Docència de la genètica

Treball Final de Màster

Màster del Professorat de Secundària Obligatòria i Batxillerat, Formació Professional i Ensenyament d'Idiomes

Curs 2022-2023

Universitat de Barcelona

Autor:

Daniel García Gomis

Tutors:

David Bueno i Torrens

Ferran Casals López

Índex

Resum 3
Introducció 4
Models d'estructuració 6
Objectius 8
Metodologia de recerca 9
Resultats 10
Anàlisi del currículum 10
Sabers 10
Competències 14
Anàlisi dels llibres de text 21
Primer d'ESO 22
Tercer d'ESO 23
Primer de batxillerat 23
Experiències docents 23
Recerca i educació 25
Bioètica a classe 26
Discussió 28
Propostes de millora 29
Currículum 29
Seqüenciació i didàctica 30
Professorat 31
Llibres de text 31
Recerca 32
Conclusions i limitacions de la recerca 33
Bibliografia 34

Resum

La genètica forma part del currículum d'ESO i batxillerat de l'assignatura de biologia. La seva docència ha estat clàssicament qualificada com difícil per als estudiants i, malgrat la seva importància creixent, molts conceptes no són compresos per la societat. Aquest treball analitza diferents branques de la docència de la genètica com els canvis en les legislacions durant els darrers quinze anys, els llibres de text així com altres recursos. S'ha observat un clar continuisme en els currículums tant pel que fa a sabers com per les competències. En el cas dels sabers destaca la importància atribuïda a la genètica mendeliana. L'anàlisi dels llibres de text no ha estat concloent al no poder accedir als cursos on es desenvolupa el gruix de la genètica. La incorporació de la bioètica i de temes socials semblen una bona eina per a l'aprenentatge i motiven l'alumnat. La vinculació amb el món de la recerca també s'ha demostrat molt beneficiosa en l'aprenentatge de les ciències. Les propostes de millora es centren en posar la genètica molecular com a pilar de la docència de la genètica i motivar l'alumnat mitjançant temes socials i recerca. El professorat requereix més formació i s'ha de fer servir material adequat.

Paraules clau: Genètica, docència, currículum, propostes de millora.

Introducció

La genètica és la branca de la biologia encarregada d'estudiar l'herència i tot el que l'envolta. Les seves branques principals són la genètica molecular (estructura i replicació de l'ADN), la genètica analítica (patrons i anàlisi d'herència), l'epigenètica (regulació d'expressió i estructura de la cromatina) i l'enginyeria genètica (aplicacions) i totes elles es tracten d'una manera o una altra durant l'educació secundària. Aquest treball té la intenció d'analitzar com s'imparteix la genètica actualment, com ha evolucionat la docència de la genètica a Catalunya durant els darrers anys, com està a escala global i fer propostes de millora.

Aquest treball final de màster s'emmarca en una època en què la genètica és un camp en constant creixement i que cada dia pren més importància gràcies al desenvolupament de les tècniques de seqüenciació massiva i d'edició genètica, amb implicacions importants, entre d'altres, en la biotecnologia industrial, la medicina personalitzada i les tècniques de reproducció assistida.

Encara que ens afecta com a individus i al nostre dia a dia, desgraciadament el desconeixement sobre la genètica és molt gran. El nivell de coneixement de la població adulta (segons el major estudi disponible, realitzat als Estats Units, Rússia, Ucraïna i el Regne Unit amb més de 5000 participants) és molt millorable, més tenint en compte que la mostra sobrerepresentava gent amb estudis superiors als quals se'ls pressuposa un major coneixement. A més, aquest desconeixement afecta de forma força transversal, encara que alguns països, religions, nivell d'estudis i professions puntuen significativament pitjor (Chapman et al., 2019).

La didàctica de la genètica tampoc és fàcil i, com es veurà a l'anàlisi dels currículums, la tendència global és que la genètica està situada en un moment molt avançat del període educatiu (Castera et al., 2008). En el cas d'Espanya, com a molts altres països, no es tracta fins al quart curs de l'Educació Secundària Obligatòria (ESO), és a dir amb alumnat de 15 anys. Aquest fet ha estat motivat en alguns casos per la suposada dificultat dels continguts i, malgrat que matemàticament no suposen cap repte per a l'alumne, s'argumenta que abans no tenen prou maduresa. És cert que trobem diferents estudis que parlen de les dificultats que tenen els alumnes amb els conceptes de genètica, els quals venen majoritàriament per prenocions errònies que costa canviar. Veiem així com s'acostumen a confondre conceptes com cromosomes o gens i no es consideren que totes les cèl·lules tinguin material hereditari o ni tan sols que tots els éssers vius estiguin formats per cèl·lules (G. Ayuso & Banet, 2002; Íñiguez Porras & Puigcerver Oliván, 2013). Una bona forma d'entendre les dificultats va ser categoritzada en

deu punts per Knippels (Knippels et al., 2005) segons els problemes més comentats per professors holandesos. Veiem així com es parla de:

1. La naturalesa abstracta dels conceptes on costa relacionar amb reproducció o veure l'ADN.
2. La complexitat ja que inclou molècules, cèl·lules, organismes i poblacions.
3. El fet de treballar amb probabilitats en lloc de números absoluts.
4. La pròpia noció del fet que és un camp difícil fent que molts alumnes es rendeixin en una mena de profecia autocomplerta.
5. La forma d'examinar, on s'intenta englobar tot el temari malgrat que les classes acostumen a centrar-se en la resolució de problemes de genètica mendeliana.
6. La terminologia específica i complexa de la genètica.
7. La simbologia específica, els quadres de Punnet i els pedigrís.
8. La resolució de problemes que està lligada amb la comprensió lectora i amb els punts 6 i 7.
9. La deficient comprensió de la divisió cel·lular i els processos de mitosi i meiosi que no sempre es tracten dins del tema de genètica.
10. L'heterogeneïtat dels grups amb diferents nivells d'interès, coneixements en biologia i en matemàtiques així com el nivell de maduresa.

Als darrers anys, la formació dels estudiants ha girat cap a un model interdisciplinari i per competències, això ha de donar eines suficients a l'alumnat per poder entendre la influència que té la genètica en les seves vides i veure les connotacions ètiques que totes les novetats impliquen. En aquest sentit, és important explicar que la genètica no és quelcom fix i d'aquesta manera lluitar contra la idea del determinisme genètic, que afortunadament no sembla molt estesa (N. Gericke et al., 2021). Malgrat no ser un corrent majoritari, sobta veure com una part del professorat, en un estudi amb més de 8000 docents de primària i secundària de 23 països, una minoria significativa (20-30% molt variable entre països) encara cau en obviar els efectes dels factors ambientals sobre els gens (Castéra & Clément, 2014). Un dels punts crítics en el seu ensenyament és el que s'anomena teleologia sintètica, és a dir, la necessitat de trobar una funció o un motiu per a l'existència de cada cosa i que fa difícil explicar la base genètica de l'evolució mitjançant mutacions aleatòries, ja que cada gen, i al·lel, ha de tenir una funció o tret preestablert. En la mateixa línia també es fomenta el determinisme genètic, doncs seguint aquesta lògica si hi ha quelcom que està als teus gens, per força s'ha de complir independentment dels factors ambientals (Stern et al., 2021).

Models d'estructuració

Com en tot aprenentatge, a la genètica hi ha diferents nivells d'assoliment. Una proposta per avaluar la comprensió dels conceptes i que dona una bona visió general es pot veure a la Taula I1. En aquesta proposta (Castro-Faix et al., 2021), podem observar quatre nivells d'assoliment diferents de tres estructuracions mentals relacionades amb tres dels pilars que s'ensenyen: la genètica molecular, la transmissió de caràcters i la relació entre genotip i fenotip. Per assolir un bon aprenentatge, l'alumnat ha de ser capaç d'interrelacionar els tres aspectes. A l'estudi es veu que tenir una bona base molecular, és una part molt important per poder dominar els altres dos conceptes. En aquest sentit, començar per la genètica mendeliana no sembla la millor opció per introduir la genètica a l'alumnat. Un exemple dels problemes que genera aquesta estructuració errònia es pot veure quan alumnes que resolen perfectament problemes bàsics de genètica mendeliana no són capaços d'explicar el funcionament dels encreuaments en vegetals, ja que no consideren que tinguin reproducció sexual i, per tant, la possibilitat de generar gàmetes. El mateix passa amb el concepte de cromàtides i cromosomes on troben problemes a l'hora de visualitzar si cada cromàtide té una còpia o si un cromosoma amb dues cromàtides tindrà dues còpies del gen. L'èxit d'alguns estudiants que no han comprès els conceptes es deu, en part, a la facilitat que tenen per aplicar un algoritme per resoldre els problemes (G. E. Ayuso et al., 1996).

	Nivell 0	**Nivell 1**	**Nivell 2**	**Nivell 3**
Organització jeràrquica	Els gens són a algunes cèl·lules, però no a totes.	Totes les cèl·lules tenen els mateixos gens. No implica que els gens siguin al nucli. Possibles diferències entre on es situa l'ADN i els gens.	Els gens es localitzen als cromosomes i en cada cromosoma hi ha molts gens diferents. No implica que els gens siguin ADN	Comprensió de l'organització ADN-cromosoma. No se separa entre gens i ADN. L'ADN està format per nucleòtids.
Transmissió física del material genètic	No es compren que es passen gens.	Es passa informació genètica, malgrat que no es comprengui l'estructura (ADN, gen, cromosoma). Poden aparèixer gens als gàmetes que no són als pares.	Distribució del 50% entre progenitors. No implica que el fill hagi de tenir una còpia de l'al·lel del pare.	Els gàmetes es formen en un procés seqüencial a la meiosi. Els gàmetes són haploides i pot haver-hi recombinació. No implica les parts de la meiosi.

Correlació genotip-fenotip	Els organismes tenen trets diferents intra i interespècie. Els trets s'hereten. No hi ha noció d'al·lels no expressats.	Es té consciència d'al·lels que no s'expressen i es compren la relació dominància-recessivitat.	Cada individu té dos al·lels per cada caràcter i tots dos estan relacionats en la producció del fenotip.	Hi ha diferents patrons d'herència: dominància-recessivitat, lligat al sexe, codominància.

