

Studi de evoluzion climatiche par mieç di modei numerics deterministics a ogjets*

ENRICO MAIERO**, DARIO GIAIOTTI***

Ristret. Inte suaze dal studi sui cambiaments climatics, al ven elaborât un model climatic a ogjets, che po al ven doprât par studiâ i senaris climatics futûrs. La superficie de Tière e ven dividude in cinc celis climaticis, tal sens de longjitudin: dôs celis polârs, dôs celis temperadis o di Ferrel, une cele ecuatoriâl o di Hadley. Chest al permet di minimizâ il scambi di energjie e materie jenfri lis fassis di latitudin: lis celis a interagjissin jenfri di lôr dome par mieç di scambi di energjie, dovûts ai vints prevalents e ai fenomens dominants aes lungjecis scjale tipichis des interfaccis tra lis celis, che a vignaran clamâts ogjets secundaris dal sisteme e a saran i responsabii dal compuartament no lineâr dal sisteme. Il model calibrât, cun valôrs verisimii dai parametris fale che chel rapresentant l'efiet sidrere, soestimât, al da fûr valôrs verisimii e stabii des temperaduris des cinc celis, ancje se a ossilin in mût iregolâr. Al è probabil che la inclusion dal vapôr di aghe e il refinament dal model a metin a puest ancje il parametri dai gas sidrere. Si simule cul model la cressite dai gas sidrere, chê storiche e chê proietade dai RCP dal IPCC (a) (b), ancje se dome in mût cualitatîf. Il model al mostre il so limit soredut tai câs plui otimistics proponûts dal IPCC, ven a stâi se il sfuarçant, dopo jessi cressût, si sbasse fintremai ai valôrs

* Chest articul al è un estrat de tesi di lauree di Enrico Maiero, dal titul *Studio dell'evoluzione climatica tramite modelli numerici deterministici ad oggetti* (Studi de evoluzion climatiche par mieç di modei numerics deterministics a ogjets), elaborade sot de vuide dal Prof. Dario Gaiotti, cuant che E.M. al jere student tal Dipartiment di Fisiche de Universitât di Triest.

** Dipartiment di Siencis Ambientâls, Informatiche e Statistiche de Universitât *Ca' Foscari di Vignesie* e Istitût Nazionâl di Oceanografie e Gjeofisiche Sperimentâl (OGS), Italie. Email: emaiero@ogs.it.

*** Dipartiment di Fisiche de Universitât di Triest, Italie. Email: dgaiotti@units.it.

iniziâi: l'efet ritardant dai oceans nol pue jessi tignût in considerazion. E je invezit credibile la simulazion di sfuarçants impulsîfs negatîfs.

Di particolâr interès al è il soreponisi des temperaduris des trê celis centrâls tal câs di sfuarçants alts dal sisteme: chest si pue devî al tentatîf de cele di Hadley di slargjâsi, che i è impedît de gjeometrie fisse dal model in cheste version.

Pe sô lizerece computazionâl, il model si preste a simulazions di ensembel. Cun di plui, i ogjets secundaris considerâts a corispuindin a events meteorologjics estrens, si che duncje il model al ven bon par valutâ se, in consequence dal cambiament climatic, chescj a aumentaran in numar e intensitât.

Peraulis clâf. Model climatic a ogjets, celis di circolazion atmosferiche, cambiament climatic.

1. Introduzion. La comunitât sientifiche internazionâl e je dacuardi intal ricognossi che a son in at cambiaments climatics che a àn une fuarte corelacion cul riscjaldament globâl, dovût, a sô volte, aes emissions di gas sidrere (anidride carboniche, metan) in consequence des ativitâts umanis. Si delinee duncje tant che une cuistion impuartantone la compresion de evoluzion de atmosfere, che e je part dal sisteme clime, sot la pression des ativitâts umanis. Par podê fâ chest, a van ben modei semplîçs, che a metin in evidence lis relazions di cause-efet. In cheste suaze si è disvilupât il model a ogjets, daspò doprât par simulazions dal cambiament climatic par mieç de introduzion di un sfuarçant arbitrari, ancje secont i senaris delineâts dal IPCC (2018).

2. Materiâi e metodelis

2.1. Il model. La atmosfere de Tere e je dividude in cinc ogjets principâi tal sens de longjitudin, che a corispuindin aes celis climatichis: dôs celis polârs, dôs celis temperadis o di Ferrel, une cele ecuatoriâl o di Hadley. Cheste ultime e je fate, in veretât, di dôs celis, une par emisferi, ma ai fins di chest studi al è plui pratic considerâlis tant che une cele sole. Lis celis a son caraterizadis di une circolazion sierade: si pue duncje assumi, in prime arossimazion, che tra di lôr no scambiin masse, ma dome energjie. Chest scambi di energjie al à lûc par mieç de azion dai vints prevalents (i vints ocidentâi des medis latitudins e i alisis) e dai

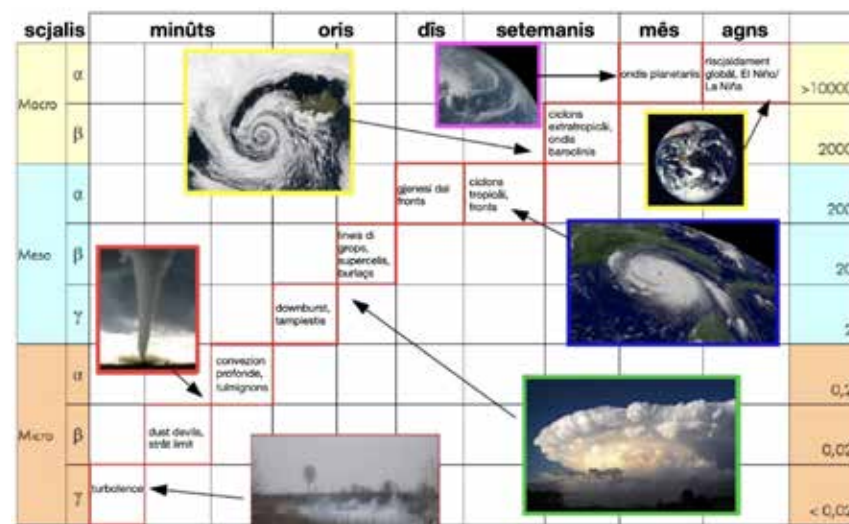


Figure 1. Confront tra lis scjalis dai ciclons tropicâi e dai ciclons extratropicâi, che a son associâts aes ondis di Rossby. I prins a son logâts te mesoscjale, i seconts te macrosjale. In ducj i câs si trate di fenomens de *scjale sinotiche*. Font: Giajotti (2017, 2018, 2019).

fenomens atmosferics dominants aes scjalis tipichis des interfasis jenfri lis celis (miârs o desenis di miârs di chilometris): a son stâts individuâts i ciclons tropicâi pes bassis latitudins e lis ondis di Rossby ta chês altis (Fig. 1). Tal model che si presente achì, chescj fenomens carateristics a vegin clamâts ogjets secundaris dal sisteme.

