

1 El balanç global de carboni i els escenaris d'estabilització del canvi climàtic

Autor

Josep Canadell Gili

Josep Canadell Gili és doctor en ecologia terrestre per la Universitat Autònoma de Barcelona. Actualment és director executiu del Global Carbon Project i investigador principal de l'Organització per a la Recerca Industrial i Científica de la Commonwealth (CSIRO, Austràlia), i prèviament va desenvolupar la recerca a les universitats nord-americanes de Stanford, Berkeley i San Diego. L'àrea de recerca és la pertorbació humana del cicle global de carboni i els efectes que té en el sistema climàtic, incloent-hi com-

ponents terrestres, marins, atmosfèrics i socioeconòmics. També treballa en les opcions de mitigació existents per a estabilitzar el sistema climàtic, particularment a escenaris d'escalfament global baixos. És un dels autors principals del Grup Intergovernamental d'Experts en Canvi Climàtic (IPCC) i ha publicat extensivament en revistes científiques. El 2015 va ser reconegut com un dels autors més citats mundialment en publicacions del canvi climàtic.

Sumari

Síntesi	23
1.1. Introducció: un repte planetari per a un món sostenible	24
1.2. La pertorbació humana del sistema climàtic	25
1.2.1. Emissions globals de gasos amb efecte d'hivernacle (CO ₂ , CH ₄ i N ₂ O) ..	25
1.2.2. Forçament radiatiu del carboni i d'altres components d'origen humà	28
1.3. El balanç històric i contemporani entre fonts i embornals de CO ₂	30
1.4. El repte de la mitigació per a estabilitzar el sistema climàtic	31
1.4.1. Balanços de carboni per a estabilitzar el sistema climàtic	32
1.4.2. Trajectòries congruents amb els balanços de carboni	35
1.5. Un repte sense precedents	38
1.6. Conclusions	41
1.7. Recomanacions	41
Referències bibliogràfiques	42

Síntesi

Les emissions dels gasos amb efecte d'hivernacle (GEH) més importants han comportat un increment atmosfèric del 40 % de diòxid de carboni (CO₂), del 150 % de metà (CH₄) i del 20 % d'òxid nítrós (N₂O) des de principi de la revolució industrial. Les emissions d'aquests gasos han continuat creixent des del *Segon informe del canvi climàtic a Catalunya*, tot i que les emissions de CO₂ han entrat en un període de creixement més lent del que es va observar durant el decenni del 2000.

Una altra novetat important des de l'últim informe ha estat la demostració que hi ha una relació quasi proporcional entre les emissions humanes acumulatives de CO₂ i l'augment de la temperatura global. Es tracta d'un descobriment important, que permet entendre la magnitud de la mitigació necessària per a assolir un objectiu d'estabilització climàtica sense haver d'esbrinar els efectes combinats dels més de trenta components que constitueixen el forçament radiatiu antropogènic. Basada en aquest marc d'interpretació, la quota d'emissions que resten per a limitar l'escalfament global per sota de 2 °C, amb una probabilitat > 66 %, és de 590 a 1.240 Gt CO₂. Si les emissions actuals de prop de 40 Gt CO₂ per any continuen, aquest balanç quedarà exhaurit entre quinze i trenta anys.

Totes les avaluacions socioeconòmiques i tècniques mostren que no és possible descarbonitzar

l'economia global amb aquests balanços de carboni tan petits. Aquest fet requereix que trajectòries d'estabilització climàtica a nivells d'escalfament baixos necessitin excedir la quota de carboni permesa amb el requeriment de remoure activament CO₂ de l'atmosfera més tard. Això comporta riscos addicionals, ja que moltes de les tecnologies per a remoure CO₂ de l'atmosfera no són disponibles o no han estat provades.

Tanmateix, hi ha signes positius: l'alentiment del creixement anual de les emissions de combustibles fòssils en els anys recents, la gran acceleració en la introducció de les energies renovables i, sobretot, la creació d'un marc polític molt adequat mitjançant l'Acord de París, amb un objectiu final d'assolir emissions zero netes durant la segona meitat d'aquest segle. Aquesta convergència de fets obre una oportunitat única, tot i que curta, per a decidir si ens volem embarcar en una transformació sense precedents dels sistemes energètic i socioeconòmic per a limitar l'escalfament global per sota de 2 °C.

Paraules clau

balanços de carboni, descarbonització, emissions de gasos amb efecte d'hivernacle, emissions negatives, mitigació climàtica

1.1. Introducció: un repte planetari per a un món sostenible

L'escalfament del sistema climàtic és inequívoc, i la influència humana ha estat la causa dominant d'aquest escalfament des de mitjan segle xx (IPCC, 2013). Des de la publicació del *Segon informe sobre el canvi climàtic a Catalunya* (Llebot, 2010) s'han observat nombroses fites climàtiques que cal destacar:

- Per primera vegada a la història, l'any 2015 la temperatura mitjana global del planeta va arribar a superar en 1 °C la temperatura de l'era preindustrial (WMO, 2016).
- Per primera vegada en vuit-cents mil anys, l'any 2015 la concentració de diòxid de carboni a l'atmosfera va superar la concentració permanent de 400 ppm (parts per milió) (Dlugokencky *et al.*, 2015).

S'han observat, també, altres canvis associats amb aquest escalfament (figura 1.1) i l'increment de la concentració de GEH a l'atmosfera: com ara la disminució de la quantitat de neu i de gel, l'escalfament i l'acidificació dels oceans i l'augment del nivell del mar. D'altra banda, des del 1950 també s'ha constatat un augment dels fenòmens meteorològics i climàtics extrems (IPCC, 2013).

Remarcablement, cal posar en relleu que a hores d'ara hem emès més de dos terços de tot el carboni que podem emetre si volem limitar l'augment de la temperatura global per sota dels 2 °C (amb una probabilitat > 66 %) respecte de la temperatura mitjana del planeta en l'època preindustrial (Le Quéré *et al.*, 2015).

Aquestes són les observacions i les fites que van servir de base per a les negociacions internacionals mantingudes a París, en el context de la COP21, per a acordar un nou pacte global per a mitigar el canvi climàtic i adaptar-s'hi (UNFCCC, 2015a). L'acord aprovat a París constitueix el canvi més radical en la història de la diplomàcia internacional per a estabilitzar el sistema climàtic. En primer lloc, estableix un objectiu absolut d'estabilitzar la temperatura mitjana global per sota de 2 °C per sobre dels nivells previs a la revolució industrial i, en segon lloc, hi afegeix l'objectiu secundari d'intentar estabilitzar el clima a 1,5 °C. La inclusió d'un objectiu concret i final és un reconeixement de la necessitat de desenvolupar estratègies polítiques, tecnològiques i socials a llarg termini que permetin desacoblar el creixement econòmic mundial de les emissions de GEH.

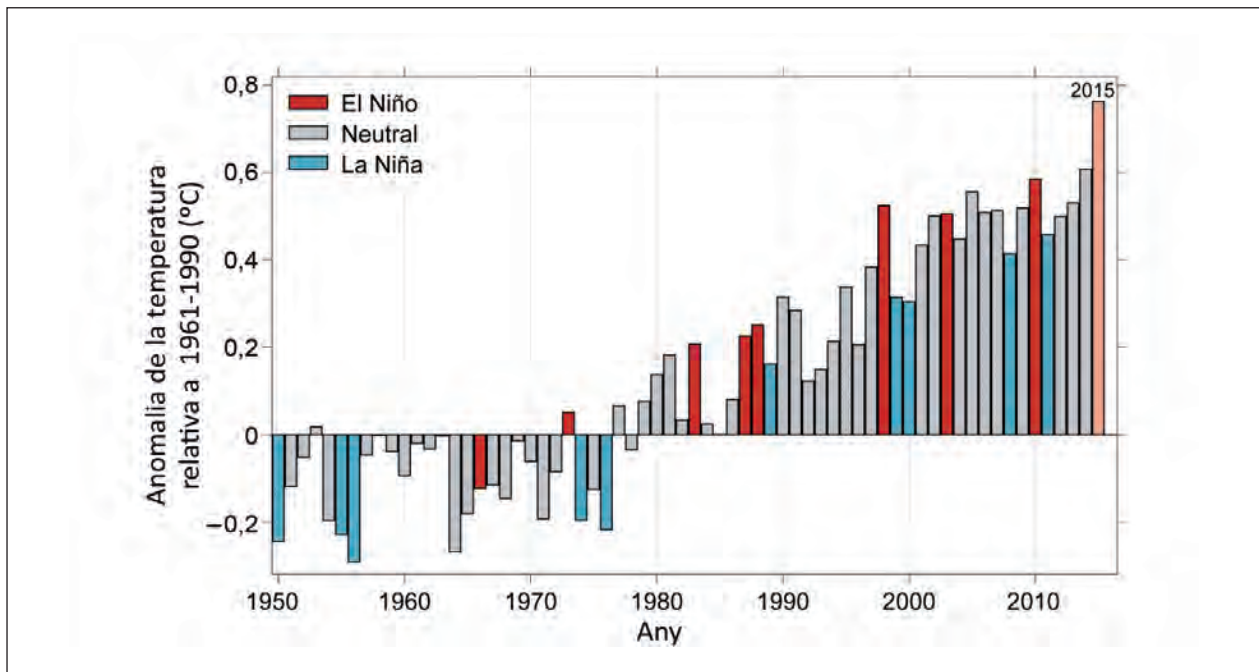


FIGURA 1.1. Anomalia de la temperatura global (1961-1990). La mitjana del 2015 es basa en les temperatures de gener a octubre. Les columnes vermelles corresponen a anys en què es produeix el fenomen d'El Niño; les blaves, a anys en què es produeix el fenomen de La Niña, i les grises, a anys neutrals. Els valors tenen una incertesa de prop del 0,1 °C.

Font: HadCRUT.4.4.0.0, GISTEMP i NOAA GlobalTemp per al període 1950-2014. (Gràfic adaptat de WMO, 2016.)

Amb la finalitat de complir aquest objectiu, els governs signataris s'han posat d'acord a assolir el pic d'emissions globals tan aviat com sigui possible i, subsegüentment, disminuir les emissions ràpidament fins al punt que qualssevol emissions procedents d'activitats humanes estiguin equilibrades amb la capacitat de remoure gasos de l'atmosfera. Aquest balanç o nivell d'emissions zero netes s'ha d'assolir durant la segona meitat d'aquest segle.

Aquest nivell tan precís en un acord polític és un triomf de la comunitat global científica i dels esforços del Grup Intergovernamental d'Experts en Canvi Climàtic (IPCC). L'acord es distancia dels objectius establerts a curt termini, entre d'altres, al Protocol de Kyoto o a l'acord que va resultar de la COP15, realitzada a Copenhagen, i fa real l'objectiu difús del Conveni marc de les Nacions Unides sobre el canvi climàtic, que consisteix a prevenir la «perillosa interferència humana en el sistema climàtic».

Tanmateix, però, estableix un procés de «compromís i revisió» en períodes de cinc anys per a monitorar i augmentar l'ambició dels nivells de mitigació proposats per cada un dels estats que ratifiquin l'acord. Aquest procés de monitoratge contingut a l'acord posa de manifest que els compromisos de mitigació a què els països s'han compromès de cara a l'any 2030 són insuficients per a mantenir l'augment de la temperatura global per sota dels 2 °C, cosa que implica que els nivells de mitigació s'han de revisar i incrementar (per tal de fer-los més ambiciosos).

L'acord també reconeix que quasi dos terços de les emissions actuals de GEH han estat generats per les economies emergents i menys desenvolupades, i, per tant, cal incloure totes les nacions en un nou compromís per a mitigar el canvi climàtic. Igualment, manté que cal diferenciar els esforços entre països i que han de ser commensurables a les circumstàncies úniques, i també elabora la provisió per a desenvolupar un fons monetari de cent mil milions de dòlars anuals a partir del 2020. Aquest fons servirà per a donar suport al desenvolupament econòmic de baixa intensitat de carboni, a les energies netes i a l'adaptació al canvi climàtic.

Finalment, l'acord no especifica la necessitat de descarbonitzar els sistemes energètics, i deixa oberta la possibilitat que tecnologies de captura de carboni i emmagatzematge i estratègies de mitigació basades en els usos del sòl (com ara la reforestació) puguin tenir un paper en la mitigació del canvi climàtic. Això permetria que els combustibles fòssils poguessin continuar formant part de la combinació energètica dels països en el futur, encara que amb una proporció molt reduïda.

Aquest capítol defineix els components de la pertorbació del sistema climàtic per part de l'activitat antròpica, amb un èmfasi específic en els que formen part dels balanços de carboni històrics, contemporanis i futurs, i tenint present els diferents nivells d'estabilització climàtica. Concretament, es presta molta atenció al balanç de carboni i a les emissions de GEH màximes que permetrien estabilitzar la temperatura mitjana global a 1,5 °C i per sota de 2 °C (els objectius de l'Acord de París), i per sota de 3 °C, en coherència amb l'escenari RCP4.5, recomanat a l'hora d'elaborar el TERCER INFORME SOBRE EL CANVI CLIMÀTIC A CATALUNYA.

