

El poder cerebral de la música

Relació entre les adaptacions cerebrals dels músics
i les habilitats cognitives

MARIA CORRAL FERNÁNDEZ

2n de Batxillerat A
INS Samuel Gili i Gaya
Curs 2013 – 2014

Tutor: Eugenio Salvatierra Domper



ÍNDEX

1.	Pròleg.....	3
2.	Precedents històrics	4
3.	Fonaments físics i biològics	4
4.	Processament cerebral de la música i àrees cerebrals que s'estimulen.....	4
4.1.	De l'oïda externa al cervell	4
4.2.	Estimulació cerebral durant l'audició musical.....	8
4.2.1.	Particularitats en l'estimulació cerebral durant l'audició de música consonant i dissonant.....	10
4.3.	Estimulació cerebral durant la interpretació musical.....	14
4.4.	Imaginació musical.....	15
5.	L'aprenentatge a nivell cerebral i àrees cerebrals que intervenen.....	16
5.1.	Plasticitat cerebral	18
5.2.	Processos mentals que intervenen en l'aprenentatge	19
5.3.	Memòria.....	22
5.3.1.	Tipus de memòria	23
5.3.2.	Formació de la memòria.....	25
5.4.	Canvis cerebrals a causa de l'aprenentatge i la memòria	26
6.	Adaptacions en el cervell dels músics i diferències amb el dels no-músics.....	28
6.1.	Diferències en les àrees cerebrals	29
6.2.	Diferències en les connexions neuronals	33
6.3.	Predisposició innata o plasticitat neuronal?.....	34
7.	Relació entre les adaptacions cerebrals dels músics i les habilitats cognitives	35
7.1.	Música i llenguatge	37

8.	Estudi estadístic.....	40
8.1.	Població i mètode	41
8.2.	Resultats.....	43
8.2.1.	Resultats per edats	43
8.2.2.	Resultats per promocions.....	52
8.3.	Anàlisi dels resultats	60
9.	Conclusions.....	65
10.	Agraïments.....	67
11.	Referències complementàries.....	68
11.1.	Bibliografia	68
11.2.	Annexos.....	71
	Annex 1. Precedents històrics	71
	Annex 2. Fonaments físics i biològics	71
	Annex 3. Documents de l'estudi estadístic	71

1. PRÒLEG

Sovint escoltar música, interpretar-la, cantar-la o, fins i tot, només imaginar-la ens produeix una sensació de benestar físic, psíquic i emocional. Aquesta satisfacció sensorial estimula algunes de les mateixes àrees del cervell que activen el menjar, la droga i el sexe. Així doncs, reproduint les paraules del destacat autor anglès Samuel Johnson, es pot dir que “la música és l’únic plaer sensual sense vici”.

L’home és un ésser energètic i sensible, que respon als estímuls que l’envolten. La música, com a seqüència de sons, és un conjunt de vibracions físiques, és a dir, energia. Quan dues energies interactuen, sempre en resulta una resposta que genera una sèrie d’estimulacions a diversos nivells, motor, cognitiu i emocional.

En aquest treball es pretén relacionar dos processos que tenen lloc al cervell. D’una banda, aquestes estimulacions que provoquen l’estudi i la pràctica musical i, de l’altra, les habilitats cognitives que intervenen en qualsevol aprenentatge. La hipòtesi plantejada és que potser les adaptacions cerebrals dels músics faciliten les habilitats cognitives. A priori, pot semblar un plantejament obvi, evident i que de manera intuïtiva ja es podria respondre; però el meu interès se centra en els processos neurofisiobiològics del cervell i fins a quin punt faciliten l’aprenentatge en altres camps.

Estudis realitzats en els últims anys han permès saber que la percepció i l’execució musical activen diverses àrees del cervell, que varien segons l’experiència i la formació musical de cada persona. Algunes d’aquestes àrees cerebrals estan involucrades en altres tipus de cognició. També s’ha vist que els cervells dels músics tenen especialitzacions addicionals, és a dir, algunes àrees dels seus cervells s’activen més i més intensament que les mateixes àrees dels no músics i disposen d’un hiperdesenvolupament que comporta un augment del volum de la matèria gris de determinades estructures cerebrals.

El cervell és objecte d’estudi de molts científics actuals. És l’òrgan més desconegut de l’ésser humà. La neurociència és un camp d’investigació obert que pot obtenir resultats que fins fa molt poc semblaven de ciència-ficció. Qui sap quins seran els mètodes d’aprenentatge dels nostres néts i si entre ells hi serà la música.

2. PRECEDENTS HISTÒRICS

Veure *annex 1*.

3. FONAMENTS FÍSICS I BIOLÒGICS

Veure *annex 2*.

4. PROCESSAMENT CEREBRAL DE LA MÚSICA I ÀREES CEREBRALS QUE S'ESTIMULEN

La música no existeix fora del cervell. Una sola nota comença quan les vibracions viatgen per l'aire i fan que el timpà vibri. Dins de l'oïda les vibracions es converteixen en impulsos nerviosos que viatgen al cervell, on es perceben com a diferents elements de la música, per exemple to i melodia. Quan aquests elements es recombinen formen un patró que reconeixem com a música (veure http://youtu.be/9_W9LSiQiBY).

En l'audició s'ha de diferenciar entre sentir i escoltar. Sentir és un procés passiu, inconscient i involuntari. En canvi, escoltar és actiu, conscient i voluntari. El nostre objecte d'estudi és l'acció d'escoltar.

A continuació s'exposa com el cervell processa la música i quins canvis provoca a nivell anatòmic, funcional, emocional i cognitiu.

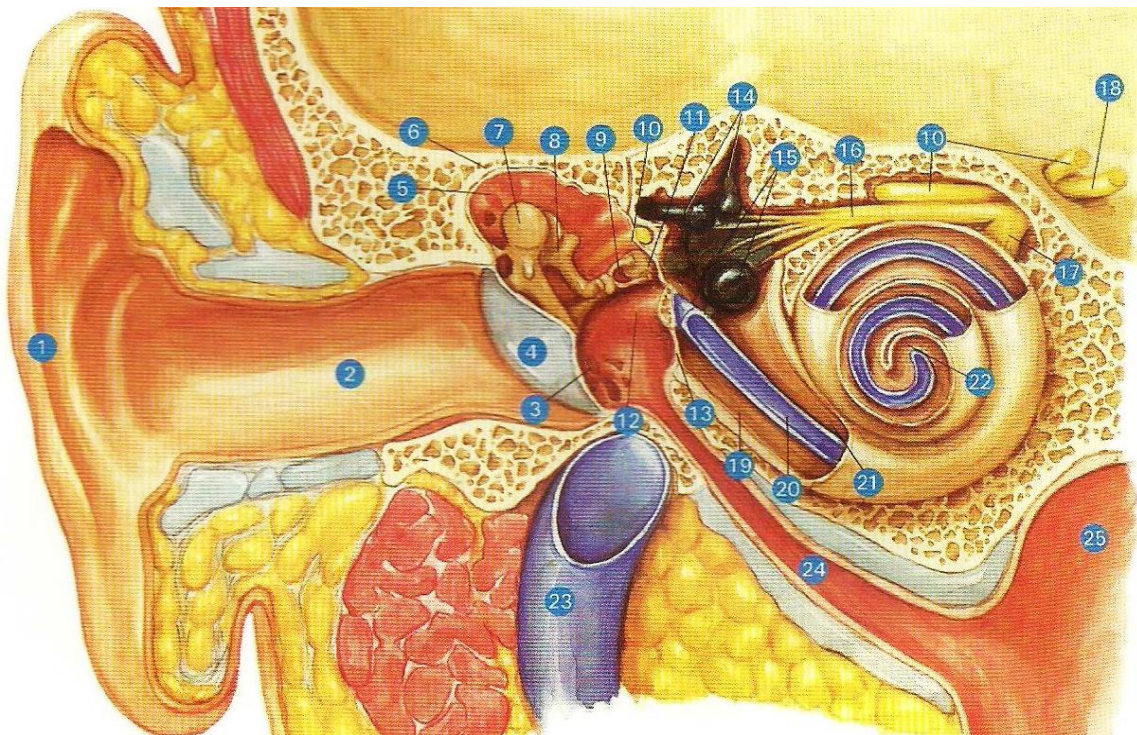
4.1. DE L'OÏDA EXTERNA AL CERVELL

El sistema nerviós necessita els sistemes sensorials per rebre informació externa i interna, és a dir, han de tenir la capacitat de:

- Discriminar entre diferents formes d'energia (mecànica, visual, sonora...).
- Respondre de forma diferencial segons el grau d'intensitat de l'estímul.
- Elaborar una resposta adequada i ràpida.

El senyal sensorial, després d'un procés de transformació en una forma d'energia comprensible pel sistema neuronal, és captat pel sistema nerviós central.

Físicament, la música és una seqüència de sons o la successió d'interferències sonores constructives. El processament musical consisteix en la transformació de l'energia mecànica transmesa en les ones sonores en percepcions musicals. El sistema auditiu s'encarrega de percebre les sensacions sonores, és a dir, captar la variació de pressió atmosfèrica causada per les ones sonores i les amplificar-les. A través del nervi vestibulococlear es transmet la informació codificada al sistema nerviós central.



Sistema auditiu de l'ésser humà. Font: curs d'anatomia de l'ISC a l'XLab.

Oïda externa	Oïda mitjana	Oïda interna
1 Pavelló auricular	4 Timpà	13 Finestra oval o vestibular
2 Conduïte auditiva externa	Ossicles	10 Nervi facial
	7 Martell	16 Nervi vestibular
	8 Enclusa	17 Nervi coclear
	9 Estrep	18 Nervi vestibulococlear
		19-22 Còclea

El processament cerebral s'inicia a l'oïda externa. El **pavelló auditiu** percep la variació de pressió de l'aire i la condueix, a través del conduïte auditiu extern, cap a la membrana del **timpà**, que vibra a la mateixa freqüència de l'estímul inicial. Aquesta vibració es propaga cap als **ossicles** (el martell, l'enclusa i l'estrep de l'oïda mitjana), que actuen com un medi transmissor amplificador (la velocitat de propagació de l'ona

augmenta). El múscul tensor del timpà i el múscul de l'estrep, dos músculs associats als ossicles, ajuden a la transmissió de la vibració. A través de la **finestra oval** o vestibular (que connecta l'oïda mitjana i la interna), l'estrep comunica la seva vibració a l'endolimfa, un dels líquids de l'interior de la **còclea**.

A la còclea es troba la **membrana basilar**, que conté les cèl·lules ciliars (constitueixen l'òrgan de Corti). Cadascuna d'elles respon a una freqüència de vibració diferent (veure <http://youtu.be/-9ys6b1J2eY>) i la transforma en impulsos electroquímics que es propaguen pel **nervi coclear**. Les fibres d'aquest nervi, juntament amb les del nervi vestibular, formen part del **nervi vestibulococlear**, el principal nervi sensorial específic del sentit de l'oïda (el coclear) i de l'equilibri (el vestibular). Per a l'estudi del processament de la música interessa la via auditiva. El nervi vestibulococlear penetra, acompanyat del nervi facial, al **conduïte auditiu intern** i transmet informació aferent (que condueix endins) des de l'oïda interna fins al sistema nerviós central.

Els potencials d'acció es dirigeixen cap als dos hemisferis cerebrals predominant la via contralateral. És a dir, la informació sonora codificada per l'oïda esquerra es dirigeix majoritàriament (un 70% - 80%) cap a l'escorça auditiva de l'hemisferi dret i la codificada per l'oïda dreta (la resta) cap a l'escorça auditiva de l'hemisferi esquerre. Abans d'arribar a l'escorça auditiva primària, els potencials d'acció es propaguen a través de les neurones de diferents estructures cerebrals. Al **tronc encefàlic** es fa el primer anàlisi, inconscient i elemental, de la informació sonora codificada. Consisteix en:

- La detecció del to, el ritme i els patrons acústics que caracteritzen el so percebut.
- La localització del focus sonor a partir de la diferència d'arribada dels sons de baixa freqüència a les dos oïdes. Es produeixen les primeres respostes autònomes corporals:
 - Sincronització del ritme amb el moviment corporal. Als nuclis coclears del tronc encefàlic es produeix una sincronització amb les neurones motores i a través de la medul·la espinal s'adapta el ritme amb el nostre moviment.
 - Sincronització del ritme amb el sistema respiratori. La freqüència respiratòria s'adapta al ritme de la música.

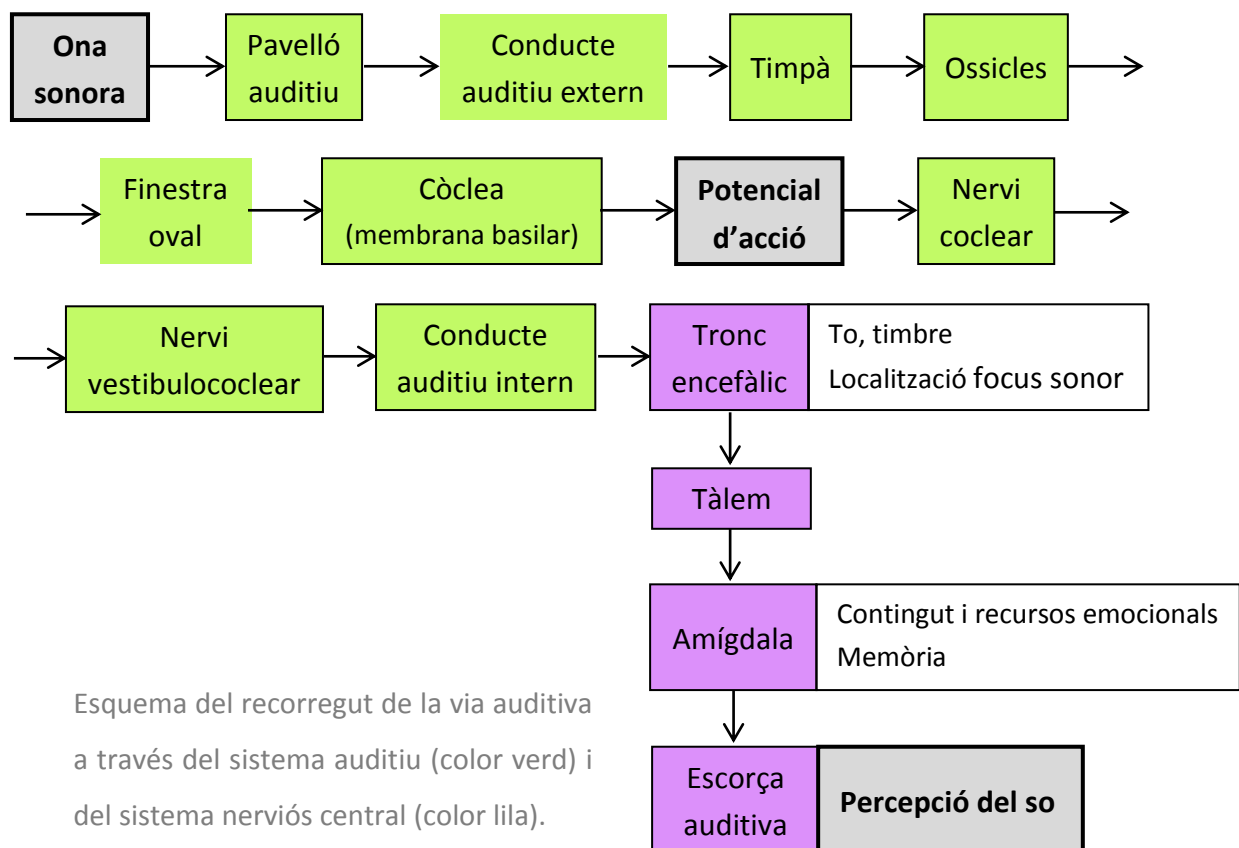
- Activació dels sistemes d'atenció i de memòria.
 - A través del sistema noradrenèrgic (locus coeruleus i subcoeruleus del tronc encefàlic) s'excita l'escorça cerebral perquè l'estat de vigília sigui molt més actiu i atenguem a la informació sonora.
 - El sistema colinèrgic (des dels nuclis basals de Meyert, situats al pà·lid, a l'escorça frontal i parietal principalment, i al tàlem, amígdala i hipocamp) estimula el mecanisme de memòria per recordar la informació externa percebuda.
 - La serotonina és un neurotransmissor que intervé en la regulació dels impulsos que poden generar l'alliberament d'acetilcolina (neurotransmissor que regula l'activitat sinàptica) i noradrenalina (neurotransmissor que facilita l'atenció i la capacitat d'aprenentatge). És a dir, controla els comportaments conscients que ens reprimim.

A continuació, els potencials d'acció es transmeten cap al **tàlem**, que decideix quina informació es dirigeix cap a l'amígdala i a les àrees corticals. A l'**amígdala** té lloc:

- L'avaluació del contingut emocional de la informació sonora percebuda.
- La gestió dels recursos emocionals necessaris a través del sistema autònom i l'hipotàlem.
- L'emmagatzematge de la informació sonora percebuda a la memòria a través de l'hipocamp.

Finalment, els potencials d'acció arriben a l'**escorça auditiva**, on son transformats en la percepció o sensació musical final (to, melodia, ritme), fenomen encara no explicable per la neurociència. Concretament es tracta de l'escorça auditiva primària, a la part mitjana del girus de Heschl's de la cissura de Sylvio, del lòbul temporal. Si el so està basat en experiències passades, és processat a l'escorça auditiva secundària. Cada hemisferi processa els aspectes musicals en els que està especialitzat. L'escorça auditiva primària manté connexions associatives amb l'escorça prefrontal, les zones associatives i el sistema límbic. Totes elles, juntament amb les escorces auditives, realitzen tres funcions bàsiques: percebre l'estímul sonor, identificar patrons sonors i integrar l'audició amb altres modalitats sensorials i funcions superiors (memòria,

imaginació, emocions, cognició). Aquestes àrees d'associació posen fi al trajecte dels impulsos nerviosos integrant la resta d'informació percebuda (visual, tàtil, gustativa i/o olfactiva).



4.2. ESTIMULACIÓ CEREBRAL DURANT L'AUDICIÓ MUSICAL

En la percepció musical intervenen diferents components bàsics d'una peça musical: la melodia, el ritme, el timbre i l'harmonia. Està demostrat que s'utilitzen xarxes neuronals diferents per a la percepció de la melodia i del ritme. És a dir, en el processament cerebral de la música es distingeixen dos processos, un tonal i un altre temporal, que són executats per dos subsistemes neuronals diferenciats.

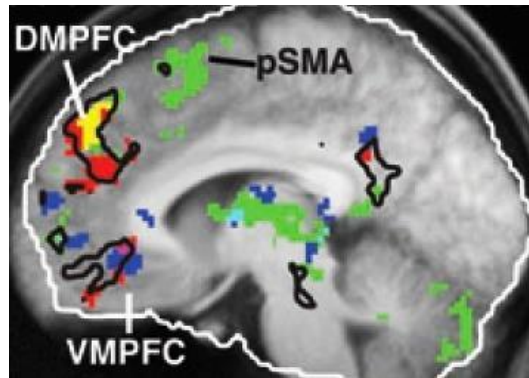
Propietat percebuda de la música	Àrea cerebral on es processa
Tons aïllats	Escorça auditiva primària
Melodia (successió de tons)	Escorça auditiva secundària, lòbuls anterior i posterior temporal superior de l'HD (no-músics) o HE (músics)
Sensació tonal	Escorça auditiva de l'HD
Harmonia	Regions auditives del lòbul temporal de l'HD i escorça auditiva secundària
Timbre	Regions auditives del lòbul temporal de l'HD i àrea posterior-superior del lòbul parietal
Relació entre la seqüència de tons (important pel ritme)	Escorça auditiva de l'HE
Ritme (percepció i producció)	Àrea motor i premotor, cerebel lateral i ganglis basals (àrees essencials pel moviment corporal) *

* En el processament del ritme un hemisferi de l'escorça cerebral participa més que l'altre, però no s'ha determinat quin dels dos és perquè diferents estímuls rítmics requereixen diferents capacitats de processament. El lòbul temporal esquerre, per exemple, processa millor els estímuls breus i està més actiu quan percebem ritmes de sons musicals curts que el lòbul temporal dret.

Pel que fa als hemisferis cerebrals:

- L'HD normalment és el no dominant (en dretans). Està especialitzat en l'aspecte emotiu de la música i és sensible a la percepció de:
 - El to, la melodia, l'harmonia, el timbre, l'entonació, la prosòdia i el cant.
 - Les emocions negatives, la seva activitat incrementa amb música dissonant, atonal, trista.
- L'HE normalment és el dominant (en dretans). Està especialitzat en l'aspecte analític de la música i és sensible a la percepció de:
 - El ritme, el tempo i la lletra.
 - Les emocions positives, la seva activitat incrementa amb música consonant, tonal, alegre.

Amb la pràctica o entrenament musical, els músics professionals modifiquen la dominància hemisfèrica, desplaçant-la de dreta a l'esquerra, en la percepció melòdica i harmònica.



Àrees cerebrals actives durant l'audició musical.

Roig: memòria. Blau: gust musical. Verd: familiaritat.

4.2.1. PARTICULARITATS EN L'ESTIMULACIÓ CEREBRAL DURANT L'AUDICIÓ DE MÚSICA CONSONANT I DISSONANT

La música, més enllà de notes disposades d'una determinada manera en una partitura, és una eina eficaç per modular les emocions i influir en els nostres actes cognitius i conductuals. És capaç d'evocar emocions molt diverses, des de positives o agradables fins a negatives o desagradables passant per un rang molt ampli.

Tot i que s'han dedicat nombrosos estudis a aquesta investigació, encara no es coneix amb detall el paper de les diferents parts del cervell en el processament de les emocions. El que sí se sap és que les estructures cerebrals que les processen intervenen en el procés musical, fet que explica la seva relació directa.

Un conjunt de sons pot produir una sensació sonora agradable (consonància) o desagradable (dissonància). Musicalment parlant, aquests dos casos es poden explicar de la següent manera:

- La **consonància** es produeix entre dos sons que tenen una **relació** algebraica o quocient **simple** (entre nombres enters) entre les seves **freqüències**. N'és un exemple l'interval de cinquena justa entre Do³ i Sol³.

$$\frac{f(\text{Do}^3)}{f(\text{Sol}^3)} = \frac{260 \text{ Hz}}{390 \text{ Hz}} = \frac{2}{3}$$

- La **dissonància** es produeix entre dos sons que tenen una **relació** o quocient **complex** (entre nombres fraccionaris) de les seves **freqüències**. N'és un exemple l'interval de segona menor entre Sol³ i Sol#³.

$$\frac{f(\text{Sol}^3)}{f(\text{Sol}^{\#3})} = \frac{390 \text{ Hz}}{430 \text{ Hz}} = \frac{3'9}{4'3}$$

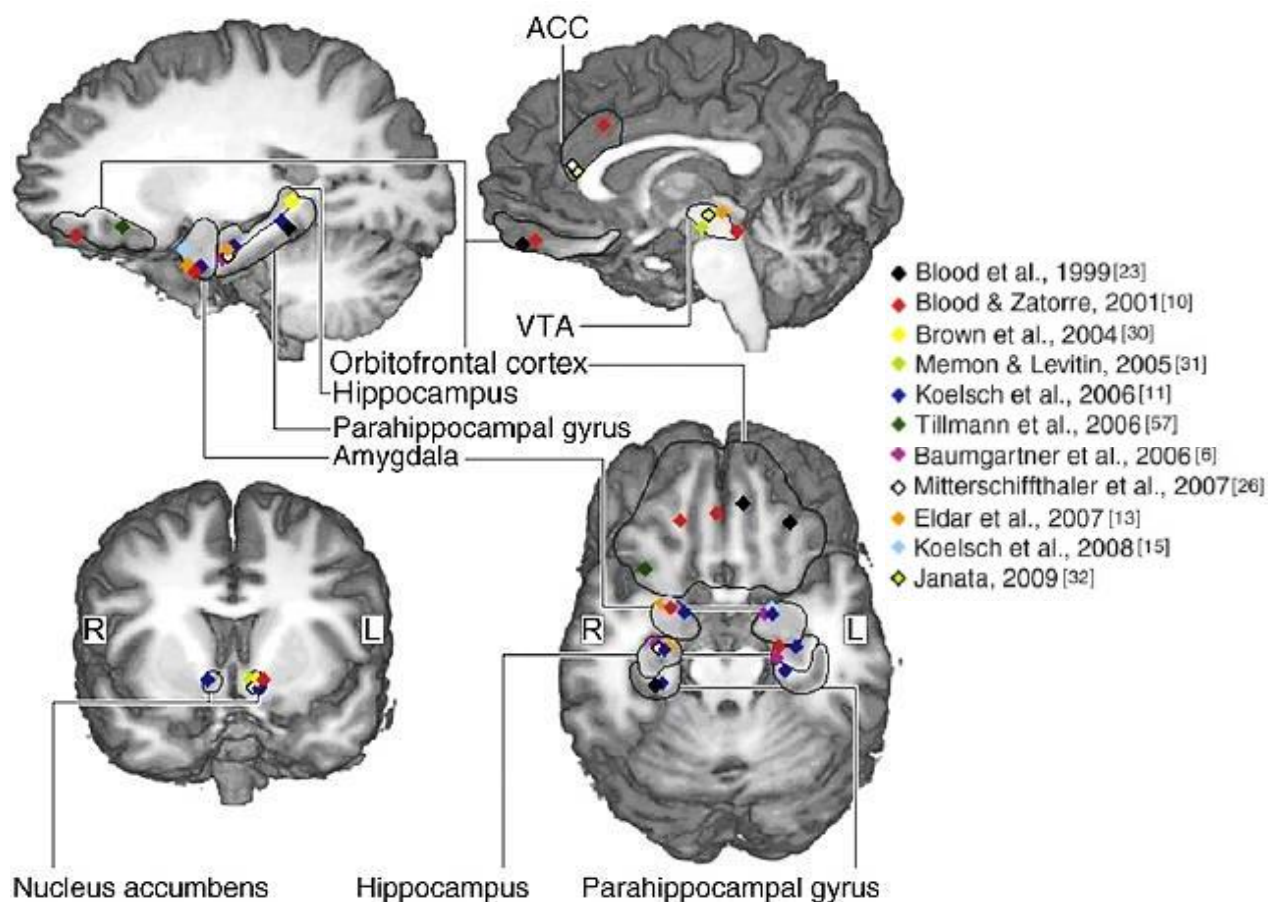
La societat occidental considera agradables els sons consonants, però la cultura, l'entorn, les experiències personals, l'aprenentatge, aspectes musicals (classificació tonal, número de semitons per octava, referències d'afinació...) i altres factors poden modificar aquesta percepció. És per això, per exemple, que als orientals els pot semblar plaent el que nosaltres classifiquem com a dissonant. Per això es pot dir que el nostre cervell neix en un 30% i es forma o es desenvolupa en un 70%. Els gustos musicals són personals i cadascú té les seves preferències. *Divenire* de Ludovico Einaudi i la BSO de *Lost* de Michael Giacchino són dues peces que ens poden estimular emocionalment: <http://youtu.be/X8rnBhJX6xE> i <http://youtu.be/WetJOa4hTrQ>.

A continuació s'exposen tots els intervals simples, que no sobrepassen una octava, i la seva classificació. Els compostos es poden descompondre en un o més intervals de 8ª o octava i un interval simple.

La taula següent mostra les característiques principals generalitzades de la música que produeix les cinc emocions bàsiques:

	ALEGRIA	TRISTESA	IRA	POR	TENDRESA
Mode	Major	Menor	Menor	Menor	Major
Tons	Aguts	Mitjans – greus	Aguts	Aguts	Mitjans - greus
Intervals	Amplis	Reduïts	Amplis	Reduïts	Reduïts
Harmonia	Consonant	Dissonant	Dissonant	Dissonant	Consonant
Volum	Mitjà – alt	Baix	Alt	Baix i variable	Mitjà – baix
Dinàmica	<i>Crescendo</i>	<i>Descrescendo</i>	<i>Crescendo</i>	Variable	<i>Descrescendo</i>
Articulació	<i>Accelerando</i> <i>Staccato</i>	<i>Ritardando</i>	<i>Staccato</i>	Variable	<i>Legato</i>
Tempo	Variable	Lent	Variable	Ràpid	Lent

L'**emoció musical** i l'**audició musical** tenen **circuits** de descodificació **cerebral independents**. Les àrees del cervell involucrades en la consonància i la dissonància són diferents a les que processen els paràmetres de la música (principalment a l'escorça dels lòbuls temporal i frontal). La informació musical arriba primer a l'escorça auditiva per una anàlisi inicial i a continuació es dirigeix cap a les zones encarregades de la interpretació emocional.



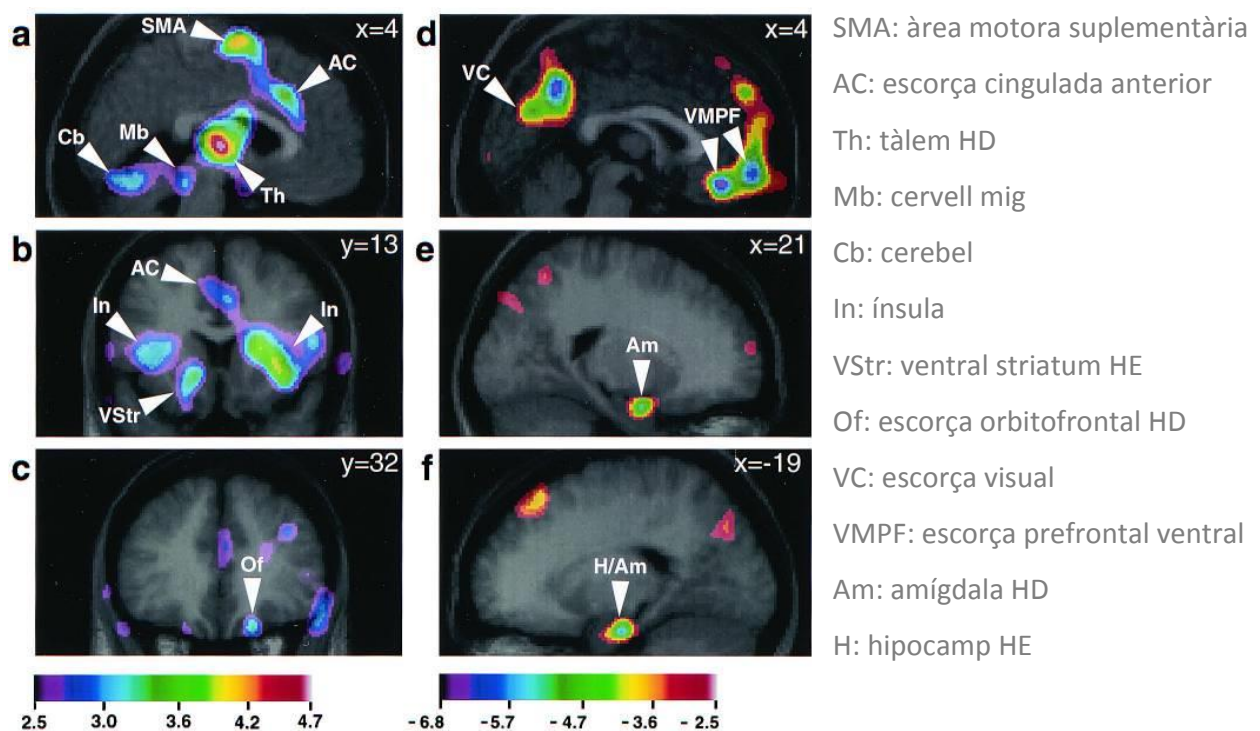
Àrees cerebrals del sistema límbic i paralímbic activades per la música.

Diferents estudis han determinat les àrees del cervell activades durant l'audició d'acords (tres o més notes simultànies) consonants i dissonants. Quan s'estimulen els centres associats al plaer no s'estimulen els relacionats amb els que podrien donar sensacions desagradables. La música sembla que està en estreta correlació amb els centres cerebrals del plaer.

	Consonància	Dissonància
Activació	Lòbul frontal de l'HE	Lòbul frontal de l'HD
	Nucli accumbens	Amígdala
	Ínsula anterior	Hipocamp
	Regió orbitofrontal de l'HD	Girus hipocampal
	Regió de sota del cos callós	
	Circumvolució frontal inferior	
Inhibició	Amígdala	Nucli accumbens
	Hipocamp	

S'observa, per tant, que l'**apreciació emocional** de la **música** involucra:

- Regions subcorticals del **sistema límbic** implicades en la generació de les emocions bàsiques, com el nucli accumbens, l'hipotàlem, l'amígdala, l'hipocamp i el girus hipocamal.
- Regions corticals implicades en aspectes cognitius de la interpretació emocional de les obres musicals, com l'ínsula i l'**escorça prefrontal i orbitofrontal**.



Àrees cerebrals activades per l'audició de música consonant (a – c) i dissonant (d – f).

La percepció de música agradable (consonant) activa algunes de les mateixes àrees del cervell que s'estimulen amb el consum de drogues, el menjar alguna cosa que ens agrada i la pràctica de sexe. En prendre cocaïna, per exemple, intervé el nucli accumbens, el tàlem, l'ínsula, l'hipocamp i l'amígdala i a l'ingerir xocolata, l'ínsula, l'escorça orbitofrontal i la regió de sota del cos callós.

4.3. ESTIMULACIÓ CEREBRAL DURANT LA INTERPRETACIÓ MUSICAL

L'audició no és l'única tasca que duu a terme el músic durant la **interpretació** d'una **obra**. Existeix una important estimulació i demanda de **múltiples processos cognitius**, que a l'unificar-se es converteixen en un **poderós estímul multisensorial**. Per tant, existeixen interaccions entre l'escorça premotora i l'auditiva.

Les diferents tasques que realitza un músic durant la interpretació musical i les àrees cerebrals on es processen són:

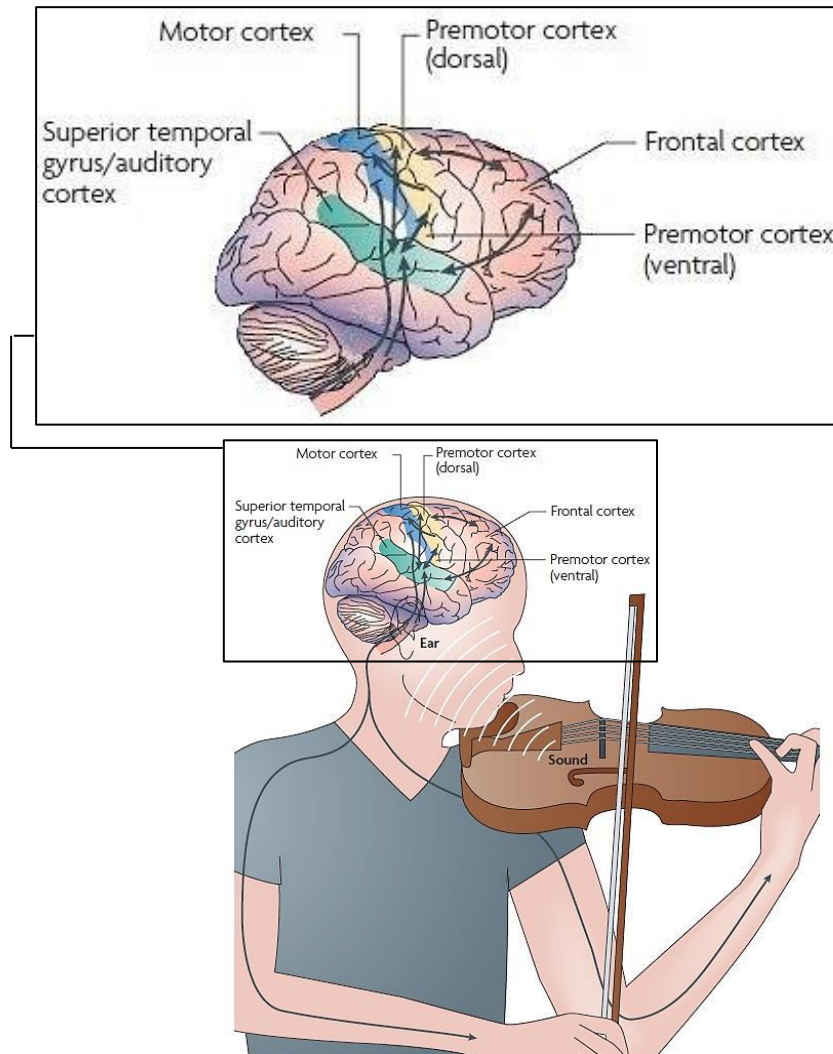
Tasca del músic	Àrea cerebral on es processa
Llegir la partitura	Lòbul occipital (veure) i parietal (interpretar)
Emocionar-se	Sistema límbic i àrees corticals associades
Recordar o memoritzar	Hipocamp
Imaginar o prestar atenció	Escorça prefrontal
Tocar l'instrument	Escorça prefrontal i somatosensorial
Motricitat	Escorça motora primària ¹ , àrea motora suplementària ² , cerebel ³ i ganglis basals ²
Comprendre l'obra musical	Àrea de Broca

¹ Envia ordres motrius a les mans i als dits.

² Estan involucrats en l'execució motriu del ritme.

³ Controla els moviments individuals dels dits de manera molt precisa. El cerebel d'un pianista professional, per exemple, és més gran que el considerat com a normal com a conseqüència d'un entrenament a llarg termini que li permet articular unes trenta notes per segon.

La repetició dia a dia de totes aquestes accions provoquen un **canvi estructural cerebral**, una hipertròfia del lòbul temporal esquerre al voltant de la zona del llenguatge, tres o quatre vegades superior al de la població general.



Interaccions auditivo-motrius durant la pràctica musical.

4.4. IMAGINACIÓ MUSICAL

La imaginació musical és l'habilitat d'escoltar **música** sense que existeixi, per exemple, llegir una partitura i que el nostre cervell la interpreti (**reproduir-la mentalment**).

Les àrees cerebrals que intervenen en el processament musical citades anteriorment també s'activen a través únicament de la imaginació. És a dir, només pensant en una música, sense necessitat d'estar escoltant-la en temps real o diferit, s'estimulen les **mateixes zones del cervell**.

Encara que no existeixi un estímul sonor físic real, l'escorça prefrontal provoca el record d'una música. En aquest procés predomina l'activació de l'**escorça auditiva** de l'**HD** i l'**escorça frontal**. Si s'imagina una cançó (amb lletra), també ho fan les àrees lingüístiques de l'HE. Si la persona pensa que està interpretant l'obra, s'estimulen els **lòbuls frontal i parietal**, el **cerebel** i les **àrees motors suplementàries**.

A més, en l'aprenentatge d'un instrument musical la pràctica mental pot arribar a ser tan efectiva com la real. No s'assoleix el mateix grau de perfecció, però augmenta la destresa i, amb un mínim de pràctica real addicional, pot aconseguir-se el mateix nivell. Per tant, és possible **aprendre a través del pensament**. Un resultat que, sense dubte, hauria de potenciar-se en l'àmbit educatiu.

De la mateixa manera, també hi ha activitat cerebral en el silenci entre dues cançons o instants abans que soni una música que s'espera. En aquests moments intervé:

- L'**escorça prefrontal**, que planifica conductes cognitives complexes (pensament).
- L'**escorça premotora**, que està associada amb el **cerebel** i els **ganglis basals** que preparen el moviment del cos (acció).

Les connexions neuronals no són tan intenses quan la persona escolta una melodia que no coneix. És a dir, a l'**anticipar** o **predir música** també s'activen pràcticament les mateixes àrees cerebrals que quan s'escolta.

5. L'APRENTATGE A NIVELL CEREBRAL I ÀREES CEREBRALS QUE INTERVENEN

L'aprenentatge és el procés mitjançant el qual s'adquireixen nous coneixements o es modulen les capacitats de l'individu per realitzar les tasques que li són pròpies com a resultat de l'experiència. Fa possible que adaptem el nostre comportament i és un poderós impuls pel progrés social. En general, provoca un canvi en la conducta, però no tots els canvis de conducta són conseqüència de l'aprenentatge. En les darreres dècades s'han unificat dos camps científics: la neurologia, ciència del cervell, i la psicologia cognitiva, ciència de la ment. Segons aquest nou plantejament, aprendre significa bàsicament adquirir noves representacions neuronals d'informació i establir

relacions funcionals entre elles i les ja existents en el cervell. Això és possible perquè quan aprenen es formen noves connexions (sinapsis) o augmenta la intensitat de moltes d'elles o desapareixen moltes de les que s'havien establert entre les neurones implicades en el coneixement. Les neurones no estan connectades unes amb altres de manera fixa. Al contrari, els seus contactes canvien constantment per tal d'adaptar-se a les noves circumstàncies (plasticitat). En això consisteix la base de qualsevol procés d'aprenentatge.