Si oten cussì un sisteme dinamic fat di cinc ecuazions diferenziâls che a àn tant che variabilis dinamicis lis temperaduris mediis des cinc celis intun ciert timp τ , ven a stâi intal pas di integrazion:

$$c^i \frac{dT^i}{dt} = \mathbf{A}^i - \mathbf{B}^i + \mathbf{C}^i + \mathbf{D}^i \quad (2.1)$$

Il sisteme dinamic al vîf duncje intun spazi des fasis di cinc dimensions.

I tiermins des ecuazions a àn lis dimensions di flus di energjiis: la unitât di misure e je duncje il $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ e i valôrs doprâts a son valôrs medis su lis areis des celis (Tabele 2) e sul pas temporâl τ , che pal moment o lassin indeterminât. L'indiç $i \in \{0, 1, 2, 3, 4\}$ (che clâr nol è un esponent) al è riferît ae cele: par $i = 0$ si à la cele polâr meridionâl, e vie sù fintremâi $i = 4$ (Fig. 2). A çampe inte ecuazion e comparis

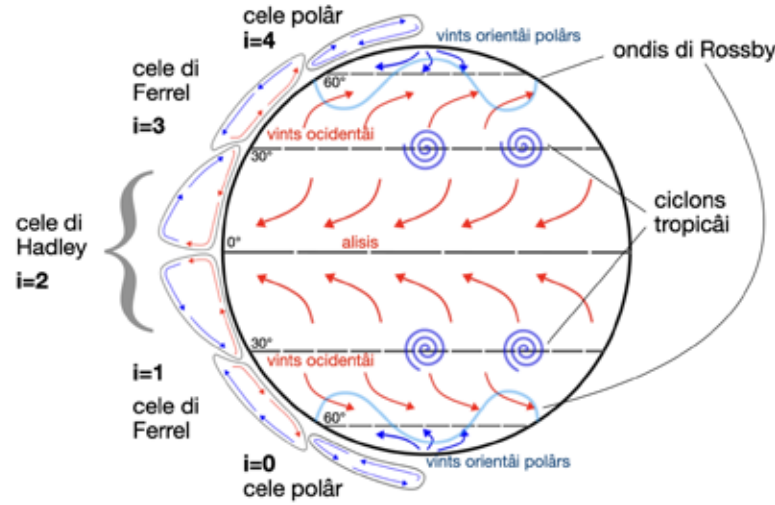


Figure 2. Scheme pe division de Tiere in celis doprade tal model climatic a ogjets. Lis cinc celis che si spartissin la superficie planetarie tal sens de longitudin a son i *ogjets principâi* dal model. Lis celis di Hadley a son dôs, ma par semplicitât computazionâl intal model a 'nt si considere une sole. Si fasin viodi ancje i vints prevalents: i alisis intes celis di Hadley, i vints occidentâi in chês di Ferrel, i vints orientâi polârs. Si mostrin i indiçs doprâts pardabon intal model. I colôrs che a van dal blu al ros a rapresentin lis temperaduris des celis, des plui bassis aes plui altis. I limits tra la cele di Hadley e chês di Ferrel a son metûts a 30° di latitudin (nord e sud), là che si cjatin lis altis pressions tropicâls. Il limit tra ogni cele di Ferrel e la relative cele polâr al è dât invezit de latitudin dal circol polâr (66°33'39''). (Lutgens, Tarbuck e Tasa, 2007)

la derivade prime de temperature intal timp. La temperature e je chês medie di ogni cele, su la aree e sul pas temporâl. La costante c^i e je la capacitât termiche superficial di ogni cele.

A man drete, invezit, a son cuatri tiermins, ven a stâi i contribûts al balanç energjetic:

- Radiazion in jentrade:

$$\mathbf{A}^i = g^i S(1 - \alpha^i) \quad (2.2)$$

cun S costante solâr, g^i fatôr gjeometric de cele (integrâl su la cele dal prodot scalar jenfri la direzion di incidence de radiazion e il vetôr ortogonâl ae superficie, dut dividût pe aree de cele), α^i albedo de cele;

- Radiazion in jessude:

$$\mathbf{B}^i = m\sigma T^4(1 - \beta) \quad (2.3)$$

cun σ costante di Stefan-Boltzmann, m emissivitât relative, β frazion di radiazion stratignude par efiet sidrere;

- Traspuart di calôr jenfri celis:

$$\mathbf{C}^i = (C_{nord}^i l_{nord}^i + C_{sud}^i l_{sud}^i) \frac{h^i}{A^i} \quad (2.4)$$

là che h^i e je la altece medie de troposfere inte cele, A^i e je la aree de superficie de cele, $C_{nord,sud}^i$ al è il calôr sensibil che al rive de cele adjacent setentrionâl o meridionâl e al è fat di doi contribûts:

$$C_{nord,sud}^i = C_{nord,sud}^{i,CONT} + C_{nord,sud}^{i,OGG} \quad (2.5)$$

là che

- il prin tiermin al è continui e si dêf ai vints prevalents (alis, vints occidentâi des medis latitudins):

$$C_{nord,sud}^{i,CONT} = -\text{sgn}(T^i - T^{i\pm 1}) K_{nord,sud}^i f^i(|T^i - T^{i\pm 1}|) \quad (2.6)$$

e

- il secont ai ogjets secundaris e al è il prodot dal lôr numar e de lôr intensitât:

$$|C_{nord,sud}^{i,OGG}| = n_{ogg}(|\Delta T|) \text{int}_{ogg}(|\Delta T|) \quad (2.7)$$

- * I ciclons tropicâi, jenfri celis di Hadley e di Ferrel, si ativin dome se $T^{Hadley} = T^{i=2} > T^{Ferrel}$ e $T^{Hadley} = T^{i=2} > T_{cycl}$, là che T_{cycl} e je une temperature critiche pe ativazion dai ciclons tropicâi¹, e il tiermin che al esprim il lôr contribût al va sotrat de cele centrâl e sumât in chês temperadis:

¹Chest al vûl rapresentâ il fat che i ciclons tropicâi a son ativâts di temperaduris de superficie marine plui grandis di 26 °C (Tory e Dare, 2015), ma chi il mâr nol è rapresentât, pa la cuâl si dore un valôr pe temperature atmosferiche.