1.2. La pertorbació humana del sistema climàtic

1.2.1. Emissions globals de gasos amb efecte d'hivernacle (CO_2 , CH_4 i N_2O)

Hi ha proves concloents que mostren que l'increment de GEH a l'atmosfera produït des de principi de l'era industrial és resultat directe de les activitats humanes. Aquestes proves inclouen el desequilibri entre les fonts i els embornals d'aquests gasos (que comporten una acumulació a l'atmosfera), la discriminació isotòpica dels gasos (que associa l'augment atmosfèric amb els combustibles fòssils) i patrons geogràfics coherents amb la distribució d'activitat humana (Ciais *et al.*, 2013).

Entre aquests gasos trobem el diòxid de carboni (CO_2), el metà (CH_4) i l'òxid nítrós (N_2O), a més d'altres gasos de vida llarga que contenen halògens (Ciais *et al.*, 2013). El CO_2 procedeix majorment de la crema de combustibles fòssils, com ara el petroli, el carbó i el gas natural, de la desforestació dels boscos (actualment, i majorment, dels boscos tropicals) i, en un percentatge més reduït, de la producció de ciment per a la construcció.

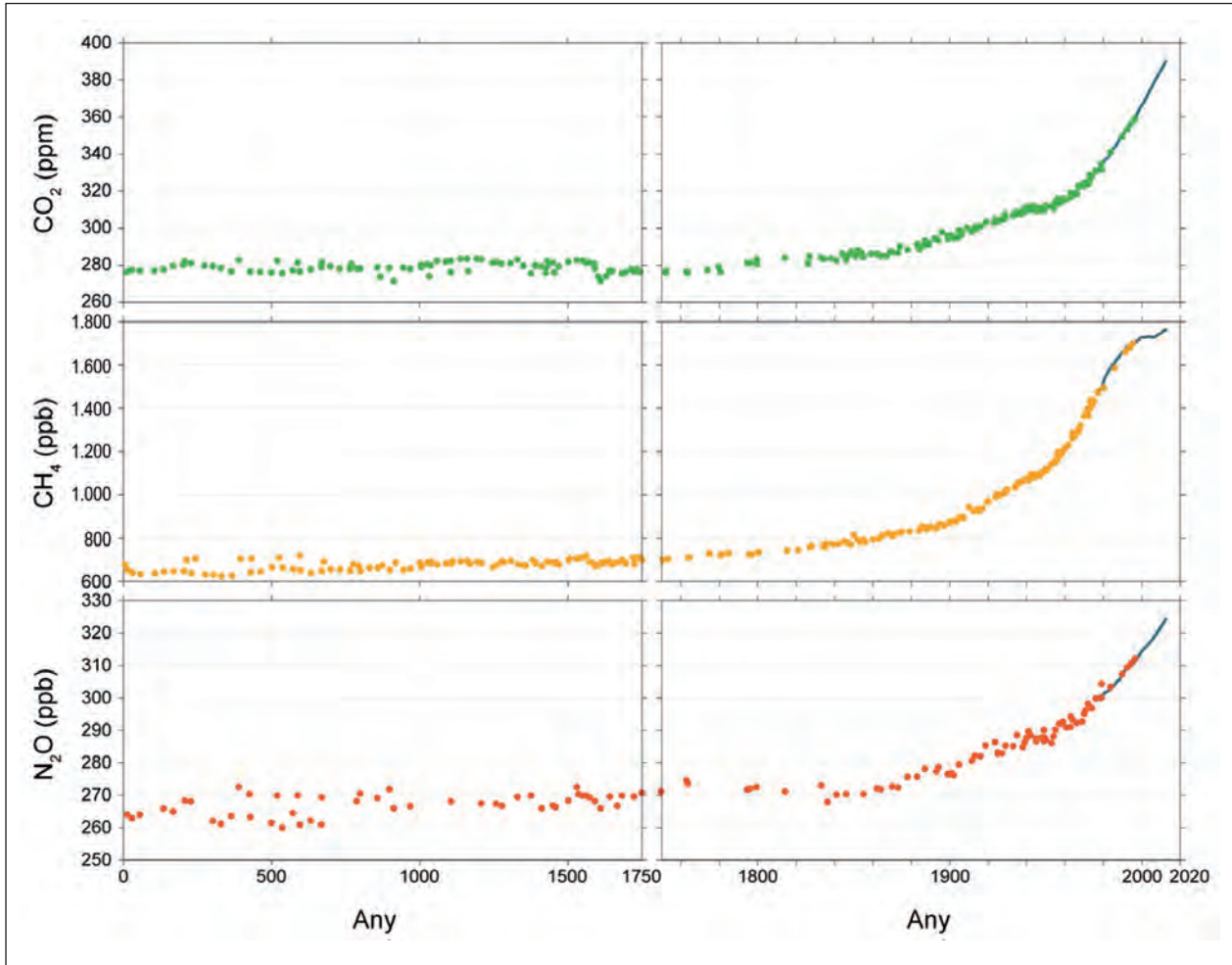


FIGURA 1.2. Evolució de la concentració atmosfèrica de CO₂, CH₄ i N₂O de l'any 0 al 1750 i durant l'era industrial (1750-2011) (Ciais *et al.*, 2013). El CO₂ es mesura en parts per milió (ppm) i el CH₄ i el N₂O, en parts per mil milions (ppb).

El CH₄ prové de la generació d'energia amb carbó, de la digestió dels residus domèstics i industrials, dels processos digestius de la cabanya remugant (majorment vaques i bous) i de la crema de vegetació. Finalment, el N₂O prové de l'ús de fertilitzants, dels fums i de la crema de combustibles fòssils.

Tot i que molts d'aquests gasos es troben a l'atmosfera d'una manera natural, la pertorbació humana ha comportat que les emissions excedeixin la capacitat d'absorció natural que tenen els oceans i els ecosistemes terrestres. D'aquesta manera, la concentració de CO₂ a l'atmosfera ha augmentat un 40 % des del 1750 (l'any que es considera l'inici de la revolució industrial) fins al 2014, i ha passat de 278 ppm a 397 ppm durant aquest període. La concentració va continuar pujant l'any 2015, quan va superar les 400 ppm. El CH₄ ha aug-

mentat més del 150 % en aquest mateix període, i el N₂O ho ha fet prop del 20 % (figura 1.2, Ciais *et al.*, 2013; Le Quéré *et al.*, 2015).

Les emissions globals de CO₂ de combustibles fòssils van assolir el 35,7 ± 1,8 Gt CO₂ el 2014,¹ distribuïdes en emissions de carbó (42 %), petroli (33 %), gas (19 %), ciment (5,7 %) i quantitats més petites d'emissions causades per la crema de gas natural en mines i fàbriques (0,6 %) (Le Quéré *et al.*, 2015). El 2014 la taxa de creixement només va ser del 0,6 % per sobre de les emissions del 2013 i la projecció per al 2015 és de creixement zero (Jackson *et al.*, 2015). Aquestes taxes de creixement són molt per sota del 2,2 % de creixement mitjà anual observat durant el decenni passat (2005-2014) i del 3 % que va caracteritzar el decenni del 2000-2009.

1. 1 Gt (1 gigatona) = 1.000 milions de tones = 10¹⁵ grams.

Aquesta desacceleració en el creixement de les emissions globals de CO₂ és important i única des que hi ha un registre d'emissions antropogèniques, perquè ha anat acompanyada d'un creixement significatiu de l'economia global. En el passat, tots els exemples de desceleració i, fins i tot, de disminució del volum d'emissions s'han associat amb crisis econòmiques, com ara la crisi del petroli durant el decenni del 1980, el col·lapse de la Unió Soviètica a mitjan decenni del 1990 i la crisi financera global recent a partir del 2008 (Peters *et al.*, 2013).

Tot i que no hi ha evidències suficients que permetin afirmar que s'ha assolit un pic en les emissions globals de CO₂, sí que s'han produït prou canvis en l'estructura energètica de molts països per a creure que entrem en una era de creixement d'emissions més lenta que en el passat i que es podria tractar del primer pas cap a un pic d'emissions. Particularment, la Xina ha tingut el paper més important, amb una disminució en l'ús d'energia provinent de la combustió de carbó els dos últims anys, que ha estat compensada per un increment en la fracció d'energies que no generen GEH, com ara la nuclear, la hidroelèctrica i altres energies renovables (Jackson *et al.*, 2015). Aquesta tendència emergent de creixement d'emissions de CO₂ lenta contrasta d'una manera molt significativa amb les tendències apuntades en el *Segon informe del canvi climàtic*

a Catalunya (Llebot, 2010) sobre la continuació de taxes de creixement d'emissions exponencials durant el decenni del 2000.

Els territoris que l'any 2014 van contribuir d'una manera més rellevant a les emissions globals de diòxid de carboni van ser, per aquest ordre, la Xina (27 %), els Estats Units (15 %), la Unió Europea (10 %) i l'Índia (7 %). En conjunt, van ser responsables del 58 % de les emissions globals (figura 1.3; Le Quéré *et al.*, 2015). És més remarcable el fet que l'any 1990 el 66 % de les emissions globals procedien dels països més desenvolupats (coneguts com els països de l'annex B del Conveni marc de les Nacions Unides sobre el canvi climàtic). L'any 2013 aquest percentatge havia disminuït fins al 38 %, cosa que indicava el gran domini en el creixement de les emissions procedents de les economies emergents i menys desenvolupades.

Malgrat el nou domini d'aquests últims països en les emissions globals, s'observa que les emissions *per capita* segueixen sent molt més baixes que les dels països desenvolupats. A part dels països més rics en petroli, com ara Qatar, Kuwait, els Emirats Àrabs Units i l'Aràbia Saudita, amb emissions de CO₂ *per capita* de 46 a 20 tones, els Estats Units i Austràlia encapçalen el rànquing amb 16-17 tones per persona i any. Aquests valors són més del doble

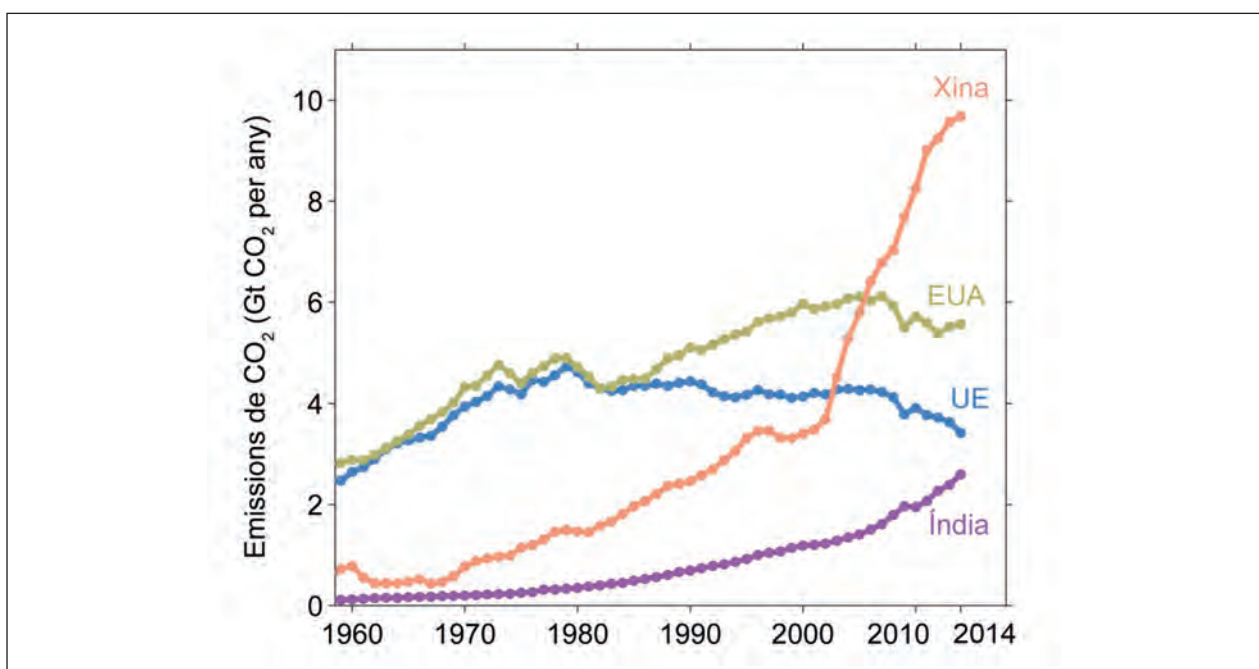


FIGURA 1.3. Evolució de les emissions de CO₂ als quatre països més emissors (la Xina, els EUA, la Unió Europea i l'Índia) en el període 1960-2014.

dels de la mitjana dels països europeus, vuit vegades més grans que els de l'Índia i més de cinquanta vegades més grans que els de molts dels països menys desenvolupats de l'Àfrica subsahariana. Significativament, les emissions *per capita* de la Xina van assolir la paritat amb les de la Unió Europea l'any 2014. Les emissions *per capita* d'Espanya són de 5,2 tones per persona (CDIAC, 2015).

Tot i que la crema de combustibles fòssils és la font principal d'emissions de GEH d'origen antròpic, la segona són els canvis deliberats en els usos i les cobertes del sòl (incloent-hi els processos de desforestació i reforestació, l'extracció de fusta i l'activitat agrícola). Part d'aquestes emissions són compensades per l'absorció de CO₂, associada amb el creixement de vegetació secundària, i pel segrest de carboni dels sòls després de la reforestació, l'abandonament agrícola, l'exclusió del foc i l'aplicació de pràctiques agrícoles que conserven el carboni (Houghton, 2003).

