



Recursos per a l'aula
(batx.)

ESTUDI D'UNA TEMPESTA GEOMAGNÈTICA

Juan José Curto, Montserrat Vallés i Estefania Blanch

Es presenta una activitat per a l'estudiantat de batxillerat relacionada amb el camp magnètic de la Terra, amb l'objectiu que l'estudiantat:

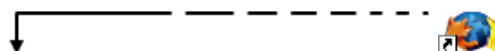
- Conegui el camp magnètic de la Terra, els vectors que el caracteritzen i el mesurament que se'n fa en un observatori.
- Identifiqui una tempesta magnètica terrestre
- Aprengui a mesurar les variacions del camp magnètic de la Terra que corresponen als períodes de tempesta magnètica.

Introducció

El treball consta d'una introducció als conceptes bàsics que permeten comprendre el camp geomagnètic, les tempestes magnètiques i l'enregistrament que se'n fa en un observatori magnètic. L'objectiu final és donar una mesura de l'activitat magnètica. La resolució del qüestionari final obliga a l'estudiantat a revisar i retenir els conceptes introduïts i facilita, l'obtenció de l'objectiu final, que és la mesura dels índex d'activitat magnètica.

Guia del professorat

A continuació s'exposen els conceptes necessaris per fer l'activitat. El professorat pot fer servir aquest material per elaborar les explicacions per a l'estudiantat o donar-li'n l'enllaç directament.



Camp magnètic de la Terra

Què és un camp magnètic?

Hi ha materials a la natura que posseeixen forces d'atracció i repulsió que són de naturalesa magnètica: els imants. Dos imants situats amb els pols oposats s'atrauen i situats amb els pols iguals es repel·leixen. Això es produeix a causa de la força del camp magnètic que crea en el seu si el material de què estan formats (figura 1).

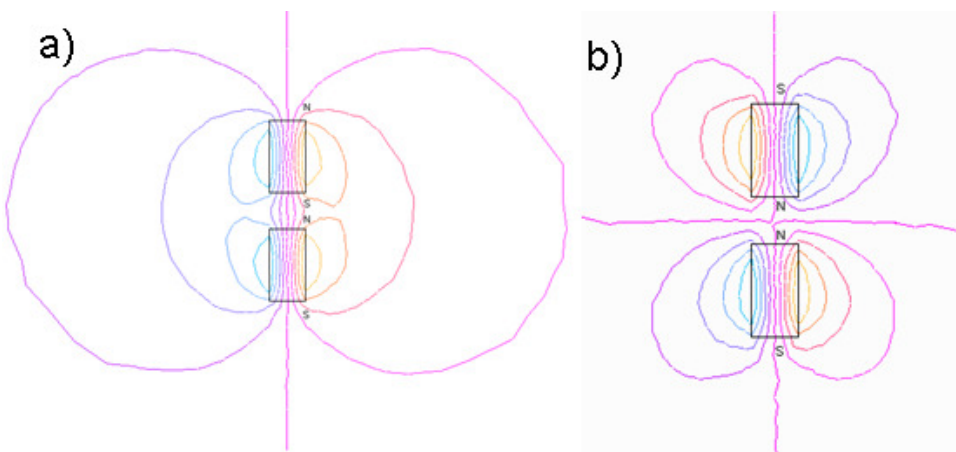


Fig. 1: Línies de camp de dos imants propers. a) Pols oposats i b) pols iguals.

També una càrrega elèctrica en moviment produeix un camp magnètic i adquireix totes les propietats d'un imant.

Com és el camp geomagnètic? Com es crea?

El camp magnètic que genera la Terra es pot comparar amb el camp magnètic creat per un dipol (imant) gegantí centrat al seu interior (figura 2) (Udías i Mezcua, 1997). L'eix d'aquest dipol es troba lleugerament inclinat respecte a l'eix de rotació terrestre (uns 11°) i presenta el pol sud magnètic a prop del pol nord geogràfic. Tanmateix, cal aclarir que des de l'inici del geomagnetisme es va adoptar la convenció d'anomenar *nord magnètic* al lloc on apunta l'agulla de la brúixola (el pol sud físic del dipol) i és aquest el que s'usa a efectes pràctics.

Al llarg del temps (en escala de temps de centenars d'anys) es produeix una deriva de l'eix del dipol magnètic i s'arriba a inversions que poden durar milions d'anys.

