

# EL CANVI CLIMÀTIC AVUI

Escrit per:

**Josep Enric Llebot**

Catedràtic de Física  
Universitat Autònoma de Barcelona

## Introducció: què és el clima?

Una definició senzilla i ràpida que ens ve al cap intuïtivament sobre què és el clima es refereix al temps mitjà, és a dir, a una mitjana de les variables meteorològiques més importants (temperatura, precipitació, humitat, etc.). En definir una mitjana temporal, no obstant, cal precisar els períodes de temps en els quals es calcula: dies, setmanes, mesos, anys. Tanmateix, seguint amb definicions intuïtives per distingir meteorologia i climatologia, es pot dir que la meteorologia correspon al coneixement del temps instantani, és a dir, el comportament de l'atmosfera inferior a deu dies, mentre que la climatologia estudia el comportament mitjà del sistema climàtic en escales de temps, en qualsevol cas superiors als deu dies. De fet, és justament aquesta característica sobre el coneixement del temps mitjà, que la climatologia no ha estat, fins molt recentment, una disciplina d'interès entre la comunitat científica. (1)

Si simplement fem una ullada a la història, el primer que parla en el sentit actual de canvi climàtic d'origen antropogènic és Svante Arrhenius, (2) un químic i físic suec, que l'any 1896 presentà a la Societat de Física d'Estocolm una comunicació on suggeria que una reducció o un augment del 40% en la concentració d'un component molt minoritari de l'atmosfera, el diòxid de carboni, podia provocar retroaccions que explicarien l'avançament o el retrocés de les geleres. En el seu treball Arrhenius desenvolupà un model d'equilibri de l'energia al sistema climàtic que considerava els efectes radiatius del diòxid de carboni i de l'aigua a temperatura

ambient i estudiava les respostes d'aquest model als canvis en les concentracions de  $\text{CO}_2$ . Aquest treball, naturalment, heretava els resultats de Josephf Stefan sobre la llei de l'emissió de la radiació en funció de la quarta potència de la temperatura,

de Knut Ansgström sobre els valors dels coeficients d'absorció del  $\text{CO}_2$  i del vapor d'aigua, i d'Alexander Buchan sobre les mesures de la temperatura sobre diferents llocs del planeta. El model formulat per Arrhenius era bastant simple i realitzava estimacions sobre la reflexió de la radiació per la superfície terrestre i pels núvols o les retroaccions produïdes per una capa de gel i de neu; aquestes estimacions, tenint en compte el coneixement actual, les consideràrem ingènues o potser, fins i tot, errònies. Arrhenius (3) va concloure que la variació del contingut de  $\text{CO}_2$  i de vapor d'aigua de l'atmosfera tenia una gran influència en l'equilibri energètic del sistema climàtic. Arribà a aquesta conclusió després de realitzar càlculs a mà que comportaven entre 10.000 i 100.000 operacions en el que

avui anomenàrem diferents escenaris d'emissions de  $\text{CO}_2$ . Considerant que les emissions de l'època eren 1, calculà el que preveia que podia passar quan fossin 0.67; 1.5; 2.0; 2.5; i 3.0. Realitzà els càlculs per a les quatre estacions de l'any discriminant la latitud i va concloure que "si la quantitat de de diòxid de carboni augmenta en progressió geomètrica, la



temperatura augmentarà en progressió aritmètica”. També Arrhenius va deduir que la variació de la temperatura seria major a mesura que fos major la quantitat de diòxid de carboni i més alta fos la latitud, i que seria major l'augment a l'hivern que a l'estiu. En general, Arrhenius va preveure un ascens de la temperatura d'entre cinc i sis graus Celsius en duplicar-se el contingut atmosfèric de CO<sub>2</sub>.

Sorprèn el fet que les prediccions d'Arrhenius siguin tan semblants, des del punt de vista quantitatiu, als resultats actuals obtinguts mitjançant els sofisticats models de circulació general. Probablement gràcies a aquesta precisió es considera que el físic suec és l'iniciador dels estudis sobre el possible origen antropogènic del canvi climàtic actual. També Arrhenius parlà dels impactes. La seva visió, la d'una persona que vivia en un país sotmès als rigors d'un llarg i dur hivern, i la seva visió positivista del progrés li feren pensar en l'impacte positiu d'un clima menys rigorós que probablement podria facilitar el desplaçament cap a latituds altes determinades pràctiques agrícoles, que podrien col·laborar a pal·liar el dèficit alimentari de l'època.