Taula I1. Models d'estructuració de l'aprenentatge de la genètica, extret de Castro- Faix (Castro-Faix et al., 2021).

Anteriorment, ja s'ha mencionat que un dels principals temes que es tracta a la genètica d'ESO és la genètica mendeliana. En molts casos es tracta del primer contacte que tenen amb la genètica i pot suposar l'establiment de conceptes erronis o, com a mínim, sobresimplificats. Habitualment, la perspectiva històrica i el fet de representar l'ideal científic d'una persona que descobreix lleis de la natura partint de l'observació ajuden a pensar en Mendel com el model ideal per presentar la genètica. No obstant això, s'ha de tenir en compte que les lleis de Mendel són part d'un procés històric dins del coneixement de la genètica, però s'han demostrat massa simples per tractar la majoria dels caràcters. El fet que els fenotips vinguin determinats per un sol gen i que aquest tingui només dos al·lels amb una relació de dominància completa pot portar a dificultats en l'aprenentatge a l'hora de parlar dels efectes l'ambient o fins i tot dels caràcters lligats. Una proposta de millora alternativa a aquest model és començar amb la genètica molecular primer, aquest tipus d'ensenyament ha millorat en alguns casos la comprensió per part dels alumnes, però no sempre amb resultats significatius (Duncan et al., 2016; Kampourakis, 2021).

Aquest dilema no es limita a l'educació secundària, ja que fins i tot en models universitaris es continua reproduint en massa casos la mateixa problemàtica. És important remarcar que ja fa anys que això està canviant amb propostes molt més actualitzades on l'anàlisi genètica no és la base de l'aprenentatge o com a mínim va darrere de la molecular malgrat la manca de material i la resistència d'alguns professors (Redfield, 2012). Com a exemple positiu, la Universitat de Barcelona fa anys que imparteix primer l'assignatura de genètica molecular abans que la de genètica analítica als graus de la facultat de biologia.

Objectius

L'objectiu principal d'aquest treball és analitzar com estan dissenyats els materials educatius i com es treballa la genètica a l'ESO i al batxillerat a Catalunya. Per això es realitzaran les següents activitats:

- Anàlisi dels currículums nous i antics de les dues etapes educatives.
- Anàlisi comparativa de diferents llibres de text i altres materials educatius.
- Anàlisi de la idoneïtat de les diferents estratègies docents per impartir la genètica així com l'ordre i el contingut en què es tracten les diferents branques del coneixement: bioquímica, genètica mendeliana, genètica molecular, aplicacions (enginyeria genètica i biotecnologia), epigenètica...
- Anàlisi de l'adequació dels continguts curriculars que permetin generar propostes de millora pel que fa a continguts, materials i seqüenciació.
- Discussió d'estratègies docents per a introduir els nous reptes bioètics que plantegen els avenços en el camp de la genètica.

Metodologia de recerca

Aquest treball final de màster s'emmarca en la modalitat de recerca, és per això que el marc teòric s'ha basat en la recopilació de publicacions de didàctica de la biologia, de la genètica en la població i de la docència en general. A més s'han analitzat els currículums i diversos llibres de text actuals per veure com es tracta a nivell legal i pràctic la docència de la genètica.

Els currículums de Catalunya analitzats han estat extrets de la pàgina del XTEC i s'ha treballat amb els tres últims disponibles per a l'ESO (175/2022, 187/2015, 143/2007) i els dos últims de batxillerat (171/2022, 142/2008) i s'ha revisat tant els sabers/continguts com les competències de la matèria de biologia i geologia d'ESO i de biologia, biomedicina i reptes científics de batxillerat. De la mateixa forma s'ha analitzat la llei estatal, la LOMLOE, extreta del BOE (2020-17264 del 30 de desembre del 2020) i els decrets de totes les comunitats autònomes de l'estat extrets de les pàgines dels corresponents departaments d'educació.

Els llibres de text han estat cedits per les diferents editorials i únicament s'han analitzat els que hi havia disponibles per al nou currículum corresponents a primer i tercer d'ESO i primer de batxillerat de les editorials Teide, Santillana i Vicens Vives.

A més s'ha consultat els dos professors de biologia del centre on vaig fer la meva estada a les pràctiques I i II i considerat les experiències viscudes durant aquestes que inclouen una situació d'aprenentatge per a la genètica de quart d'ESO.

Resultats

Anàlisi del currículum

La genètica és un tema central en l'ensenyament de la biologia, però que, en moltes ocasions, es reserva pels cursos superiors de la secundària. Als darrers currículums el gruix de la matèria es troba a quart d'ESO i segon de batxillerat, la qual cosa fa que els alumnes que no escullen la matèria optativa de biologia i geologia a quart acabin la seva educació obligatòria sense tenir coneixements bàsics sobre el tema. Malgrat això, alguns conceptes van apareixent prèviament en altres temes de la matèria, en molts casos sense cap mena de context. Les diferents reformes educatives que s'han realitzat els darrers anys tant a Espanya com a Catalunya, han anat modificant els continguts i els models educatius. En els últims 15 anys hi ha hagut tres currículums d'ESO i dos de batxillerat que s'analitzaran a continuació.

Sabers

L'evolució al currículum d'ESO (Taula R1), ens mostra una disminució del nombre de sabers, però amb un redactat més obert que permet major flexibilitat del centre i del docent. Aquesta tendència és coherent amb l'evolució de l'ensenyament cap a currículums més competencials i basats en projectes que han de ser necessàriament oberts. Concretament, els canvis en els sabers es troben d'acord amb l'evolució de la genètica als darrers anys on casos com les anàlisis de cariotips han perdut importància. Es mantenen els blocs bàsics del que es podria resumir en conceptes bàsics, genètica mendeliana i mitosi i meiosis. No obstant això, destaca la pèrdua en el nou currículum d'un dels elements on més s'ha evolucionat aquests darrers anys, l'enginyeria genètica i la biotecnologia. Com ja s'ha comentat anteriorment, el gruix recau al quart curs, sent la reproducció a tercer l'únic altre moment on es tracten temes de genètica.

ESO (143/2007)	
Segon	Reproducció sexual i l'asexual, descendents genèticament idèntics o diferents del seu progenitor
Tercer	Reproducció humana transferència de material genètic dels caràcters hereditaris i cicle biològic
Quart	Caràcters hereditaris i no hereditaris

	Definició de fenotip i concepte de gen Les cèl·lules com a vehicle de transmissió dels caràcters hereditaris Els cromosomes com a transmissors de la informació genètica: composició, estructura i funcions Mitosi i meiosi Conceptualització de les mutacions Anàlisi d'un cariotip Teoria cromosòmica de l'herència i transmissió dels caràcters hereditaris Determinació cromosòmica del sexe Resolució de problemes relacionats amb l'herència i amb l'herència del sexe Diagnòstic prenatal Aproximació històrica a la genètica fins al projecte genoma humà Enginyeria genètica (transgènics, clonació i genoma humà) i les seves repercussions
ESO (187/2015)	
Tercer	La reproducció com a transferència de material genètic.
Quart	ADN: Composició, estructura i funcions biològiques Caràcters hereditaris i no hereditaris. Genotip i fenotip. Mitosi i meiosi: Els cromosomes i el cicle cel·lular. Teoria cromosòmica de l'herència i herència mendeliana Malalties hereditàries (diagnòstic prenatal) Les mutacions Anàlisi de cariotips Enginyeria genètica (transgènics, clonació i genoma humà) i les seves repercussions Herència lligada al sexe Determinació cromosòmica del sexe
ESO (175/2022)	
Tercer	Relació entre el material genètic i les funcions
Quart	Estructura de l'ADN i de l'ARN: funció i síntesi Material genètic i característiques observables expressió gènica, genotip i fenotip Mitosi i meiosis cicle cel·lular Problemes de genètica mendeliana: dominància (inclou incompleta), al·lelisme múltiple i lligada al sexe Investigació herència de malalties genètiques Mutacions, biodiversitat i processos evolutius.

Taula R1. Sabers de la matèria de biologia i geologia relacionats amb la genètica durant la ESO dividit en cursos segons els diferents decrets.

En el cas del batxillerat, el fet de no haver-se canviat el currículum durant 14 anys fa que el canvi sigui molt més sobtat. En primer lloc, hi ha una gran reorganització, ja que tota la genètica passa al segon curs, mentre que abans es dividia entre genètica molecular (primer) i problemes i aplicacions (segon). Aquest canvi ve marcat, en part, per les proves d'accés a la universitat (PAU), on es determina que només es pot avaluar el contingut de segon curs. D'altra banda, s'han creat dues assignatures optatives que permeten aprofundir en alguns conceptes de genètica, encara que queda explícit en els sabers, com són biomedicina i reptes científics. L'aparició d'aquestes matèries optatives suposa un repte doncs podem trobar alumnes sense una bona base a biologia matriculats a l'hora que alguns dels alumnes que fan la matèria de biologia poden no haver-la escollit.

A nivell de sabers (Taula R2), sí que hi ha una gran incorporació de nous conceptes com expressió gènica que obre la porta a parlar d'epigenètica i desenvolupament. S'actualitza també l'apartat d'enginyeria genètica, eliminat de quart d'ESO, amb tècniques actuals com és el cas del CRISPR. La resta de sabers es mantenen, essent els nous respecte a l'ESO, principalment els coneixements sobre genètica molecular. La resta són essencialment continuacions, reforç i ampliació de la genètica mendeliana treballada a quart i la mitosi i meiosis.