· Numar:

$$n_{cycl} = \text{floor}(\eta_{cycl}((T^{Hadley} - T_{cycl})\epsilon_{cycl} + 1)^{\lambda_{nC}}) \quad (2.8)$$

Il numar al à un limit superiôr tal rapuart jenfri la lungjece dal paralêl al confin fra lis celis centrâls e il diametri tipic di un ciclon, par un parametri coretîf.

· Intensitât:

$$int_{cycl} = int_{cycl}^{min}((T^{Hadley} - T_{cycl})\epsilon_{cycl} + 1)^{\lambda_{iC}} \quad (2.9)$$

* lis ondis di Rossby, jenfri celis di Ferrel e polârs, si ativin dome se $T^{polar} < T^{Ferrel}$.

· Numar:

$$n_R = \text{int}(\eta_{nR}(|T^{Ferrel} - T^{polar}|)^{\lambda_{nR}}) \quad (2.10)$$

· Intensitât:

$$int_R = \eta_{iR}(|T^{Ferrel} - T^{polar}|)^{\lambda_{iR}} \quad (2.11)$$

• Calôr latent:

$$\mathbf{D}^i = L_v \Delta e^i \quad (2.12)$$

cun L_v calôr latent di condensazion/evaporazion e Δe^i frazion di vapôr nete condensade (in câs di evaporazion, chê cuantitât e à segn negatîf). Dut câs, stant che par risolti chest tiermin al sarès necessari cubiâ ancje des ecuazions pal traspuart dal vapôr di aghe, si à vût miôr, par chest studi preliminar, ponilu a 0.

Tabele 1. Sintesi de ecuazion di balanç energjetic par une cele dal model a ogjets. L'indîç i al indiche la cele, i cressint viers Nord. Il significât fisic dai parametrîs al è dispieât te Tabele 2. Di notâ ben che: 1) se $i = 0$, i tiermins cun indîç $i - 1$ a son metûts compagns di 0; se $i = 4$, i tiermins cun indîç $i + 1$ a son metûts compagns di 0; 2) lis diferencis di temperature che a fasin di base di esponenziâi a van considerâts cence dimension parcè che a son normalizâts cuntun fatôr oportun, che al vâl 1 in modul fale che specificât diferent.

Balanç energjetic de cele i -esime	
$c^i \frac{dT^i}{dt} = \mathbf{A}^i - \mathbf{B}^i + \mathbf{C}^i + \mathbf{D}^i$	
Radiazion in jentrade a ondis curtis	$\mathbf{A}^i = g_i S(1 - \alpha_i)$
Radiazion in jessude a ondis lungjis	$\mathbf{B}^i = m\sigma T^4(1 - \beta)$
Traspuart di calôr sensibil	$\mathbf{C}^i = \sum_{j=nord, sud} C_j^i l_j^i \frac{h^i}{A^i}$
Densitât superficial di calôr sensibil	$C_{nord, sud}^i = C_{nord, sud}^{i, CONT} + C_{nord, sud}^{i, OGG}$
Contribût dai vints prevalents	$C_{nord}^{i, CONT} = -\text{sgn}(T^i - T^{i+1}) K_{nord}^i (T^i - T^{i+1})^{\gamma_{nord}^i}$ $C_{sud}^{i, CONT} = -\text{sgn}(T^i - T^{i-1}) K_{sud}^i (T^i - T^{i-1})^{\gamma_{sud}^i}$
Contribût dai ogjets secundaris:	$ C^{OGG} = n_{ogg}(\Delta T) int_{ogg}(\Delta T)$
-ciclons tropicâi	A comparissin dome se $T^{Hadley} = T^{i=2} > T^{Ferrel}$ & $T^{Hadley} = T^{i=2} > T_{cycl}$ Gjavâ par $i = 2$, zontâ par $i = 1$ o $i = 3$ $n_{cycl} = \text{floor}(\eta_{cycl}((T^{Hadley} - T_{cycl})\epsilon_{cycl} + 1)^{\lambda_{nC}})$, ma se $n_{cycl} > \frac{l_{Hadley}^{min}}{L_{cycl}^{min}} \xi$ alore $n_{cycl} := \frac{l_{Hadley}^{min}}{L_{cycl}^{min}} \xi$ $int_{cycl} = int_{cycl}^{min}((T^{Hadley} - T_{cycl})\epsilon_{cycl} + 1)^{\lambda_{iC}}$
-ondis di Rossby	A comparissin dome se $T^{polar} < T^{Ferrel}$ Gjavâ par $i = 1$ o $i = 3$, zontâ par $i = 0$ o $i = 4$ $n_R = \text{int}(\eta_{nR}(T^{Ferrel} - T^{polar})^{\lambda_{nR}})$ $int_R = \eta_{iR}(T^{Ferrel} - T^{polar})^{\lambda_{iR}}$
Contribût dovût ae condensazion/evaporazion	$\mathbf{D}^i = L_v \Delta e^i$

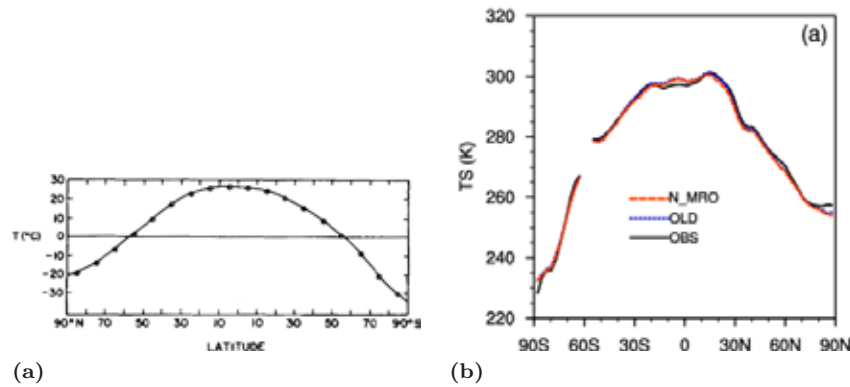


Figure 3. Temperatur in funzion de latitudin sicu proviodude di cierts modeli in leterature. (a) Rielaborazion grafiche tirade fûr di Sellers (1969), temperatur in grâts Celsius; (b) (Zhang, Jing e Li 2014), temperatur in Kelvin.

Il model cussì descrit al è metût in struc inte Tabele 1. Il tiermin plui complès al è sigûr chel dal traspuart di calôr, che al è fat di un contribût continui (i vints prevalents, a ûs i alisis) e di un contribût no continui, ven a stâi i ogjets secundaris, che si ativin dome se un ciert soiâr di temperatur al ven passât e, tal câs dai ciclons tropicâi, dome se la temperatur de cele di Hadley e je plui grande di chê des cele dongje. Cun di plui, i ogjets secundaris a comparissin intun numar discret, ancje se la lôr energjie e pues variâ cun continuitât.

