

### 3. El balanç global de carboni antropogènic

#### **Josep Canadell i Gili**

Global Carbon Project, Marine and Atmospheric Research, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO), Canberra, Austràlia

**Josep Canadell** és director executiu del *Global Carbon Project* i investigador de la *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization* a Austràlia. Va rebre el seu grau de Doctor en ecologia terrestre a la Universitat Autònoma de Barcelona, i va ocupar tres llocs de recerca en diferents universitats als Estats Units d'Amèrica (San Diego State University, University of California at Berkeley, i Stanford University) abans de la seva feina actual. La seva àrea d'experiència és la pertorbació humana del cicle global de carboni i els efectes que això té en el sistema climàtic; aquest inclou els seus components terrestres, marins i atmosfèrics. Ha publicat més de 90 articles científics i 11 llibres i volums en revistes científiques.



Resum	77
3.1. La pertorbació antropogènica del cicle de carboni	79
3.2. Emissions de carboni	79
3.2.1. Emissions globals provinents de la crema de combustibles fòssils i producció de ciment	79
3.2.3. Emissions globals dels canvis en els usos del sòl	82
3.2.4. Emissions globals de metà	84
3.3. Embornals naturals de diòxid de carboni	84
3.3.1. Els ecosistemes terrestres	84
3.3.2. Els oceans	85
3.4. El CO <sub>2</sub> atmosfèric i el balanç global de carboni	85
3.5. Vulnerabilitats en el cicle de carboni	88
3.5.1. Eficiència dels embornals de CO <sub>2</sub>	88
3.5.2. Carboni congelat	90
3.5.3. Carboni inundat	90
3.5.4. Carboni hidratat	90
3.5.5. Carboni vegetal	91
3.6. Pic de CO <sub>2</sub> : implicacions per aconseguir estabilització atmosfèrica	91
Referències	93



## Resum

Hi ha proves indiscutibles que l'increment de gasos amb efecte d'hivernacle a l'atmosfera és degut a la crema de combustibles fòssils i a canvis en els usos del sòl. Aquesta darrera causa inclou la desforestació, i és responsable del 15% del total d'emissions provinents d'activitats humanes. El diòxid de carboni ( $\text{CO}_2$ ), el gas dominant en la pertorbació humana del sistema climàtic, ha augmentat un 38% des de la Revolució Industrial i ha contribuït en 2/3 parts de l'escalfament global observat en els darrers 100 anys ( $0,8^\circ\text{C}$ ). Les taxes de creixement d'emissions des del 2000 han estat sense precedents i per sobre les projeccions més pessimistes de les Nacions Unides. També ha estat preocupant l'aturada del procés històric de l'economia mundial a esdevenir progressivament menys intensiva en emissions de carboni. Això es deu a l'augment de la proporció global de riquesa generada amb l'ús de carbó, el combustible fòssil amb emissions més altes per unitat d'energia generada.

Del total de 10 Pg C anuals d'emissions antropogèniques a l'atmosfera durant els darrers anys (1 Pg = petagram =  $10^{15}$  grams), el 55% és absorbit per les plantes i els oceans, i la resta s'acumula a l'atmosfera. Això demostra el gran valor dels embornals naturals de  $\text{CO}_2$  en frenar la progressió del canvi climàtic a gairebé la meitat de la velocitat amb què s'esdevindria si no fos per ells. Tanmateix, l'eficiència d'aquests embornals ha disminuït durant les últimes dècades augmentant la fracció del total d'emissions que

es queden a l'atmosfera, fet que ha contribuït a l'acceleració de l'acumulació de  $\text{CO}_2$  a l'atmosfera.

Així, la dinàmica futura dels embornals de  $\text{CO}_2$  és tan important com el comportament humà en gestionar la disminució d'emissions per aconseguir l'estabilització de gasos amb efecte d'hivernacle a l'atmosfera. A la disminució en l'eficiència dels embornals naturals de  $\text{CO}_2$ , s'hi han d'afegir els riscos derivats de la possible desestabilització futura de grans estocs de carboni causats per l'escalfament global i canvis en els usos del sòl. Aquests inclou el carboni congelat al ecosistema nòrdics, torberes als tròpics i en zones fredes, hidrats de metà en els oceans, i carboni en biomassa, sobretot en boscos tropicals.

Aquests són els paràmetres del sistema humà-natural que imposen límits en els camins possibles per aconseguir l'estabilització dels gasos amb efecte d'hivernacle a l'atmosfera. Acceptant els  $2^\circ\text{C}$  com a límit superior en escalfament global per evitar una interferència perillosa amb el sistema climàtic, el món només pot emetre 500 Pg C més per tenir una certesa del 50% que no se sobrepassa aquell límit. Això requereix unes taxes globals de disminució d'emissions de  $\text{CO}_2$  del 6% anual, comparable a les taxes observades durant la nuclearització de França en la dècada del 1980, i la caiguda de la Unió Soviètica durant la dècada del 1990. Les taxes de mitigació es fan més grans per cada any que s'endarrerix l'inici en la davallada de les emissions globals.



### 3.1. La pertorbació antropogènica del cicle de carboni

Hi ha proves indiscutibles del fet que l'increment de gasos amb efecte d'hivernacle a l'atmosfera durant els últims 100 anys és degut al resultat directe d'activitats humanes. Aquests gasos inclouen el diòxid de carboni (CO<sub>2</sub>), el metà (CH<sub>4</sub>), òxids de nitrogen (N<sub>2</sub>O), i altres gasos de vida llarga que contenen halògens (IPCC 2007). Tot i que molts d'aquest gasos es troben a l'atmosfera de forma natural, la pertorbació humana ha fet que les emissions excedeixin la capacitat d'absorció natural d'aquests gasos resultants en la seva acumulació a l'atmosfera.

El CO<sub>2</sub> prové majoritàriament de la crema de combustibles fòssils com el petroli, el carbó i el gas natural, de la desforestació dels boscos, en l'actualitat majoritàriament dels boscos tropicals, i d'una quantitat mes petita de la producció de ciment per a la construcció. El CH<sub>4</sub> prové de la producció d'energia amb carbó, de les deixalles domèstiques i industrials, del creixement de la població de remugants (vaques i bous) i la crema de vegetació. El N<sub>2</sub>O prové de l'ús de fertilitzants, fens i crema de combustibles fòssils.

També hi ha proves que indiquen que aquests gasos, amb una probabilitat del 90%, són la causa dominant del canvi climàtic observat durant l'últim segle, i d'una manera més accelerada durant els últims 60 anys. Aquest canvi climàtic inclou l'escalfament global de 0,8 °C i una sèrie de canvis en els patrons de precipitació i freqüència de condicions climàtiques extremes (IPCC 2007).

L'evidència més clara de la relació entre els gasos amb efecte d'hivernacle i el canvi climàtic ve d'una vintena de models climàtics globals que són incapaços de reproduir les tendències climàtiques dels últims 100 anys llevat que invoquin el creixement d'aquests gasos a l'atmosfera. Altres components que afecten el balanç d'energia de la Terra i que també són considerats en els models climàtics són els canvis en la intensitat de la radiació solar i els canvis en la reflectivitat de la superfície terrestre i oceànica (albedo).

De tots els gasos amb efecte d'hivernacle el CO<sub>2</sub> és responsable del 63% de la pertorbació humana del balanç energètic de la Terra per a

l'any més recent de què es tenen dades, el 2008. No només és el gas més dominant sinó que és responsable del 80% del creixement del *forçament radiatiu* causat pels gasos amb efecte d'hivernacle produïts per les activitats humanes durant el període 2000-2008 (Butler 2009).

Finalment, el CO<sub>2</sub> té un temps de residència a l'atmosfera molt llarg, quelcom que ha estat poc apreciat fins recentment, en part a causa de la complexitat de calcular adequadament aquesta variable. El CO<sub>2</sub> emès per les activitats humanes s'equilibra entre varis reservoris de carboni que involucren processos a l'atmosfera, els ecosistemes terrestres i els oceans durant períodes de temps entre segons i milers d'anys. Aquests processos inclouen l'extracció immediata de CO<sub>2</sub> per la fotosíntesi de les plantes terrestres i el seu balanç amb la respiració que emet CO<sub>2</sub>, la difusió més lenta de CO<sub>2</sub> cap a l'oceà poc saturat, canvis en l'estructura de la vegetació que necessiten des de dècades a segles, i processos litològics que requereixen milers d'anys. Amb aquesta multiplicat d'equilibris s'estima que una bona part del CO<sub>2</sub> emès a l'atmosfera serà absorbit per l'oceà entre 2 i 20 segles, però fins i tot després de permetre aquest nou equilibri hi haurà entre el 20% i el 35% del CO<sub>2</sub> que romandrà a l'atmosfera a l'espera de processos litològics encara més lents. Això indica que el CO<sub>2</sub> provinent d'activitats humanes exerceix un efecte en el clima que es pot qualificar de permanent (Archer *et al.* 2009).

## 3.2. Emissions de carboni

### 3.2.1. Emissions globals provinents de la crema de combustibles fòssils i producció de ciment

Històricament, la crema de combustibles fòssils i petites quantitats de la producció de ciment han emès uns 345 PgC (1 PgC = 1 petagram de carboni = 1 gigatona = 1000 milions de tones = 10<sup>15</sup> grams) (actualitzat de Canadell *et al.*, 2007a). Aquestes emissions de carboni van començar amb la crema de carbó durant la Revolució Industrial al segle XIX i han tingut un creixement exponencial des de mitjans del segle passat. Les taxes de creixement més altes s'han experimen-

ta a partir del 2000, amb un creixement mitjà anual de 3,4% comparat amb l'1,1% durant la dècada anterior. El pic més alt d'emissions va ser el 2008 amb 8,7 PgC, l'últim any del qual hi ha dades disponibles.

L'acceleració d'emissions en aquesta última dècada ha estat tant gran que ha superat la mitjana de les pitjors projeccions fetes pels escenaris més intensius de carboni (figura 1) i desenvolupades pel Grup Intergovernamental d'Experts sobre el Canvi Climàtic (IPCC) de les Nacions Unides (Nakicenovic *et al.*, 2000). Deu anys enrere, quan es va publicar l'informe especial de l'IPCC, era impensable que els escenaris més intensos de carboni com l'A1FI podien esdevenir una realitat.

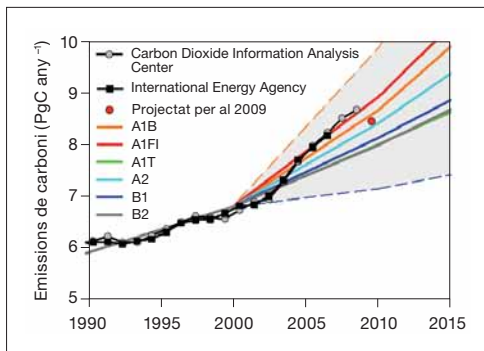


Figura 1. Diferències de les tendències en les emissions globals de carboni ( $\text{CO}_2$ ) de combustibles fòssils entre les observades (línies negres) i les projectades pels escenaris d'emissions de l'IPCC (línies sòlides de colors). Els colors representen les trajectòries mitjanes per a cada família d'escenaris, i les línies de colors discontinües representen l'escenari individual més alt i més baix (actualitzat de Raupach *et al.* 2007).  
Font: Le Quéré *et al.*, 2009.