Batxillerat (142/2008)	
Primer	Expressió gènica i fenotip Àcids nucleics i proteïnes, a escala molecular (duplicació de l'ADN, transcripció i traducció) Model d'herència aplicat a situacions concretes (problemes un sol caràcter i lligat al sexe) Cicle cel·lular (mitosi i meiosis) i càncer
Segon	Cicles vírics: transcripció, traducció i replicació del material hereditari Microorganismes en processos industrials (transgènesis i resistència a antibiòtics) Problemes de monohibridisme i dihibridisme en casos d'herència autosòmica i lligada al sexe Evolució com un canvi en la freqüència gènica, problemes senzills de genètica quantitativa Biodiversitat: variabilitat genètica, mutacions i recombinació genètica

Batxillerat (171/2022)	
Primer	Organització cel·lular, els processos bàsics que esdevenen a la cèl·lula
Segon	Característiques químiques, estructura i funció dels diferents tipus d'àcids nucleics Model procariota: replicació, expressió gènica i característiques del codi genètic (problemes) Cicle cel·lular (mitosi i meiosis) i càncer La importància de la regulació de l'expressió gènica en la diferenciació cel·lular Característiques generals del genoma i de l'expressió gènica en procariotes i eucariotes Enginyeria genètica (PCR, enzims de restricció, clonació molecular, CRISPR...) i aplicacions Resolució de problemes de monohibridisme i dihibridisme (autosòmica i lligada al sexe) Evolució com un canvi en la freqüència gènica (problemes senzills de genètica quantitativa) Relació entre les mutacions, la replicació de l'ADN, l'evolució i la biodiversitat.

Taula R2. Sabers de la matèria de biologia i geologia durant el batxillerat dividit en cursos segons els diferents decrets.

Respecte a l'actualització de sabers, és important tenir present que la genètica és un dels camps de la biologia on més avenços i novetats s'han produït a les darreres dècades. Pel nivell científic i les mateixes polítiques educatives no sempre és fàcil seguir el ritme a les escoles. Els canvis de llei d'educació estatal i de currículums a Catalunya obren la porta a modificacions dels sabers encara que, malauradament, en molts casos no s'hi incorporen les noves tecnologies. De fet, la *Sociedad Española de Genética* no ha rebut cap contacte, segons el seu president i la vocal de docència (comunicació personal), per part del ministeri d'educació per redactar la LOMLOE. Tampoc té constància de cap contacte per part del departament d'educació el responsable de la secció d'ensenyament de la Societat Catalana de Biologia que pertany a l'Institut d'Estudis Catalans (comunicació personal). Aquest problema no és un cas especial del nostre territori, un estudi que va analitzar el currículum dels 50 estats i el districte de Columbia dels Estats Units que comparteixen un marc similar va establir que un 85% suspenien pel que fa a la incorporació de nous descobriments o tècniques, fins i tot sense tenir en compte conceptes considerats massa complexos com els ARN o l'epigenètica (Dougherty et al., 2011). A més en un altre estudi es va comprovar la preponderància dels coneixements "clàssics" la genètica mendeliana i l'estructura de l'ADN (McElhinny et al., 2014). Per tant, gran part del coneixement no arriba a la docència de secundària i es perd abans de fer el que s'anomena transposició didàctica, és a dir,

entrar a les aules i als currículums en contraposició al conegut com a popularització, on és la societat i l'alumnat el que s'apropia d'ells (Lombard & Weiss, 2018). En aquest procés s'ha de donar necessàriament una simplificació filtrada en un primer moment pel procés de publicació a revistes científiques, posteriorment pels legisladors i finalment pel professorat. Aquest conjunt d'etapes fa que els nous conceptes no siguin aleatoris sinó que es fomenten aquells que tenen una estructura concreta (facilitat d'ensenyar, possibilitat de fer exercicis, accessibilitat de mitjans i aprenentatge dels alumnes). Alguns d'aquests conceptes han aconseguit complir tots els paràmetres i, malgrat deixar de ser vàlids en el món de la recerca, es mantenen als currículums com ara la genètica mendeliana, la classificació en cinc regnes o els mapes de sabors de la llengua.

Competències

Els sabers fan referència als coneixements teòrics, però des de fa temps els currículums educatius giren entorn de les competències, és a dir la capacitat que té l'alumne per realitzar tasques, pensar diferent o entendre els conceptes. En aquest sentit, hi ha sempre unes competències transversals a l'ensenyament i unes altres pròpies de les matèries o àmbits anomenades competències específiques (CE). És difícil focalitzar les competències pròpies de la genètica, però la gran majoria de les competències de l'assignatura de biologia i geologia estan implicades d'alguna manera en el coneixement de la genètica. A la introducció ja s'ha parlat del canvi de model educatiu on es prioritzen les competències. A la taula R3 es poden veure les competències d'ESO i, marcades en negreta, les que poden estar relacionades amb la genètica i en les que pràcticament no hi ha més canvis que la redacció en els tres currículums. Cal dir que al currículum de l'any 2015 no hi ha unes competències pròpies de la matèria, si no de l'àmbit cientificotecnològic de les quals s'han extret les més afins a la biologia i la genètica.

Per una banda, sembla estrany que no hi hagi canvis significatius, però, d'altra banda, es pot explicar pel redactat ampli que es fa i que es refereix principalment al mètode científic i l'anàlisi de dades. Sí que hi ha hagut una millora en la complexitat o el detall d'aquestes competències específiques en el redactat del darrer currículum que dona una visió més completa i que inclou alguns conceptes nous com el pensament computacional. Aquesta frase obre la porta a treballar una de les mancances més grans en la docència de la biologia que és tot el ventall d'eines bioinformàtiques, omnipresents en el món de la recerca i especialment en l'àmbit de la genètica, on trobem totes les anomenades òmiques (genòmica, epigenòmica, proteòmica...). Si bé no és

viable que els alumnes aprenguin a treballar amb elles, sí que haurien de conèixer la seva existència, la importància que tenen i saber l'ampli ventall de possibilitats que ofereixen.

ESO 143/2007
Pensar científicament a partir de construir i utilitzar versions elementals, però complexes dels grans models de la ciència. Proporcionar estratègies útils per descriure els fenòmens relacionats amb problemes socialment rellevants, per explicar-los i per fer prediccions.
Analitzar i donar resposta a problemes contextualitzats, a partir de plantejar-se preguntes investigables científicament trobar evidències de les explicacions inicials elaborades, de posar en pràctica el procés de recerca d'aquestes evidències, de deduir conclusions i d'analitzar-les críticament.
Pensar de manera autònoma i creativa, tot assumint que el coneixement científic evoluciona a partir de la recerca d'evidències i també de les discussions sobre les maneres d'interpretar els fenòmens.
Comunicar en llenguatge científic les dades, les idees i les conclusions fent servir diferents modes comunicatius, i argumentar-les tenint en compte punts de vista diferents del propi.
Comprendre textos de contingut científic de diferents fonts, posar de criteris per analitzar-los críticament.
Fer servir el coneixement científic per argumentar de manera fonamentada i creativa les actuacions com a ciutadans i ciutadanes responsables, especialment les relacionades amb la gestió sostenible del medi, la salut pròpia i la comunitària, i l'ús d'aparells i materials en la vida quotidiana.
ESO 187/2015
CE 2: Identificar i caracteritzar els sistemes biològics i geològics des de la perspectiva dels models, per comunicar i predir el comportament dels fenòmens naturals.
CE 4: Identificar i resoldre problemes científics susceptibles de ser investigats en l'àmbit escolar, que impliquin el disseny, la realització i la comunicació d'investigacions experimentals.
CE 5: Resoldre problemes de la vida quotidiana aplicant el raonament científic.
CE 6: Reconèixer i aplicar els processos implicats en l'elaboració i validació del coneixement científic.
CE 10: Prendre decisions amb criteris científics que permetin preveure, evitar o minimitzar l'exposició als riscos naturals.
CE 11: Adoptar mesures amb criteris científics que evitin o minimitzin els impactes mediambientals derivats de la intervenció humana.

CE 12: Adoptar mesures de prevenció i hàbits saludables en l'àmbit individual i social, fonamentades en el coneixement de les estratègies de detecció i resposta del cos humà.
CE 13: Aplicar les mesures preventives adequades, utilitzant el coneixement científic en relació amb les conductes de risc i malalties associades al consum de substàncies addictives.
CE 14: Adoptar hàbits d'alimentació variada i equilibrada que promoguin la salut i evitin conductes de risc, trastorns alimentaris i malalties associades.
CE 15: Donar resposta a les qüestions sobre sexualitat i reproducció humanes, a partir del coneixement científic, valorant les conseqüències de les conductes de risc.
ESO 175/2022
CE 1: Interpretar fenòmens de la naturalesa, predient i argumentant el seu comportament a partir de models, lleis i teories propis de la biologia i la geologia per apropiar-se de conceptes i processos propis de la ciència.
CE 2: Identificar, seleccionar, organitzar i avaluar críticament dades i informació, contrastant-ne la fiabilitat per resoldre preguntes relacionades amb la biologia i la geologia i descartar solucions pseudocientífiques.
CE 3: Dissenyar, desenvolupar i comunicar el plantejament i les conclusions de recerques dins de l'àmbit escolar, incloent-hi la formulació de preguntes i d'hipòtesis i la seva contrastació experimental, seguint els passos de les metodologies pròpies de la ciència, com l'experimentació i la cerca d'evidències, cooperant quan calgui, per indagar en aspectes relacionats amb la biologia i la geologia.
CE 4: Fer servir diverses formes de raonament, com el pensament hipoteticodeductiu i el pensament computacional, per resoldre problemes o donar explicació a fenòmens naturals i processos de la vida quotidiana relacionats amb la biologia i la geologia, mitjançant l'anàlisi crítica de les respostes i solucions i reformulant el procediment, si fos necessari.
CE 5: Analitzar els efectes de determinades accions sobre el medi ambient i la salut, basant-se en els fonaments de les ciències biològiques i geològiques, per fer propostes d'acció i per decidir de manera informada sobre problemàtiques actuals i adoptar hàbits que minimitzin els impactes mediambientals, que siguin compatibles amb un desenvolupament sostenible i que permetin mantenir i millorar la salut individual i col·lectiva.
CE 6: Analitzar els elements del paisatge, utilitzant de forma integrada els coneixements procedents de la biologia, la geologia i les ciències ambientals per explicar-ne l'origen i la possible evolució, així com les característiques de la comunitat d'organismes, la dinàmica del relleu i els possibles riscos naturals.