El cervell es modifica quan realitzem una activitat repetitiva que suposi una novetat i una adaptació (serveix per alguna cosa), i si ens proporciona plaer, encara més.

Dins de l'aprenentatge cal diferenciar entre:

APRENTATGE IMPLÍCIT	APRENTATGE EXPLÍCIT
No intervé la consciència de l'individu.	Intervé la consciència de l'individu.
És lent.	És ràpid.
Acumula destresa a través de repetits assaigs.	Pot tenir lloc després del primer esforç.
Sovint requereix l'associació d'estímuls seqüencials i permet recollir informació sobre les relacions predictives entre fets.	Sovint requereix l'associació d'estímuls simultanis i permet recollir informació sobre un fet que ha succeït en un lloc i temps determinats. Per això, proporciona una sensació de familiaritat amb fets previs.
Intervé en l'estudi musical, principalment en la pràctica d'un instrument on s'aprenen destreses de manera inconscient a partir de repeticions d'assajos.	Dins de l'estudi musical és part important en el procés perceptiu del ritme, el timbre, l'harmonia i el reajustament que el músic fa segons la informació rebuda.
Principalment es manifesta per la millora en la realització de determinades tasques, sense que la persona sigui capaç de descriure amb exactitud què és el que ha après.	
Posa en joc sistemes de memòria que no influeixen en els continguts del coneixement general de la persona.	

5.1. PLASTICITAT CEREBRAL

La **plasticitat** és una característica bàsica del cervell que consisteix en la variació del nivell relatiu de dinamisme entre les diferents àrees cerebrals.

La base fisiològica de la plasticitat cerebral es troba en la sinapsi química que s'estableix entre les neurones. Pràcticament tots els passos de la transmissió es poden regular independentment, de manera que s'ajusta amb molta precisió a la necessitat de cada moment. Aquesta capacitat d'adaptació del sistema nerviós constitueix la base de totes les funcions cerebrals superior, des de la localització del sons fins al pensament. L'alliberació de neurotransmissors (mecanisme presinàptic) produeix canvis que no duren més de dos minuts, però que són importants per a la plasticitat cerebral i necessaris per a la memòria operativa. Les adaptacions en els receptors postsinàptics, en canvi, poden arribar a romandre al cervell durant tota la vida.

Tot i que les principals connexions neuronals estan determinades genèticament, l'experiència postnatal pot modificar-les. En els primers anys de vida es desenvolupen notablement les ramificacions neuronals i els contactes sinàptics, depenent de factors genètics, l'experiència i els estímuls rebuts a través dels receptors sensorials. Aquesta activitat és molt intensa fins als 7 anys, aproximadament. Per tant, la pràctica és necessària per induir el desenvolupament dels sistemes sensorials, modular el seu manteniment i mantenir el que estava programat genèticament.

Les neurones experimenten canvis morfològics i fisiològics a causa de l'aprenentatge, que organitza i reorganitza el cervell. Aquest òrgan és plàstic perquè els canvis es veuen reflectits en la seva fisiologia global, modificant aspectes relacionats amb els neurotransmissors i augmentant les següents estructures cerebrals:

- El pes i el gruix de l'escorça cerebral.
- Les espines dendrítiques, llocs on s'estableixen sinapsis.
- Les ramificacions de les dendrites.
- La mida dels contactes sinàptics.

Aquest enriquiment està causat per la varietat d'estímuls sensorials i la relació establerta amb individus de la mateixa espècie.

La plasticitat cerebral depèn de diversos factors com:

- La genètica heretada.
- L'edat (és major en la infantesa però persisteix tota la vida).
- L'àrea cerebral afectada.
- Els tipus d'estímuls i la interacció entre ells.
- Les emocions.
- L'existència de lesions.

Fins als anys 90 estava vigent la idea que els nens tenien diferent capacitat cerebral i diferències individuals en la capacitat d'aprenentatge per dotació genètica. Els recents avenços en neurociència de l'aprenentatge han demostrat que aquest punt de vista és erroni perquè no té en consideració la plasticitat cerebral. La capacitat d'aprenentatge es té durant tota la vida i si ens mantenim en un constant aprenentatge, molt probablement durant la vellesa gaudirem d'una desitjada dignitat mental.

5.2. PROCESSOS MENTALS QUE INTERVENEN EN L'APRENTATGE

Les funcions mentals que intervenen de manera rellevant en tots els processos d'aprenentatge són la percepció, l'atenció, la motivació, la memòria, la consciència i la comunicació. Totes elles interactuen entre si i són interdependents les unes de les altres.

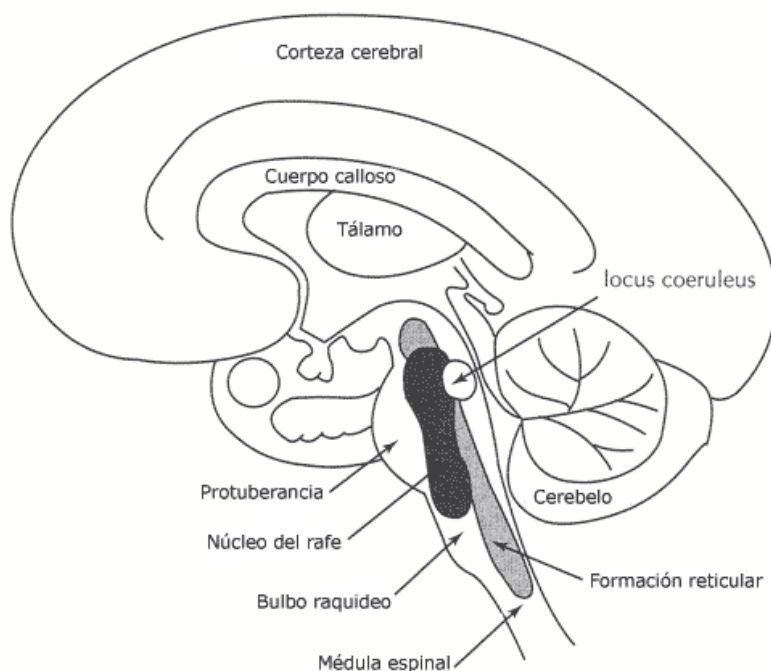
La **percepció** dels estímuls externs o interns dels objectes o esdeveniments que succeeixen en l'entorn o en l'interior de les persones és el que fa captar inicialment la seva atenció i les prepara per a captar una informació. L'**atenció** és un mecanisme de selecció que concentra la consciència en determinats estímuls per a processar-los de manera eficaç. Perquè això sigui possible se sincronitza l'activitat de les neurones implicades en l'objecte de l'atenció, és a dir, totes les neurones que s'ocupen de diferents aspectes de la percepció del mateix objecte estan perfectament sincronitzades. La informació ha de ser ràpidament retinguda, avaluada i contrastada per poder decidir si val la pena mantenir aquesta atenció.

L'atenció activa (voluntària) millora la sincronització i no depèn únicament dels estímuls externs sinó també de la dinàmica cerebral interna. Per això les intencions, les expectatives i l'estat d'ànim també influeixen en la percepció de l'entorn.

Les regions cerebrals més directament implicades en el procés de l'atenció són dues regions del lòbul frontal superior i lateral (escorça frontal) i una regió del lòbul parietal superior (escorça parietal), però també intervé l'amígdala, entre altres.

Íntimament lligada a l'atenció es troba la **motivació**, el procés intern, intrínsec a l'individu, que dota d'energia i de direccionalitat a una conducta. Pot sorgir de l'interès per aconseguir un objectiu o per satisfer un desig experimentat i reconegut. La motivació potencia l'augment de l'aprenentatge, especialment en qualitat i en permanència, però l'aprenentatge també es pot convertir en un potenciador de la motivació.

La base neurobiològica de la motivació es troba en el sistema reticular activador (al tronc encefàlic), que té la particularitat d'ampliar la informació que rep l'organisme retransmetent els estímuls al tàlem, i a l'escorça activant-los de manera àmplia i difusa. D'aquesta manera alerta a l'individu i el dota d'energia per a rebre millor la informació i obrar en conseqüència. Tot això provoca un increment de l'estat de vigília i uns canvis en les funcions vegetatives que conformen la preparació per a la resposta.



Esquema de les estructures cerebrals que intervenen en el sistema reticular activador i en la motivació.

La motivació està íntimament relacionada amb l'**emoció** perquè estableix les pautes dins de les quals apareix. Les emocions canvien amb les situacions perquè reflecteixen l'apreciació immediata de la nostra relació amb l'ambient, és a dir, l'avaluació del que es considera perjudicial o beneficiós per a l'individu.

Les emocions també estan estretament interrelacionades amb el coneixement. La memòria, els pensaments, la informació i l'experiència van donant forma a les emocions i, alhora, aquestes van conformant el coneixement. Es pot dir, doncs, que la motivació, les emocions i els coneixement determinen la conducta, inclosa aquella que va dirigida a l'adquisició de noves experiències (l'aprenentatge).

Un altre procés essencial en per a l'adquisició de nous aprenentatges és la **memòria**, el procés que permet registrar, codificar, consolidar i emmagatzemar la informació per poder accedir a ella quan sigui necessari. A causa de la seva importància i complexitat, se li dedica un apartat específic, el següent.

Actualment, la ciència encara no és capaç d'explicar el substrat de la **consciència**, però sí pot afirmar que es troba al cervell i que és el resultat de la informació genètica heretada i de les transformacions que van afectant al cervell al llarg de la vida a causa de les experiències personals.

El cos callós pren gran importància en aquest procés perquè relaciona el món exterior i l'interior de l'individu amb la integració dels dos hemisferis cerebrals. En aquesta estructura cerebral es distingeixen tres zones amb funcions ben diferenciades i fonamentals en el procés de l'aprenentatge:

- Posterior: integra les imatges visuals.
- Mig: posa en relació el lòbul temporal i parietal, converteix el llenguatge parlat i escrit en instrument de reconeixement de l'entorn, d'aprenentatge, de comunicació i d'elaboració del pensament.
- Anterior: important en la integració del que és lineal/global, el detall/context, la lògica/abstracció, el pràctic/emocional, el real/imaginari.

Aquesta característica del cos callós sembla que determina una **compensació** entre **sexes** pel que fa a les capacitats cognitives. Per una banda, les dones tenen més fibres nervioses al cos callós (entre un 10 i un 45% més desenvolupat), a causa de la potenciació de varies habilitats dominants en un o altre hemisferi. Això fa que tinguin una interconnexió hemisfèrica més eficaç i els permet valorar situacions simultàniament des de diferents perspectives. Per l'altra banda, és major el nombre de neurones en els homes (23.00 milions) que en les dones (19.300 milions). Així doncs, encara que els **homes** tenen **més neurones**, en el cervell de les **dones** es troba una **major connexió entre els dos hemisferis**.

La **comunicació** és fonamental per a captar qualsevol tipus d'informació. Per tant, influeix de manera decisiva sobre els altres processos de l'aprenentatge. És un intercanvi d'informació que exigeix atenció, memòria i motivació i, al mateix temps, també les afavoreix i les facilita. La comunicació està molt lligada al llenguatge i aquest està relacionat amb el pensament, d'aquí la seva importància en el desenvolupament de l'ésser humà.

5.3. MEMÒRIA

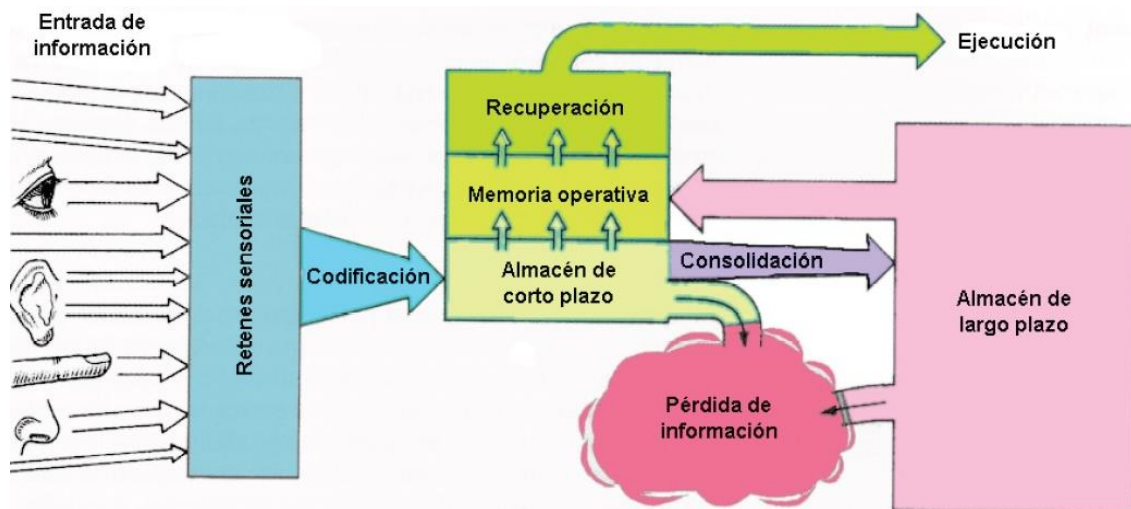
La memòria pren un paper fonamental en el procés de l'aprenentatge perquè és:

- L'emmagatzematge, la conservació i la recuperació d'informació rebuda a través de l'experiència.
- La facultat que permet retenir i recordar els coneixements al llarg del temps.
- El sistema mitjançant el qual s'evoquen de forma espontània o voluntària coneixements anteriors.

Sense aquesta capacitat totes les altres perdrien la seva efectivitat perquè no es podrien implementar i no s'assentarien les bases per a nous aprenentatges. Si tenim en compte que la major part del que sabem ho hem après i que tot l'après pot ser evocat, es pot dir que la **memòria** és el **resultat de l'aprenentatge** que **modifica** de manera més o menys estable les estructures i funcions neuronals en diverses àrees del **cervell**.

En el procés de retenció d'informació es distingeixen les següents **fases**:

- **Entrada d'informació** a través de les vies sensorials.
- Transducció o **codificació** de la informació: el senyal sensorial es converteix en **senyal neuronal** (potencial d'acció). Es produeixen canvis en les propietats estructurals i funcionals de les neurones implicades.
- **Consolidació** de la informació. Es generen circuits nerviosos estables com a forma de retenció de l'aprenentatge.
- **Recuperació** o ús de la informació memoritzada.



Esquema de les fases de la memòria.

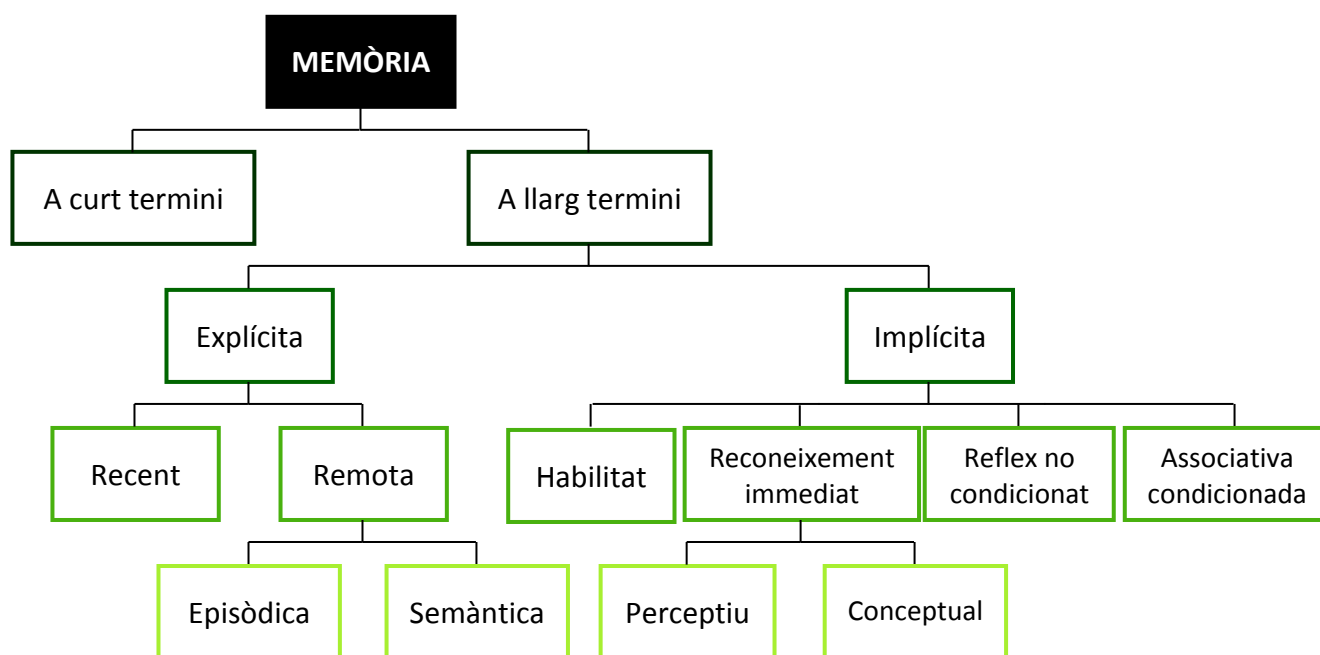
5.3.1. TIPUS DE MEMÒRIA

Existeixen diferents tipus de memòria en funció del temps d'emmagatzematge a causa de canvis temporals o permanents en la fisiologia neuronal:

- Memòria **icònica** (la més breu): record visual immediat d'una escena que s'il·lumina breument i en la que gairebé no es pot captar una part de la imatge.
- Memòria **a curt termini** o **operacional**: record que es reté durant minuts o hores, té un temps d'emmagatzematge breu. S'utilitza per retenir la informació a mida que ens va arribant per poder realitzar amb ella activitats cognitives bàsiques i immediates (comprensió, raonament, càlcul). Té una capacitat limitada.
- Memòria **a mig termini**: record que es reté durant uns dies.
- Memòria **a llarg termini** (la més prolongada): record que es reté durant setmanes, mesos o anys, temps d'emmagatzematge estable.

Una altra classificació de la memòria es pot fer en funció de la seva representació mental i de la seva execució:

- Memòria **explícita**, declarativa o representacional: recordar mentalment una imatge viscuda quan existeix un estímul que la rememora, com ara recordar la lletra i la música d'una cançó.
 - Memòria episòdica o d'esdeveniments): s'utilitza per a recordar experiències pròpies emmarcades en el context personal.
 - Memòria semàntica o de conceptes: mostra el coneixement del món, dels noms de les persones i de les coses i el seu significat.
- Memòria **implícita**, no declarativa o associativa: recordar una capacitat que es realitza de manera automàtica i que sap executar però no explicar, com ara tocar un instrument o cantar.
 - Memòria instrumental o de procediment: s'utilitza per realitzar activitats de manera automàtica i fins i tot inconscient (escriure, tocar un instrument, conduir un cotxe...). Té a veure amb la capacitat per aprendre les habilitats expressades en forma de conductes.



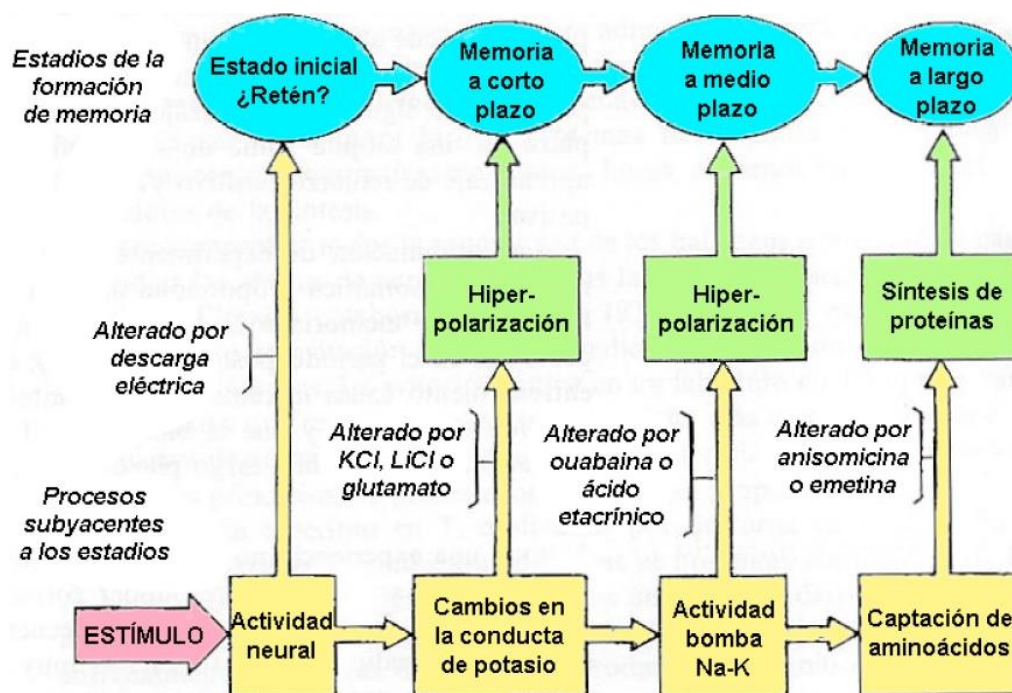
El cervell utilitza diferents procediments per endreçar els continguts de la memòria i totes les memòries formen un conjunt funcional que s'influeixen mútuament. Un aprenentatge serà més sòlid com més tipus de memòries s'activin durant la seva adquisició.

La memòria explícita i la implícita sembla ser que utilitzin sistemes neuronals diferents.

5.3.2. FORMACIÓ DE LA MEMÒRIA

Tot i que no es coneixen tots els mecanismes neuronals implicats en la formació de la memòria, sí que se sap que cada tipus de memòria requereix una activitat fisiològica específica:

- La memòria a curt termini implica els canals de K^+ que produeixen una hiperpolarització. També causa canvis en la intensitat de les connexions sinàptiques existents.
- La memòria a mig termini implica la bomba Na-K que també produeix una hiperpolarització.
- La memòria a llarg termini implica l'activació de gens i l'expressió de noves proteïnes que produeixen canvis estructurals en les neurones, sobretot a nivell sinàptic, i el desenvolupament de noves connexions.



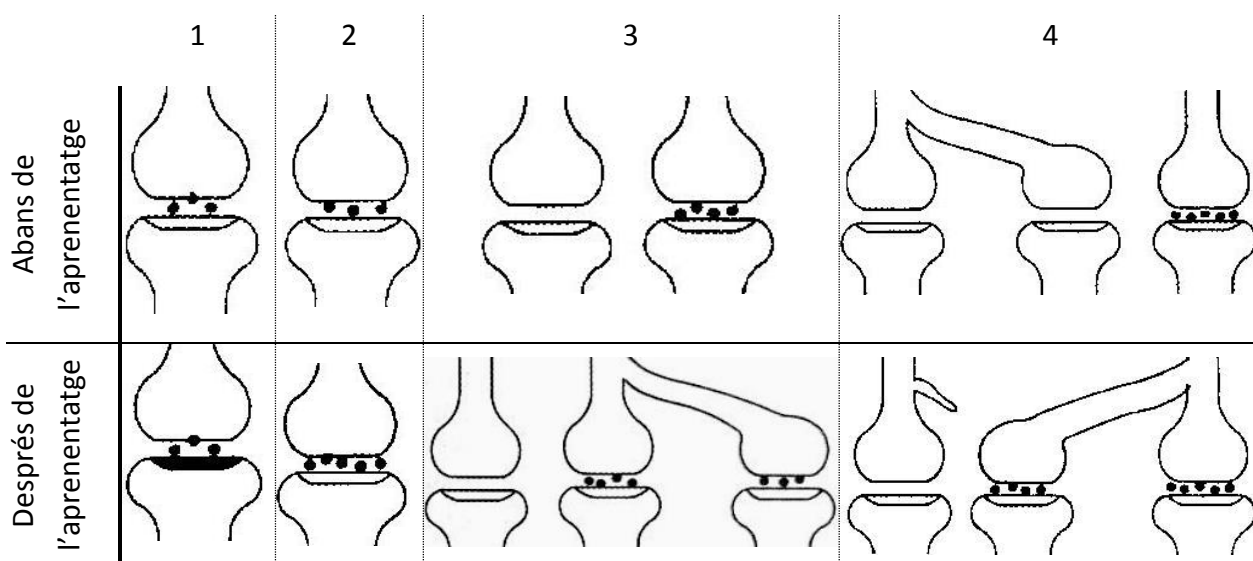
Esquema dels mecanismes fisiològics en la formació de la memòria.

5.4. CANVIS CEREBRALS A CAUSA DE L'APRENTATGE I LA MEMÒRIA

L'aprenentatge provoca canvis en les sinapsis entre neurones del cervell, que poden ser:

- Fisiològics:
 - Canvi presinàptic causat per una neurona moduladora que provoca un augment en l'alliberació de neurotransmissors en cada impuls elèctric (esquema 2 de la taula).
 - Augment de la mida del potencial postsinàptic, ja sigui excitador (PEPS) o inhibitor (PIPS).
 - Modificació del receptor de la membrana postsinàptica que provoca un contacte més prolongat amb la mateixa quantitat de neurotransmissor alliberat.
 - Reducció del llindar d'excitació.
- Estructurals:
 - Augment de l'àrea de contacte sinàptic (esquema 1 de la taula).
 - Augment del número de contactes sinàptics (esquemes 3 i 4).
 - Modificació dels contactes sinàptics preexistents (esquemes 3 i 4).
 - Un circuit neuronal utilitzat amb major freqüència pren possessió de zones sinàptiques ocupades inicialment per un de menys actiu (esquema 4).

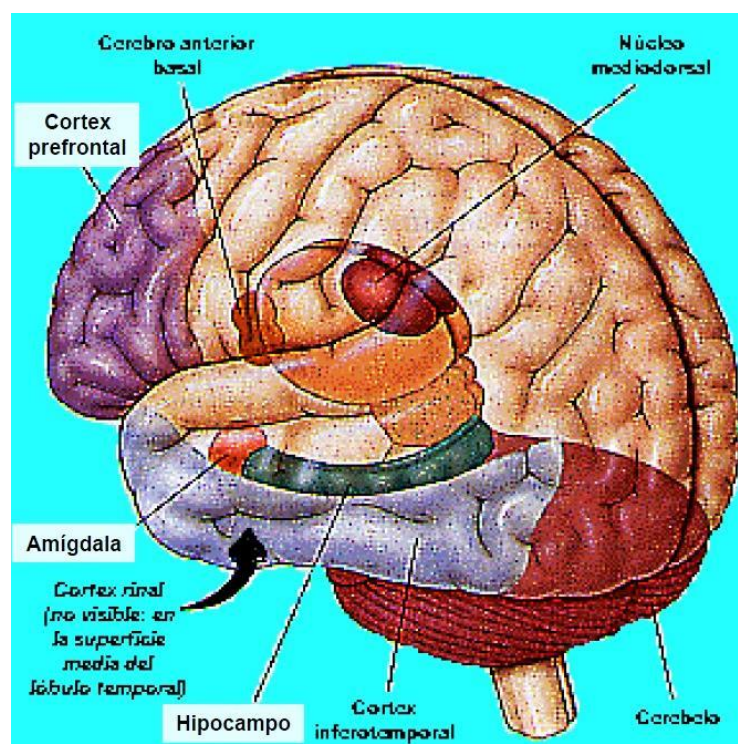
Aquests canvis es poden representar esquemàticament de la següent manera:



També causa modificacions en les estructures cerebrals implicades. La memòria i l'aprenentatge explícit requereixen que s'activi el lòbul temporal. L'hipocamp és una de les estructures del lòbul temporal particularment decisiva per l'adquisició de la memòria, concretament per l'emmagatzematge mnèmic: l'hipocamp processa la informació recentment adquirida per un període de setmanes o mesos i, després, la transfereix a àrees importants de l'escorça cerebral per un emmagatzematge més prolongat. La memòria emmagatzemada en aquestes àrees corticals s'expressa a través del funcionament mnèmic de l'escorça prefrontal. Les neurones de l'hipocamp tenen una gran capacitat plàstica, habilitat que es requereix per l'aprenentatge.

Encara que pot considerar-se que en l'aprenentatge i la memòria participen totes les àrees cerebrals, les que tenen un paper més important són:

- **Hipocamp**, que selecciona quins records han de ser emmagatzemats i a on, assimila les experiències, emmagatzema noves memòries, reconeix les novetats d'una situació, modula l'atenció.
- **Amígdala**, que aporta la vessant emocional a la informació percebuda i a l'aprenentatge.
- **Escorça prefrontal** (part anterior del lòbul central), que defineix la percepció particular que cada individu té del món i les respostes que genera davant dels diferents estímuls que rep (presa de decisions).



La taula següent recull les àrees cerebrals activades en els diferents processos mentals que intervenen en l'aprenentatge:

Procés mental	Àrees cerebrals actives
Percepció	Les relacionades amb els estímuls sensorials, específiques per a cada sentit
Atenció	Lòbul frontal superior i lateral, una regió del lòbul parietal superior i amígdala
Motivació	Sistema reticular activador al tronc encefàlic, escorça i sistema límbic (emocions)
Memòria	Hipocamp, amígdala, escorça prefrontal
Consciència	Cos callós
Comunicació	Àrea de Broca, àrea de Wernicke, àrea motora suplementària (llenguatge) i les involucrades en els altres processos mentals de l'aprenentatge

6. ADAPTACIONS EN EL CERVELL DELS MÚSICS I DIFERÈNCIES AMB EL DELS NO-MÚSICS

Tots som criatures musicals des del naixement. Gràcies a això, per exemple, aprenem a parlar escoltant els sons musicals del llenguatge, la musicalitat de la parla. Tothom té un aprenentatge musical implícit, contínuament estem immersos en audicions passives quotidianes. La diferència és que els músics, com a conseqüència de l'estudi i la pràctica musical, desenvolupen més la sensibilitat i la velocitat d'anàlisi de la música que els no músics. Quan una persona aprèn que cada nota té un interès diferent, la percepció dels sons musicals es modifica i una zona més gran de l'escorça auditiva processa les notes importants. De manera que augmenta el nombre de cèl·lules ciliars que responen amb més intensitat als sons que es potencien a través de reforç conductual. Per contra, les capacitats de percepció i d'escolta són molt semblants en músics i no-músics.

La música és una activitat que requereix grans i múltiples recursos cognitius. Alguns científics la consideren una de les més complexes que la ment humana pot realitzar i, fins i tot, d'altres la situen en l'art més poderós per modificar la consciència. Músics i no-músics processen la música de diferent manera. Gràcies a la neuroplasticitat, el cervell s'ha modelat per la intensa pràctica musical alterant, fins i tot, determinades funcions cognitives i influint en la densitat neuronal de diverses àrees cerebrals. Les neuroimatges permeten apreciar aquestes diferències al comparar cervells de músics professionals (que han dedicat intensament uns anys a l'estudi i la pràctica musical) i de no músics (que tenen poca o nul·la experiència musical). En els músics s'activen determinades xarxes neuronals en diferent grau i en zones no sempre coincidents amb les dels no-músics. Per tant, com més coneixement musical tingui una persona (dretana), més desenvoluparà el seu hemisferi esquerre.

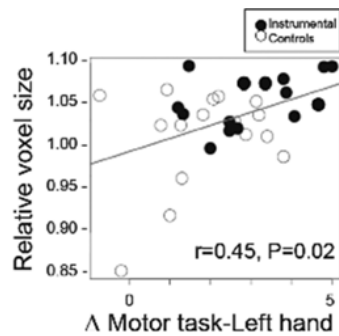
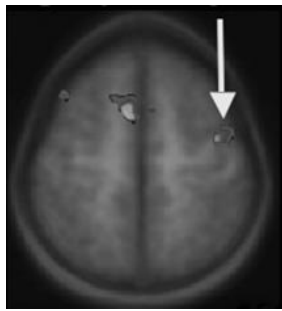
Amb l'experiència i l'educació musical el cervell s'adapta i es modifica en les regions que processen els diversos components musicals. Hi ha diferències en la distribució de la matèria gris que involucren regions auditives, motrius i visual-espacials i en les connexions neuronals.

6.1. DIFERÈNCIES EN LES ÀREES CEREBRALS

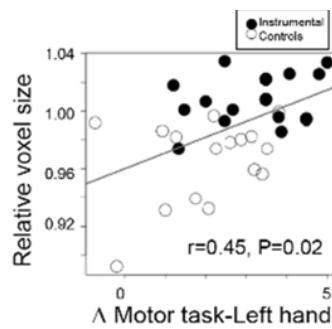
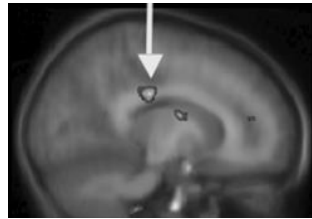
- Major activació de l'hemisferi esquerre en els aspectes musicals perquè activen més àrees cerebrals de forma interdependent. Els hemisferis cerebrals dels músics professionals treballen al mateix nivell.
- Audició.
 - **L'escorça auditiva primària** augmenta el nombre de cèl·lules que responen amb màxima intensitat als sons musicals. Els músics poden presentar major resposta a sons en part perquè la seva escorça auditiva és més extensa, podent arribar a ser un 130% més gran el volum de la matèria gris en els músics.
 - En escoltar una peça musical un músic activa un 25% més de les seves **regions auditives** de l'**hemisferi esquerre** que una persona sense formació musical.
 - **L'escorça auditiva secundària** i altres regions associades a l'audició processen elements musicals més complexos com l'harmonia, la melodia i el ritme.
 - **Més volum de matèria gris** (un 30%) al **girus de Heschl** de l'escorça auditiva respecte dels no-músics.

- Motricitat.
 - Augment de les **àrees cerebrals** per al **control** motor dels **dits**.
 - Augment del **cos callós** anterior perquè els músics han de desenvolupar una major habilitat per utilitzar les dues mans. La meitat anterior, que connecta amb es escorces prefrontal, premotoraimotora, és més gruixuda. Aquestes àrees corticals són les que més es modifiquen amb la pràctica d'un instrument musical perquè impliquen l'adquisició d'una sèrie de destreses motores molt importants. Així augmenta la connectivitat interhemisfèrica, ja sigui augmentant el nombre de neurones que els connecta o el gruix de la capa de mielina que les recobreix.
 - Increment de la mida de l'**escorça motora** i del **cerebel** (el dels músics és al voltant d'un 5% més gran que el dels no-músics.), regió responsable de la coordinació motora.
- Visió-espai.
 - Canvis en la **regió parietal superior** relacionada amb el processament visual-espacial. Aquesta regió desenvolupa un paper important en la integració de la informació sensorial multimodal intervenint en les operacions motrius a través de les connexions recíproques intenses amb l'escorça premotora.
 - Augment del volum de matèria gris en l'**àrea temporal inferior** dels músics. Aquests canvis es relacionen amb la pràctica musical perquè els músics estan contínuament triant accions a partir d'estímul visual quan toquen el seu instrument.
 - **Diferències** significatives en l'**escorça frontal, temporal i parietal-occipital** (que intervenen en les funcions d'integració sensorial-motors multimodals implícites en l'aprenentatge d'un instrument musical).

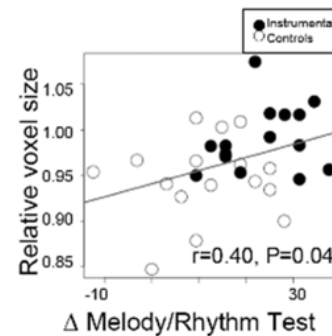
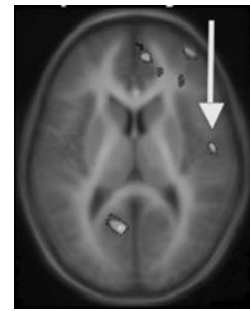
(A) Right primary motor



(B) Corpus callosum



(C) Right primary auditory

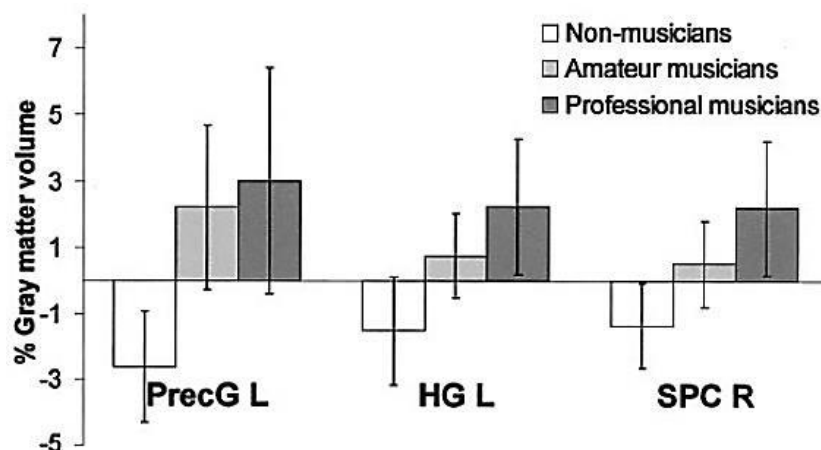


Diferències estructurals cerebrals en nens amb entrenament musical.

Resultats d'un estudi realitzat amb dos grups de nens: un grup control de 16 nens sense pràctica musical (color blanc als gràfics) i un altre de 15 nens amb pràctica musical durant uns 15 mesos (color negre als gràfics).

Les imatges cerebrals mostren àrees del cervell amb **deformacions** significatives (indicades amb una fletxa). A la imatge A s'assenyala el **girus precentral** de l'**escorça motor primària** de l'HD, a la B el **cos callós** i a la C el **girus de Heschl** de l'**escorça auditiva primària** de l'HD.

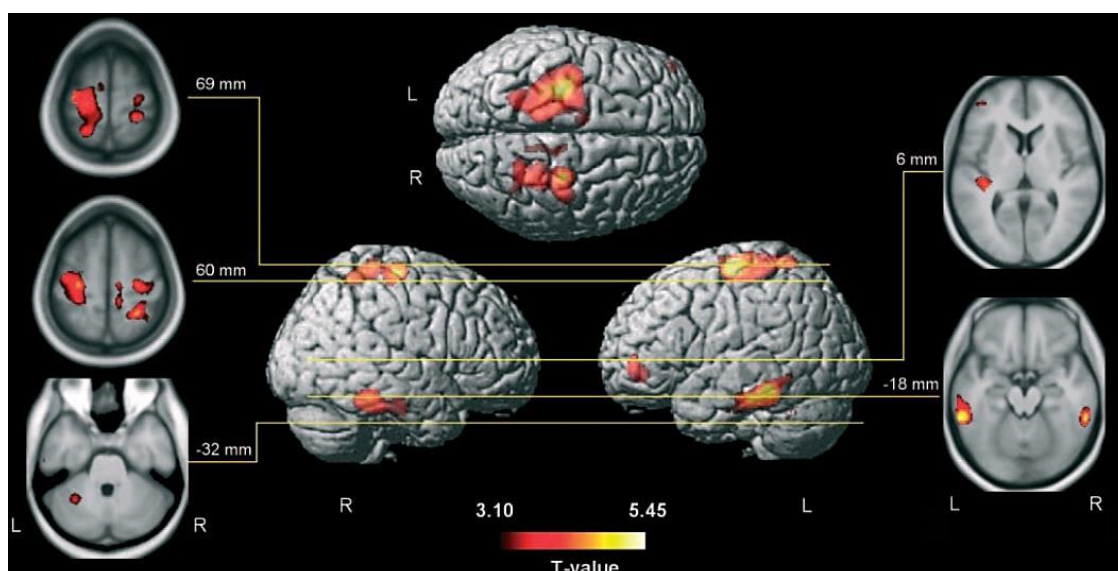
Els gràfics mostren la **correlació positiva** en el grup de nens amb **pràctica musical** entre l'execució musical, tant de la mà esquerra, la melodia o el ritme, (eix d'abscisses) i la mida relativa de les àrees cerebrals citades anteriorment (eix d'ordenades).