Es calcula que les emissions netes de CO₂ causades pels canvis en l'ús del sòl van ser de $5,5 \pm 2,5$ Gt CO₂ per any per al període 1990-2006 (Canadell *et al.*, 2007), però han disminuït significativament des de llavors. Per al decenni passat s'estima que les emissions han estat de $3,3 \pm 1,8$ Gt CO₂, i per al 2014, de $4,0 \pm 0,5$ Gt CO₂ (Le Quéré *et al.*, 2015). Tot i que la tendència general cap a una disminució en les emissions pels usos del sòl sembla bastant robusta, cal recordar que les observacions de satèl·lit suggereixen que hi ha un augment en la pèrdua de boscos de 2.101 km²/any. Brasil mostra una reducció clara de la desforestació contrarestada per l'augment en la pèrdua de boscos al sud-est d'Àsia i Àfrica. Les pràctiques intenses forestals en boscos subtropicals d'arreu del món són les responsables de les taxes de pèrdua més altes (Hansen *et al.*, 2013).

A diferència de la crema de combustibles fòssils, en què les emissions arriben a l'atmosfera immediatament, les emissions dels canvis en els usos del sòl són el resultat de les activitats d'aquell mateix any, però també de les emissions que resulten d'activitats d'anys anteriors. Per exemple, el drenatge d'aiguamolls tropicals genera emissions de CO₂ en sòls orgànics durant decennis subsegüents a l'any que es van drenar (Hooijer *et al.*, 2009).

1.2.2. Forçament radiatiu del carboni i d'altres components d'origen humà

De l'efecte total dels GEH en l'escalfament global (forçament radiatiu), el CO₂ és el responsable del 65 % del canvi que s'ha produït al llarg de la història i del 80 % del creixement actual (prenent el 2014 com a any de referència; Butler, *et al.*, 2015). A més de ser dominant en la pertorbació humana del clima, el CO₂ té un temps de residència a l'atmosfera molt llarg, quelcom que ha estat poc apreciat fins fa poc, en part a causa de la complexitat de calcular adequadament aquesta variable.

El CO₂ emès per les activitats humanes s'equilibra entre els diversos reservoris de carboni existents (i per mitjà de múltiples processos químics) a l'atmosfera, els ecosistemes terrestres i els oceans, en períodes que varien de segons a milers d'anys. Aquests processos inclouen l'extracció immediata de CO₂ per la fotosíntesi de les plantes terrestres i el balanç amb la respiració que emet CO₂, la difusió més lenta de CO₂ cap a l'oceà poc saturat, canvis en l'estructura de la vegetació durant decennis o segles i processos litològics que requereixen milers d'anys (figura 1.4).

Amb aquesta multiplicitat d'equilibris s'estima que el 40 % de les emissions de CO₂ produïdes durant un viatge en cotxe avui romandran a l'atmosfera durant cent anys, i que més del 20 % de les emissions encara seran a l'atmosfera d'aquí a mil anys. Hi ha un residu de més del 10 % que requerirà més de deu mil anys per a ser eliminat de l'atmosfera. Altres gasos tenen temps de residència a l'atmosfera proporcionalment encara més llargs, com ara el N₂O (tres-cents anys) i alguns HFC, amb més de tres mil anys.

Aquests temps de «residència» tan llargs a l'atmosfera expliquen la preocupació que provoca el fenomen del canvi climàtic, molt per sobre d'altres problemàtiques ambientals. L'objectiu, en aquest cas, és estabilitzar el sistema climàtic i no pas retornar-lo a l'estat previ a la pertorbació humana iniciada al segle XVIII amb la revolució industrial. És aquest fet d'irreversibilitat a l'escala de moltes generacions humanes el que nodreix el principi de precaució en la gestió i la mitigació del canvi climàtic.

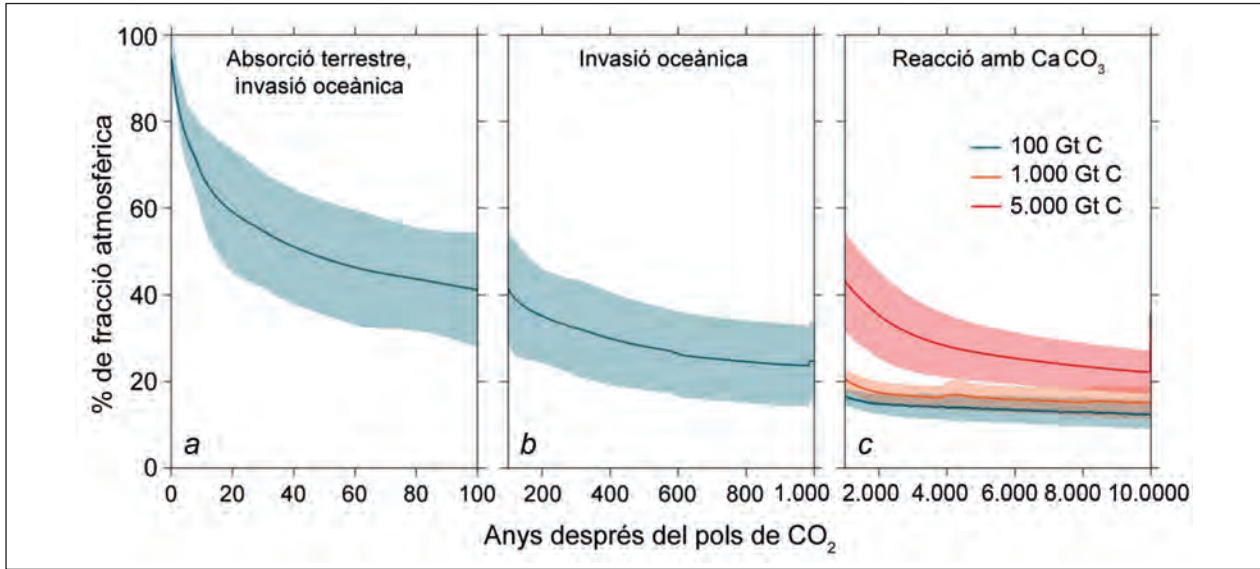


FIGURA 1.4. Permanència del CO₂ emès a l'atmosfera després d'una emissió massiva puntual d'acord amb models biogeoquímics (Ciais *et al.*, 2013).

A més dels GEH més importants (CO₂, CH₄, i N₂O), hi ha gasos halogenats (principalment, clorofluorocarburs, CFC) que també actuen com a GEH. Excepte el HFC i el SF₆, que no contenen clor ni brom, hi ha tretze gasos més petits amb efecte d'hivernacle que també contribueixen a l'aprimament de la capa d'ozó estratosfèric. En aquest

cas, cal tenir present que molts dels gasos que van ser escollits per a substituir els que eren més agressius per a la capa d'ozó són GEH, amb un poder de forçament radiatiu milers de vegades més elevat que el CO₂ i amb unes concentracions atmosfèriques que, a més, augmenten (Lunt *et al.*, 2015). Això requereix la coordinació urgent entre

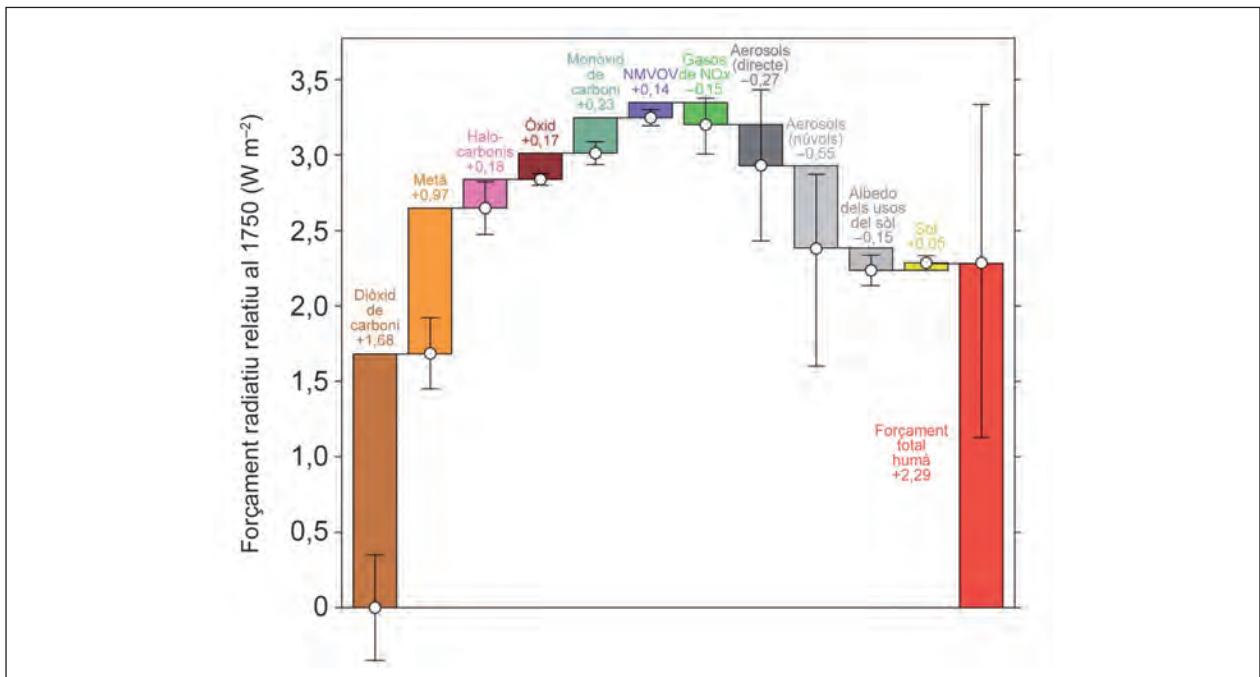


FIGURA 1.5. Forçament radiatiu relatiu a l'any 1750 (W m⁻²) per components directament o indirectament relacionats amb l'activitat humana. Els canvis causats pel sol són un component natural i no pas antropogènic, i no es comptabilitza en el total antropogènic.

Font: Basada en la figura SPM.5 del Grup de Treball I (WGI) del Cinquè informe d'avaluació (AR5) de l'IPCC. Adoptada del disseny original de *ShrinkthatFootpring.com* pel Global Carbon Project (Glen Peters i Robbie Andrew, CICERO).

el Conveni marc de les Nacions Unides sobre el canvi climàtic i el Protocol de Mont-real, l'encarregat de gestionar les emissions de substàncies que consumeixen l'ozó estratosfèric. En conjunt, els GEH van tenir una concentració atmosfèrica en CO_2 equivalent de 481 ppm CO_2 equiv. el 2014, de les quals 397 ppm eren CO_2 (GGI, 2015).

D'altra banda, també hi ha altres components que afecten el forçament radiatiu de la Terra, entre els quals aerosols i precursors d'aerosols que refreden l'atmosfera perquè reflecteixi la radiació incident (com, per exemple, la pols mineral, els sulfats, els nitrats i el carboni orgànic). Altres aerosols contribueixen a l'escalfament de l'atmosfera perquè la deposició de carboni negre sobre la superfície de neu i gel en fa disminuir el poder reflectant. També hi ha evidències clares que els canvis en l'ús del sòl han augmentat l'albedo de la Terra, és a dir, la capacitat d'absorbir i tornar a emetre la radiació que incideix en la superfície terrestre i que, per tant, contraresta part de l'escalfament global d'altres components. Aquest augment s'explica, en bona part, per la substitució de masses forestals (que actuen com a superfícies fosques en termes d'albedo) per superfícies més reflectants, com ara les pastures i els conreus. La figura 1.5 mostra els diferents components del forçament radiatiu i la contribució al canvi antropogènic total durant l'era

industrial (1750-2011) de $2,3(1,1-3,3) \text{ W m}^2$ (Myhre *et al.*, 2013).

1.3. El balanç històric i contemporani entre fonts i embornals de CO_2

L'atenció sobre els impactes i la mitigació del canvi climàtic se centra, majorment, a entendre les emissions de GEH i la manera de reduir-les (i altres components del forçament radiatiu). Per al CO_2 , el gas dominant, és tan important entendre les emissions antropogèniques com els embornals d'aquest gas (tant naturals com gestionats). Aquesta importància es posa de manifest en la figura 1.6, que mostra les contribucions de les diferents fonts d'emissions a l'augment de la concentració de CO_2 a l'atmosfera entre el 1870 i el 2014.

