern i intern** (separades per la discontinuïtat de Lehmann)

El descobriment del canal de baixa velocitat d'ona, amb l'existència d'una capa semifluida dins el mantell superior va fer sorgir un nou model, model dinàmic, segons el qual per dalt d'aquesta capa els materials de naturalesa rígida formarien **la litosfera**, la capa semifluida formaria **l'astenosfera**, la resta de mantell per sota de l'astenosfera formaria la **mesosfera** i el nucli rebria el nom d'**endosfera**.

Escorça

És la capa més superficial i més prima de la Terra. Tot i que té un volum i una massa insignificants si els comparem amb els de la resta del planeta, té un paper fonamental en la dinàmica de la Terra i en el sosteniment de la biosfera. S'hi distingeixen dos conjunts: **escorça oceànica**, sota els oceans, entre els 6 i 12 km de gruix, i **escorça continental** a les zones continentals del planeta, amb un gruix major que pot arribar fins i tot als 70 km a sota de les grans serralades. En alguns punts del planeta es considera a més l'escorça continental dividida en una escorça superior i una escorça inferior.

Mantell

Està situat per sota de l'escorça i s'estén cap a l'interior de la terra fins aproximadament els 2900 km de profunditat. S'hi poden distingir dues parts diferenciades: el **mantell superior** i el **mantell inferior**. El mantell superior arriba fins aproximadament els 1000 km de profunditat; se suposa que la majoria de materials es troben en aquesta capa en estat sòlid, llevat d'un tram situat entre els 100 i els 300 km de profunditat en la que els materials estarien dotats d'una certa plasticitat i que s'anomena **astenosfera**. El mantell inferior, més homogeni, és sòlid, i per la densitat que presenta es creu que té una composició equivalent a la d'alguns meteorits rics en silici, ferro i magnesi.

El model dinàmic introdueix el terme **litosfera** per referir-se al conjunt format per l'escorça i una part important del mantell superior, que formen una unitat dinàmica de comportament rígid per sobre de l'astenosfera inferior de característiques plàstiques. Els corrents de convecció que es produeixen en l'astenosfera són els responsables que la litosfera estigui fracturada i sotmesa a tensions. El mantell superior per sota de l'astenosfera i el mantell inferior, formen un conjunt rígid anomenat segons el model dinàmic **mesosfera**.

Nucli (o endosfera)

És la part més interna del planeta. S'estén des dels 2900 km fins al centre de la terra, situat aproximadament als 6378 km. La seva composició química es dedueix de la seva elevada densitat i sembla que hi predomina la presència de ferro i níquel. S'hi poden distingir dues parts el **nucli extern** situat fins aproximadament els 5100 km de profunditat i, tot i les grans pressions que suporta s'interpreta que ha d'estar en estat líquid, i el **nucli intern**, sòlid amb densitats que arriben fins als 13 g/cc.

3. Variació de les propietats físiques a l'interior de la terra

Variació de la temperatura amb la profunditat

Si el gradient geotèrmic mitjà es mantingués constant, el centre del planeta estaria a centenars de milers de graus centígrads. Una temperatura d'aquest ordre seria del tot incompatible amb les restants propietats que presenta la terra. El més probable és que el valor del gradient geotèrmic vagi decreixent progressivament fins a fer-se mínim en les capes més internes de la terra de manera que la temperatura en aquestes zones gira al voltant dels 3600 o 3900°C

Variació de la pressió amb la profunditat

La pressió augmenta amb la profunditat amb un gradient pràcticament constant des de la superfície fins a la discontinuïtat de Gutenberg on s'assolarien valors de pressió superiors als 1000 kbars. A partir d'aquesta profunditat la pressió augmentaria més ràpidament per decaure en les zones més internes, on la pressió se suposa és de l'ordre dels 3500 kbars.

Variació de la densitat amb la profunditat

La densitat augmenta amb la profunditat des dels 2,7 o 2,8 g/cm³ en la superfície a valors que oscil·len entre els 13 i 14 g/cm³ en el centre de la terra. Aquest augment no es gradual, si no que es produeix de forma irregular, destacant el salt espectacular que es dona en la transició del mantell al nucli (discontinuitat de Gutenberg) en que la densitat puja bruscament dels 5,5 g/cm³ als gairebé 10 g/cm³. Està clar que aquest canvi de densitat s'ha de correspondre amb un canvi important en la composició química dels materials a nivell de la discontinuïtat.

4. Composició i característiques de les capes terrestres

Escorça

Les roques que formen l'escorça terrestre estan formades quasi completament pels 8 elements següents: oxigen (46,6%), seguit pel silici (27,7%), alumini (8,1%), ferro (5%), calci (3,6%), sodi (2,8%), potassi (2,6%) i magnesi (2,1%). La resta d'elements que trobem a l'escorça es troben en quantitat ínfimes. Tots aquests elements s'anomenen elements geoquímics, i són els components de la major part dels minerals i roques tant de l'escorça com de l'interior del planeta.