Diferències relatives en el volum de matèria gris entre músics professionals (gris fort), aficionats a la música (gris clar) i no-músics (blanc) en tres regions cerebrals: girus precentral de l'HE (PrecG L), girus de Heschl de l'HE (HG L) i escorça parietal superior de l'HD (SPC R).

Totes aquestes modificacions es poden resumir en un **hiperdesenvolupament** (augment de la densitat o el volum de la **matèria gris** causat per un augment de la matèria gris o a un augment de les connexions neuronals) de:

- El cos callós anterior (només en homes).
- L'escorça auditiva (girus de Heschl entre d'altres), motora i prefrontal (visual-espacial).
- El cerebel (només en homes, potser perquè el de les dones ja és més gran de per si).
- Algunes àrees associatives (escorça parietal-temporal-occipital) com el girus angular.



Àrees cerebrals visual-espacials, auditives i motores que presenten un augment de volum de matèria gris en músics professionals.

També s'observen diferències en la **matèria blanca**, en:

- Les fibres nervioses que uneixen l'escorça motor primària i la medul·la espinal.
- Una regió propera a l'àrea de Broca, zona de gran importància en els complexos processos de la música i el llenguatge.

Es pot concloure, doncs, que els cervells dels músics i dels no-músics perceben la música de manera diferent. En escoltar una cançó, en els no-músics s'activa l'hemisferi cerebral dret (més emocional), que capta la melodia, i l'escorça auditiva. En els músics s'activen addicionalment zones de l'hemisferi esquerre (més analític) i l'escorça motora.

6.2. DIFERÈNCIES EN LES CONNEXIONS NEURONALS

- **Augment** del nombre de **neurones** implicades en algunes àrees cerebrals, com ara les encarregades del moviment dels dits.
- **Major plasticitat sinàptica** en base a l'hiperdesenvolupament de determinades àrees sensorials-motores i a l'**augment** de les **connexions neuronals** (més sinapsis) i de la seva potència.
- Millora de la **sincronització** entre les neurones.
- L'audició musical estimula la **neurogènesi hipocampal**, segregant hormones esteroides (cortisol, testosterona i estrògen) que intervenen en la neuroplasticitat cerebral.
- La pràctica d'un instrument pot arribar a augmentar el nombre d'**espines dendrítiques**.
- Actuació sobre l'**alliberació** de **determinats neurotransmissors**. Per exemple, el cant potencia la producció de serotonina, un neurotransmissor que influeix en l'estat de benestar de les persones.

Les millores en el desenvolupament cerebral per la pràctica musical són més evidents amb la pràctica regular i continuada a llarg termini. De tota manera, es poden començar a apreciar en poc temps. Amb uns segons de pràctica musical l'eficàcia i la connectivitat entre neurones són majors. Amb uns dies s'incrementa la quantitat i la mida de les dendrites. Amb unes setmanes es millora la mielinització dels axons. Amb uns mesos d'entrenament regular augmenta la interacció entre cèl·lules glials i la capil·laritat del teixit cerebral.

No hi ha dubte sobre l'eficàcia de la música i dels seus efectes positius al cervell, especialment quan és activa, és a dir, quan cantem o toquem un instrument musical. Fa pocs centenars d'anys es va fer la diferenciació entre cant i ball, i només en el món civilitzat. La música ha estat moviment per a la major part dels pobles del món i durant la major part de la seva història. En la seva essència, però, **cantar** i **ballar** van units, formen una **unitat**.

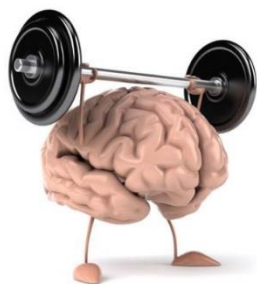
6.3. PREDISPOSICIÓ INNATA O PLASTICITAT NEURONAL?

Les investigacions realitzades fins al moment demostren les diferències citades anteriorment en les estructures cerebrals entre els músics i els no-músics. El que no queda clar és si són causades únicament per la pràctica musical continuada o si intervenen també les aptituds personals i els factors genètics.

És possible que algunes d'aquestes diferències es puguin atribuir a una predisposició innata. Tanmateix, aquests resultats també es podrien explicar per la plasticitat neuronal humana, que fa que algunes regions cerebrals creixin depenent de l'ús i de l'adaptació estructural en la matèria gris cerebral com a resposta a les demandes intenses ambientals que se li fan, especialment durant el període de maduració del cervell. És lícit pensar, tot i que no estigui demostrat, que la forta associació entre les diferències de matèria gris i la formació musical confirma el supòsit que el cervell del músic mostra canvis estructurals amb la pràctica musical, encara més si es té en compte que s'observen diferències entre músics i no-músics en força regions cerebrals anatòmicament diferents. Això porta a pensar que és menys probable que aquestes diferències siguin innates i recolza la idea dels canvis cerebrals per la plasticitat.

Així doncs, aquestes diferències estructurals podrien ser **adaptacions** com a conseqüència d'anys d'**experiència** amb la música. Les investigacions han identificat quatre elements de la pràctica musical determinants en la plasticitat del cervell: l'edat d'inici de la formació musical, el nombre d'anys de pràctica continuada, el temps dedicat a la pràctica i l'aptitud innata. Encara que no se sàpiga del cert, diverses investigacions conclouen que les **modificacions** anatòmiques i funcionals del **cervell** dels músics són **directament proporcionals** al temps i la intensitat de l'**entrenament musical** i que existeix una correlació entre les habilitats obtingudes i els canvis estructurals detectats.

Les modificacions en el cervell observades en els que practiquen música de manera



continuada els preparen i **entrenen per a altres activitats** més enllà del processament de la música, especialment en activitats on l'audició té un paper important. Es podria comparar l'efecte que provoca la pràctica musical en el cervell amb el que provoca l'exercici físic en el cos. El primer tonifica el cervell per al

benestar auditiu igual que el segon provoca un benestar corporal.

7. RELACIÓ ENTRE LES ADAPTACIONS CEREBRALS DELS MÚSICS I LES HABILITATS COGNITIVES

El desenvolupament i l'organització funcional del cervell depenen i es beneficien amb l'experiència, qualsevol forma d'estímul capaç de modificar l'organització, l'estructura i les funcions del cervell. La base neurofisiològica de l'aprenentatge és la plasticitat cerebral. És per això que per aprendre és important realitzar activitats repetitives sempre en la mateixa direcció. Això és exactament el que fan els músics, amb la pràctica diària o quotidiana potencien la seva plasticitat cerebral. La música afecta a l'aprenentatge neuronal i al seu reajustament perquè influeix de manera important en la resposta de les cèl·lules del cervell als estímuls auditius, millora els canvis sinàptics i desenvolupa de manera quantitativa certes àrees cerebrals.

Resulta evident, doncs, que música i aprenentatge estan íntimament relacionats si tenim en compte que la repetició és aprenentatge. El cervell es modifica (produeix canvis significatius en la reorganització dels mapes corticals) amb la pràctica repetida d'una acció concreta com la pràctica musical, que és complexa i implica moltes àrees cerebrals simultàniament i de manera coordinada.

Les àrees cerebrals involucrades en la motricitat musical (escorça motora primària, àrea motora suplementària, cerebel i ganglis basals), a més de coordinar el moviment físic, també coordinen el moviment del pensament. Igual que ordenen els moviments per moure's o tocar un instrument també ordenen la seqüència de pensaments necessaris per a pensar.

El món emocional és un altre aspecte que interrelaciona música i aprenentatge. La música desperta emocions i les emocions afavoreixen i intensifiquen el procés d'aprenentatge. Un clima emocional positiu reforça totes dues activitats perquè les estructures cerebrals cognitives i les emocionals estan íntimament relacionades.

És per tot això que molts estudis demostren la influència positiva de la música. El nostre cervell treballa en forma de xarxa, de manera que el desenvolupament de certes àrees que s'entrenen regularment amb la pràctica musical repercuteix en la millora d'altres habilitats cognitives, en particular les relacionades amb el llenguatge, el càlcul, la memòria verbal i el raonament temporal-espacial.

Algunes diferències que afecten a l'aprenentatge entre els que practiquen música i els que no són:

- Major **domini** a nivell **motriu**, especialment la motricitat fina dels dits.
- Major desenvolupament de la **capacitat visual-espacial**. Amb la pràctica musical s'entrena la capacitat d'examinar la partitura, si es llegís nota per nota no sortiria cap melodia. El músic aprèn a captar el conjunt (entrenament visual-espacial), per exemple en la diferenciació visual de les octaves.
- La música afavoreix la **memòria** i l'**atenció**. Amb tan sols unes hores d'entrenament musical a la setmana ja es produeixen millores, tant en nens com en adults. Estimula el desenvolupament de la memòria i, pel que fa a l'atenció, augmenta la precisió i redueix el temps de reacció.
- L'estudi musical fa **escoltar millor** en el futur. Adults que han tingut una formació musical d'entre un i cinc anys quan eren nens tenen respostes millorades del cervell als sons complexos. És a dir, són més eficaços per extreure la freqüència fonamental del so (molt important per la percepció de la parla i la música), fet que els permet reconèixer sons en entorns auditius complexos i sorollosos. La música també ajuda, d'aquesta manera, a millorar la consciència fonològica, que és fonamental en l'aprenentatge de la **lectoescriptura**.
- Millora en el desenvolupament del **llenguatge**. Els estudiants amb aprenentatge musical poden expressar-se millor i tenen un vocabulari més extens. El motiu és que la música i el llenguatge comparteixen àrees cerebrals. De fet, la música és considerada un dels llenguatges de la comunicació. La relació entre música i llenguatge és molt significativa, de manera que s'ha dedicat l'apartat següent a la seva explicació.
- La pràctica d'un instrument musical ajuda en gran mesura a la comprensió de les **matemàtiques** perquè les dues matèries són processades per àrees cerebrals semblants.

Recordant (apartat 5) les funcions del cervell que intervenen directament en l'aprenentatge en general (percepció, atenció, concentració, motivació, emocions positives, memòria, consciència i comunicació) i el processament cerebral de la música (apartat 4), es pot establir una **relació** mútua entre tots dos, **aprenentatge** i **música**.

Totes les funcions cerebrals, sense excepció, es veuen potenciades positivament amb una pràctica musical activa.

A mode de resum es pot dir que la pràctica musical afavoreix l'aprenentatge de:

- La psicomotricitat.
- Les habilitats visual-espacials i espacial-temporals.
- La lectura i l'escriptura.
- El llenguatge.
- La memòria verbal.
- Les matemàtiques.
- La intel·ligència, fins a 7 punts més de coeficient intel·lectual.

Dit això, la música es pot considerar un fort potenciador del desenvolupament cerebral dels nens, i no només com un instrument cognitiu més, sinó com un entrenador cognitiu en si mateix. És a dir, posa en marxa tots els mecanismes cognitius de la persona.

Cal puntualitzar que les millores esmentades estan estretament relacionades amb la pràctica regular i constant en el temps. Si la formació musical s'inicia des de petits, els canvis cerebrals es mantenen tota la vida. Els adults sembla que també reaccionen amb rapidesa davant les activitats musicals, especialment amb una pràctica contínua i quotidiana. Això és causat perquè el cervell no perd la capacitat de canvi, de plasticitat, i amb la música algunes àrees cerebrals realitzen un esforç major que ajuden també a desenvolupar la intel·ligència.

7.1. MÚSICA I LLENGUATGE

La música és un dels llenguatges de **comunicació** humans. És lògic, doncs, que tinguin molts aspectes en comú i que comparteixin moltes de les seves estructures, fins i tot algunes àrees cerebrals (la sintaxi verbal i la musical, per exemple, neurològicament se solapen). Per tant, és força evident que treballant amb la música es treballa també amb el llenguatge, i a l'inrevés.

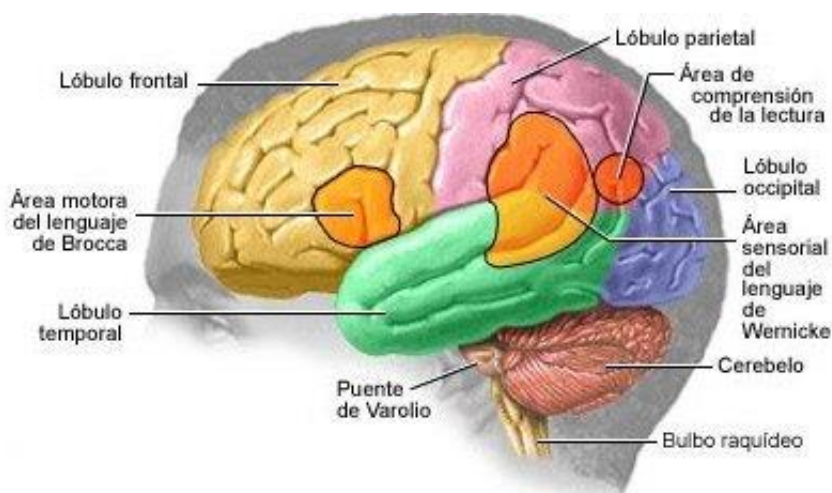
Els nens abans de pronunciar les seves primeres paraules ja són capaços d'entendre la música que hi ha darrera del llenguatge: el ritme i l'entonació. Aprenem a parlar escoltant la música de la parla (els sons musicals del llenguatge). Per això, els adults quan es comuniquen amb els més petits modifiquen la seva manera de parlar: augmenten el to, parlen més agut... perquè de manera intuïtiva sabem que els nens capten millor els aguts que els greus i que capten millor els missatges si exagerem l'entonació, si fem com una cançoneta amb les frases. Per tant, podem dir que el primer que s'aprèn és la música del llenguatge i que durant el primer any de vida la música de la veu és més important que el contingut.

La música i el llenguatge són diferents a nivell perceptiu, tot i que **comparteixen** molts punts en comú a diversos nivells:

- Estan formats per diversos **elements organitzats jeràrquicament**: tons, intervals, acords (música) i so, síl·laba, paraula (llenguatge).
- A nivell acústic, utilitzen el **to**, el **ritme** i el **timbre** per transmetre informació. Aquestes propietats de la música són també crucials per al processament de la parla i el domini del llenguatge.
- A nivell cognitiu, el seu processament requereix **destreses memorístiques** i d'**atenció** semblants. La pràctica musical comporta una alta càrrega de treball memorístic i un desenvolupament d'habilitats selectives d'atenció. És conegut, per exemple, que una informació és recordada molt més fàcilment si és cantada que si és parlada (per això els nens aprenen més fàcil i ràpidament si associen una informació a una cantarella: taules de multiplicar, enumeracions, regles mnemotècniques...).
- Fan servir una habilitat cognitiva per integrar fets acústics discrets en un corrent perceptiu coherent d'acord amb **regles sintàctiques** específiques. La música comporta l'aprenentatge implícit de les normes sintàctiques i acústiques que lliguen els sons musicals. El cervell construeix les frases musicals i les frases verbals de manera similar.
- Poden activar les **mateixes àrees cerebrals**, tot i que tenen **representacions corticals diferents** que poden alterar-se de manera independent. En persones amb amplia formació musical o músics professionals, melodies amb alt grau descriptiu

estimulen les mateixes àrees cerebrals que s'activen durant el processament semàntic del llenguatge (àrea de Broca).

El processament del llenguatge té lloc principalment a l'hemisferi dominant de l'individu, l'esquerre en el cas dels dretans i el dret en els esquerrans. Hi ha moltes àrees cerebrals relacionades: àrea de Broca, àrea de Wernicke al lòbul temporal i, en menor extensió, al parietal i àrea motora suplementària al lòbul frontal.



Àrees cerebrals que intervenen en el llenguatge i la lectura (color taronja).

Durant la interpretació d'una obra musical es repeteixen cada pocs segons processos visuals, motors i cognitius que augmenten el consum de l'hemisferi cerebral esquerre. Això provoca un canvi estructural, una hipertròfia del lòbul temporal esquerre al voltant de la zona del llenguatge, tres o quatre vegades més ampli que el de les persones que no practiquen o estudien música.

Es pot concloure, doncs, que la pràctica musical millora les habilitats auditives i cognitives que no estan exclusivament relacionades amb la música, com la parla i el llenguatge. També es pot afirmar que la pràctica musical afavoreix l'adquisició i el **desenvolupament** de les **llengües**, tant de la **materna** com d'**estrangeres**.

Pel que fa a la llengua materna, els músics mostren una activació neuronal més forta en els models tonals de la seva llengua materna i tenen més capacitat per detectar petites desviacions en el contorn tonal. Això facilita l'adquisició del vocabulari i l'habilitat lectora.

En el que es refereix a les llengües estrangeres, aquestes comparteixen amb la música el processament de models tonals. La capacitat per apreciar les subtileses en el to i el tempo ajuda a l'estudi d'altres llengües. Per exemple, en l'aprenentatge d'una llengua estrangera, en un principi el cervell segmenta la informació sonora del nou idioma i després es van atribuint els sentits a les cadenes de sons. A més, els músics tenen més facilitat per aprendre a incorporar els sons d'una nova llengua a les paraules. Si no fos per la musicalitat innata en l'ésser humà ens costaria molt aprendre a parlar o aprendre idiomes.

8. ESTUDI ESTADÍSTIC

Amb la part experimental d'aquest treball es pretén corroborar, amb les possibilitats que es tenen a l'abast, la hipòtesi inicial: potser les adaptacions cerebrals dels músics faciliten les habilitats cognitives.

No s'ha realitzat una experimentació basada en les tècniques d'exploració cerebral (de neuroimatge o electrofisiològiques) com es podria haver pensat en un principi perquè requereixen autoritzacions i permisos que queden fora del nostre abast, resulten molt costoses econòmicament i no s'hagués pogut dur a terme amb una població prou gran per obtenir uns resultats significatius en el temps disponible.

S'ha buscat una alternativa que no presenta aquests inconvenients i que igualment serveix per comprovar la hipòtesi plantejada. Per tots aquests motius s'ha fet un estudi estadístic com a treball pseudoexperimental.

Els resultats acadèmics dels alumnes del nostre institut durant tres cursos acadèmics han servit com a base de dades. S'han tractat i s'han comparat les notes obtingudes a final de curs dels estudiants que realitzen estudis musicals amb les d'aquells que no en fan per comprovar si la formació musical repercuteix positivament en les qualificacions. A més, s'ha fet el seguiment dels resultats de cada grup classe durant els tres anys per analitzar l'evolució i verificar si les diferències entre músics i no-músics es mantenen o varien al llarg del temps.

8.1. POBLACIÓ I MÈTODE

La població utilitzada ha estat de 1783 individus d'entre 12 i 18 anys, tots els alumnes de l'institut públic Samuel Gili i Gaya de Lleida de tres cursos acadèmics. Les variables considerades en l'estudi han estat quatre:

- El sexe: masculí (811 alumnes que representen un 45.5% de la població total) o femení (972 alumnes $\equiv$ 55.5% de la població total).
- La formació musical: no-músics (1578 alumnes $\equiv$ 88.5% de la població total) o músics aficionats (205 alumnes $\equiv$ 11.5% de la població total). Els alumnes que s'han considerat músics aficionats realitzen, a més dels estudis acadèmics, estudis musicals de grau mitjà o professional al Conservatori Municipal de Música o altres centres homologats.
- L'edat. L'edat indicada en el tractament de les dades correspon a l'edat que tenen al setembre els alumnes que no n'han repetit cap curs. A final de curs (moment en què s'han recollit les dades analitzades) poden haver fet un any més.
- Els resultats acadèmics obtinguts en totes les matèries a final dels cursos 2010-11, 2011-12 i 2012-13.

La taula següent mostra la població del present estudi estadístic segons les variables del sexe, la formació musical i l'edat:

Edat (anys)	Curs 2010-11				Curs 2011-12				Curs 2012-13				Total per edats
	Músic		No-músic		Músic		No-músic		Músic		No-músic		
	Femení	Masculí	Femení	Masculí	Femení	Masculí	Femení	Masculí	Femení	Masculí	Femení	Masculí	
12	7	5	38	40	12	9	36	41	8	6	39	47	288
13	7	4	51	31	5	6	47	53	12	10	43	51	320
14	7	4	52	43	4	3	43	34	8	5	49	40	292
15	5	4	53	45	9	6	53	40	5	3	43	28	294
16	3	1	45	40	8	4	62	50	11	3	54	44	325
17	2	0	51	27	3	2	31	36	8	6	58	40	264
Total	31	18	290	226	41	30	272	254	52	33	286	250	1783
	49		516		71		526		85		536		
	565				597				621				

Per estudiar la possible correlació entre l'aprenentatge musical i una millora del rendiment escolar respecte dels estudiants no-músics del mateix curs s'han recollit les notes de totes les assignatures de tots els alumnes de l'institut durant els tres anys. Els resultats acadèmics s'han agrupat en dos **camp d'aprenentatge**, l'**humanístic** (HUM) i el **científic** (CIE). El camp humanístic inclou els **àmbits de coneixement** de llengües (LLE) i ciències social (CSC). El camp científic inclou els àmbits de coneixement de ciències abstractes (CAB) i ciències aplicades (CAP). En l'àmbit de **llengües** s'han considerat les matèries de llengua catalana, millorem el català, taller de lectura, llengua castellana, llengua anglesa, *english everywhere*, *spotlight on english culture*, *around the world in 80 days*, llengua francesa, llatí, grec, literatura universal, literatura catalana, literatura castellana, literatura francesa i cultura clàssica. En l'àmbit de **ciències socials** les matèries de ciències socials, nostra cultura, educació per a la ciutadania, educació ètica, filosofia, història de la filosofia, història, història del món contemporani, història de França, història de la música i la dansa, geografia i psicologia. En l'àmbit de **ciències abstractes** les matèries de matemàtiques, millorem les matemàtiques, perfeccionem les matemàtiques i matemàtiques aplicades a les ciències socials. En l'àmbit de **ciències aplicades** les matèries de ciències per al món contemporani, ciències naturals, educació per a la salut, biologia i geologia, biologia, ciències de la Terra i medi ambient, física i química, física, química, descobrim el laboratori, tecnologia, tecnologia industrial, informàtica, pàgines web, dibuix tècnic, economia i economia de l'empresa. Finalment s'ha considerat un **valor global** (GLO) que inclou les assignatures del camp humanístic, les de camp científic i les que no pertanyen a cap d'aquests dos camps d'aprenentatge: educació física, jocs populars esportius, música, anàlisi musical, llenguatge i pràctica musical, arts escèniques, cultura audiovisual, religió catòlica, educació visual i plàstica, treball de síntesi, projecte de recerca i treball de recerca.

S'han analitzat els resultats des de **dues perspectives** diferents. En la primera s'agrupen els alumnes dels tres cursos acadèmics **segons l'edat**, de manera que la població d'individus de la mateixa edat assoleix un número suficient com per

considerar els resultats prou significatius. S'ha fet aquesta anàlisi (en funció de l'edat) per veure si s'aprecien diferències en augmentar els anys de formació musical. En la segona s'observa l'**evolució** dels grups d'alumnes durant els tres anys que s'han recollit les dades. S'han anomenat **promocions** tot i que no siguin promocions acadèmiques senceres dels sis anys a l'institut, sinó de dos o tres. S'ha realitzat aquesta comparació per veure si els resultats en el mateix grup d'alumnes es mantenen estables en el temps o si altres factors, com els lligats a l'edat o al sexe, tenen una influència més gran que els estudis musicals.

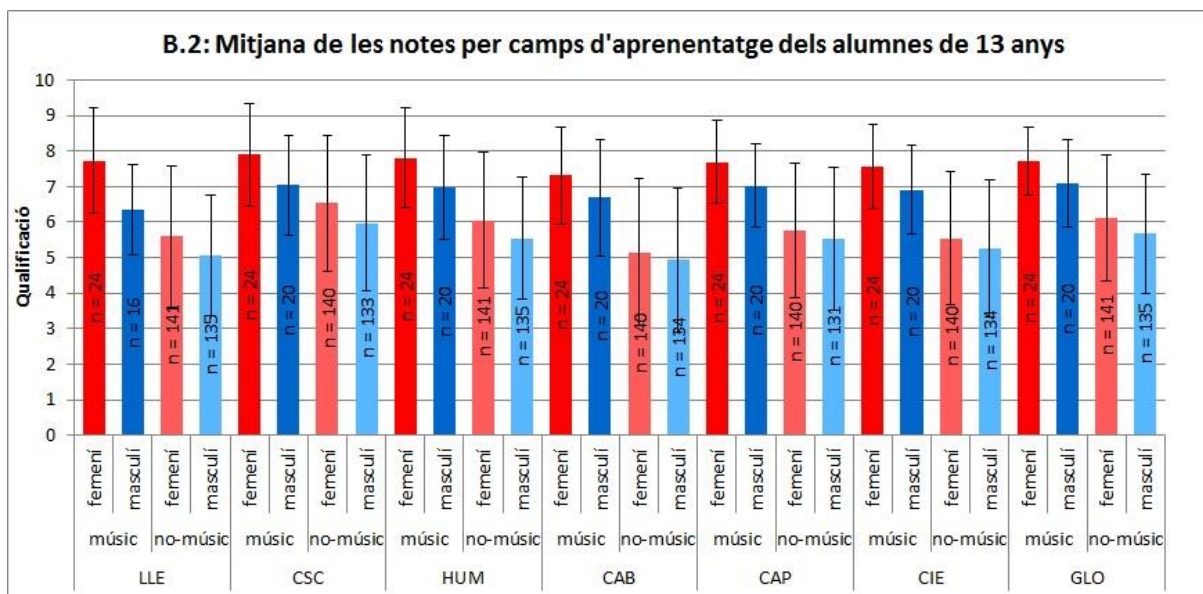
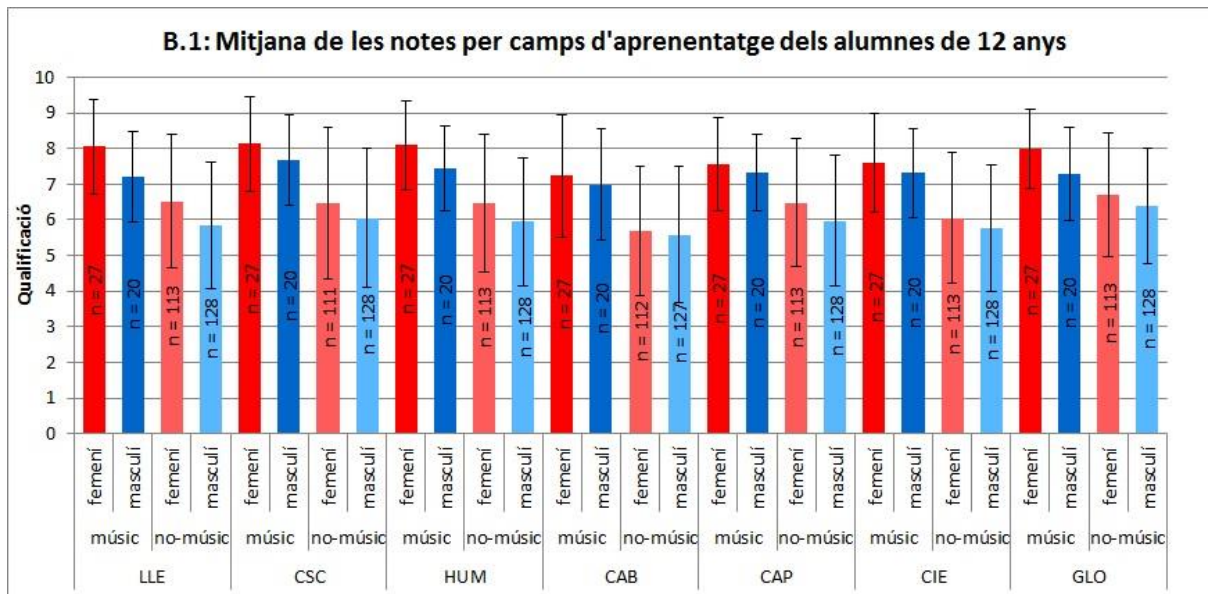
S'han calculat les **mitjanes aritmètiques** i les corresponents **desviacions típiques** d'aquests tres valors (HUM, CIE i GLO) i s'ha estudiat la **correlació** d'aquest valor amb l'edat, el sexe i el coneixement musical.

Totes les dades han estat introduïdes i tractades amb el programa **Microsoft Excel**.

8.2. RESULTATS

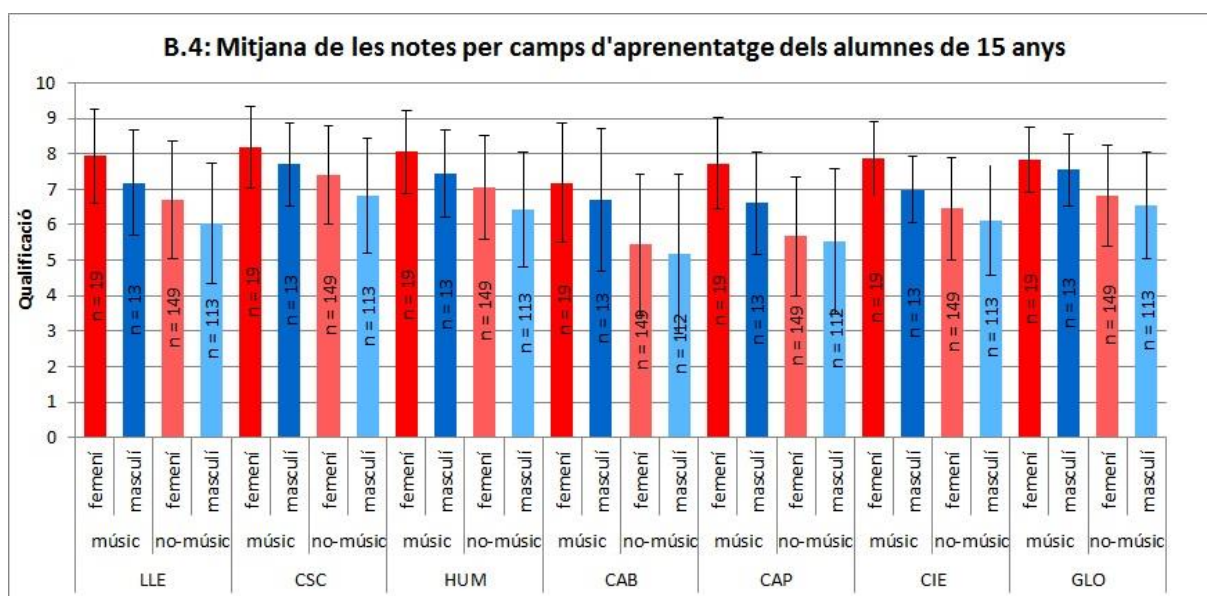
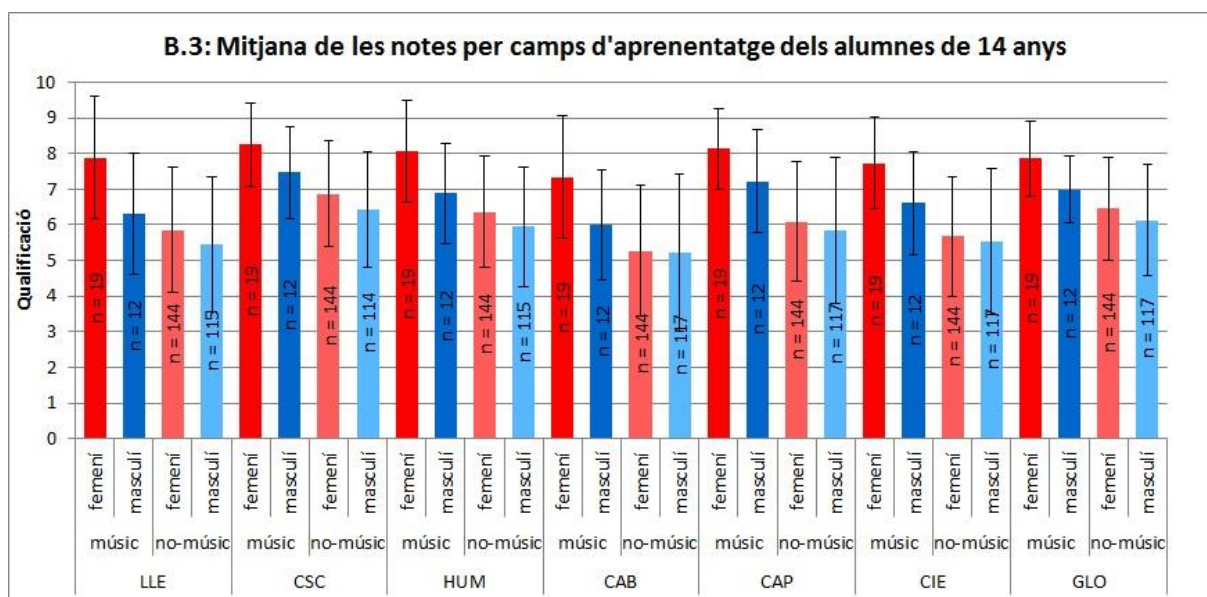
8.2.1. RESULTATS PER EDATS

A continuació es presenten els resultats dels alumnes dels tres cursos acadèmics agrupats per edat. El tipus de **gràfic** utilitzat ha estat el **de barres** (B). Les columnes mostren les mitjanes globals i per camps d'aprenentatge segons la formació musical i el sexe. Les barres d'error indiquen les desviacions típiques corresponents. *n* és el nombre d'individus sobre el qual s'han fet els càlculs.



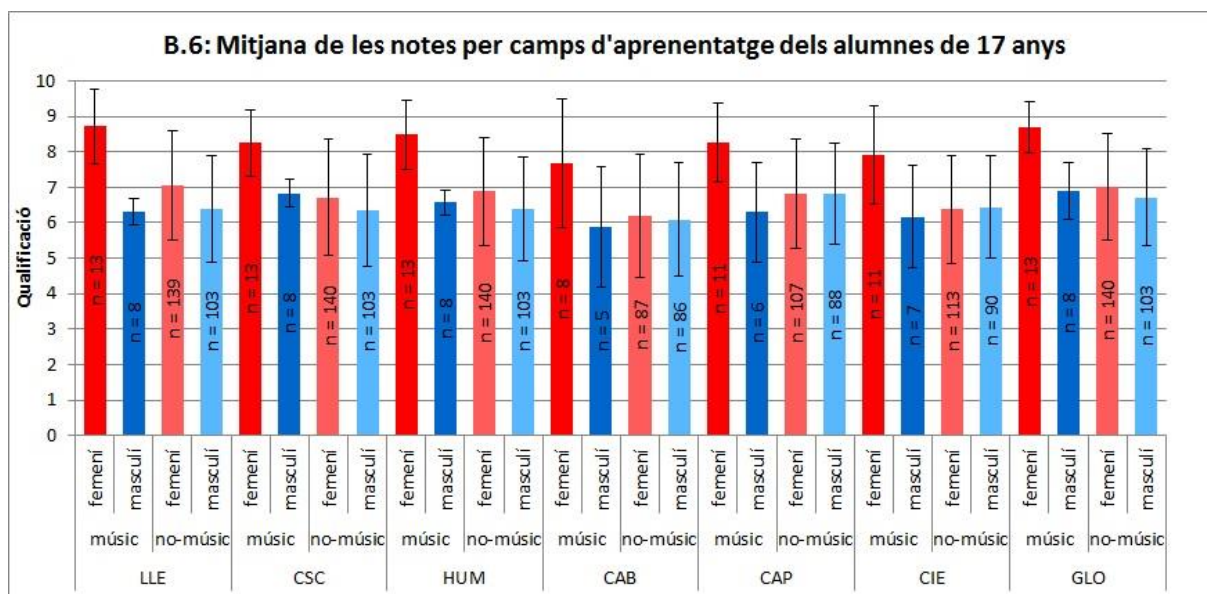
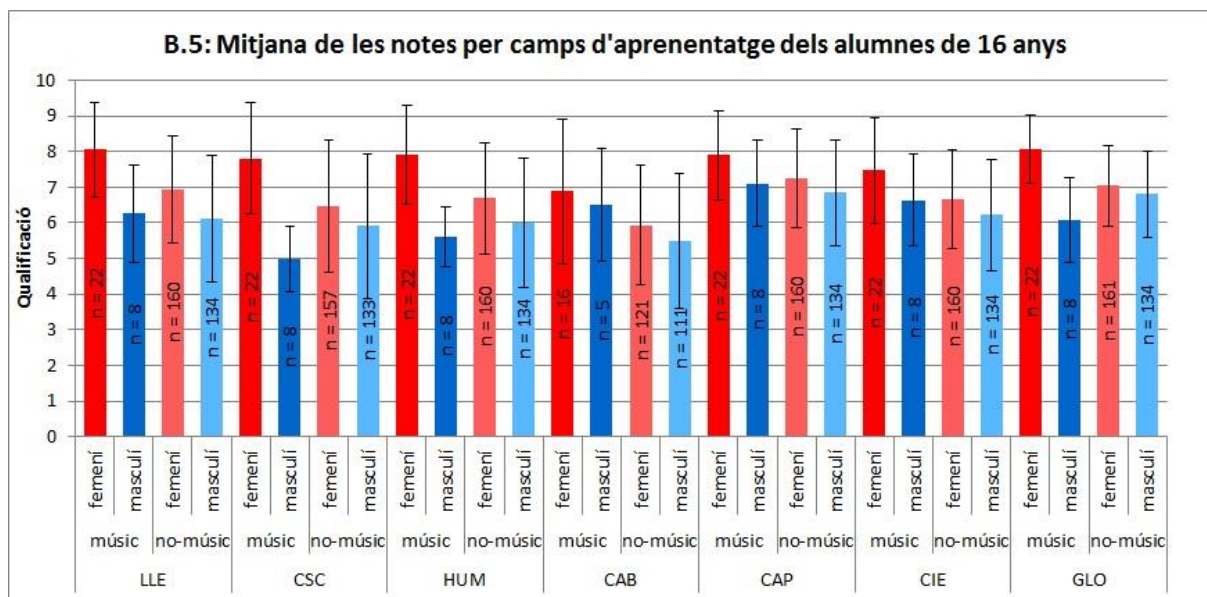
Mitjanes de les notes dels alumnes de 12 i 13 anys agrupades segons la pràctica musical, el sexe i els camps d'aprenentatge: **humanístic** (HUM), que inclou les llengües (LLE) i les ciències socials (CSC) i **científic** (CIE), que inclou les ciències abstractes (CAB) i les aplicades (CAP). GLO són les notes globals.

n és el nombre d'individus sobre el qual s'han fet els càlculs. Les barres d'error corresponen a la desviació estàndard.



Mitjanes de les notes dels alumnes de 14 i 15 anys agrupades segons la pràctica musical, el sexe i els camps d'aprenentatge: **humanístic** (HUM), que inclou les llengües (LLE) i les ciències socials (CSC) i **científic** (CIE), que inclou les ciències abstractes (CAB) i les aplicades (CAP). GLO són les notes globals.

n és el nombre d'individus sobre el qual s'han fet els càlculs. Les barres d'error corresponen a la desviació estàndard.

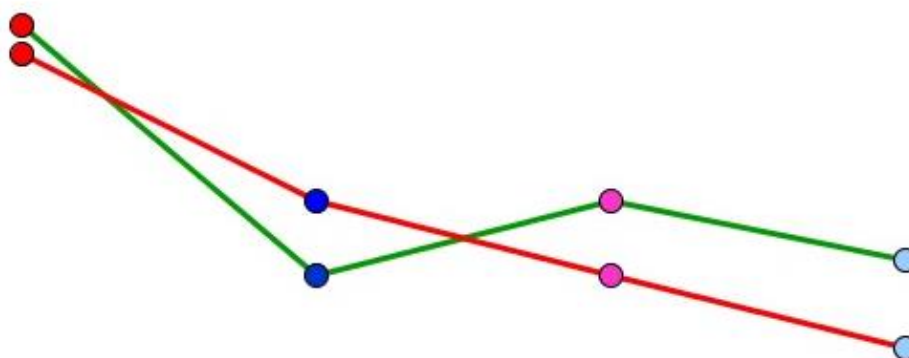


Mitjanes de les notes dels alumnes de 16 i 17 anys agrupades segons la pràctica musical, el sexe i els camps d'aprenentatge: **humanístic** (HUM), que inclou les llengües (LLE) i les ciències socials (CSC) i **científic** (CIE), que inclou les ciències abstractes (CAB) i les aplicades (CAP). GLO són les notes globals.

n és el nombre d'individus sobre el qual s'han fet els càlculs. Les barres d'error corresponen a la desviació estàndard.