2.2. Calibradure dal model. Intes ecuazions a comparissin dai parametris, che il lôr significât al è ripuartât in Tabele 2. Si son otignûts valôrs verisimii dai parametris midiant di une operazion di calibradure dal model. Par cheste operazion, si è lâts daûr di doi criteris: tant par tacâ, si è cirût inte leterature sientifiche stimis bielzà fatis dai valôrs dai parametris o di cuantitâts leadis; daspò si è fat un raffinament cambiant il valôr dai parametris dentri intervai verisimii e eseguint il program che al implemente il model, fin a otignî la convergjence a valôrs realistics pes temperaturis des cinc celis, che il lôr valôr al è stât stimât partint dai grafics in Figure 3: 292K pe cele di Hadley, 287K pe cele di Ferrel (vint miôr che la cele di Ferrel setentrionâl e sedi un ninin plui frede), 272K pe cele polâr setentrionâl, 265K pe cele polâr meridionâl, cu la tolerance

Tabele 2. Parametris che a comparissin inte ecuazion di balanç energjetic par une cele dal model a ogjets: si riferissin i lôr nons, simbui, valôrs di calibradure tal sens de sezion 2.2. La prime part de Tabele e inten grandecis gjeometricis e costantis fisichis validis a part de calibradure; la seconde lis cuantitâts calibradis. L'apiç i al è metût su lis cuantitâts dependentis de cele.

Grandece	Simbul	Valôr
Costante di Stefan-Boltzmann	σ	$5.67 \cdot 10^{-8} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-4}$
Rai medi de Tiere	R_T	$6.37 \cdot 10^6 \text{m}$
Latitudin dal confin Hadley-Ferrel	ϕ^{Hadley}	30°
Latitudin dal confin Ferrel-cele polâr	ϕ^{polar}	$66^\circ 33' 39''$
Altece de atmosfere inte cele	h^i	$[8.0; 12; 18; 12; 8.0] \cdot 10^3 \text{m}$
Calôr latent di evaporazion de aghe	L_v	$2.27 \cdot 10^6 \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
Costante solâr	S	$1370 \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
Emissivitât de Tiere	m	0.964
Albedo	α^i	$[0.26; 0.30; 0.35; 0.35; 0.25]$
Capacitât termiche superficial	c^i	$[17; 20; 20; 19; 18] \text{J} \cdot \text{m}^{-2}$
Coef. pal calôr sensibil (vints preval.)*	K_{nord}^i	$[15; 40; 40; 15; 0] \text{J} \cdot \text{K}^{-1}$
Espon. pal calôr sensibil (vints preval.)*	γ_{nord}^i	$[0.4; 1.2; 1.2; 0.5; 0]$
Fraz. di rad. a o. lungjis stratignude**	β	0.46
Soiâr di temperatur pai ciclons tropicâi	T_{cycl}	296K
Coef. par ΔT tal n. di ciclons tropicâi	η_{cycl}	40
Fatôr di normaliz. par ΔT pai ciclons tr.	ϵ_{cycl}	1K^{-1}
Esponent pal numar di ciclons tropicâi	λ_{nC}	1.5
Lungjece minime di un ciclon tropicâl	$L_{\text{cycl}}^{\text{min}}$	$2.0 \cdot 10^6 \text{m}$
Fatôr coretif pal num. di ciclons tropicâi	ξ	3
Intensitât minime di un ciclon tropicâl	$\text{int}_{\text{cycl}}^{\text{min}}$	$10 \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
Esponent pe intensitât dai ciclons tropic.	λ_{iC}	4
Coef. par ΔT tal n. des ondis di Rossby	η_{nR}	31.5
Esponent pal numar di ondis di Rossby	λ_{nR}	0.5
Coef. par ΔT te intensitât di ondis di R.	η_{iR}	15
Esp. pe int. di ondis di R. emisferi Nord	λ_{iR}	1.7
Esp. pe int. di ondis di R. emisferi Sud	λ_{iR}	1.5

*Si riferis l'array pai scambis cu lis celis a Nord; par vê K_{sud}^i al baste traslâ in maniere cicliche i valôrs dal array a man drete. I parametris no àn segn: il segn al è determinât de temperatur.

**La calibradure manuâl di β e puarte a soestimâ la cuantitât: il cont just al larès fat cjapant a riferiment un sempliç model a balanç energjetic pal planet intîr.

di cirche 2K.

La prime part de Tabele 2 e je fate dute di costantis fisichis ben cognossudis, che no àn vude bisugne di jessi calibradis; la seconde, inve-zit, e je fate des grandecis calibradis. O viodìn che si pues rigjavà cun facilitàt la aree di une cele jenfri dōs latitudins φ_0 e φ_1 :

$$2\pi R_T^2(\sin(\varphi_1) - \sin(\varphi_0)) \quad (2.13)$$

Cussì ancje il fatôr g^i in ecuazion 2.2:

$$g^i = \frac{\varphi_1 - \varphi_0 + \sin(\varphi_1) \cos(\varphi_1) - \sin(\varphi_0) \cos(\varphi_0)}{2\pi(\sin(\varphi_1) - \sin(\varphi_0))} \quad (2.14)$$

Stant che il valôr sielzût pe costante solâr S al è une medie anuâl, o podìn tignî il pas temporâl tant che tal ordin dal an: $\tau \gtrsim 1yr$ ².

Un esempli dal mût che si son calibrâts i parametrîs al è chel dai ciclons tropicâi: viodût che $\tau \gtrsim 1yr$ e che intun an e je cualchi desene di ciclons tropicâi (viôt, par esempli, WMOB), si spietisi che η_{cycl} al sedi di cualchi desene. Cun di plui, savint che la CAPE (*Convective Available Potential Energy* - energjie potenziâl convetive disponibile) tal strât limit di une aree sogjete a ciclon e je di $2000J \cdot kg^{-1}$ (Lee e Frisius 2018) e considerant lis grandecis-scjale tipichis di un ciclon tropicâl, si pues stimâ la potence in cirche $10^{14}W$ e duncje si puedin acetâ valôrs dai parametrîs dai ciclons tropicâi che a produsin potencis jenfri $10^{12}W$ e $10^{15}W$.

Il parametri η_{mR} , numar di ondis di Rossby, al pues jessi 7. Considerazions su energjiis e temperaduris cjapadis dentri a dan i valôrs in Tabele 2.