Els països desenvolupats, amb un 20% de la població mundial, són responsables del 80% de les emissions històriques. Actualment, però, les emissions dels països desenvolupats quasi no creixen en mitjana amb alguns països amb emissions a la baixa (per exemple, Gran Bretanya, Dinamarca) i altres amb emissions a l'alta (per exemple, Espanya, Grècia). Aquest fet juntament amb el ràpid creixement de la Xina i l'Índia ha fet que, recentment i per primera vegada en la història, els països menys desenvolupats siguin responsables d'una proporció més gran de les emissions globals (54%) que els països desenvolupats (figura 2).

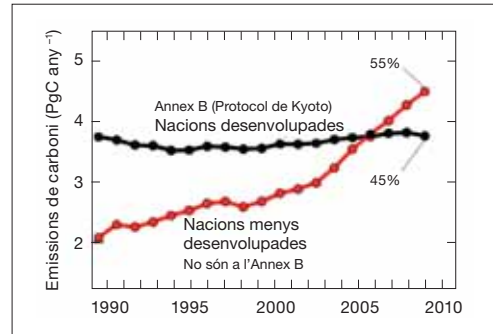


Figura 2. Tendències en les emissions de combustibles fòssils (carboni- $\text{CO}_2$ ) entre els països desenvolupats (Annex B del Protocol de Kyoto) i països menys desenvolupats (No annex B del Protocol de Kyoto).

Font: Le Quéré *et al.*, 2009.

Economies més establertes com Gran Bretanya, Suïssa i els països escandinaus mostren una tendència a la disminució d'emissions totals tot i que les seves economies han continuat creixent (figura 3). Malgrat aquesta tendència de descarbonització de les seves economies, hi ha una tendència para l'augment de creixement en la importació de carboni contingut en productes i serveis que provenen de països menys desenvolupats. Això vol dir que països desenvolupats estan externalitzant parcialment les seves emissions a països menys desenvolupats els quals es fan responsables de les emissions de produir productes i serveis que seran exportats (Peters i Hertwich, 2008). Els països amb un import net més gran de carboni en productes de comerç són els Estats Units, el Japó i les economies més establertes a Europa. Per exemple, quasi el 50% de les emissions en productes i serveis consumits pels suecs provenen de l'estranger i per tant no són comptades en els seus inventaris d'emissions anuals (Davis i Caldeira, 2010). Espanya és el sisè país del món amb unes importacions netes de carboni més altes. Per l'any de referència, el 2004, Espanya va importar un flux net de carboni addicional provinent de l'estranger equivalent al 20% de les seves pròpies emissions (en el seu territori). El país amb una exportació neta de carboni més gran és la Xina amb un 50% de la taxa del creixement els últims cinc anys deguda a les exportacions netes (Guan *et al.*, 2009).

Les emissions de carboni de la crema de combustibles fòssils en el territori espanyol (exclusos



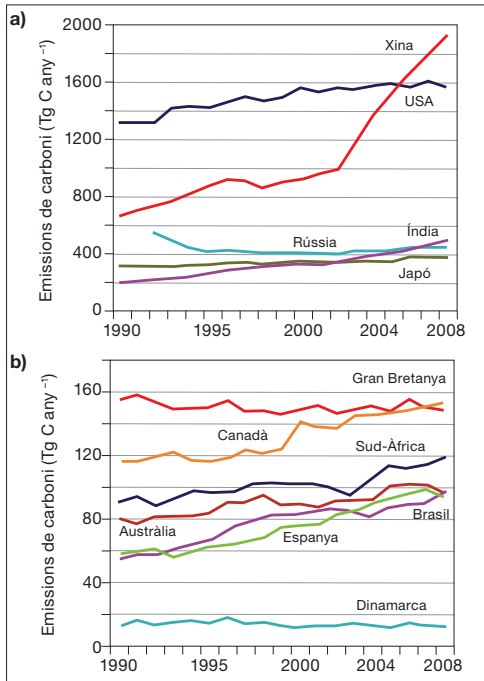


Figura 3. Tendències en les emissions de combustibles fòssils (carboni-CO<sub>2</sub>) entre els països desenvolupats (Annex B del Protocol de Kyoto) i països menys desenvolupats (No annex B del Protocol de Kyoto).  
Font: Le Quéré et al., 2009.

els fluxos de carboni importats en productes manufacturats i serveis van ser de 94,5 Tg C el 2008 (1 teragram = 1 milió de tones 10<sup>12</sup> grams), 51% més altes que les emissions el 1990, l'any de referència del Protocol de Kyoto. El Protocol demana que Espanya no emeti més del 15% més de les emissions del 1990 en acabar el 2012.

Del total d'emissions, la Xina i els Estats Units contribueixen al 45% seguits de l'Índia, Rússia i el Japó (figura 3a). És important assenyalar que els 3 màxims emissors són responsables del 50% de les emissions globals, els 10 màxims emissors són responsables de 2/3 parts de les emissions globals, i els 5 màxims emissors més la Unió Europea són responsables del 80% de les emissions globals. Això suggereix que des d'un punt de vista de mitigació del canvi climàtic n'hi hauria prou d'assolir un acord entre uns pocs governs per adreçar la majoria d'emissions globals. La necessitat d'un pacte global és conseqüència de la importància d'ajudar els països

menys desenvolupats a adoptar trajectòries de desenvolupament sostenible i d'assistir aquests països per adaptar-se a la part del canvi climàtic que serà inevitable.

Malgrat la nova dominància dels països menys desenvolupats en emissions globals, les emissions per càpita segueixen sent molt més baixes en aquests països que als països desenvolupats. A part dels països més rics en petroli com Qatar, Kuwait i els Emirats Àrabs amb més de 9 tones d'emissions de carboni per persona anualment, els Estats Units i Austràlia encapçalen el rànquing amb uns 5 tones per persona i any. Aquests valors són el doble de la mitjana dels països europeus, quatre vegades els valors de la Xina, i tretze vegades més grans que aquells de l'Índia i la majoria de països africans.

Un altre fet important durant aquesta última dècada ha estat el creixement exponencial de la proporció d'emissions de carboni provinents de la crema de carbó. Emissions de carboni provinents del petroli han dominat sobre altres fonts d'emissions des dels anys seixanta. Aquesta dominància, però, va canviar el 2007 quan el carbó va esdevenir la font de CO<sub>2</sub> més important arribant a una proporció del 40% de les emissions globals el 2008; el 36% de les emissions aquell mateix any provenien de la crema de petroli i la resta provenien del gas natural i de la producció de ciment per a la construcció (Boden *et al.*, 2009; Le Quéré *et al.*, 2009). L'atribució d'aquest augment en l'ús mundial de carbó és quasi exclusiva (90%) atesa la demanda energètica de les economies de la Xina i de l'Índia, particularment de la Xina.

Lligada amb l'augment de la proporció en l'ús carbó ha estat l'aturada del procés històric de l'economia mundial a esdevenir progressivament menys intensiva en emissions de carboni. Durant el segle passat hi ha hagut una tendència a la baixa en la quantitat de carboni emès per tal de produir una unitat de riquesa econòmica (per exemple, un dòlar). Tanmateix, des de principis d'aquest segle, aquesta tendència s'ha aturat principalment a causa del ràpid augment de la proporció global de l'economia xinesa, la qual es basa en gran mesura en l'ús de carbó com a font d'energia (Canadell *et al.*, 2007a; Raupach *et al.*, 2007; IMF 2009). Aquesta nova tendència apunta al fet que no només l'economia global no

s'ha estat descarbonitzant com a resultat de polítiques climàtiques durant aquesta última dècada, sinó que fins i tot la tendència històrica de descarbonització s'ha aturat. Algunes de les economies més desenvolupades han seguit una tendència moderada de descarbonització.

La crisi econòmica que va començar el 2008 als Estats Units i es va estendre a la resta del món durant el 2009 tindrà un efecte petit però discernible en les emissions de combustibles fòssils, particularment als països desenvolupats on l'impacte de la crisi és més gran. De fet, el creixement de les emissions de CO<sub>2</sub> durant el 2008 ja va ser una mica més baix, del 2,0%, comparat amb la taxa de creixement mitjana del 3,4% per any durant els 7 anys previs (Le Quéré *et al.*, 2009). Tot i aquesta desacceleració en el creixement de les emissions de CO<sub>2</sub>, el valor total d'emissions durant el 2008 encara va seguir els escenaris d'emissions més alts de l'IPCC. Basat en projeccions del producte interior brut global per al 2009, contracció econòmica del -1,9% (IMF, 2009), s'estima que les emissions de CO<sub>2</sub> tindran un decreixement d'un 2,8%, fet insòlit en les últimes dècades. Atès que globalment no hi ha canvis significatius en l'estructura del sistema energètic, s'espera que les emissions tornaran a un creixement positiu el 2011 en paral·lel amb el creixement positiu del producte interior brut anual global.

### 3.2.3. Emissions globals dels canvis en els usos del sòl

Les emissions degudes als canvis deliberats en la cobertura de la terra i del seu ús formen el segon component més important d'emissions de carboni. Les activitats responsables per aquestes emissions inclouen la desforestació, la reforestació, l'extracció de fusta i el cultiu del sòl en les seves múltiples formes. Part d'aquestes emissions són compensades per l'absorció de CO<sub>2</sub> a causa del creixement de vegetació secundària i del segrest de carboni en els sòls després de la reforestació, l'abandonament agrícola, l'exclusió del foc i l'aplicació de pràctiques agrícoles que conserven el carboni (Houghton, 2003). A diferència de la combustió d'energies fòssils en què les emissions arriben a l'atmosfera immediatament, les emissions dels canvis en l'ús del sòl són el resultat de les activitats d'aquell mateix any més les

emissions resultants d'activitats en anys anteriors. Per exemple, el drenatge d'aiguamolls tropicals resulta en emissions de CO<sub>2</sub> dels sòls orgànics durant dècades subsegüents des de l'any en què es van drenar (Hooijer *et al.*, 2009).

