

Valuri de căldură: știință, instrumente și tendințe pe termen lung

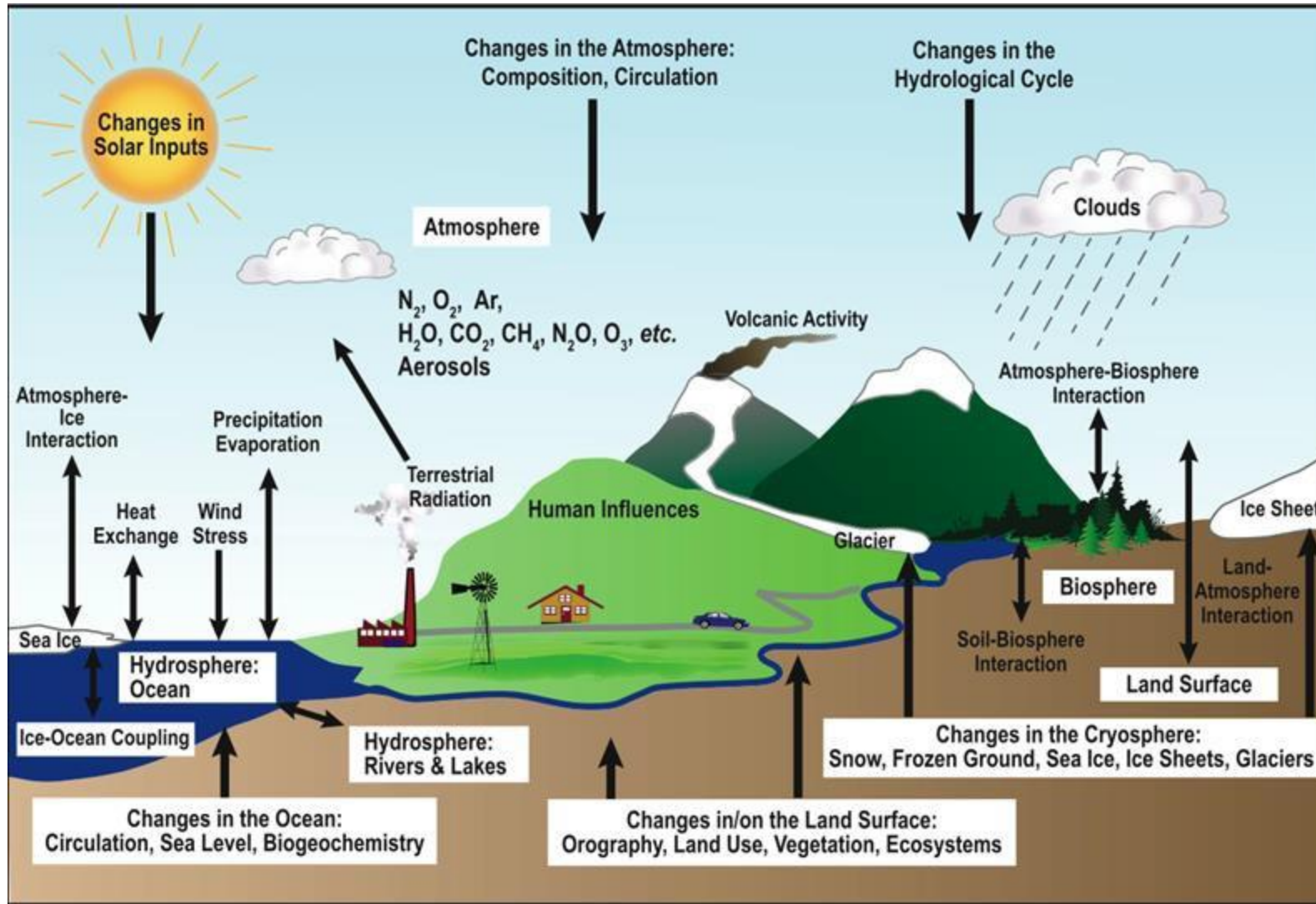
Lorenzo Sangelantoni

□ Introducere în modelarea climatică

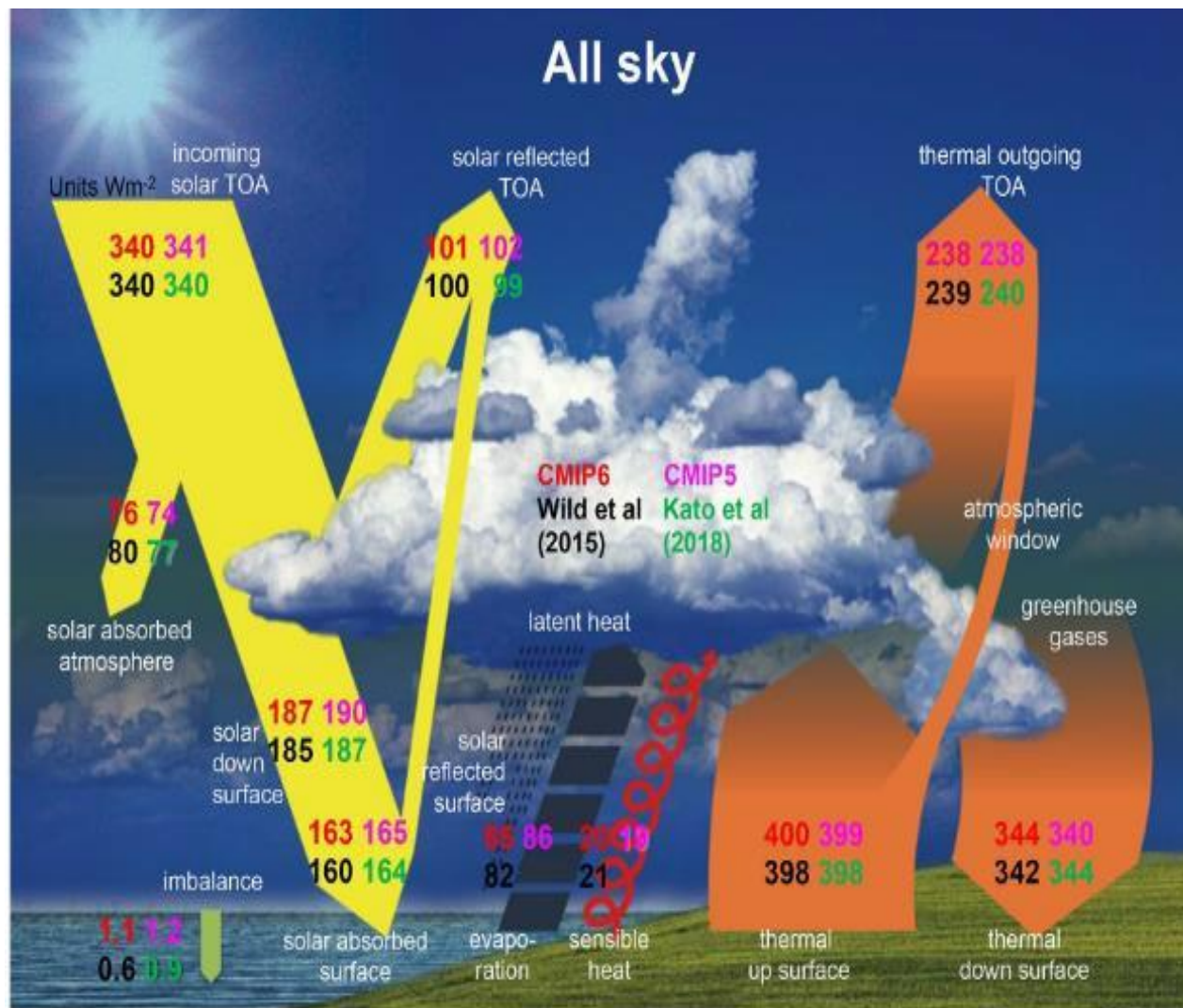
- Sistemul climatic;
- Modele Climatiche Globale (GCM) vs Modele Climatiche Regionale (RCM);
- Scări de timp în modelarea climatică: de la prognoze meteorologice la proiecții;
- Incertitudine: Determinist vs. Probabilistic.