I valôrs de albedo e de capacitât termiche che si cjatin inte leterature (Schwartz 2007) a son, pal planet intîr, $\alpha = 0.31$, $C = 17J \cdot m^{-2}$. I valôrs des celis ugnulis a son stâts cjatâts tignint tant che riferiments i valôrs planetaris sicu valôrs medis e tignint cont des diferencis e des asimetriis jenfri lis celis: par esempli la presince di glace e nûi continentâi e fâs lâ sù la albedo, ma une incidence debile dai rais dal Soreli e compuarte une albedo debile (ve ca displeâts i bas valôrs pes celis polârs); grandis cuantitâts di aghe a alcin la capacitât termiche. A son stadis fatis con-

²Pal studi dal clime cheste sielte e je sensade, dal moment che il clime al pues jessi definît tant che il comportament medi de atmosfere intun interval di timp une vore lunc, in gjenar trente agns (viôt WMOa)

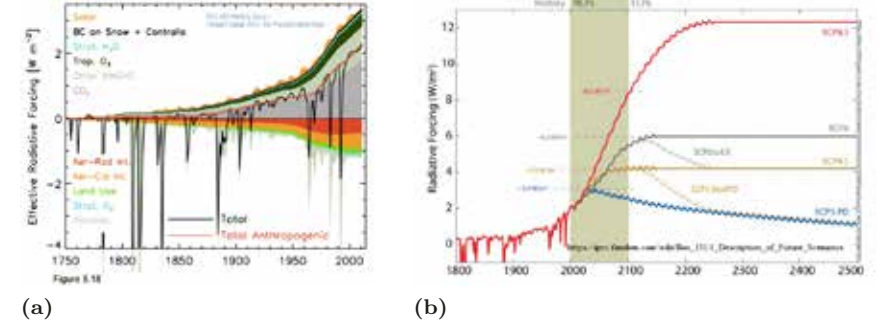


Figure 4. (a) Cressite dal sfuarçant radiatîf tai ultins doi seculi e mieç. Viodi la impuartance dal contribût de anidride carboniche. La impenade de curve dal 1960 indenand e à ispirât il non de curve, *hockey stick* (mace di hockey). Font: IPCC (2018). (b) Cressite dal sfuarçant radiatîf tai ultins doi seculi e mieç, slungjade par mostrâ i senaris climatics futûrs secont sieltis politichis diferentis sul control des emissions di anidride carboniche. Si marcjin i agns di chest secul, che a son critics pal avignî. Font: IPCC (2018)

siderazions dal gjenar ancje pes altris grandecis, tignint cont ancje des asimetriis jenfri i doi emisferis.

I valôrs otignûts a son ripuartâts inte ultime colone de Tabele 2. Il sôl parametri che al è calibrât a un valôr lontan di chei misurâts al è β , che al rapresente la frazion di radiazion a ondis lungjis stratignude dal sisteme par vie dal efiet sidrere: il valôr stimât su la fonde de osservazion al è $\beta_{oss} = 0.36$, chel che si oten cu la calibradure $\beta_{cal} = 0.46$.

2.3. Câs di studi. Tes ecuazions si pues introdusi un tiermin sfuarçant ΔF , che in chest câs lis ecuazions a diventin:

$$c^i \frac{dT^i}{dt} = \mathbf{A}^i - \mathbf{B}^i + \mathbf{C}^i + \Delta F + \mathbf{D}^i \quad (2.15)$$

cul stes significât dai simbui de sezion 1.

La utilitât dal tiermin sfuarçant e je chê di podê meti dentri dal balanç energjetic di ogni cele dai elements esternis al sisteme, ma che a puedin influî sul sisteme stes, par esempli une eruzion vulcaniche o lis emissions consecuentis aes ativitâts antropichis. Pal studi in esposizion, a son stâts metûts dentri sfuarçants di fatis diferentis: un tiermin costant tal timp, un cressint in mût lineâr par un ciert interval e daspò costant,

un che al cres a hockey stick, ven a stâi secont la forme dal grafic che al ripuarte l'andament tal timp dai gas sidrere (anidride carboniche e metan) che apont al ricuarde une mace di hockey (Fig. 4a) (dôs cressitis lineârs, prin une plui lente e dopo une plui svelte, e daspò un valôr costant).

A son stâts metûts dentri ancje doi sfuarçants che a àn dai andaments simii, in mût cualitatîf, ai senaris futûrs rangjâts dal IPCC, i in-nomenâts *Representative Concentration Pathway* (RCP) (ICCPb 2018). In veretât, sot un voli cualitatîf, la cressite a hockey stick proietade tal futûr e je isomorfe ai senaris plui pessimistics, là che invece i senaris miôr a fasin seguî une decressite lineâr; ancje chest secont cês al è stât simulât (Fig. 4b).

Alfin si viôt ce che al compuarte un sfuarçant negatîf impulsîf, a ûs di chei prodots dai vulcans in eruzioni tant fuartis di fâ rivâ particulât in stratosfere. Al impuls negatîf si fâs seguî une cressite lineâr al valôr originari dal sfuarçant, par figurâ la colade dal particulât.

Fasint chescj experiments numerics, si viôt la rispueste des temperaturis des celis, de intensitât e dal numar di ogjets secundaris par ogni pas temporâl in consequence de alterazion dal sfuarçant.

Il model al è stât implementât in lengaç Python (Python Software Foundation).

3. Risultâts. In Figure 5 si ripuartin lis seriis temporâls (la unitât di timp e je il pas τ) des temperaturis des celis par diferents simulazions.

Il comportament dal model calibrât si pues viodi tes Figuris 5a, là che i ogjets secundariis no son stâts ativâts, e 5b, là che invece a son stâts piâts. In ducj i doi i cês al è stât eseguît un run dal model par 200 agns. Tal prin cês lis temperaturis a assumin dai valôrs costants dopo un transient, ven a stâi che lis traietoriis tal spazi des fasis a colin suntun pont di ecuilibri; tal secont cês, invece, lis temperaturis des cinc celis a ossilin ator di valôrs medis e verisimii, ancje se chestis ossilazions no son regolârs, pa la cuâl lis traietoriis, intal spazi des fasis, a van a colâ suntun atratôr strani. Al è evident che a son i ogjets secundaris a introdusi la no-linearitât dal sisteme. Cun di plui, i ogjets secundaris a aumentin la eficiencia dal traspuart energjetic, si che duncje lis temperaturis des celis a son plui dongje tra lôr inte Figure 5b che no inte 5a.