Com es pot observar, sense els embornals les emissions haurien elevat la concentració atmosfèrica de CO_2 fins a 545 ppm i haurien superat clarament el límit que permetria establir el sistema climàtic per sota de 2°C . Gràcies a l'efecte embornal dels oceans i la vegetació terrestre, que van absorbir més de la meitat de les emissions, la concentració atmosfèrica es va reduir en 148 ppm fins a assolir, l'any 2014, 397 ppm. Aquest pot ser el servei ecosistèmic més valuós per al benestar de les societats modernes, valorat en centenars de milions d'euros anualment, ja que el mateix efecte

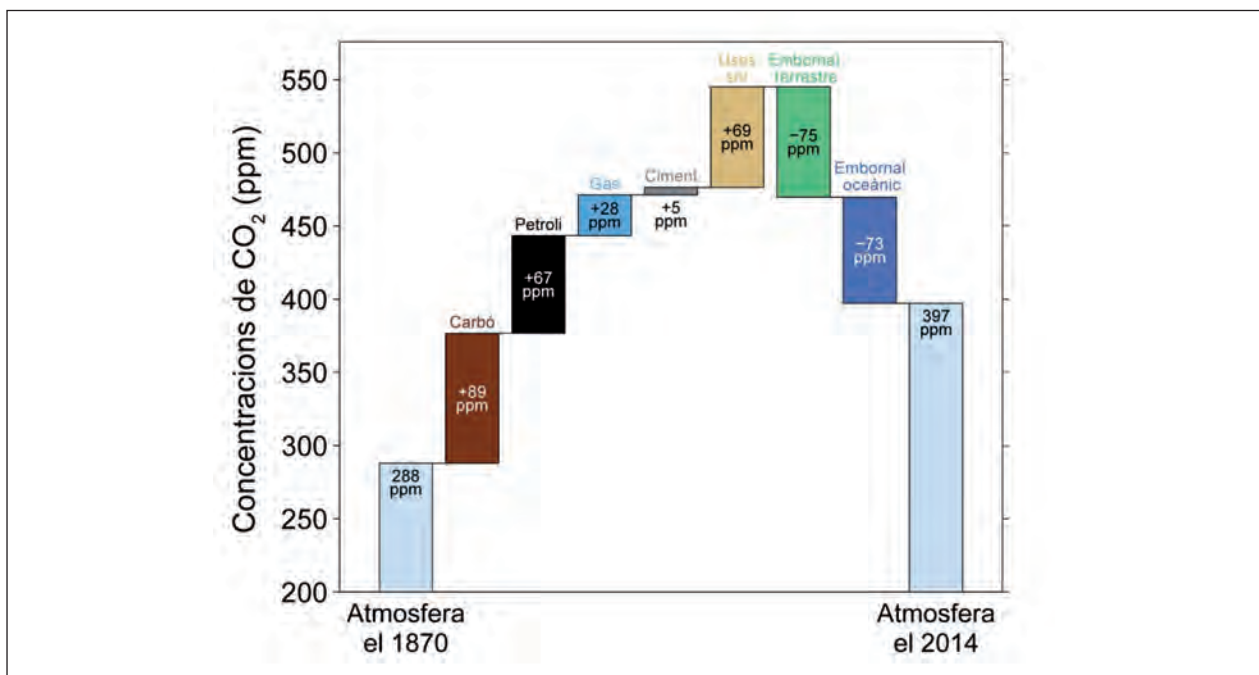


FIGURA 1.6. Les contribucions acumulatives de fonts i embornals de CO_2 al balanç global de carboni del 1870 al 2014 (GCP, 2015a).

TAULA 1.1. Emissions acumulatives de CO₂ per als períodes 1750-2014 i 1870-2014 en gigatonnes de diòxid de carboni (Gt CO₂)

Unitats en Gt CO ₂	1750-2014 (acumulatiu)	1870-2014 (acumulatiu)	2005-2014 (mitjana anual)
Emissions			
Combustibles fòssils i industrials	1.480 ± 75	1.465 ± 75	33 ± 1,8
Usos del sòl	690 ± 240	530 ± 180	3,4 ± 1,8
Emissions totals	2.170 ± 255	1.995 ± 200	37,4 ± 2,5
Partició			
Acumulació a l'atmosfera	935 ± 20	845 ± 20	16,0 ± 0,4
Embornal oceànic	625 ± 75	570 ± 75	9,5 ± 1,8
Embornal terrestre	605 ± 255	585 ± 220	10,9 ± 2,9

Per a les dues primeres columnes, els valors s'han arrodonit al número 5 més proper per tal de reflectir els límits de les estimacions. Això fa que el balanç entre les emissions i la partició no sigui zero.

Font: GCP, 2015a; Le Quéré *et al.*, 2015.

seria molt costós d'aconseguir utilitzant els mercats de carboni i altres sistemes per a la descarbonització (Canadell *et al.*, 2010).

Les emissions acumulatives durant el període 1750-2014 van ser de 1.480 ± 75 Gt CO₂ procedents de combustibles fòssils i de 690 ± 240 Gt CO₂ procedents de canvis en els usos del sòl, i van assolir un total de 2.170 ± 255 Gt CO₂. Aquestes emissions es van repartir entre l'atmosfera (935 ± 20 Gt CO₂), els oceans (625 ± 75 Gt CO₂) i els ecosistemes terrestres (605 ± 255 Gt CO₂). Segons alguns càlculs de balanços, les emissions acumulatives es compten a partir del 1870 (taula 1.1).

Les tendències dels embornals naturals són molt importants per a entendre l'excés de CO₂ que romandrà a l'atmosfera per una quantitat determinada d'emissions. La dinàmica d'aquests embornals ha estat una propietat molt impressionant del sistema planetari, que en part ha sobtat la comunitat científica per la constància i la resiliència al llarg del temps i en condicions de pertorbació molt diferents.

Això es posa de manifest amb l'exemple que a principi dels anys seixanta del segle passat les activitats humanes emetien unes 15 Gt CO₂ l'any, i que prop de la meitat van ser absorbides pels embornals naturals. Seixanta anys més tard les activitats humanes emeten unes 40 Gt CO₂ l'any, i

prop de 20 Gt CO₂ són absorbides pels oceans i els ecosistemes terrestres (Le Quéré *et al.*, 2015). Tanmateix, ja s'han detectat canvis en aquests embornals, amb una disminució de l'eficiència (Canadell *et al.*, 2007; Raupach *et al.*, 2015). A partir de l'aplicació de models climàtics, s'ha simulat que en un món més calent i amb més CO₂ l'eficiència dels embornals disminuirà. Tanmateix, la incertesa d'aquest *feedback* de carboni-clima és gran i constitueix una de les àrees de recerca més activa en el present.

1.4 El repte de la mitigació per a estabilitzar el sistema climàtic

El *Cinquè informe d'avaluació* de l'IPCC (2013-2014) va produir més d'un miler de trajectòries d'emissions que exploraven una gran varietat d'escenaris futurs socioeconòmics i tecnològics. Això inclou des d'un món globalitzat que es descarbonitza molt ràpidament fins a un món on els sistemes energètics continuen basats en combustibles fòssils que alimenten economies d'una gran intensitat energètica i d'ús de materials. Aquests futurs comporten augments en la temperatura global mitjana des de quasi un 1 °C per sobre dels nivells preindustrials fins a més 5 °C a final d'aquest segle, amb escenaris extrems encara més alts (Clarke *et al.*, 2014).

Per a entendre la importància d'aquest interval entre 1 °C i 5 °C, cal tenir en compte que un

interval d'una magnitud similar però en fred és el que separa un període glacial d'un període interglacial, amb la diferència que en el primer cas més de mitja Europa i Amèrica del Nord són cobertes per gel i en el segon cas tenim els paisatges d'avui dia. L'Acord de París estableix l'objectiu d'estabilitzar el canvi climàtic per sota de 2 °C, cosa que correspon a la major part de les trajectòries amb línies blaves de la figura 1.7, conegudes com a *trajectòries de concentracions representatives*, que estableixen el clima a final de segle amb un excés de forçament radiatiu de 2,6 W m⁻².

Tots aquests escenaris són il·lustracions idealitzades de la manera com el món podria funcionar d'acord amb les assumpcions i les capacitats dels models d'avaluació integrada que van ser utilitzades en aquest exercici. Tot i que presenten mancances, aquests escenaris representen l'estat més avançat del coneixement i serveixen per a emmarcar els reptes associats a trajectòries alternatives i les conseqüències finals al clima. El que resta, ara,

és traduir aquestes trajectòries en accions concretes i entendre l'evolució temporal dels canvis socioeconòmics i tecnològics requerits per a estar dins d'una trajectòria determinada.

1.4.1. Balanços de carboni per a estabilitzar el sistema climàtic

El Cinquè informe d'avaluació de l'IPCC, publicat l'any 2013, va mostrar que hi ha una relació directa, quasi proporcional, entre les emissions humanes acumulatives de CO₂ i l'augment de la temperatura global. És un descobriment important, ja que hi ha molts components relacionats amb les activitats humanes que influeixen en el sistema climàtic, amb propietats d'escalfament i de refredament, algunes de les quals amb incerteses molt grans. Així, és possible relacionar una quantitat relativament fàcil de mesurar com ara les emissions acumulatives de CO₂ amb el canvi de la temperatura global, que és el resultat de canvis en la concentració de CO₂ però també de molts altres components que, d'una manera complexa, generen canvis del forçament radiatiu de la Terra (figura 1.5).

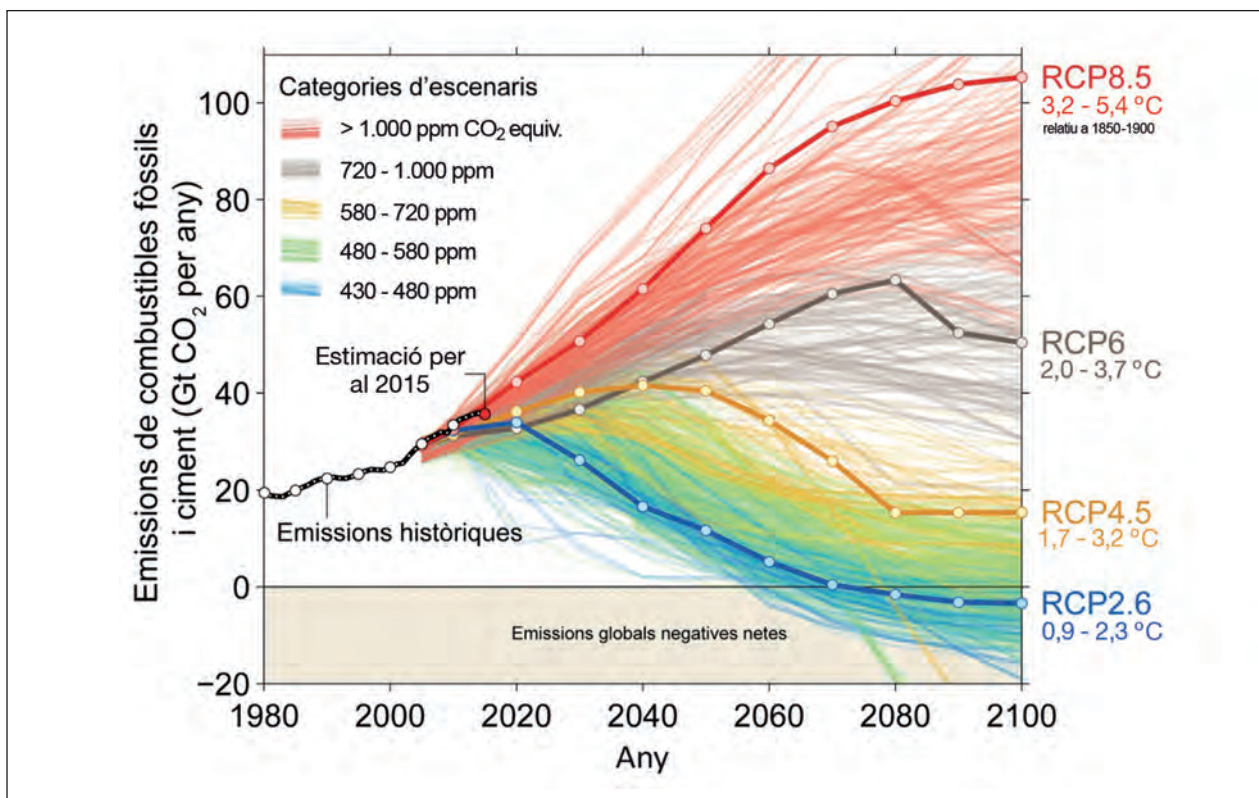


FIGURA 1.7. Trajectòries d'emissions de CO₂ utilitzades a l'AR5 de l'IPCC (2013-2014). Les línies fortes corresponen a les quatre trajectòries de concentracions representatives utilitzades al WGI de l'AR5 de l'IPCC per a generar les projeccions de canvi climàtic, i les línies més difuminades corresponen a les trajectòries utilitzades pel Grup de Treball III (WGIII) de l'IPCC per a avaluar les alternatives de mitigació. La línia negra de les emissions històriques prové del Carbon Dioxide Information Analysis Center i el Global Carbon Project.

TAULA 1.2. Emissions acumulatives de CO₂ des del 1870 per a no excedir tres nivells d'estabilització climàtica

Emissions acumulatives de CO ₂ des del 1870 (Gt CO ₂)									
Temperatura	< 1,5 °C			< 2 °C			< 3 °C		
Probabilitat	66 %	50 %	33 %	66 %	50 %	33 %	66 %	50 %	33 %
Balanç de carboni	2.300	2.300	2.400	2.550	2.900	2.950	s/d*	4.150	3.500
	–	–	–	–	–	–		–	–
	2.350	2.350	2.950	3.150	3.200	3.800		5.750	4.250

* s/d: sense dades.

Els dos nivells més baixos es corresponen amb els escenaris de l'RCP2.6 i l'Acord de París, i el nivell < 3 °C es correspon amb l'RCP4.5 i l'escenari triat com a referència en l'elaboració del TICCC. Aquests valors procedeixen de més de mil escenaris analitzats amb els models del WGIII de l'IPCC (Clarke *et al.*, 2014 i línies descolorides de la figura 1.7).