### Elements que formen el clima

En un document elaborat l'any 1975 pel GARP (Global Atmospheric Research Program) de l'Organització Meteorològica Mundial, el sistema climàtic fou definit com el sistema format per l'atmosfera, la hidrosfera, la criosfera, la litosfera i la biosfera.<sup>(4)</sup> Aquests cinc subsistemes que formen el sistema climàtic estan acoblats entre si mitjançant intercanvis de massa, de moment i d'energia. Termodinàmicament, el sistema climàtic, no és un sistema aïllat sinó que és un sistema tancat, ja que rep l'energia del sol en forma de radiació electromagnètica d'ona curta i emet radiació electromagnètica d'ona llarga, l'anomenada radiació terrestre.

No obstant això, l'energia que arriba a la Terra procedent

del Sol no és constant, ja que d'una banda l'activitat del Sol segueix un comportament cíclic que fa variar l'energia que ens envia; de l'altra, els paràmetres de l'òrbita de la Terra al voltant del Sol també canvien de forma regular, i constitueixen els anomenats cicles de Milankowich. Per tant, les variacions de l'activitat solar i les variacions dels paràmetres orbitals de la Terra constitueixen una component important de la denominada variabilitat natural del clima. L'altre component associat a la variabilitat natural són els canvis del comportament dels subsistemes terrestres deguts a canvis geofísics com són les erupcions volcàniques i, en menor mesura, els incendis forestals.

Per a poder conèixer quin és el comportament del sistema climàtic hem de saber abans quines variables el caracteritzen. A l'atmosfera les variables d'interès són la temperatura, la pressió superficial, l'altura geopotencial, el contingut de vapor d'aigua, la densitat de l'aire, la velocitat de l'aire. A la hidrosfera és de gran importància el coneixement de la temperatura, la salinitat i el camp de velocitats, a la criosfera el gruix de les capes de gel, l'extensió de la capa de gel en els pols, l'acreció (precipitació sòlida), l'ablació (la fusió o la fragmentació del gel), etc.

Com hem dit abans, els subsistemes que formen el clima estan acoblats. Aquests acoblaments produeixen els mecanismes de retroacció o *feedback* que són una de les característiques més significatives del sistema climàtic. Una retroacció és, en general, un mecanisme mitjançant el qual el resultat d'una pertorbació modifica la pròpia pertorbació que l'ha originat. Conseqüentment, el resultat pot ser una amplificació (retroacció positiva) o un esmorteïment (retroacció negativa). El sistema climàtic mostra ambdós tipus de retroaccions. A continuació oferim alguns exemples dels més representatius per al sistema climàtic.

#### *Retroacció gel-albedo*

Si alguna pertorbació interna o externa al sistema climàtic actua de tal forma que disminueixi la temperatura global de la superfície, és probable que es formin àrees addicionals de neu i de gel. Aquest augment de la criosfera facilitaria la reflexió de la radiació solar i, per tant, es reduiria l'absorció de radiació incident. Així les temperatures cada vegada serien més baixes. Aquest fet augmentaria encara més l'extensió de la neu i el gel i el procés continuaria. Aquest és, evidentment, un mecanisme de retroacció positiu.

#### *Retroacció del vapor d'aigua*

Si alguna pertorbació actua de forma que la temperatura superficial augmenta és probable que augmenti l'evaporació i, en conseqüència, la concentració de vapor d'aigua a l'atmosfera. Com aquest gas absorbeix bona part de la radiació infraroja que emet la superfície, la temperatura de l'atmosfera augmentaria, la qual cosa, a la vegada, induiria un



© George Shewchuk

nou creixement de l'evaporació. Com el cas anterior, aquest mecanisme de retroacció és positiu.

#### *Retroacció dels núvols*

Aquest és un mecanisme on és difícil establir el tipus de retroacció. Els núvols tenen una alta reflexió però també estan formats per aigua i per vapor d'aigua, contribuint a l'efecte hivernacle de l'atmosfera. El mecanisme, en principi, actua de la forma següent. Si augmenta la temperatura, com s'ha dit abans, creix el vapor d'aigua a l'atmosfera i augmenta la probabilitat de formació de núvols. Els núvols baixos i mitjans reflecteixen amb gran efectivitat la radiació solar i, per tant, contribueixen al refredament atmosfèric. Aquest és un exemple de retroacció negativa.

Moltes vegades, la importància dels efectes de retroacció depèn de l'escala temporal dels subsistemes que afecta. De fet, aquest concepte d'escala temporal de la resposta d'un determinat procés és crucial per a la modelització del clima. A l'escala temporal, se l'ha anomenada de forma diferent, com temps d'equilibració, temps de resposta, temps d'ajustament o temps de relaxació. No és més que el temps que necessita un determinat subsistema per a reequilibrar-se després d'una petita pertorbació. Clarament, un procés de modelització del sistema climàtic hauria d'incorporar tots els mecanismes de retroacció existents en el sistema. No obstant, algun d'aquests mecanismes es pot excloure si es considera que el seu temps de resposta característic és molt més gran que l'interval temporal que es vol simular.