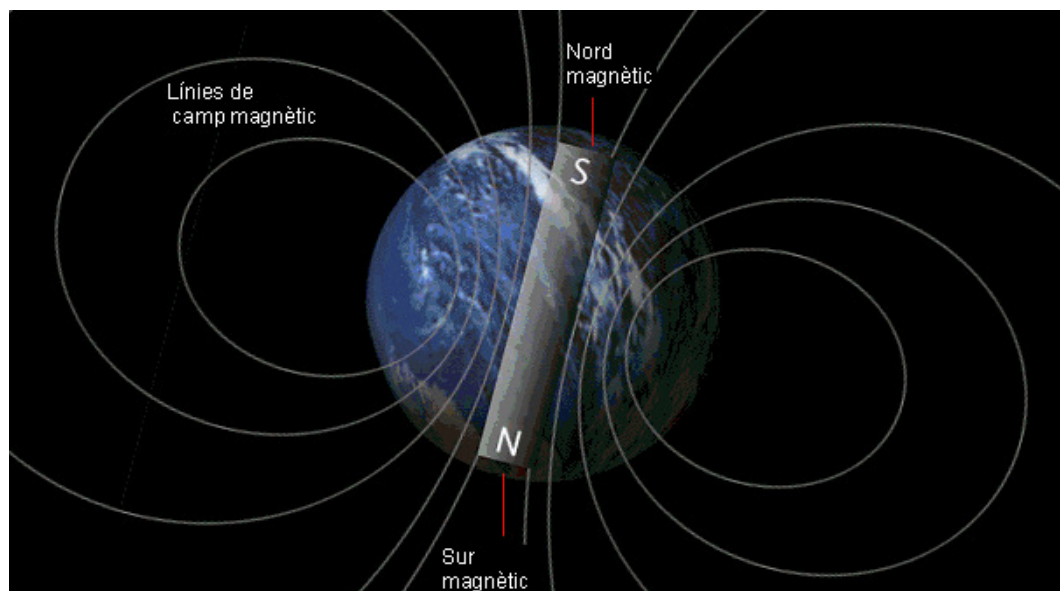


Fig. 2: Esquema del camp magnètic de la Terra mostrant la polaritat.

Podem comprovar la distribució espacial del camp magnètic de la Terra amb una brúixola senzilla. La brúixola està formada per una agulla magnetitzada que pot girar lliurement en un pla, de manera que si la situem en un pla horitzontal, s'orientarà aproximadament cap a la direcció nord-sud de manera espontània. Sempre que no hi hagin altres fonts magnètiques properes, el moment de força que fa orientar l'agulla de la brúixola prové del camp geomagnètic.

Les línies que representen el camp magnètic són les línies de força del camp (figura 3). Es tracen perquè siguin, en tots els punts tangents al vector camp. Cal fixar-se que en algunes regions de la Terra properes als pols les línies són pràcticament perpendiculars a la superfície.

L'origen d'aquest camp geomagnètic prové de l'interior de la Terra (De Miguel, 1980). El nucli extern és líquid i està compost per ferro majoritàriament. Aquest nucli es troba en rotació respecte al nucli intern. Per tant es comporta com un corrent elèctric en moviment i crea un camp magnètic conegut com a *camp principal*.

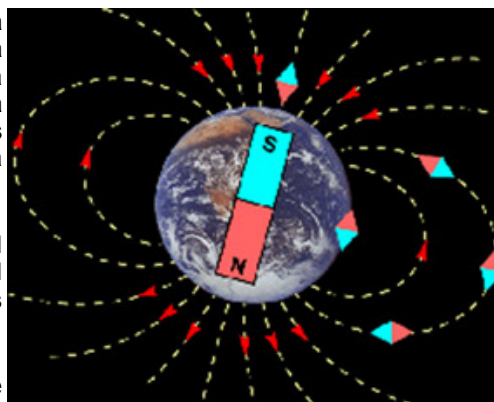


Fig. 3: Línies de força del camp geomagnètic i orientació de la brúixola.

Propietats

El camp geomagnètic evita que totes les partícules que provenen del Sol penetrin a l'atmosfera terrestre a través del vent solar. Funciona com un escut que preserva la vida (Campbell, 2001).

Mesura del camp geomagnètic, aparells

El camp magnètic terrestre és molt variable, i es mesura amb magnetòmetres continuament (figura 4), amb els quals s'enregistren tres components en un suport físic (paper fotogràfic) o informàtic (disquet) que s'anomena *magnetograma*.