Taula R3. Competències de l'assignatura de biologia i geologia durant l'ESO dels diferents decrets. Marcades en negreta les relacionades amb la genètica.

Pel que fa a les competències de batxillerat (Taula R4), es veu un increment important en el número (de tres passem a sis, encara que una només fa referència al medi ambient). Aquest canvi provoca la inclusió de molts matisos. Es manté la competència lligada a la recerca escolar, però en les altres competències trobem canvis. Si en el currículum antic es parlava d'epistemologia de la ciència de forma abstracta, a l'actual es desdobla en dues competències amb molt més contingut en la CE 1 i la CE 2, que inclouen interpretar dades, argumentar i analitzar treballs aliens i també la selecció d'informació per respondre preguntes. Finalment, mentre que el decret antic proposava una competència amb una visió clàssica de la ciència com la comprensió del món (i la possibilitat d'actuar); el decret nou planteja dues competències on es dona molta més importància a l'acció i l'aplicació. En conclusió, sí que hi ha un canvi important de paradigma pel que fa a les competències del batxillerat cap a una visió molt més aplicada i on es dona més protagonisme a l'estudiant.

Batxillerat 142/2008
Indagació i experimentació: portar a terme una investigació en el context de la ciència escolar
Comprensió de la naturalesa de la ciència: desenvolupament alhora d'una comprensió epistemològica de la naturalesa de la ciència i de la construcció del coneixement científic
Comprensió i capacitat d'actuar sobre el món físic: apropiar-se dels conceptes fonamentals, models i principis de la ciència per utilitzar-los en explicacions argumentades, en prediccions donar compte dels fets observats i per prendre decisions informades
Batxillerat 171/2022
CE 1: Interpretar, comunicar informació i dades procedents de treballs científics, i argumentar, per analitzar conceptes, processos, mètodes, experiments o resultats.
CE 2: Identificar, seleccionar, organitzar i avaluar críticament informació, contrastant-ne la fiabilitat per resoldre preguntes plantejades de manera autònoma i crear continguts.
CE 3: Dissenyar i desenvolupar projectes de recerca i analitzar críticament els resultats d'aquests projectes i de treballs d'investigació i divulgació, comprovant si segueixen els passos de la metodologia científica, per avaluar la fiabilitat de les conclusions.
CE 4: Aplicar els aprenentatges de manera integrada i les diverses formes de raonament pròpies de la ciència, per plantejar i resoldre problemes, analitzant críticament les solucions i reformulant el procediment, si calgués.
CE 5: Dissenyar, promoure i executar iniciatives de conservació del medi ambient basades en fonaments científics i analitzar els impactes d'activitats humanes a partir d'observacions de

camp i d'informació en diferents formats per promoure i adoptar hàbits compatibles amb el desenvolupament sostenible.
CE 6: Descriure, integrar i relacionar els principals processos característics dels éssers vius per justificar la complexitat de la vida i desmarcar-la del que és inert.

Taula R4. Competències de l'assignatura de biologia i geologia relacionats amb la genètica durant el batxillerat dels diferents decrets. Marcades en negreta les relacionades amb la genètica.

Els canvis dels darrers currículums venen motivats pel canvi de llei d'educació estatal a la LOMLOE (BOE-A-2020-17264). En aquesta llei que serveix de marc per a les diferents lleis autonòmiques, no específica els sabers, però sí les competències. En el cas de l'ESO veiem que les competències de Catalunya són exactament les mateixes que les estatals (Taula R5). En canvi, a batxillerat sí que trobem diferències significatives, en especial és destacable una competència molt diferent de la normativa catalana de separar matèria inerta i viva (CE 6, taula R4) enfront de l'espanyola on es focalitza la importància de bioquímica en trets macroscòpics (CE 6, taula R5).

LOMLOE ESO
CE 1 Interpretar i transmetre informació i dades científiques, argumentant-los fent-los servir per analitzar conceptes i processos biològics
CE 2 Identificar, localitzar i seleccionar informació, contrastant la veracitat, organitzant-la i avaluant-la críticament per resoldre preguntes relacionades amb la biologia
CE 3 Planificar i desenvolupar projectes d'investigació, seguint el mètode científic, cooperant, per indagar sobre aspectes relacionats amb la biologia.
CE 4 Fer servir el raonament i pensament computacional, analitzant críticament les respostes i solucions, reformulant el procediment per resoldre problemes o donar explicacions a processos quotidians relacionats amb la biologia
CE 5 Analitzar els efectes d'accions sobre la salut, basant-se en els fonaments de la biologia per promoure i adoptar hàbits saludables individuals i col·lectius
CE 6 Analitzar els elements d'un paisatge concret valorant-lo com a patrimoni natural i utilitzant coneixements sobre geologia i ciències de la Terra per a explicar la seva història geològica, proposar accions encaminades a la seva protecció i identificar possibles riscos naturals

LOMLOE Batxillerat
CE 1 Interpretar i transmetre informació i dades científiques a partir de treballs científics, argumentant-los de forma precisa i fent-los servir per analitzar conceptes, processos, mètodes, experiments o resultats biològics
CE 2 Localitzar i fer servir fonts fiables, identificant, seleccionant i organitzant la informació, avaluant-la críticament i contrarestant la veracitat per resoldre preguntes plantejades de forma autònoma i crear contingut relacionats amb la biologia.
CE 3 Analitzar treballs de recerca o divulgació relacionats amb la biologia, comprovant amb sentit crític la veracitat o si segueixen el mètode científic per avaluar la fiabilitat de les conclusions.
CE 4 Plantejar i resoldre problemes buscant i fent servir estratègies adients analitzant críticament les solucions i reformulant el procediment si fos necessari per explicar fenòmens relacionats amb la biologia.
CE 5 Analitzar críticament els efectes d'accions sobre la salut, basant-se en els fonaments de la biologia molecular per argumentar la importància de promoure i adoptar hàbits saludables individuals i col·lectius
CE 6 Analitzar la funció de les principals biomolècules, bioelements i les estructures i interaccions bioquímics, argumentant sobre la importància als éssers vius per explicar les característiques macroscòpiques a partir de les moleculars.

Taula R5. Competències específiques de la matèria de biologia i geologia d'ESO i de biologia de batxillerat de la LOMLOE.

Aprofitant les similituds que hi ha entre l'alumnat espanyol, però les diferents legislacions es van analitzar les competències en l'àmbit de comunitats autònomes. El resultat és força clar, ja que exceptuant Andalusia i Euskadi que encara no han actualitzat el currículum a la LOMLOE, la resta de comunitats es dediquen, igual que a Catalunya, a transposar les competències de la LOMLOE i com a molt reforçar el context territorial en la sisena competència específica que està relacionada amb la geologia. Destaca positivament el decret valencià (Taula R6) que és l'únic diferent i que presenta fins a 10 competències específiques. Sense treure les sis competències de la LOMLOE, les fa més concretes i detallades, dividint algunes i incorporant d'altres, algunes de les quals no tenen relació amb la genètica. En aquest sentit, es remarca la importància de la igualtat de gènere i la conservació d'espècies, cosa que, indirectament es pot tractar amb la genètica al parlar de determinació cromosòmica del sexe o la importància de la variabilitat genètica en les poblacions i fins i tot els usos biotecnològics de les espècies.

Decret ESO Generalitat valenciana
Resoldre problemes científics abordables en l'àmbit escolar a partir de treballs d'investigació de caràcter experimental.
Analitzar situacions problemàtiques reals utilitzant la lògica científica i explorant les possibles conseqüències de les solucions proposades per a afrontar-les.
Utilitzar el coneixement científic com a instrument del pensament crític, interpretant i comunicant missatges científics, desenvolupant argumentacions i accedint a fonts fiables, per a distingir la informació contrastada de les notícies falses i opinions.
Justificar la validesa del model científic com a producte dinàmic que es va revisant i reconstruint sota la influència del context social i històric, atenent la importància de la ciència en l'avanç de les societats, així com els riscos d'un ús inadequat o interessat dels coneixements i les seues limitacions.
Adoptar hàbits de vida saludable basats en el coneixement del funcionament del propi cos, i dels perills de l'ús i l'abús de determinades pràctiques i del consum d'algunes substàncies.
Identificar i acceptar la sexualitat personal, i respectar la varietat d'identitats de gènere i d'orientacions sexuals existents, sobre la base del coneixement del cos humà i del propi cos.
Actuar amb responsabilitat i participar activament en la conservació de totes les formes de vida i del planeta sobre la base del coneixement dels sistemes biològics i geològics.
Decret batxillerat Generalitat valenciana
Explicar fenòmens i resoldre problemes relacionats amb les ciències biològiques, utilitzant metodologies pròpies del treball científic.
Localitzar i seleccionar informació procedent de diferents fonts, analitzant-la críticament
Comunicar informació i dades sobre qüestions de naturalesa biològica, argumentant amb precisió i aplicant diferents formats.
Identificar i explicar les característiques dels éssers vius a partir de l'anàlisi dels seus components moleculars i microscòpics, dels mecanismes d'intercanvi de matèria i energia a nivell cel·lular i de la transmissió dels caràcters hereditaris.
Relacionar les característiques dels microorganismes amb la seua participació en diferents processos naturals i industrials i amb l'origen de les malalties infeccioses.

Taula R6. Competències específiques de la matèria de biologia i geologia d'ESO (decret 107/2022) i de biologia de batxillerat (decret 108/2022) de la Generalitat valenciana relacionades amb la genètica.

Per tancar aquest apartat, mereix una menció especial el fet que a Catalunya tant a l'ESO com al batxillerat es fomenta la recerca mitjançant el projecte de recerca i el treball de recerca que permeten a l'estudiant integrar diverses competències científiques malgrat que la temàtica pugui estar enfocada cap a altres àmbits.