Es calcula que les emissions netes de CO<sub>2</sub> degudes als canvis en l'ús del sòl són d' $1,5 \pm 0,7$  Pg per any per al període 1990-2006 amb una contribució històrica de més de 130 PgC (Canadell *et al.* 2007a). La desforestació és el procés més important i es dona en l'actualitat quasi exclusivament en els boscos tropicals. La desforestació neta als boscos temperats i boreals va parar durant la dècada dels vuitanta. Del total d'emissions, el 43% provenen de la desforestació dels tròpics de Sud i Centre-Amèrica; el 41% provenen d'Àsia tropical, particularment el Sud-est d'Àsia i majoritàriament d'Indonèsia. La resta (17%) provenen de l'Àfrica tropical (Canadell *et al.*, 2009). És interessant el fet que malgrat les emissions provinents d'Amèrica i d'Àsia són molt similars, el nombre total d'hectàrees desforestades és més petit a l'Àsia, segurament atesa l'alta densitat de carboni d'alguns dels seus boscos desforestats que creixen sobre torberes. Una relació contrària es troba a l'Àfrica tropical on el nombre d'hectàrees desforestades és proporcionalment més alt que les seves emissions de carboni, indicant més desforestació en boscos tropicals secs amb una densitat de carboni més baixa (figura 4). Aquesta distribució d'hectàrees i estocs de carboni posa un repte important per adreçar prioritats en la conservació de carboni i en la biodiversitat, les quals no sempre estan estretament relacionades; si la conservació

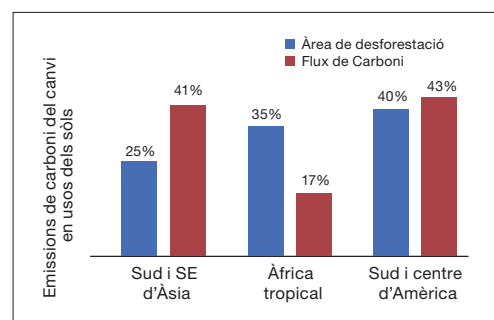


Figura 4. Atribució continental de les àrees desforestades i les emissions netes dels canvis en els usos del sòl i silvicultura per a les regions tropicals.

Font: Canadell *et al.*, 2009.

d'estocs de carboni entra en mercats nacionals i internacionals de carboni és possible que regions riques en biodiversitat però més pobres en estocs de carboni perdin una oportunitat crítica per finançar-ne la conservació.

Similar a la distribució per països de les emissions de combustibles fòssils, una proporció molt gran de les emissions provinent dels usos del sòl prové de pocs països (figura 5). De la trentena de països tropicals amb boscos, el 60% de les emissions provenen de Brasil i d'Indonèsia i la resta està repartida amb contribucions d'entre el 4 i el 0,5% del total (Canadell *et al.* 2009).

Aquestes emissions han baixat una mica a 1,2 PgC per a l'últim any de què es té una estima, el 2008 (Le Quéré *et al.* 2009; Van der Werf 2009). Aquesta disminució sembla més relacionada amb el fet que hi ha hagut unes condicions climàtiques molt humides a conseqüència de la Niña, particularment als tròpics de l'Àsia, que no en resposta a polítiques de canvi climàtic i conservació de biodiversitat. En països com Indonèsia, l'eina més important per obrir boscos per a

l'agricultura és el foc que requereix un període de condicions seques. L'acceleració continuada de les emissions de combustibles fòssils ha fet que la proporció d'emissions antropogèniques provinents de la desforestació neta hagi baixat del 20% durant la dècada dels noranta al 12% el 2008.

La incertesa d'aquests fluxos de carboni és del 50% a causa de la informació limitada que es té globalment dels canvis històrics de cobertura del sòl i dels canvis en la densitat de carboni dels boscos; aquest inclou la degradació de boscos la qual és difícil de mesurar i de ser detectada amb plataformes aèries com satèl·lits (Houghton *et al.*, 2009). De fet, la densitat de carboni dels boscos és tan important (i poc coneguda) que malgrat les taxes de desforestació a l'Amazònia brasilera no han canviat significativament des del 1990, les emissions de carboni han augmentat un 25% durant el període 2000-2007. Aquest fet va ser degut a la biomassa més alta, i per tant carboni, dels boscos desforestats més recentment (Loarie *et al.*, 2009).

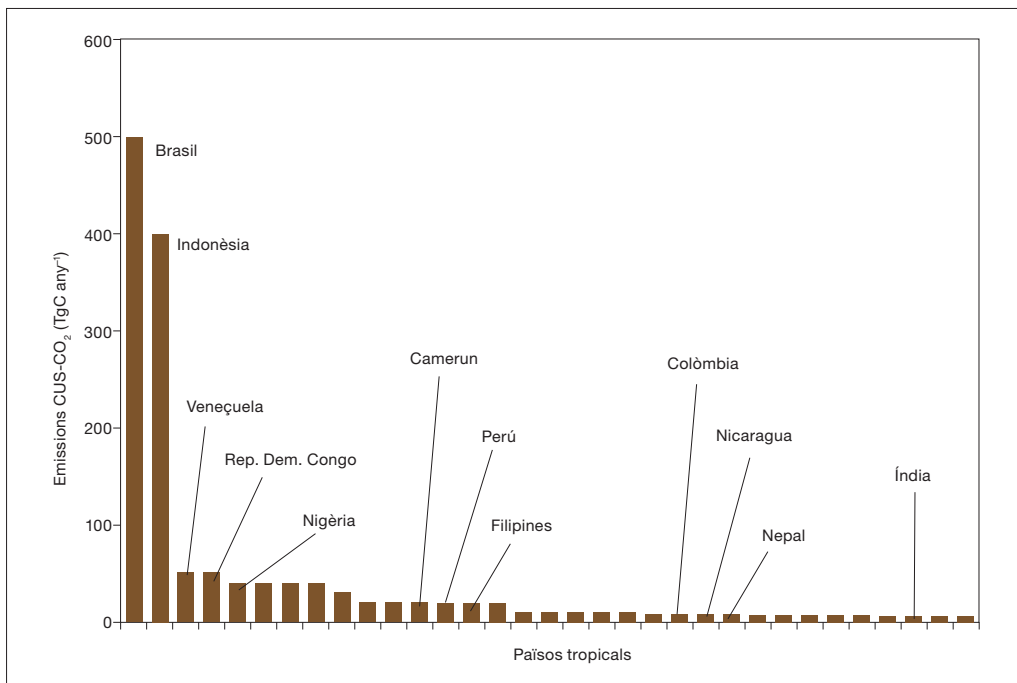


Figura 5. Emissions netes de carboni (CO<sub>2</sub>) del canvi en els usos del sòl i silvicultura dels països tropicals. Font: Houghton 2008.

L'anàlisi dels fluxos de carboni en diferents ecosistemes a Catalunya suggereix la presència d'un augment dels embornals de diòxid de carboni en boscos (Gracia *et al.* 2010). Les causes d'aquest augment són el creixement de nous boscos en terres de cultiu abandonades i l'augment de superfície de plantacions forestals. Aquestes tendències a Catalunya són consistents amb un guany net de superfície forestal a tot el territori espanyol de quasi 300.000 hectàrees per any durant el període 2000-2005 (FAO 2006). Les àrees cultivades són fonts netes d'emissions de gasos amb efecte d'hivernacle, particularment d'òxids de nitrogen, consistents amb un patró també trobat a la resta d'Europa (Janssens *et al.*, 2005; Schulze *et al.*, 2009).

### 3.2.4. Emissions globals de metà

A més de les emissions de CO<sub>2</sub>, les emissions de metà (CH<sub>4</sub>) són un component important del balanç global de carboni. Atès que la seva concentració és més baixa que la del CO<sub>2</sub>, les bandes d'absorció d'infraroig estan menys saturades i per tant el seu potencial d'escalfament és 25 vegades més alt que el del CO<sub>2</sub> (IPCC 2007). El CH<sub>4</sub> es forma majoritàriament durant la descomposició de la matèria orgànica en condicions de deficiència d'oxigen comunes en llacs, aiguamolls, camps d'arròs i altres condicions naturals o de gestió on l'aigua inunda ecosistemes terrestres. Els animals remugants com les vaques i els bous també contribueixen.

En anys recents, particularment el 2007 i el 2008, la concentració de CH<sub>4</sub> a l'atmosfera va augmentar després de dècades de concentracions estables (Rigby *et al.*, 2008). Aquest creixement va coincidir amb dos anys de temperatures altes a l'Àrtic a causa de l'augment d'absorció d'energia solar en l'oceà que va tenir lloc com a conseqüència de la disminució rècord de la capa de gel àrtic. Les temperatures altes estimulen la metanogènesi, el procés de descomposició de matèria orgànica en condicions pobres d'oxigen, i es creu que els llacs àrtics i els aiguamolls van jugar un paper important en l'augment de CH<sub>4</sub> observat recentment (Canadell i Raupach, 2009). Anàlisis posteriors indiquen que els ecosistemes tropicals també van tenir un paper important en aquest augment recent de les emissions. Aquesta

sensibilitat alta de les emissions de CH<sub>4</sub> a la temperatura suggereix que ecosistemes d'arreu del món amb aigua abundant poden esdevenir fonts de CH<sub>4</sub> en un món futur més càlid.

### 3.3. Embornals naturals de diòxid de carboni

De totes les emissions de carboni provinents d'activitats humanes al voltant de la meitat són absorbides pels embornals naturals de CO<sub>2</sub> en els oceans i els ecosistemes terrestres. Concretament, durant els últims 50 anys només el 43% de totes les emissions provinents d'activitats humanes han restat a l'atmosfera indicant el paper vital que els embornals de CO<sub>2</sub> juguen en frenar la progressió del canvi climàtic (Canadell *et al.*, 2007a; Raupach *et al.*, 2008; Le Quééré *et al.*, 2009). De fet hom podria considerar l'acció d'aquests embornals com un descompte de més del 50% del canvi climàtic que observariem si no fos per aquests embornals. El valor econòmic d'aquests embornals és de bilions de dòlars anuals si s'haguessin de pagar els mateixos serveis a través dels mercats financers de carboni que existeixen actualment (Canadell i Raupach, 2008).

La dinàmica d'aquests embornals ha estat una propietat molt impressionant del sistema planetari que ha sobtat en part a la comunitat científica per la seva constància i resiliència al llarg del temps i sota condicions de pertorbació molt diferents. Això queda ben demostrat amb el fet que durant la dècada dels cinquanta, les activitats humanes emetien uns 2 PgC a l'any, i al voltant d'1 Pg (la meitat) va ser absorbit pels embornals naturals de CO<sub>2</sub>. Cinquanta anys més tard les activitats humanes emeten uns 10 PgC a l'any, i al voltant de 5 PgC (la meitat) són absorbits pels oceans i pels ecosistemes terrestres (Canadell *et al.*, 2007a; Le Quééré *et al.*, 2009). Tanmateix, recentment s'han detectat canvis en l'eficiència d'aquests embornals el quals es discuteixen en detall en una secció més endavant.