□ Introducere în valurile de căldură (HWs)

- Definiția valurilor de căldură;
- Detectarea valurilor de căldură;
- Mecanismele care determină valurile de căldură. Forțări la scară mare vs. la scară locală.



IPCC AR4



- Sistemul climatic este un sistem forțat, disipativ, neliniar, complex și eterogen, aflat în afara echilibrului termodinamic.
- Sistemul prezintă o **variabilitate naturală** la multe scări, atât în timp cât și în spațiu, și este supus **diverselor forțări externe, naturale** cât și **antropice**.
- În ansamblu, sistemul climatic poate fi văzut ca un **motor termic** capabil să transforme **căldura radiativă în energie mecanică (circulațiile atmosferice și oceanice)**.

Ghil M, Lucarini V (2020) *The Physics of Climate Variability and Climate Change*. Rev Mod Phys 92



SCEWERO

Modelarea sistemului climatic

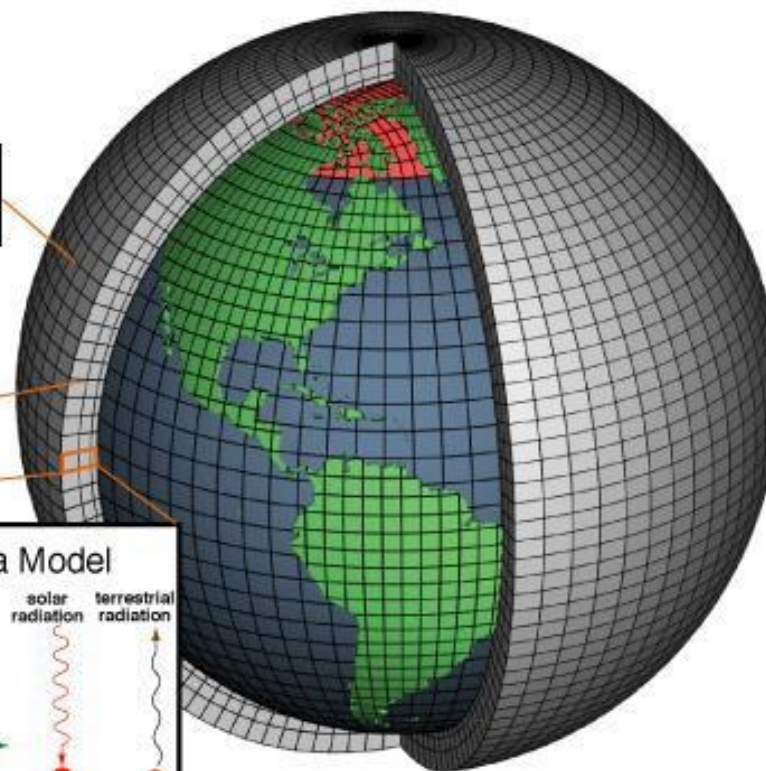
STRENGTHENING THE RESEARCH CAPACITIES FOR EXTREME WEATHER EVENTS IN ROMANIA

Grilă orizontală
(Latitudine-Longitudine)

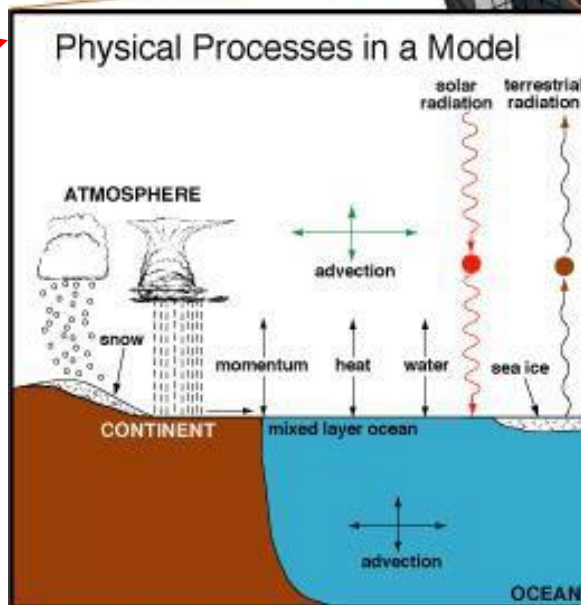
Horizontal Grid
(Latitude-Longitude)

Grilă verticală
(Altitudine sau Presiune)

Vertical Grid
(Height or Pressure)