### **Les equacions del clima i la modelització**

Les equacions que relacionen les variables de cadascun dels subsistemes climàtics es poden obtenir a partir de les equacions de conservació de massa, de moment i d'energia i de les equacions d'estat. L'equació de conservació de massa s'utilitza per a conèixer els canvis de la densitat o de la concentració d'un determinat component en funció de les fonts externes i dels embornals i té en compte els fenòmens de transport. L'equació de conservació del moment (o equació de Newton-Navier-Stokes) descriu el moviment de l'aire o de l'aigua. L'equació de conservació de l'energia s'usa per predir els canvis temporals de la temperatura i incorpora termes per al transport de l'energia, les fonts externes i els embornals externs d'energia. Les equacions d'estat descriuen la relació entre la pressió, la densitat i la temperatura o, en el cas de l'aigua de mar, la relació entre la salinitat i la temperatura i la densitat. L'equació hidrostàtica dona la variació del camp de pressió en funció de la densitat i de l'altura. Finalment, les equacions de continuïtat per a altres variables, com per exemple, la humitat específica, que relaciona la seva dinàmica amb les fonts i embornals.

La modelització del sistema climàtic pot seguir dues direccions ben diferenciades: mitjançant experiments de laboratori o bé a partir de simulacions numèriques. Els experiments de laboratori per a modelar el sistema climàtic només han resultat satisfactoris per caracteritzar processos

generals, com per exemple, la simulació de la forma del forat d'ozó en una taula rotatòria. La complexitat intrínseca del sistema climàtic, a part de les interaccions no lineals, impossibilita una reproducció detallada en un experiment de laboratori. Per tant, l'única solució de forma general és recórrer a les solucions de tipus numèric.

Per a realitzar les simulacions numèriques es realitzen les aproximacions següents: (5)

#### *Simplificació matemàtica*

Consisteix en la discretització de les equacions, les quals no s'accepten com vàlides en un punt qualsevol del sistema sinó en diverses regions en què dividim el medi. Així, el domini espacial del model es divideix en una sèrie de cel·les de dimensió finita i els intervals de temps que s'elegeixen per a pronosticar les noves variables no són infinitesimals.

#### *Simplificació física*

En els punts en què s'ha discretitzat el sistema no s'apliquen totes les equacions que s'han comentat abans sinó només aquelles dins de l'escala temporal i espacial amb què es treballa.

#### *Simplificacions numèriques*

Els models climàtics simulen processos físics descrits per equacions diferencials parcials i ordinàries. Aquestes equacions es resolen numèricament utilitzant mètodes de diferències finites, operador – splitting i desenvolupament en sèries.

També, abans d'utilitzar els models climàtics amb fins predictius, convé realitzar els tres passos següents:

*Calibració:* Per completar el sistema a modelar s'utilitzen relacions empíriques que incorporen una sèrie de paràmetres a determinar. La calibració del model consisteix a ajustar aquests paràmetres de manera que les condicions inicials a simular es corresponguin amb les dades observades.

*Validació:* Són tests objectius. Per exemple, utilitzar el model per a simular altres estats climàtics coneguts mitjançant dades observacionals.

*Verificació:* Corresponen a un test lògic del model 0. És a dir, veure si el model es comporta tal i com era previsible.

Els models, en funció dels processos que volen incorporar i de l'escala de temps i espacial que volen estudiar es classifiquen de la forma següent:

#### *Models 0 dimensionals:*

Corresponen al valor estadístic mitjà de les variables i, per tant, tracten el sistema com a un ens puntual. L'única equació és la del balanç d'energia.

#### *Models unidimensionals:*

Incorporen la dependència en la latitud, tot i que les variables segueixen realitzant mitjanes zonals. Incorporen, per tant, el transport meridional de calor.

### Models de caixes:

Són una altra forma dels models de balanç d'energia que incorporen les caixes. Una caixa consisteix, per exemple, a considerar l'atmosfera com una caixa limitada en la part superior per l'espai i en la base per la superfície continental o de l'oceà. L'oceà està format per dues caixes, una que representa l'oceà superficial i una altra que inclou l'oceà profund.