Anàlisi dels llibres de text

L'educació de les últimes dècades ha tingut com a eina de referència el llibre de text, encara que trobem cada cop més centres que opten per treballar amb materials alternatius. Els llibres de text intenten donar una base teòrica i excercicis adaptant-se a les especificitats del currículum. Per una banda, contenen molts recursos i informació, però en cap cas s'adapten al context o a l'alumnat, els seus coneixements previs o l'evolució del grup classe. A més, els llibres poden contenir errors o mostrar models antics, en aquest sentit cal destacar una metaanàlisi amb llibres suecs (11), anglesos (2), australians (2), americans (1) i brasilers (18) (N. M. Gericke et al., 2014). En aquest estudi es van trobar fins a cinc models diferents del concepte de gen (mendelià, clàssic, bioquímic-clàssic, neoclàssic i modern), alguns dels quals es basen en el model mendelià on un gen implica un tret i aquest no té estructura, o en models clàssics totalment deterministes (un gen, una funció). Aquest nivell de variabilitat o fins i tot d'incoherència no ajuda al bon coneixement de la genètica. Un altre estudi a petita escala de tres llibres holandesos recalcava la falta de connexió entre la divisió cel·lular i la genètica així com la inconsistència a l'hora de fer servir el vocabulari més tècnic i els nivells d'organització (al·lels, gens, individus) (Knippels et al., 2005). Finalment, un estudi centrat en la presència del determinisme genètic en 50 llibres (11 de francesos i 7 d'italians i menys de quatre dels altres països) de 16 països europeus a més del Marroc, Líban, Tunis i el Senegal (Castera et al., 2008). La presència de conceptes com programa genètic o l'èmfasi en els bessons univitel·lins ressaltant similituds són comunes en molts dels llibres, deixant poc espai per l'efecte ambiental. És destacable el factor històric d'aquests resultats com es pot veure en el fet que ni Alemanya ni Itàlia tenen llibres on es parli de programa genètic segurament degut al seu passat feixista lligat a l'eugenèsia; tampoc en fan refèrencia els antics membres de l'URSS en aquest cas atribuït a les teories errònies de Lyssenko.

A nivell espanyol hi ha un gran estudi sobre llibres de text, on es van analitzar 34 llibres diferents (Martínez-Gracia et al., 2006). L'estudi data de l'any 2006, però els llibres analitzats van ser publicats entre el 1997 i 2001 i mostra moltes carències a l'hora de tractar diversos aspectes importants. Els llibres corresponen a quart d'ESO i els dos cursos de batxillerat on es concentra la genètica. L'estudi observa una sobresimplificació en els dos primers cursos on ni tan sols es

parla de conceptes bàsics com l'ARN o de la transcripció. Els llibres de segon de batxillerat si mencionen transcripció i traducció, però pocs parlen del control de l'expressió o de que el codi genètic és universal.

Hi ha un altre estudi sobre una situació d'aprenentatge a Galícia que analitza en cinc llibres el tractament del determinisme genètic en un context on s'intenta estudiar com evitar prejudicis racistes. Els resultats són força positius amb quatres dels cinc llibres descrivint el fenotip com la barreja del genotip amb la influència de l'ambient. Tots ells posen com a mínim un exemple d'efectes ambientals i fins i tot dos tracten obertament el determinisme genètic (Puig & Jiménez-Aleixandre, 2011).

Finalment, un anàlisi de llibres més antics (amb les legislacions de 1992 i de 2002) mostra una gran heterogeneïtat tant en la seqüenciació com en el tractament de la informació i dels efectes ambientals, però tots tenien mancances importants en tractar temes estructurals (ADN, gen, cromosoma) així com en la relació entre meiosi i herència (Iñiguez Porras, 2006).

Per tal de veure com es presenta als alumnes la matèria, es va considerar adient analitzar diversos llibres de text adaptats al nou currículum. Aquesta selecció fa que només es disposi de llibres de primer i tercer d'ESO i de primer de batxillerat, on segons el currículum els conceptes de genètica són gairebé residuals. Es van analitzar llibres de tres editorials a ESO (Santillana, Vicens Vives i Teide) i dues a batxillerat (Santillana i Teide).

Primer d'ESO

Al llibre de Teide es menciona el concepte de material genètic a l'hora de parlar de la reproducció. Se'ns presenta així la reproducció sexual com a positiva, ja que permet l'intercanvi genètic, mentre que l'asexual genera individus genèticament idèntics. Es parla també de material hereditari (ADN) quan es presenten les diferències entre les cèl·lules eucariotes i les procariotes.

Al llibre de Vicens Vives tornem a veure el concepte de material genètic al parlar de les diferències entre cèl·lules eucariotes i procariotes així com per parlar de reproducció sexual i asexual. En aquest punt s'ha de destacar que es defineix l'ADN com la "substància" que porta la informació i que controla el funcionament de la cèl·lula.

Tercer d'ESO

A tercer d'ESO el temari tracta la reproducció de forma extensa el que dona peu a parlar de nou de material genètic i com trobem al llibre de Teide i Vicens Vives, la definició cromosòmica del sexe. Es presenten l'òvul i l'espermatozou com a portadors d'informació genètica.

Es torna a parlar de diferències entre cèl·lules procariotes i eucariotes i en aquest s'aprofundeix una mica més en el que és l'ADN, amb algunes imatges de la doble hèlix i fins i tot es presenta l'ARN com a un altre àcid nucleic.

Primer de batxillerat

L'antic currículum presentava la genètica de batxillerat dividida entre els dos cursos, fent a primer la part bioquímica i molecular i fent un repàs als conceptes de genètica mendeliana de quart d'ESO amb un sol caràcter i la possibilitat que fossin lligats al sexe. Es deixava per a segon el gruix dels problemes, el rol de la genètica en l'evolució i la biodiversitat i l'enginyeria genètica i biotecnologia.

El nou currículum mou tota la genètica al segon curs i deixa una porta amb el concepte: "Organització cel·lular, els processos bàsics que esdevenen a la cèl·lula". Sembla lògic introduir l'ADN i l'ARN si s'ha de parlar de síntesi proteica. Teide presenta els àcids nucleics i torna a parlar del concepte de material genètic al parlar de la cèl·lula i de l'origen de la vida.

Santillana per la seva banda dedica un capítol sencer a les proteïnes i els àcids nucleics i dona molts detalls fins i tot d'estructura del nucli i cromatina, temes que estan fora de currículum fins i tot a segon.

Experiències docents

L'estada al centre de pràctiques m'ha permès la interacció amb alumnes i amb els dos professors de biologia del centre (un encarregat d'ESO i l'altre de batxillerat) així com fer la situació d'aprenentatge en el tema de genètica de quart d'ESO. Aquesta experiència fora del marc teòric i legal analitzat anteriorment ha donat lloc a diferents observacions. En primer lloc, cal destacar que els dos docents em van advertir de la dificultat de molts alumnes en comprendre realment els problemes de genètica mendeliana, que havia estat la base de treball habitual. En aquest sentit, es retroalimenta una greu manca de comprensió lectora, que en dificulta la resolució,

amb la mecànica d'estudi de molts estudiants que es basa en memoritzar mètodes de resolució com ja s'ha comentat a la introducció (G. E. Ayuso et al., 1996).

La introducció del nou currículum no ha suposat un gran canvi a nivell d'ESO, però sí pel batxillerat. En aquest sentit, l'estructura antiga on es feia la genètica molecular juntament amb tota la bioquímica de glícids, lípids i proteïnes permetia, en opinió del professor de batxillerat, una explicació més global del funcionament de la cèl·lula. La forma del professor de batxillerat d'abordar aquesta part del temari era mitjançant un projecte de ciència en context, projecte en el qual té 28 anys d'experiència, que implicava la fibrosi quística com a element vertebrador i que es podria adaptar perfectament a l'estructura de les noves situacions d'aprenentatge. La separació actual ha dificultat aquest procés i aquest any de transició ha hagut de recórrer a un model de classe molt més magistral.

Per la situació d'aprenentatge de les pràctiques II es va optar per començar per la genètica molecular amb la intenció de posar una base més sòlida amb un estímul important fent una precipitació de l'ADN de cada alumne. Malgrat els esforços, no va ser possible que tots els alumnes aconseguissin una base prou sòlida. Els alumnes sí que acostumen a participar quan es parla de malalties que coneixen o de caràcters observables la qual cosa fa que tinguin una motivació extra a l'hora de resoldre'n problemes relacionats. La llibertat d'escollir alguna síndrome genètica per exposar a classe va ajudar al seu interès. Per acabar, es va tancar la situació d'aprenentatge tractant diverses eines (seqüenciació, PCR, enzims de restricció i CRISPR) i tècniques bàsiques de l'enginyeria genètica (expressió de proteïnes recombinants, clonació i transgènesis) contemplades als currículums. La introducció de situacions amb una alta càrrega bioètica va promoure el debat i, probablement, un aprenentatge més significatiu al haver-hi un component social com ja ha estat descrit a la bibliografia (Puig & Jiménez-Aleixandre, 2011). En aquest cas la idea original era tractar les conseqüències del cultiu de transgènics, però el gran interès mostrat per l'alumnat en la possible clonació humana i l'alarmant falta de conceptes bioètics van fer que es canvies de tema. Al deixar que investiguessin de forma autònoma es va permetre una recerca de fonts d'informació i a la sessió de debat els arguments van tenir una base científica generalment sòlida.