#### 3.3.1. Els ecosistemes terrestres

Durant el període 2000-2008, els ecosistemes terrestres van absorbir una mitjana anual de 3,0 ± 0,9 PgC (Le Quééré *et al.*, 2009). Aquesta quantitat és el 30% del total de les emissions antropogèniques i tres vegades més gran que el flux

durant la dècada dels seixanta. Aquest augment és el resultat directe de l'augment del  $\text{CO}_2$  atmosfèric que força directament un dels processos més importants d'absorció de  $\text{CO}_2$ , la fotosíntesi.

Es creu que els ecosistemes terrestres es van convertir en embornals nets de  $\text{CO}_2$  a meitats del segle passat quan el forçament del  $\text{CO}_2$  sobre la fotosíntesi va començar a créixer exponencialment (McGuire *et al.*, 2001; Sitch *et al.*, 2008). La quantitat total de carboni emmagatzemat en la nova biomassa i en els sòls és incerta atesa, en part, la incertesa de les emissions provinents de la desforestació.

Una característica important d'aquest flux és que és molt variable d'un any per l'altre en comparació amb l'embornal dels oceans. La biosfera terrestre esdevé de tant en tant una font neta de  $\text{CO}_2$ , particularment durant anys molt calorosos, mentre que altres anys pot doblar el flux mitjà d'absorció de  $\text{CO}_2$ . Això és degut a les oscil·lacions climàtiques que influencien els processos d'absorció i d'emissió de  $\text{CO}_2$  en les plantes i en l'extensió dels focs. Aquests canvis sovint són una conseqüència de la variabilitat regional o planetària a causa d'erupcions volcàniques que refreden la terra i a oscil·lacions climàtiques com el Niño-Southern Oscillation que escalfa la terra i canvia alguns patrons de pluja (Jones *et al.*, 2001; Jones i Cox, 2001; Keeling i Revelle, 1985).

A més dels processos més directament relacionats amb la fotosíntesi i la respiració (aquesta última tant de les plantes com dels sòls), hi ha una gran varietat de processos que es creu que contribueixen a la dinàmica dels embornals de  $\text{CO}_2$  dels ecosistemes terrestres. Aquests inclouen tot un seguit de processos moderats per les activitats humanes com l'expansió de boscos en camps abandonats, la silvicultura, la gestió de boscos per a la prevenció de focs, i el drenatge de sòls orgànics (Canadell *et al.*, 2007b). L'atribució d'aquests processos a diferents fluxos té moltes incerteses que dificulten entendre la possible dinàmica d'aquests embornals en el futur i, per tant, la natura i la intensitat de les retroaccions (*feedbacks*) entre el cicle de carboni i el sistema climàtic.

### 3.3.2. Els oceans

L'oceà constitueix l'únic embornal amb un flux net continu des de principis de la revolució industrial.

Durant aquest període s'estima que l'oceà ha acumulat uns  $140 \pm 25$  PgC amb una taxa d'absorció de  $\text{CO}_2$  de 2,3 PgC a l'any durant el període 2000-2008. Com l'embornal terrestre, l'oceà també ha crescut en paral·lel al creixement de les emissions antropogèniques que forcen els mecanismes d'absorció. Els oceans absorben 1,5 PgC a l'any durant la dècada dels seixanta.

L'oceà del Sud és l'oceà més important en absorbir  $\text{CO}_2$  antropogènic sent responsable del 40% de les emissions totals absorbides pels oceans durant el 2008 (Khaliwala *et al.*, 2009). Els oceans tropicals són emissors nets de  $\text{CO}_2$  a causa de les aigües càlides i als corrents marins, i a l'oceà Atlàntic Nord és on es troben les concentracions verticals integrades més altes amb una seqüestració del 23% del total de carboni antropogènic en els oceans malgrat que només cobreix un 15% de la superfície oceànica. El 50% de tot el  $\text{CO}_2$  antropogènic a l'oceà es troba per sobre els 400 metres (Sabine *et al.*, 2004).

El procés més important d'absorció de  $\text{CO}_2$  antropogènic a l'oceà és la bomba de difusió. Aquesta porta  $\text{CO}_2$  de l'atmosfera, on les concentracions són més altes, cap a la superfície dels oceans, on les concentracions són més baixes. L'existència de corrents que enfonsen aigua cap a les profunditats assegura que les capes superficials no se saturin de  $\text{CO}_2$  i per tant, la capacitat d'absorció pot perdurar durant centenars d'anys (Orr *et al.*, 2001; Sabine *et al.*, 2004). Això contrasta amb l'embornal de la biosfera terrestre que es pot saturar a nivells alts de  $\text{CO}_2$  i a causa de l'escalfament de l'atmosfera (Canadell *et al.*, 2007b). Si mai pareixen les emissions antropogèniques, els oceans podrien netejar la totalitat d'excés de  $\text{CO}_2$  a l'atmosfera, però en un lapse de temps de milers d'anys.

### 3.4. El $\text{CO}_2$ atmosfèric i el balanç global de carboni

A escala global, el  $\text{CO}_2$  atmosfèric augmenta perquè hi ha una manca de balanç entre les emissions de  $\text{CO}_2$  a l'atmosfera (procedents de la combustió d'energia fòssil i dels canvis en els usos del sòl) i l'absorció per part dels embornals de  $\text{CO}_2$  a la terra emergida i als oceans. Durant el període 2000-2008, les emissions mitjanes van ser de 9,1 PgC a l'any i l'absorció va ser 5,0 PgC a l'any

(aproximadament en parts iguals entre els embornals de la terra i els oceans) (figura 6). Això va deixar 4,1 PgC a l'any per acumular a l'atmosfera i va augmentar la concentració de CO<sub>2</sub> a un ritme de 1,9 parts per milió (ppm) per any (Le Quéré *et al.*, 2009). Aquest creixement mostra una acceleració exponencial de les emissions antropogèniques durant l'última dècada ja que el creixement anual durant els 30 anys previs havia estat al voltant de 1,5% per any (Canadell *et al.*, 2007a; Le Quéré *et al.*, 2009). La concentració de CO<sub>2</sub> a l'atmosfera era de 385 ppm el 2008, un 38% per sobre la concentració anterior a la revolució industrial que era de 280 ppm (Conway *et al.*, 2009).

Les quantitats dels diferents components del balanç de carboni per al període 1958-2008 es troben a la taula 1. El 1958 és el primer any en què la concentració de CO<sub>2</sub> atmosfèric es va començar a mesurar amb precisió a l'observatori de Mauna Loa a Hawaii. La figura 7 ensenya l'evolució dels components de balanç global de carboni des del principi de la revolució industrial. Perquè hi hagi un equilibri total, cal que el flux total de fonts de CO<sub>2</sub> sigui el mateix que el flux dels embornals (incloent-hi l'atmosfera), però atès que els diferents components es calculen independentment, sovint hi ha un residu (no representat a la figura).

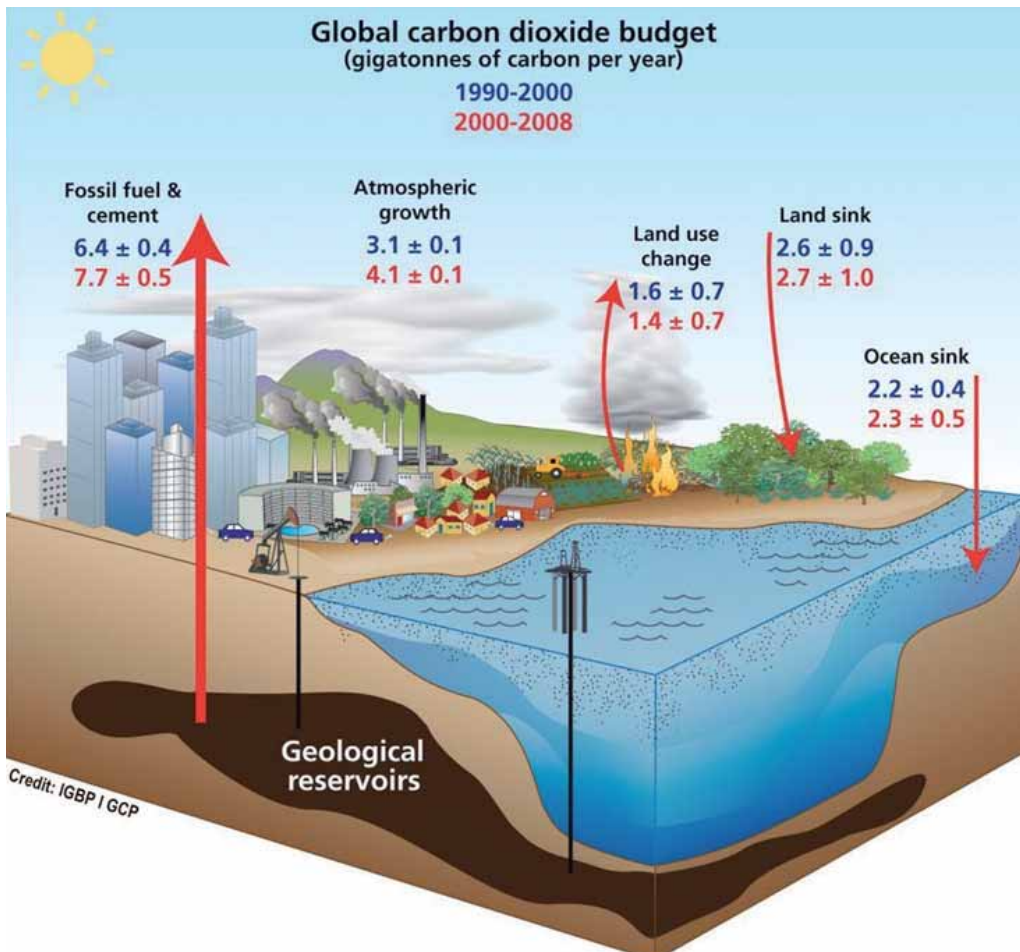


Figura 6. Il·lustració de les emissions i embornals globals de carboni-CO<sub>2</sub> per als períodes 1990-1999 i 2000-2008. Font: IGBP/Global Carbon Project.



	1960-1970	1990-2000	2000-2008
<b>Fonts de CO<sub>2</sub> (PgC any<sup>-1</sup>)</b>			
Combustibles fòssils + ciment	3,1 ± 0,2	6,4 ± 0,4	7,7 ± 0,4
Canvis en usos del sòl	1,5 ± 0,7	1,6 ± 0,7	1,4 ± 0,7
<b>Embornals de CO<sub>2</sub> (PgC any<sup>-1</sup>)</b>			
Creixement CO <sub>2</sub> atmosfèric	1,8 ± 0,1	3,1 ± 0,1	4,1 ± 0,1
Embornal oceànic	1,5 ± 0,4	2,2 ± 0,4	2,3 ± 0,4
Embornal terrestre	1,2 ± 0,9	2,6 ± 0,9	3,0 ± 0,9
Residu	0,1 ± 1,3	0,0 ± 0,0	-0,3 ± 1,3
<b>Distribució de les emissions totals</b>			
Atmosfera	0,39 ± 0,07	0,40 ± 0,04	0,45 ± 0,04
Oceà	0,33 ± 0,10	0,28 ± 0,06	0,26 ± 0,05
Terra	0,28 ± 0,12	0,32 ± 0,07	0,29 ± 0,06

Taula 1. Fonts i embornals de CO<sub>2</sub> per a tres dècades amb la seva participació de totals.