Procese fizice într-un model



UNIVERSITATEA
BABEȘ-BOLYAI



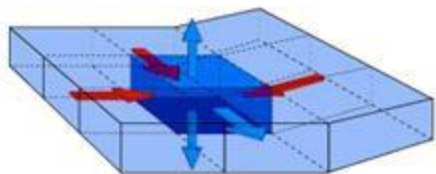
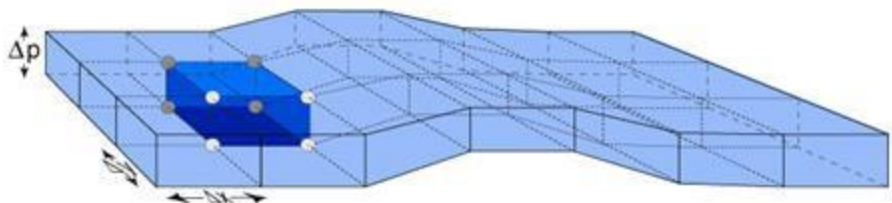
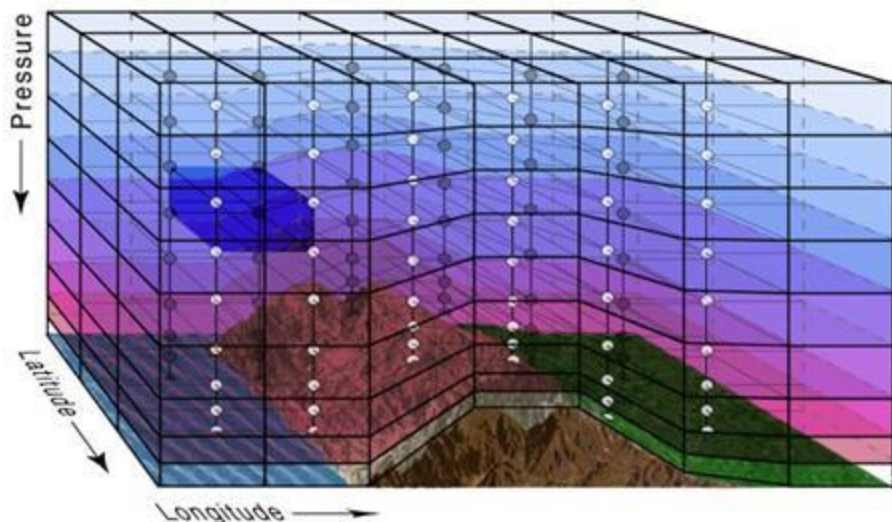
Universiteit
Antwerpen



Funded by
the European Union

Grant Agreement 101159497

Grilă tipică de GCM atmosferic



- **Pentru fiecare celulă de grilă, o singură valoare a fiecărei variabile** (temperatură, vânt etc.).
- Coordonata verticală urmează topografia și este exprimată în presiune. Grila orizontală este în latitudine și longitudine.
- **Ecuatiile diferențiale parțiale ale mișcării sunt înlocuite cu un număr finit de ecuații care implică diferențele dintre valorile din celulele de grilă vecine.**
- **Fiecare celulă de grilă comunică cu vecinele sale în ceea ce privește transportul de masă, energie și umiditate.**
- **Fluxul este proporțional cu diferențele dintre celulele de grilă pentru fiecare variabilă; bugetele acestor fluxuri sunt asociate cu ecuațiile respective.**

Neelin, 2011. *Climate Change and Climate Modeling*, Cambridge UP

Ecuțiile matematice care reprezintă caracteristicile și procesele fizice sunt introduse pentru fiecare celulă (box)

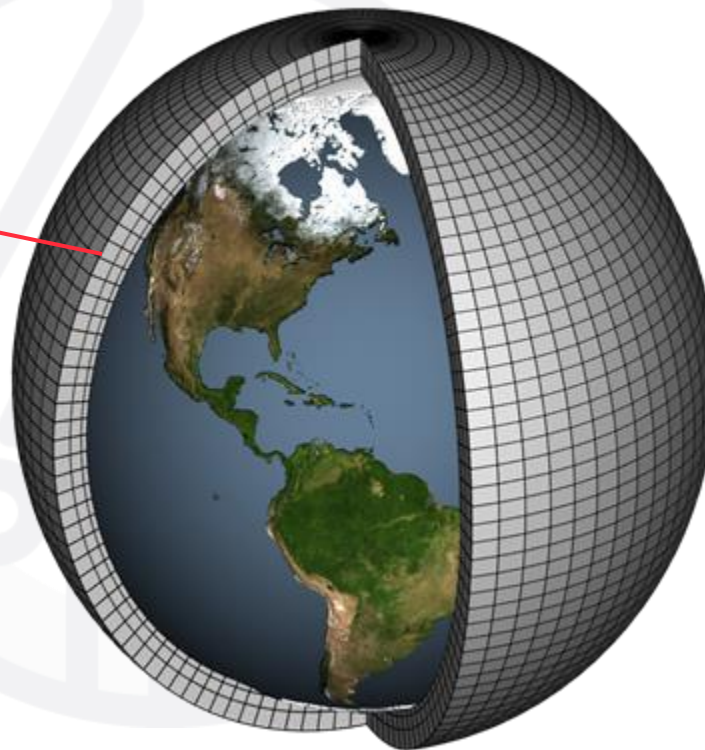
$$\frac{\partial u}{\partial t} = \eta v - \frac{\partial \Phi}{\partial x} - c_p \theta \frac{\partial \pi}{\partial x} - z \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{\partial \left(\frac{u^2 + v^2}{2} \right)}{\partial x}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\eta \frac{u}{v} - \frac{\partial \Phi}{\partial y} - c_p \theta \frac{\partial \pi}{\partial y} - z \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \frac{\partial \left(\frac{u^2 + v^2}{2} \right)}{\partial y}$$

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z}$$

$$\frac{\delta W}{\delta t} = u \frac{\partial W}{\partial x} + v \frac{\partial W}{\partial y} + w \frac{\partial W}{\partial z}$$

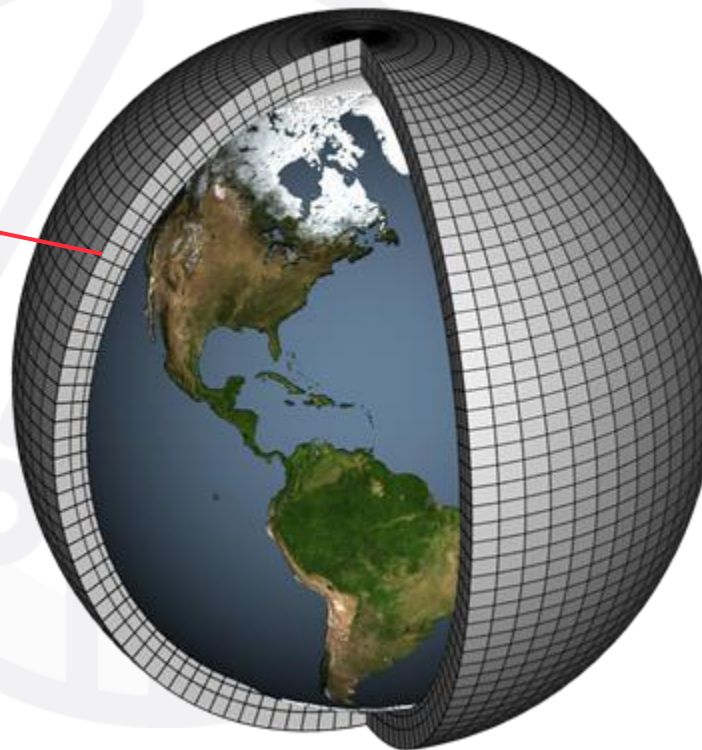
$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial p}{\partial \sigma} = u \frac{\partial}{\partial x} x \frac{\partial p}{\partial \sigma} + v \frac{\partial}{\partial y} y \frac{\partial p}{\partial \sigma} + w \frac{\partial}{\partial z} z \frac{\partial p}{\partial \sigma}$$