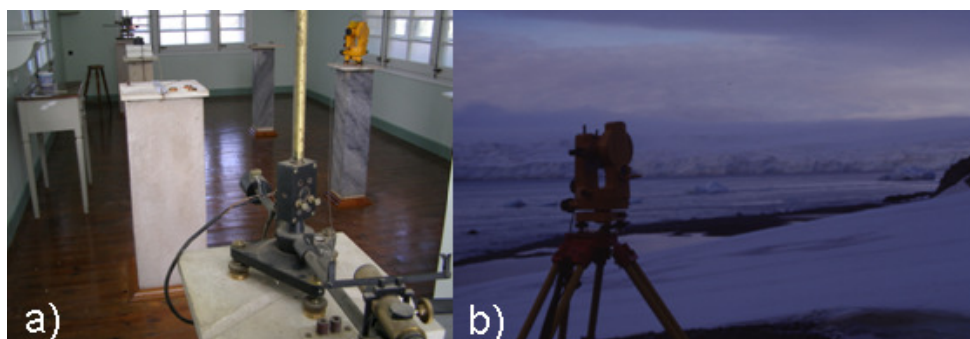


Fig. 4: a) Pavelló d'absolutes de l'Observatori de l'Ebre. b) Magnetòmetre Diflux durant una observació a l'Antàrtida.

Els components del camp geomagnètic poden expressar-se mitjançant diferents sistemes de referència (figura 5): en coordenades cilíndriques H (mòdul del component en el pla horitzontal), D declinació (angle que forma aquest vector amb el nord geogràfic) i B_z (component vertical) o bé en coordenades cartesianes B_x (positiu cap al nord geogràfic), B_y (positiu cap a l'est geogràfic), B_z (positiu cap al nadir, és a dir cap a baix).

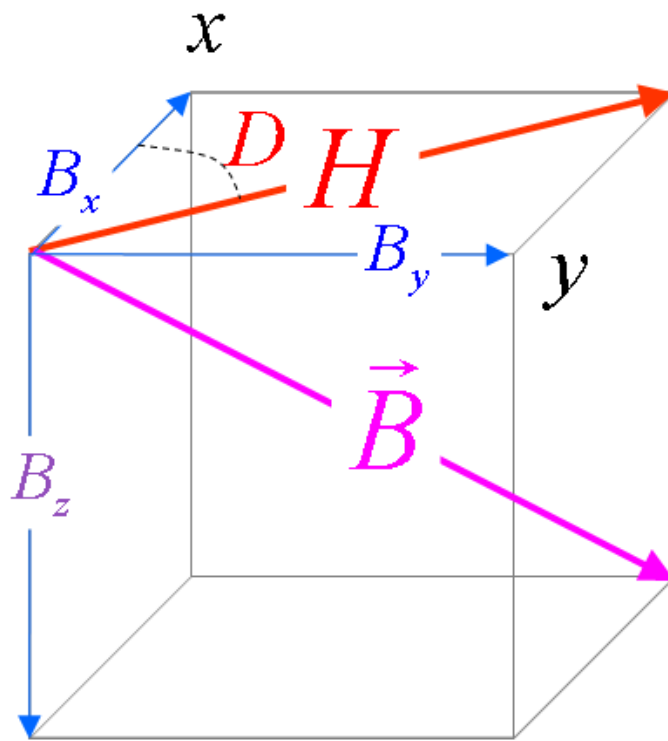


Fig. 5: Components del camp magnètic.

Unitats de mesura

En el Sistema Internacional, la unitat de mesura del camp magnètic és el tesla (T). El valor del camp magnètic de la Terra és molt petit en relació amb el valor d'un tesla, per la qual cosa s'utilitza el nanotesla ($1 \text{ nT} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ T}$).

Els valors habituals del camp geomagnètic són de l'ordre de 10^4 nT . Per exemple, un valor possible enregistrat a l'Observatori de l'Ebre podria ser d'uns 45000 nT.

Tempestes magnètiques

Calma magnètica i tempestes magnètiques

El camp geomagnètic és el resultat de diferents fonts. La més important és el camp principal, que prové de l'interior de la Terra; però el camp geomagnètic també depèn d'efectes externs, com ara de l'activitat solar.