Aquesta relació és el resultat d'una sèrie de *feedbacks* compensatoris, com ara la relació logarítmica entre el CO₂ i el forçament radiatiu, la disminució en l'eficiència termal de l'oceà amb el temps i els canvis en l'eficiència dels embornals de CO₂ (Rogelj *et al.*, 2016), i del fet que el CO₂ té un temps de «residència» a l'atmosfera molt llarg.

Així, aquesta relació simplifica extraordinàriament l'exercici d'estimar la quantitat màxima de CO₂ permesa per a no excedir un objectiu específic d'estabilització climàtica. Hi ha molta literatura científica centrada en els balanços de carboni, que sovint presenta quantitats diferents de carboni per a un mateix nivell de temperatura. Això és degut als diferents resultats que s'obtenen quan s'usen diferents models o tipus de models per a calcular el balanç, al nivell de probabilitat (risc) de no excedir la temperatura objectiu i al fet que els gasos i els components del forçament radiatiu que no són CO₂ tenen trajectòries diferents als diversos escenaris, cosa que afecta la quota final de CO₂ permès (Rogelj *et al.*, 2016).

Sobre la probabilitat de situar-se per sota d'una temperatura objectiu, com més alta sigui la probabilitat més petit serà el balanç de carboni permès. La probabilitat es calcula com el nombre de models-escenaris que són capaços de romandre per sota d'un objectiu de temperatura per a una quantitat de carboni determinada.

La taula 1.2 mostra els valors dels balanços de carboni necessaris per a no excedir tres nivells de temperatura. Com més segur es vulgui estar

de no superar el nivell de temperatura escollit, més petit serà el balanç de carboni que és permès. La probabilitat s'associa al nivell de risc que els governs del món vulguin prendre quan decideixin els nivells de temperatura i de probabilitat (risc) associada.

Els dos gràfics de la figura 1.8 il·lustren els components històrics i permesos en el futur per als dos objectius d'estabilització del nou Acord de París (< 1,5 °C i < 2 °C). Els components que no són CO₂ inclouen tots els components de forçament radiatiu (figura 1.5), amb quantitats determinades pels escenaris. L'atribució del balanç de carboni disponible per al futur entre les emissions d'usos del sòl i de combustibles fòssils és el resultat de les fraccions escollides per als mateixos models i escenaris utilitzats. La qüestió important és la quota total restant, i no pas la partició entre combustibles fòssils i usos de sòl. Les quotes d'emissions que es podrien assumir en el futur són molt reduïdes: l'any 2014, per a l'escenari de 2 °C quedava un marge de 900 Gt CO₂, a les quals cal restar 40 Gt CO₂ d'emissions de combustibles fòssils i d'usos del sòl que es van produir durant el 2015 (Le Quéré *et al.*, 2015), per a arribar a un balanç per sota de 870 Gt CO₂. Si els nivells d'emissions de CO₂ actuals continuen en el futur, aquest balanç de carboni quedarà exhaurit en vint-i-dos anys. Si les emissions globals continuen creixent com ho han fet durant els decennis passats, les emissions permissibles es gastaran encara més ràpidament. Per a l'escenari d'1,5 °C, les quotes permissibles de CO₂ encara són més petites i quedaran exhaurides en pocs anys.

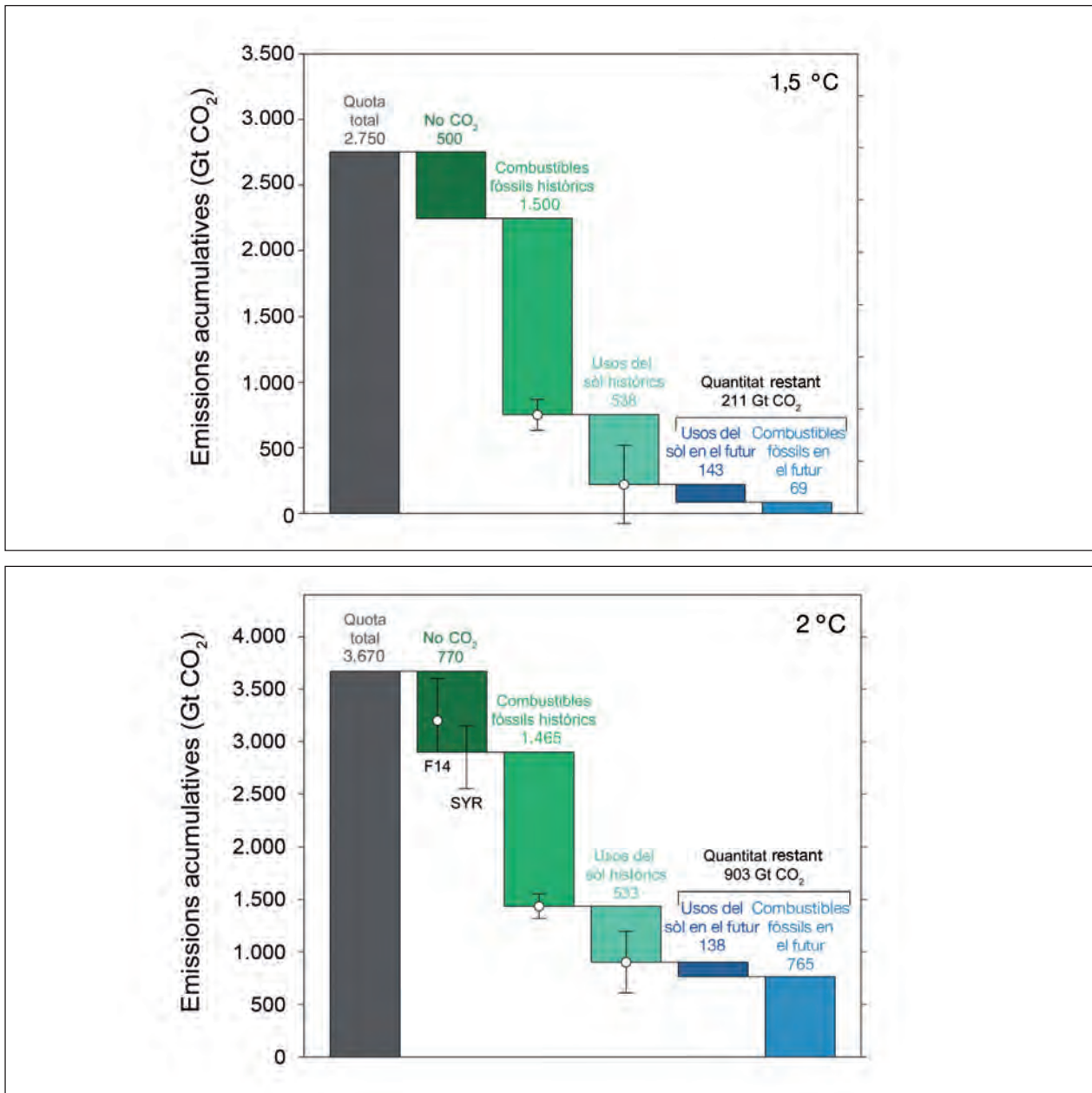


FIGURA 1.8. Il·lustracions simplifiades del balanç de carboni per a no excedir la temperatura mitjana global d'1,5 °C i 2 °C, amb una probabilitat més gran del 66 %. Les emissions històriques corresponen al període 1870-2014. En negre: quota total; en verd: emissions històriques, i en blau: emissions permeses en el futur.

Font: Glen Peters, CICERO; GCP, 2015a; Clarke *et al.*, 2014.

Com s'ha explicat abans, el nivell de risc que hom considera acceptable per a no superar la temperatura objectiu comporta canviar significativament la mida dels balanços de carboni. L'adopció del nivell de riscos és quelcom que els governs i la societat hauran de decidir. Tanmateix, no sembla prudent assumir riscos associats amb probabilitats per sota del 66 % (probabilitat mínima 2 de 3) per tal d'assegurar que no se superi l'objectiu de temperatura atès un balanç de carboni. Malaura-

dament, és massa tard per a poder adoptar nivells de probabilitat més alts per a l'estabilització a 1,5 °C i 2 °C, com ara nivells del 90-95 %, que assegurarien aconseguir els objectius escollits.

El valor d'aquests balanços de carboni, especialment per a nivells d'estabilització baixos com ara < 1,5 °C i < 2 °C, té més incertesa a causa dels altres components del forçament radiatiu que no són CO₂. Hi ha moltes possibles barreges de CO₂ i no

CO₂, amb l'efecte consegüent en la temperatura. Aquest efecte és més petit per a escenaris alts de temperatura, en els quals el CO₂ és molt abundant amb relació a la resta de components, cosa que fa la relació quasi lineal més forta.

D'acord amb el coneixement adquirit sobre balanços de carboni des de la publicació del *Cinquè informe d'avaluació* de l'IPCC (l'any 2013) fins ara, es considera que la quota d'emissions que encara es poden emetre sense superar els 2 °C amb una probabilitat > 66 % és de 590 Gt CO₂ a 1.240 Gt CO₂ (Rogelj *et al.*, 2016). Si les emissions actuals de 40 Gt CO₂ per any continuen, aquest balanç quedarà exhaurit entre quinze i trenta anys.

1.4.2. Trajectòries congruents amb els balanços de carboni

És important apuntar que per a arribar al pic d'emissions i a l'estabilització de la temperatura global es requereix assolir emissions netes iguals a zero. En el cas dels escenaris d'1,5 °C i 2 °C, aquesta fita s'ha d'aconseguir durant aquest segle (Collins *et al.*, 2013; Clarke *et al.*, 2014).

D'acord amb els càlculs de l'apartat anterior, la probabilitat de quedar-se per sota de 2 °C disminuirà ràpidament més enllà dels pròxims vint o trenta anys. Descarbonitzar l'economia global en aquest període tan curt requereix l'assoliment, d'una manera immediata, de taxes de mitigació anuals per sobre del 5 %, sostingudes durant decennis (Rau-pach *et al.*, 2014). És una opció molt improbable, bàsicament perquè més del 60 % de les emissions globals provenen d'economies emergents i menys desenvolupades, amb una capacitat limitada per a descarbonitzar-se tan ràpidament.

Les quotes d'emissions disponibles es poden fer allargar més temps si entrem en una tendència de reducció d'emissions amb el temps. Una mitigació agressiva, comparable a la reducció d'emissions que va resultar de les grans transformacions energètiques en alguns països quan es van nuclearitzar (Peters *et al.*, 2013), podria allargar les quotes de carboni fins a mitjan segle. Tanmateix, els models d'avaluació integrada mostren que no és possible, ni econòmicament ni tècnicament, descarbonitzar l'economia global tan ràpidament sense entrar en camins insostenibles de desenvolupament. Això

fa que els models excedeixin la quota de carboni i no assoleixen emissions netes iguals a zero fins a la segona meitat d'aquest segle. El pagament per a excedir la quota durant la primera meitat del segle és la necessitat de remoure activament CO₂ de l'atmosfera en grans quantitats per a arribar a emissions zero netes (Fuss *et al.*, 2014), tal com ensenya la figura 1.7, per a tots els escenaris que superen la línia zero d'emissions.

La figura 1.9 il·lustra tres trajectòries possibles discutides en aquest apartat que són congruents amb l'estabilització de la temperatura global a 1,5 °C. Les figures 1.8.a i 1.8.b il·lustren l'ús del concepte del balanç de carboni sense remoure emissions de l'atmosfera (també conegudes com a *emissions negatives*). L'Acord de París es basa en la premissa que excedirem el balanç de carboni durant la primera meitat d'aquest segle, que esdevindrem neutrals en emissions durant la segona meitat i que a continuació vindrà un període en què remourem CO₂ activament de l'atmosfera (figura 1.8.c). Això es basa en el fet que 101 dels 116 escenaris amb nivells de concentracions de CO₂ de 430 a 480 ppm CO₂ equiv. del WGIII de l'IPCC (Clarke *et al.*, 2014), coherents amb els 2 °C, requereixen emissions negatives globals netes durant la segona meitat d'aquest segle (Fuss *et al.*, 2014; Smith *et al.*, 2016). De fet, les tecnologies d'emissions negatives també són comunes en els portafolis de mitigació de moltes de les trajectòries més calentes de 2 °C. Concretament, 235 dels 635 escenaris que assoleixen concentracions de 480 a 720 ppm CO₂ equiv. fan servir tecnologies d'emissions negatives (Fuss *et al.*, 2014).