Ecuțiile sunt convertite în cod de calculator și variabilele climatice sunt setate

```

if (diagts .and. eots) then
  do 1500 m=1,nt
    do 1490 k=1,km
      fx = cst(j)*dyl(j)*dzt(k)/(c2dtts*dtxcel(k))
      do 1480 i=2,intml
        boxfx      = fx*dxt(i)*fm(i,k,jc)
        sddt       = (ta(i,k,m)-t(i,k,jc,nm,m))*boxfx
        svar       = (ta(i,k,m)**2-t(i,k,jc,nm,m)**2)
                  *boxfx
        n          = 0
        termbt(k,1,m,n) = termbt(k,1,m,n) + sddt
        tvar(k,m,n)    = tvar(k,m,n)    + svar
        n             = nhreg*(mskvr(k)-1) + mskhr(i,j)
        if (n .gt. 0 .and. mskhr(i,j) .gt. 0) then
          termbt(k,1,m,n) = termbt(k,1,m,n) + sddt
          tvar(k,m,n)    = tvar(k,m,n)    + svar
    
```



CASSANDRA

Compute node type: LENOVO SD650 V3
(Direct Water Cooled)

Processor type: Intel Xeon Max 9480 (56
cores) (Sapphire Rapids HBM)

Processor Speed: 1.9 GHz

of processor cores: 20,160

GPU: n.a.

of nodes: 180 (dual processors nodes)

Memory per node: 1024 GB

Interconnection: Infiniband NDR
(400Gbps)

Peak Performance: 1,225 TFlops

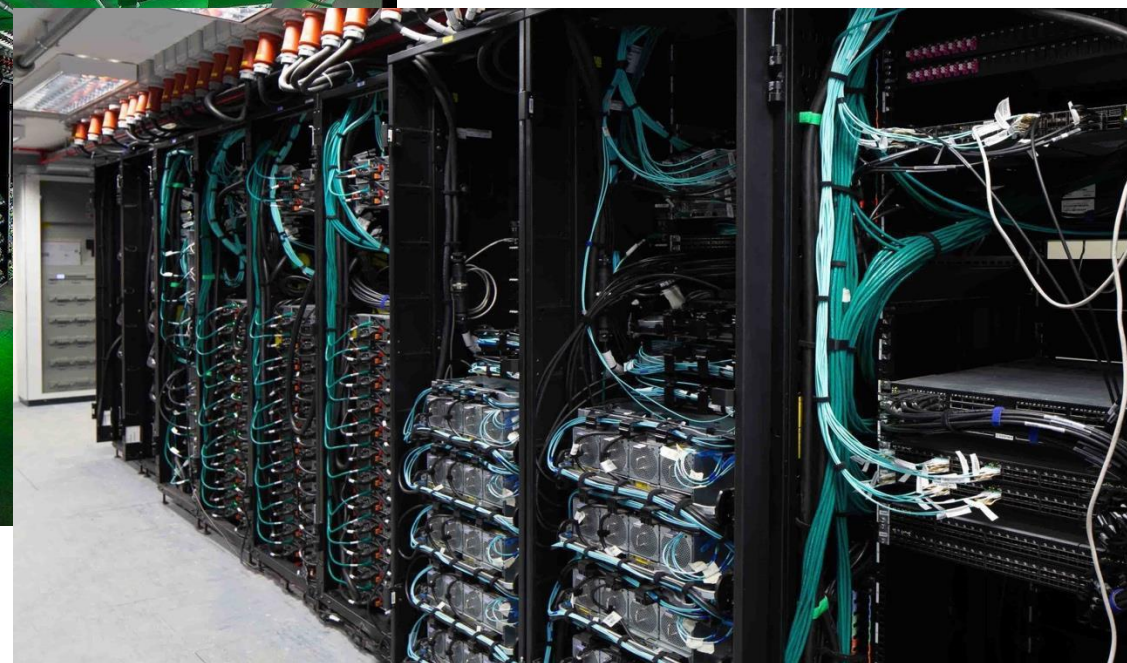
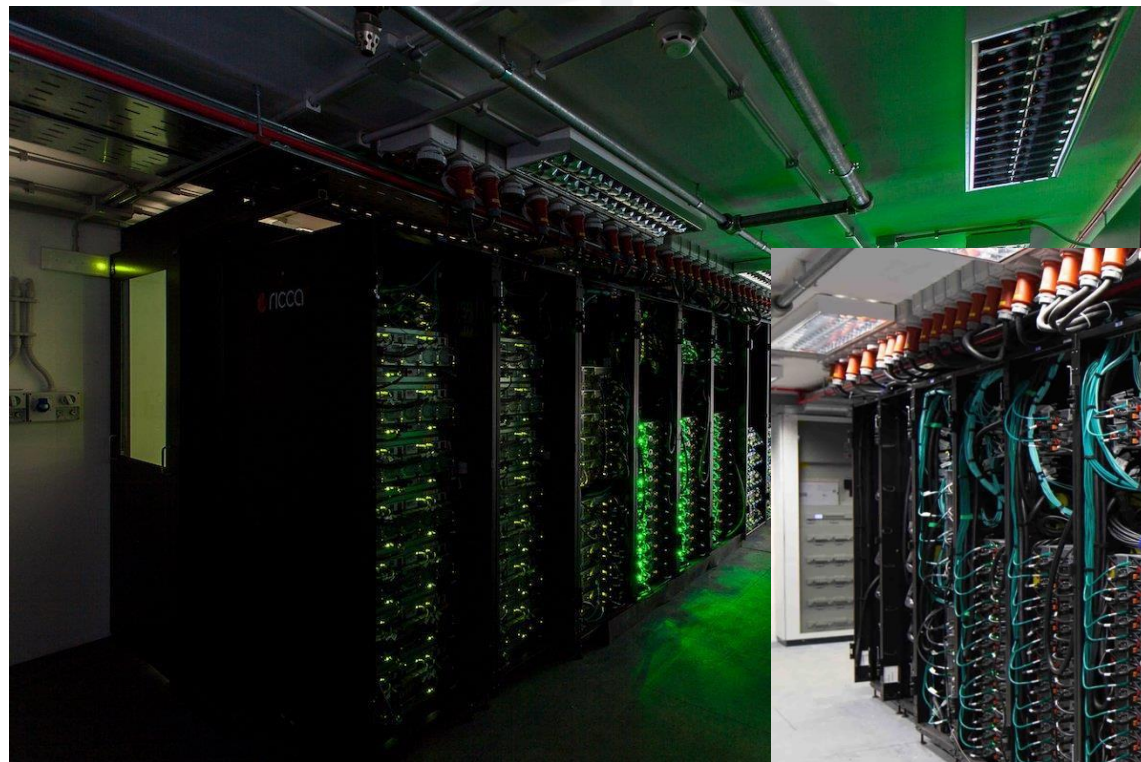
Operating System: Red Hat v.9.0 (Linux
x86_64)