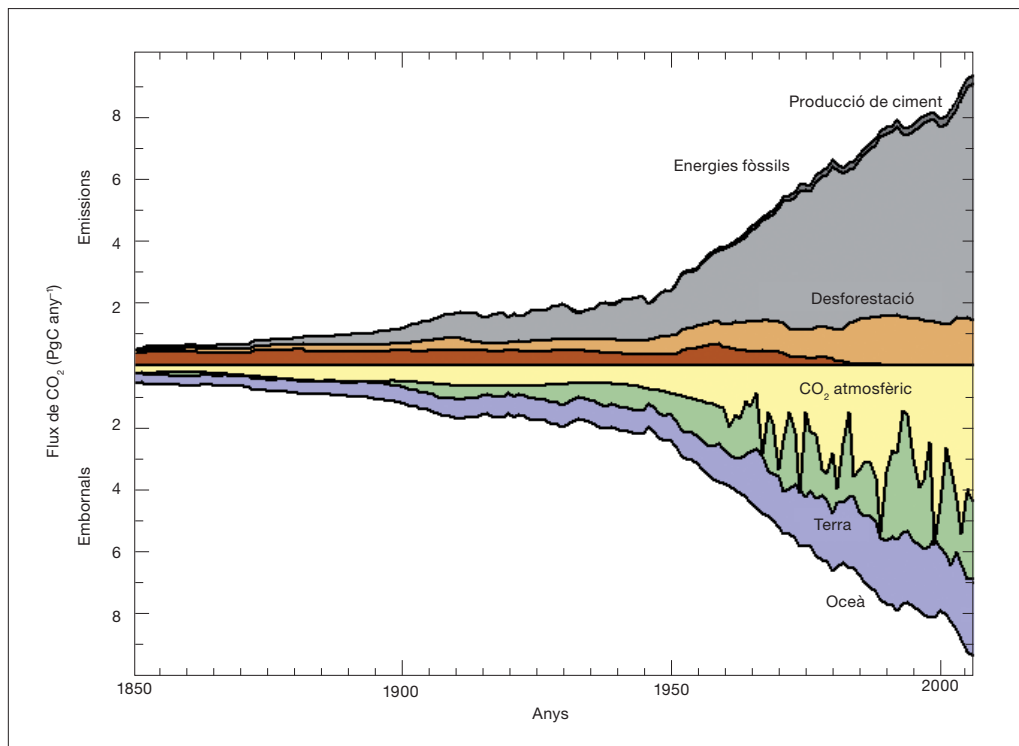


Figura 7. Evolució de la pertorbació humana del cicle de carboni per al període 1850-2008. Es mostren tots els components de les emissions de carboni-CO<sub>2</sub> i els embornals que formen part del balanç global. En les emissions dels usos del sòl el color marró fosc correspon a les emissions en regions temperades i el marró clar a les emissions en regions tropicals. La suma de totes les emissions a la part de dalt del gràfic ha de ser igual a la suma de tots els embornals a la part de sota.

Font: Global Carbon Project.

### 3.5. Vulnerabilitats en el cicle de carboni

El coneixement sobre els processos responsables dels embornals naturals de  $\text{CO}_2$  ha portat a la conclusió que l'eficiència dels embornals disminuirà en un futur. Durant aquesta dècada una sèrie de models climàtics amb representació del cicle de carboni han trobat que la retroacció entre la dinàmica del cicle natural de carboni i el sistema climàtic podria resultar en un augment entre 20 i 200 ppm de  $\text{CO}_2$  a l'atmosfera a finals d'aquest segle. Aquesta quantitat de  $\text{CO}_2$  seria addicional a aquella de les emissions de combustibles fòssils i canvis en els usos dels sòls, i faria accelerar l'escalfament global entre 0,1 i 1,5 °C (Friedlingstein *et al.*, 2006).

La possible disminució en l'eficiència dels embornals seria deguda a canvis en els processos terrestres i marins que absorbeixen i emeten  $\text{CO}_2$  amb un flux net cap als oceans i ecosistemes terrestres a la baixa o insensible a augments futurs d'emissions de  $\text{CO}_2$ . Aquesta tendència podria ser el resultat de tres factors. En primer lloc, hi ha processos que faran disminuir la capacitat d'absorbir  $\text{CO}_2$  com, per exemple, les temperatures altes o els dèficits hídrics. En segon lloc, altres processos augmentaran les emissions cap a l'atmosfera com la descomposició de matèria orgànica en regions on el pergelisòl es desgeli. I per

últim, les escales de temps dels processos d'absorció treballen a unes escales de temps més lentes que la taxa a la qual les emissions de  $\text{CO}_2$  creixen. Aquestes tres possibilitats no són exclusives.

Les seccions següents adrecen diversos mecanismes i estocs de carboni que són o es creuen que seran vulnerables en el futur (figura 8).

#### 3.5.1. Eficiència dels embornals de $\text{CO}_2$

Malgrat que els models climàtics que incorporen el cicle de carboni han suggerit una disminució en l'eficiència dels embornals naturals durant el transcurs d'aquest segle, anàlisis atmosfèriques recents han demostrat que aquest procés ja va començar el segle passat. La fracció mitjana de les emissions totals que es queda a l'atmosfera va ser del 43% entre el 1958 i el 2008 però, durant aquest període, la fracció va augmentar el  $0,3 \pm 0,2\%$  cada any (figura 9; Canadell *et al.*, 2007a; Raupach *et al.*, 2008; Le Quéré *et al.*, 2009). Aquest augment és la conseqüència directa de la disminució en l'eficiència dels embornals de  $\text{CO}_2$  d'un 60% al 55% del total d'emissions antropogèniques. Això vol dir que per cada tona de  $\text{CO}_2$  emesa a l'atmosfera, els embornals eren capaços d'extraure'n 600 kg fa 50 anys i només 550 kg actualment. Tot i que és una diferència petita, la integració en els 50 anys

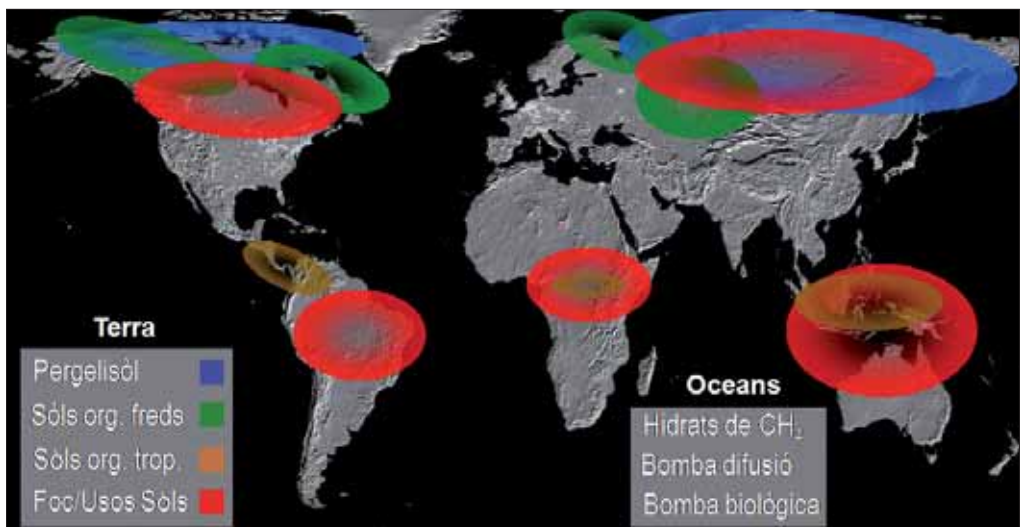


Figura 8. Representació gràfica dels estocs de carboni i processos vulnerables al canvi climàtic i a canvis en els usos de sòl que resultarien en retroaccions positives i accelerarien el canvi climàtic.

Font: Gruber *et al.*, 2004 i Canadell *et al.*, 2007.



i el fet que les emissions ara són quatre vegades més grans que fa 50 anys, la concentració de  $\text{CO}_2$  a l'atmosfera és un 18% més alta de la que seria si no s'hagués produït aquesta disminució en l'eficiència dels embornals (Canadell *et al.*, 2007a).

L'atribució d'aquesta tendència als embornals terrestres i marins mostra que només hi ha una tendència estadísticament significativa en els oceans. Així, als oceans, malgrat l'augment ràpid en l'absorció de  $\text{CO}_2$  durant els últims 50 anys, hi ha hagut una disminució en la capacitat d'absorció (la fracció del total d'emissions) d'aquest embornal durant els últims 20 anys; això vol dir que el

flux cap a l'oceà ha augmentat més lentament que l'augment del  $\text{CO}_2$  a l'atmosfera (Le Quéré *et al.*, 2007). Es creu que aquesta disminució està lligada a la disminució de l'ozó estratosfèric que porta a un augment en la ventilació dels vents i aquests a un augment en la ventilació d'aigües profundes riques en  $\text{CO}_2$  (Lenton *et al.*, 2009). Això fa que el flux de  $\text{CO}_2$  de l'oceà cap a l'atmosfera augmenti fent disminuir la capacitat neta de seqüestració de  $\text{CO}_2$ . L'eficiència de l'embornal en l'Atlàntic Nord també ha disminuït durant l'última dècada però no queda clar si és deguda al canvi climàtic o a una anomalia regional temporal (Schuster *et al.*, 2009).