### Models bidimensionals

Els models de dues dimensions solen representar les dues direccions horitzontals o bé una dimensió vertical i una dimensió horitzontal. Aquesta última és més habitual. Aquests models incorporen ja unes parametritzacions molt detallades dels fluxos de moment en la superfície terrestre i dels calors latents i sensibles. Els models bidimensionals són molt més econòmics que els models tridimensionals en temps de còmput.

### Models tridimensionals:

Les variables del sistema climàtic depenen de les tres dimensions, dues horitzontals i una de vertical. Aquests models intenten incorporar la majoria de processos existents a l'atmosfera i, per tant, incorporen un nombre molt elevat de variables i d'equacions.

## Alguns resultats

Com a resultat del gran interès i actualitat, a l'informe de l'IPCC recentment publicat, (6) s'estableixen una sèrie de conclusions que es basen en mesures instrumentals o en simulacions. A continuació en mencionem algunes.

### HI HA OBSERVACIONS QUE MOSTREN ELS CANVIS DEL SISTEMA CLIMÀTIC

- La temperatura global ha augmentat durant el segle XX uns 0.6°C.
- Les concentracions dels gasos d'efecte hivernacle i el seu conseqüent forçament radiatiu han augmentat com a resultat de les activitats humanes.
- Els aerosols antropogènics tenen un temps de vida petit i, en general, produeixen un forçament negatiu.
- Els factors naturals han contribuït poc al forçament radiatiu durant el segle XX.

### HA AUGMENTAT LA CONFLANÇA EN LA CAPACITAT DELS MODELS DE PROJECTAR ELS CLIMES DEL FUTUR

- Hi ha una evidència més forta sobre l'origen humà de l'escalfament dels últims 50 anys.
- Les influències humanes continuaran canviant la composició atmosfèrica durant tot el segle XXI.
- Es preveu que la temperatura augmenti entre 1.4°C i 5.8°C

entre 1990 i 2100 a tots els escenaris.(7)

- Es preveu un augment de la concentració del vapor d'aigua i de la precipitació durant el segle XXI.
- Es preveuen situacions d'esdeveniments meteorològics extrems: temperatures màximes més altes, temperatures mínimes més altes, interval diürn de temperatures més reduït, precipitacions més intenses.
- Es preveu un afebliment de la circulació termohalina.
- Es preveu un augment del nivell del mar d'entre 0.09m fins 0.88m pel període 1990-2100.(8)

El canvi climàtic antropogènic persistirà durant segles

- Es preveu el manteniment dels canvis del clima durant segles ja que els temps de permanència a l'atmosfera dels gasos d'efecte hivernacle són grans i les emissions es preveu que continuïn.
- La major incertesa està en els escenaris.

### ACCIONS D'INVESTIGACIÓ PEL FUTUR IMMEDIAT

- Conservació i augment de la xarxa d'observació.
- Foment de sèries climàtiques llargues.
- Desenvolupament d'estudis que reconstrueixin el clima del passat.
- Millora de les observacions de la distribució espacial dels aerosols i dels gasos d'efecte hivernacle.
- Èmfasi en l'estudi de la variabilitat natural *versus* la variabilitat artificial.
- Estudis sobre l'impacte i les prediccions dels models en l'àmbit regional.
- Millora de la incorporació dels núvols en els models.
- Millora en el coneixement del cicle del carboni.

### NOTES:

(1) Llebot, J.E. *El cambio climático* Rubes 1998

(2) Llebot J.E. *Spante Arrhenius: los albores del cambio climático en Medi ambient. Tecnologia i cultura: Once referencias del pensamiento ambiental*, Barcelona 2001

(3) Arrhenius, S On the influence of carbonic acid in the air upon de temperature of the ground *Philosophical Magazine*, 41 237-76, 1896

(4) Peixoto José P. Y Oort A.H. *Physics of climate* AIP, 1989

(5) Schlesinger M.E. (ed.) *Physically based modelling and simulation of climate and climatic change Part2*. Kluwer 1985

(6) *Climate Change 2001 The scientific basis* Cambridge University Press 2001

(7) Aquesta franja de les variacions de la temperatura abasta el resultat d'utilitzar els models de circulació general en tots els escenaris