Aquestes tecnologies d'emissions negatives inclouen la producció de biocombustibles amb captura de carboni i emmagatzematge, la captura directa de CO₂ de l'atmosfera amb reaccions químiques, l'acceleració de la descomposició natural de minerals, l'aforestació i la reforestació, la conversió de biomassa a biocarbó altament recalcitrant i la manipulació de l'absorció de carboni pels oceans per mitjans químics o biològics. Amb relació a moltes d'aquestes tecnologies, cal tenir present que hi ha grans incerteses sobre l'efectivitat, no se n'ha demostrat la viabilitat comercial o bé tenen costos prohibitius. Poques tècniques tenen el potencial de ser desenvolupades per a crear emissions ne-

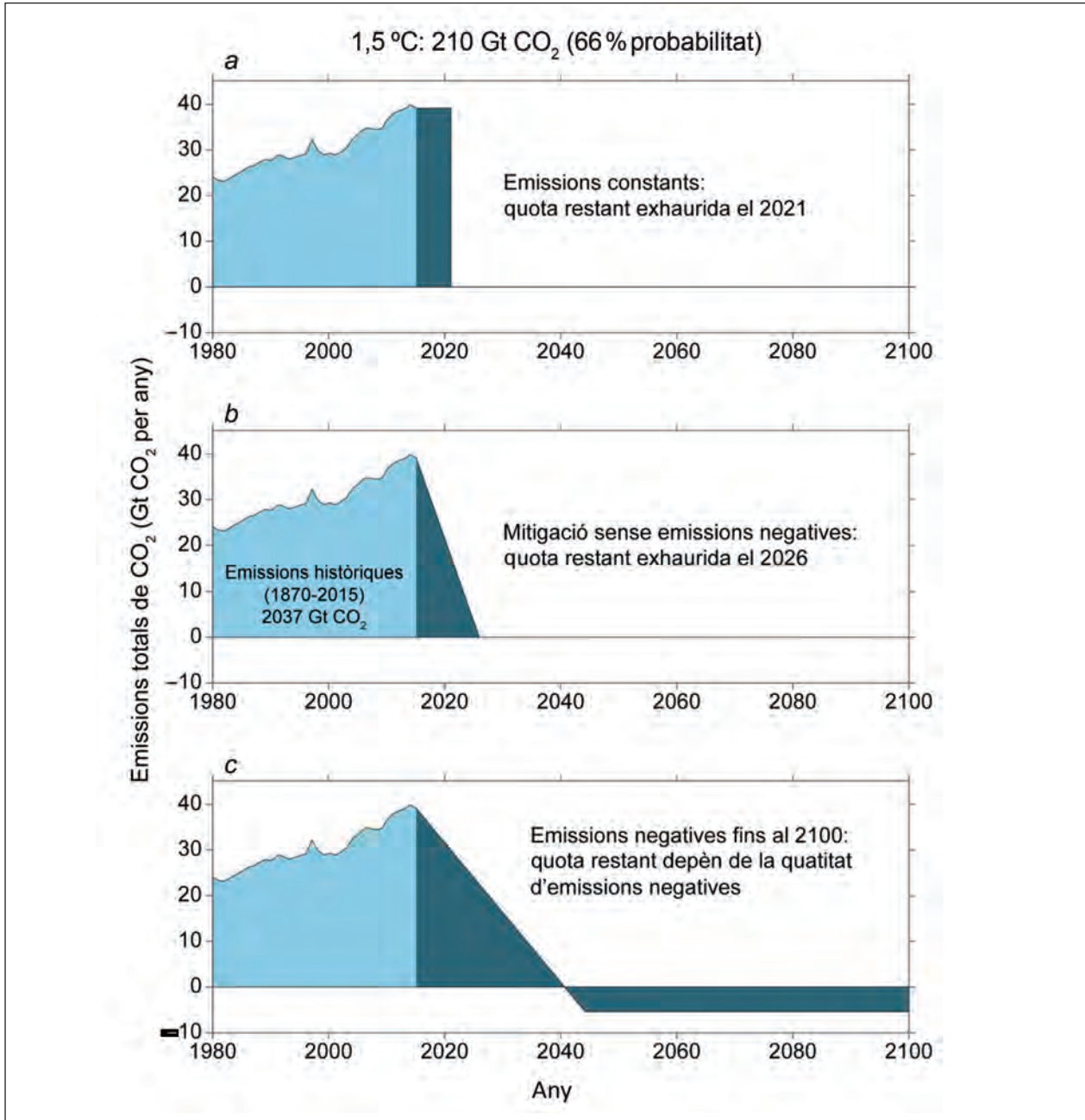


FIGURA 1.9. Il·lustració de tres trajectòries alternatives congruents amb l'estabilització de la temperatura global a 1,5 °C. a) Basat en el balanç de carboni restant a partir del 2016 de 210 Gt CO₂ i d'emissions anuals de 40 Gt CO₂; el balanç és exhaurit el 2021. b) El mateix balanç de carboni però amb una mitigació d'emissions molt agressiva; el balanç és exhaurit el 2026. c) El mateix balanç de carboni «net» però excedit el 2040, a partir del qual es necessiten emissions negatives de quasi 4 Gt CO₂ per any fins a final de segle per a compensar l'excés d'emissions.

Font: Adoptat de Glen Peters, CICERO; dades de GCP, 2015a.

gatives a l'escala que és necessària; alguns escenaris requereixen nivells de fins a 1.000 Gt CO₂ acumulatius en el transcurs d'aquest segle (Smith *et al.*, 2016). L'ús excessiu de tecnologies que no han estat demostrades comercialment o que tenen costos prohibitius s'afegeix als riscos de les trajectòries acceptades i a la urgència de desenvolupar

la recerca necessària i el desenvolupament per a fer possibles les trajectòries d'escalfament baix.

Atesa la incertesa d'aquestes tecnologies, els models d'avaluació integrada han optat per usar, majorment, la producció de biocombustibles amb captura de carboni i emmagatzematge (BCCCE)

(figura 1.10). Els BCCCE són el resultat d'ajuntar dues opcions molt polèmiques: la producció de biocombustibles i la captura i emmagatzematge dels gasos de l'oxidació de la biomassa en reserves geològiques, sovint aqüífers salins. Quaranta-quatre escenaris que s'adiuen amb la limitació de l'escalfament global per sota de 2 °C requereixen emissions negatives anuals de BCCCE de -12 (-22, -7) Gt CO₂ a final de segle i produeixen un total d'emissions netes negatives (l'eliminació neta de CO₂ de l'atmosfera) de -10 (-22, -1,5) Gt CO₂ (Smith *et al.*, 2016).

Tot i que sabem com produir biocombustibles i usar tecnologies de captura i emmagatzematge de carboni a l'escala de pocs milions de tones de CO₂ l'any, no sabem si és possible o com podríem incrementar aquestes tecnologies als nivells requerits de centenars de milions de tones anuals d'emissions negatives (Canadell *et al.*, 2014).

Uns punts clau que encara cal resoldre per a poder augmentar la producció necessària de BCCCE són els requeriments de sòls disponibles per a plantar els cultius energètics, amb estimacions de 370 a 800 milions d'hectàrees per a escenaris de 2 °C, amb requeriments mitjans d'aigua de 700 km³ per any a final de segle (Smith *et al.*, 2016). La competència i l'optimització de múltiples usos del sòl seran uns dels grans rep-

tes que caldrà resoldre en els propers decennis, ja que estabilitzar el clima a costa de disparar els preus alimentaris a causa de l'escassetat de sòls agrícoles per a alimentar una població mundial creixent no faria cap bé.

Catalunya s'ha compromès a reduir en un 40 % les emissions de GEH per al 2030, respecte al nivell del 2005, com a contribució a l'Acord de París (OCCC, 2015). Formarà part de la contribució espanyola de reduir en un 25 % les emissions durant el mateix període i de la reducció de prop del 34 % de la Unió Europea (un 40 % de reducció si ho comparem amb el 1990). Això situa l'esforç de Catalunya molt per sobre de l'esforç mitjà d'Espanya i de la Unió Europea, i es relaciona més amb els esforços de les nacions econòmicament més avançades d'Europa i els Estats Units.

No és fàcil avaluar si el compromís de Catalunya o el de qualsevol altra nació és congruent amb els objectius de l'Acord de París d'estabilitzar la temperatura global per sota de 2 °C i d'intentar romandre a 1,5 °C, i això és degut a dues raons. La primera té a veure amb el fet que l'únic balanç del qual podem comparar les contribucions és el balanç global de carboni restant, que permet estabilitzar la temperatura per sota de 2 °C. La partició d'aquest balanç restant seria una decisió política dels estats membres del Conveni marc sobre el canvi climàtic.

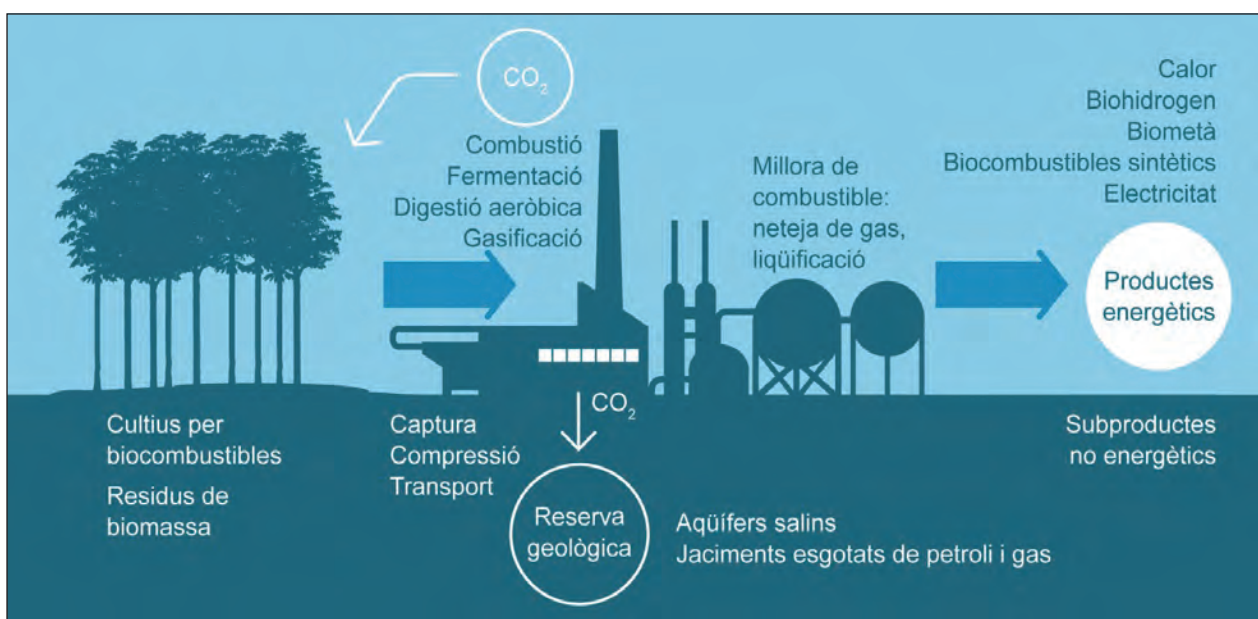


FIGURA 1.10. Producció de biocombustibles amb captura de carboni i emmagatzematge geològic.

Font: Canadell *et al.*, 2014.

Tanmateix, el Conveni marc ha deixat clar que no desenvoluparà regles per a distribuir la quota restant entre els estats membres. De fet, un dels principis fonamentals del nou acord, i a diferència del Protocol de Kyoto, és el fet que els estats membres decideixen per si mateixos els nivells de mitigació, i el compromís de l'acord és engrandir l'esforç cada cinc anys. A aquesta primera raó cal afegir el fet que la quota permesa d'emissions no és una quota fixa, sinó que canvia segons el nivell de risc que la societat vol acceptar quan té en compte tecnologies futures per a remoure CO₂ de l'atmosfera, que encara no són disponibles.

La segona raó és el fet que els compromisos de mitigació només s'estenen fins al 2030, i que hi ha molts pocs països que revelin les aspiracions per a més enllà, com ara el Regne Unit, que pretén reduir en un 80 % les emissions per al 2050, respecte del 1990. Aquestes trajectòries només per als quinze anys vinents són massa curtes per a entendre si ens encaminem cap a trajectòries coherents amb els objectius, les quals s'estendran durant la resta d'aquest segle.

Tanmateix, hom pot assumir uns requeriments específics més enllà del 2030 i avaluar si els primers quinze anys de la trajectòria de mitigació són congruents amb l'estabilització per sota de 2 °C. Totes les anàlisis fetes fins ara han arribat a la mateixa conclusió: la col·lecció d'esforços de mitigació (INDC) que els estats membres van sotmetre al Conveni marc sobre el canvi climàtic l'any passat comportarà que la temperatura global se situï ben per sobre dels 2 °C (UNFCCC, 2015b; CAT, 2015).

Tenir en compte l'excés d'emissions del 2030 (15,1 Gt CO₂ equiv., o el 35 % d'acord amb l'UNFCCC, 2015b) i demanar a nacions específiques que estableixin objectius d'emissions més ambiciosos per a cobrir aquesta distància seria arbitrari. D'això deduïm que totes les nacions hauran d'oferir nivells de mitigació més alts dels que van oferir abans de les negociacions de París, el 2015. Raupach *et al.* (2014) van fer un intent de basar la distribució de les emissions permeses per a un escenari de 2 °C en una distribució d'emissions iguals per persona o en una distribució que respectés les tendències actuals. En ambdues maneres de distribuir les emissions, entre regions o entre països, els nivells

de mitigació que pertoquen als països europeus són molt més alts que els nivells oferts als INDC. Això resulta de la necessitat de permetre que els països més pobres es puguin desenvolupar en part encara amb l'ús de combustibles fòssils.

A la figura 1.7, que conté la informació en què es va basar l'Acord de París, la major part dels escenaris congruents amb 2 °C o menys assoleixen emissions zero netes a mitjan segona part d'aquest segle. Si reflectim el principi del Conveni marc de la responsabilitat comuna però diferenciada d'acord amb les circumstàncies nacionals diferents, hom podria esperar que els països més desenvolupats haurien d'arribar a emissions zero netes al voltant del 2050, per tal de permetre que els països menys desenvolupats assolissin aquest objectiu més tard. Es tracta d'un objectiu clar a llarg termini, que permet entendre si les accions dels països desenvolupats són coherents amb la limitació de la temperatura global per sota de 2 °C.