Camp magnètic principal: és el més important. És d'origen endogen i presenta variacions en el temps (variacions al llarg dels segles, anomenades seculars) i en l'espai (anomalies magnètiques geogràfiques). A l'Observatori de l'Ebre el mòdul del camp val, com hem dit abans uns 45000 nT.

Camp variable d'origen extern: presenta variacions de caràcter periòdic (diürnes, mensuals, anuals i decennals) i de caràcter irregular (Bardasano i Elorrieta, 2000). A l'Observatori de l'Ebre la variació diürna en temps de calma és de l'ordre de 30 nT i en episodis de tempesta les variacions poden arribar a 350 nT.

En aquest treball aprendrem a mesurar les variacions que corresponen al períodes de tempesta magnètica a través dels índex K .

Durant les èpoques en què l'activitat solar és baixa, el camp geomagnètic presenta poques variacions; i és el que es coneix com a calma magnètica (*Solar quiet*, Sq). En canvi, quan l'activitat solar és important, es produeixen les tempestes geomagnètiques a causa de l'arribada de partícules del vent solar que, en augmentar en abundància i velocitat fan variar bruscament el camp magnètic.

Normalment el Sol emet un flux continu de matèria compost de protons, electrons i nuclis d'heli (vent solar). Quan es pertorba el camp magnètic de la corona solar aquest flux augmenta i injecta en el medi interplanetari gran quantitat de partícules d'alta energia que arriba a la Terra al cap d'algunes hores o dies (Parkinson, 1983).

Com és una tempesta magnètica?

Una tempesta magnètica presenta tres fases (figura 6)

1. **SSC (Sudden Storm Commencement; començament sobtat d'una tempesta)** : es detecta com un augment brusc en el component H del camp geomagnètic degut a l'augment sobtat de la pressió dinàmica del vent solar.

2. **Fase principal** : es caracteritza per un descens continu durant unes hores del component H del camp i és degut al reforçament dels corrents d'anella (figura 7) que tenen forma toroïdal i que envolten la Terra .
3. **Fase de recuperació** : es caracteritza per la recuperació del valor del camp magnètic. En general necessita alguns dies i està causat per l'afebliment dels corrents d'anella a causa de la recombinació dels ions que havien entrat durant la fase principal.

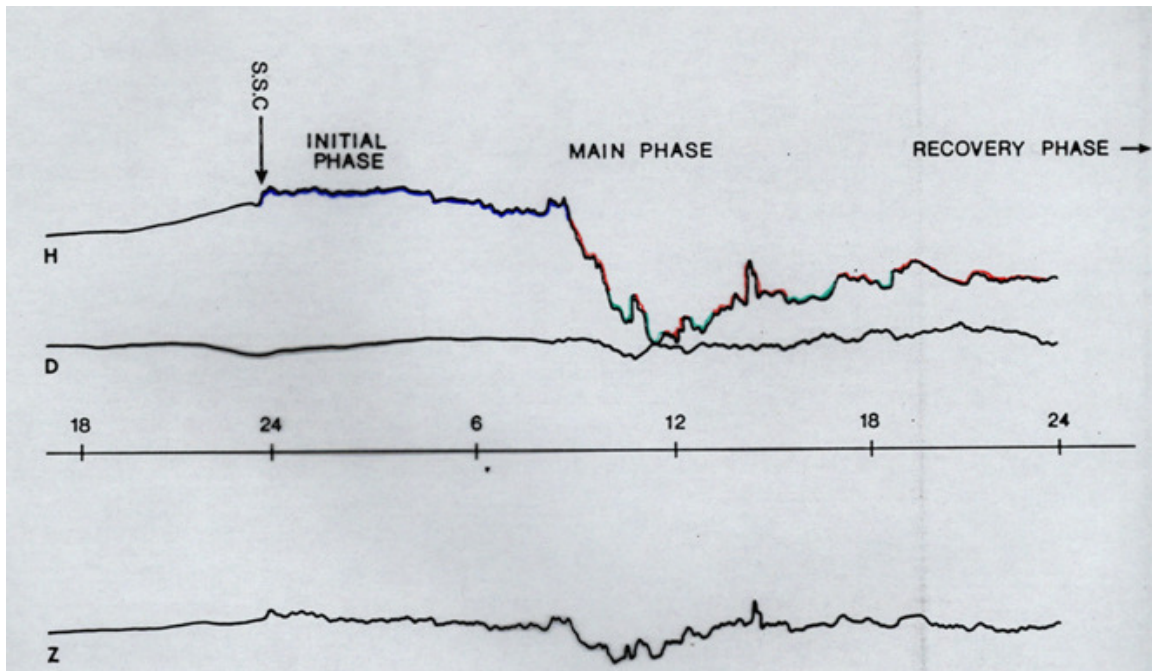


Fig. 6: Còpia d'un magnetograma cobrint 31 hores de registre i mostrant les fases d'una tempesta geomagnètica.