Batch Queuing System: IBM Spectrum
LSF v.10.x (HPC Suite)

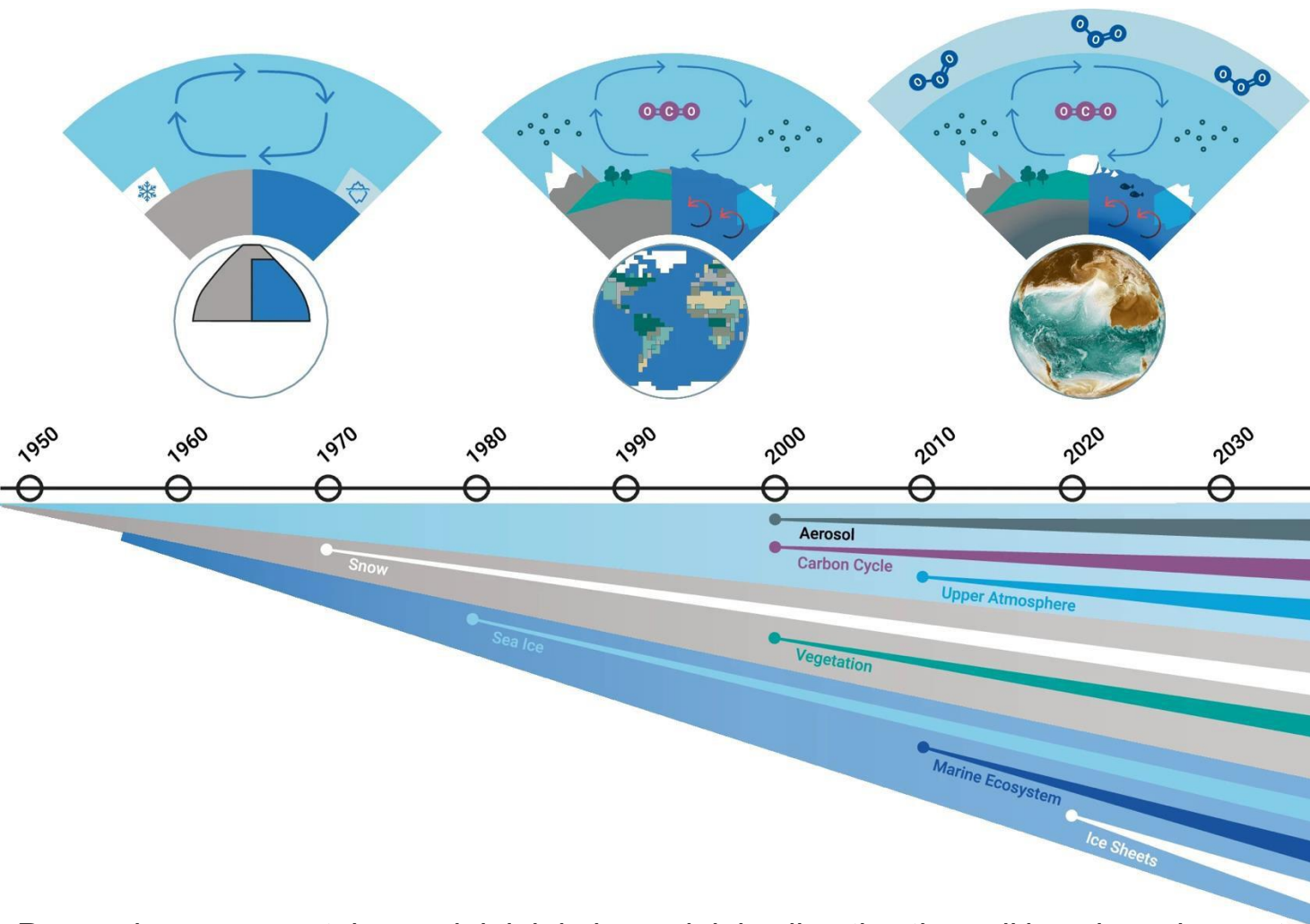
Cluster Parallel File System: IBM
Spectrum Scale v.5.x (GPFS)

File systems:

- /users_home: 100TB
- /work: 13.6 PB of usable capacity



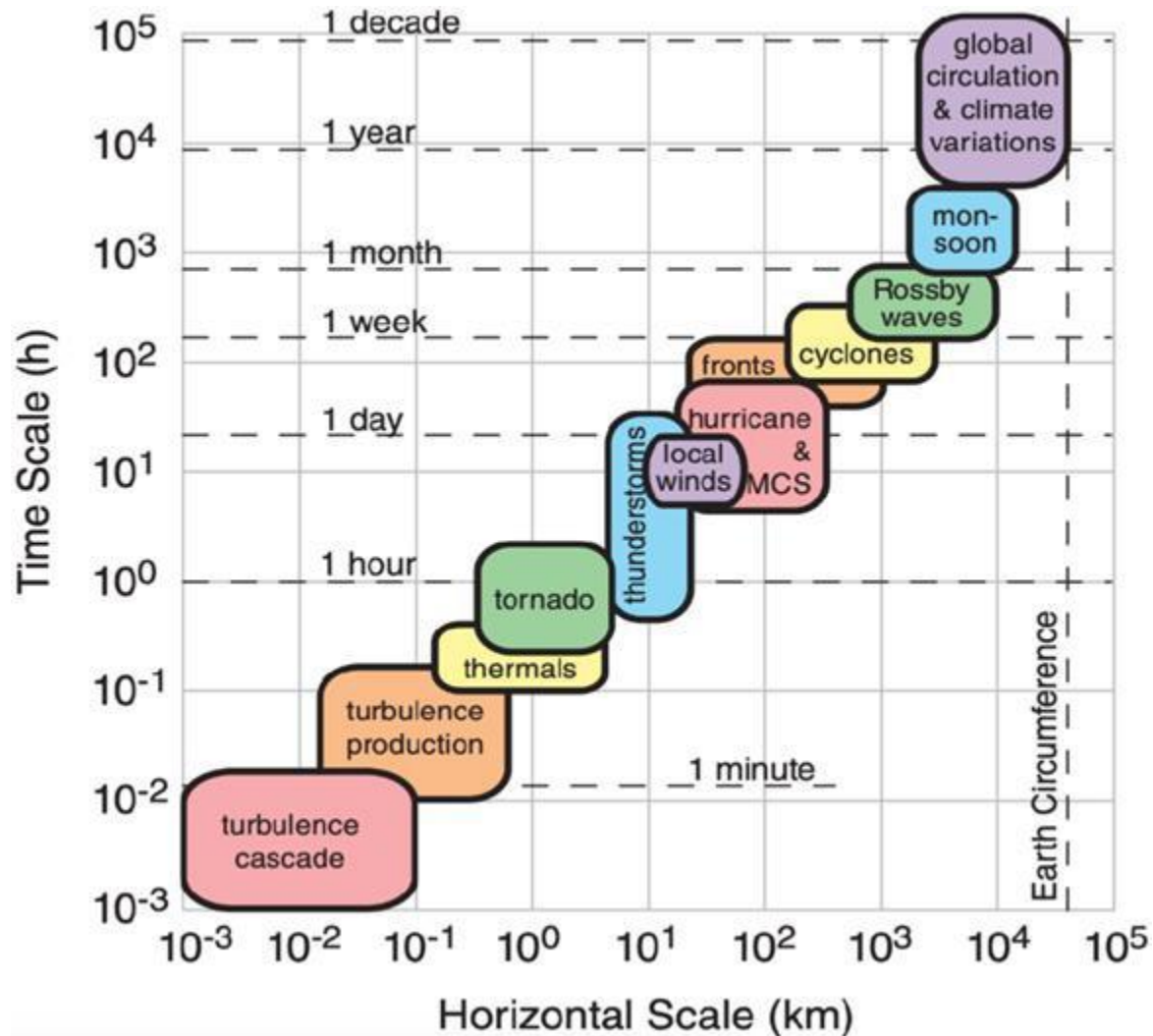
Supercomputerul
ajută la aceste
calcul



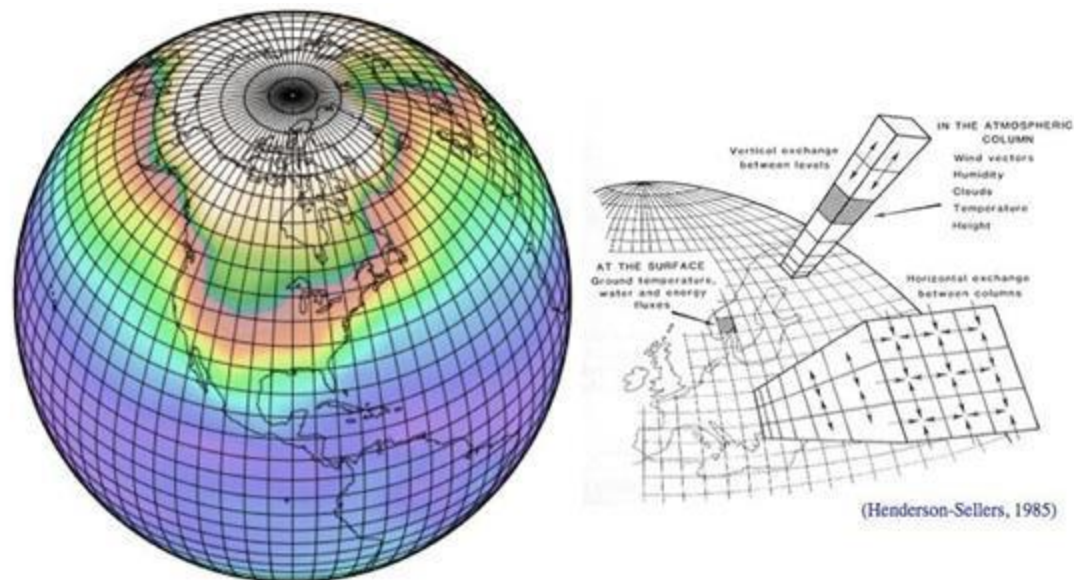
Lista **componentelor** și **proceselor** reproduse în modelele numerice a crescut în timp datorită **îmbunătățirilor tehnologice** (și ale cunoștințelor).

Progresia componentelor modelului de la modelele climatice timpurii la cele mai recente modele ale Sistemului Terestru.
From Bordoni et al., 2025

Scări de timp în modelarea climatică



Stergiou 2023



- **GCM-urile** includ componente **atmosferice, oceanice și de gheață marină**
- Acestea sunt cuplate, **astfel încât pot schimba energie, impuls și umiditate**. Versiunile recente conțin, de asemenea, componente de model pentru **vegetația dinamică și ciclul carbonului terestru și oceanic**. Aceste modele mai cuprinzătoare sunt cunoscute sub numele de **Modele ale Sistemului Terestru (ESMs)**.
- Stările simulate sunt date pe grile spațiale tridimensionale și la pași de timp discreți, iar ecuațiile modelului descriu modul în care sistemul evoluează în timp..
- Rezoluția grilei orizontale pentru componenta atmosferică a GCM-urilor utilizate în aplicații climatice este, de obicei, de ordinul a 200–25 km, numărul nivelurilor verticale între 30 și 100, începând de la suprafață și incluzând troposfera și, în diferite grade, stratosfera.