1.5. Un repte sense precedents

No hi ha cap dubte que l'Acord de París, aprovat el mes de desembre de l'any 2015, ha llançat el repte més gran que mai s'ha plantejat als estats que són part del Conveni marc de les Nacions Unides sobre el canvi climàtic, un repte que requereix una transformació fonamental dels sistemes energètic i econòmic a escala global. Aquesta transformació només serà possible si va lligada a un canvi del sistema social de la mateixa magnitud. Ara mateix, trobar una situació anàloga a la història de les societats modernes es fa difícil.

La figura 1.7 mostra la tendència global de les emissions de CO₂ fins a l'any 2015, la qual no és congruent amb l'escenari de limitació de l'escalfament global per sota de 2 °C. Aquesta tendència no permet projectar el futur, però un seguiment lineal ens portaria cap a un escalfament global mitjà de més de 3 °C a final d'aquest segle.

La figura 1.11 il·lustra les trajectòries d'emissions dels quatre països/regions que generen més emissions de CO₂, responsables del 59 % de les emissions globals de CO₂, incloent-hi els compromisos de mitigació fins al 2030. Aquestes projeccions es comparen amb un escenari idealitzat que conserva el balanç de carboni per limitar l'escalfa-

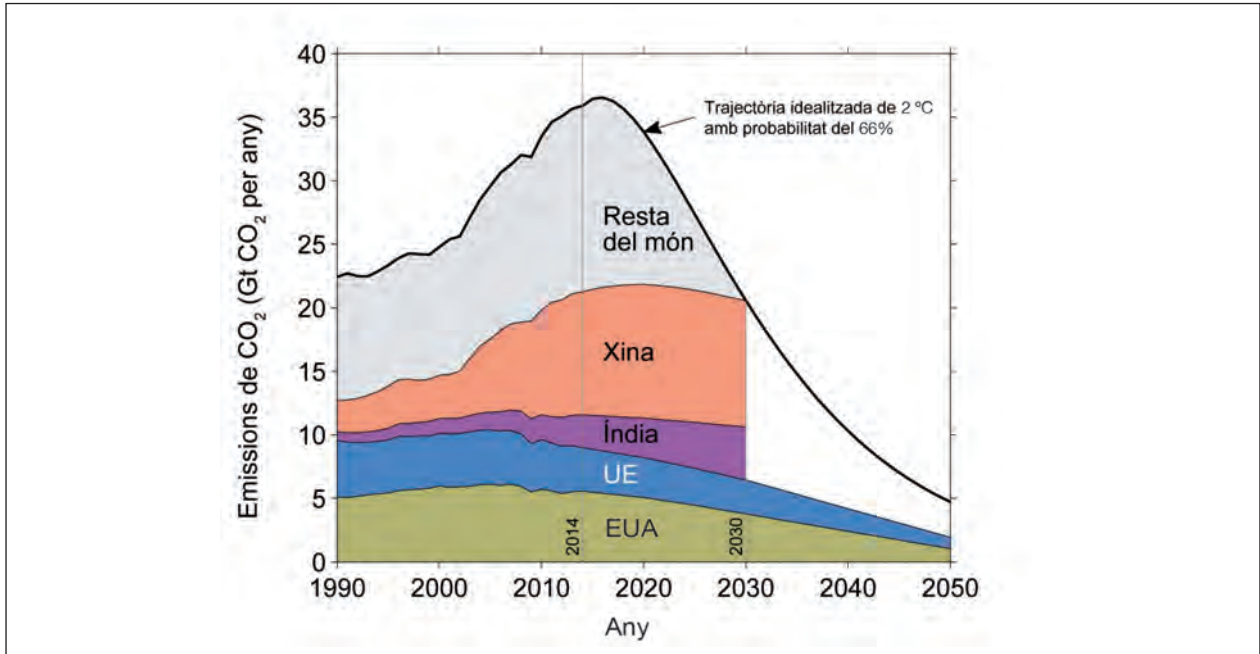


FIGURA 1.11. Comparació entre les trajectòries dels quatre països/regions amb les emissions de CO₂ més altes globalment, incloent-hi els compromisos de mitigació fins al 2030 i un escenari idealitzat d'estabilització a 2 °C (basat en Peters *et al.*, 2015; GCP, 2015a).

ment global per sota a 2 °C (sense utilitzar emissions negatives netes), i mostren que els esforços de mitigació a què els governs s'han compromès fins al 2030 no són suficients per a evitar excedir el balanç de carboni permès. Fins i tot seguint trajectòries amb emissions negatives (les trajectò-

ries de color blau de la figura 1.7), els esforços de mitigació proposats pel col·lectiu de més de cent noranta estats no són suficients (UNFCCC, 2015b).

També és important avaluar i monitorar les trajectòries de descarbonització de països individuals

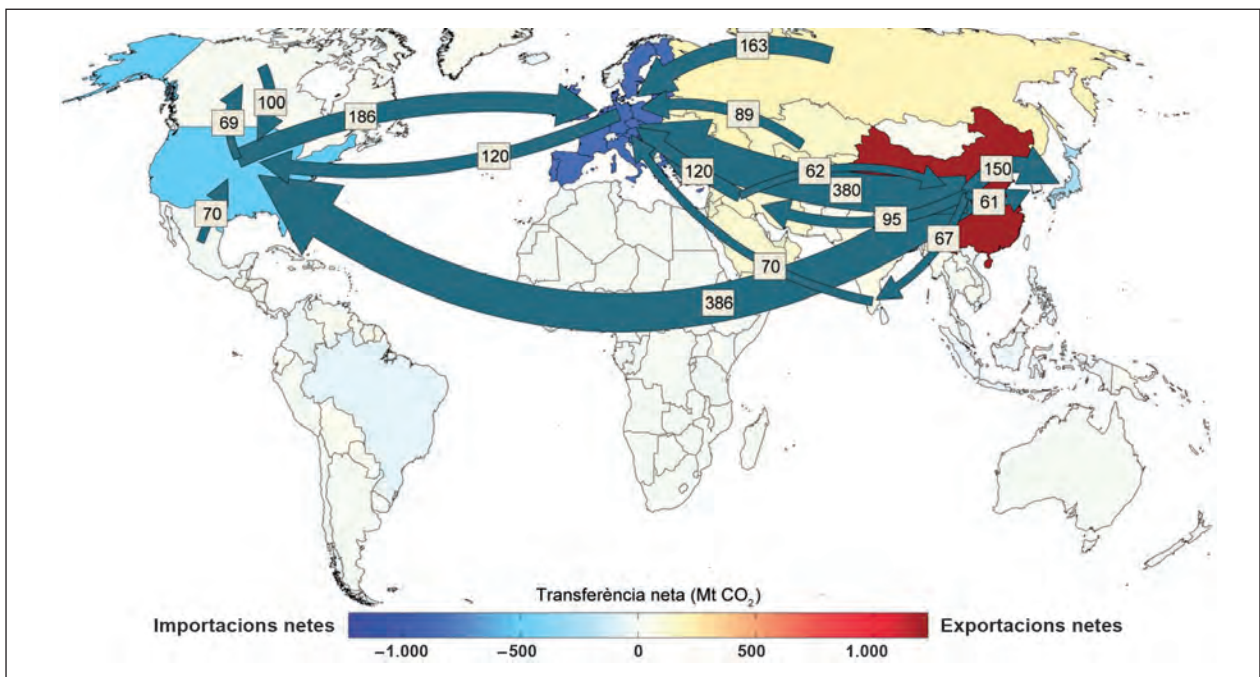


FIGURA 1.12. Els deu fluxos de carboni més grans entre el lloc on s'emeten i el lloc on els productes i serveis es consumeixen. Es tracta de les transferències netes entre països per mitjà del comerç internacional de productes i serveis en Mt CO₂ (Peters *et al.*, 2013; GCP, 2015a).

tenint en compte la tendència de molts països desenvolupats a externalitzar parcialment a altres països les emissions associades al consum de productes i serveis. Aquestes emissions, anomenades *de consum*, són diferents de les emissions *territorials*, generades al territori d'un país determinat, i són regulades pel Conveni marc de les Nacions Unides sobre el canvi climàtic. Entre els anys 1990 i 2013, les emissions territorials dels països més desenvolupats (països de l'annex B del Conveni marc) van disminuir a un ritme mitjà del 0,1 % anual, mentre que les de consum van créixer en un 0,8 % (Le Quéré *et al.*, 2015). L'estabilització del clima no es materialitzarà si simplement es transfereixen emissions d'un país a un altre per mitjà del comerç internacional (figura 1.12).

Finalment, bona part del repte de desenvolupar un món amb emissions de carboni molt baixes o totalment descarbonitzat es relaciona amb el fet que el sistema econòmic actual es basa, en part, en els beneficis de l'explotació futura de reserves fòssils. La figura 1.13 mostra els balanços de carboni que corresponen als escenaris d'estabilització climàtica a 2 °C, 2,5 °C i 3 °C. Els balanços representen les emissions històriques però també les emissions *compromeses*, és a dir, les emissions futures associades a la infraestructura energètica basada en combustibles fòssils que continuaran fins que es retirin de velles (Davis *et al.*, 2010).

Aquestes quotes mostren que quasi dues terces parts dels recursos fòssils emmagatzemats a

les reserves conegudes no s'haurien d'explotar amb finalitats energètiques per evitar superar la concentració atmosfèrica de carboni que, amb una probabilitat del 50 %, mantindria l'escalfament global per sota de 2 °C (Raupach *et al.*, 2014). La transferència de carboni de les reserves de recursos fòssils convencionals a l'atmosfera ja excediria el balanç de 3 °C, i si hi afegim les reserves de combustibles menys convencionals, que creixen ràpidament, se superarien els 4 °C de temperatura mitjana global.

Malgrat l'excepcionalitat de tots aquests reptes, hi ha signes positius que convergeixen ràpidament i que podrien facilitar l'inici de la gran transformació requerida (si optem per fer-la). L'Acord de París, tot i no ser en si mateix el progrés tangible òptim pel que fa a la reducció de les emissions globals, sí que és el marc polític més agressiu que mai hem tingut, amb una visió fixada en l'objectiu final d'estabilització climàtica per sota de 2 °C i unes estructures d'implementació i de revisió adequades.

El creixement d'emissions globals de CO₂ s'ha desaccelerat significativament els dos últims anys, amb un creixement del 0,6 % el 2014 i una projecció de no creixement per al 2015, amb relació a les taxes de creixement anual del 2,4 % del decenni anterior (Jackson *et al.*, 2015). Aquesta desacceleració ha anat acompanyada d'un creixement important del producte brut mundial, de més del 3 % per any, que apunta d'una manera clara cap a un desacoblament —únic a la història moderna— en-

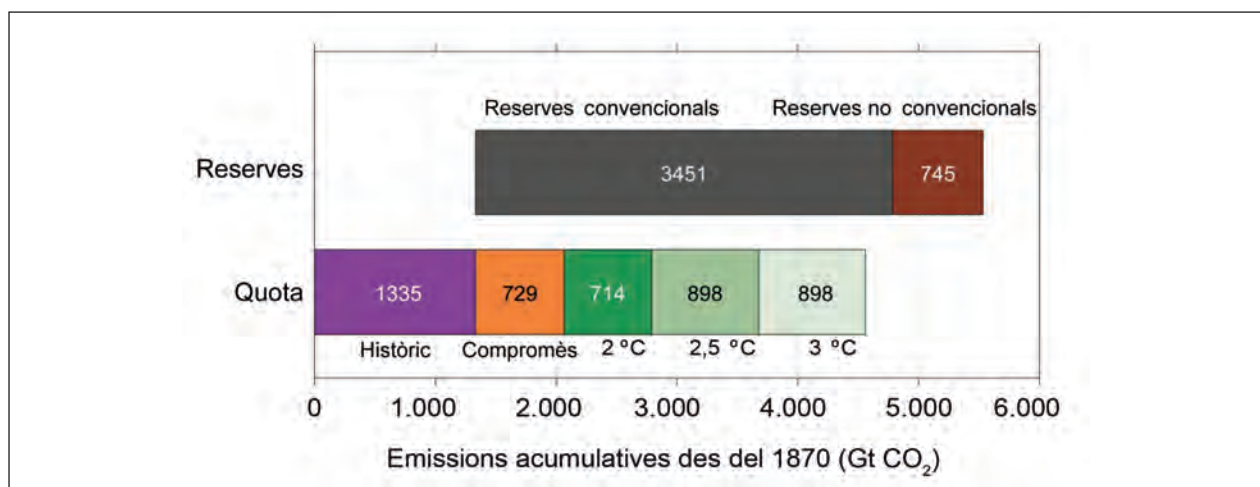


FIGURA 1.13. Comparació entre els balanços de carboni corresponents a escenaris d'estabilització climàtica a 2 °C, 2,5 °C i 3 °C (50 % probabilitat) amb les reserves de carboni dels combustibles fòssils (carbó, gas natural, petroli, gas no convencional i petroli no convencional) (Raupach *et al.*, 2014).

tre l'economia i les emissions globals. És ben possible que les emissions tornin a créixer en el futur, però tots els signes indiquen que som davant d'un període de creixement lent que podria comportar un pic d'emissions en un futur no gaire llunyà.