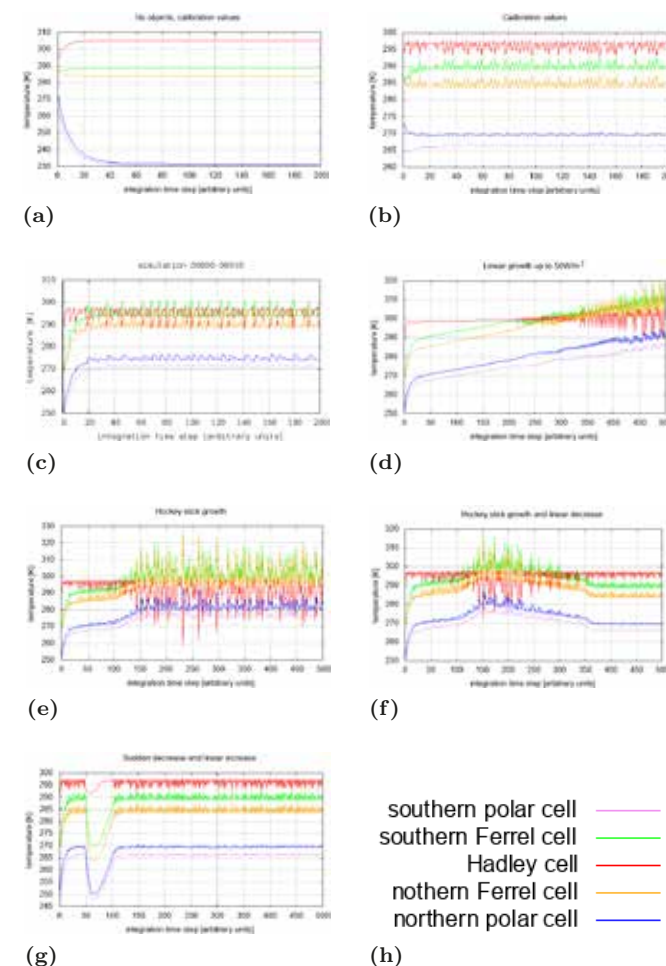


Figure 5. Risultâts des simulazions. Evoluzion tal timp de temperature des celis, pai valôrs di calibrature dal model mostrâts in Tabele 2 fale che specificât diferent. (a) Si metin a zero i contribûts dai ogjets secundaris (ciclons e ondis di Rossby). (b) I ogjets secundaris a son “piâts” (parametris ai valôrs di calibrature). (c) Sfuarcant costant $10\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$. (d) $\lambda_{IC} = 2$ e il sfuarçant al varie in mût lineâr cul timp di 0 a $50\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ in 500 pas di integrazione. (e) Il sfuarçant al varie in mût lineâr cul timp secont une funzion a tocs: tes primis 100 iterazions di $0\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ a $5\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, tes seguitivis 50 di $5\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ a $20\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, e alfin si ferme su chest valôr. (f) Il sfuarçant al varie in mût lineâr cul timp secont une funzion a tocs: tes primis 100 iterazions di $0\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ a $5\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, tes seguitivis 50 di $5\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ a $20\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, tes seguitivis 200 al torne jù fintremai $0\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, e alfin si ferme su chest valôr. (g) Il sfuarçant al devente in mût impulsîf $-50\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ a $5\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ae 50-esime iterazion e al torne sù in mût lineâr fintremai a $0\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ in 50 iterazions, e alfin si ferme su chest valôr. (h) Leide.

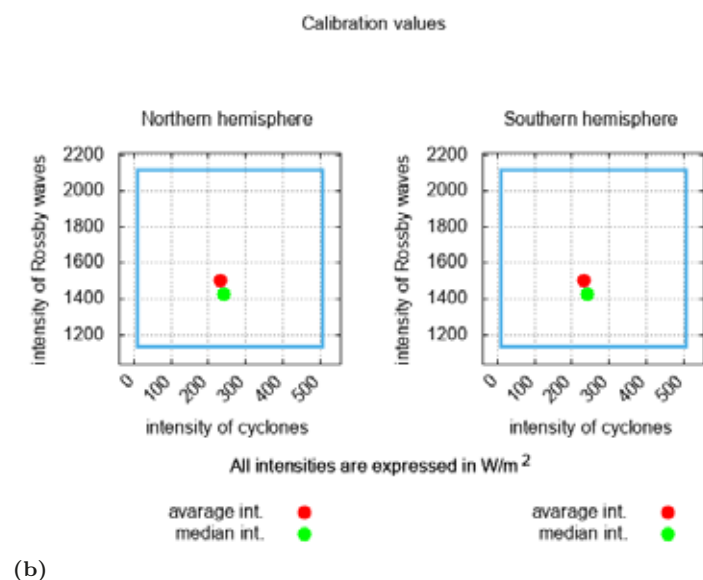
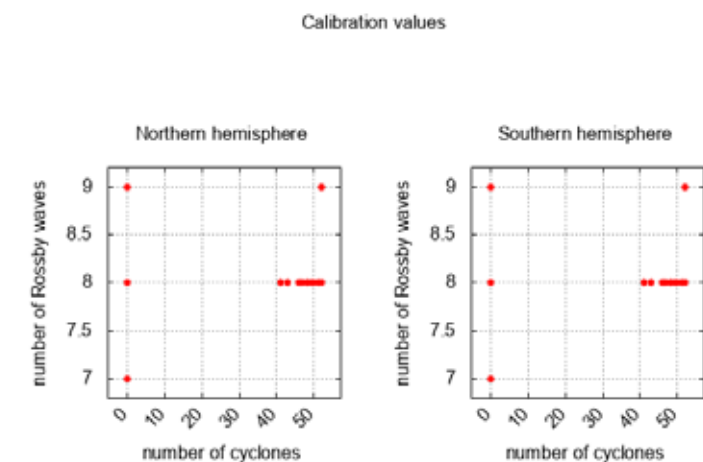


Figure 6. Risultâts numericis par un *run* dal model climatic calibrât (Tabele 2, temperature iniziâl sicu in Fig. 5b) tai doi emisferis. (a) Numar di ciclons tropicâi vs. numar di ondis di Rossby. (b) Intensitât dai ciclons tropicâi vs. intensitât des ondis di Rossby. Il pont ros al è sui valôrs medis di dutis dôs lis grandecis, il pont vert al è la mediane; il retangul blâf al è segnât jenfri i minimis e i massims de intensitât.

La immagin 6a e mostre i numars di ciclons e di ondis di Rossby che si otegnin pal model calibrât. Di notâ che i ciclons a pendolin simpri jenfri 0 e valôrs dongje al massim, là che invezit lis ondis di Rossby a son in pratiche simpri presintis in cuantitâts cuasi costantis. In Figure 6b si viodin lis energjiis di ciclons e ondis di Rossby.