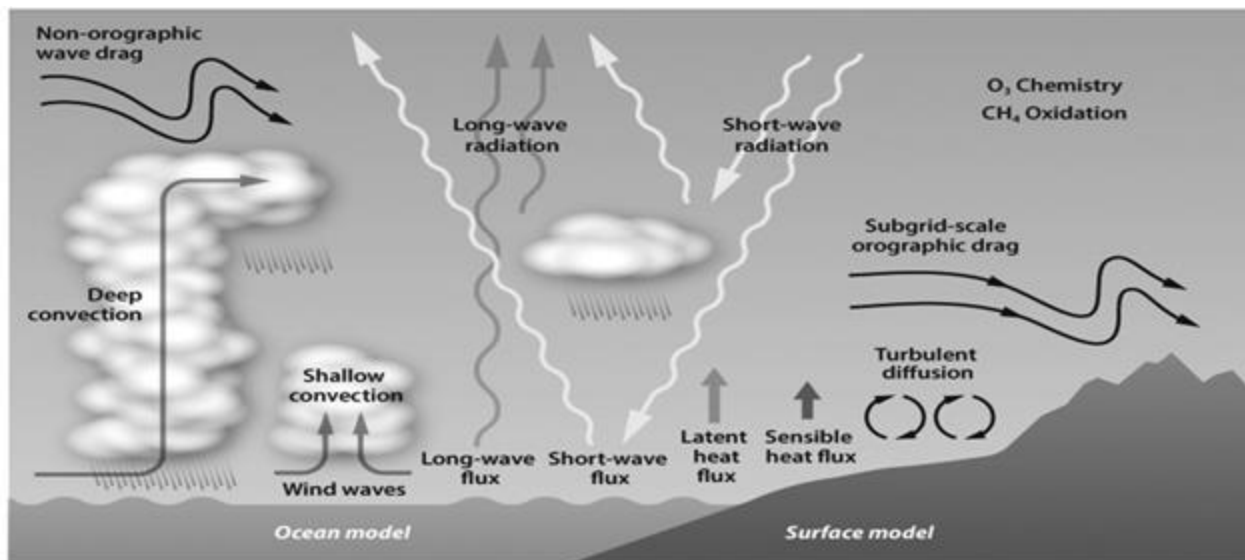
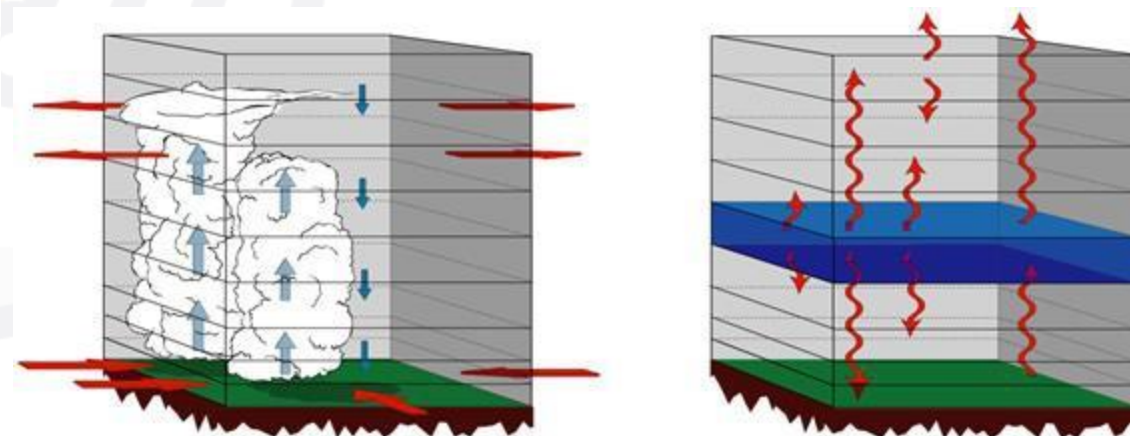


Figure 8.4 Parameterised processes in atmospheric general circulation models. Figure provided by ECMWF <https://www.ecmwf.int/en/research/modelling-and-prediction/atmospheric-physics>. Copyright given through Creative Commons license version 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode>).

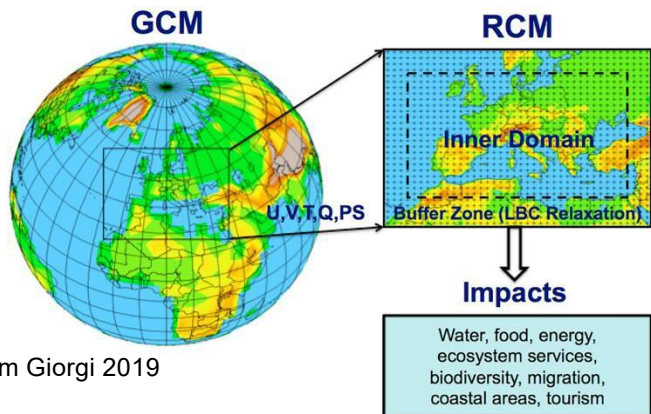
Cambridge University Press 978-1-107-06605-2 — Statistical Downscaling and Bias Correction for Climate Research D. Maraun , M. Widmann 2019

Există multe procese în atmosfera și oceanul real care apar la scări spațiale și temporale mai mici decât rezoluția modelului. În atmosferă, acestea includ radiația absorbită, împrăștiată și emisă de molecule, aerosoli și picături de nori, microfizica norilor, convecția, procesele din stratul limită, frecarea cauzată de orografie, interacțiunea atmosferă-ocean etc.



Neelin, 2011. *Climate Change and Climate Modeling*, Cambridge UP

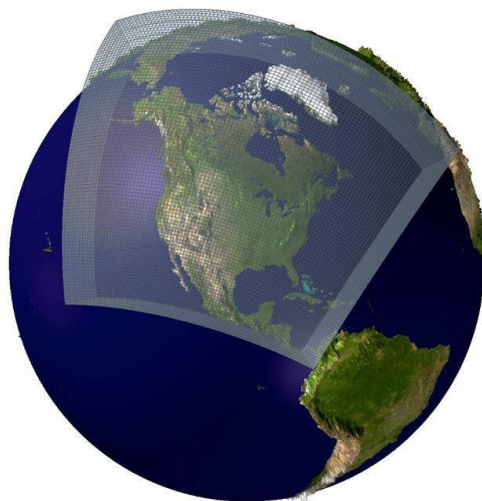
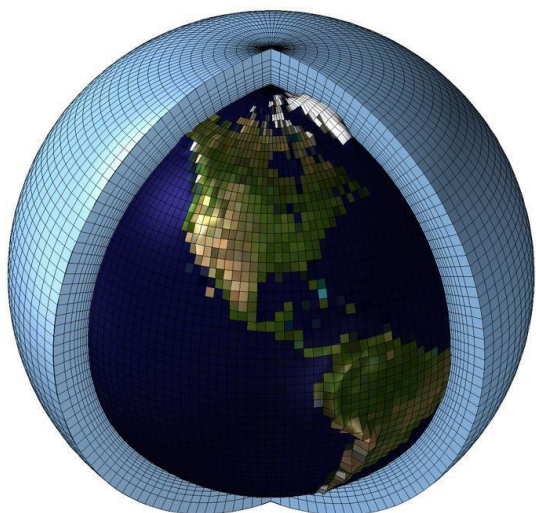
Modelele climatice regionale sunt concepute pentru a rezolva discrepanța de scară între scenariile de schimbare climatică necesare pentru evaluarea impactului sau pentru reprezentarea fenomenelor foarte localizate.