Recerca i educació

Un dels camps on hi ha més marge de millora i potencial aprenentatge és en la comunicació i interacció entre l'educació secundària i el món de la recerca. Aquest diàleg pot tenir molts beneficis pels alumnes, fent que vegin la seva recerca com real i útil, fomentar la competència transversal d'aprendre a prendre, a més de suposar una experiència que els pot marcar de per vida i que recorden durant molt de temps (Dorfman et al., 2020). No només suposa una millora en l'educació, ja que des del món de la recerca, massa cops tancat als laboratoris, suposa una forma d'obrir-se a la societat i de fer visible la seva importància, el que ajudarà a posar en valor la seva feina en les noves generacions. En aquest sentit, les noves tecnologies ofereixen un marc immillorable per a poder posar en contacte centres de recerca amb instituts. Ara mateix estem en condicions d'estalviar-nos una de les barreres més grans que hi ha, el desplaçament de l'alumnat als laboratoris, que suposa un coll d'ampolla pel que fa a temps i espai. Un bon exemple és una experiència realitzada en la recerca de gens responsables de resistències bacterianes als antibiòtics que, mitjançant un robot, ha permès a més de catorze centres d'Israel i dels Estats Units ajudar en el seguiment i modificació d'assajos a gran escala implicant més de 200 alumnes, durant un període de deu dies. Aquest projecte ha fet que molts estudiants tinguin contacte amb la ciència real no tot està controlat i es fan servir elements transversals (microbiologia, genètica i evolució). Durant l'experiència han d'aprendre a adaptar-se (modificant tractaments), col·laborar (mitjançant reunions i fulls de càlcul compartits), analitzar resultats (propis i aliens) i prendre decisions constantment (Dahan et al., 2019). En un altre exemple que porta la implicació de l'alumnat un pas més enllà, es va treballar amb *Arabidopsis thaliana* la qual cosa va permetre als estudiants manipular mostres *in situ* i no quedar-se només en eines computacionals. En aquest projecte es van sotmetre plantes normals (*wild type*) i amb gens deplecionats (*knock-out*) a diferents condicions, per entendre millor el funcionament de determinats gens pels quals encara no es tenia constància d'un efecte clar per manca de fenotip en condicions de creixement normals. L'experiència amb més de 12000 alumnes americans de 60 instituts diferents es va dur a terme durant diversos anys amb resultats molt satisfactoris, ja que els alumnes es prenen la recerca com a pròpia i fins i tot plantejaven qüestions que havien obviat els científics (Dolan et al., 2008).

Les eines computacionals suposen la base de molta de la recerca genètica que es fa actualment, moltes d'elles són d'accés obert mitjançant plataformes web, donada la disponibilitat i la senzillesa d'algunes d'elles poden suposar una bona forma d'introduir-se en el món de la bioinformàtica amb BLAST, Clustal, Primer3Plus o les webs de la UCSC (Genome Browser i *In silico* PCR). Ja fa anys que hi ha models i fins i tot projectes que fan servir aquestes eines per la

docència i és probablement la forma més fàcil per a molts centres per accedir al món de la recerca (Gelbart et al., 2009). Hi ha un problema amb l'ús d'aquestes tècniques per a docència i és la manca de formació del professorat en moltes d'elles. Afortunadament, la majoria dels graus relacionats amb la biologia ja incorporen una matèria de bioinformàtica amb la qual cosa s'espera que cada cop més professors tinguin coneixements relacionats. La possibilitat de fer servir aquestes eines no implica un èxit ni una recerca significativa per part dels alumnes, ja que en massa ocasions es segueixen les mateixes dinàmiques lineals a classe on només hi ha una possibilitat d'èxit i els alumnes que no l'aconsegueixen es considera que han fracassat (Waight & Abd-El-Khalick, 2011).

Totes aquestes experiències i d'altres no comentades tenen un problema important quan s'enfronten als currículums, ja que en general suposen moltes hores de feina i poden estar tractant només un tema molt concret si no es fan correctament. És precisament la falta de temps i la necessitat que en moltes ocasions tenim de fer què l'alumnat arribi a determinades conclusions les que poden portar un conflicte quan els experiments no donen els resultats esperats o fins i tot contraris als coneixements científics. Aquesta situació fa que el professorat hagi de decidir si intervenir i, per tant, tenir el risc que l'alumat vegi que no era una recerca oberta, o bé deixar que es quedin amb conceptes erronis al no poder continuar la seva recerca (Kapon et al., 2018).

Bioètica a classe

La genètica té implicacions molt més enllà de la biologia que entren en contacte amb consideracions de caràcter ètic, concretament en el marc de la bioètica. Històricament, la genètica ha estat l'argument principal del racisme, tots els moviments d'eugenèsia de principis del segle XX van precedir la recerca nazi de la raça ària o, a escala espanyola, amb els casos de Sabino Arana, fundador del Partit Nacionalista Basc, sobre la raça basca o el psiquiatre franquista Antonio Vallejo-Nájera que ja parlava del "gen roig". El major coneixement de la genètica i l'avenç social va desterrar de l'opinió majoritària aquests conceptes. Malgrat les evidències, i la dificultat de mesurar-la per la poca acceptació social, una part de la societat (amb dades dels Estats Units) encara atribueix a la genètica una suposada superioritat blanca i de forma significativament més alta en majors de 45 anys, gent no blanca i persones amb estudis superiors (Morning et al., 2019). És destacable que fins i tot un científic de renom com el premi Nobel i descobridor de la doble hèlix d'ADN, James Watson hagi fet declaracions racistes amb el pretext de la genètica. Els adolescents que tenen el primer contacte amb la genètica obren la porta a

refutar aquestes teories o a reforçar-les, el que fa especialment rellevant la forma d'enfocar determinats temes. En aquest sentit, s'ha demostrat que la genètica mendeliana que ignora l'ambient o exemples de malalties associades a ètnies (anèmia falciforme en africans o fibrosi quística a caucàsics) afavoreixen un biaix racista en els estudiants (Donovan et al., 2021).

La genètica, com a base per a la biotecnologia, és un dels àmbits de la biologia on juguen un paper més destacat els components ètics. L'anàlisi dels currículums mostra una total falta d'argumentació bioètica, encara que pretén entrar en temes polèmics. Els alumnes haurien de ser capaços no només de poder argumentar amb una base científica sobre temes d'actualitat, sinó de poder veure les implicacions ètiques que hi ha més enllà. La situació no és fàcil, ja que juntament amb el ressorgiment de moviments anticientífics (terraplanisme, creacionisme, antivacunes) i pseudocientífics (homeopatia, astrologia), s'ha de sumar un baix nivell científic i la manca de coneixement sobre bioètica. La societat continua molt distanciada de la ciència i per a molta gent la figura del científic acostuma a ser la del "científic boig" capaç de fer qualsevol experiment del qual sigui tècnicament capaç. Aquesta falta de confiança juntament amb la ignorància fan molt mal a la credibilitat de la ciència. Finalment, s'ha de superar en molts casos ideologies i creences religioses (Rollin, 2014). En aquest sentit, es recomana adreçar directament les creences de l'alumnat i no obviar-les. Tot això fa difícil poder incloure la bioètica en el temari. Malgrat això, és important introduir el concepte per evitar futurs científics sense cap mena de valors o sensibilitat així com perquè els alumnes que no continuaran amb una carrera científica siguin conscients de la preocupació real dels científics. En conclusió, és molt important tractar els temes mencionats a classe encara que estiguin fora del currículum per a fer de l'alumnat persones crítiques que no caiguin en reduccionismes simplistes i sense cap mena de base científica.

Discussió

L'anàlisi realitzada fins al moment mostra com s'imparteix la genètica actualment. La preponderància de la genètica mendeliana i l'anàlisi genètica emmascaren en molts casos la complexitat de la genètica, ja sigui per la facilitat a l'hora d'ensenyar i resoldre's (G. E. Ayuso et al., 1996), pel desconeixement del professorat (Castéra & Clément, 2014) o per la lentitud de les institucions per canviar el marc legal per adaptar-se a la recerca (Dougherty et al., 2011).

L'anàlisi dels currículums mostra que, pel que fa als sabers, en la línia d'un currículum més competencial tenen tendència a reduir-se, mantenint la genètica mendeliana i les bases moleculars, a més de la mitosi i la meiosi. Els dos canvis més importants en la introducció del nou currículum són, en primer lloc, l'eliminació de l'enginyeria genètica a quart d'ESO i la reestructuració del batxillerat agrupant tota la genètica al segon curs. Pel que fa a les competències, la conclusió més clara és veure la poca flexibilitat que hi ha respecte a la llei estatal (LOMLOE), ja que totes les comunitats autònomes, exceptuant el País Valencià, amb prou feines modifiquen una de les competències. Pel que fa a l'evolució sí que trobem una visió molt més aplicada de la ciència i un redactat que posa l'alumnat al centre. Destaca positivament la incorporació d'un àmbit computacional cada cop més important en ciència i concretament en el camp de la genètica.

L'anàlisi dels llibres no ha estat gaire significatiu al no poder accedir a les publicacions del nou currículum ni de quart d'ESO ni de segon de batxillerat on es concentra el gruix de la genètica. De cara al curs vinent seria interessant veure com les editorials transposen el nou currículum i les competències als llibres de text, ja que, malgrat la seva influència està minvant, continuen sent una referència per a molts centres escolars.

Basant-se en l'anàlisi del currículum, dels llibres de text i la bibliografia a continuació es plantejaran diverses propostes de millora, essent conscients de les possibilitats reals d'implantar-se al nostre entorn. S'ha de tenir en compte que no tot el que hi ha en l'actualitat és negatiu i que al llarg dels anys s'ha vist una millora. A més el sistema educatiu català té mancances que afecten a tota la docència com ara les desigualtats socials, les altes ràtios alumne/professor, la falta d'infraestructures a molts centres i la pèrdua d'autoritat de la figura del docent principalment enfront de les famílies. Seria, per tant, poc realista plantejar treballar amb 10 alumnes per professor i tenir accés a laboratoris on els estudiants poguessin treballar tècniques com la PCR, electroforesis d'ADN o fer una recerca profunda i experimental de qualsevol temàtica.