Existeixen diferències de composició segons es tracti de regions oceàniques o continentals:

Escorça continental (zones emergides dels continents + plataformes continentals + talús continental)

També anomenada granítica per ser aquesta la seva composició majoritària.

A) Estructura vertical de l'escorça continental. Es diferencien tres nivells o capes verticals de diferent composició i característiques:

- *Capa sedimentària*: recobreix externament l'escorça continental, pot faltar en alguns llocs. Composta per sediments, roques sedimentàries i roques metamòrfiques.
- *Capa granítica*: composta essencialment per roques magmàtiques i metamòrfiques de caràcter àcid, sent la seva composició equivalent a la del granit.
- *Capa basàltica*: formada per roques magmàtiques de caràcter bàsic, sent la seva composició equivalent a la del basalt.

El trànsit entre l'escorça granítica i la basàltica és gradual, amb un augment progressiu de la densitat i una modificació pausada del caràcter àcid de les roques a bàsic. Tot i així, en alguns punts la transició no es tan gradual i queda ben definida per un augment de la velocitat de les ones P i S, donant lloc a la discontinuïtat de Conrad.

B) Estructura horitzontal de l'escorça continental. Es diferencien dues classes de zones:

- *Cratons*: zones geològicament estables, topogràficament planes, sense capa sedimentària o molt prima i no deformada. Solen ocupar les parts centrals dels continents i corresponen a les parts més antigues de l'escorça continental, molt arrasades per l'erosió.
- *Orògens*: zones geològicament actives, amb topografia escarpada, la capa sedimentària està ben desenvolupada i intensament deformada pels processos tectònics.

Cal considerar també la *plataforma continental*, prolongació submergida del continent, d'extensió variable i profunditat mitjana de 200m, plana i de pendent suau, i el *talús continental*, al final de la plataforma continental amb un pendent més pronunciat que assoleix ràpidament els 3000 metres. El peu del talús marca el límit de l'escorça continental i l'inici de l'escorça oceànica.

Escorça oceànica

Anomenada basàltica per la seva composició de roques bàsiques, com el basalt, a diferència de l'escorça continental, predominantment àcida.

A) Estructura vertical de l'escorça continental. Es diferencien tres nivells o capes verticals de diferent composició i característiques:

- *Capa sedimentària*: formada per una capa molt fina de sediments, generalment sense consolidar i bastant moderns. El seu gruix augmenta en aproximar-se als continents.
- *Capa basàltica*: formada per colades basàltiques que, en contacte amb l'aigua de mar, se solidifiquen en formes encoixinades (en anglès pillow-laves)
- *Capa inferior*: de roques plutòniques bàsiques, amb predomini de gabres i peridotites.

B) Estructura horitzontal de l'escorça oceànica. Podem distingir:

- *Les planures abissals:* formen la major part dels fons oceànics. Són enormes extensions a una profunditat mitjana de 3000-4000m, pràcticament planes, en les que ocasionalment poden aparèixer elevacions de diferent tipus com volcans aïllats que a vegades poden emergir formant illes, com les Canàries o Hawaii.
- *Dorsals oceàniques:* grans serralades submarines de milers de km de longitud, originades pels corrents convectius ascendents procedents de l'astenosfera. De vegades poden emergir i formen illes com Islàndia.
- *Fosses oceàniques:* grans solcs de gran profunditat (poden assolir els 11.000m). Se situen al peu d'alguns continents o d'arcs d'illes.

Mantell

Sobre la composició del mantell, s'han emès diferents hipòtesis, tot i que totes coincideixen en establir una composició fonamentalment de *roques ultrabàsiques*. A la part més superior del mantell se li atribueix una composició anàloga a la de la roca ultrabàsica **peridotita**, formada fonamentalment per *piroxens* i *olivins* (tot ells silicats de magnesi, ferro i calci). És possible també l'existència de bosses d'eclogites. En zones més profundes, cap als 400 km aproximadament les altes pressions produïrien una transformació de l'estructura de l'oliví en una estructura més densa del mineral, l'*espinela*. A pressions corresponent a 700 km de profunditat aquesta estructura es transformaria en una mescla del mineral perovskita (d'estructura molt més densa) i d'òxid de magnesi.

Nucli

La hipòtesis tradicionalment acceptada suposa com a composició fonamental una al·leació de ferro i níquel, amb un percentatge de Ni al voltant del 6%. Tot i així, la densitat del nucli que prediuen els models és més baixa que la que hauria de tenir si fos una al·leació de Fe-Ni, amb la qual cosa es creu amb la presència en la composició química del nucli d'un percentatge d'elements menys densos, com el sofre, el silici i inclús oxigen.

La naturalesa metàl·lica del nucli i la dualitat sòlid-líquid afavoreixen la idea de que el camp magnètic terrestre és d'origen intern, i de que aquest es comporta com una gegant dinamo.