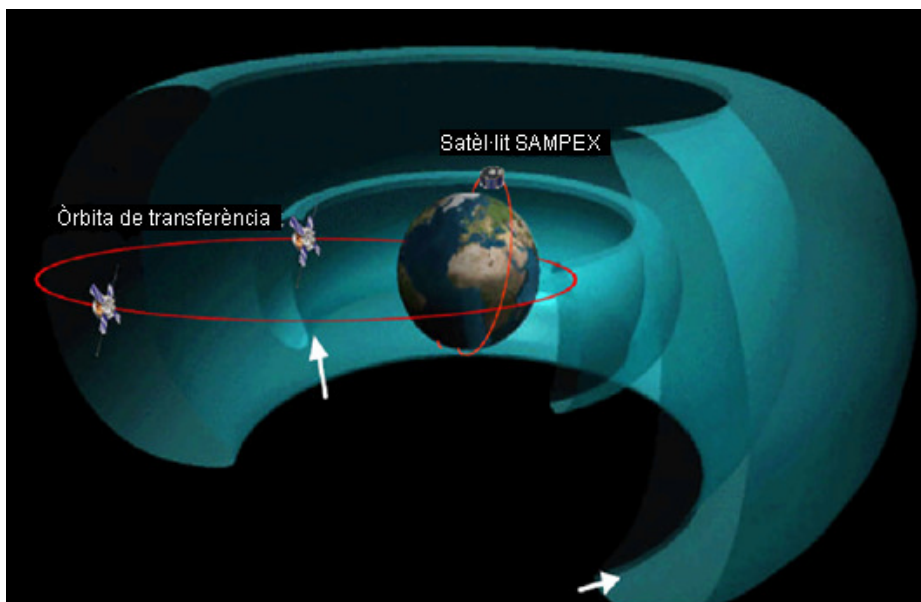


Fig. 7: Corrents d'anella equatorials que envolten la Terra.

Mesura de les tempestes magnètiques

Com es mesura la “força” d'una tempesta magnètica?

Els índexs geomagnètics serveixen per mesurar quantitativament la pertorbació magnètica. La manera més òbvia

d'estudiar un fenomen és agafar la mesura de la variació de la seva intensitat sobre un cert interval. És el cas de l'índex D_{st} , que indica la força del corrent d'anella equatorial. Està basat en els magnetogrames dels observatoris de latituds baixes. Representa la mesura dels valors de les variacions geomagnètiques produïdes per aquest corrent dins d'una hora, després de sostreure'ls la variació regular diürna.

El més usat, però, és l'índex K , que té un sentit físic bastant significatiu. Representa bàsicament les perturbacions causades pels corrents polars que es desenvolupen durant les tempeste, dóna molta informació sobre les fonts solars de l'activitat geomagnètica i és essencial en els models d'interacció Sol-Terra (Mayaud, 1980).

L'índex K va ser desenvolupat per Bartels per controlar objectivament les variacions magnètiques irregulars observades en un observatori donat durant un interval de tres hores de Temps Universal (TU), comptant a partir de les 0 hores a Greenwich. Es basa en l'amplitud de les variacions dels components horitzontals (H i D) després de sostreure'ls la variació diürna regular del dia. Se'n van definir 10 classes, amb límits proporcionals a aquells definits per Bartels a l'Observatori de Niemegk, a Alemanya.

Atesa la gran variabilitat de les variacions s'utilitza una escala quasi logarítmica:

Valor de K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Rang (Ebro)	[0,3]	[3,7]	[7,14]	[14,28]	[28,49]	[49,84]	[84,140]	[140,231]	[231,350]	>350
Rang (Niemegk)	[0,5]	[5,10]	[10,20]	[20,40]	[40,70]	[70,120]	[120,200]	[200,330]	[330,500]	>500

Taula 1: Límits en nanotesles de les 10 classes per als índexs K a l'Observatori de l'Ebre i al de Niemegk.