Observant les mitjanes, es pot dir que en tots els casos les noies músics són les que obtenen més bons resultats. La diferència que les separa dels nois músics va des d'unes dècimes fins a més d'un punt. Si comparem els estudiants músics amb els no-músics s'aprecien diferències significatives en els resultats dels alumnes de la ESO (dels 12 als 15 anys) i els de Batxillerat (16 i 17 anys).

A l'ESO (gràfics B.1 – B.4) la diferència entre els músics i no-músics és molt més accentuada, arribant en alguns casos fins als dos punts. En tots els casos s'observen millors qualificacions en els músics. A Batxillerat (gràfics B.5 i B.6) es veu un canvi de tendència: els nois músics obtenen qualificacions més baixes que les noies no-músics, que, a més, obtenen millors resultats que a l'ESO. A segon de Batxillerat (gràfic B.6), sobretot, els nois músics i no-músics obtenen pràcticament els mateixos resultats. D'aquesta manera, l'única columna que sobresurt de manera destacada per sobre de les altres és la de les noies músics, quedant les altres tres aproximadament a la mateixa alçada perquè obtenen resultats molt semblants.



Línies de tendència dels resultats acadèmics a l'ESO (línia vermella) i a Batxillerat (línia verda). Els punts representen les noies músics (vermell), els nois músics (blau fort), les noies no-músics (rosa) i els nois no-músics (blau fluix).

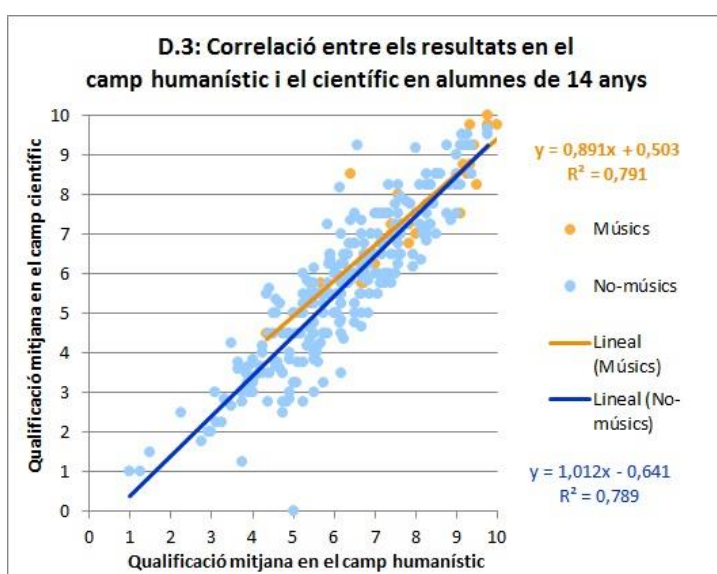
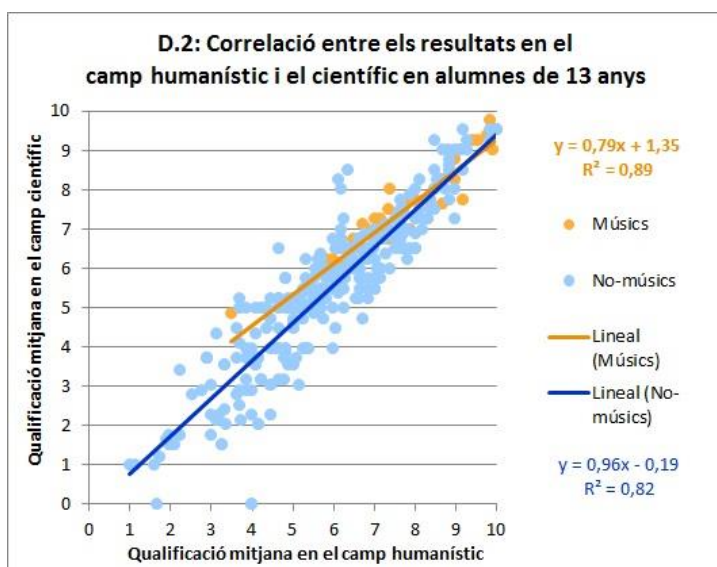
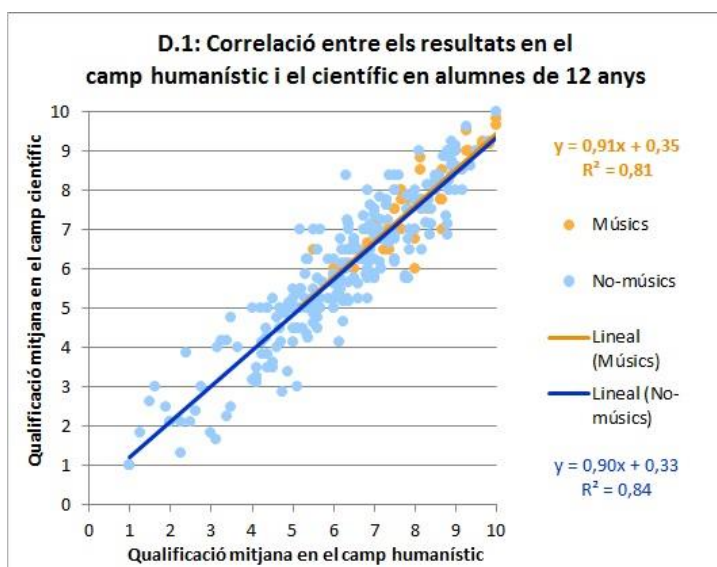
En els gràfics de barres de totes les edats les puntuacions obtingudes són similars pràcticament en tots els àmbits de coneixement. Destaca, però, l'excepció de les ciències abstractes, que també és constant. Els resultats són més baixos en tots els grups d'alumnes.

L'anàlisi de les barres d'error proporciona informació sobre la variabilitat en els resultats acadèmics dels grups estudiats. Una variabilitat petita, indica una major homogeneïtat en el grup.

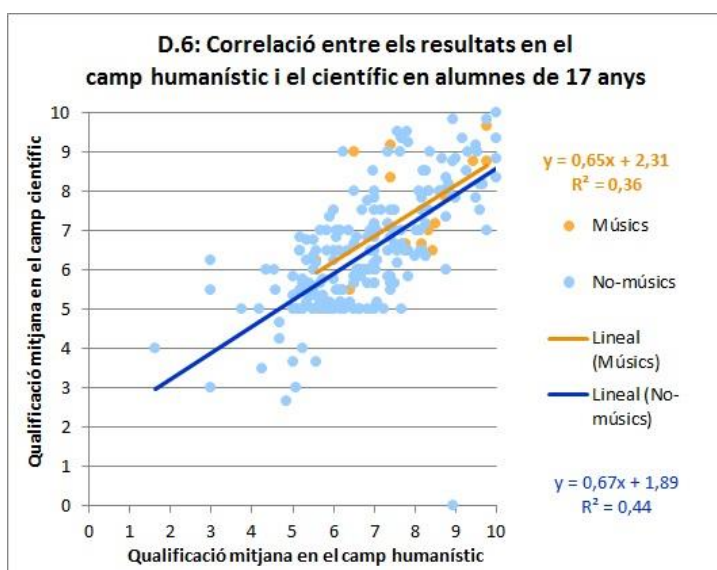
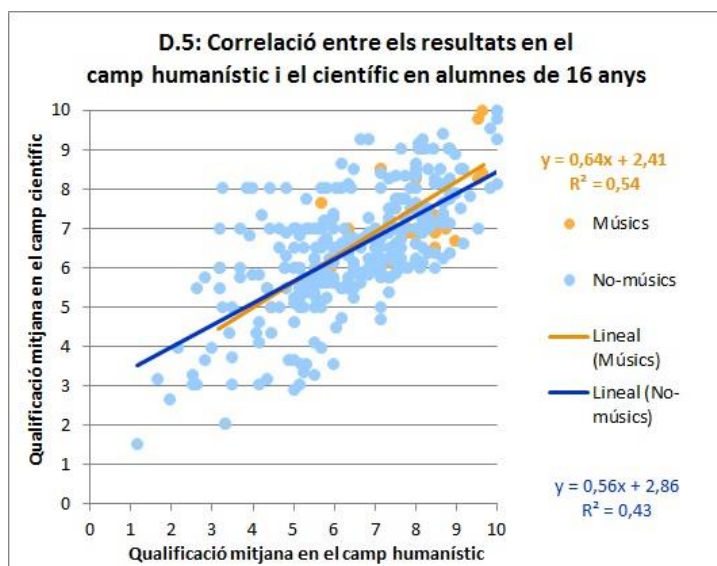
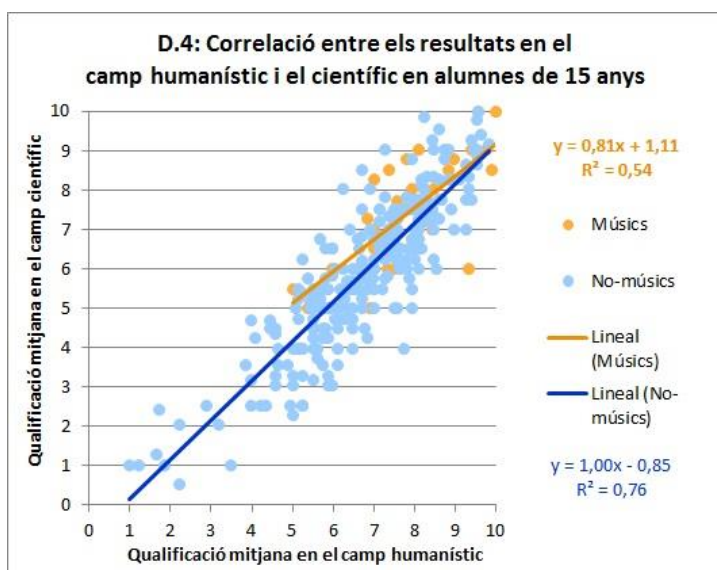
Tots els gràfics de l'ESO (B.1 – B.4) reflecteixen més homogeneïtat en els grups dels músics que en els dels no-músics. La desviació típica és menor en els grups musicals tant en el camp humanístic, com en el científic i en els resultats globals. Si s'observa cadascun dels gràfics per edats, a l'ESO entre alumnes del mateix sexe la desviació dels músics és significativament menor a la dels no-músics, al voltant de -0.50 punts. Aquesta diferència disminueix en el camp humanístic als 14 i 15 anys perquè disminueix la desviació típica en els no-músics respecte als cursos anteriors (gràfics B.3 i B.4). Això possiblement és a causa de la disminució de les diferències del domini de les llengües en els no-músics a partir de tercer d'ESO (els alumnes estrangers assolixen el nivell dels seus companys o abandonen els estudis).

Al Batxillerat (gràfics B.5 i B.5) les desviacions típiques en el camp científic entre músics i no-músics s'igualen molt. En canvi, en el camp humanístic es manté una diferència important, pràcticament de -1 punt en els nois i de -0.40 punts en les noies.

Per saber si hi ha alguna relació entre el fet d'estudiar música i una major capacitat cognitiva que interrelaciona els dos camps d'aprenentatge analitzats, s'ha estudiat la correlació entre les notes en el camp humanístic i el científic. Per fer-ho, cada punt (definit per les coordenades X,Y) dels **gràfics de dispersió (D)** representa un alumne i ve definit per la seva nota mitjana en el camp humanístic (X) i en el camp científic (Y). S'ha suposat una correlació lineal entre les notes dels dos camps d'aprenentatge, i s'ha caracteritzat cada població amb el corresponent valor de correlació (R^2). Una millor correlació, és a dir, un R^2 més pròxim a 1, indicarà una millor capacitat cognitiva en els dos camps d'aprenentatge.



Gràfics de dispersió de les notes mitjanes en els camps humanístic i científic dels alumnes de 12, 13 i 14 anys. En blau es representen els resultats dels alumnes que no estudien música i en taronja els dels que sí que n'estudien. La correlació entre els resultats acadèmics en el camp humanístic i el científic a cada edat es representa amb la línia de tendència.



Gràfics de dispersió de les notes mitjanes en els camps humanístic i científic dels alumnes de 15, 16 i 17 anys. En blau es representen els resultats dels alumnes que no estudien música i en taronja els dels que sí que n'estudien. La correlació entre els resultats acadèmics en el camp humanístic i el científic a cada edat es representa amb la línia de tendència.

La primera observació que es pot fer a partir dels gràfics D.1 – D.6 és que no hi ha grans diferències entre la correlació entre els resultats en el camp humanístic i el científic dels músics i la dels no-músics. Les màximes diferències es troben en els alumnes de 15 anys (gràfic D.4, els músics obtenen una correlació de -0.22 punts per sota dels no-músics) i en els de 16 anys (gràfic D.5, els músics obtenen una correlació de +0.11 punts per sobre dels no-músics). Les variacions entre els valors de la correlació dels músics i la dels no-músics dels gràfics de les altres edats oscil·len entre -0.08 i +0.07, per tant, les correlacions són molt similars.

Una altra apreciació destacable és que la correlació dels estudiants de 12, 13 i 14 anys (al voltant de 0.80 sobre un màxim d'1) és molt més alta que la dels alumnes de 15, 16 i 17 anys, on s'observa que la correlació disminueix a mida que augmenta l'edat (la correlació més baixa es troba en els músics de 17 anys, amb un valor de 0.36).

En tots els gràfics la distribució dels punts es reparteix entre el quadrant superior dret (la majoria), on se situen els aprovats en els dos camps d'aprenentatge, i l'inferior esquerre, on se situen els suspesos en els dos camps. En els altres dos quadrants (el superior esquerre i l'inferior dret, on es troben els alumnes que aproven en un camp d'aprenentatge i suspenen en l'altre) el número de punts és molt baix en comparació amb el total. A mesura que va augmentant l'edat dels estudiants, també augmenta la concentració de punts en el quadrant superior dret. En tots els gràfics, també, tots els punts que representen els músics (color taronja) se situen en el quadrant superior dret, excepte 7 individus dels 205 músics de tot l'estudi (1 de 13 anys, 1 de 14, 2 de 15 i 3 de 16).

8.2.2. RESULTATS PER PROMOCIONS

A continuació es presenta l'evolució dels resultats acadèmics de cada promoció en els últims tres cursos. S'han utilitzat els mateixos tipus de gràfics que en l'anàlisi per edats, el de barres (B) i el de dispersió (D).

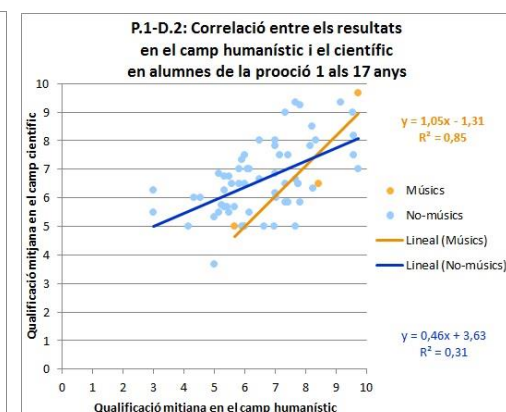
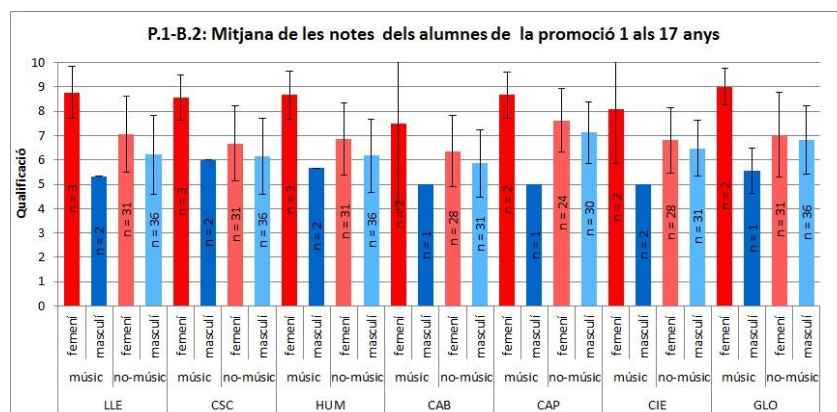
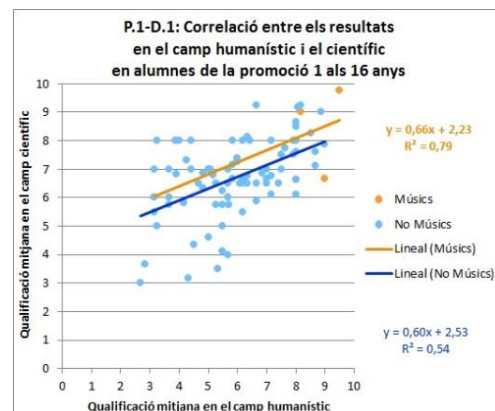
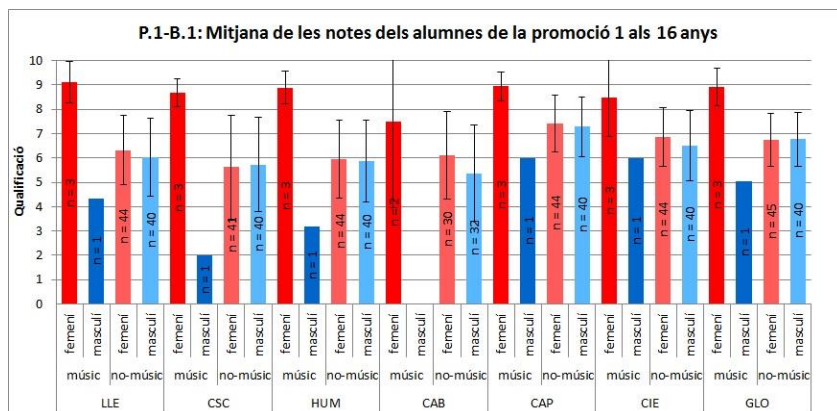
Les promocions (P) estudiades han estat:

Promoció	Edats dels alumnes (en anys)		
	Curs 2010-11	Curs 2011-12	Curs 2012-13
P.1*	16	17	(18)
P.2	15	16	17
P.3	14	15	16
P.4	13	14	15
P.5	12	13	14
P.6*	(11)	12	13

* En les promocions 1 i 6 només s'ha disposat de les dades de dos cursos acadèmics perquè es corresponen amb les promocions que van marxar o entrar a l'institut en el període d'aquests tres anys.

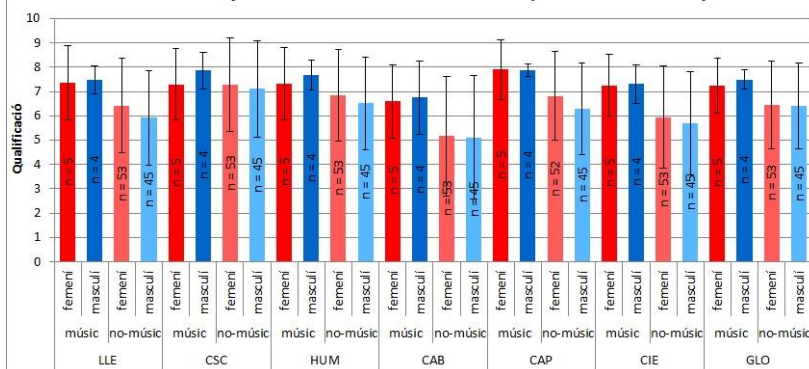
Cada promoció està formada, fonamentalment, pel mateix grup d'alumnes, de manera que es pot observar l'evolució dels resultats dels mateixos estudiants al llarg dels tres anys. S'ha de tenir present que en cada promoció es produeixen altes i baixes d'alumnes (principalment a l'inici del Batxillerat, que es correspon amb els 16 anys de cada promoció), donant lloc a variacions dels individus del grup que no s'han controlat a l'hora de realitzar aquest estudi però que sí s'han tingut en compte a l'hora d'analitzar els resultats.

Evolució dels resultats acadèmics de la promoció 1

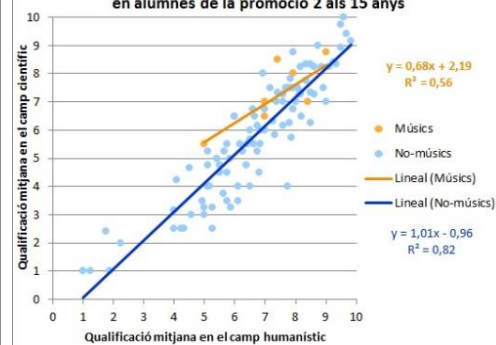


Evolució dels resultats acadèmics de la promoció 2

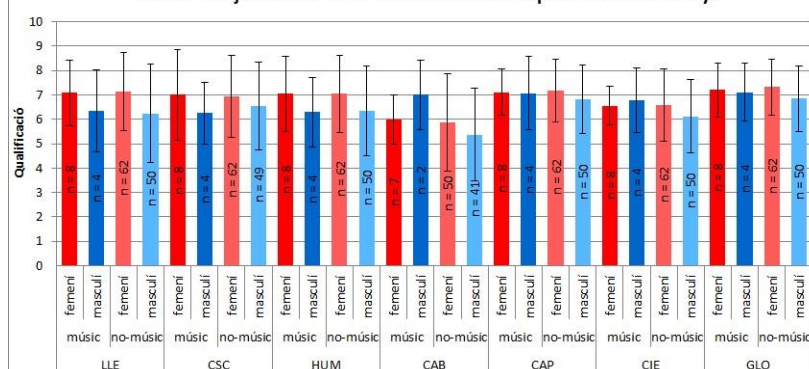
P.2-B.1: Mitjana de les notes dels alumnes de la promoció 2 als 15 anys



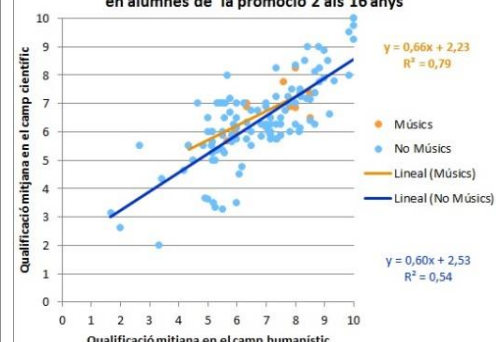
P.2-D.1: Correlació entre els resultats en el camp humanístic i el científic en alumnes de la promoció 2 als 15 anys



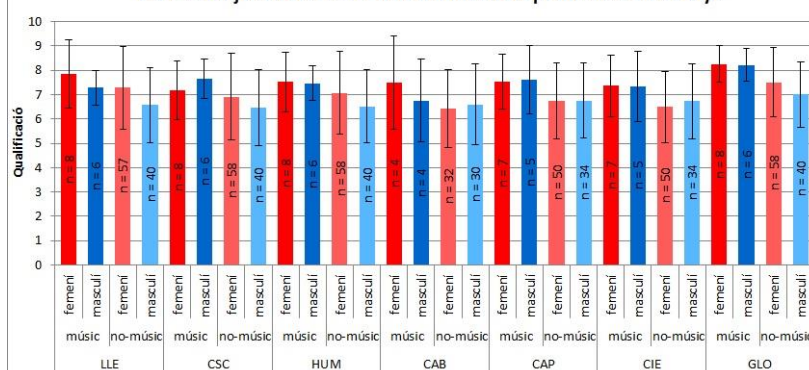
P.2-B.2: Mitjana de les notes dels alumnes de la promoció 2 als 16 anys



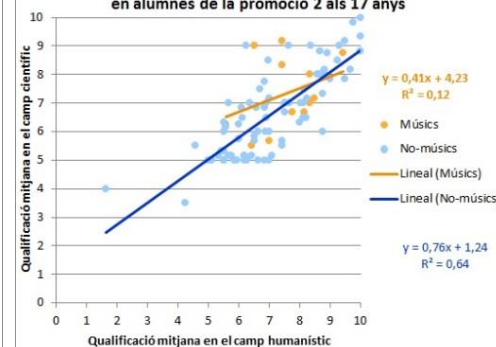
P.2-D.2: Correlació entre els resultats en el camp humanístic i el científic en alumnes de la promoció 2 als 16 anys



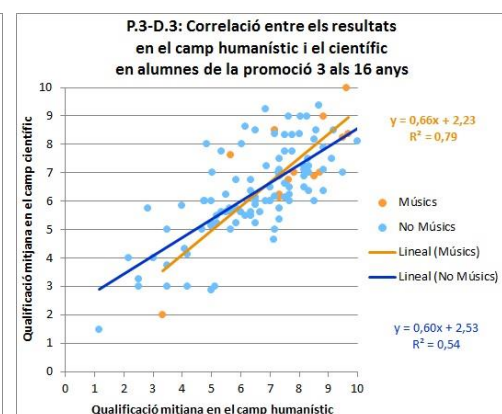
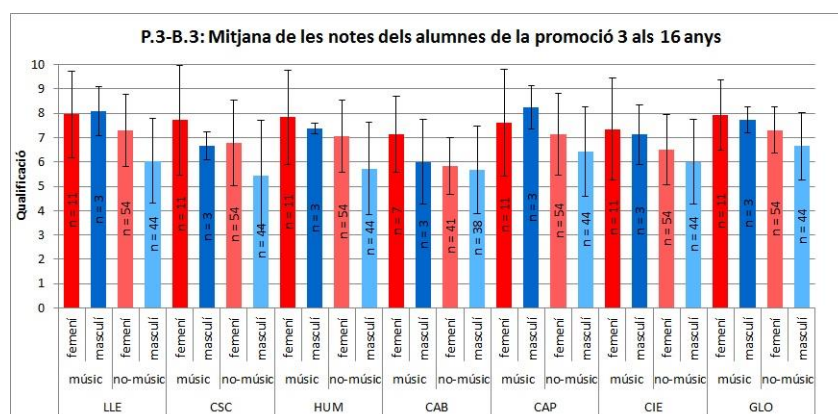
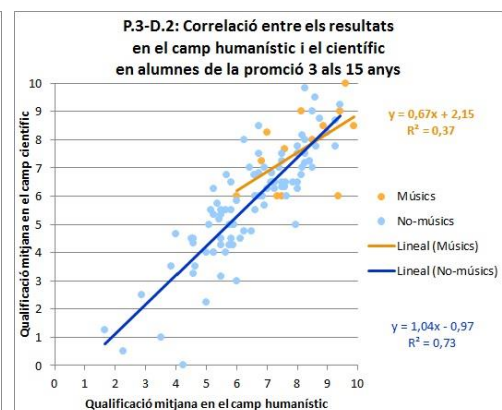
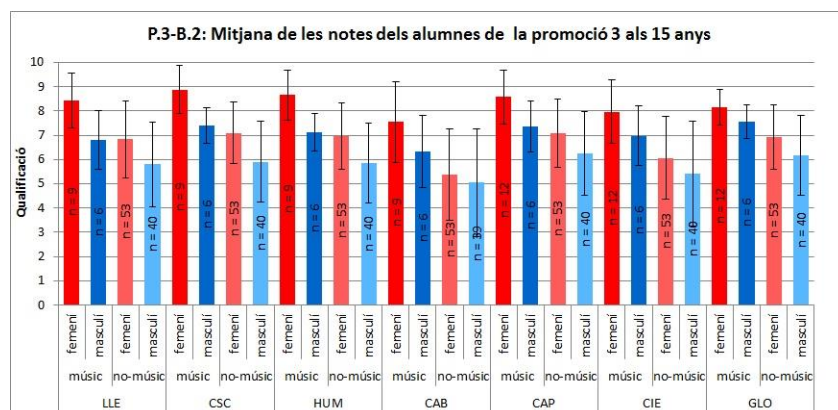
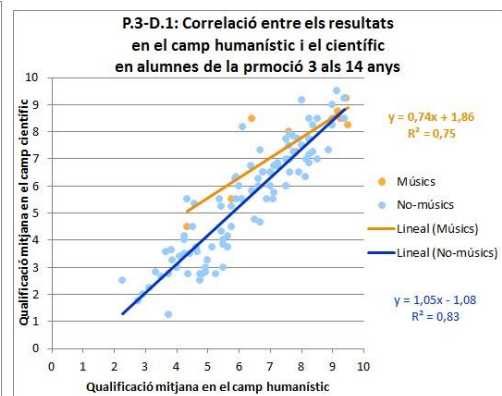
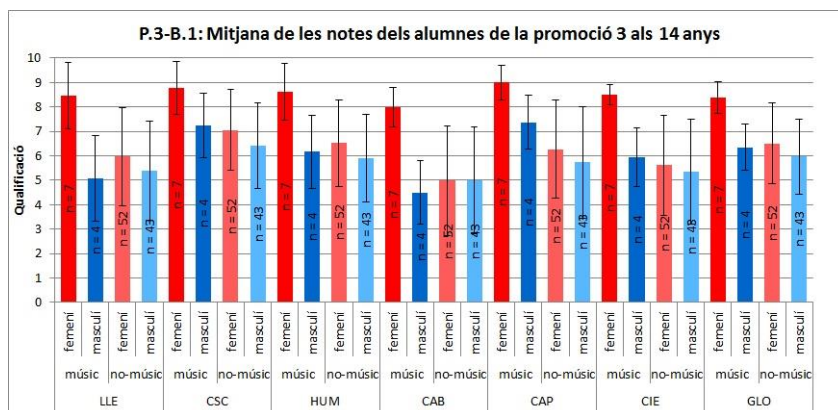
P.2-B.3: Mitjana de les notes dels alumnes de la promoció 2 als 17 anys



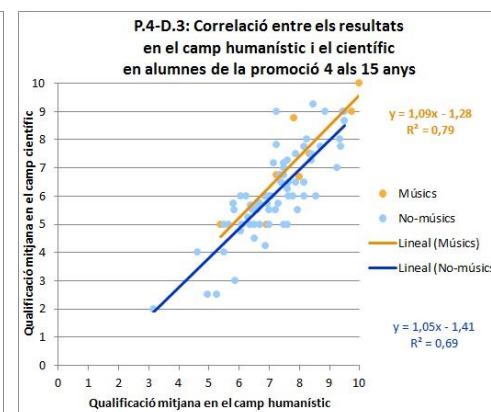
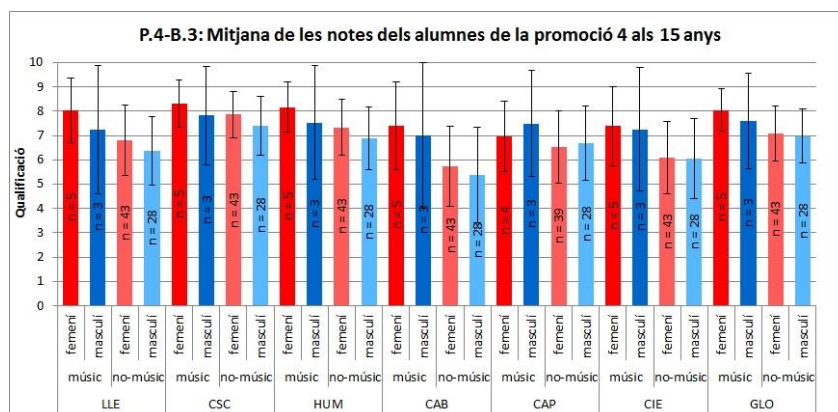
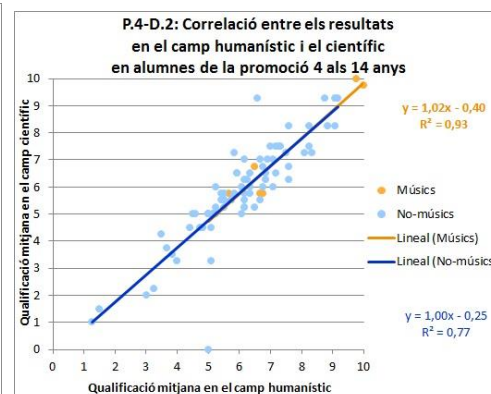
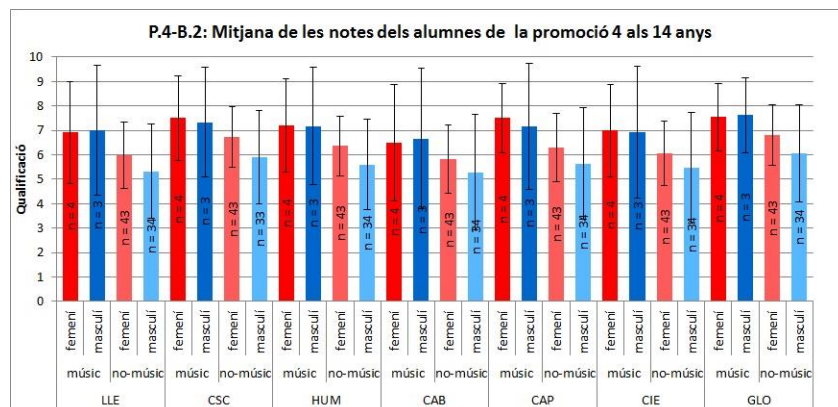
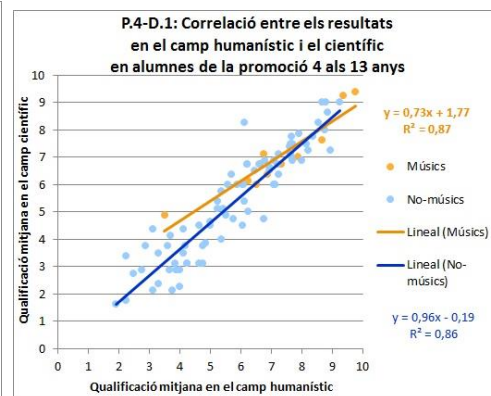
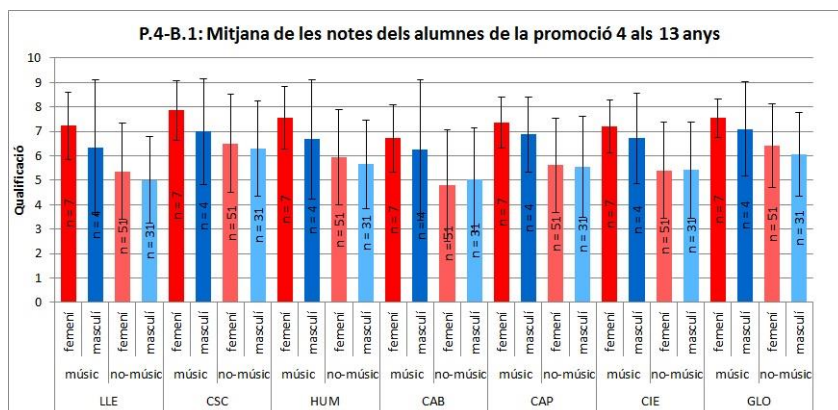
P.2-D.3: Correlació entre els resultats en el camp humanístic i el científic en alumnes de la promoció 2 als 17 anys



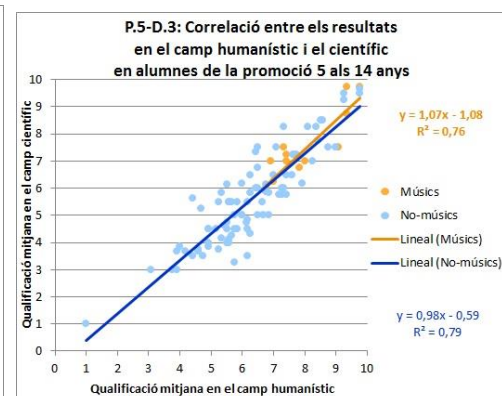
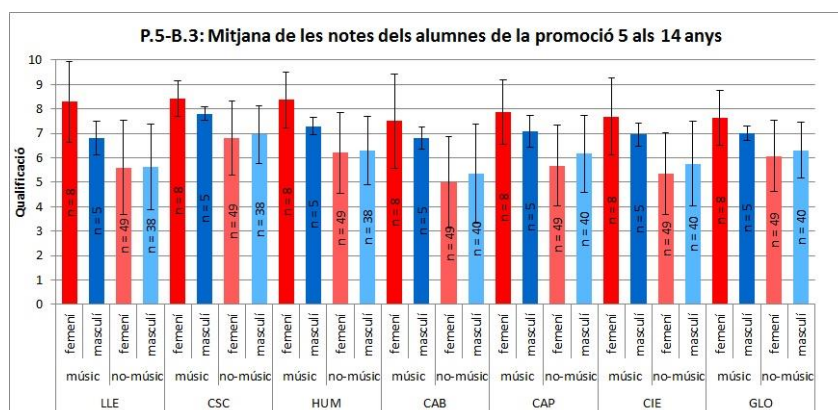
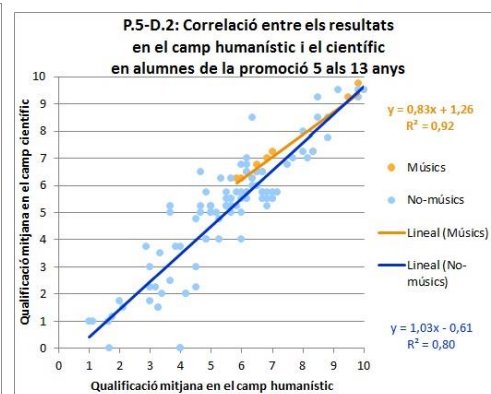
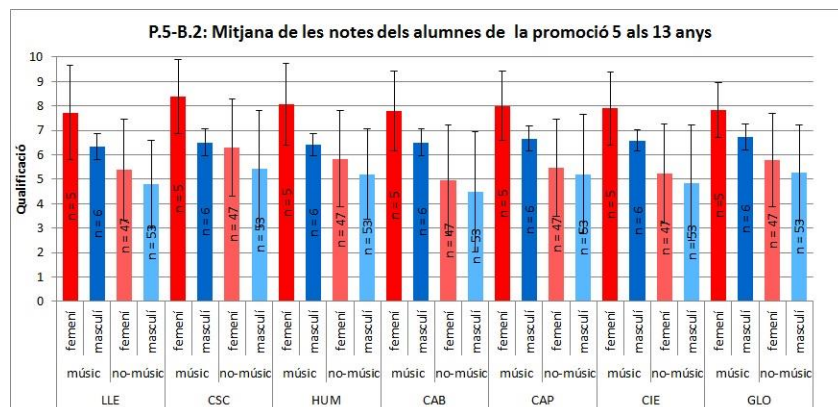
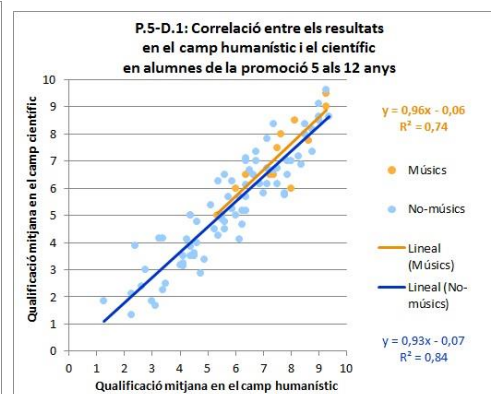
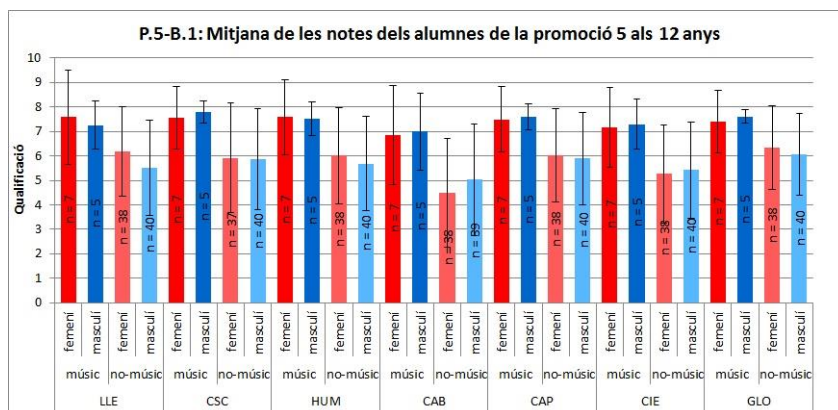
Evolució dels resultats acadèmics de la promoció 3



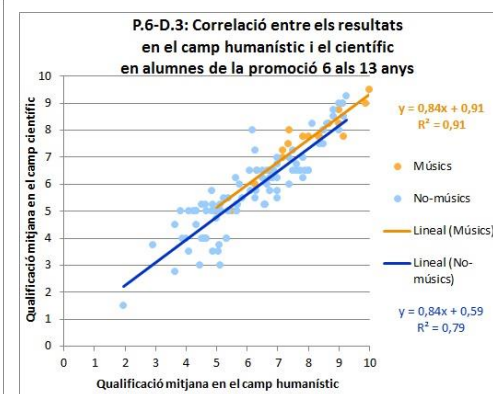
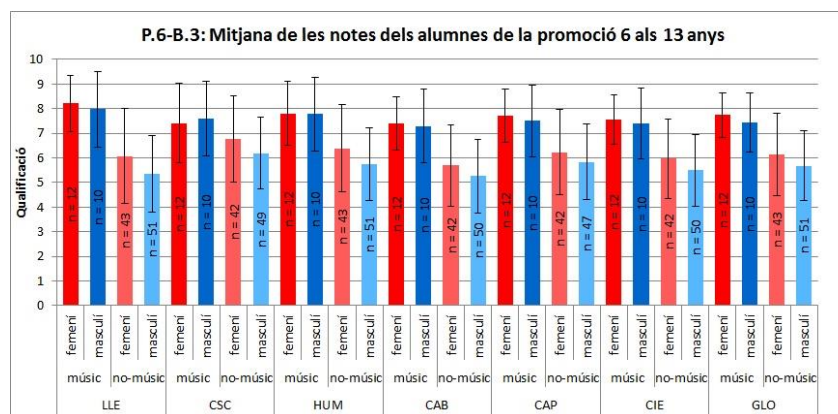
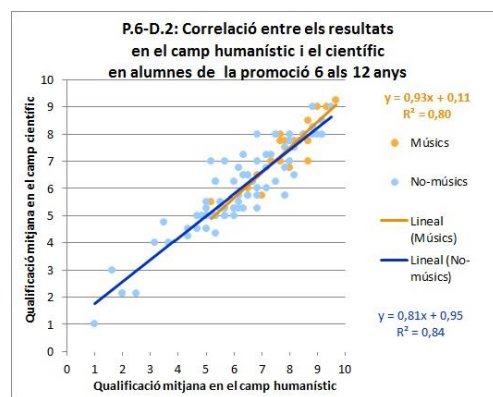
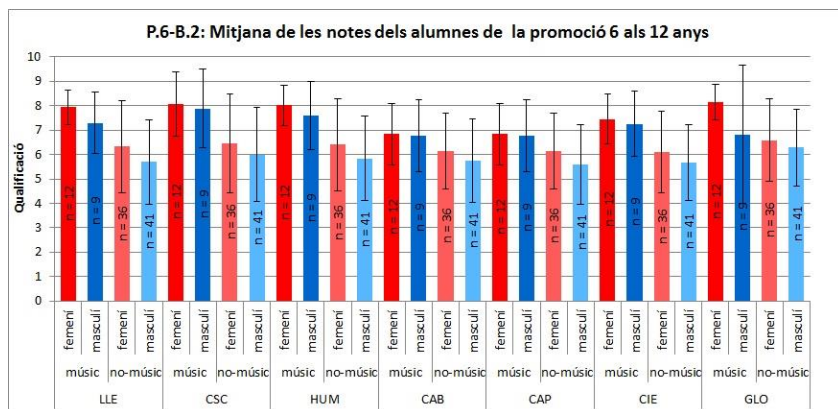
Evolució dels resultats acadèmics de la promoció 4



Evolució dels resultats acadèmics de la promoció 5



Evolució dels resultats acadèmics de la promoció 6



S'observa que cada promoció té una línia de tendència que es manté força estable al llarg dels tres anys. Mentre estan a l'ESO aquestes línies de tendència es corresponen amb les mateixes que s'han vist en l'anàlisi per edats i es poden observar clarament en les promocions 3, 4, 5 i 6. Quan les promocions inicien el Batxillerat cada promoció segueix una línia de tendència pròpia més allunyada de l'estàndard.