Propostes de millora

Currículum

Com ja s'ha comentat durant el treball, la complexitat de la genètica, el poc temps que se li dedica a classe i la limitació de recursos no fan fàcil trobar una única solució per a millorar la seva docència. El context de classes i instituts també dificulta trobar un estàndard adequat, però malgrat tot això hi ha certes propostes de millora que si es poden incorporar. Per una banda, ja fa uns anys que un grup internacional de 57 d'experts va proposar uns mínims del que es considera l'alfabetització de la genètica (Boerwinkel et al., 2017). Segons aquest estudi la genètica hauria d'incorporar coneixements conceptuals, socioculturals i epistemològics. En aquest estudi es van posar l'equivalent en el llenguatge del currículum actual a uns sabers i competències i fins i tot es van donar exemples del que es podria considerar presentacions de situacions d'aprenentatge que inclouen: enquestes forenses, test d'anèmia falciforme a atletes, comprar aliments transgènics, fer autotest de BRCA1, discussions sobre un possible gen de l'alcoholisme, debats sobre diferències ètniques i assessorament genètic sobre l'atròfia muscular. Més enllà de les recomanacions, podem establir clarament que a Espanya és actualment impossible que s'aconsegueixi aquesta anomenada alfabetització en genètica en la població per un motiu ben simple: un gran percentatge d'alumnes no escull la matèria optativa de biologia i geologia a quart d'ESO on es comença la genètica. Sembla clar que cal avançar part del temari al tercer curs on, aprofitant que aquest es centra en el cos humà, es poden incorporar conceptes de mitosi i meiosi amb la reproducció sexual, així com els factors genètics com a factors o causes de les malalties juntament amb els ambientals o en l'explicació dels grups sanguinis. En un sentit similar, sembla poc adient separar la genètica molecular de la bioquímica que es dona a primer de batxillerat, doncs el paper de l'ADN com a codificant de les proteïnes es veu difuminat i ajuda a una visió d'un gen, un caràcter i no pas d'un gen codificant per una proteïna que és la que realitza una determinada funció.

La reordenació del currículum també dona peu a modificar els sabers on caldria tornar a incorporar l'enginyeria genètica a quart i especialment afegir conceptes o una breu introducció a la bioètica facilitant ambdues un aprenentatge més global i en connexió amb la realitat de l'alumnat. La redacció del saber hauria de ser prou flexible per a no haver d'esperar a una nova modificació del currículum per a reforçar-ho. Per exemple es podria enunciar un nou saber similar a aquest: presentar les tècniques i aplicacions de l'enginyeria que es fan servir en la indústria i la recerca com ara el sistema CRISPR i d'altres novetats que puguin aparèixer. En contraposició, les competències actuals semblen prou àmplies i transversals per a poder

aconseguir un bon aprenentatge de la genètica, ja que busquen que l'alumnat tingui una visió científica del món i que sigui capaç d'analitzar i investigar els fenòmens de la naturalesa.

Seqüenciació i didàctica

La seqüenciació, és a dir l'ordre i estructura i de les situacions d'aprenentatge, és una de les parts més importants de qualsevol model d'aprenentatge. Per tant, l'ordre en el qual es presenten les diferents parts de la genètica i la interrelació entre elles pot canviar fàcilment. Una de les millores potencials que sembla més a l'abast és el canvi en l'enfocament d'una visió mendeliana cap a una visió molecular que té moltes conseqüències secundàries principalment en l'àmbit del funcionament dels gens i l'estructura i herència dels cromosomes. En aquest sentit, encara que pugui semblar un grau més de dificultat, una petita introducció a l'epigenètica pot ajudar a connectar els gens i l'ambient abans d'introduir la genètica mendeliana (N. Gericke, 2021). Ja fa anys que es planteja la necessitat d'un model seqüencial que permeti a l'alumnat crear els seus propis esquemes, destaca en aquest sentit una tesi doctoral del 2006 on ja es dona una visió constructivista com el millor mètode per l'ensenyament de la genètica (Iñiguez Porras, 2006). Seguint aquest model, cada cop més articles destaquen els avantatges de començar per la genètica molecular i centrar-se en casos propers als alumnes, que giren principalment entorn a la genètica humana fins al punt d'ometre els experiments de Mendel amb pèsols. Fins i tot es planteja directament obviar Mendel com a pare de la genètica, ja que els seus estudis sobre hibridisme poden dificultar més que no pas ajudar a l'estructuració de conceptes en ser una sobresimplificació excessiva i mostrar un model de ciència individualista enfront a la realitat col·laborativa i grupal (Kampourakis, 2021).

A Espanya, com ja s'ha comentat, la didàctica es centra en molts casos en la resolució de diversos problemes de genètica mendeliana o d'herència lligada al sexe. Si bé la resolució de problemes pot ser una eina útil aquesta s'ha de fer servir correctament i posar èmfasis en el procés i no pas en el resultat (Ibáñez Orcajo & Martínez Aznar, 2005). Cada cop es plantegen més alternatives per a allunyar-se d'aquest model (Casanoves et al., 2017) que intenten integrar més coneixements que no pas el model d'herència i els pedigrís per evitar la resolució sense comprensió mitjançant l'aplicació d'algoritmes (G. E. Ayuso et al., 1996).

La incorporació de temàtiques amb una càrrega de conflictivitat o polèmica social són una bona manera per motivar els estudiants i per a preparar-los com a ciutadans, en el que és una de les competències transversals. El fet de tractar clonacions, transgènics o cèl·lules mare també permet un aprofundiment en el coneixement i una visió més pràctica que acostuma a motivar

l'alumnat com s'ha descrit recentment (Betul Cebesoy & Chang Rundgren, 2021). Malgrat no aparèixer en els sabers, aquest tipus d'experiències estan totalment en la línia del nou currículum i engloben diverses competències específiques així com la competència transversal de ciutadania.

Professorat

El professorat és també una potencial font de millora, encara que la transversalitat de la matèria de biologia i geologia fa difícil que el professor sigui expert (Castéra & Clément, 2014) i, per tant, es cometen errades o situacions que poden donar lloc a malentesos com per exemple parlar de "gens de". Per una banda, es podria formar al professorat amb cursos i material i per altra es podrien facilitar glossaris o llistes amb errors habituals a evitar. Desgraciadament, la falta de recursos i la sobrecàrrega de la majoria dels docents, fa difícil que aquestes solucions suposin una millora significativa. Un dels aspectes que sí que possibilita una millor comprensió de la genètica de cara al futur és una qüestió de formació. A Espanya, el professorat de secundària ha d'haver cursat, a més del màster habilitant, una carrera de la branca del coneixement que vol impartir. Fins a la introducció del pla Bolonya l'any 2008, el que inclou la formació universitària de la gran majoria del professorat actual, havien cursat una llicenciatura en biologia o bé en geologia, mentre que l'aparició dels graus ha augmentat i diversificat molt l'oferta (Ciències ambiental, bioquímica, biotecnologia o biomedicina). En la majoria d'aquests graus les matèries de genètica són molt més comunes, cosa que es complementa amb els majors coneixements i la major importància que se li dona en l'actualitat. Aquest efecte pot fer que els professors que s'estan incorporant actualment tinguin una base molt més sòlida de genètica. En qualsevol cas, per millorar els coneixements de tot el professorat caldria promoure cursos de formació que fossin atractius i útils i que en última instància depenen de l'elecció personal.

Llibres de text

El llibre de text continua sent un material bàsic en molts centres malgrat que cada cop són més els que fan servir material propi o alternatiu. En el cas de fer-se servir els llibres de text tenen alhora l'avantatge i l'inconvenient de convertir-se en la referència absoluta. En un món on els estudis genètics comencen a ser populars i les informacions que ens arriben als mitjans de comunicació magnifiquen els descobriments, els professors i els llibres de text es queden enrere i es deixa que gent no experta sigui la que transmet els coneixements en molts casos amb errors sinó amb biaixos de forma interessada (Stern & Kampourakis, 2017). La millor forma d'evitar

aquests problemes és que el professorat accedeixi directament a la informació i pugui filtrar-la, especialment pel que fa a referències al determinisme genètic o les representacions on els cromosomes acostumen a barrejar el nombre de cromàtides (N. M. Gericke et al., 2014; Martínez-Gracia et al., 2006; Puig & Jiménez-Aleixandre, 2011). En aquest sentit cal destacar que el ministeri d'educació té material teòric en obert i que altres fonts fiables també disposen de molt material gratuït com, per exemple, la universitat de Utah i el seu programa *Learn Genetics*.

Recerca

La genètica és un dels camps on més ha avançat la recerca en les últimes dècades, aprofitant el gran clúster de recerca en genètica que hi ha a Barcelona i la seva àrea metropolitana suposaria una gran millora fer una connexió real i generalitzada del contacte entre els laboratoris i els instituts (no necessàriament de forma presencial). Com ja s'ha comentat, incorporar l'alumnat a la recerca té múltiples beneficis (Dorfman et al., 2020). En primer lloc, es tracta d'un aprenentatge molt competencial, i que fomenta la ciència ciutadana (vectors 1 i 5 del nou currículum i que pot arribar a incloure totes les competències transversals segons sigui el projecte). A més pot compensar mancances del professorat o dels llibres de text en posar tant l'alumnat com el professorat en contacte directament amb experts en la matèria. Per acabar, la recerca és, per definició, innovadora, la qual cosa implica que la problemàtica dels currículums no actualitzats o conceptes superats com les lleis de Mendel queden fora del que veuria l'alumnat. Òbviament, els projectes no sempre són perfectes (Kapon et al., 2018) i caldria una predisposició per part de molts agents (instituts, centres de recerca/universitats i Generalitat) per fer-ho possible. L'experiència positiva del treball de recerca, dona una idea de com podria arribar a ser.

Conclusions i limitacions de la recerca

L'objectiu principal d'aquest treball era tenir una visió global de la docència de la genètica i veure com afecten els darrers canvis de currículum així com analitzar els llibres de text i proposar millores. La impossibilitat d'accedir als llibres de quart d'ESO i segon de batxillerat dissenyats amb el nou currículum, ja que no s'implantarà en aquests cursos fins a l'any vinent han suposat que l'anàlisi dels llibres de text sigui poc significatiu. L'altre principal limitació d'aquest estudi és que l'aplicació de les propostes de millora, en tractar-se de canvis que impliquen tant al professorat com a l'administració, serà difícil que es duguin a terme. Tenint en compte aquestes referències les principals conclusions del treball són les següents:

- La genètica constitueix una part especialment difícil del temari de biologia i hi ha un desconeixement general en la societat sobre el seu funcionament.
- Els sabers de genètica del currículum no han patit grans canvis amb la darrera modificació. Sí que hi ha una modificació important al batxillerat en moure's la genètica molecular a segon, però mantenint el contingut.
- Les competències específiques, tenen un redactat prou ampli per a poder-se adaptar a moltes situacions i venen marcades de forma poc flexible per la LOMLOE com demostra el fet que siguin gairebé idèntiques a totes les comunitats autònomes.
- Els llibres de text adaptats al nou currículum presenten conceptes de genètica abans que els alumnes en tinguin cap coneixement i en el cas de batxillerat un llibre manté la genètica molecular a primer de batxillerat en contra del què marca el currículum.
- La genètica mendeliana continua sent la base de l'ensenyament de genètica malgrat les evidències dels seus efectes negatius en la comprensió de l'alumnat.
- La genètica molecular ha de suposar el punt de partida del temari de genètica.
- La manca explícita de la bioètica al currículum suposa la pèrdua d'una oportunitat per a un aprenentatge més integral. Cal dir que tant les competències transversals com les específiques permeten i encaixen la seva incorporació fora dels sabers.
- El diàleg dels instituts amb el món de la recerca és una de les millors eines per a millorar la docència de les ciències i en especial de la genètica.