Així, si la variació del camp magnètic a Ebre és de 35 nT, el valor de l'índex K seria 4. Per observatoris de latitud més baixa que Niemegk -com és el cas d'Ebre-, s'aplica un coeficient corrector per determinar els límits entre classes. Així l'índex K trihorari és un nombre enter, entre 0 i 9, corresponent a la major amplitud mesurada en els components horitzontals (H o D).

L'escalat (mesura) es fa amb una escala graduada (plantilla) que s'aplica sobre els magnetogrames, de manera que les divisions mesurades donen directament el valor de l'índex dins d'un interval trihorari (figura 8).

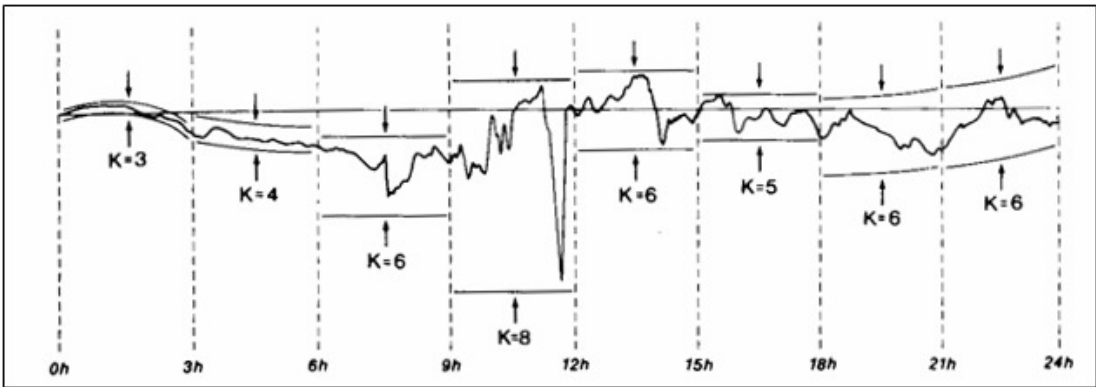


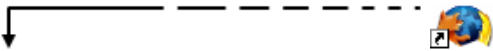
Fig. 8. Exemple de mesura de l'índex K per un dia d'enregistrament.



Per acabar, a la fitxa de l'estudiantat, a l'exercici pràctic **2)**, a més de completar la taula es pot demanar als estudiants

que la contrastin amb les mesures que va donar l'observador a l'Observatori de l'Ebre (la corresponent taula la trobareu a la secció de solucions).

Fitxa de l'estudiantat



Objectius

- Conèixer el camp magnètic de la Terra, els vectors que el caracteritzen i el mesurament que se'n fa en un observatori.
- Identificar una tempesta magnètica terrestre
- Aprendre a mesurar les variacions del camp magnètic de la Terra que corresponen als períodes de tempesta magnètica.

Material

Magnetogrames. Estan inclosos com imatge [2004-11-07A](#), [2004-11-07B](#), [2004-11-08A](#), [2004-11-08B](#). Per comoditat d'impressió s'ha dividit cada dia en dues parts: **A** representa el primer i **B** el segon. **Cal vigilar de no fer cap tipus de reducció o ampliació en les còpies ja que una variació en l'escala tant en la plantilla com en els magnetogrames produiria un error en els resultats** .

Plantilla. Està inclosa com a imatge. Haurà de ser impresa sobre un acetat transparent per permetre la visió dels magnetogrames quan se'n faci la superposició durant la mesura.

Procediment

Passos previs:

Imprimir els magnetogrames des dies 7 i 8 de novembre de 2004 i la plantilla (còpia dels originals enregistrats a l'Observatori de l'Ebre) que heu trobat en els enllaços anteriors. Per poder distingir bé una corba de l'altra, la impressora hauria de poder imprimir en color.

Exercici pràctic:

- 1) Observeu els períodes de calma i d'activitat magnètica. Detecteu quan comença la tempesta i les diferents fases que té.
- 2) Mesureu els índex trihoraris K d'activitat magnètica per als dos dies i completeu la taula 2.

	0-3	3-6	6-9	9-12	12-15	15-18	18-21	21-24
07/11/2004								
08/11/2004								

Taula 2: Índex K dels dies 7 i 8 de novembre de 2004 que cal que completi l'alumne.