Se si introdûs un tiermin sfuarçant ΔF costant, lis temperaduris des celis no centrâls si alcin dutis, ma l'efiet al è une vore plui evident inta chês polârs. La cele di Hadley no rive invezit a alcâ la sô temperature par vie che, ogni volte che si passe la temperature T_{cycl} , e je costrete a cedi la energjie in ecès par mieç di ciclons. A valôrs alts dai sfuarçants lis temperaduris des celis di Hadley e di Ferrel a tindin fintremai a coincidi. Dut chest si pues viodi te Figure 5c. L'intensitât dai ogjets secundaris si alce cul alcâsi dai sfuarçants, invezit il numar al pendole simpri jenfri 0 e un valôr massim.

Cuntun sfuarçant che al cres in mût lineâr tal timp (situazion che pues simulâ une cressite costante dai gas sidrere) si cjatin lis stessis carateristichis za viodudis intai sfuarçants costants, sedi in rivuart ae temperature che ai ogjets secundaris; clâr che lis ossilazions a divegnin man man plui grandis e mancun realistichis cul lâ indenant dal timp (Fig. 5d).

L'andament realistic dal sfuarçant radiatîf al è, come za dit, chel a *hockey stick* (Fig. 4a); simulant une cressite di ceste fate e daûr un sfuarçant che al reste costant al valôr finâl (ce che al corispuent ancje ai senaris futûrs cence riassorbiment dal sfuarçant di Fig. 4b), si torne a vê l'andament a dôs pendencis ancje tes temperaduris des celis (Fig. 5e). Chê altre fate di senaris futûrs di Figure 4b e je chê che, daspò de cressite a *hockey stick*, e fâs lâ jù il sfuarçant linearmentri tal timp fin ai valôrs preindustriâi. Ancje in chest câs lis temperaduris des celis a spielin l'andament dal sfuarçant (Fig. 5f).

Alfin, aplicant un sfuarçant impulsîf negatîf e daspò une cressite lineâr curte fin ae situazion iniziâl, si viôt che lis temperaduris a calin di bot, ma sui timps luncs no si à memorie di chest efiet (Fig. 5g).

4. Discussion. Un prin apont al va fat su la calibradure dal model: par sigûr a son fuarts margjins di miorament, cirint salacor dâts plui inzornâts e cjaltant aes distribuzions statisticis dai risultâts che si otegnin par mieç dal model (analizâ par esempi lis seriis temporâls otignudis

e confrontâlis cun chês osservadis). Par prionte, cierts parametris a dipendin di fat de temperadure, par esempi la albedo, che tant e dipent de superficie nulade e di chê glaçade. Se si ten cont di dut chest, al è probabil che il parametri β (viôt la Tabele 2) al puedi jessi calibrât in maniere plui realistiche.

Par ce che al inten i risultâts esponûts, al va dit che tal câs dai senaris futûrs e, plui in gjenerâl, in ducj i câs che si è doprât il tiermin sfuarçant ΔF , si è volût cjalâ al svilup cualitatîf dal sisteme, pluitost che cirî risultâts numerics precîs, pa la cuâl i risultâts no van intindûts tant che previsions o indicazioni sul clime futûr.

Une prime considerazion di fâ sul model e je che la funzion dai ogjets secundaris inte introduzion di un compuartament no lineâr dal sisteme e je fundamentâl: cun di fat, intes Figuris 5a e 5b si viôt ben come cence ogjets secundaris l'atrator al è un pont di ecuilibri, cun ogjets secundaris al è un atrator strani e lis temperaduris a ossilin simpri in mût iregolâr. Se po si cjale ancje il numar di ondis di Rossby e ciclons tropicâi (Fig. 6a), si viôt ben che lis primis a son simpri presentis e i seconts invezit a son o assents o in numar consistent. Chest al fâs vignî il sospiet che, ancje se in teorie nissun dai doi ogjets secundaris al è lineâr, a son i seconts i vêrs responsabii dal compuartament caotic; di fat, si è otignût conferme di chest distudent in mût separât lis ondis di Rossby e i ciclons tropicâi. Chest compuartament al è cetant plui clâr se si cjale al fat che i ciclons, par piâsi, a àn bisugne di un soiâr di temperadure T_{cycl} .

Fasint riferiment simpri al numar di ciclons tropicâi (simpri Fig. 6a), si viôt ancje che a son presints o in numar dongje dal massim, o no son presints dal dut. Chest al è pôc realistic e al è sigûr un pont debil dal model. Lis energjiis dai ogjets secundaris (Fig. 6b), invezit, a son realistichis, almancul in prime arossimazion.

Un altri limit dal model si viôt introdusint sfuarçants alts, a ûs di chel in Figure 5c: lis temperaduris des celis di Hadley e di Ferrel a tindin a coincidi, par vie che la cele di Hadley e je costrete a cedi la energjie in ecès ogni volte che e passe la temperadure T_{cycl} . Chest risultât, sigûr no realistic, al pues jessi però interpretât intune maniere interessante: si pues di fat displeâ come un tentatîf de cele di Hadley di slargjâsi, robe che no i je permetude par vie dal fat che la gjeometrie dal model e je salde. Se la cele di Hadley e pues “mangjâ” chês dongje, o miôr se si amet une gjeometrie variabile dal sisteme, si pues pensâ che il

riscjaldament globâl al vedi come efiet il slargjâsi de cele di Hadley e il strenzisi di chês altris, cuntun efiet di aument des temperaduris cetant plui clâr intes celis polârs.

Cun riferiment ae situazion in Figure 5f, ven a stâi a un senari di decressite dal sfuarçant dopo che al è cressût, nol è credibil che lis temperaduris des celis a tornin daurman ae situazion di partence, come che il model al sugjeris, dal moment che no si considerin lis componentis no atmosferichis dal clime, tant che par esempi i oceans, che a àn tims-scjale di reazion une vore plui grancj. E je invezit realistiche la rispueste ai impuls negatîfs in Figure 5g.

Alfin, un pas necessari par miorâ il model al sarès la inclusion dal traspuart e dai passaçs di fase dal vapôr di aghe.

Par clâr, si pues slargjâ il model ancje cun altris ogjets secundari, metipen i monsons. Al è un pont di fuarce dal model il fat che i ogjets secundaris a son leâts a events meteorologjics estrens, si che duncje un studi su la evoluzion dal numar e de fuarce dai ogjets secundaris al pues vignî bon par scandaiâ i efietis dai cambiamenti climatics sul risi idrometeorologjic.

La lizerece computazionâl dal model lu rint adat a jessi doprât in ensembles di simulazions o in simulazions une vore lungjis.