La promoció 1 presenta uns gràfics de barres on la columna dels nois músics és la més baixa. Aquest grup està format per només dos nois amb estudis musicals que obtenen uns resultats atípics. Aquest número d'alumnes és tan petit que els resultats no es poden generalitzar. Sense considerar la columna dels nois músics, les altres sí que segueixen la línia de tendència.

En totes les promocions, en general, els millors resultats els obtenen les noies músics, seguides dels nois músics, les noies no-músics i els nois no-músics. En la promoció 2 i en alguns casos puntuals d'altres promocions els nois músics superen les noies músics. Les noies músics de la promoció 2 tenen, en general, puntuacions més baixes que les noies músics de les altres promocions. Això fa que els nois músics d'aquesta promoció als 15 anys (gràfic P.2-B.1) obtinguin resultats més alts que elles i que les noies no músics les superin als 16 anys (gràfic P.2-B.1). Si no es tenen en compte les noies músics, la resta de grups sí que segueixen la tendència observada en grups d'altres promocions a l'ESO i al Batxillerat, la que els correspon per l'edat. En canvi, als 17 anys (P.2-B.3) milloren els resultats en general i especialment els dels músics, tant nois com noies. El quadrant superior dret del gràfic de dispersió (P.2-D.3) conté pràcticament tots els punts. Un altre cas on els nois músics superen els resultats de les noies músics és en l'àmbit de les ciències aplicades de la promoció 3 als 16 anys (gràfic P.3-B.3) i en gairebé tots els àmbits de la promoció 5 als 12 anys (gràfic P.5-B.1).

És interessant observar que en la promoció 6 els resultats dels nois i les noies músics estan pràcticament igualats al nivell de les noies músics. Això és perquè els resultats dels nois músics d'aquesta promoció són més alts que en les altres (gràfics P.6-B.2 i P.6-B.3).

Les particularitats més característiques de cada promoció estudiada són:

- Promoció 1: els nois músics obtenen els pitjors resultats, per sota de tots els altres.
- Promoció 2: les noies músics obtenen resultats més baixos en comparació amb les altres promocions, de manera que els nois músics (als 15 anys) o les noies no-músics (als 16 anys) les superen en moltes àrees. Als 17 anys augmenten els resultats en general, especialment els dels músics.
- Promoció 3: segueix la tendència estàndard. Els nois músics són els que la trenquen en alguna ocasió (als 14 anys en algunes àrees obtenen resultats inferiors i als 16 obtenen resultats superiors en l'àmbit de les ciències aplicades).
- Promoció 4: segueix la tendència estàndard. Els nois músics superen en dos ocasions les noies músics, en ciències abstractes als 14 anys (gràfic P.4-B.2) i en ciències aplicades als 15 anys (gràfic P.4-B3).
- Promoció 5: segueix la tendència estàndard, excepte als 12 anys on els nois músics superen les noies músics perquè les qualificacions d'elles no són tan altes com les d'altres promocions.
- Promoció 6: segueix la tendència estàndard de l'ESO, però els nois músics pràcticament igualen els resultats de les noies músics.

8.3. ANÀLISI DELS RESULTATS

Els resultats d'aquest estudi es poden considerar perquè el nombre d'individus de la població (1783 dels quals 1578 són no-músics i 205 músics aficionats) és considerable. El número d'estudiants és elevat, però el número de músics és molt més reduït (11.5% del total), especialment als 16 i 17 anys que corresponen al Batxillerat i encara més en els nois que en les noies. De totes maneres, aquest centre educatiu és un dels de Lleida amb un percentatge més elevat d'alumnes que reben formació musical fora de l'institut. És un estudi basat en persones i com que tots som diferents i no hi ha dos persones idèntiques possiblement no es reproduirien exactament de la mateixa manera en un altre grup d'individus.

L'anàlisi dels resultats és **significatiu** i **extrapolable en certa mesura**. En ser una població prou gran, augmenta la fiabilitat i disminueix la probabilitat que els resultats obtinguts siguin a causa de l'atzar o de factors que no s'han tingut en compte.

Als resultats obtinguts en els alumnes de 16 i 17 anys (Batxillerat) se'ls ha de donar un valor més relatiu que als obtinguts en els alumnes d'entre 12 i 15 anys (ESO). El nombre d'alumnes per assignatura a Batxillerat disminueix considerablement en el camp científic perquè són assignatures ofertades dins d'un gran ventall de matèries de modalitat que no trien tots els estudiants. A més a més, en aquest nivell disminueix el nombre d'alumnes que realitzen estudis musicals.

A l'ESO, els **resultats** dels **no-músics** són molt més **aleatoris**. En canvi, els dels **músics** no són tan dispersos (més **uniformes**) i, a més, són més alts. Així es pot deduir que aquests últims tenen algun factor en comú, justament l'estudi i la pràctica musical, que afavoreix les seves notes.

A partir dels gràfics de barres resulta prou evident que el factor **música** és **més influent que** el factor **sexe** en els resultats. La diferència de resultats entre nois i noies és molt menor en els no-músics que en els músics, de manera que el factor que fa augmentar la diferència ha de ser el que canvia entre els dos grups comparats, la música. De totes maneres, cal tenir en compte que hi ha altres variables que segurament van lligades a realitzar estudis musicals i que també tenen un pes en aquests resultats. Un estudiant que fa música fora de l'institut és probable que tingui un nivell socio-econòmic acceptable i una certa motivació.

En totes les edats pràcticament les mitjanes de totes les àrees de les **noies músics** estan al voltant del 8 i sempre n'hi ha algunes que arriben o superen el 9. Treuen **molt bons resultats** i sempre **superant la resta de grups** observats (nois músics i nois i noies no-músics).

L'inici de les matèries optatives als 15 anys podria explicar que la correlació disminueixi amb l'edat. A menys correlació, més diferències de resultats entre els camps humanístic i científic i, per tant, més especialització. Esquemàticament:

↑ edat ⇒ ↓ correlació ⇒ ↑ especialització

També es pot concloure que al **Batxillerat** hi ha un **augment general** dels **resultats** respecte a l'ESO, especialment a segon. Dels quatre grups observats només destaquen de manera significativa les noies músics. Aquesta diferència probablement està determinada per un canvi de **tipologia** de l'**alumnat**. Els grups d'alumnes es refan perquè alguns dels que han cursat l'ESO al centre abandonen els estudis o marxen i es produeix una entrada important d'alumnes d'altres instituts. A l'ESO (ensenyament obligatori) els estudiants són més diversos en molts aspectes: socio-econòmics, de motivació, socio-culturals, entorn familiar, expectatives i objectius vitals, adolescència... Aquestes diferències són més evidents entre els músics i els no-músics. Al Batxillerat (ensenyament no obligatori) disminueixen les diferències i l'alumnat és menys divers. Això explicaria l'aproximació en els notes obtingudes de tots els alumnes, tot i que continuen destacant les noies músics.

Una altra explicació de la millora dels resultats als cursos superiors és que són uns **estudis no obligatoris**. Per tant, en un principi la motivació dels estudiants és major que a l'ESO. A més a més, probablement hi ha estudiants que a segon de Batxillerat deixen els estudis musicals de manera temporal per dedicar-se únicament a l'institut i a la selectivitat. Els que segueixen sembla que tenen uns mètodes d'aprenentatge definits que fan augmentar els resultats.

Es pot dir que el **factor sexe influeix més en aquestes edats**, tal com es veu als gràfics de barres dels alumnes de 16 i 17 anys. Les noies no-músics obtenen uns resultats lleugerament superiors als nois músics. Però si tenim en compte que el número de nois músics és bastant més petit que a l'ESO, no es pot concloure categòricament que el factor sexe influencii més que el factor música. Seria necessari augmentar número de músics per confirmar els resultats obtinguts. Després d'estudiar amb profunditat les adaptacions cerebrals en els músics i la seva relació amb les altres habilitats cognitives, crec que probablement té més pes la música que el sexe, però que si s'uneixen les dos variables en un mateix individu les millores se sumen.

Les **correlacions elevades** en els dos camps d'aprenentatge dels alumnes de **12, 13 i 14 anys** indiquen que els estudiants que obtenen resultats alts / baixos en el camp humanístic també els treuen alts / baixos en el científic, tant si són músics com si no ho són.

El número d'alumnes aprovats en els dos camps d'aprenentatge augmenta amb l'edat, tal com mostren els punts dels gràfics de dispersió que es van acumulant al quadrant superior dret.

A **Batxillerat** la desviació típica entre músics i no-músics del mateix sexe en el camp científic és pràcticament nul·la, en canvi, en el camp humanístic és significativa (-1 punt en els nois i -0.4 punts en les noies). Com que hi ha una major homogeneïtat en els resultats del **camp científic**, això pot significar que els **estudis musicals determinen menys** els **resultats** obtinguts en aquest camp que en l'humanístic perquè en el científic existeix força variabilitat (pràcticament la mateixa) en les notes dels músics i les dels no-músics.

En l'àmbit de coneixement de les **ciències abstractes** s'observa en totes les edats uns **resultats** més **diversos** i una **major dificultat** per treure millors notes, independentment de la formació musical i el sexe.

En general, els resultats per **promocions** segueixen els mateixos patrons que els dels resultats per edats. L'anàlisi de l'evolució durant els tres anys posa de manifest que existeix una mateixa tendència en cada promoció d'alumnes diferents i que també existeixen algunes diferències associades a les particularitats de cada grup d'alumnes.

Cada promoció presenta una **línia de tendència pròpia**, diferent d'una promoció a una altra, que es manté força estable al llarg dels tres anys. Aquest fet pot ser explicat per les diferències individuals dels estudiants de cada promoció. Cada persona és diferent i totes les persones que formen part d'un mateix grup influeixen en els resultats conjunts. Tot i ser diferents, aquestes línies de tendència tenen un **patró comú** que coincideix amb el que s'ha trobat en l'anàlisi de les dades per edats. Això significa que hi ha alguns elements comuns i que no depenen dels individus del grup de cada promoció. En aquest cas són la formació musical i l'edat.

Abans de concloure s'ha de dir que els resultats acadèmics depenen de moltíssimes **variables** i controlar i tabular el seu **total** és molt **difícil**. Hi ha factors que no es poden mantenir constants i que segurament han interferit en els resultats. A més a més, s'han trobat resultats en alumnes músics i en no-músics que no segueixen la tendència general. Per exemple, els nois músics de la promoció 1 (gràfics P.1-B.1 i P.1-B.2) obtenen pitjors resultats que els estudiants no-músics, les noies no-músics de la promoció 2 obtenen millors resultats en moltes àrees que els músics (gràfic P.2-B.2). Això demostra que les variables que s'han tingut en compte (sexe, formació musical i edat) tampoc són determinants al 100%, tot i que els resultats obtinguts sí que han permès fer algunes generalitzacions.

Com a conclusió final es pot dir que l'estudi i la pràctica musical influeixen positivament en els resultats acadèmics, però no de la mateixa manera en tots els camps d'aprenentatge. Milloren els resultats en el camp humanístic respecte els estudiants no-músics ja als 12 anys d'edat, millora que es manté com a mínim fins als 17 (període d'edat estudiat). En el camp científic no s'han observat diferències importants en els 16 i 17 anys, on tots els estudiants obtenen una variabilitat semblant en els resultats. Com a conseqüència, es pot dir que l'estimulació cerebral de la música repercuteix positivament en primer lloc en les habilitats cognitives relacionades amb les llengües i les ciències socials.

Aquest estudi estadístic ha posat de manifest un factor que també influeix de manera molt determinant en l'aprenentatge, el sexe. Les noies obtenen millors resultats que els nois quan es redueixen altres variables que poden afectar de manera decisiva els resultats acadèmics (apreciació feta al Batxillerat).

9. CONCLUSIONS

Aquest treball ha estat fet sota **diverses perspectives** perquè el món és un tot complex on la física, les matemàtiques, la bioquímica, l'anatomia, la neurociència, la pedagogia i la música estan íntimament interrelacionades. Per comprendre el funcionament del processament cerebral de la música i de l'aprenentatge, s'ha necessitat de totes aquestes disciplines.

Tant els estudis científics existents avui en dia com l'estudi estadístic realitzat aquí evidencien l'existència d'una clara **correlació positiva** entre l'**educació musical** a llarg termini i les **habilitats cognitives** generals. L'estudi i la pràctica musical impliquen un major nombre de connexions entre neurones i com a resultat augmenta el volum de matèria gris en les àrees del cervell relacionades amb la música. L'experiència musical, per tant, promou la **neuroplasticitat**. Algunes d'aquestes regions estan relacionades també amb altres funcions mentals que intervenen de manera decisiva en l'aprenentatge, com la percepció, el llenguatge, la memòria i la consciència. El cervell dels músics també té més desenvolupades l'atenció, la selecció i la discriminació auditiva, habilitats que faciliten altres aprenentatges més enllà del musical.

El **cervell** no és un receptor passiu d'estímuls de l'entorn, ni de bon tros, sinó un **sistema actiu** que s'autoregula a través d'una dinàmica interna complexa. Les nostres experiències, intencions, expectatives i necessitats modifiquen aquesta dinàmica i determinen la manera en què percebem i vivim en el nostre entorn. En la música podem trobar un gran aliat que ens ajudi a trobar la dinàmica i l'estil de vida que desitgem.

Tal com ha posat en evidència l'estudi estadístic, la pràctica musical afavoreix l'aprenentatge i millora els resultats de tots els àmbits de coneixement. Les **primeres millores** es produeixen en el **camp humanístic** perquè la música i el llenguatge tenen una relació especialment intensa, compartint estructures i procediments de funcionament, de manera que l'efecte és més immediat. Les millores en el **camp científic** es faran més evidents amb la **professionalització musical**, quan les connexions interhemisfèriques estiguin molt desenvolupades. Quan això es produeix augmenta

l'activitat cerebral en l'hemisferi esquerre, l'analític, el científic, arribant a estimular-se els dos hemisferis amb una intensitat similar.

Mario Capecchi, premi Nobel de Medicina 2007, explica de manera molt gràfica aquesta interconnexió cerebral: "Tot està connectat al cervell. Creus que aprens només solfeig i en realitat estàs enfortint també la teva orientació al camp; creus que només jugues als escacs i en realitat també perfecciones la teva sensibilitat cromàtica. El cervell té camins encara inexplorats, però certs..."

Els efectes de la pràctica musical proporcionen avantatges més enllà del processament sensorial. Beneficia les habilitats auditives i cognitives dels estudiants, millorant els resultats acadèmics. Això justifica la importància i la necessitat d'una educació musical a les **escoles** qualitativament i quantitativa suficient. La formació musical ja forma part del **currículum** de l'ensenyament obligatori a tots els nivells, però potser caldria **actualitzar-lo**. Seria interessant que els assessors i polítics responsables de l'elaboració de les lleis educatives tinguessin en compte els resultats obtinguts en les investigacions fetes fins al moment i aquelles que es puguin realitzar en el futur.

Aquestes investigacions han demostrat fins ara que la plasticitat del cervell és més gran en el seu període de maduració, fins als set anys, i que la seva matèria gris s'adapta estructuralment a les demandes ambientals intenses. Per tant, com més aviat s'iniciïn aquestes demandes, com per exemple amb l'educació musical, més adaptacions es realitzaran i més ràpidament. Una via de recerca de gran interès en el camp de l'educació i en el de la medicina pot ser el de la investigació conjunta de la neurologia i la psicologia cognitiva. Aquest treball ha estat realitzat sota aquesta perspectiva i creiem que és una línia d'actuació amb molt camí encara per recórrer.

Una altra conclusió amb la qual tots els estudis es posen d'acord és en la importància de l'**activitat regular, quotidiana i a llarg termini** per aconseguir uns **efectes positius** i duradors. Això ens fa pensar que la presència de la música hauria de ser constant al llarg de tota la nostra vida, tant en l'àmbit educatiu com en el personal.

D'altra banda, encara no s'ha determinat amb exactitud la contribució relativa de la predisposició innata i la pràctica musical en els canvis detectats en el cervell dels

músics respecte dels no-músics. Quin pes específic tenen els **factors genètics** en les adaptacions del cervell humà i quin és el que tenen els **factors externs**? Mentrestant, la música és una oportunitat fantàstica de generar canvis positius.

Ja que aquest és un treball que relaciona música i aprenentatge, voldria que la música fos part activa en les conclusions finals. El següent vídeo d'Antoni Tolmos, músic i compositor lleidatà, serveix d'il·lustració perfecta: <http://youtu.be/97XYbaCSEhQ>.

10. AGRAÏMENTS

En primer lloc, vull agrair a l'Eugenio Salvatierra les seves orientacions, les hores dedicades i el seu seguiment durant aquests intensos nou mesos. Gràcies als membres de l'equip directiu del l'Institut Samuel Gili i Gaya de Lleida per facilitar-me les dades emprades en l'estudi estadístic. Gràcies a CatalunyaCaixa i el seu programa Joves i Ciència per l'oportunitat d'elaborar el meu primer article científic i per la formació a l'XLab. Vull agrair, també, l'ajuda en la recerca d'informació de la Carla Conejo i la Núria Rodríguez, la revisió lingüística de la Carina Llobera i el suport tecnològic i estètic de la Sílvia Corral i la Patricia Delgado. Per últim, voldria dedicar un agraïment molt especial als meus pares pel seu ajut incondicional en aspectes científics, lingüístics i en altres de no tan tècnics.

11. REFERÈNCIES COMPLEMENTÀRIES

11.1. BIBLIOGRAFIA

Llibres

- JAUSET BERROCAL, Jordi Àngel, ***Cerebro y música, una pareja saludable. Las claves de la neurociencia musical***, Círculo Rojo - Investigación, Espanya, 2013.
- JAUSET BERROCAL, Jordi Àngel, ***Música y neurociencia: la musicoterapia. Sus fundamentos, efectos y aplicaciones terapéuticas***, UOC, Barcelona, 2008.
- JAUSET BERROCAL, Jordi Àngel, ***Sonido, música y espiritualidad. Un camino científico hacia la unidad***, Gaia Ediciones, Móstoles (Madrid), 2010.
- DENNIS RAINS, G., ***Principios de neuropsicología humana***, McGraw-Hill, Mèxic, 2004.

Apunts

- SALVATIERRA DOMPER, Eugenio, ***Campo eléctrico***, apunts de la matèria Física II, curs 2013-2014, INS Samuel Gili i Gaya, Lleida.
- SALVATIERRA DOMPER, Eugenio, ***Campo eléctrico***, apunts de la matèria Física II, curs 2013-2014, INS Samuel Gili i Gaya, Lleida.
- ROSENBUSCH, Joachim, ***Anatomy. The Brain***, apunts i pràctiques del ISC (Internacional Science Camp), juliol 2013, XLab (Göttingen, Alemanya).
- RITTER, Barbara i FERBER, Michael, ***Neurophysiology***, apunts i pràctiques del ISC (Internacional Science Camp), juliol 2013, XLab (Göttingen, Alemanya).
- ALÓS ALCALDE, Carles, ***La armonía de las neuronas***, apunts de la 8^a escola d'estiu d'educació musical de l'associació de mestres de música de Catalunya (aemcat), juliol 2013, La Seu d'Urgell.
- PEREIRA, José Antonio, ***Anatomía general del sistema nervioso***, apunts de la matèria *Anatomia Humana II*, curs 2012-2013, Universitat Pompeu Fabra, grau en *Biologia Humana*.
- PEREIRA, José Antonio, ***Meninges. Sistema Ventricular. Líquido cefalo-raquídeo***, apunts de la matèria *Anatomia Humana II*, curs 2012-2013, Universitat Pompeu Fabra, grau en *Biologia Humana*.

- PEREIRA, José Antonio, **La corteza cerebral**, apunts de la matèria *Anatomia Humana II*, curs 2012-2013, Universitat Pompeu Fabra, grau en *Biologia Humana*.
- PEREIRA, José Antonio, **Núcleos grises cerebrales**, apunts de la matèria *Anatomia Humana II*, curs 2012-2013, Universitat Pompeu Fabra, grau en *Biologia Humana*.
- CÓRDOBA GARCÍA, Francisco, **La memoria**, apunts de la matèria *Fundamentos biológicos del aprendizaje y la memoria*, curs 2005-2006, Universidad de Huelva, Diplomatura de Maestro – Educación Especial.
- CÓRDOBA GARCÍA, Francisco, **La base celular y físico-química del impulso y transmisión de la señal nerviosa**, apunts de la matèria *Fundamentos biológicos del aprendizaje y la memoria*, curs 2005-2006, Universidad de Huelva, Diplomatura de Maestro – Educación Especial.
- CÓRDOBA GARCÍA, Francisco, **Evolución, organización y fisiología general del sistema nervioso**, apunts de la matèria *Fundamentos biológicos del aprendizaje y la memoria*, curs 2005-2006, Universidad de Huelva, Diplomatura de Maestro – Educación Especial.
- CÓRDOBA GARCÍA, Francisco, **La percepción: mecanismos sensoriales**, apunts de la matèria *Fundamentos biológicos del aprendizaje y la memoria*, curs 2005-2006, Universidad de Huelva, Diplomatura de Maestro – Educación Especial.
- CÓRDOBA GARCÍA, Francisco, **La plasticidad cerebral: bases neurobiológicas del aprendizaje y la memoria**, apunts de la matèria *Fundamentos biológicos del aprendizaje y la memoria*, curs 2005-2006, Universidad de Huelva, Diplomatura de Maestro – Educación Especial.

Articles científics

- Christian Gaser i Gottfried Schlaug (2003). **Brain structures Differ between Musicians and Non-Musicians**. The Journal of Neuroscience, Oct 8, 23(27):9240-9245.
- Nina Kraus i Bharath Chandrasekaran (2010). **Music training for the development of auditory skills**. Neuroscience, Vol 11, 599-605.
- Norman M. Wienberger (2004). **Music and the Brain**. Scientific American 291, 88-95.

- Krista L. Hyde et al. (2009). ***Musical Training Shapes Structural Brain Development***. The Journal of Neuroscience, Mar 11, 29(10): 3019-3025.
- Robert J. Zatorre, Joyce L. Chen and Virginia B. Penhune (2007). ***When the brain plays music: auditory-motor interactions in music perception and production***. Nature neuroscience, Vol 8, 547-558.
- Isabelle Peretz i Robert J. Zatorre (2005). ***Brain Organization for Music Processing***. Annual Review of Psychology, Vol 56, 89-114.
- Eric R. Kandel i Robert D. Hawkins (1992). ***The Biological Bases of Learning and Individuality***. Scientific American 267, 78-86.
- Robert J. Zatorre, R. Douglas Fields and Heidi Johansen-Berg (2012). ***Plasticity in gray and white: neuroimaging changes in brain structure during learning***. Vol 15, 528-536.
- Peter Schneider et al. (2002). ***Morphology of Heschl's gyrus reflects enhanced activation in the auditory cortex of musicians***. Nature neuroscience, Vol 5, 688-694.
- Ana Carolina Rodrigues et al. (2010). ***Musical training, neuroplasticity and cognition***. Dement Neuropsychol, Vol 4, 277-286.
- Thomas F. Münte et al. (2002). ***The musician's brain as a model of neuroplasticity***. Nature neuroscience, Vol 3, 473-478.
- Matthias Bethge i Klaus Pawelzik (2003), ***El lenguaje de las neuronas***. Cuadernos Mente y Cerebro, nº 4, 4-11.
- Juan Lerma (2005), ***Comunicación neuronal***. Cuadernos Mente y Cerebro, nº 4, 12-20.
- Nils Brose i Ludwig Kolb (2011), ***Las sinapsis al detalle***. Cuadernos Mente y Cerebro, nº 4, 21-25.
- Andreas K. Engel et al. (2006), ***Sincronización neuronal***. Cuadernos Mente y Cerebro, nº 4, 26-32.

Pàgina web

- http://www.down21.org/salud/neurobiologia/bases_aprend.htm
Las bases del aprendizaje. Fundación iberoamericana Down 21.

Vídeos

- <http://vimeo.com/74925178>
Carles Alós, ***La armonía de las neuronas***, conferència inaugural de la 8ª escola d'estiu d'educació musical de l'associació de mestres de música de Catalunya (aemcat), juliol 2013, La Seu d'Urgell.
- <http://youtu.be/bjQc0kyuUwQ>
Mi cerebro musical, documental del National Geographic.

11.2. ANNEXOS

Annex 1. Precedents històrics

Annex 2. Fonaments físics i biològics

Annex 3. Documents de l'estudi estadístic

Fitxers Excel amb el processament i el tractament de dades de l'estudi estadístic (suport digital).

- Curs 2010-11.
- Curs 2011-12.
- Curs 2012-13.
- Gràfics per edats.

El poder cerebral de la música

Annexos

MARIA CORRAL FERNÁNDEZ

2n de Batxillerat A
INS Samuel Gili i Gaya
Curs 2013 – 2014

Tutor: Eugenio Salvatierra Domper



ÍNDIX

Annex 1. Precedents històrics	3
Annex 2. Fonaments físics i biològics	9
1. Ones sonores musicals	9
1.1. Classificació del so musical.....	10
1.2. Fenòmens ondulatoris	10
1.3. Interferències	11
1.4. Ones estacionàries i harmònics	12
1.5. Propietats del so musical	14
2. Cervell	15
2.1. Sistema nerviós	16
2.2. Cèl·lules del sistema nerviós	23
2.3. Substància grisa i substància blanca cerebrals	26
2.4. Funcions cerebrals.....	27
2.5. Hemisferis cerebrals.....	27
2.6. Escorça cerebral	29
2.7. Cerebel	33
2.8. Sistema límbic	33
3. Corrent elèctric entre neurones	36
3.1. Camp elèctric.....	36
3.2. Corrent elèctric continu	37
Llei d'Ohm.....	38
Elements principals d'un circuit elèctric.....	39

3.3. Corrent elèctric en el cervell	39
El potencial de repòs i el potencial d'acció	41
La sinapsi.....	47
Transformació dels estímuls en impulsos elèctrics.....	51
Annex 3. Documents de l'estudi estadístic	51

ANNEX 1. PRECEDENTS HISTÒRICS

La música ha estat present en totes les societats humanes des dels inicis de la cultura. Els **grecs** van formular les primeres **bases** racionals i **científiques** de la música. Li donaven una importància vital. La consideraven un element religiós (el déu Apol·lo tocava la lira) i amb poder terapèutic (creien que la malaltia era conseqüència del pecat i utilitzaven el cant per demanar la salut als déus).

Diversos savis de l'època es van interessar per aquest art. **Pitàgores** (580 aC – 495 aC), el més destacat d'aquests, va ser el primer en atribuir-li unes **bases matemàtiques**. Va establir relacions entre els sons musicals i algunes proporcions físiques naturals harmonioses (com el nombre auri) i també amb l'univers (segons ell existia una harmonia universal formada pels sons que generava el moviment dels àtoms). Descrivia la música com la medicina de l'ànima i recomanava dur-la a la pràctica per evitar el mal humor i les preocupacions.

Alcmeó de Crotona (500 aC – 450 aC), d'ideologia pitagòrica, és considerat l'impulsor del pensament naturalista i mèdic. Va descobrir els nervis òptics i va situar el pensament i les sensacions al **cervell**.

Aristòtil (384 aC – 322 aC) també afirmava que la música influïa en l'estat anímic de les persones, però va establir el centre de l'intel·lecte al **cor**. Els seus pensaments el conduïen cap a una concepció de l'ésser humà que atribuïa la seva racionalitat a la gran capacitat del cervell per refredar la sang sobreescalfada pel cor. Considerava que la música tenia diversos beneficis i usos en l'educació i en la purificació i l'estat de repòs dels humans (el que era anomenat **catarsi** emocional).

Plató (427 aC – 347 aC) aconsellava la pràctica musical per combatre l'angoixa, la por i el terror i assolir un estat de **serenitat**. Comparava els efectes de l'exercici físic al cos amb els de la música a la ment.

Hipòcrates (460 aC – 370 aC) és una de les figures més destacades de la història de la medicina. Creia que el cervell exercia el major poder sobre l'home, que totes les sensacions provenien d'aquest òrgan i que a través del mateix l'home adquiria la saviesa i el coneixement.

Galè (130 – 200), seguint la tesis d'Hipòcrates, va proposar el cerebel com a activador dels músculs i el **cervell** com a receptor de les sensacions. També va relacionar els

ventricles cerebrals amb les cavitats del cor i va suggerir els **nervis** com a conductes que transportaven els fluids secretats pel cervell i la medul·la espinal cap a la resta del cos.

Pràcticament fins l'Edat Mitjana, va persistir la creença de l'associació de la música amb la divinitat. Sant Agustí (354 – 430) i Sant Ambròs (340 – 397) encara tenien aquesta convicció i als seus escrits feien referència a la música com la medidora entre Déu, la natura i l'home.

Sant Isidor de Sevilla (556 – 636) va intuir la influència del so en l'home, va atribuir a la música una capacitat de suscitar emocions i va establir una connexió i una harmonia entre tots els ritmes musicals de la vida humana. Al segle XVI va destacar el doctor Ambroise Paré (1509 – 1590), que associava a la música la capacitat de mitigar el dolor en certes malalties on era molt elevat.

Andreas Vesal (1514 – 1564) va aportar molts detalls sobre l'anatomia del cervell. Robert Burton (1577 – 1640) va escriure un tractat en el que recollia els coneixements mèdics de l'època, com ara les modificacions de l'organisme humà després d'haver estat sotmès al so d'un instrument.

Durant el **Renaixement** no va canviar el concepte de localització ventricular de les funcions cerebrals. Segurament la invenció de les màquines hidràuliques va reforçar aquesta teoria, podent sostenir la suposició de que els líquids expulsats des dels ventricles “bombegen” al cos i, per això, els músculs augmenten de mida durant el moviment.

René **Descartes** (1596 – 1650) atribuïa a l'home un intel·lecte i una ànima donada per Déu, que el diferenciava de l'animal. Defensava dues línies de pensament molt influents avui en dia. Per una banda, la filosofia mecanicista, segons la qual coneixent la màquina (el físic: el cos humà i el cervell), es poden conèixer tots els secrets del món i, per l'altra, la problemàtica **ment-cervell**.

El rei Felip V (1683 – 1746) mentre va estar afectat per una malaltia depressiva va sol·licitar els serveis de l'il·lustre cantant d'òpera Farinelli (1705 – 1782). Sembla ser que aquesta peculiar cura va contribuir a la seva millora.

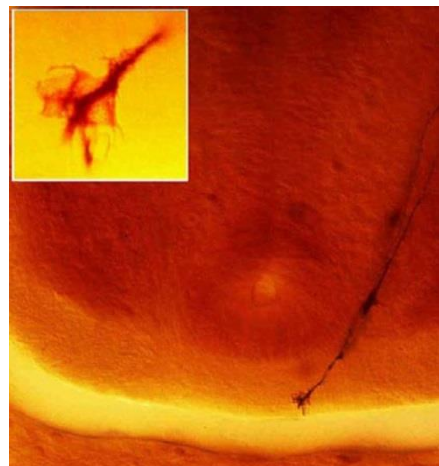
Les variacions de *Goldberg*, composades per Johann Sebastian Bach (1685 – 1750) com a encàrrec del comte Kaiserling per evitar nits d'insomni, són usades actualment per calmar i asserenar els cossos i les ments.

Al **segle XIX** es van iniciar investigacions científiques sobre l'aplicació de la **música** al **tractament** de **malalties mentals**. També es va estudiar la seva influència en les emocions i els seus **efectes fisiològics** com a respostes en el ritme cardíac, la circulació sanguínia i la respiració. Com a conclusió es va extreure que determinades seqüències musicals modifiquen les constants corporals i alleugen certs dolors, induint a estats de relaxació.

Al **segle XX** es va observar en els ferits de les guerres mundials que la música, a més de ser una distracció i d'augmentar els ànims dels soldats ferits, influïa positivament en els casos de depressió i reduïa la sensació de dolor.

El que avui es coneix amb el nom de **neurociència** és la ciència de caràcter interdisciplinari que estudia l'estructura i la funció del sistema nerviós. Actualment, està en un procés inicial de revolució i puixança molt important. En aquesta ciència moderna convergeixen els coneixements de l'anatomia, l'embriologia, la fisiologia, la bioquímica, la farmacologia, la psicologia, la neurologia i, encara en una fase inicial, la computació i la bioenginyeria.

L'**anatomia** del sistema nerviós va experimentar un notable progrés gràcies al desenvolupament del microscopi i de les tècniques de fixació i de tinció dels teixits. Utilitzant aquests procediments, Santiago **Ramón i Cajal** (1852 – 1934) va formular la doctrina neuronal que anunciava que el sistema nerviós està format per **neurones**, cèl·lules independents que contacten entre si en llocs específics. Va resoldre la morfologia cel·lular de les cèl·lules nervioses, va descriure els tipus de neurones, les seves connexions i la distribució i l'organització de les estructures cerebrals, va descobrir el con de creixement, va predir la direcció del flux d'informació (de les dendrites i el soma cap a l'axó).



Preparació per a microscopi òptic original de Ramón i Cajal d'un tall histològic de la medul·la espinal d'un embrió de pollastre tenyit amb el mètode de Golgi. En l'ampliació s'observa una prolongació axònica que acaba en un con de creixement.

La doctrina neuronal va ser confirmada des d'altres camps experimentals. L'embrióleg Ross Harrison (1870 – 1959) va demostrar que les prolongacions de les neurones, les dendrites i l'axó estan en continuïtat amb el cos neuronal i es desenvolupen a partir d'ell.

La **neurofisiologia**, també fonamental per a l'estudi de la funció neuronal, deu el seu origen al descobriment fet per Luigi **Galvani** (1737 – 1798) a finals del segle XVIII de la producció d'**electricitat** per part de les **cèl·lules musculars**. Al segle XIX van succeir una sèrie de troballes que van fer evolucionar aquesta ciència. Emil Dubois-Reymond (1818 – 1896) , Johannes Müller (1801 – 1858) i Hermann von Helmholtz (1821 – 1894) van desenvolupar els fonaments de l'**electrofisiologia**. Von Helmholtz va descobrir que l'**activitat elèctrica** de les **cèl·lules nervioses** és la forma de transmissió d'informació entre cèl·lules. Charles Bell (1774 – 1842) i François Magendie (1783 – 1855) van estudiar els **senyals elèctrics** entre el **sistema nerviós** i la resta de l'organisme. Per últim, Charles Scott Sherrington (1857 – 1952) va atribuir el nom de **sinapsi** al contacte entre neurones que va determinar Santiago Ramón i Cajal.

A finals del segle XIX, Claude Bernard (1813 – 1878) , Paul Ehrlich (1854 – 1915) i John Langley (1852 – 1925) van demostrar que els fàrmacs interaccionen amb receptors específics de les cèl·lules. Això va suposar l'inici de l'estudi modern de la sinapsi i de la **neurofarmacologia** actual.

Als anys setanta del segle passat, la **bioquímica** va oferir unes aportacions crucials a la neurologia. Homykiewicz va documentar la primera correlació fisiopatològica entre la deficiència d'un neurotransmissor i la presència d'un trastorn neurològic. Va arribar a aquesta conclusió després d'observar una disminució de dopamina al cervell de malalts de Parkinson. Juntament amb Mirkmayer va dissenyar un remei terapèutic farmacològic utilitzat encara avui dia que consisteix en l'administració de L-Dopa, un precursor de la dopamina.

A la segona meitat del mateix segle, la **psicologia** va dur a terme els seus primers estudis científics sobre la conducta de la ment i el comportament humà. Charles Darwin (1809 – 1882), al segle anterior, amb la teoria de l'evolució de les espècies, ja va iniciar un camí cap a la psicologia experimental, estudi de la conducta al laboratori, i l'etologia, estudi de la conducta al medi natural. Les observacions que va realitzar

indiquen que es pot relacionar la **conducta** i el **sistema nerviós** dels animals amb els de les persones.

Una qüestió fonamental plantejada en aquest segle va ser la **localització** de les **funcions al cervell**. Franz Joseph **Gall** (1758 – 1828) tenia una concepció materialista de la ment i va proposar una base biològica i cerebral de les seves funcions. Va postular que el **cervell** no era un únic òrgan, sinó que estava format per, com a mínim, 35 **centres** i cadascun d'ells el relacionava amb una funció mental. Aquests centres com més funcionessin, més es desenvoluparien i augmentarien de mida. El creixement dels centres originaria uns petits relleus al crani que revelarien la personalitat de la persona.