Una manera adient de mesurar les variacions magnètiques, dins del grup trihorari, que cal considerar, és: superposant la plantilla transparent sobre el gràfic alhora que enrasem la línia de zero en el punt de mínima i buscar on cau el punt de màxima. El nombre es calcula buscant la línia d'escala immediata inferior. S'ha de fer per a la **H** (gràfica vermella) i per a la **D** (gràfica blava) i triar el màxim valor dels dos. A la figura 9 trobareu un exemple de com s'ha de fer la mesura.

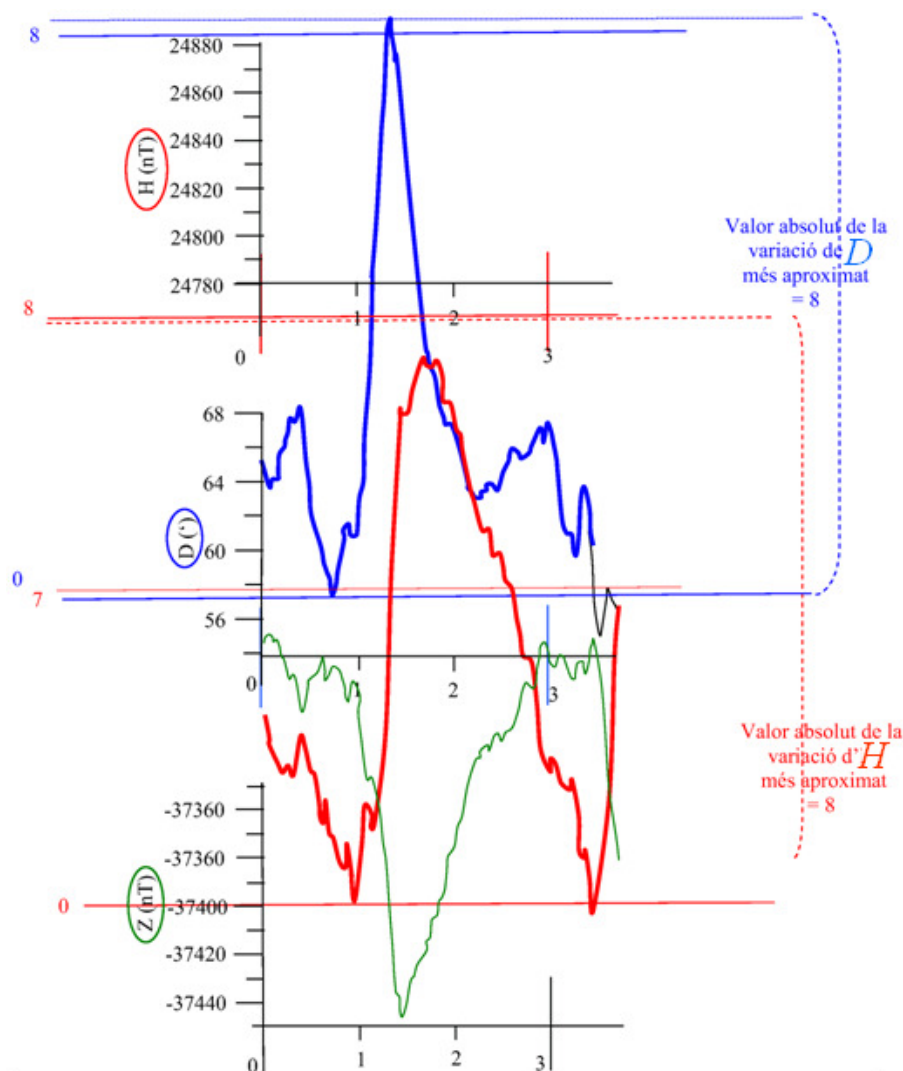


Fig. 9. Exemple d'ajust de la plantilla sobre els gràfics per fer la mesura de l'índex K en l'interval trihorari $[0,3]$ del dia 8 de Novembre de 2004. El desplaçament de les corbes respecte als seus eixos ve donat per la necessitat d'encabir la variació diària dins del registre gràfic.

Qüestionari

Per acabar, i amb la intenció d'ajudar-vos a recordar els conceptes treballats, responeu al qüestionari següent (escolliu només una opció de cada afirmació):

1. El camp geomagnètic prové:

- ☐ a) Exclusivament de l'interior de la Terra
- ☐ b) Exclusivament de l'activitat solar
- ☐ c) De l'interior de la Terra i d'altres efectes externs com ara l'activitat solar.