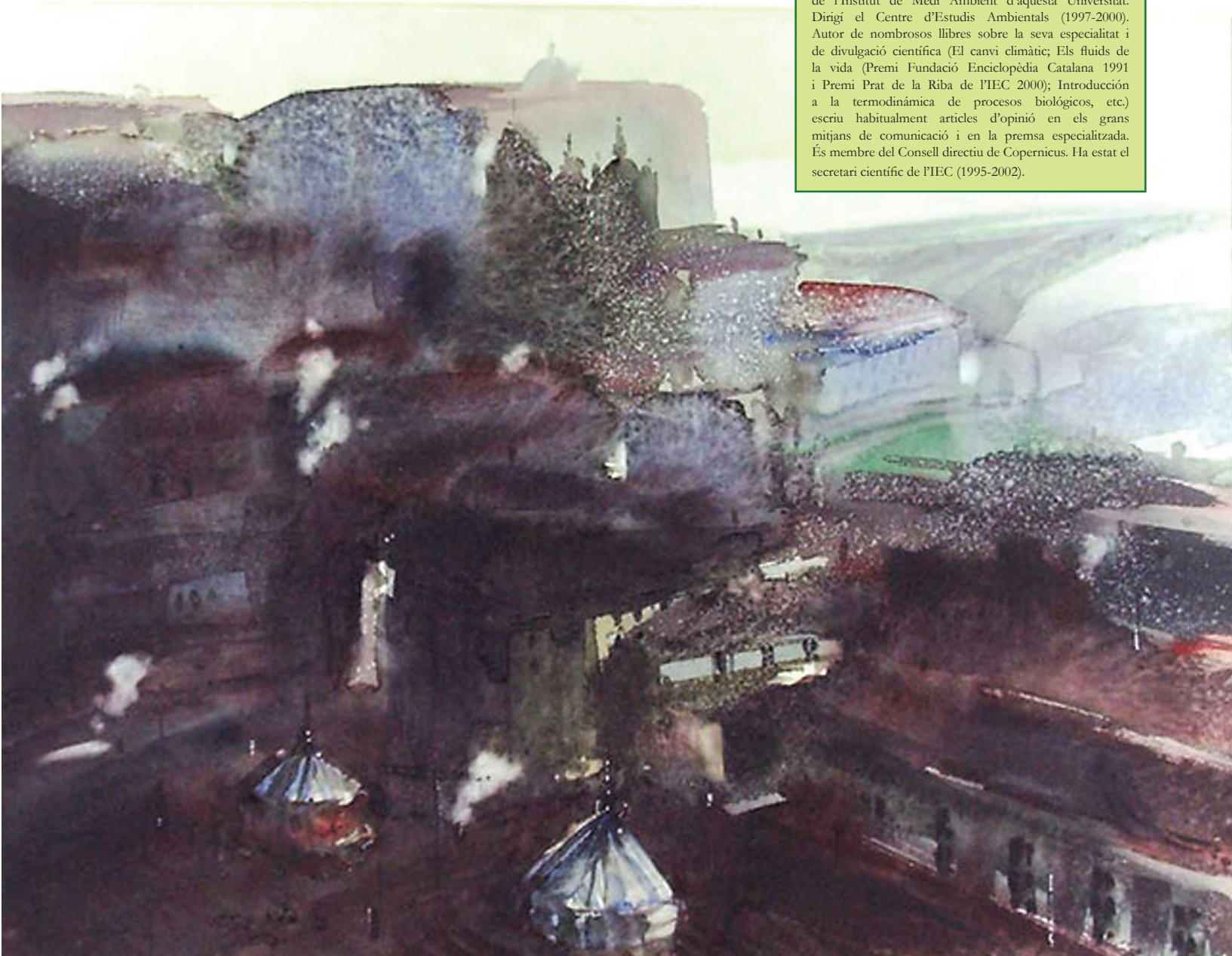
(8) id nota 1





Doctorat en Ciències Físiques per la UAB, **Josep Enric Llebot** és especialista reconegut internacionalment en la termodinàmica de processos irreversibles i en l'estudi i construcció de models climàtics de baixa resolució.

Ha estat professor titular a la UAB, catedràtic a la Universitat de Girona i, actualment, és catedràtic a la UAB. Fou degà de la Facultat de Ciències de la UAB (1991-1993), des d'on impulsà la titulació de ciències ambientals. També fou degà de la Facultat de Ciències Experimentals de la Universitat de Girona, on impulsà també els estudis en aquest camp, i fou el primer director de l'Institut de Medi Ambient d'aquesta Universitat. Dirigi el Centre d'Estudis Ambientals (1997-2000). Autor de nombrosos llibres sobre la seva especialitat i de divulgació científica (El canvi climàtic; Els fluids de la vida (Premi Fundació Enciclopèdia Catalana 1991 i Premi Prat de la Riba de l'IEC 2000); Introducció a la termodinàmica de processos biològics, etc.) escriu habitualment articles d'opinió en els grans mitjans de comunicació i en la premsa especialitzada. És membre del Consell directiu de Copernicus. Ha estat el secretari científic de l'IEC (1995-2002).



Ortiz Alfau, *Dia Gris* (1992)