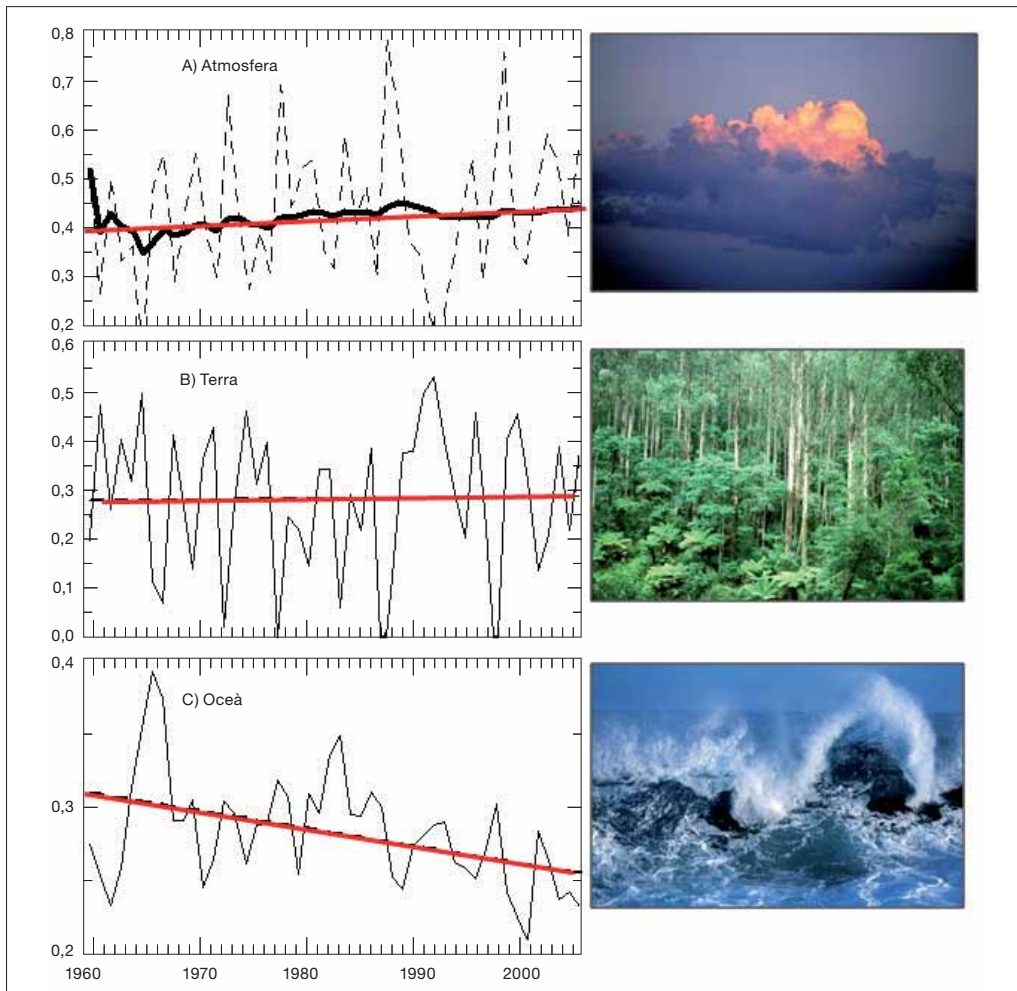


Figura 9. Tendències en les fraccions d'acumulació de carboni- $\text{CO}_2$  provinents d'activitats humanes en l'atmosfera, ecosistemes terrestres i oceans durant els últims 50 anys.

Font: Canadell *et al.*, 2007.

### 3.5.2. Carboni congelat

La descomposició de la matèria orgànica en sòls congelats (pergelisòl) de les regions nòrdiques es considera una de les retroaccions potencialment més grans en la pertorbació del sistema climàtic. Aquesta prominència és deguda als grans estocs de carboni emmagatzemats en aquelles regions i al fet que s'espera que l'escalfament antropogènic sigui el doble de la mitjana global en aquestes regions (IPCC, 2007).

Aquest carboni es va dipositar durant milers d'anys de creixement de moltes, herbes i plantes llenyoses seguit d'una descomposició molt lenta deguda a les baixes temperatures. El resultat ha estat un acumulament progressiu de matèria orgànica constituint els dipòsits de carboni orgànic més grans a la superfície terrestre. Anàlisis recents indiquen que els estocs de carboni en la regió circumpolar del Nord contenen 1.650 Pg C, aproximadament el doble del carboni contingut a l'atmosfera (Tarnocai *et al.*, 2009). Aquesta també és una quantitat quasi el doble de la que s'havia estimat prèviament en part gràcies a la descoberta de vastos dipòsits de carboni en sediments a Sibèria anomenats *yedomas* (Zimov *et al.*, 2006) i en els deltes dels majors rius d'Alaska, Canadà i Rússia (Tarnocai *et al.*, 2009).

Aquesta quantitat tan gran de carboni no indica necessàriament una gran vulnerabilitat a l'escalfament global, però suggereix que el desglaçament de fins i tot una fracció petita d'aquest estoc portaria a un increment important d'emissions cap a l'atmosfera. Amb la predicció climàtica del fet que el 90% del pergelisòl superficial es descongelarà a finals de segle (Lawrence *et al.*, 2005; Lawrence *et al.*, 2008) és d'esperar un augment significatiu d'emissions provinents d'aquesta part de la Terra. Estimacions basades en models i mesures en el camp indiquen que entre 50 i 100 Pg C podrien ser emesos durant aquest segle (Zhuang *et al.*, 2006; Khvorostyanov *et al.*, 2008; Schuur *et al.*, 2009). La detecció de carboni molt vell en la respiració de matèria orgànica en àrees on el pergelisòl s'està descongelant a Alaska és una demostració de l'alta sensibilitat d'aquest carboni acumulat fa milers d'anys (Schuur *et al.*, 2009).

El desglaçament del pergelisòl i la subsegüent descomposició de matèria orgànica és un dels processos que es considera que pot tenir propietats

irreversibles. El treball experimental al camp amb l'ús de models suggereix que quan la descomposició de matèria orgànica arriba a certes profunditats en el perfil del sòl, el procés de descongelació del pergelisòl esdevé autosuficient a través de l'escalfor generada per l'activitat dels microorganismes, similar a l'escalfor generada dins d'una pila de compost. Això portaria a un procés irreversible d'emissió de gasos amb efecte d'hivernacle que duraria centenars d'anys i independent de la trajectòria de l'escalfament antropogènic (Zimov *et al.*, 2006; Khvorostyanov *et al.*, 2008).

### 3.5.3. Carboni inundat

A més dels dipòsits de carboni congelats, hi ha grans quantitats de carboni en aiguamolls en les regions boreals, subàrtiques i tropicals. S'estima que hi ha uns 400 Pg C en aiguamolls de climes freds (Sabine *et al.*, 2004; Limpens *et al.*, 2008) i uns 70 Pg C en aiguamolls de regions tropicals majoritàriament al Sud-est d'Àsia, i particularment a Indonèsia i Malàisia (Jaenicke *et al.*, 2008; Hooijer *et al.*, 2009).

La vulnerabilitat d'aquests dipòsits de carboni es relaciona amb el canvi climàtic (tant l'escalfament com els canvis de precipitació) i les activitats humanes de drenatge i desforestació, aquests últims particularment als aiguamolls dels tròpics. Experiments recents en el camp indiquen que per cada grau d'escalfament de l'aire els aiguamolls poden alliberar globalment fins un 0,1 Pg C per any (Dorrepaal *et al.*, 2009). En els tròpics, la desforestació, acompanyada sovint de l'ús de foc, i el drenatge dels aiguamolls són les causes principals d'emissions. S'estima que en els propers 60 anys uns 10 Pg C s'alliberaran de la descomposició dels sòls orgànics exposats pel drenatge, i uns 20 Pg C més, de la crema i la descomposició dels arbres en el procés de desforestació (Hooijer *et al.*, 2009). Canvis en els patrons de precipitació també modularan les emissions amb un probable augment en els aiguamolls d'Indonèsia a causa d'estacions seques més intenses i llargues projectades pel final d'aquest segle (Li *et al.*, 2007).

### 3.5.4. Carboni hidratat

Els hidrats de gas, concretament de CH<sub>4</sub>, són una forma molt comuna de carboni a la Terra. Són el resultat de la barreja de molècules de CH<sub>4</sub> i

aigua, congelades en àrees de pergelisòl a l'Àrtic i en sediments als marges continentals on les condicions de pressió i de temperatura són apropiades per a la seva formació. Es consideren una possible font grandiosa d'energia encara no explotada, i a la vegada, un possible perill pel canvi climàtic si se n'alliberen quantitats significants en el futur (Krey *et al.*, 2009).

Hi ha dues raons per les quals els hidrats de  $\text{CH}_4$  es consideren un possible perill i una sorpresa dins les retroaccions carboni-clima. La primera raó es deu a les vastes quantitats d'aquest compost que existeixen a la Terra. S'estima que els dipòsits d'hidrats de  $\text{CH}_4$  excedeixen els 1.000 Pg C amb un certesa molt alta, i entre 1.000 i 10.000 Pg C amb una certesa mitjana (Krey *et al.*, 2009). Per comparació, els dipòsits de combustibles fòssils (petroli, carbó, gas) són al voltant de 5.000 Pg C (Rogner, 1997). Això vol dir que la desestabilització de fins i tot una fracció petita d'hidrats de  $\text{CH}_4$  podria comportar quantitats molt importants de  $\text{CH}_4$  a l'atmosfera i, per tant, d'escalfament global.

La segona raó és que es creu que els hidrats de  $\text{CH}_4$  han jugat un paper important en els climes passats i particularment en canvis climàtics abruptes (MacDonald, 1990), sent l'escalfament global un factor de desestabilització. Es creu que els forats en els sediments oceànics i les esclavissades submarines han alliberat en el passat entre 1 i 5 Pg C en casos individuals, fet que comportaria un augment del 0,2  $\text{W m}^{-2}$  del *forçament radiatiu* si tot el  $\text{CH}_4$  arribés a l'atmosfera (Archer, 2007). Malgrat que és improbable que una fracció gran del  $\text{CH}_4$  arribi a l'atmosfera (Lamarque, 2008) aquest *forçament radiatiu* comparat amb l'observat des de temps preindustrials (1,6  $\text{W m}^{-2}$ , IPCC, 2007) dona un marc de referència del possible impacte.

Malgrat aquests riscos importants, el procesos físics de desestabilització no es coneixen suficientment per poder-los incorporar en els models climàtics que actualment no tenen cap representació d'hidrats de  $\text{CH}_4$ . De fet, l'opinió d'experts indica que en aquest segle hi ha més possibilitats d'emissions dels hidrats de  $\text{CH}_4$  atesa la seva explotació com a font d'energia que no de la possible desestabilització deguda a l'escalfament global que és més probable que es

doni a escales de centenars a milers d'anys (Krey *et al.*, 2009).

### 3.5.5. Carboni vegetal

Una de les primeres retroaccions identificades a la biosfera terrestre va ser la possible transició cap a caràcter de sabana de l'Amazònia a causa de la disminució de la precipitació durant la segona part d'aquest segle i a causa del canvi climàtic (Cox *et al.*, 2000). Les conseqüències d'aquesta transformació són l'alliberament de grans quantitats de  $\text{CO}_2$  de la descomposició i oxidació de matèria orgànica continguda a la biomassa i als sòls durant la transició d'un sistema d'alta densitat de carboni, el bosc tropical, a un sistema de baixa densitat, la sabana. Malgrat que no tots els models climàtics prediuen una disminució de la precipitació a l'Amazònia de la mateixa magnitud, altres anàlisis amb models dinàmics de vegetació indiquen el possible augment en emissions de focs com a conseqüència dels dèficits hidrològics en diverses regions de la Terra (Sitch *et al.*, 2008). Aquestes anàlisis assenyalen fins un màxim d'emissions de 3-4 Pg C a l'any les quals són quantitats suficients per augmentar l'escalfament global amb un grau de temperatura addicional.