Hughlings Jackson (1835 – 1911) va donar suport al concepte de l'existència al cervell de centres especialitzats en determinades funcions. Va deduir que a l'escorça cerebral es localitzava una regió motora. Seguint amb aquesta línia d'investigació, Gustav Fritsch (1838 – 1927) i Eduard Hitzig (1839 – 1907) van demostrar experimentalment que l'estimulació elèctrica d'una regió cerebral del gos provocava moviments de les extremitats.

Korbinian **Brodmann** (1868 – 1918) va descriure 52 àrees de l'**escorça cerebral humana** i va suggerir que cadascuna d'elles tenia una funció específica.

Karl **Lashley** (1890 – 1958) va denominar una concepció unitària de la funció cerebral. Amb els resultats que va obtenir de les seves experimentacions, va poder concloure que l'**aprenentatge** i altres funcions mentals **no** tenen una **localització específica** al cervell i, per tant, no es poden associar a determinats grups neuronals o regions de l'escorça cerebral. Avui dia aquesta hipòtesi està superada perquè s'ha demostrat que un processament sensorial pot ser compensat per altres funcions sensorials quan la regió cortical implicada no funciona correctament.

Un altre aspecte que investiguen els neurocientífics és el **llenguatge** com una **funció cognitiva** específicament humana. Pierre Paul **Broca** (1824 – 1880), a partir del cas d'un pacient que podia entendre el llenguatge però no parlava, va afirmar que la capacitat del llenguatge se situa a l'**hemisferi cerebral esquerre**.

Karl **Wernicke** (1848 – 1905) va proposar una nova teoria de la funció cerebral, el connectivisme, segons la qual les **funcions mentals** més elementals, com les activitats motores o perceptives senzilles, tenen una localització en una única àrea cerebral i les

més complexes són possibles gràcies a les **connexions** entre **diverses àrees**. Així doncs, diferents aspectes d'una mateixa funció són processats en diferents llocs del cervell. Després d'haver vist l'evolució de la neurociència al llarg de les diferents èpoques històriques, es pot classificar com un camp d'investigació recent amb molt camí per recórrer. Sembla augurar un futur molt prometedor que, molt probablement, obrirà moltes portes del coneixement de l'home que permetran progressos en molts altres àmbits.

ANNEX 2. FONAMENTS FÍSICS I BIOLÒGICS

En els següents apartats es pretén exposar els coneixements bàsics i necessaris per poder entendre a nivell cerebral l'estimulació musical i l'aprenentatge, els dos aspectes que es relacionen al cos del treball per resoldre la hipòtesi plantejada.

1. ONES SONORES MUSICALS

Les modificacions de les estructures cerebrals que provoquen l'estudi i la pràctica de la música s'inicien amb l'efecte fisiològic de les ones sonores musicals sobre el sistema auditiu.

Una **ona sonora** és la propagació de la pertorbació originada per la variació de la pressió de l'aire. Es transmet energia i quantitat de moviment (producte entre la massa i la velocitat), però no es produceix un transport net de matèria. Per tant, podem dir que són *viatgeres*.

Les ones sonores que estimulen el desenvolupament del cervell són les **harmòniques**. La seva pertorbació és originada per un oscil·lador harmònic, un sistema físic material que verifica el corresponent moviment vibratori harmònic simple.

Les ones harmòniques presenten una sèrie de característiques. Algunes d'elles són importants per a l'estudi musical perquè estan relacionades amb les propietats del so:

- L'**amplitud** (A): valor màxim de la distància de les partícules del medi a la posició d'equilibri. Es mesura en metres (m), segons el Sistema Internacional (SI).
- La **frequència** (f): número de polsos (oscil·lacions completes) transmesos per l'ona per unitat de temps. Es mesura en Hertz (Hz = oscil·lacions/segon), segons el SI.
- La **longitud** d'ona (λ): distància entre dos fronts d'ona (conjunt de punts que posseeixen les mateixes característiques de vibració) consecutius o espai que recorre un front d'ona en un període de temps. Es mesura en metres, segons el SI.

1.1. CLASSIFICACIÓ DEL SO MUSICAL

Tenint en compte els diferents criteris de classificació de les ones, el so és una **ona**:

- **Mecànica**, necessita un medi material per a transmetre's.
- **Longitudinal**, la seva direcció de vibració coincideix amb la direcció de propagació. La velocitat de propagació sempre és constant i la imposa el medi transmissor. La velocitat de vibració és variable i l'origina l'oscil·lador harmònic.
- **Tridimensional**, es propaga en tres dimensions.

1.2. FENÒMENS ONDULATORIS

Com tota ona, el so pot **evitar** i bordejar **obstacles** verificant el fenomen ondulatori de la **difracció**. Quan una ona topa amb un orifici o un obstacle de dimensions comparables a la seva longitud d'ona, s'origina una ona circular de la mateixa freqüència i període (magnitud inversa a la freqüència).

La **reflexió** és un altre fenomen ondulatori important per a l'**acústica** del so. Es produeix a la sala on s'escolta la música, al pavelló auricular i a la cavitat cranial. Quan una ona incideix sobre el límit de separació entre dos medis diferents (l'aire i la paret o la superfície de l'orella o el crani), els fronts d'ona experimenten un canvi de direcció. La forma del pavelló auricular i les seves irregularitats afavoreixen la concentració de rajos incidents de les ones sonores al timpà, l'estructura biològica que inicia el procés d'audició.

Quan una ona **canvia** de **medi** (travessa la superfície de separació entre ells), la seva **velocitat i direcció de propagació varien**. D'aquesta manera té lloc l'anomenada **refracció** quan el so passa de l'aire al teixit cartilaginós de l'orella i, a continuació, al fluid intern de l'oïda. Com que és una ona mecànica, es propaga millor com més compacte sigui el medi material transmissor. Per tant, la velocitat de propagació de les ones sonores musicals augmenta quan passa de l'aire al cartílag i disminueix quan entra al fluid intern de l'oïda.

$$(v_{\text{propagació}})_{\text{aire}} \lll (v_{\text{propagació}})_{\text{cartílag de l'orella}} > (v_{\text{propagació}})_{\text{fluid de l'oïda}}$$

1.3. INTERFERÈNCIES

És habitual que dos o més ones se superposin, originant **interferències**.

Els **instruments** musicals generen **sèries harmòniques** (un so fonamental i els seus harmònics), és a dir, diverses ones (harmònics) superposades a l'ona principal (so fonamental). Per tant, la música instrumental i vocal és una seqüència d'interferències **constructives**, la suma d'ones de diferents freqüències.

L'anàlisi de les posicions de màxim i mínim de l'ona resultant d'una interferència indica on es produeixen interferències constructives i destructives, respectivament. Es consideren dos focus coherents (amb el mateix període, freqüència i longitud d'ona) i se sap que, d'acord amb la construcció de Fresnel, l'amplitud de l'ona resultant (A_R) ve donada per l'equació escrita a continuació:

$$A_R = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cdot \cos\Delta\varphi}$$

A_1 i A_2 : amplituds de les dues ones que interfereixen

$\Delta\varphi$: diferència de fase (estat de vibració de les partícules del medi en un determinat instant) entre les dues ones que interfereixen

En les **interferències constructives**, l'amplitud de l'ona resultant és la màxima, és a dir, la suma de les amplituds de les dues ones que interfereixen. Això es produeix en els punts del medi que estan separats dels focus productors de les ones que interfereixen un número enter de longituds d'ona.

$$A_R = (A_R)_{\text{màxima}} \Leftrightarrow \boxed{\cos \Delta\varphi = 1} \Rightarrow \Delta\varphi = 2k\pi \Rightarrow (\Delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta x}{\lambda}) \Rightarrow 2k\pi = 2\pi \frac{\Delta x}{\lambda} \Rightarrow \Delta x = k\lambda$$

$$(A_R)_{\text{màxima}} = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cdot \boxed{\cos\Delta\varphi}} = \sqrt{(A_1 + A_2)^2} = A_1 + A_2$$

En les **interferències destructives**, l'amplitud de l'ona resultant és la mínima, és a dir, la resta de les amplituds de les dues ones que interfereixen. Això es produeix en els punts del medi que estan separats dels focus productors de les ones que interfereixen un número imparell de semilongituds d'ona.

$$A_R = (A_R)_{\text{mínima}} \Leftrightarrow \boxed{\cos \Delta\varphi = -1} \Rightarrow \Delta\varphi = (2k\pm 1)\pi \Rightarrow (2k\pm 1)\pi = 2\pi \frac{\Delta x}{\lambda} \Rightarrow \Delta x = (2k\pm 1) \frac{\lambda}{2}$$

$$(A_R)_{\text{mínima}} = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cdot \boxed{\cos\Delta\varphi}} = \sqrt{(A_1 - A_2)^2} = A_1 - A_2$$

Existeix la possibilitat que com a resultat de dues o més ones sonores es produeixi el silenci, però és molt remota. Si els focus sonors emetessin ones harmòniques d'una única freqüència, la seva suma en un punt determinat podria ser nul·la i es tractaria d'una interferència destructiva. Només es podria produir si les ones fossin emeses per diapasons perquè emeten vibracions pràcticament pures.

1.4. ONES ESTACIONÀRIES I HARMÒNICS

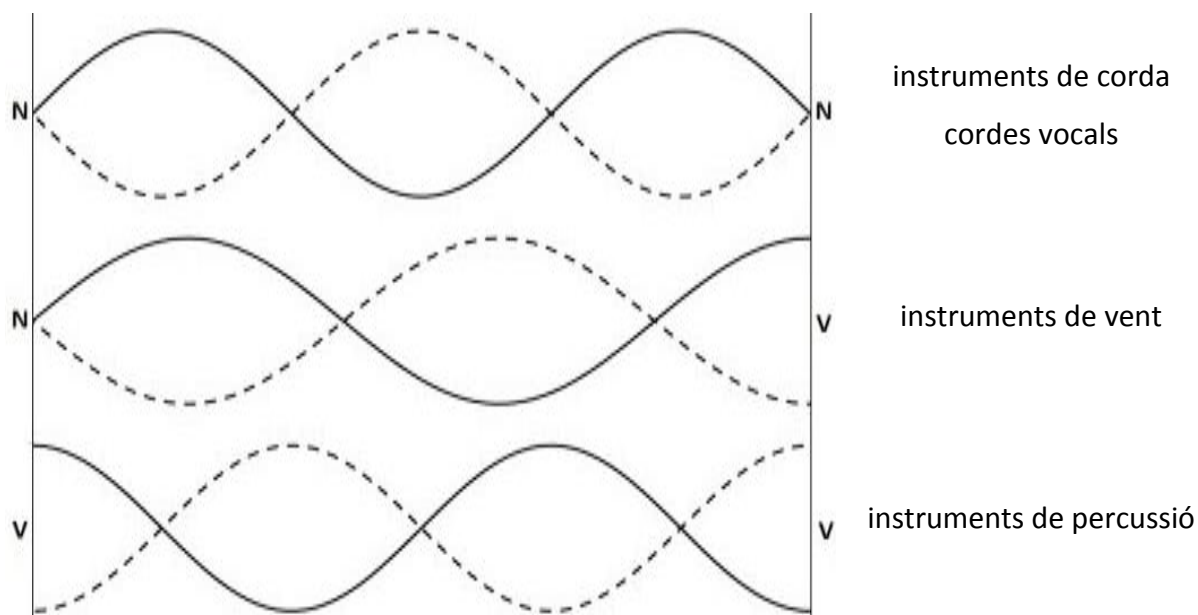
Quan les interferències es produeixen entre dues ones idèntiques que es propaguen en sentits contraris, les **ones** resultants són **estacionàries**. O, el que és el mateix, l'ona reflectida està en oposició de fase (desfase de π radians) de la incident. Reben aquest nom perquè l'energia resta confinada dins l'estructura del medi on es produeixen.

Una ona es pot representar gràficament per una funció sinusoidal. Aquesta funció és periòdica i té infinits màxims i mínims relatius, anomenats en una ona ventres i nodes. Els primers es corresponen amb els punts d'amplitud màxima d'una ona i els segons amb els d'amplitud nul·la.

Els extrems de les ones sonores generades pels instruments són diferents en cada família instrumental (corda, vent i percussió).

- El so en els **instruments** de **corda** (tan fregada com percutida) i en les **cordes vocals** es transmet per una corda amb els **dos extrems fixos**.
- El so en els **instruments** de **vent** es transmet per un tub amb **un extrem** que es pot considerar **tancat** (l'embocadura) i **un extrem obert** (la campana).
- El so en els **instruments** de **percussió** es transmet entre **dos extrems oberts**.





Representació gràfica de les ones sonores musicals generades pels instruments de les diferents famílies i per les cordes vocals.

N: node V: ventre — ≡ ona incident - - ≡ ona reflectida

Els **harmònics** són els modes de vibració corresponents a una ona estacionària generats en una determinada estructura. El grau de cada harmònic es correspon al nombre de mitges longituds d'ona de l'ona estacionària.

HARMÒNIC			
Primer o fonamental	$L = \frac{\lambda}{2}$	$\lambda = 2L$	
Segon	$L = 2\frac{\lambda}{2} = \lambda$	$\lambda = L$	
Tercer	$L = 3\frac{\lambda}{2} = \frac{3}{2}\lambda$	$\lambda = \frac{2}{3}L$	
Quart	$L = 4\frac{\lambda}{2} = 2\lambda$	$\lambda = \frac{L}{2}$	
Cinquè	$L = 5\frac{\lambda}{2} = \frac{5}{2}\lambda$	$\lambda = \frac{2}{5}L$	
Sisè	$L = 6\frac{\lambda}{2} = 3\lambda$	$\lambda = \frac{L}{3}$	

La **freqüència fonamental** és la freqüència **més baixa** i els harmònics són les seves freqüències múltiples. Aquesta freqüència es pot calcular de la següent manera:

$$f = \frac{v_{\text{propagació}}}{\lambda} = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \cdot \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{n \cdot L} \cdot \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

L: longitud de la corda d'un instrument de corda, de les cordes vocals, del tub d'un instrument de vent o de l'estructura de ressonància d'un instrument de percussió

T: tensió de la corda

μ : massa per unitat de longitud

S'observa que com **més longitud** tingui la corda d'un instrument de corda, el tub d'un instrument de vent o les cordes vocals, l'harmònic generat serà de **menys freqüència** i, per tant, el so **més greu**. De la mateixa manera, un instrument de menys longitud produirà un harmònic de més freqüència, és a dir, un so més agut. Així doncs, la construcció física de l'instrument limita o caracteritza el rang de freqüències que pot originar.

1.5. PROPIETATS DEL SO MUSICAL

Les propietats més importants del so musical són:

- La **intensitat**, determinada per l'amplitud de l'ona. Com més elevada és l'amplitud, major és la intensitat del so. Els humans percebem sons compresos entre les intensitats sonores de 10^{-12} W/m² i 1 W/m². Aquestes intensitats produeixen una sensació sonora (efecte fisiològic) sobre els éssers vius d'entre 0 i 120 decibels. Una intensitat de 120 decibels correspon al llindar dolorós per a l'oïda.
- El **to**, determinat per la freqüència de l'ona. L'espècie humana pot percebre i distingir freqüències compreses entre 16 i 20.000 Hz. Com més elevada és la freqüència d'un so, més agut és.
- El **timbre**, la qualitat que permet diferenciar sons de la mateixa intensitat del mateix to. El so fonamental d'una sèrie harmònica dona el to i els seus harmònics donen el timbre de la nota.

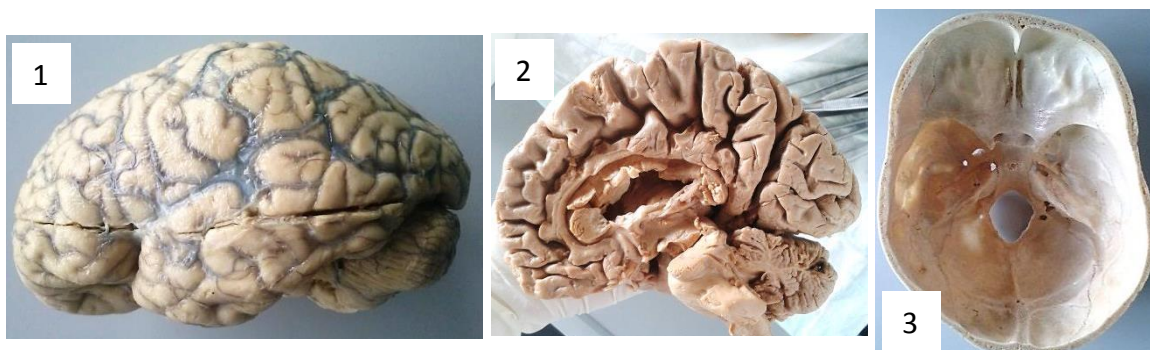
2. CERVELL

El cervell és segurament l'òrgan més important del nostre organisme i també és alhora el més desconegut.

Recordant les paraules del físic i matemàtic Isaac Newton, podem dir que “el que sabem és una gota d'aigua; el que ignorem és l'oceà”. Aquesta màxima es pot concretar, per exemple, fent referència als secrets del cervell.

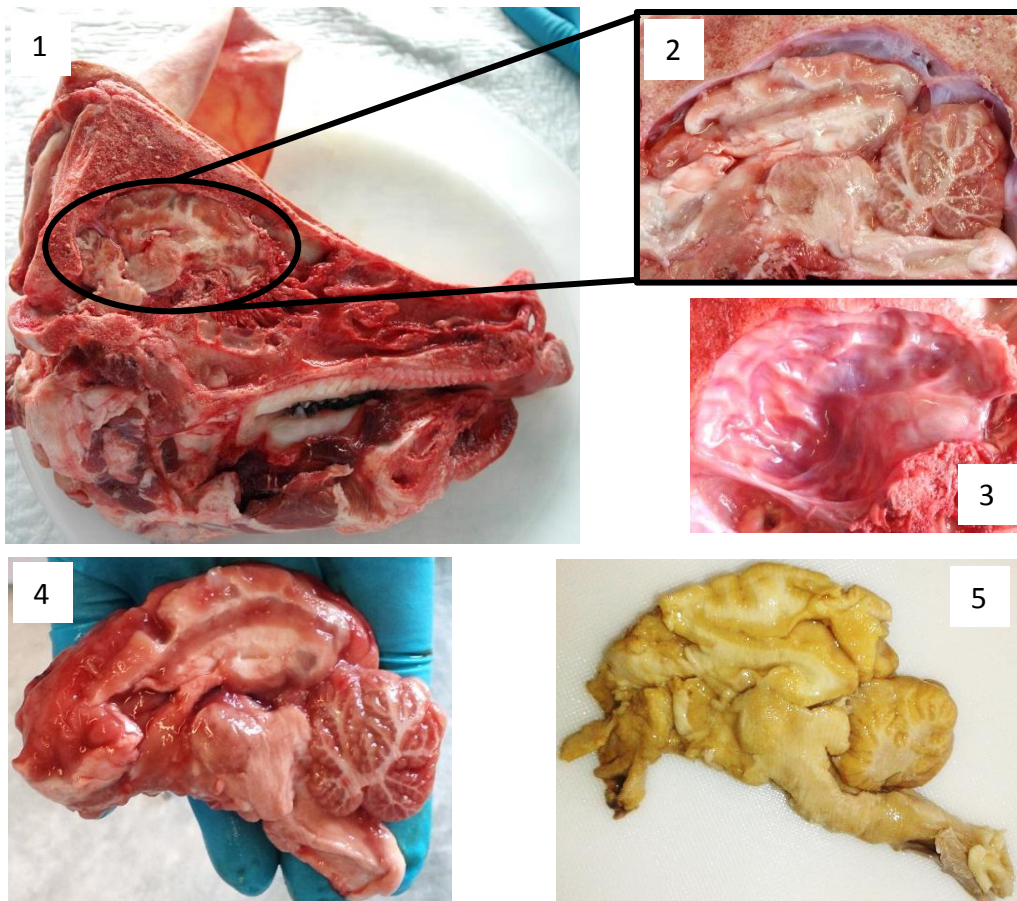
Es pot fer un símil entre aquest òrgan i l'univers. Es calcula que el nombre de neurones del cervell és semblant al d'estrelles de la Via Làctia. Encara que no es coneguin amb exactitud cap de les dues xifres, és evident la gran magnitud i desconeixement dels dos. En el cas del cervell, el misteri resideix en com els potencials elèctrics entre neurones es converteixen en percepcions. És per això que la neurociència té com a repte investigar la formació de l'experiència subjectiva a partir dels diferents processos cerebrals.

Si entenem el nostre cervell possiblement arribarem a entendre'ns millor com a espècie i a saber perquè ens comportem d'una manera o d'una altra. Conèixer com funciona aquest misteriós òrgan ens ajudarà a entendre d'on venim i, possiblement, cap on anem. Ara per ara sembla una utopia, però cada petit descobriment que fem serà un gran avenç social i personal.



Perspectives laterals d'un cervell humà dissecat (1) i d'un endurit per l'acció del formaldehid (2) i cavitat cranial (3) on està situat.

Font: curs d'anatomia de l'ISC (International Science Camp) a l'XLab.



1. Cap d'un porc 2. Encèfal a la cavitat cranial 3. Cavitat cranial
4. Encèfal extret de la cavitat cranial 5. Encèfal més endurit per l'acció del formaldehid

Font: curs d'anatomia de l'ISC a l'XLab.

2.1. SISTEMA NERVIÓS

El sistema nerviós és el conjunt d'òrgans i estructures similars de l'organisme que s'encarreguen de la seva relació amb l'entorn: percepció d'estímuls i resposta (conscient o inconscient) adequada.

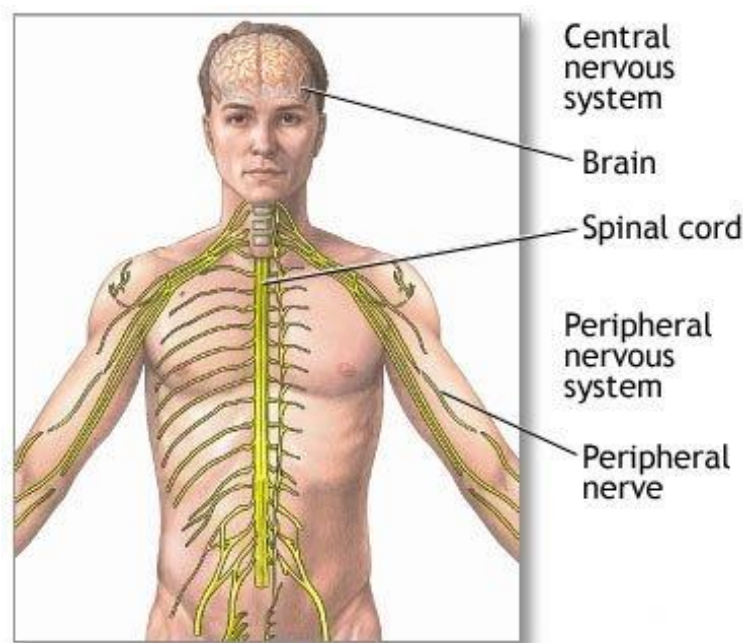
Té tres **funcions bàsiques**:

- La funció **sensitiva**: capta estímuls interns, que provenen del medi intern de l'organisme, i externs, que provenen del medi extern de l'organisme.
- La funció **integradora**: analitza els estímuls captats i emmagatzema alguns dels seus aspectes.
- La funció **motora**: respon als estímuls iniciant contraccions musculars o secrecions glandulars.

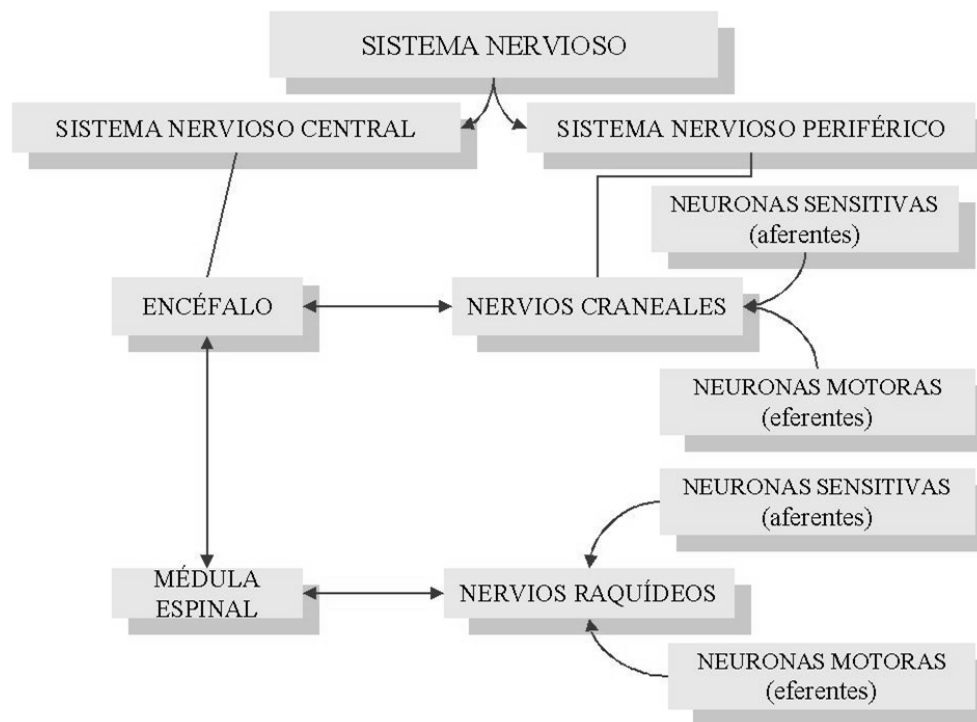
Funcionalment es pot distingir el sistema nerviós de relació, l'autònom i el reticular, que actuen coordinadament, no independentment. El primer pot exercir cert grau de control sobre el segon, alterant el seu normal funcionament.

- * **Sistema nerviós de relació.** Posa en relació l'organisme amb el món exterior. Gràcies a ell s'executen accions i es perceben les sensacions de l'entorn. Pot ser conscient o inconscient (reflexos). Pot estar connectat o desconnectat depenent de les necessitats de l'individu.
- * **Sistema nerviós vegetatiu o autònom.** Manté inconscientment les funcions vitals de l'organisme (respiració, secreció sudorípara...). Es manté sempre en funcionament, en major o menor intensitat.
 - Simpàtic: control catabòlic (reaccions de degradació).
 - Parasimpàtic: control anabòlic (reaccions de síntesi).
 - Entèric: control del sistema gastrointestinal.
- * **Sistema reticular.** Regula (activa, desactiva o varia els nivells de funcionament) el sistema nerviós de relació.

Tenint en compte la localització dels elements del sistema nerviós es diferencia:



Sistema nerviós humà.



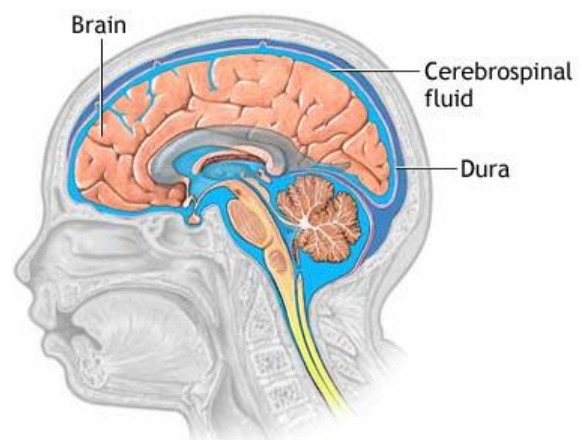
- * **Sistema nerviós central (SNC):** elements que regeixen les respostes als diferents estímuls (integra i relaciona la informació sensitiva aferent, la que arriba des de l'exterior a través dels òrgans sensitius); generen els pensaments i les emocions; i originen la majoria dels impulsos nerviosos que estimulen la contracció muscular i les secrecions glandulars.

Està connectat amb els receptors sensitius, els músculs i les glàndules de les zones perifèriques de l'organisme a través del SNP.

Les estructures biològiques que el formen presenten unes cavitats comunicades entre si, que a nivell encefàlic estan més desenvolupades, formant quatre cavitats comunicades anomenades **ventricles**.

Aquestes estructures estan cobertes pel **líquid cefaloraquídi** (LCR), un fluid incolor que:

- Ocupa uns 120 – 140 mil·límetres i es renova uns cinc cops cada 24 hores.
- Proporciona una protecció i un esmorteïment mecànics en possibles traumatismes cranials.

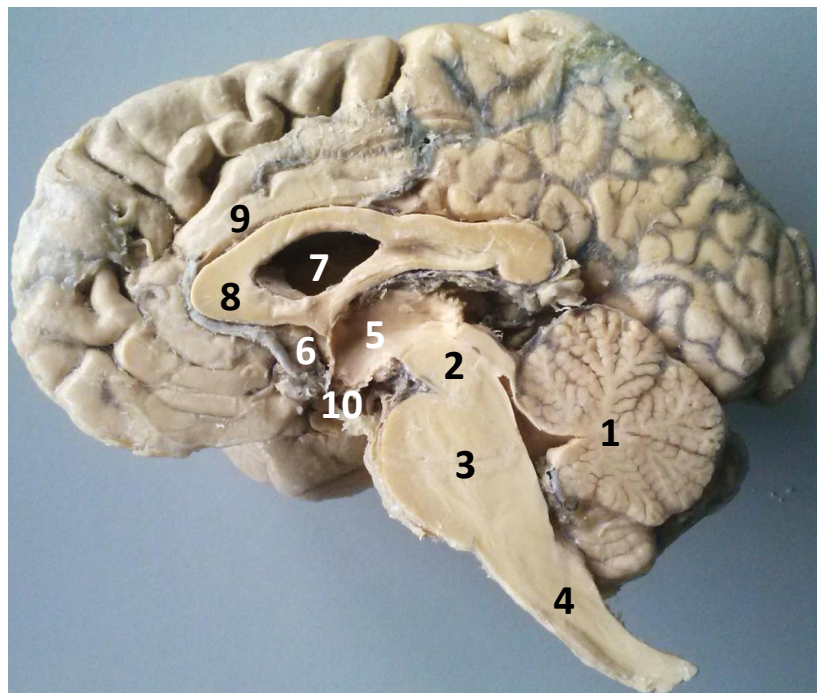


Distribució del LCR (color blau fluix)
per les cavitats encefàliques.

- Compensa els canvis de volum i de pressió de la sang intracranial.
- Funciona com a termoregulator.
- En menor mesura, transporta nutrients (glucosa, proteïnes, sals, elements com sodi, clor, potassi i calci i un petit nombre de limfòcits) i depura productes del metabolisme neuronal.

Està format per:

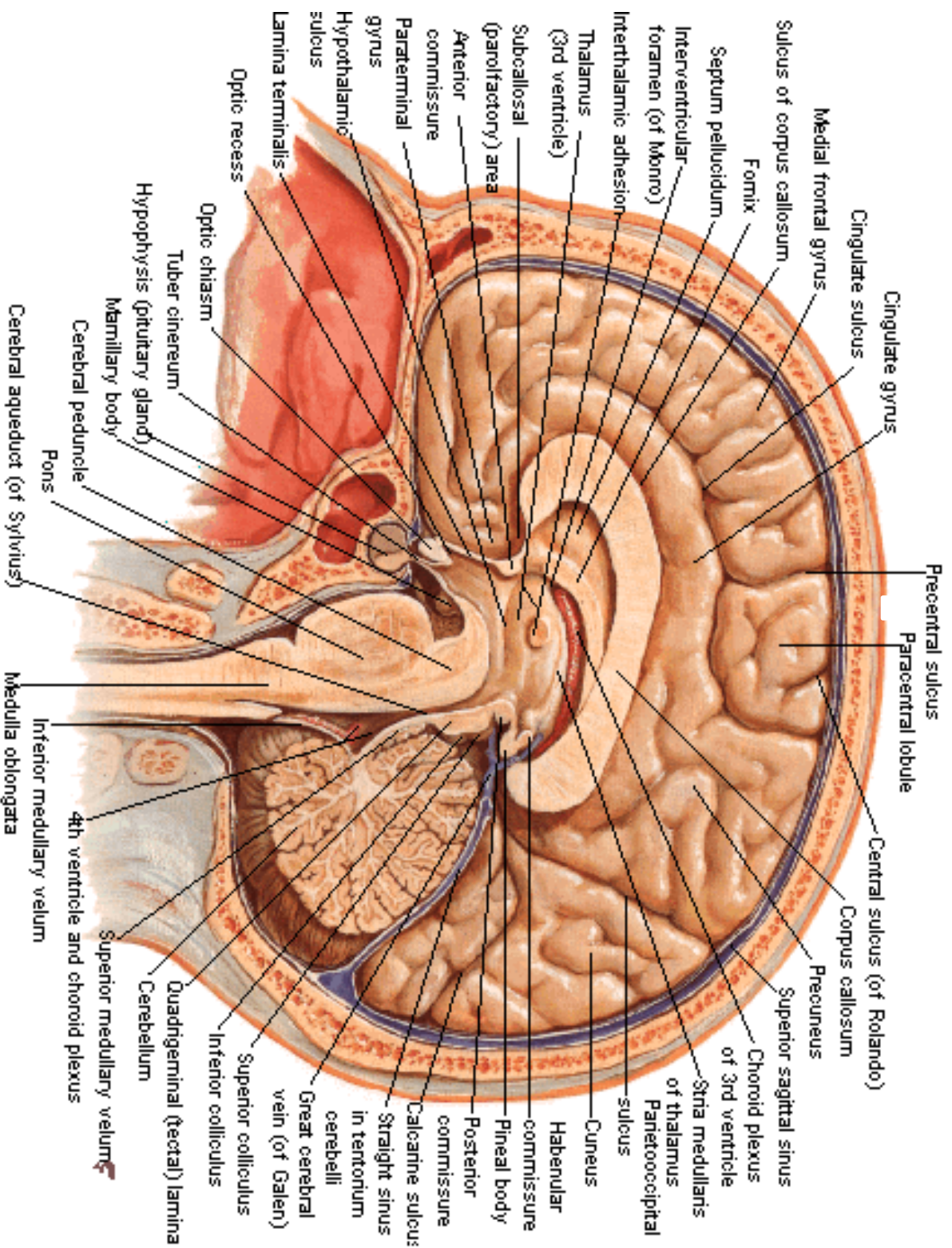
- L'**encèfal**. Regula les principals funcions vitals de l'organisme. Situat a la cavitat cranial.
 - Cervell.
 - Tronc encefàlic. Format pel mesencèfal (part superior), el pont (part mitjana) i el bulb raquidi (part inferior que uneix amb la medul·la espinal).
 - Cerebel·l. Situat al costat del pont i el bulb raquidi i a sota del cervell.
- La **medul·la espinal**. Situada al conducte raquidi de la columna vertebral. Formada pel conjunt de fibres nervioses que sorgeixen (o es dirigeixen) a l'encèfal i es dirigeixen (o sorgeixen) a les zones d'acció i percepció.



Tall sagital d'un encèfal humà dissecat on es diferencien les parts del SNC.

(1) Cerebel·l	Tronc encefàlic	Cervell
	(2) Mesencèfal	(5) Tàlem
	(3) Pons	(6) Ganglis basals
	(4) Bulb raquidi	(7) Ventricle cerebral
		(8) Cos callós
		(9) Sistema límbic
		(10) Glàndula pituïtària

Font: curs d'anatomia de l'ISC a l'XLab.



Tall sagital d'un encèfal humà on es diferencien les parts detallades del SNC.

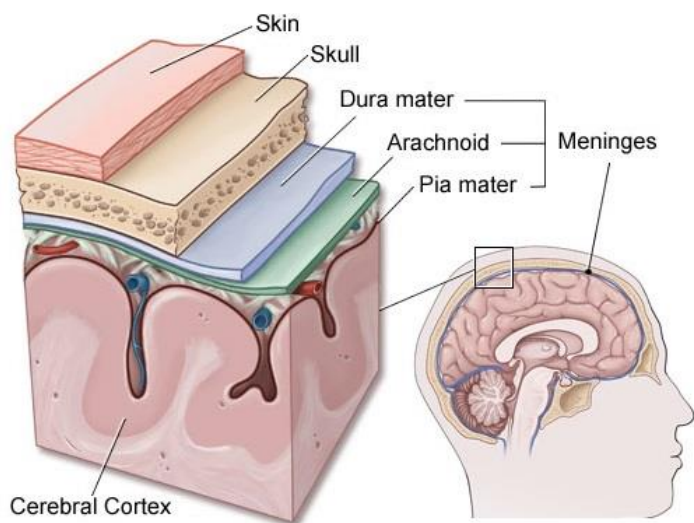
El SNC està recobert per les **meninges**, tres membranes contigües que protegeixen i aïllen el sistema nerviós de l'exterior:

- **Duramàter:** capa externa, gruixuda, forta i fibrosa que conté uns sis venosos pels que circula la sang.
- **Aracnoide:** capa mitjana, prima, delicada i laxa, que conté els vasos de l'encèfal i està comunicada amb el IV ventricle per permetre la circulació del LCR des dels ventricles (on es forma) cap a la superfície del SNC.
- **Piamàter:** capa interna, fina i vascular amb forma adaptada a la superfície del SNC.



Duramàter de l'encèfal d'un porc.

Font: curs d'anatomia de l'ISC a l'XLab.



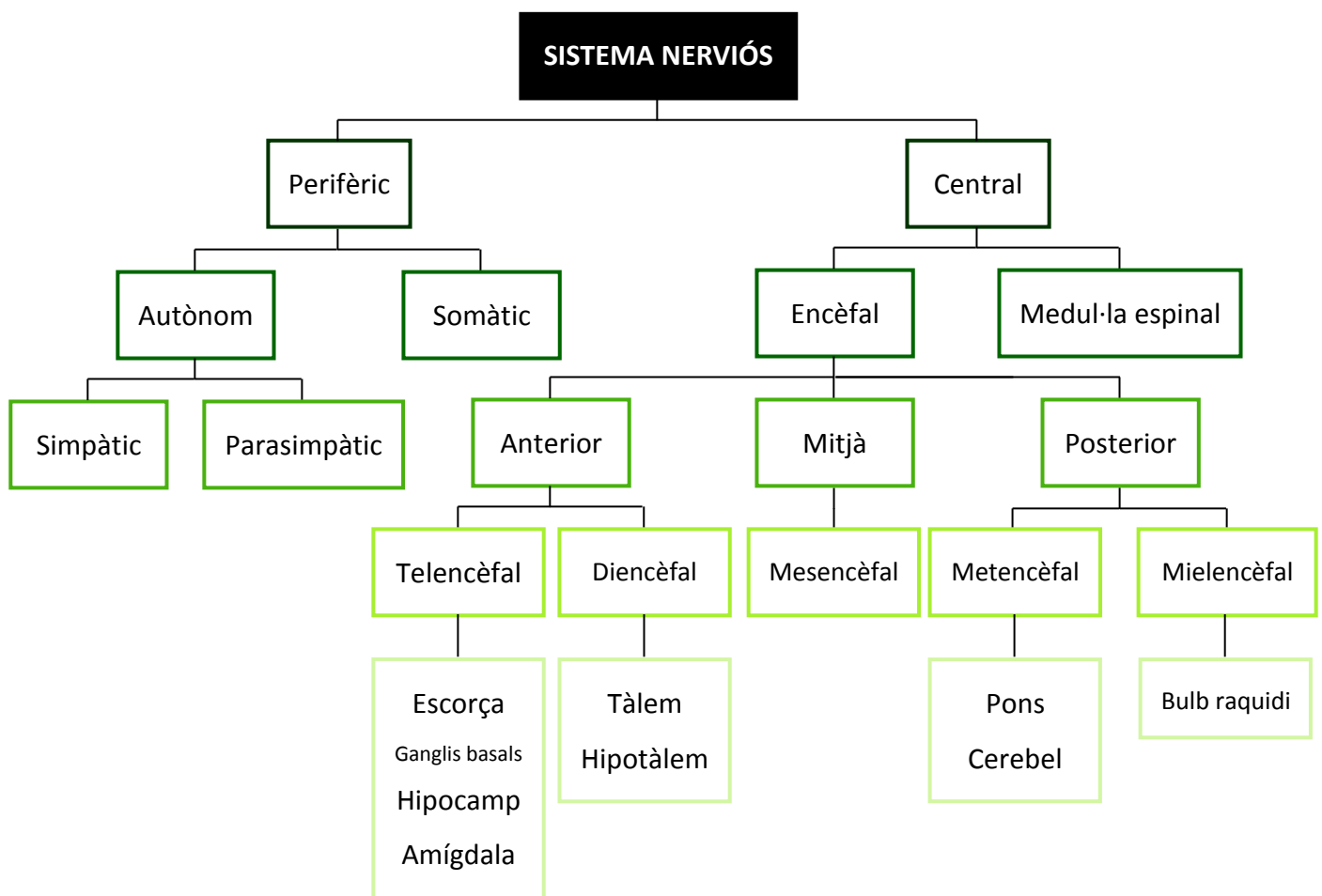
Tall transversal de la superfície del SNC.