També s'han observat canvis estructurals molt enorrajadors a les economies i els sistemes energètics. La capacitat instal·lada d'energia eòlica va assolir els 370 GW el 2014, amb 51 GW instal·lats tot just aquell any, cosa que equival a la capacitat global total que existia tot just fa un decenni (GWEC, 2015). La capacitat total d'energia solar fotovoltaica instal·lada va passar de 3,7 GW el 2004 a 178 GW el 2014, amb més de quaranta països i regions on el preu de les energies renovables va assolir la paritat amb l'energia generada a partir de combustibles fòssils (IEA, 2015).

Finalment, caldria destacar les emissions associades als canvis d'usos del sòl, que han mostrat una tendència cap a la disminució: mentre que la mitjana del decenni del 1990 va ser de $5,5 \pm 2,9$ Gt CO₂, en el decenni del 2000 va disminuir fins a 4 Gt CO₂ i en el decenni actual s'ha aconseguit una mitjana de 2,9 Gt CO₂ (Le Quéré *et al.*, 2015). L'alentiment dels processos de desforestació al Brasil és el factor que explica aquest fet (Zarin *et al.*, 2016). Malgrat tenir un pes més petit si es compara amb les emissions de combustibles fòssils, té una rellevància molt important en termes d'emissions acumulatives històriques del balanç de carboni.

No obstant això, però, encara s'és molt lluny d'encarriar-se cap a trajectòries que permetin assolir escenaris d'estabilització a temperatures baixes, fins i tot si es volen prendre riscos importants i apostar per tecnologies d'emissions negatives en el futur que no se sap si funcionaran —ni com. No hi ha cap dubte que el progrés assolit fins ara podria servir de plataforma per a passar a una era nova, absolutament necessària, de descarbonització i transformació socioeconòmica molt ràpida. Una continuació progressiva de les bones tendències observades fins ara no aconseguirà els objectius de l'Acord de París.

1.6. Conclusions

Les emissions globals de GEH han augmentat durant més de cent cinquanta anys, particular-

ment des del decenni del 1950 i amb una gran acceleració des de principi del 2000. L'any 2015, les emissions de CO₂ provinents de la crema de combustibles fòssils eren quasi un 60 % més elevades que el 1990, fet que constitueix un creixement sense precedents que coincideix, per cert, amb un període intens de diplomàcia internacional per a mitigar el canvi climàtic.

Això ha comportat que els balanços de carboni per a estabilitzar el clima a nivells d'escalfament global baixos que semblaven raonables i possibles durant el decenni del 1990, quan es van discutir per primera vegada, hagin esdevingut reptes que semblen excepcionals o quasi impossibles d'assolir. Aquest gran repte existeix, fins i tot, si acceptem riscos alts i confiem en tecnologies que encara no existeixen o per a les quals encara no s'ha demostrat l'efectivitat i la viabilitat econòmica.

Tanmateix, la convergència de tendències més positives en aquests últims anys i la creació d'un marc polític molt adequat per a controlar les emissions globals obre una oportunitat única, però molt curta, per a decidir embarcar-nos en una de les transformacions del sistema energètic i socioeconòmic més importants de la història i sense precedents en el passat.

1.7. Recomanacions

Els compromisos nacionals de mitigació sotmesos al Conveni marc de les Nacions Unides sobre el canvi climàtic per al període 2020-2030 no són suficients per a assolir els objectius del nou Acord de París. Això implica que totes les nacions hauran de revisar els compromisos i fer-los més ambiciosos per a cobrir la distància que existeix entre el que es requereix i el que les nacions han ofert.

Atesa la necessitat d'accelerar tan ràpidament les taxes de mitigació anual, a més de reduir les emissions del sistema energètic, principalment de CO₂, cal explorar totes les opcions disponibles que puguin reduir el forçament radiatiu antropogènic, les quals inclouen les emissions del sistema de producció d'aliments (com ara el metà i els òxids de nitrogen), que sovint no reben prou atenció, i les que actualment augmenten més ràpidament que el CO₂ (Tian *et al.*, 2016). Igualment, la regeneració i el manteniment dels boscos d'arreu del món

seran importants per a aconseguir nivells baixos d'estabilització climàtica.

Tot i que la transformació cap a un món descarbonitzat es veu com una transformació majorment tecnològica, serà impossible aconseguir els nivells de mitigació necessaris sense una transformació del sistema social d'una magnitud similar. Això inclou la manera com treballem, com ens desplaçament i el que mengem, entre altres exemples. Les economies hauran d'esdevenir molt més eficients i menys intenses energèticament, amb una dependència més gran de la producció de serveis que de la producció de béns.

És tan important treballar en la descarbonització domèstica dels països desenvolupats com fer-ho en les economies emergents i menys desenvolupades, proveint-les d'ajuda econòmica, cooperació i transferència de coneixement i de tecnologies per a accelerar els camins de descarbonització. Menys del 40 % de les emissions globals provenen de països desenvolupats i no estan creixent o disminuint. El 60 % de les emissions restants es preveu que seguiran creixent, i moltes de les promeses de mitigació d'aquests països dependran de la disponibilitat d'ajudes exteriors, sense les quals no es realitzaran.

Tots els esforços de mitigació han de ser coherents amb els principis del desenvolupament sostenible. Més dels cent noranta països que van aprovar l'Acord de París el mes de desembre del 2015 també van aprovar l'Agenda 2030 per al desenvolupament sostenible tot just tres mesos abans (amb els disset objectius de sostenibilitat globals). Cal recordar que l'any 2030 finalitza el primer període de mitigació de l'Acord de París. Això inclou les provisions necessàries per a adaptar-se al canvi climàtic que ja ha ocorregut i que, inevitablement, ocorrerà.

Referències bibliogràfiques

- BUTLER, J.; MONTZKA, S. (2015). «The NOAA anual greenhouse gas index (AGGI)» A: *NOAA Earth System Research Laboratory* [en línia]. <<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html>> [Consulta: 25 gener 2016].
- CANADELL, J. G.; LE QUÉRÉ, C.; RAUPACH, M. R. [et al.] (2007). «Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks». *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104, p. 18866-18870, DOI: 10.1073/pnas.0702737104.
- CANADELL, J. G.; RAUPACH, M. R. (2008). «Managing forests for climate change mitigation». *Science*, 320, p. 1456-1457. DOI: 10.1126/science.1155458.
- CANADELL, J. G.; SCHULZE E.-D. (2014). «Global potential of biospheric carbon management for climate mitigation». *Nature Communications*, 5, 5282, p. 1-12. DOI: 10.1038/ncomms6282.
- CDIAC = CARBON DIOXIDE INFORMATION ANALYSIS CENTER (2015). *Global Carbon Project* [en línia]. <<http://cdiac.ornl.gov/GCP>> [Consulta: 25 gener 2016].
- CIAIS, P.; SABINE, C.; BALA, G. [et al.] (2013). «Carbon and other biogeochemical cycles». A: IPCC = INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR5)*. Edició de T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner [et al.]. Cambridge, etc.: Cambridge University Press. També disponible en línia a: <https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_Chapter06_FINAL.pdf> [Consulta: 25 gener 2016].
- CLARKE L.; JIANG, K.; AKIMOTO, K. [et al.] (2014). «Assessing transformation pathways». A: IPCC = INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate change 2014: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR5)*. Edició d'O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona [et al.]. Cambridge, etc.: Cambridge University Press. També disponible en línia a: <https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_chapter6.pdf> [Consulta: 25 gener 2016].
- Climate action tracker* [en línia] (2015). <http://climateactiontracker.org/assets/publications/briefing_papers/CAT_Temp_Update_COP21.pdf> [Consulta: 25 gener 2016].
- COLLINS, M.; KNUTTI, R.; ARBLASTER, J. [et al.] (2013). «Long-term climate change: Projections, com-

- mitments and irreversibility». A: IPCC= INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR5)*. Edició de T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner [et al.]. Cambridge, etc.: Cambridge University Press. També disponible en línia a: <http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_Chapter12_FINAL.pdf> [Consulta: 25 gener 2016].
- DAVIS, S. J.; CALDEIRA, K.; MATTHEWS, H. D. (2010). «Future CO₂ emissions and climate change from existing energy infrastructure». *Science*, 329, p. 1330-1333.
- DLUGOKENCKY, E.; TANS, P. (2015). «Trends in atmospheric carbon dioxide». A: NOAA Earth System Research Laboratory [en línia]. <<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>> [Consulta: 25 gener 2016].
- FUSS, S.; CANADELL, J. G.; PETERS, G. P. [et al.] (2014). «Betting on negative emissions». *Nature Climate Change*, 4, p. 850-853.
- GCP = GLOBAL CARBON PROJECT (2015a). *Global carbon atlas* [en línia]. <<http://www.globalcarbonatlas.org>> [Consulta: 25 gener 2016].
- (2015b). *Global carbon budget 2015* [en línia]. <<http://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget>> [Consulta: 25 gener 2016].
- GWEC = GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (2015). *Global wind report: Annual market* [en línia]. <<http://go.nature.com/soCk1e>> [Consulta: 25 gener 2016].
- HANSEN, M. C.; POTAPOV, P. V.; MOORE, R. [et al.] (2013). «High-resolution global maps of 21st-century forest cover change». *Science*, 342, p. 850-853.
- IEA = INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2015). *Snap-shot of global PV markets 2014* [en línia]. <<http://go.nature.com/9BFh4O>> [Consulta: 25 gener 2016].
- IPCC = INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2013). «Summary for policymakers». A: *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR5)*. Edició de T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner [et al.]. Cambridge, etc.: Cambridge University Press. També disponible en línia a: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf> [Consulta: 25 gener 2016].
- LE QUÉRÉ, C.; MORIARTY, R.; ANDREW, R. M. [et al.] (2015). «Global carbon budget 2015». *Earth System Science Data*, 7, p. 349-396.
- LLEBOT, J. E. (ed.) (2010). *Segon informe sobre el canvi climàtic a Catalunya*. Barcelona: Generalitat de Catalunya: Institut d'Estudis Catalans.
- LUNT, M. F.; RIGBY, M.; GANESAN, A. L. [et al.] (2015). «Reconciling reported and unreported HFC emissions with atmospheric observations». *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112, p. 5927-5931.
- MYHRE, G.; SHINDELL, D.; BRÉON, F.-M. [et al.] (2013). «Anthropogenic and natural radiative forcing». A: IPCC = INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR5)*. Edició de T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner [et al.]. Cambridge, etc.: Cambridge University Press. També disponible en línia a: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_Chapter08_FINAL.pdf> [Consulta: 25 gener 2016].
- OCCC = OFICINA CATALANA DEL CANVI CLIMÀTIC (2015). *Memòria explicativa de la contribució prevista d'àmbit nacional de Catalunya*. Barcelona: Oficina Catalana del Canvi Climàtic.
- PETERS, G. P.; ANDREW, R. M.; BODEN, T. [et al.] (2013). «The challenge to keep global warming below 2 °C». *Nature Climate Change*, 3, p. 4-6. DOI: 10.1038/nclimate1783.
- PETERS, G. P.; ANDREW, R. M.; SOLON, S. [et al.] (2015). «Measuring a fair and ambitious climate agreement using cumulative emissions». *Environmental Research Letters*, 10, p. 105004.
- RAUPACH, M. R.; GLOOR, M.; SARMIENTO, J. L. [et al.] (2014). «The declining uptake rate of atmospheric CO₂ by land and ocean sinks». *Biogeosciences*, 11, p. 3453-3475.

- RAUPACH, M. R.; DAVIS, S. J.; PETERS, G. P. [et al.] (2014). «Sharing a quota on cumulative carbon emissions». *Nature Climate Change*, 4, p. 873-879. DOI: 10.1038/NCLIMATE2384.
- ROGELJ, J.; MICHIEL SCHAEFFER, M.; FRIEDLINGSTEIN, P. [et al.] (2016). «Differences between carbon budget estimates unraveled». *Nature Climate Change*, 6, p. 245-252. DOI: 10.1038/NCLIMATE2868.
- SMITH, P.; DAVIS, S. J.; CREUTZIG, F. [et al.] (2016). «Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions». *Nature Climate Change*, 6(1), p. 42-50.
- TIAN, H.; LU, C.; CIAIS, P. [et al.] (2016). «The terrestrial biosphere as a net source of greenhouse gases to the atmosphere». *Nature*, 531, p. 525-228.
- UNFCCC = UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (2015a). *Adoption of the Paris agreement* [en línia]. FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1. <<https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>> [Consulta: 25 gener 2016].
- (2015b). *Synthesis report on the aggregate effect of the intended nationally determined contributions* [en línia]. FCCC/CP/2015/7. <http://unfccc.int/focus/indc_portal/items/9240.php> [Consulta: 25 gener 2016].
- WMO = WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION [en línia]. <<https://www.wmo.int>> [Consulta: 25 gener 2016].
- ZARIN, D.J.; HARRIS, N. L.; BACCINI, A. [et al.] (2016). «Can carbon emissions from tropical deforestation drop by 50 % in 5 years?» *Global Change Biology*, 22, p. 1336-1347.