2. El camp geomagnètic:

- ☐ a) Afavoreix el vent solar
- ☐ b) Evita que les partícules que provenen del Sol amb el vent solar penetrin a l'atmosfera terrestre.
- ☐ c) Està alineat exactament sobre l'eix de rotació de la Terra.

3. El camp geomagnètic :

- ☐ a) Es mesura amb els magnetòmetres i la seva unitat a l'SI és el tesla (T).
- ☐ b) La unitat amb què es mesura a l'SI és el nanotesla (nT).
- ☐ c) Té valors aproximats de 500 nT .

4. La declinació magnètica:

- ☐ a) És el component vertical del camp geomagnètic.
- ☐ b) Ve donada en minuts de grau.
- ☐ c) Es mesura en tesla.

5. L'activitat solar:

- ☐ a) És alta en èpoques de calma magnètica.
- ☐ b) No produeix cap efecte sobre el camp geomagnètic.
- ☐ c) Pot produir variacions brusques en el camp geomagnètic.

6. La fase principal d'una tempesta geomagnètica:

- ☐ a) Es caracteritza per un augment continu del component H del camp.
- ☐ b) Està relacionada amb el reforçament dels corrents d'anella equatorials envolten la Terra.
- ☐ c) És l'última fase de la tempesta.

7. La força d'una tempesta magnètica es mesura amb els índex geomagnètics:

- ☐ a) L'índex D_{st} està basat en els magnetogrames dels observatoris de latituds altes.
- ☐ b) L'índex K es basa en les perturbacions degudes als corrents equatorials.
- ☐ c) L'índex K es basa en l'amplitud de les variacions dels components H i D .

8. La mesura de l'índex K :

- ☐ a) Es fa utilitzant una escala logarítmica.
- ☐ b) Els intervals de mesura són de dues hores.
- ☐ c) L'índex K és un número entre 0 i 5.

9. Les 10 classes per als índex K , en nanotesles, varien gradualment entre:

- ☐ a) 0 i 350 a Niemegk.
- ☐ b) 0 i 500 a l'Observatori de l'Ebre.
- ☐ c) 0 i 350 a l'Observatori de l'Ebre.

10. L'índex $K = 5$ correspon a variacions, expressades en nanotesles, entre:

- ☐ a) [120 , 200] a Niemegk.
- ☐ b) [49 , 84] a l'Ebre.
- ☐ c) [49 , 84] a Niemegk .

Solucions

Solucions al qüestionari

1)	2)	3)	4)	5)	6)	7)	8)	9)	10)
c	b	a	b	c	b	c	a	c	b

Solucions a la taula 2

	0-3	3-6	6-9	9-12	12-15	15-18	18-21	21-24
07/11/2004	1	2	3 (1)	4	5(4)	6	6	7
08/11/2004	8	8	7	5	5(4)	3	5	5

Índex K dels dies 7 i 8 de novembre 2004. Les dades que hi ha entre parèntesi indiquen el valor que en realitat va donar realment l'operador tenint en compte que algunes "punxes" són degudes a pertorbacions artificials del camp magnètic produïdes per fugues en l'alimentació dels trens que van circular per les rodalies de l'observatori, i que, per tant, no s'haurien de tenir en compte.

Referències

Bardasano, J.L. i Elorrieta, J.I. (2000). "Bioelectromagnetismo". *Ciencia y salud, Mc Graw Hill*.

Campbell, W. (2001). "Earth magnetism, a guided tour through magnetic fields". *Harcourt-Academic press*.

De Miguel, L. (1980). "Geomagnetismo". *Pub. IGN*.

Mayaud, P.N. (1980). "Derivation, meaning and use of geomagnetic indices". *AGU*.

Parkinson, W.D. (1983). "Introduction to geomagnetism". *Scottish academic press*.

Udías, A i Mezcuca, J. (1997). "Fundamentos de geofísica". *Alianza editorial*.

Juan José Curto
Observatori de l'Ebre, Universitat Ramon Llull. Professor titular, màster i doctorat en Geofísica.
Adreça electrònica: jjcurto@obsebre.es

Montserrat Vallés
Montserrat Vallès Marro és llicenciada en Física per la Universitat de Barcelona i professora d'institut jubilada. Actualment col·labora amb l'Observatori de l'Ebre en l'àmbit de divulgació.

Adreça electrònica: mvalles8@xtec.cat

Estefania Blanch

Observatori de l'Ebre. Universitat Ramon Llull. Crèdit de síntesi ESO.