* **Sistema nerviós perifèric (SNP):** elements originats al SNC i dirigits cap als efectors i receptors perifèrics que recullen estímuls del sistema central de relació i de l'autònom i emeten respostes. Està format per:

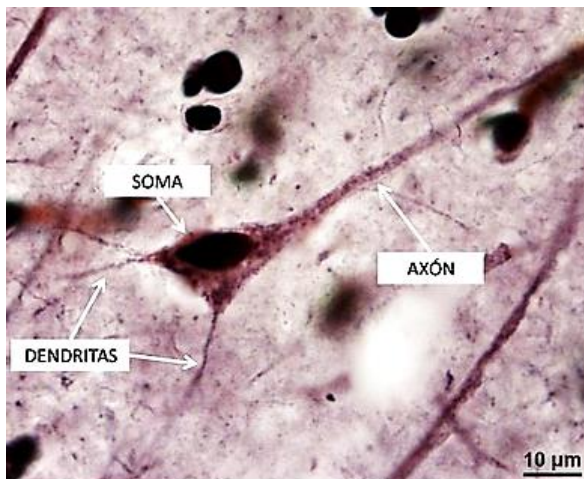
- Ganglis nerviosos: zones de connexió entre fibres nervioses i neurones perifèriques on es produeix un intercanvi d'informació. Es diferencien els ganglis espinals, els simpàtics i els parasimpàtics.
- Plexes nerviosos: zones de creuament de fibres nervioses perifèriques d'una regió específica que s'organitzen ordenadament formant estructures anatòmiques rellevants.
- Nervis perifèrics: agrupació de diferents axons que es dirigeixen ordenadament cap a una regió específica. Es distingeixen els nervis espinals o raquidis originats a la medul·la espinal i els cranials originats a l'encèfal.

Es diferencia:

- El SNP **somàtic**: conjunt de nervis relacionats amb els músculs de contracció voluntària i que estan controlats per l'escorça cerebral.
- El SNP **autònom**: conjunt de nervis relacionats amb respostes automàtiques i involuntàries i que són relativament independents del control de l'escorça cerebral. Té dos components que actuen oposadament:
 - El SNP autònom simpàtic, que prepara el cos per a la resposta davant de situacions d'alarma. Per exemple, accelera el ritme cardíac, augmenta la pressió arterial, dilata les pupil·les, relaxa la musculatura intestinal...
 - El SNP autònom parasimpàtic, que intervé en funcions restauradores del cos. Per exemple, redueix el ritme cardíac, disminueix la pressió arterial, incrementa els moviments de la paret intestinal, augmenta la secreció de les glàndules digestives...



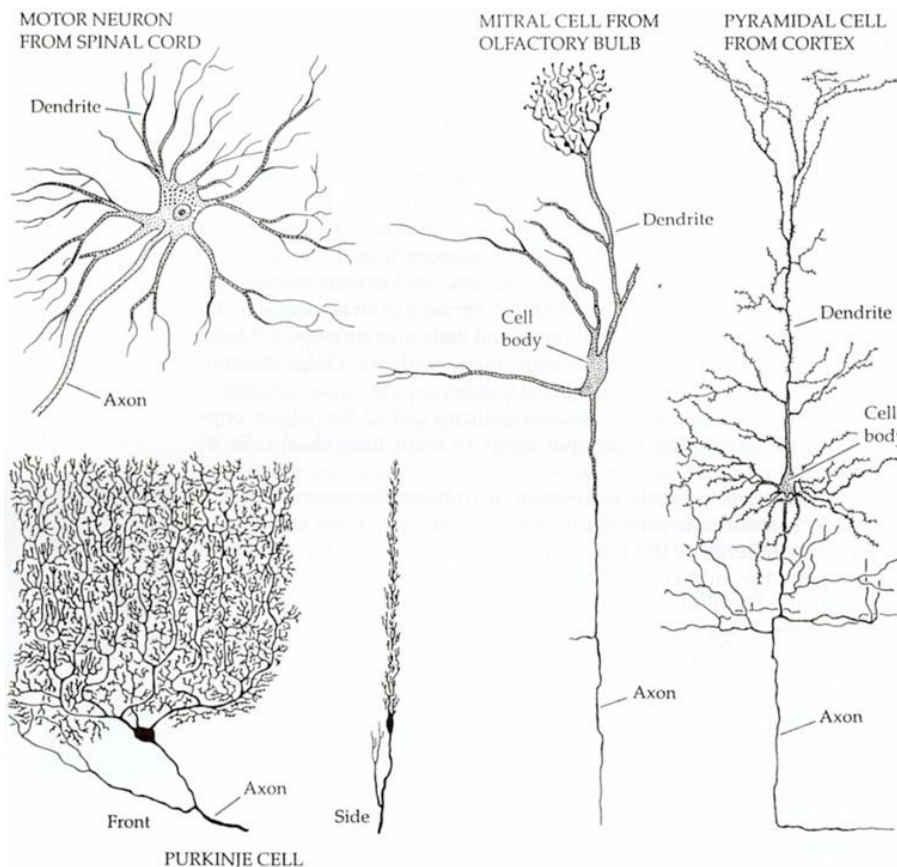
2.2. CÈL·LULES DEL SISTEMA NERVIÓS



Visualització d'una neurona al teixit neuronal.

accions i percepcions. Constitueixen la **xarxa o teixit neuronal**. A diferència de les altres cèl·lules de l'organisme, no es divideixen ni es reproduïxen. L'ésser humà neix amb una quantitat determinada de neurones que no poden duplicar-se però que són **molt plàstiques**. Al nostre encèfal n'hi ha entre 10.000 i 100.000 milions unides per unes 3.000 connexions cada una. La suma de totes aquestes zones de connexió és d'uns 25.000 m², l'equivalent a quatre camps de futbol. Amb els mitjans actuals, resulta impossible cartografiar el mapa neuronal humà. Es trigaria un milió d'anys en descriure tan sols un mm³ del nostre cervell. Poden adoptar diferents formes i mides.

Les **neurones** són unes de les cèl·lules bàsiques del sistema nerviós central que s'encarreguen de canalitzar impulsos elèctrics (potencials d'acció) a través d'espais minúsculs (sinapsis) i amb l'ajuda de missatgers químics (neurotransmissors). La informació continguda en aquests potencials d'acció es tradueix en els nostres pensaments,



En la majoria de les neurones es poden distingir les següents parts:

- El cos neuronal o **soma** (d'una mida d'entre 30 i 80 μm). Conté el nucli de la cèl·lula neuronal, és a dir, l'ADN amb les seves propietats bioquímiques i genètiques.

La substància de Nissl són grànuls del reticle endoplasmàtic rugós distribuïts per tot el citoplasma, excepte pel con axònic (zona eixamplada més propera a l'axó). Sintetitza les proteïnes que flueixen per les dendrites i l'axó i reemplaça les proteïnes que són degradades durant l'activitat cel·lular.

- Les **dendrites**: prolongacions del soma ramificades, curtes i nombroses que contacten amb els axons de les neurones contigües. Recullen la informació dels impulsos elèctrics i la dirigeixen cap al soma.

Les espines dendrítiques (unes 10.000 a cada neurona) són les responsables de la comunicació neuronal. Són estructures molt dinàmiques que es creen, es desenvolupen o es reabsorbeixen segons l'activitat de la neurona. Si és alta augmenta la connectivitat i la capacitat d'integració d'informació.

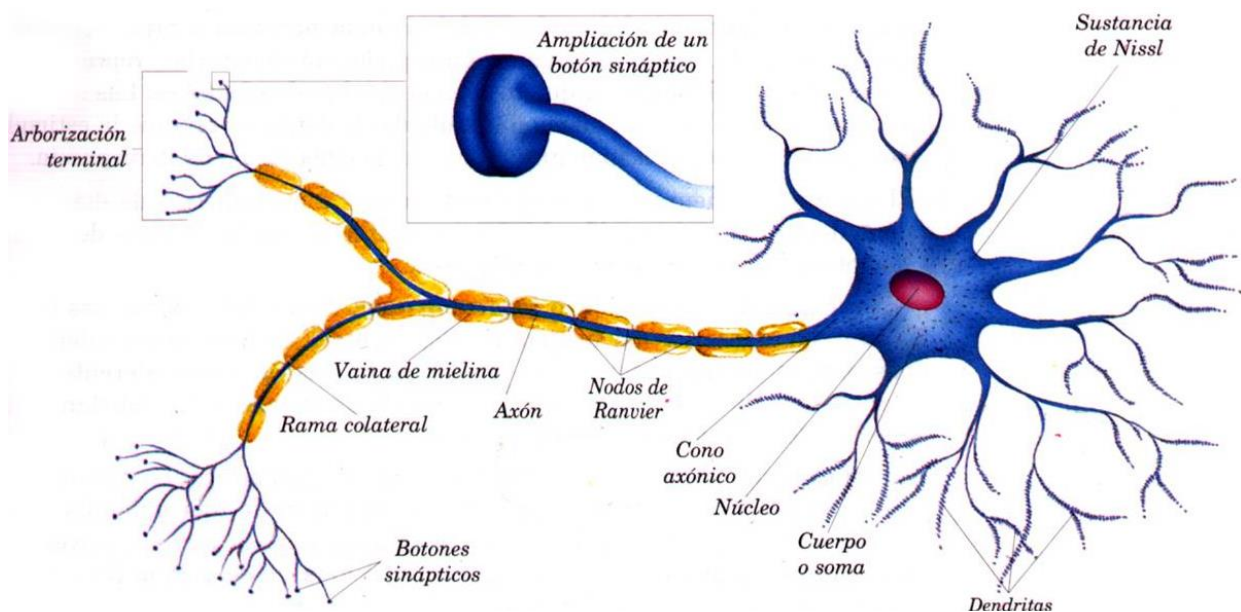
- L'**axó**: prolongació del soma que transmet l'impuls elèctric o potencial d'acció en una única direcció, des del soma i les dendrites fins al o als botons sinàptics (les terminacions de l'axó que contacten amb les dendrites de les neurones contigües).

La mielina és una substància blanca grassa formada per les cèl·lules de Schwann que aïlla i protegeix l'axó, evita pèrdues d'informació i millora el rendiment d'aquest procés de transmissió augmentant la velocitat de propagació dels potencials d'acció. Les velocitats típiques oscil·len entre 0'5 m/s i 120 m/s.

Els nodes de Ranvier són els espais que queden sense mielinitzar en un axó, és a dir, els que no estan coberts per la mielina.

Funcionalment, les neurones es poden classificar en tres tipus:

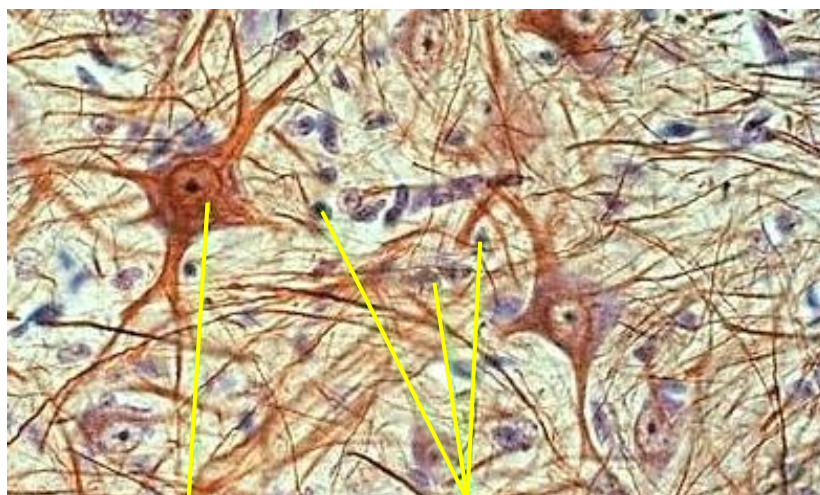
- **Sensitives**, en òrgans sensorials o zones del sistema nerviós relacionades amb la integració de les sensacions.
- **Motors**, en zones del sistema nerviós responsables de la resposta motora.
- D'associació o **interneurones**, que relacionen diferent tipus de neurones entre si.



La neurona i les seves parts.

Les altres cèl·lules bàsiques del sistema nerviós són les **cèl·lules glials**. Són entre 10 i 50 vegades més nombroses que les neurones, aproximadament un bilió, però més petites. No són excitables, s'encarreguen de:

- Donar suport metabòlic i fermesa a la xarxa neuronal.
- Controlar els nivells dels neurotransmissors i l'entrada de nutrients al cervell. Serveixen d'enllaç entre la sang i les neurones. Els principals ingredients que necessita per sobreviure són la glucosa i l'oxigen. El cervell és l'òrgan amb major demanda energètica, consumint un 20-25 % de l'energia corporal.
- Regular la composició iònica del medi extracel·lular i el salt del potencial d'acció entre neurones a través de la fosa sinàptica.
- Participar en la regeneració nerviosa després d'una lesió.



Neurona

Cèl·lules glials

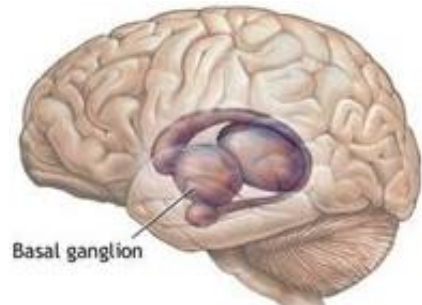
Visualització de les neurones i les cèl·lules glials al teixit neuronal.

2.3. SUBSTÀNCIA GRISA I SUBSTÀNCIA BLANCA CEREBRALS

El sistema nerviós es compon de dos elements ben diferenciats:

- * **Substància** o matèria **grisa** (SNC i ganglis del SNP): nuclis de cèl·lules neuronals (somes), que constitueixen els centres reals de funcionament del teixit nerviós. Es calcula que 1 mm³ de substància gris conté unes 50.000 neurones.

Els nuclis grisos cerebrals són acumulacions de substància gris. Estan als hemisferis cerebrals, a les parts laterals i inferiors de cada ventricle lateral. Antigament rebien el nom de *ganglis basals*, però actualment aquesta denominació es considera incorrecta. S'utilitza el terme *gangli* per fer referència als elements del SNP.

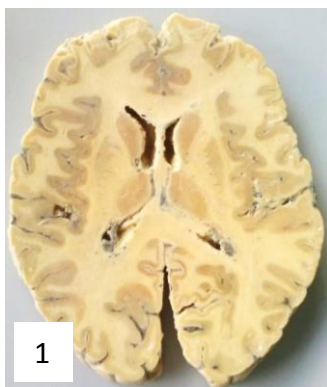


Localització encefàlica dels nuclis grisos cerebrals.

- * **Substància** o matèria **blanca** (SNC i SNP): prolongacions neuronals (axons) i les seves cèl·lules de recobriment (mielina) que es dirigeixen als seus efectors i receptors perifèrics.

Segons la seva connexió, les fibres nervioses es classifiquen en tres grups:

- Fibres d'associació: connexions entre neurones del mateix hemisferi.
- Fibres comissurals: connexions entre neurones d'hemisferis contraris. La principal és el cos callós.
- Fibres de projecció: connexions entre el cervell i altres zones del sistema nerviós (cerebel, tronc encefàlic, medul·la...).



Seccions transversal (1), sagital (2) i coronal (3) d'un cervell humà dissecat on s'observa la distribució de la substància gris i la substància blanca cerebrals.

Font: curs d'anatomia de l'ISC a l'XLab.

2.4. FUNCIONS CEREBRALS

- * **Regulació** i control de les **funcions** de l'**organisme**.

Uns receptors recullen informació de l'estat intern del nostre cos (òrgans, músculs i tendons). El cervell els processa, els interpreta i envia les respostes adequades dels diferents processos metabòlics, conductuals, immunitaris, endocrins...

- * **Percepció** dels **estímuls externs**.

Els receptors sensorials recullen dades de diversa naturalesa (física, química, electromagnètica) del medi extern de l'organisme. Aquests sensors converteixen la informació captada en impulsos elèctrics, l'únic codi que el cervell entén, perquè finalment es produeixi la percepció.

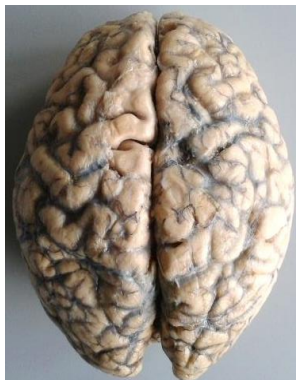
- * **Adaptació** a l'**entorn** per garantir la supervivència de l'espècie.

El cervell té la capacitat de retenció en la seva memòria. A partir de la informació que té emmagatzemada, projecta les imatges per anticipar el futur i adequar constantment les dades que percep dels sentits. Quan no li proporcionen la informació que espera o desitja, la recrea o l'inventa fent prediccions. És per això que el cervell està permanentment imaginant. No és certa la idea que sempre està processant la informació que li arriba per entendre el món. Pensem que vivim en una mateixa realitat, però vivim en el nostre món imaginari i de tant en tant comprovem que la nostra imaginació no ens enganyi massa.

Així doncs, el cervell té una gran mal·leabilitat i està sotmès a un procés de canvi constant i permanent. Mai no som iguals a nosaltres mateixos perquè el nostre cervell, el nucli del nostre "jo", sempre està mutant.

2.5. HEMISFERIS CEREBRALS

Els hemisferis cerebrals són cadascuna de les dues parts aparentment simètriques (mantenen diferències morfològiques) en les quals està dividit el cervell.



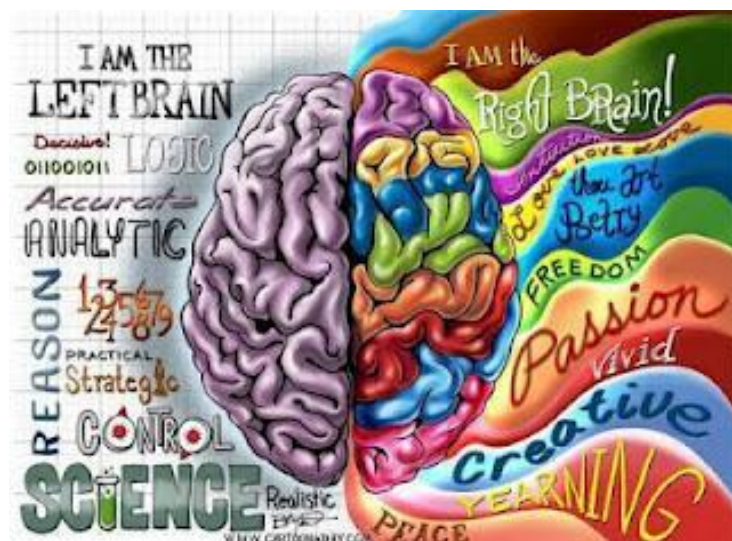
Perspectiva superior d'un cervell humà dissecat on es diferencien els dos hemisferis cerebrals.

Font: curs d'anatomia de l'ISC a l'XLab.

Estan separats per una cissura interhemisfèrica i units en la seva part central pel **cos callós**, un conjunt d'unes 200.000 fibres nervioses que els intercomunica. Al gir del cos callós conflueixen zones de l'al·locòrtex i del neocòrtex (dos tipus d'escorça cerebral que al següent apartat es descriuen amb detall) i controla la memòria de l'olfacte, la més primitiva.

Funcionalment són diferents i, a la vegada, **complementaris**. Cadascun d'ells controla i rep informació de la meitat oposada del cos. Encara que el cervell funcioni globalment amb els dos hemisferis actuant com una unitat, a cadascun dels quals se li poden atribuir una sèrie de funcions, que en el cas dels dretans són les següents:

- * **Hemisferi cerebral dret (HD).** S'activa davant d'allò que és nou i desconegut, és creatiu. Controla les activitats no verbals, no racionals i intuïtives: habilitats artístiques i musicals (processa la comprensió de la melodia, la percepció dels tons i el timbre), la percepció espacial, la intuïció, la imaginació i la creativitat. Encara que té un major reconeixement de la informació emocional, està més especialitzat en emocions negatives. Té una dominància visual-espacial: processa imatges i aprèn a través del moviment del cos, és a dir, estableix relacions múltiples entre l'espai i el temps.
- * **Hemisferi cerebral esquerre (HE).** S'activa davant de les rutines i automatismes. Controla el llenguatge parlat (lectura, escriptura, comprensió i producció) i els processos aritmètics (càlcul i ritme musical). Està més especialitzat en emocions positives. És l'hemisferi planificador, metòdic i analític que organitza la informació i extreu conclusions basades en la lògica.



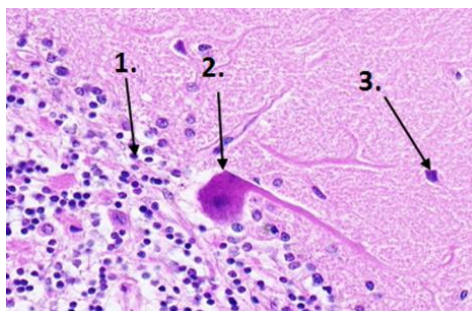
2.6. ESCORÇA CEREBRAL

L'escorça cerebral és la capa que cobreix els hemisferis cerebrals formant nombrosos **plecs**. Aquests plecs, que representen un 67% de la superfície cortical (el 33% restant correspon a la part visible), augmenten la quantitat de teixit ocupant el mínim espai. És de color gris a causa de la concentració de nuclis de les neurones que emeten prolongacions cap a la perifèria o en reben connexions. Està formada per diverses subcapes cel·lulars que varien de nombre segons la localització, l'especialització funcional i l'evolució filogenètica (relativa al desenvolupament evolutiu d'un grup d'organismes) de l'escorça.

És el centre de control superior de totes les activitats conscients de l'organisme, responsable de les **capacitats** i activitats **cognitives** (personalitat, consciència, pensament abstracte i llenguatge).

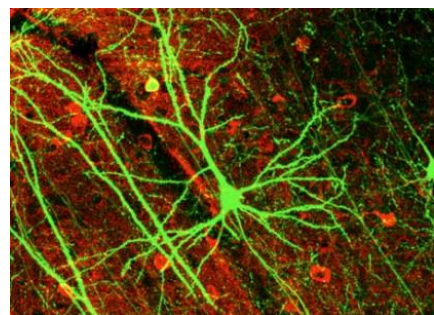
Es poden distingir diversos tipus d'escorça cerebral:

- * Al·locòrtex. Format per menys de sis capes. És primitiva i elemental. S'encarrega de funcions menys evolucionades en l'home o que amb l'evolució han anat perdent importància, com l'olfacte.
 - Isocòrtex homotípic. Les sis capes són harmòniques entre si, sense que predomini cap tipus neuronal.
 - Isocòrtex heterotípic. Alguna de les capes destaca sobre les altres per la seva importància i mida. Pot ser una escorça granular, si destaquen les neurones granulars i és característica de les zones de percepció; o agranular, si les neurones són piramidals i és característica de les zones motores.



Porció de l'escorça cerebel·losa

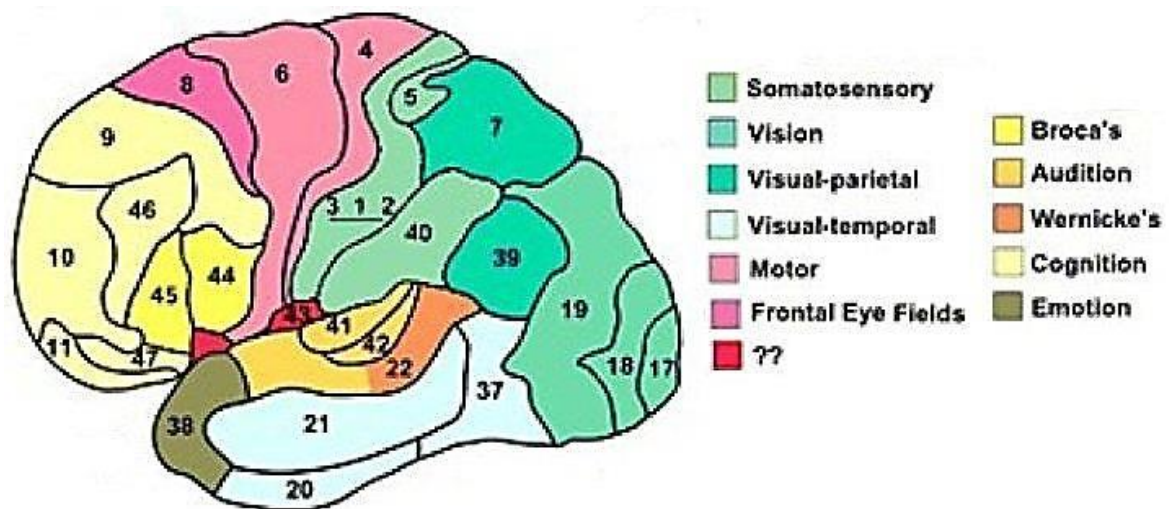
1. Neurona granular
2. Cèl·lula de Purkinje
3. Neurona brossa (*basket*)



Neurona piramidal visualitzada amb la proteïna de fluorescència verda.

- * Neocòrtex. Format per sis capes perfectament individualitzades. És la més evolucionada i especialitzada en funcions específiques més desenvolupades que les de l'al·locòrtex. S'encarrega de les capacitats i activitats cognitives (personalitat, consciència, pensament abstracte i llenguatge) i altres funcions motores i sensorials. Aquestes capacitats cognitives són les funcions mentals superiors dels humans que controlen l'instint i dicten la nostra conducta i, per tant, és la part que ens diferencia de la resta d'espècies animals.
- * Mesocòrtex. Format per zones de l'al·locòrtex i de l'isocòrtex. Estableix relacions entre el sistema límbic i el neocòrtex.

Per a l'estudi de l'escorça cerebral, s'ha creat una divisió fictícia de les funcions cerebrals. S'ha de tenir en compte que les àrees cerebrals no solen ser només receptores o efectores, sinó que existeix una superposició de funcions en la majoria. El **mètode de Brodmann**, el més utilitzat, identifica cada àrea funcional amb un número.



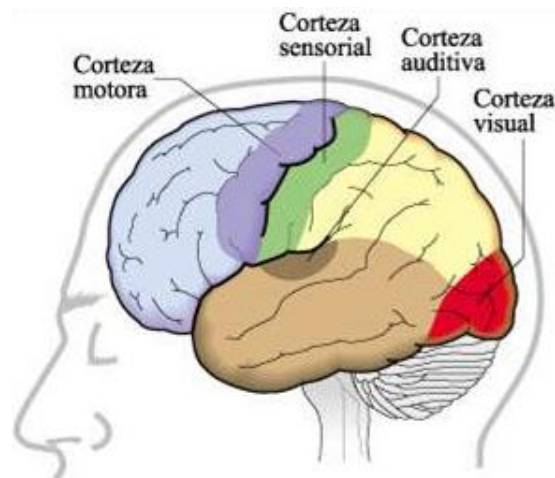
Representació del mètode de Brodmann.

Els **lòbuls** són les zones que es distingeixen en cadascun dels hemisferis cerebrals de l'escorça cerebral. En cadascun d'ells es localitzen diferents àrees funcionals especialitzades que es classifiquen en:

- Primàries (representen el 12'5% de la superfície total de l'escorça cerebral). Especialització sensorial, processen la informació que prové dels sentits. Connectades amb els òrgans dels sentits i les àrees motores de la medul·la espinal.

Es tracta de les àrees sensorials primàries visual, auditiva, gustativa i somatosensorial.

- Secundàries (representen el 9'5% de la superfície total de l'escorça cerebral). Especialització motora, regulen els moviments voluntaris. Processen estímuls més complexes.
- Terciàries (representen el 78% de la superfície total de l'escorça cerebral). Especialització polimodal, associen la informació que prové de diferents fonts sensorials. Processen estímuls més complexes.

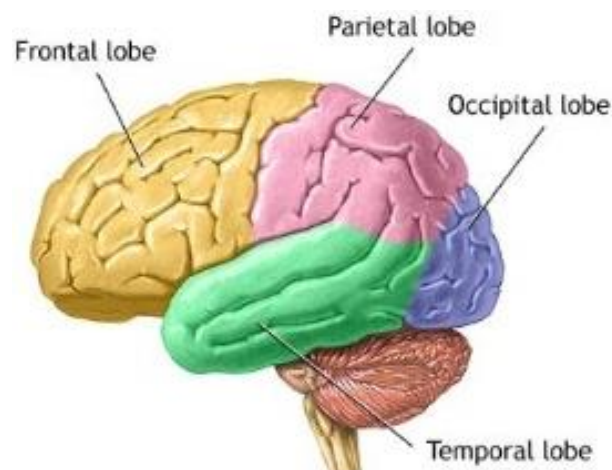


Localització encefàlica de les àrees sensibles,
motores, auditives i visuals.

A l'escorça cerebral es poden diferenciar quatre lòbuls:

- * Lòbul **frontal** (representa el 41% del volum total de l'escorça cerebral). Controla les funcions executives (presa de decisions, planificació, resolució de problemes, autoconsciència, capacitats morals), les funcions sensitivomotores, alguns processos motors (contracció dels músculs, control dels impulsos), les funcions d'associació, alguns processos lingüístics (conversió dels pensaments en paraules i activitat motora de la parla a l'àrea de Broca a l'HE), alguns processos conductuals (comportament social i sexual) i facultats emocionals exclusives de l'home.
- * Lòbul **temporal** (representa el 22% del volum total de l'escorça cerebral). Controla els processos auditius (integració i interpretació dels sons i representació espacial de les diferents freqüències dels sons), la comprensió del llenguatge (a l'àrea de Wernicke de l'HE) i la memòria visual (a l'HD) i sintàctica (a l'HE).

- * Lòbul **parietal** (representa el 19% del volum total de l'escorça cerebral). Controla l'orientació espacial, la percepció d'estímuls sensitius procedents del SNP, les aptituds lingüístiques (comprensió oral i escrita a l'àrea de Wernicke de la part superior) i el càlcul matemàtic.
- * Lòbul **occipital** (representa el 18% del volum total de l'escorça cerebral). Controla els processos visuals.



Localització encefàlica dels lòbuls cerebrals.

LÒBUL	CONTROL DE...	
Frontal	Pensament i raonament	Moviments voluntaris
	Processos lingüístics	Emocions i personalitat
Temporal	Processos auditius	Equilibri
	Llenguatge	Estats d'ànim
	Memòria	
Parietal	Orientació espacial	Càlcul
	Processos sensitius (no visuals)	Sensació de dolor,
	Aptitud lingüística	pressió i temperatura
Occipital	Processos visuals	

2.7. CEREBEL

El cerebel és l'estructura de l'encèfal situada a la fossa cranial posterior, sota dels lòbuls occipital i temporal. Té una forma semblant a la del cervell, però és de menor mida. La seva massa és de gairebé 150 grams i ocupa el 10% del volum total del cervell. És caracteritzat per la seva **alta densitat neuronal**, que és superior a la del cervell. S'ha calculat que pot contenir tantes neurones com els dos hemisferis cerebrals junts. Les **cèl·lules de Purkinje** són el tipus de neurones que es troben a l'escorça cerebel·losa. Són les més voluminoses del cervell.

Les seves funcions principals són:

- **Coordinació** de l'aprenentatge de les **funcions motores** de tot el cos. Elabora, emmagatzema i executa les accions motores. Les cèl·lules de Purkinje s'encarreguen de processar la informació provinent dels moviments de les fibres musculars.
- **Memòria** associada a **aptituds psicomotors**, com ara anar amb bicicleta, esquiar o tocar un instrument musical.
- **Control d'aptituds cognitives**, com ara l'atenció i l'emotivitat.
- Processament del **llenguatge** i la **música**.

2.8. SISTEMA LÍMBIC

El sistema límbic és l'àrea cerebral situada entre el tronc encefàlic i el diencèfal que regula l'aprenentatge, la memòria, l'atenció i les emocions i experiències.

- **Hipocamp**. Controla l'aprenentatge, la memòria espacial, el comportament de supervivència, la regulació hormonal i el sistema immunitari. La memorització es reforça quan es reben els estímuls adequats perquè millori l'eficàcia de les sinapsis, les zones de connexió entre neurones.

És una zona molt sensible que es veu afectada greument per l'estrès i la depressió. En aquests casos allibera substàncies (glucocorticoides i adrenalina) al flux sanguini que afecten negativament als sistemes cardiovascular i immunològic induint a la mort neuronal. Tot i així, l'exercici físic aeròbic, com ara caminar o córrer, faciliten la regeneració neuronal.

- **Amígdala.** Està situada a la part anterior i central del lòbul temporal, és arrodonida i de mida semblant a la d'una ametlla. Està formada per diversos nuclis (lateral, basal, central, medial i cortical).

Controla les reaccions emocionals (per això s'associa a la por, l'ansietat, l'agressivitat, la ràbia), els records emotius, l'expressivitat, el comportament instintiu (alimentació, sexualitat, perill) i la regulació hormonal. Actua com una "alarma" natural davant d'emocions com la por i l'agressivitat i és fonamental en les nostres relacions, la conducta social i la comunicació.

Rep informació sensorial del tàlem i de l'escorça cerebral i la transmet a l'escorça prefrontal perquè prengui decisions conscients. Està relacionada amb el sistema nerviós autònom. Així doncs, l'amígdala dona respostes (conductuals, endocrines i autònomes) a estímuls externs preparant l'organisme per actuar eficaçment davant d'una situació determinada.

- **Hipotàlem.** Controla els estats emocionals (activa respostes conductuals inconscients), les reaccions a l'estrès, l'ansietat i la depressió, el cicle biològic de les hores de son i de vigília, el sistema immunitari, el sistema endocrí, la regulació hormonal (com el cicle menstrual femení) i algunes funcions orgàniques (temperatura corporal, pressió sanguínia, set, gana, son).

- **Tàlem.** Està situat a la zona central interior del cervell, entre els dos hemisferis. Comença a ser conscient quan rep la informació dels diferents sentits.

Controla la coordinació sensorial (rep informació de tots els òrgans sensorials, excepte de l'olfacte, i la distribueix a les diferents regions especialitzades de l'escorça cerebral amb les que manté una comunicació bidireccional) i les respostes inconscients defensives (està connectat a l'amígdala).

- Els **ganglis basals** controlen la síntesi de monoamines (uns neurotransmissors molt sensibles a la degeneració durant la vellesa), la regulació de les seqüències de moviments, l'atenció, la concentració i el processament d'emocions agradables (com el plaer físic, sexe o droga, o emocional, música).

El **nucli accumbens** i el **bulb olfactori** són les àrees dels ganglis basals (part ventral del cos estriat) que es troben al sistema límbic. Són considerades el motor del sistema límbic. Per al seu funcionament són importants dos neurotransmissors: la dopamina i la serotonina. Reben informació de l'amígdala i l'hipocamp i la

distribueixen a determinats nuclis dels ganglis basals que desenvolupen funcions importants en l'aprenentatge, la selecció i l'execució d'accions.

- * **Escorça prefrontal.** Controla l'aprenentatge, la memòria (manté informació en el pensament durant un període curt de temps sense guardar-los com a records, per exemple, pot recordar una melodia o detectar una nota falsa en una cançó coneguda), l'atenció, la motivació, l'elaboració de plans immediats i futurs i la resposta i modulació dels impulsos emocionals generats a l'amígdala. Una lesió en aquesta zona canvia la personalitat de l'individu. Si afecta a l'HE, s'aïlla del món social i, si afecta a l'HD, predomina l'eufòria en les seves accions.

A l'escorça prefrontal es diferencia una zona anomenada escorça orbitofrontal, que controla el plaer i l'addicció. Una lesió en aquesta zona indueix a comportaments desinhibits, com ara perdre la noció del bé i del mal.

- **Escorça cingulada** o estructures paralímbiques. Envolta el cos callós en forma de mitja lluna. La seva part anterior rep informació de l'amígdala i la posterior de les escorces prefrontal, parietal i motora.

Controla la memòria (com que va des del tàlem fins l'hipocamp, associa memòries a olors i al dolor), l'atenció, l'elaboració de plans immediats i futurs, l'execució d'una conducta determinada, la recompensa i el plaer. S'activa quan l'individu fa ús de l'atenció durant un procés de raonament i cerca de solucions a problemes.

En persones eufòriques està hiperexcitada i en persones excessivament tristes o depressives està hipoactiva.



Estructures principals del sistema límbic.

3. CORRENT ELÈCTRIC ENTRE NEURONES

3.1. CAMP ELÈCTRIC

La **càrrega elèctrica** és la propietat que adquireix la matèria quan es produeix un desequilibri entre el nombre de protons i el nombre d'electrons dels àtoms que la constitueixen. És positiva si el cos perd electrons de la seva estructura partint de la neutralitat i és negativa si en guanya. La seva unitat en el SI és el coulomb (C).

És experimental que dos càrregues elèctriques s'atreuen (si són de signe oposat) o es repelen (si són del mateix signe) amb una força (F) que té un valor directament proporcional al producte del valor absolut de les càrregues i inversament proporcional al quadrat de la distància que les separa. L'expressió matemàtica que posa de manifest aquest fet és la **lleï de Coulomb**:

$$F = k \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$$

Q_1 i Q_2 : càrregues elèctriques que interactuen.

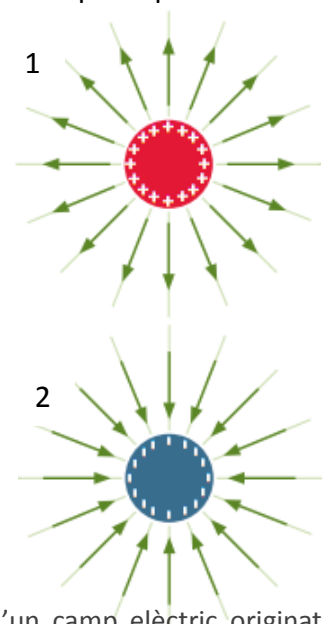
r: distància que separa les dues càrregues que interactuen.

k: constant en el SI $= 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2} = \frac{1}{4} \pi \epsilon$, on ϵ és la permitivitat dielèctrica que mesura el poder aïllant del medi davant dels efectes de les càrregues elèctriques que es troben en ell.

El **camp elèctric** (E) en un punt de l'espai és la magnitud vectorial definida per la força que actua sobre la unitat de càrrega elèctrica positiva situada en aquest punt. Les seves característiques són:

- Mòdul: $E = k \cdot \frac{Q}{r^2}$ ($\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$).
- Direcció radial respecte l'origen del camp elèctric.
- Sentit dirigit cap a l'origen del camp elèctric si la càrrega elèctrica que crea el camp és negativa o cap a l'exterior si és positiva.

Pot representar-se mitjançant **línies de força** o línies de camp, les trajectòries que seguiria la unitat de càrrega elèctrica positiva que, lliurement abandonada i partint del repòs, es veuria sotmesa a l'efecte net del camp elèctric.



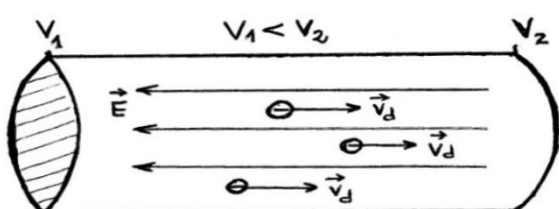
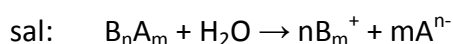
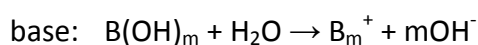
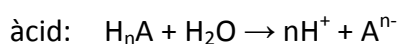
Línies de força d'un camp elèctric originat per una càrrega positiva (1) o negativa (2).