In chest articul si è volût dâ impuartance ai risultâts fisics dal studi, massime aes temperaduris des cinc celis intai diferents senaris. Dut câs, inte tesi si è cjalât ancje aes proprietâts dai ogjets secundaris intes diferents situazions e ancje a un studi dal model dal pont di viste dal sisteme dinamic, lant a studiâ lis diferents topologjiis dal spazi des fasis cul variâ dai parametris e fasint atenzion particulâr aes beorcjis³. Par ogni aprofondiment si mande ae tesi di lauree.

5. Conclusions. I ogjets secundaris, massime i ciclons tropicâi, a son responsabii dal compuartament no lineâr des temperaduris des celis e a àn une part fundamentâl tal traspuart energjetic.

Si è ideât, calibrât e studiât un model climatic a ogjets, che la Tiere e je rapresentade par mieç di cinc ogjets principâi, lis celis climatichis (la cele ecuatoriâl o di Hadley, lis celis temperadis o di Ferrel, lis celis polârs), che e comunichin tra di lôr midiant il traspuart energjetic dovût

³Che valôrs critics dai parametris che a fasin passâ di une topologjie a chê altre, par inglês *bifurcation*, par talian *biforcazione*.

ai vints prevalents e ai ogjets secundari, ven a stâi i ciclons tropicâi e lis ondis di Rossby. Il model è une vie di mieç tra modei a dimension 0, che a tratin il planet tant che un sisteme termodinamic che al scambie energjie cul spazi esteri, cence une dinamiche interne proprie, e modei a dimension 1, là che si à la dimension de latitudin. Il vantaç dal model a ogjets rispjet ai modei a dimension 0 al è chel di rapresentâ la dinamiche atmosferiche, ancje se cuntune parametrizazion; rispjet ai modei a dimension 1 al è chel di semplificâ il plui pussibil chê dinamiche, zovantsi che lis celis climaticis a son sistemis plui sierâts che no fassis arbitrariis di latitudin.

Un bon risultât dal model al è che, par valôrs realistics des temperaduris iniziâls e dai parametris (Tabele 2), il sisteme al converç, su di un pont fis o su di un atratôr strani dulà che lis orbitis si movin ator di valôrs realistics pes temperaduris.

Un secont risultât positîf a son lis intensitâts verisimilis dai ogjets secundari, ancje rispjet al traspuart dovût ai vints prevalents; nol è dal pâr bon il compuartament dal lôr numar, che al ossile simpri tra 0 e un valôr massim.

La calibradure dal model e met in biele mostre che l'ûs di ogjets che a contribuissin ae redistribuzion de energjie inte atmosfere globâl e amente la efience dal traspuart e e introdûs perturbazions inte evoluzion dal sisteme dinamic. In particolâr la topologjie des soluzions dal model intal spazi des fasis si modifichè passant di un pont fis a un atratôr strani, che al mostre temperaduris di ogni cele une vore dongje a chês de atmosfere de Tiere vuê dî.

Un tierç risultât bon al è apont che par valôrs verisimili dai parametris il sisteme al converç aes justis temperaduris di ecuilibri. Il sôl parametri che al è calibrât a un valôr lontan di chei misurâts al è β , che al rapresente la frazion di radiazion a ondis lungjis stratignude dal sisteme par vie dal efiet sidrere: il valôr stimât su la fonde de osservazion al è $\beta_{oss} = 0.36$, chel che si oten cu la calibradure $\beta_{cal} = 0.46$.

Un cuart risultât positîf al è il compuartament dal sisteme in rispueste al inseriment di un sfuarçant climatic. Un sfuarçant climatic simil a chel dal efiet sidrere al compuarte che la temperature si alce in dutis lis celis, ma plui intes altis latitudins (chest al va dacuardi cui senaris metûts sù de comunitât dai climatolics [IPCC 2018]); un sfuarçant climatic impulsîf, a ûs chel di une eruzion vulcaniche, nol à efiet che a

durin tal timp. Simulant il riscjaldament globâl al ven fûr il pont debil dal model, ven a stâi il compuartament de cele di Hadley, che e mole cetante energjie a chês altris celis che il gradient termic meridionâl al ven invertît plui voltis. Dut cês chest al pues jessi displeât par mieç dal tentatîf de cele di Hadley di slargjâsi a dam di chês dongje.

In conclusion, il model al pâr prometi ben, tant che se si metin a puest i siei limits principâi (traspuart e cambiament di stât dal vapôr di aghe, passâ a une gjeometrie variabile, refinâ i parametris e fâju dipendi de temperature), si pues pensâ di doprâlu par simulâ i cambiamenti climatics in cors, ancje in fuarce de sô lizerece computazionâl che e favorîs l'ûs di ensembles di simulazions; si pues stâ atents a cemût che a variin numar e intensitât dai ogjets secundaris, stant che a son leâts a events meteorologjics estrens.

Ringraciamenti

Si ringracie la inzeegnere Silvia Cipriani pal jutori te grafiche.

Bibliografie

- Giajotti D. (2018). *Lezioni di Fisiche de Atmosfere*. Dipartimento di Fisiche. Università di Trieste. Agns academics 2017–2018 e 2018–2019.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCCa). <https://www.ipcc.ch>
- (IPCCb 2018). Myhre G., Shindell D. Chapter 8: Anthropogenic and natural radiative forcing supplementary material. In IPCC AR5 Report. IPCC.
- Lee M., Frisius T. (2018). On the role of convective available potential energy (CAPE) in tropical cyclone intensification. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 70(1).
- Lutgens F. K., Tarbuck E. J., Tasa D. G. (2007). *The Atmosphere: An Introduction to Meteorology*. 10th edition.
- Python Software Foundation. (c.d.). *Python*. Retrieved from <https://www.python.org>
- Schwartz S. E. (2007). Heat capacity, time constant, and sensitivity of Earth's climate system. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D24).
- Sellers W. D. (1969). A global climatic model based on the energy balance of the Earth-atmosphere system. *Journal of Applied Meteorology*, 8(3), 392–400.
- Tory K. J., Dare R. A. (2015). Sea surface temperature thresholds for tropical cyclone formation. *Journal of Climate*, 28(20), 8171–8183.
- World Meteorological Organization (WMO). (c.d.). *Climate*. Retrieved from <https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate>

World Meteorological Organization (WMO). (c.d.). Tropical Cyclones. Retrieved from <https://public.wmo.int/en/our-mandate/focus-areas/naturalhazards-and-disaster-risk-reduction/tropical-cyclones>

Zhang H., Jing X., Li J. (2014). Application and evaluation of MCICA scheme with new radiation code in BCC AGCM2.0.1. *Geoscientific Model Development*, 7(3), 737–754.