A més de les emissions com a conseqüència del foc, la respiració de  $\text{CO}_2$  dels ecosistemes és una via molt ràpida i dominant d'emissions de  $\text{CO}_2$  a l'atmosfera, particularment en condicions amb dèficits hídrics. Durant l'ona de calor a Europa a l'estiu del 2003, les emissions de respiració van excedir el flux d'absorció de  $\text{CO}_2$  a través de fotosíntesis amb emissions netes de 0,4 Pg C. Aquestes emissions van ocórrer en un temps molt curt i van desfer l'equivalent de 4 anys de seqüestració de carboni per part dels ecosistemes terrestres europeus (Ciais *et al.*, 2005).

### 3.6. Pic de $\text{CO}_2$ : implicacions per aconseguir estabilització atmosfèrica

Sovint és difícil d'entendre quines són les implicacions de l'evolució del balanç global de carboni per tal d'establir trajectòries d'emissions que assoliran estabilització atmosfèrica de  $\text{CO}_2$  a nivells que evitin la interferència humana perillosa en el sistema climàtic. Aquest és l'objectiu de la Convenció Marc del Canvi Climàtic de les Nacions

Unides i dels esforços de polítiques nacionals i internacionals que s'estan implementant.

Preguntes claus sobre l'estabilització del CO<sub>2</sub> atmosfèric són: a) quines són les implicacions de les trajectòries passades i actuals d'emissions de CO<sub>2</sub> i altres gasos amb efecte d'hivernacle?, i b) quines són les implicacions de les dinàmiques dels processos naturals que emeten i absorbeixen CO<sub>2</sub>? Quin és el nivell de mitigació necessari per no excedir nivells específics de la temperatura global?

Mentre les implicacions de la primera pregunta són més òbvies, sovint les implicacions dels canvis en la capacitat dels embornals és omesa; en part per la dificultat o impossibilitat de gestionar-los i en part pel desconeixement de com el sistema planetari funciona d'una manera integrada.

Una aproximació per integrar la resposta global ha estat establerta recentment i es basa en la relació probabilística entre les emissions cumulatives de CO<sub>2</sub> i la temperatura que no es voldria excedir per sobre el nivell preindustrial (Allen *et al.*, 2009; Meinshausen *et al.*, 2009; Matheus *et al.*, 2009). Si un pot definir quin és el valor de temperatura global màxima per evitar la interferència perillosa en el sistema climàtic, llavors es pot calcular el total màxim de gasos que es poden emetre sota diferents nivells d'incertesa que representen la diversitat de respostes de models i processos considerats. El següent pas és escollir un nivell d'incertesa d'acord amb una avaluació de riscos i decidir com atribuir les emissions permeses entre les diferents nacions. Això darrer no es tracta aquí ja que són qüestions d'acords polítics basats en l'equitat global i allò que és factible fer des d'un punt de vista tecnològic, institucional i social.

No hi ha un valor màxim d'escalfament global que la comunitat científica hagi dictat més enllà del qual hi hauria la interferència perillosa amb el clima. Tanmateix, el valor de 2 °C per sobre de la temperatura preindustrial s'ha escollit en alguns cercles científics i polítics (Schellnhuber, 2007). Recentment aquesta temperatura màxima ha estat adoptada a la Conferència de les Parts (COP15, Novembre 2009) de la Convenció del Canvi Climàtic amb l'Acord de Copenhaguen. Majoritàriament, la selecció d'aquesta tempera-

tura límit ha estat el resultat d'un judici social informat per la ciència del canvi climàtic.

Anàlisis climàtiques mostren que amb un nivell de certesa del 50%, 2 °C d'escalfament global s'assoleixen amb emissions totals de 1.000 Pg C (Allen *et al.*, 2009). Com que des de la revolució industrial ja s'han emès al voltant d'un 500 Pg C, el món té un subsidi de 500 Pg d'emissions de carboni més per repartir entre 192 països. Això justifica que assumint els 2 °C d'escalfament màxim tot just ara estem al pic planetari de CO<sub>2</sub>.

La taxa mitjana de mitigació global necessària per descarbonitzar la societat abans d'excedir emissions de 500 Pg C és del 6% anual considerant les trajectòries actuals d'emissions de CO<sub>2</sub> i permetent 10 anys més de creixement d'emissions abans de començar amb un creixement negatiu (figura 10). Aquests anys de transició són importants per generar canvis institucionals i estructurals suficients que permetin taxes de mitigació altes i sostenibles durant diverses dècades.

Les taxes de mitigació es fan més grans per cada any que es retarda l'inici de la davallada d'emissions, i també si es vol augmentar els nivells de certesa de no excedir la temperatura escollida. Un retard de 10 anys en l'inici de la davallada d'emissions augmenta les taxes de mitigació al 12% a l'any, que és un esforç comparable a si es vol aug-

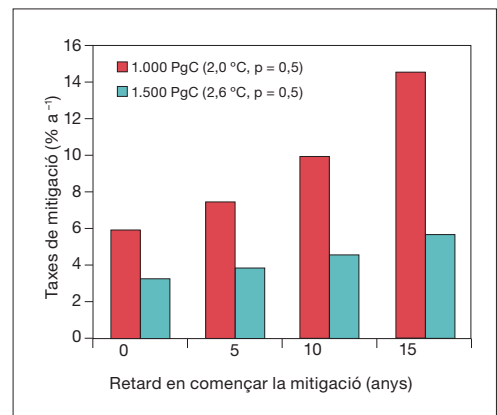


Figura 10. Taxes de mitigació (reduccions) d'emissions de carboni requerides per no excedir 2 °C amb una probabilitat del 50% (corresponents a un total de 1.000 PgC d'emissions acumulades des de la revolució industrial) i 2,6 °C (corresponents a 1.500 PgC) 2005 és el punt d'inici.

Font: Raupach *et al.*, 2010.

mentar el nivell de certesa del 50% al 95% (figura 10). És important entendre que un nivell del 50% de certesa de no sobrepassar 2 °C té un risc del 10% d'excedir els 3,0 °C (Allen *et al.*, 2009).

Les taxes de mitigació descrites en els paràgrafs anteriors per un volum total de 1.000 Pg d'emissions de carboni són més grans que les reduccions experimentades per països que han tingut transicions transformatives dels seus sistemes energètics. Aquestes inclouen la transició de descarbonització experimentada per França i per Suècia durant la dècada dels vuitanta, quan es van assolir reduccions del 4-5% anuals. França ho va fer a través de la nuclearització del seu sistema energètic i Suècia a través de l'adopció d'energies renovables i a un augment de l'eficiència en l'ús d'energia. El col·lapse de l'antiga Unió Soviètica va portar reduccions d'emissions de carboni del 7% a l'any durant la dècada dels noranta, acompanyades de col·lapse institucional i d'agitació social.

Un objectiu d'estabilitzar la temperatura global a nivells més alts de 2 °C permetria unes quantitats més grans d'emissions i, per tant, taxes de mitigacions menys restringents (figura 10).

## Referències

- ALLEN, M.R.; FRAME, D.J.; HUNTINGFORD, C. [et al.] (2009) «Warming caused by cumulative carbon emissions: towards the trillionth tonne». *Nature* 458, p. 1.163-1.166.
- ARCHER, D. (2007) «Methane hydrate stability and anthropogenic climate change» *Biogeosciences* 4, p. 521-544.
- ARCHER, D.; EBY, M.; BROVKIN, V. [et al.] (2009) «Atmospheric Lifetime of Fossil Fuel Carbon Dioxide». *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 37, p. 117-134.
- BODEN, T.A.; MARLAND, G.; ANDRES, R.J. (2009). *Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO<sub>2</sub> Emissions*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., DOI 10.3334/CDIAC/00001.
- BUTLER, J. (2010) The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI). <<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi>>. [Consulta: 10 maig 2010].
- DAVIS, S.J.; CALDEIRA, K. (2010) «Consumption-based accounting of CO<sub>2</sub> emissions». *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 107, p. 5.687-5.692. DOI 10.1073/pnas.0906974107.
- CANADELL, J.G.; LE QUÉRÉ, C.; RAUPACH, M.R. [et al.] (2007) «Contributions to accelerating atmospheric CO<sub>2</sub> growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks». *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 104, p. 18.866-18.870. DOI 10.1073/pnas.0702737104
- CANADELL, J.G.; PATAKI, D.; GIFFORD, R. [et al.] (2007) «Saturation of the terrestrial carbon sink». A: *Terrestrial Ecosystems in a Changing World*, CANADELL J.G.; PATAKI D.; PITELKA L. (eds.), Berlin-Heidelberg: The IGBP Series. Springer-Verlag, p. 59-78.
- CANADELL, J.G.; RAUPACH, M.R. (2008) «Managing Forests for Climate Change Mitigation». *Science* 320, p. 1.456-1.457. DOI 10.1126/science.1155458.
- (2009) «Land carbon cycle feedbacks. A: *Arctic Climate Feedbacks: Global Implications*, SOMMERKORN M.; HASSOLD S.J. Oslo: WWF Arctic Programme, agost 2009, p. 69-80.
- CANADELL, J.G.; RAUPACH, M.R.; HOUGHTON, R.A. (2009) «Anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions in Africa». *Biogeosciences* 6, p. 463-468.
- CLAIS, P.; REICHSTEIN, M.; VIOVY, N. [et al.] (2005) «Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003». *Nature* 437, p. 529-533.
- CONWAY, T.J.; LANG, P.M.; MASARIE, K.A. (2009) «Atmospheric Carbon Dioxide Dry Air Mole Fractions from the NOAA ESRL Carbon Cycle Cooperative Global Air Sampling Network», 1968-2008, [Versió: 15 juliol 2009] <<ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/co2/flask/event/>>.
- COX, P.M.; BETTS, R.A.; JONES, C.D. [et al.] (2000) «Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model». *Nature* 408, p. 184-187.
- DORREPAAL, E.; TOET, S.; VAN LOGTESTIJN, R.S.P. [et al.] (2009) «Carbon respiration from subsurface peat accelerated by climate warming in the subarctic». *Nature* 460. DOI 10.1038/nature08216.
- FAO (2006) *Global Forest Resources Assessment 2005*. FAO Forestry Paper 147. Roma.
- FRIEDLINGSTEIN, P.; COX, P.; BETTS, R. [et al.] (2006) «Climate-carbon cycle feedback analysis. Results from the C4MIP model intercomparison». *J. Clim.* 19, p. 3.337-3.353.
- GRACIA, C.; SABATÉ, S.; VAYREDA, J. [et al.] (2010). *Embornals. Segon informe sobre el canvi climàtic a Catalunya*. Barcelona: Generalitat de Catalunya.