El **potencial** (V) en un punt d'un camp elèctric és el treball realitzat per la força electrostàtica en traslladar la unitat de càrrega elèctrica positiva des de l'infinit o exterior del camp elèctric fins al punt considerat. També es pot definir com l'energia potencial electrostàtica (E_p) per unitat de càrrega elèctrica positiva ubicada en el punt del camp elèctric corresponent. Es mesura en volts ($V = J/C$), segons el SI

$$(E_p = k \cdot \frac{Q \cdot q}{r} \text{ i } q = 1) \rightarrow V = \frac{E_p}{q} = k \cdot \frac{Q}{r}$$

3.2. CORRENT ELÈCTRIC CONTINU

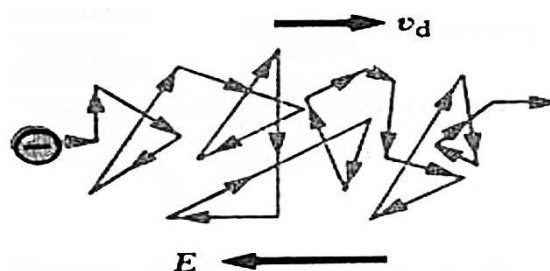
El corrent elèctric continu és el moviment o circulació en un mateix sentit de càrregues elèctriques a través d'un medi conductor que ho permeti. El tipus de conductors presents en els circuits cerebrals són els de segona classe, les dissolucions electrolítiques d'àcids, bases i sals (electròlits que al dissoldre's en aigua les seves molècules es dissocien en ions de signe contrari).



Diferència de potencial aplicada als extrems d'un conductor de primera classe, com ara un metall.

En sotmetre en dos punts d'una dissolució electrolítica una **diferència de potencial**, s'origina un camp elèctric a través seu dirigit cap als potencials decreixents. Els electrons de la dissolució es veuen obligats a moure's en sentit oposat al camp, cap als potencials creixents. És a dir, aquesta diferència de

potencial origina un moviment d'electrons des del punt de menor potencial al punt amb major potencial, amb una determinada intensitat i vencent la resistència de la dissolució. Els electrons sotmesos a una diferència de potencial no es mouen en línia recta al llarg del conductor, sinó que experimenten un complicat moviment en ziga-zaga perquè estan xocant constantment amb els àtoms que el constitueixen. És per això que la seva velocitat de desplaçament



(v_d) és molt petita, d'uns $2'45 \cdot 10^{-4}$ m/s (tarden uns 68 minuts en recórrer un metre).

El sentit real del corrent ve donat pel dels electrons (cap als potencials creixents), però es considera el **sentit convencional** el del camp elèctric (**cap als potencials decreixents**, del pol positiu cap al negatiu).

Llei d'Ohm

La llei d'Ohm és l'expressió matemàtica que posa de manifest la relació entre les tres magnituds elèctriques principals, la diferència de potencial (V), la intensitat de corrent elèctric (I) i la resistència del conductor (R):

$$V = I \cdot R \quad I = \frac{V}{R} \quad R = \frac{V}{I}$$

La **intensitat** de corrent elèctric és la quantitat de càrrega elèctrica que travessa una determinada secció del conductor per unitat de temps, el flux de partícules carregades a través d'un conductor. Es mesura en ampers ($A = C/s$), segons el SI

$$I = \frac{Q}{t} = n \cdot S \cdot v_d \cdot q$$

n: número de portadors per unitat de volum

S: secció del conductor

v_d : velocitat de desplaçament dels electrons

q: càrrega elèctrica dels portadors

La **resistència** del conductor és l'oposició que presenta als electrons perquè circulin a través seu. Controla el valor que pot adquirir la intensitat del conductor quan es veu sotmès a una diferència de potencial. Es mesura en ohms ($\Omega = C/A$), segons el SI

$$R = \frac{d}{\sigma \cdot S} = \rho \cdot \frac{d}{S} = \rho \cdot \frac{l}{S}$$

d: densitat del conductor S: secció del conductor

l: longitud del conductor σ : conductivitat del conductor

ρ : resistivitat del conductor (inversa a la conductivitat), que depèn de la naturalesa material del conductor i de la temperatura

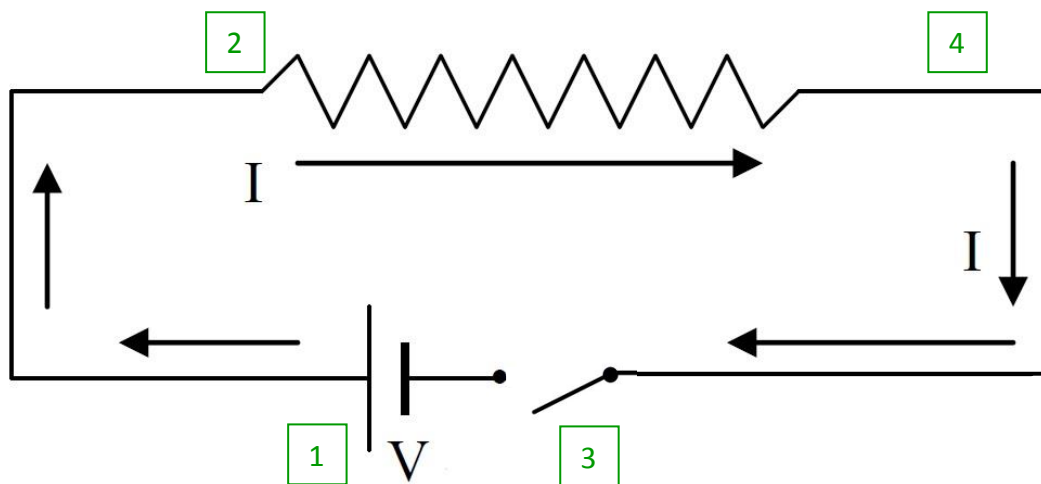
Elements principals d'un circuit elèctric

Un **generador** (1) és un dispositiu que estableix una diferència de potencial constant entre dos punts d'una dissolució electrolítica, mantenint així la circulació de càrregues elèctriques pel circuit elèctric establert.

Una **resistència** (2) és l'element que representa la resistència existent en el circuit.

Un **interruptor** (3) és l'element que regula la circulació de corrent elèctric pel circuit.

El **fil conductor** (4) és l'element que uneix tots els altres.



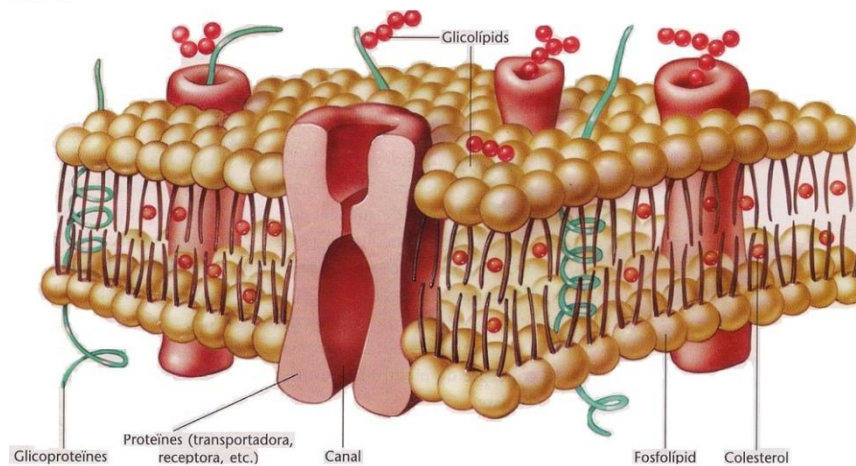
3.3. CORRENT ELÈCTRIC EN EL CERVELL

El funcionament del cervell és electroquímic (tenen lloc una sèrie de descàrregues i es produeix un intercanvi de neurotransmissors). Per això, genera una diferència de potencial que encara que sigui molt petita és capaç de crear gran quantitat de pensaments diaris amb totes les seves implicacions conductuals.

Com ja s'ha dit, la funció principal de les neurones és transmetre l'impuls nerviós. Físicament, això causa canvis en els potencials de les seves membranes plasmàtiques. La cèl·lula, doncs, necessita els mateixos components que un circuit elèctric. Tenint en compte que el mecanisme neuronal emprat per la transmissió dels impulsos elèctrics es basa en la distribució desigual d'ions entre els medis intracel·lular i extracel·lular de les neurones, es pot establir una correspondència entre:

- **Generador – proteïnes** de la membrana plasmàtica. Els generadors de corrent elèctric en els circuits cerebrals són bateries biològiques que corresponen a les proteïnes que travessen la membrana plasmàtica. Funcionen com a canals que permeten el transport d'ions a través seu, establint així la diferència de potencial.

- **Resistència – membrana plasmàtica.** Els ions (carregats elèctricament) no poden travessar la membrana plasmàtica (bàsicament, una bicapa de fosfolípids) de les neurones perquè no es poden dissoldre en lípids. Només poden aconseguir-ho a través de proteïnes específiques.



- **Interruptors – estímuls.** Els circuits elèctrics neuronals no estan sempre tancats, activats. Els estímuls (externs o interns) desencadenen l'impuls nerviós.
- **Fil conductor – medi intracel·lular i extracel·lular.** La dissolució electrolítica d'aquests medis és conductora del corrent elèctric i està en contacte amb la membrana plasmàtica i les proteïnes que la travessen.

A mode de resum l'activació de senyals elèctrics en el sistema nerviós es pot explicar de la següent manera.

Quan una neurona rep, a través de les seves dendrites, un nombre suficient de senyals aferents s'excita. Transmet, via axó, un senyal en forma de seqüències d'impulsos elèctrics anomenats potencials d'acció.

En estat de repòs, la membrana té un potencial elèctric negatiu d'uns -70 mV, com a conseqüència de la distribució asimètrica dels ions positius i negatius als dos costats d'aquesta estructura. D'altra banda, la membrana cel·lular disposa de canals iònics, que depenen de les diferències de potencial, que li confereixen l'excitabilitat elèctrica. Quan els senyals que arriben a la zona d'excitació del con axònic indueixen un canvi de potencial elèctric que supera un cert llindar, s'obren els canals iònics. Es produeix, llavors, una forta caiguda del potencial de repòs (potencial d'acció), per tornar després a la situació inicial.

El potencial d'acció es propaga del soma cel·lular a l'axó i, a través de la sinapsi, estableix contacte amb les dendrites d'altres neurones. Com que les neurones estan separades per la fossa sinàptica, no existeix un contacte directe, sinó una transmissió electroquímica del senyal. En el moment que un potencial d'acció arriba a la fossa sinàptica, des del costat presinàptic s'alliberen neurotransmissors, que actuen de missatgers i obren determinats canals iònics en la part postsinàptica, canviant així el potencial de membrana de la neurona postsinàptica.

El potencial de repòs i el potencial d'acció

En el flux d'ions a través de la membrana plasmàtica de les neurones es veuen implicats, bàsicament, els cations potassi (K^+) i sodi (Na^+) i l'anió clorur (Cl^-). Aquesta bicapa lipídica té la propietat de la permeabilitat selectiva a les molècules hidrosolubles i es fa permeable a les molècules hidròfiles i polars. És a dir, catalitza i transporta ions de determinades molècules a través seu per mantenir constant el medi intern.

El **potencial de repòs** és la diferència de càrrega elèctrica entre l'interior i l'exterior d'una neurona no excitada i correspon a **-70 mV** a l'interior. És causat per la següent descompensació de ions:

	Medi intracel·lular	Medi extracel·lular
Molta quantitat	$A^- *$, K^+	Cl^- , Na^+
Poca quantitat	Cl^- , Na^+	$A^- *$, K^+

* Anions orgànics, com proteïnes, ADN i ARN, que no poden sortir de la cèl·lula.

La **bomba de sodi – potassi** (Na-K) és l'encarregada de mantenir el potencial de repòs de la membrana. El transport de ions es produeix en contra del gradient de concentració i, per tant, és necessària l'aportació d'energia, que en aquest cas ve donada per la hidròlisi de l'ATP. Presenta dos configuracions alternatives: la primera té una cavitat que s'obre a l'interior de la cèl·lula en la que encaixen els Na^+ i la segona té una cavitat que s'obre cap a fora, en la que encaixen els K^+ . El balanç d'aquest transport és que per cada molècula d'ATP que s'hidrolitza són expulsats tres Na^+ de la

cèl·lula i dos K^+ són introduïts. Així s'estableix una diferència de càrrega elèctrica o potencial, el potencial de repòs.

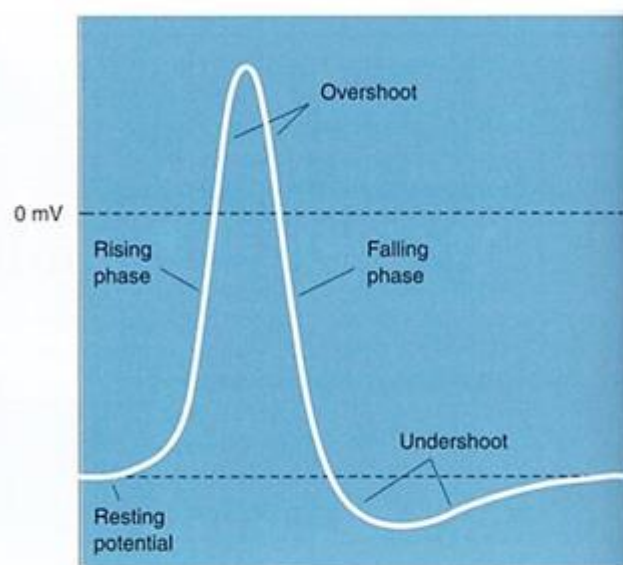
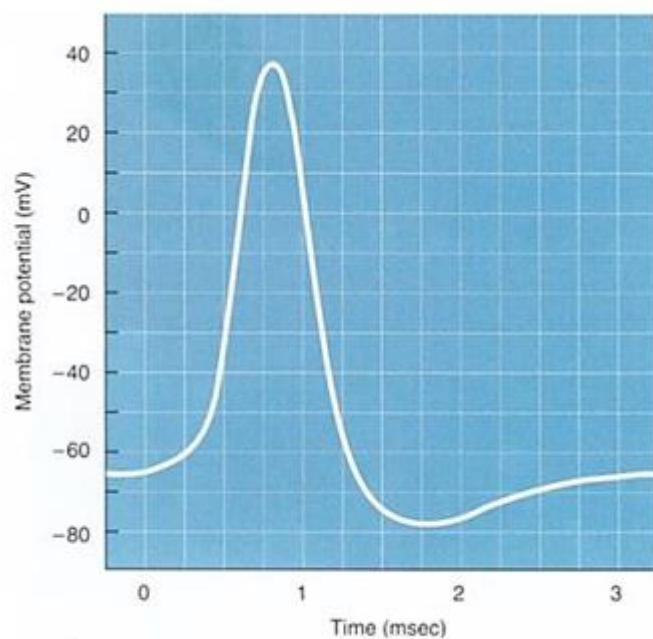
El seu mecanisme de funcionament segueix aquests quatre passos:

- Tres Na^+ del citoplasma intracel·lular s'insereixen amb precisió a la proteïna de transport, que encara no canvia de conformació.
- Es produeix una reacció química que involucra a l'ATP, uneix un grup fosfat a la proteïna, alliberant-se ADP (difosfat de adenosina). Aquest procés provoca un canvi en la conformació de la proteïna que fa que els tres Na^+ s'alliberin cap a l'exterior de la cèl·lula.
- Dos K^+ de l'espai extracel·lular s'insereixen a la proteïna de transport, la qual ja ha canviat a la segona conformació. En aquesta segona conformació el K^+ s'acoba millor a la proteïna que el Na^+ .
- El grup fosfat s'allibera de la proteïna, induint la conversió a la primera conformació, i el K^+ és alliberat en el citoplasma. Ara la proteïna està preparada per a transportar de nou Na^+ cap a fora de la cèl·lula i poder continuar la transmissió del potencial d'acció.

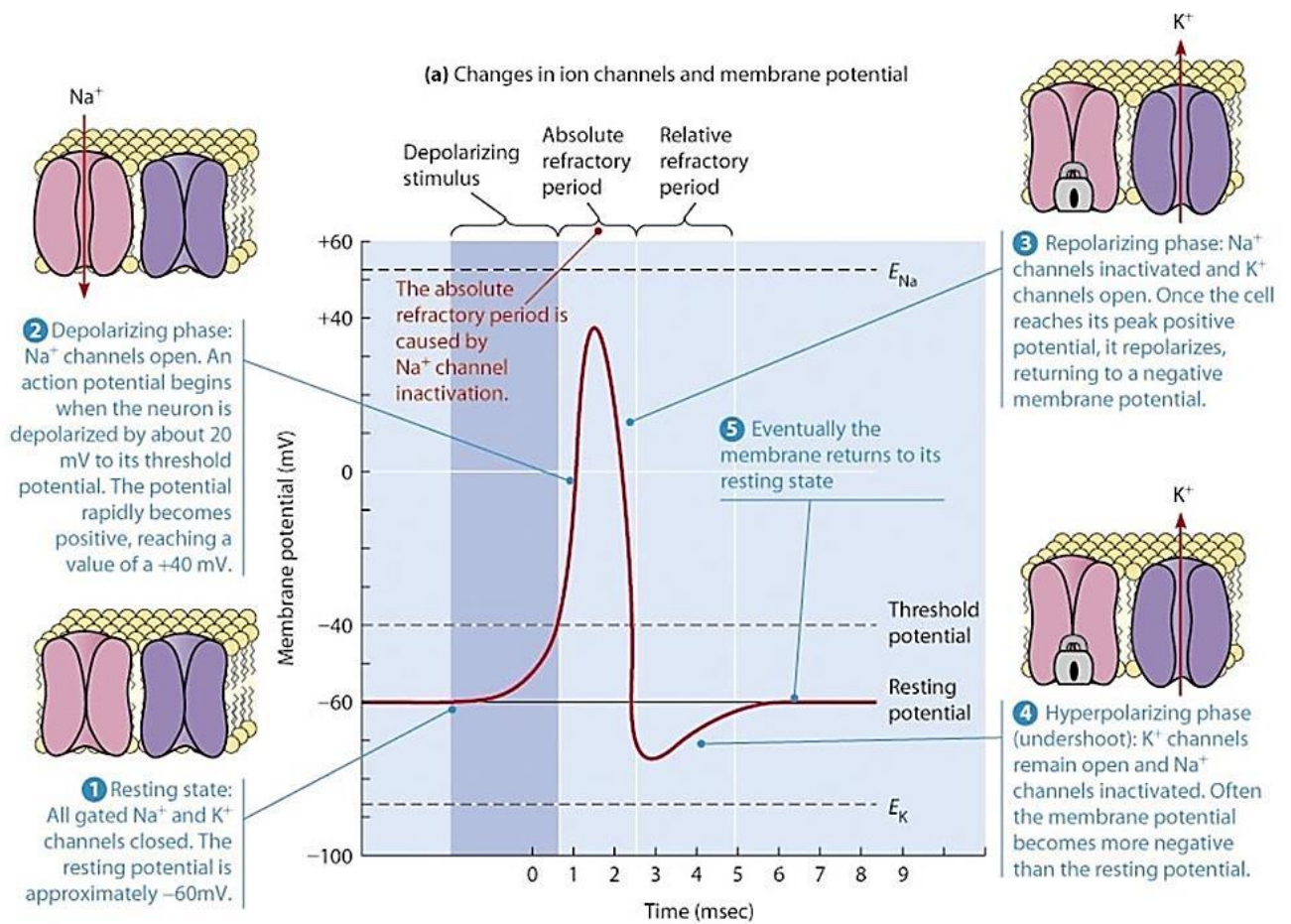
El **potencial d'acció** és la diferència de càrrega elèctrica entre l'interior i l'exterior d'una neurona excitada. Un estímul obre els canals de la membrana que permeten el pas de certs ions. Quan s'estimula l'axó i se supera un llindar es produeix una despolarització, entren Na^+ a l'interior, que disminueix el potencial (valor més positiu). Segons la llei del tot o res, només es produeix si l'estímul supera el llindar, ja sigui un de sol o la suma de més d'un de continus. Aquesta situació és la responsable de la transmissió de l'impuls elèctric. Si entressin Cl^- o sortissin K^+ , es produiria una hiperpolarització i augmentaria el potencial (valor més negatiu).

Durant el potencial d'acció es diferencien les següents fases:

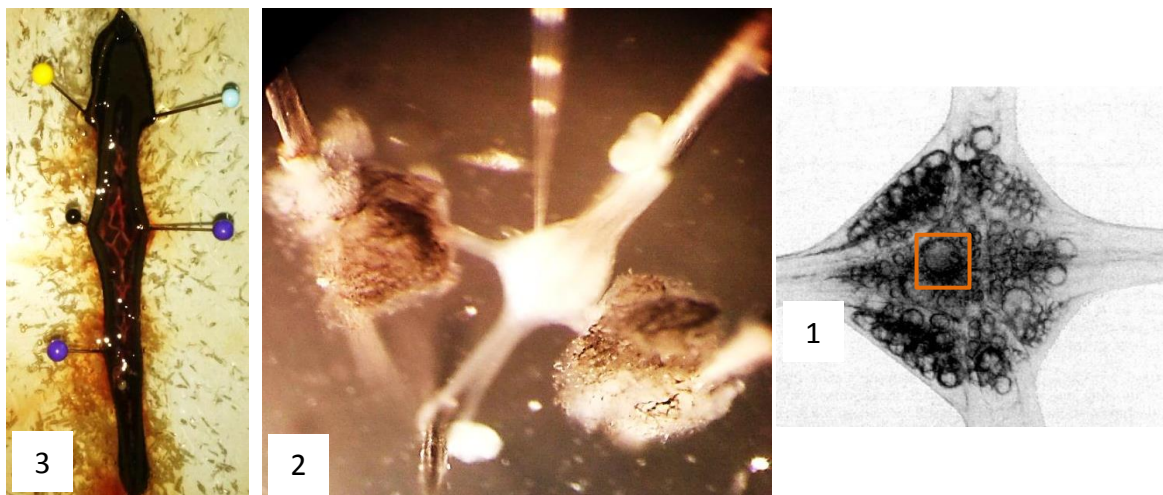
Fase	Voltatge (mV)	Membrana plasmàtica
Polarització	- 70	Abans d'iniciar-se el potencial d'acció, el potencial intern de la neurona és el potencial de repòs.
Despolarització	- 40	Entrada de Na^+ .
Repolarització	+ 55	Equilibri de Na^+ .
Hiperpolarització	- 90	Tancament dels canals de Na^+ i sortida de K^+ .
Polarització	- 70	Restabliment del potencial de repòs.



Representació gràfica d'un potencial d'acció.



Al laboratori es pot mesurar el potencial d'acció d'una cèl·lula introduint-li un elèctrode connectat a un oscil·loscopi.



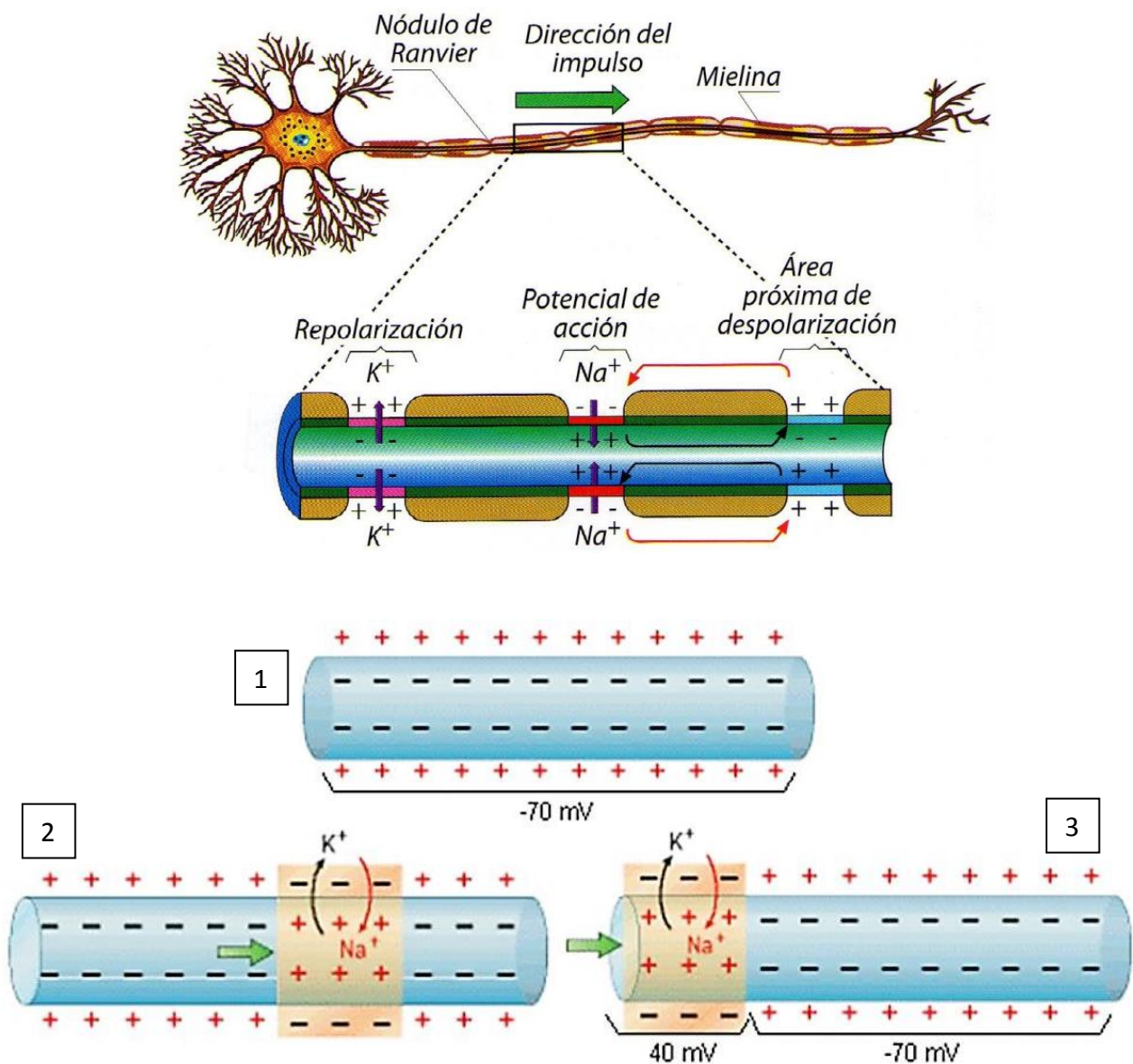
Cèl·lula de Retzius (1) d'un gangli (2) de sangonera (3) on es va mesurar el potencial d'acció de la taula següent.

Font: curs d'anatomia de l'ISC a l'XLab.

Fase	Gràfic del potencial d'acció	Esquema cel·lular
Despolarització		
Repolarització		
Hiperpolarització		
Polarització		

En la **conducció** de l'impuls elèctric per l'axó pren un paper molt important la **mielina** que el recobreix. El potencial d'acció es transmet a través seu mitjançant obertures i tancaments consecutius dels canals de Na^+ i K^+ fins arribar als botons sinàptics. La velocitat de propagació de l'impuls depèn de:

- El gruix de l'axó. Major velocitat a major diàmetre.
- La beina de mielina que l'envolta. Els fragments d'axó que estan envoltats d'aquesta substància grassa i aïllant no contenen els canals per dur a terme l'intercanvi d'ions amb l'exterior de la neurona. Als nodes de Ranvier sí que hi ha aquests porus i la transmissió és continua. Així, la conducció de l'impuls és saltatòria, es fa a salts, entre nodes. Major velocitat a major conducció saltatòria.



Esquema representatiu del potencial de repòs (1), l'estímul i el potencial d'acció (2) i la propagació d'aquest últim (3) en un node de Ranvier.

La sinapsi

Quan el potencial d'acció arriba als botons sinàptics de l'extrem de l'axó més allunyat del soma s'inicia la **sinapsi**, la comunicació neuronal entre dues neurones, la presinàptica i la postsinàptica. En el tipus més comú no existeix un contacte físic entre elles, sinó que estan separades per la fosa sinàptica, un espai d'uns 20-30 nanòmetres d'amplada. És un mecanisme unidireccional, la informació flueix sempre en un únic sentit. La neurona presinàptica també pot transmetre l'estímul nerviós a una cèl·lula muscular o una de glandular.

Els neurotransmissors són substàncies químiques endògenes (produïdes per l'organisme) que s'alliberen al rebre un potencial d'acció i el propaguen a través de la fosa sinàptica fins a la neurona postsinàptica. La majoria són aminoàcids, derivats seus o pèptids (cadena curta d'aminoàcids). Poden ser excitadors o inhibidors. La major part de la comunicació sinàptica utilitza el glutamat com a excitador i l'àcid gamma amino-butíric (GABA) com a inhibidor.

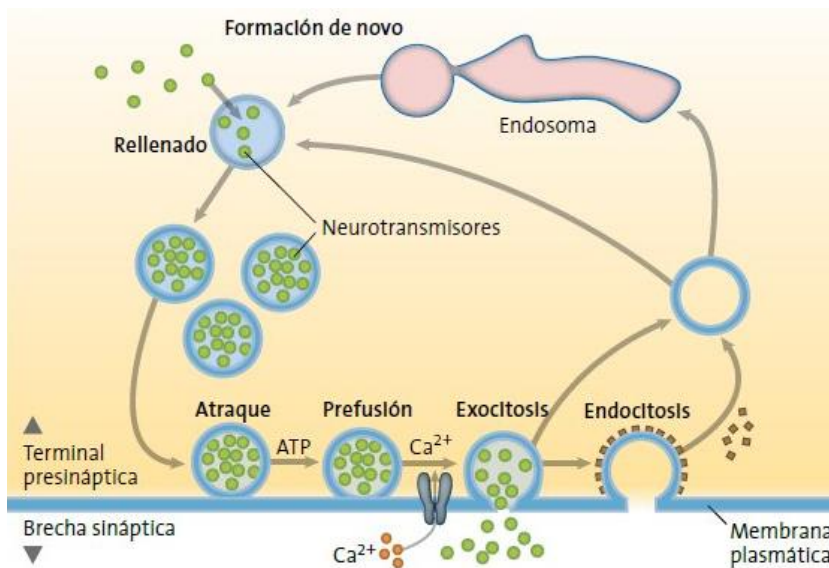
Les vesícules sinàptiques són uns petits espais d'uns 40 nm situats als botons sinàptics on són sintetitzats i emmagatzemats els neurotransmissors i que contenen unes 10.000 molècules d'ells. També hi ha mitocondris perquè la sinapsi requereix molta energia.



Vesícules sinàptiques del boto presinàptic vistes al microscopi electrònic. S'observa també la fosa sinàptica.

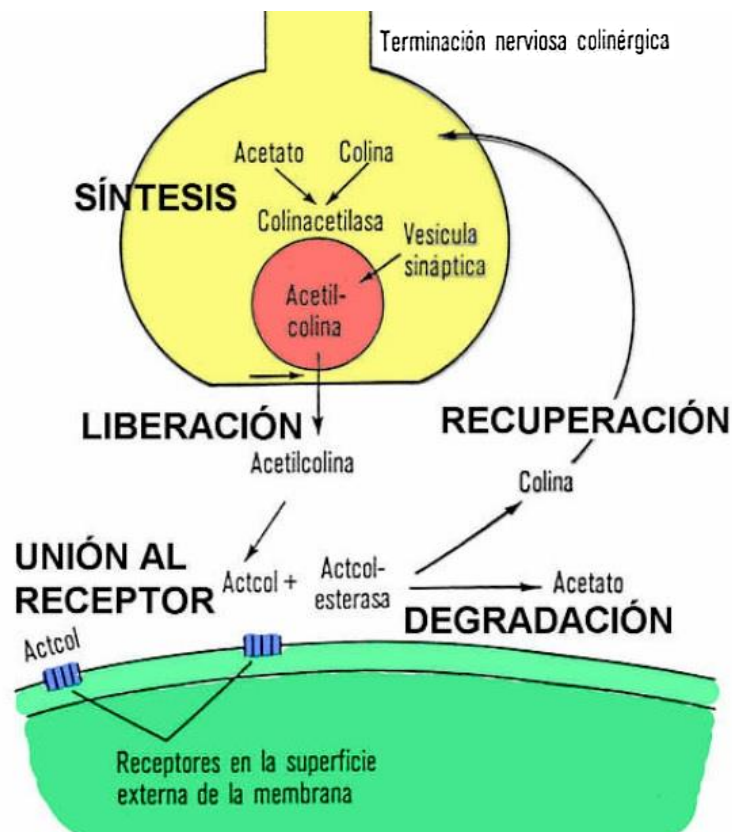
L'alliberació de neurotransmissors depèn de la presència de cations calci (Ca^{+2}). La despolarització de la membrana presinàptica

indueix l'obertura de canals iònics permeables a Ca^{+2} . L'entrada d'aquest ió a l'interior del botó presinàptic desencadena l'alliberació del neurotransmissor, promovent la unió de les vesícules sinàptiques amb la membrana cel·lular. S'inicia el procés d'exocitosi del neurotransmissor, que s'aboca al medi extracel·lular i allí interacciona amb els receptors sinàptics.



Esquema del cicle que segueix una vesícula sinàptica des de la seva formació fins al buidat del neurotransmissor al medi extracel·lular i el seu posterior reciclatge.

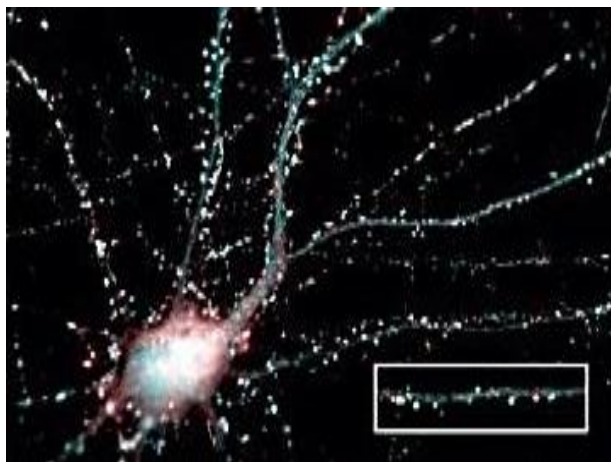
Cada tipus de neurona utilitza un neurotransmissor diferent amb les seves funcions específiques. Generalment, una determinada neurona pot alliberar dos o més substàncies: un neurotransmissor principal i un o uns cotransmissors (neurotransmissor secundari o neuromodulador que activa o inhibeix circuits neuronals involucrats en funcions cerebrals específiques).



Un neurotransmissor ha de ser sintetitzat, emmagatzemat a la vesícula sinàptica, alliberat de la neurona presinàptica, unit temporalment a la membrana de la cèl·lula receptora i degradat o recuperat.

La sinapsi es desenvolupa en els passos següents:

- El potencial d'acció arriba al botó sinàptic de la neurona presinàptica a través de l'axó de la mateixa.
- Les vesícules sinàptiques es mouen fins a la membrana presinàptica, s'obren i alliberen els neurotransmissors a la fosa sinàptica.
- Els neurotransmissors es fixen (durant un període molt curt de temps) a les proteïnes receptores de la membrana postsinàptica de les dendrites i s'obren els seus canals iònics a través dels quals es produeix el flux d'ions.
- Els neurotransmissors o part d'ells se separen de la neurona postsinàptica i tornen al botó sinàptic fins que es tornin a alliberar.
- La diferència de potencial establerta en la membrana postsinàptica propaga el senyal elèctric, és integrat pel soma cel·lular, es dirigeix cap al con axònic i es transmet per l'axó on s'inicia una nova sinapsi.

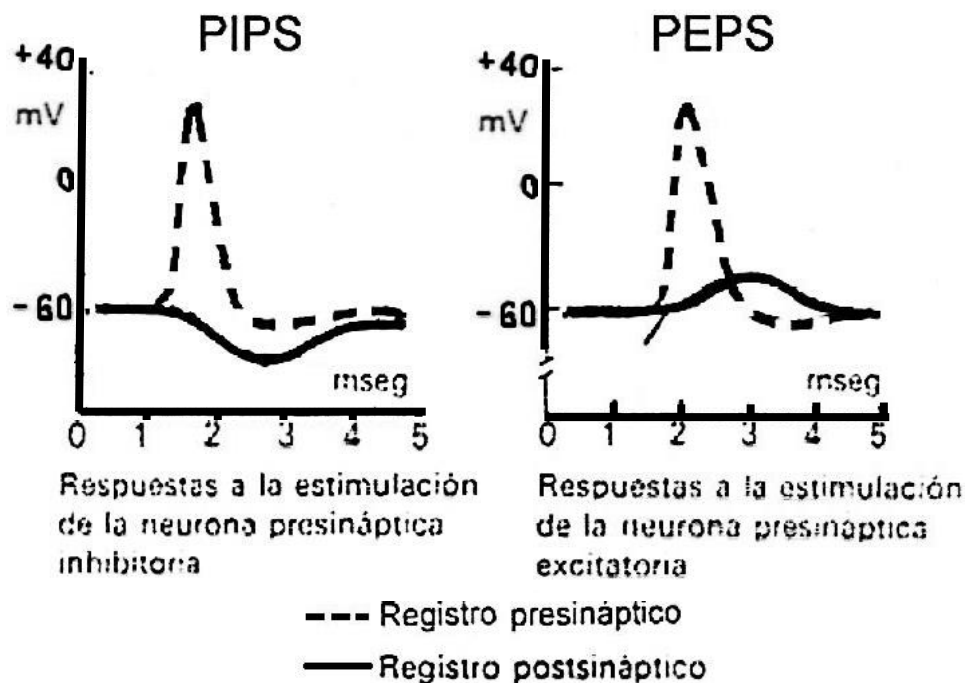


Sinapsis visualitzades amb un anticòs fluorescent.

En funció del tipus de neurotransmissor i receptor implicats es poden donar dos casos:

- Potencials excitadors postsinàptics (**PEPS**). Es produeix una despolarització com a conseqüència de l'obertura dels canals Na^+ de la membrana plasmàtica de la neurona postsinàptica. En resulta:
 - El desencadenament d'un potencial d'acció, si la cèl·lula postsinàptica és una altra neurona.
 - La contracció d'un múscul, si la cèl·lula postsinàptica és una de muscular.
 - La secreció d'una substància, si la cèl·lula postsinàptica és una de glandular.

- Potencials inhibidors postsinàptics (**PIPS**). Es produeix una hiperpolarització com a conseqüència de l'obertura dels canals Cl^- i/o K^+ de la membrana plasmàtica de la neurona postsinàptica. En resulta:
 - La disminució d'un potencial d'acció (valor més negatiu), si la cèl·lula postsinàptica és una altra neurona.
 - L'expansió d'un múscul, si la cèl·lula postsinàptica és una de muscular.
 - La dificultat en la secreció d'una substància, si la cèl·lula postsinàptica és una de glandular.



Transformació dels estímuls en impulsos elèctrics

De la mateixa manera que les lletres de l'abecedari són els elements bàsics de les paraules d'un idioma, els potencials d'acció ho són en el **llenguatge neuronal**.

La informació percebuda en els estímuls ve determinada pel número i la distribució al llarg del temps dels potencials d'acció. Es pot dir, doncs, que una neurona pot codificar la informació que li arriba de manera similar a com es fa amb el codi Morse.

Perquè aquesta **codificació** resulti **eficient**, el cervell utilitza una sèrie d'estratègies:

- Les neurones acostumen a treballar en **grups**, fet que permet que la transmissió del senyal nerviós sigui estable encara que falli alguna connexió entre elles.
- En moltes regions corticals les neurones veïnes responen de la mateixa manera i tenen preferència per estímuls semblants, fet que les permet crear **codis col·lectius**. Hi ha grups neuronals específics i interconnectats.
- Les neurones responen als estímuls amb la **mínima despesa energètica**, transporten la major quantitat possible d'informació amb la mínima despesa per aconseguir una codificació correcta. Per això redueixen a l'essencial la informació.
- La **resposta** que elabora el cervell no es redueix a un acte reflex, sinó que és **complexa** i intervenen l'estat de vigília i l'atenció, les emocions, els objectius, el flux constant de records...

ANNEX 3. DOCUMENTS DE L'ESTUDI ESTADÍSTIC

Fitxers Excel amb el processament i el tractament de dades de l'estudi estadístic (suport digital).

- Curs 2010-11.
- Curs 2011-12.
- Curs 2012-13.
- Gràfics per edats.