Bibliografia

Ayuso, G., & Banet, E. (2002). Alternativas a la enseñanza de la genética en educación secundaria. *Enseñanza de Las Ciencias*, *20*(1), 133–157.

Ayuso, G. E., Banet Hernández, E., & Abellán, T. (1996). Introducción a la genética en la enseñanza secundaria y bachillerato: II. ¿Resolución de problemas o realización de ejercicios? *Enseñanza de Las Ciencias. Revista de Investigación y Experiencias Didácticas*, *14*(2), 127–142. https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.4219

Betul Cebesoy, U., & Chang Rundgren, S. N. (2021). Embracing socioscientific issues-based teaching and decision-making in teacher professional development. *Educational Review*. https://doi.org/10.1080/00131911.2021.1931037

Boerwinkel, D. J., Yarden, A., & Waarlo, A. J. (2017). Reaching a Consensus on the Definition of Genetic Literacy that Is Required from a Twenty-First-Century Citizen. *Science and Education*, *26*(10), 1087–1114. https://doi.org/10.1007/s11191-017-9934-y

Casanoves, M., Salvadó, Z., González, Á., Valls, C., & Novo, M. T. (2017). Learning genetics through a scientific inquiry game. *Journal of Biological Education*, *51*(2), 99–106. https://doi.org/10.1080/00219266.2016.1177569

Castéra, J., & Clément, P. (2014). Teachers' Conceptions About the Genetic Determinism of Human Behaviour: A Survey in 23 Countries. *Science and Education*, *23*(2), 417–443. https://doi.org/10.1007/s11191-012-9494-0

Castera, J., Clement, P., Abrougui, M., Nisiforou, O., Valanides, N., Turcinaviciene, J., Sarapuu, T., Agorram, B., Calado, F., Bogner, F., & Carvalho, G. (2008). Genetic Determinism in School Textbooks: A Comparative Study Conducted among Sixteen Countries. *Science Education International*, *19*(2), 163–184.

Castro-Faix, M., Duncan, R. G., & Choi, J. (2021). Data-driven refinements of a genetics learning progression. *Journal of Research in Science Teaching*, *58*(1), 3–39. https://doi.org/10.1002/tea.21631

Chapman, R., Likhanov, M., Selita, F., Zakharov, I., Smith-Woolley, E., & Kovas, Y. (2019). New literacy challenge for the twenty-first century: genetic knowledge is poor even among well educated. *Journal of Community Genetics*, *10*(1), 73–84. https://doi.org/10.1007/s12687-018-0363-7

Dahan, O., Dorfman, B. S., Sayin, S., Rosener, B., Hua, T., Yarden, A., & Mitchell, A. (2019). Harnessing robotic automation and web-based technologies to modernize scientific outreach. *PLoS Biology*, *17*(6). https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000348

Dolan, E. L., Lally, D. J., Brooks, E., & Tax, F. E. (2008). PREPping students for authentic science. *Science Teacher*, *75*(7), 38–43. https://www.researchgate.net/publication/51545125

Donovan, B. M., Salazar, B., & Weindling, M. (2021). How Can We Make Genetics Education More Humane? In *Genetics education: Current challenges and possible solutions* (pp. 161–177). https://doi.org/10.1007/978-3-030-86051-6_10

Dorfman, B. S., Issachar, H., & Zion, M. (2020). Yesterday's Students in Today's World—Open and Guided Inquiry Through the Eyes of Graduated High School Biology Students.

Research in Science Education, *50*(1), 123–149. https://doi.org/10.1007/s11165-017-9683-6

Dougherty, M. J., Pleasants, C., Solow, L., Wong, A., & Zhang, H. (2011). A comprehensive analysis of high school genetics standards: Are states keeping pace with modern genetics? *CBE Life Sciences Education*, *10*(3), 318–327. https://doi.org/10.1187/cbe.10-09-0122

Duncan, R. G., Castro-Faix, M., & Choi, J. (2016). Informing a learning progression in genetics: Which should be taught first, mendelian inheritance or the central dogma of molecular biology? *International Journal of Science and Mathematics Education*, *14*(3), 445–472. https://doi.org/10.1007/s10763-014-9568-3

Gelbart, H., Brill, G., & Yarden, A. (2009). The impact of a web-based research simulation in bioinformatics on students' understanding of genetics. *Research in Science Education*, *39*(5), 725–751. https://doi.org/10.1007/s11165-008-9101-1

Gericke, N. (2021). How Can Epigenetics be Used to Integrate Nature and Nurture in Genetics Education? In *Genetics education: Current challenges and possible solutions* (pp. 17–34). https://doi.org/10.1007/978-3-030-86051-6_2

Gericke, N., El-Hani, C. N., Sbeglia, G. C., Nehm, R. H., & Evangelista, N. A. M. (2021). Is Belief in Genetic Determinism Similar Across Countries and Traits? In *Genetics education: Current challenges and possible solutions* (pp. 107–125). https://doi.org/10.1007/978-3-030-86051-6_7

Gericke, N. M., Hagberg, M., dos Santos, V. C., Joaquim, L. M., & El-Hani, C. N. (2014). Conceptual Variation or Incoherence? Textbook Discourse on Genes in Six Countries. *Science and Education*, *23*(2), 381–416. https://doi.org/10.1007/s11191-012-9499-8

Ibáñez Orcajo, T., & Martínez Aznar, M. (2005). Solving problems in genetics II: Conceptual restructuring. *International Journal of Science Education*, *27*(12), 1495–1519. https://doi.org/10.1080/09500690500186584

Iñiguez Porras, F. J. (2006). *La Enseñanza de la genética: Una propuesta didáctica para la educación secundaria obligatoria desde una perspectiva constructivista*. Universitat de Barcelona.

Íñiguez Porras, F. J., & Puigcerver Oliván, M. (2013). Una propuesta didáctica para la enseñanza de la genética en la Educación Secundaria. *Eureka*, *10*, 307–327. http://hdl.handle.net/10498/15441

Kampourakis, K. (2021). Should We Give Peas a Chance? An Argument for a Mendel-Free Biology Curriculum. In *Genetics education: Current challenges and possible solutions* (pp. 3–16). https://doi.org/10.1007/978-3-030-86051-6_1

Kapon, S., Laherto, A., & Levrini, O. (2018). Disciplinary authenticity and personal relevance in school science. *Science Education*, *102*(5), 1077–1106. https://doi.org/10.1002/sce.21458

Knippels, M. C. P. J., Waarlo, A. J., & Boersma, K. T. (2005). Design criteria for learning and teaching genetics. *Journal of Biological Education*, *39*(3), 108–112. https://doi.org/10.1080/00219266.2005.9655976

Lombard, F., & Weiss, L. (2018). Can Didactic Transposition and Popularization Explain Transformations of Genetic Knowledge from Research to Classroom? *Science and Education*, *27*(5–6), 523–545. https://doi.org/10.1007/s11191-018-9977-8

Martínez-Gracia, M. V., Gil-Quílez, M. J., & Osada, J. (2006). Analysis of molecular genetics content in Spanish secondary school textbooks. *Journal of Biological Education*, *40*(2), 53–60. https://doi.org/10.1080/00219266.2006.9656014

McElhinny, T. L., Dougherty, M. J., Bowling, B. V., & Libarkin, J. C. (2014). The Status of Genetics Curriculum in Higher Education in the United States: Goals and Assessment. *Science and Education*, *23*(2), 445–464. https://doi.org/10.1007/s11191-012-9566-1

Morning, A., Brückner, H., & Nelson, A. (2019). Socially desirable reporting and the expression of biological concepts of race. *Du Bois Review*, *16*(2), 439–455. https://doi.org/10.1017/S1742058X19000195

Puig, B., & Jiménez-Aleixandre, M. P. (2011). Different Music to the Same Score: Teaching About Genes, Environment, and Human Performances. In T. D. Sadler (Ed.), *Socio-scientific Issues in the Classroom* (Vol. 39, pp. 201–238). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1159-4_12

Redfield, R. J. (2012). "Why do we have to learn this stuff?"-a new genetics for 21st century students. *PLoS Biology*, *10*(7), 6. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001356

Rollin, B. E. (2014). The Perfect Storm-Genetic Engineering, Science, and Ethics. *Science and Education*, *23*(2), 509–517. https://doi.org/10.1007/s11191-012-9511-3

Stern, F., & Kampourakis, K. (2017). Teaching for genetics literacy in the post-genomic era. *Studies in Science Education*, *53*(2), 193–225. https://doi.org/10.1080/03057267.2017.1392731

Stern, F., Kampourakis, K., Delaval, M., & Müller, A. (2021). How are High-School Students' Teleological and Essentialist Conceptions Expressed in the Context of Genetics and What Can Teachers Do to Address Them? In *Genetics education: Current challenges and possible solutions* (pp. 145–159). https://doi.org/10.1007/978-3-030-86051-6_9

Waight, N., & Abd-El-Khalick, F. (2011). From scientific practice to high school science classrooms: Transfer of scientific technologies and realizations of authentic inquiry. *Journal of Research in Science Teaching*, *48*(1), 37–70. https://doi.org/10.1002/tea.20393