- GRUBER, N.; FRIEDLINGSTEIN, P.; FIELD, C.B. [et al.] (2004) «The vulnerability of the carbon cycle in the 21<sup>st</sup> Century: An assessment of carbon-climate-human interactions». A: FIELD, C.B.; RAUPACH, M. (eds). *Global Carbon Cycle, integrating human, climate, and the natural world*, Washington DC.: Island Press, p. 45-76.
- GUAN, D.; PETERS, G.; WEBER, C.L.; HUBACEK, K. (2009) «Journey to world top emitter: an analysis of the driving forces of China's recent CO<sub>2</sub> emissions surge». *Geophys. Res. Lett.* 36, L04709.
- JANSSENS, A.; FREIBAUER, A.; SCHLAMADINGER, B.; CEULEMANS, R. (2005) «The carbon budget of terrestrial ecosystems at country-scale – a European case study». *Biogeosciences* 2, p. 15-26.
- HOOIJER, A.; PAGE, S.; CANADELL, J.G. [et al.] (2010) «Current and future CO<sub>2</sub> emissions from drained peatlands in Southeast Asia». *Biogeosciences* 7, p. 1-10.
- HOUGHTON, R.A. (2003) «Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850-2000». *Tellus* 55B: 378-390.
- (2008) «Carbon Flux to the Atmosphere from Land-Use Changes: 1850-2005». A: *TRENDS: A Compendium of Data on Global Change*. Oak Ridge, Tenn., U.S.A.: Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy.
- HOUGHTON, R.A.; HALL, F.; GOETZ, S.J. (2009) «Importance of biomass in the global carbon cycle». *Journal of Geophysical Research* 114, G00E03. DOI 10.1029/2009JG000935.
- IMF (2009) International Monetary Fund., World Economic Outlook. Abril 2009.
- IPCC (2007) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. SOLOMON, S., QIN, D., MANNING, M. [et al.] (eds.). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 996 pp.
- JAENICKE, J.; RIELEY, J.O.; MOTT, C., [et al.] (2008) «Determination of the amount of carbon stored in Indonesian peatlands». *Geoderma* 147, p. 151-158.
- JONES, C.D.; COLLINS, M.; COX, P.M.; SPALL, S.A. (2001) «The carbon cycle response to ENSO: a coupled climate-carbon cycle model study». *J. Clim.* 14, p. 4.113-4.129.
- JONES, C.D.; COX, P.M. (2001) «Modeling the volcanic signal in the atmospheric CO<sub>2</sub> record». *Glob. Biogeochem. Cycl.* 15, p. 453-465.
- KEELING, C.D.; REVELLE, R. (1985) «Effects of El-Nino southern oscillation on the atmospheric content of carbon-dioxide». *Meteoritics* 20, p. 437-450.
- KHATIWALA, S.; PRIMEAU, F.; HALL, T. (2009) «Reconstruction of the history of anthropogenic CO<sub>2</sub> concentrations in the ocean». *Nature* 462, p. 346-350, DOI:10.1038/nature08526.
- KHVOROSTYANOV, D.V.; CIAIS, P.; KRINNER, G. [et al.] (2008) «Vulnerability of permafrost carbon to global warming. Part II: sensitivity of permafrost carbon stock to global warming». *Tellus* 60B, p. 265-275.
- KREY, V.; CANADELL, J.G.; NAKICENOVIC, N. [et al.] (2009) «Gas Hydrates: Entrance to a Methane Age or Climate Threat?» *Environ. Res. Lett.* 4: 034007.
- LAMARQUE, J.F. (2008) «Estimating the potential for methane clathrate instability in the 1%-CO<sub>2</sub> IPCC AR-4 simulations». *Geophys. Res. Lett.* 35, L19806.
- LAWRENCE, D.M.; SLATER, A.G. (2005) «A projection of severe near-surface permafrost degradation during the 21<sup>st</sup> century». *Geophys. Res. Lett.*, 32 (L2) 4401, DOI 10.1029/2005GL025080.
- LAWRENCE, D.M.; SLATER, A.G.; ROMANOVSKY, V.E.; NICOLSKY, D.J. (2008) «Sensitivity of a model projection of near-surface permafrost degradation to soil column depth and representation of soil organic matter». *J Geophys. Res.* 113: F02011, DOI 10.1029/2007JF000883.
- LE QUÉRÉ, C.; RAUPACH, M.R.; CANADELL, J.G. [et al.] (2009) «Trends in the sources and sinks of carbon dioxide». *Nature Geoscience*, DOI: 10.1038/ngeo689.
- LE QUÉRÉ, C.; RÖDENBECK, Ch.; BUITENHUIS, E.T. [et al.] (2007) «Saturation of the Southern Ocean CO<sub>2</sub> sink due to recent climate change». *Science* 316, p. 1.735-1.738.
- LENTON, A.; CODRON, F.; BOPP, L. [et al.] (2009) «Stratospheric ozone depletion reduces ocean carbon uptake and enhances ocean acidification». *Geophys. Res. Lett.* 36: L12606.
- LI, W.; DICKINSON, R.E.; FU, R. [et al.] (2007) «Future precipitation changes and their implications for tropical peatlands». *Geophys. Res. Lett.* 34, L01403, DOI 10.1029/2006GL028364.
- LIMPENS, J.; BERENDSE, F.; BLODAU, C. [et al.] (2008) «Peatlands and the carbon cycle: from local processes to global implications - a synthesis». *Biogeosciences* 5, p. 1475-1491.

- LOARIE, S.R.; ASNER, G.P.; FIELD, C.B. (2009) «Boosted carbon emissions from Amazon deforestation». *Geophys. Res. Lett.* 36: L14810. DOI 10.1029/2009GL037526.
- MACDONALD, G.J. (1990b) «Role of methane clathrates in past and future climates». *Clim. Change* 16, p. 247-281.
- MATHEWS, H.D.; GILLET, N.P.; STOTT, P.A.; ZICKFELD, K. (2009) «The proportionality of global warming to cumulative carbon emissions». *Nature* 459, p. 829-832.
- MCGUIRE, A.D.; SITCH, S.; CLEIN, J.S. [et al.] (2001) «Carbon balance of the terrestrial biosphere in the twentieth century: Analyses of CO<sub>2</sub>, climate and land-use effects with four process-based ecosystem models». *Glob. Biogeochem. Cycl.* 15, p.183-206.
- MEINSHAUSEN, M.; MEINSHAUSEN, N.; HARE, W. [et al.] (2009) «Greenhouse gas emission targets for limiting global warming to 2 degC». *Nature* 458, p.1158-1162.
- NAKICENOVIC, N.; ALCAMO, J.; DAVIS, G. [et al.] (2000) *IPCC Special Report on Emissions Scenarios*, Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press.
- ORR, J.C.; MAIER-REIMER, E.; MIKOLAJEWICZ, U. [et al.] (2001) «Estimates of anthropogenic carbon uptake from four three-dimensional global ocean models». *Glob. Biogeochem. Cycl.* 15, p. 43-60.
- PETERS, G.P.; Hertwich, E.G. (2008) «CO<sub>2</sub> embodied in international trade with implications for global climate policy». *Environ. Sci. Techn.* 42, p. 1.401-1.407.
- RAUPACH, M.R.; MARLAND, G.; CIAIS, P. [et al.] (2007) «Global and regional drivers of accelerating CO<sub>2</sub> emissions». *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 14, p. 10.288-10.293.
- RAUPACH, M.R.; CANADELL, J.G.; LE QUÉRE, C. (2008) «Drivers of interannual to interdecadal variability in atmospheric in atmospheric CO<sub>2</sub> growth rate and airborne fraction». *Biogeosciences* 5, p. 1601-1613.
- RAUPACH, M.R.; CANADELL J.G.; BRIGGS P.R. [et al.] (2010) «Beyond peak CO<sub>2</sub>: sharing and timing of globally capped emissions». *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* [en revisió]
- RIGBY M.; PRINN R.G.; FRASER P.J. [et al.] (2008) «Renewed growth of atmospheric methane». *Geophys. Res. Lett.* 35: L22805. DOI 10.1029/2008GL036037.
- ROGNER H.H. (1997) «An assessment of world hydrocarbon resources». *Ann. Rev. Energy Environ.* 22, p. 217-262.
- SABINE C.L.; HEIMANN, M.; ARTAXO, P. [et al.] (2004) «Current status of past trends of the global carbon cycle». A: FIELD C, RAUPACH M (eds.) *Global Carbon Cycle, Integrating Humans, Climate and the Natural World*, Washington, D.C., Island Press, p. 17-44.
- SCHELLNHUBER, H.J.; CRAMER, W.; NAKICENOVIC, N. [et al.] (2006) *Avoiding dangerous climate change*. Cambridge: Cambridge University Press, 392 p.
- SCHULZE, E.D.; LUYSSAERT, S.; CIAIS, P. [et al.] (2009) «Importance of methane and nitrous oxide for Europe's terrestrial greenhouse-gas balance». *Nature Geoscience* 2009, 2 p. 842-850.
- SCHUSTER, U.; WATSON, A.J.; BATES, N.R. [et al.] (2009) «Trends in North Atlantic sea surface pCO<sub>2</sub> from 1990 to 2006». *Deep-Sea Res. II* 56, p. 620-629.
- SCHUUR, E.A.G.; VOGEL, J.G.; CRUMMER, K.G. [et al.] (2009) «The effect of permafrost thaw on old carbon release and net carbon exchange from tundra». *Nature* 459. DOI 10.1038/nature08031.
- SITCH, S.; HUNTINGFORD, C.; GEDNEY, N. [et al.] (2008) «Evaluation of the terrestrial carbon cycle, future plant geography and climate-carbon cycle feedbacks using five Dynamic Global Vegetation Models (DGVMs)». *Glob. Change Biol.* 14, p. 2015-2039. DOI 10.1111/j.1365-2486.2008.01626.
- TARNOCAI, C.; CANADELL, J.G.; MAZHITOVA, G. [et al.] (2009) «Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region». *Glob. Biogeochem. Cycl.* 23: GB2023. DOI 10.1029/2008GB003327.
- VAN DER WERF, G.R.; MORTON, D.C.; DEFRIES, R.S. [et al.] (2009) «CO<sub>2</sub> emissions from forest loss». *Nature Geoscience* 2, p. 737-738.
- ZIMOV, S.A.; SCHUUR, E.A.G.; CHAPIN III, F.S. (2006) «Permafrost and the Global Carbon Budget». *Science* 312, p. 1612-1613.
- ZHUANG, Q.; MELILLO, J.M.; SAROFIM, M.C. [et al.] (2006) «CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> exchanges between land ecosystems and the atmosphere in northern high latitudes over the 21st century». *Geophys. Res. Lett.* 33: L17403. DOI 10.1029/2006GL026972.