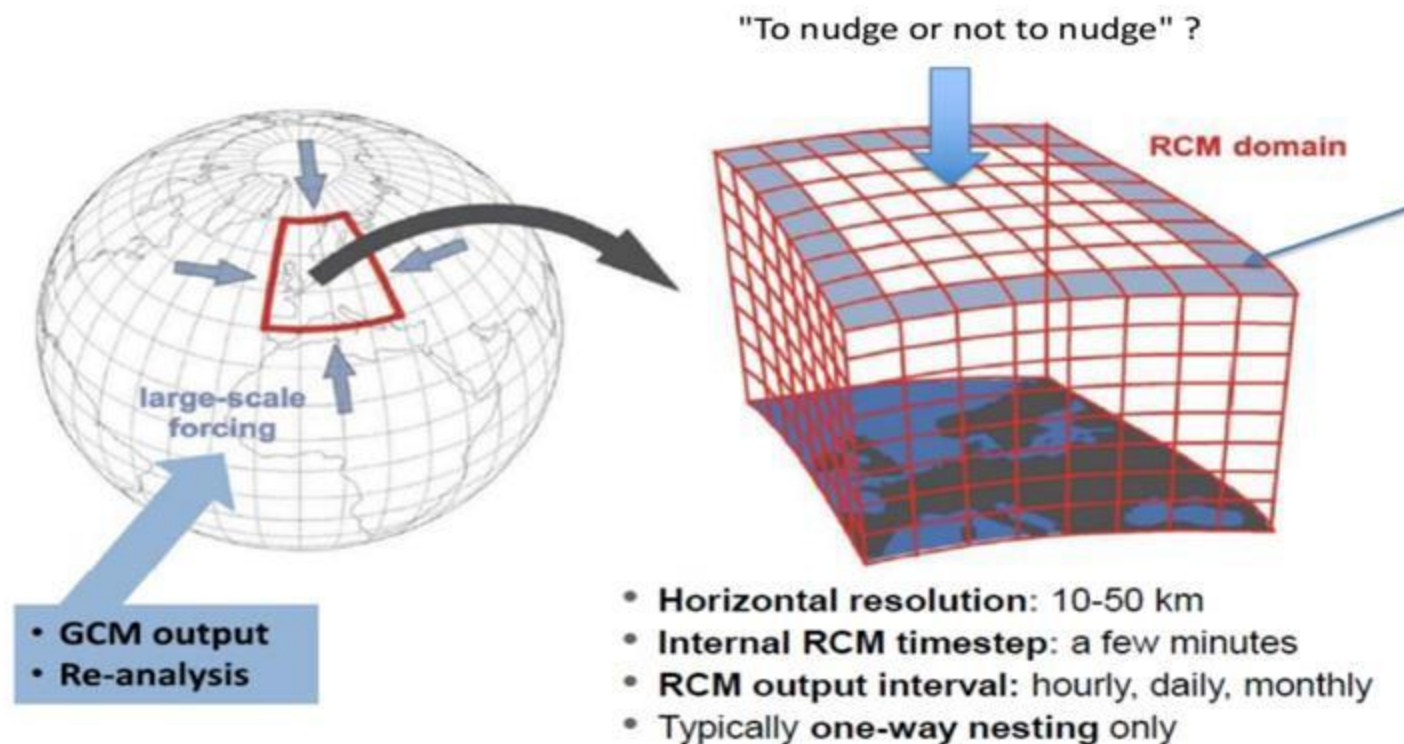
From Giorgi 2019



- RCM-urile sunt utilizate pentru reducerea dinamică a scării (dynamical downscaling) pe un **domeniu limitat**.
- **Ele sunt forțate la limitele laterale ale domeniului** și, de obicei, la suprafața mării prin valori provenite din GCM-uri.
- Cuplarea RCM-ului în GCM-ul de bază este, de obicei, **unidirecțională**.
- Pentru a reduce diferența de rezoluție între modelele de bază și cele cuibărite, se pot aplica și mai multe **cuiburi succesive**.
- **Pentru a evita instabilitățile numerice**, se creează o **zonă tampon (sponge zone)** de obicei de 10 celule de grilă la marginea domeniului RCM.
- **Aici, condițiile la limită ale GCM sunt amestecate treptat cu cele ale RCM-ului**



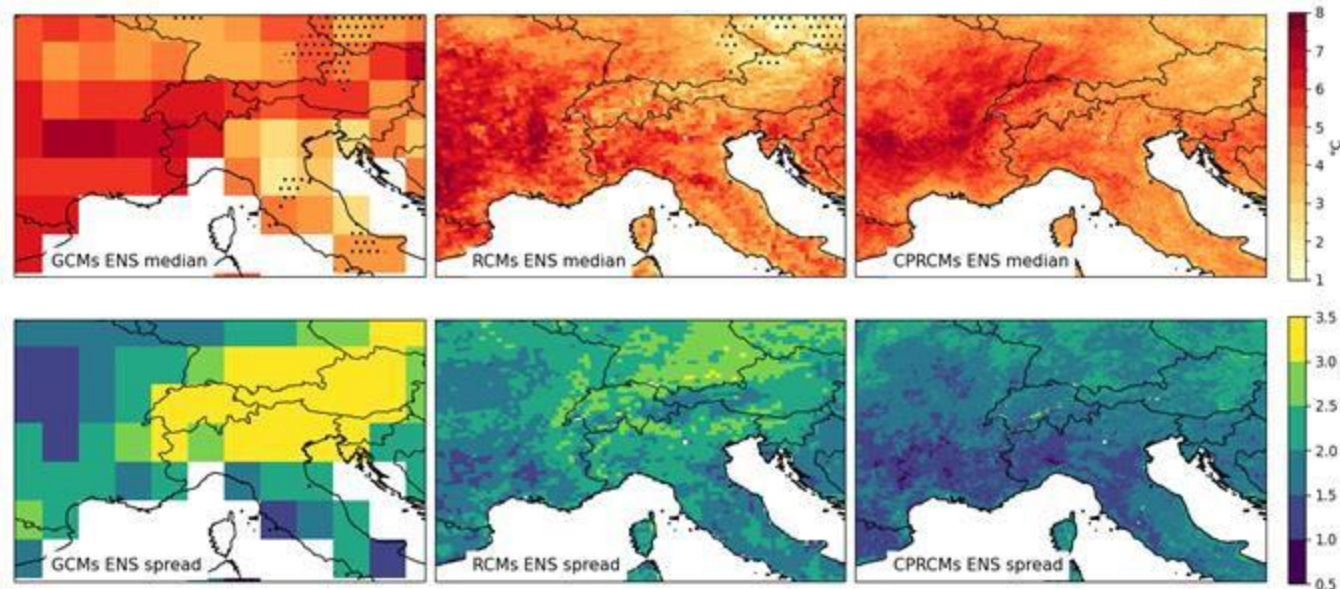
Reducerea dinamică a scării (Dynamical downscaling)



- ◆ Utilizează un **Model Climatic Regional (RCM)**
- ◆ Bazat pe procese fizice: rezolvă ecuațiile atmosferice
- ◆ Costisitor din punct de vedere computațional
- ◆ Reproduce **feedback-uri locale**, extreme, efecte ale reliefului
- ◆ Exemplu: simulările CORDEX

From J. H. Christensen 2018

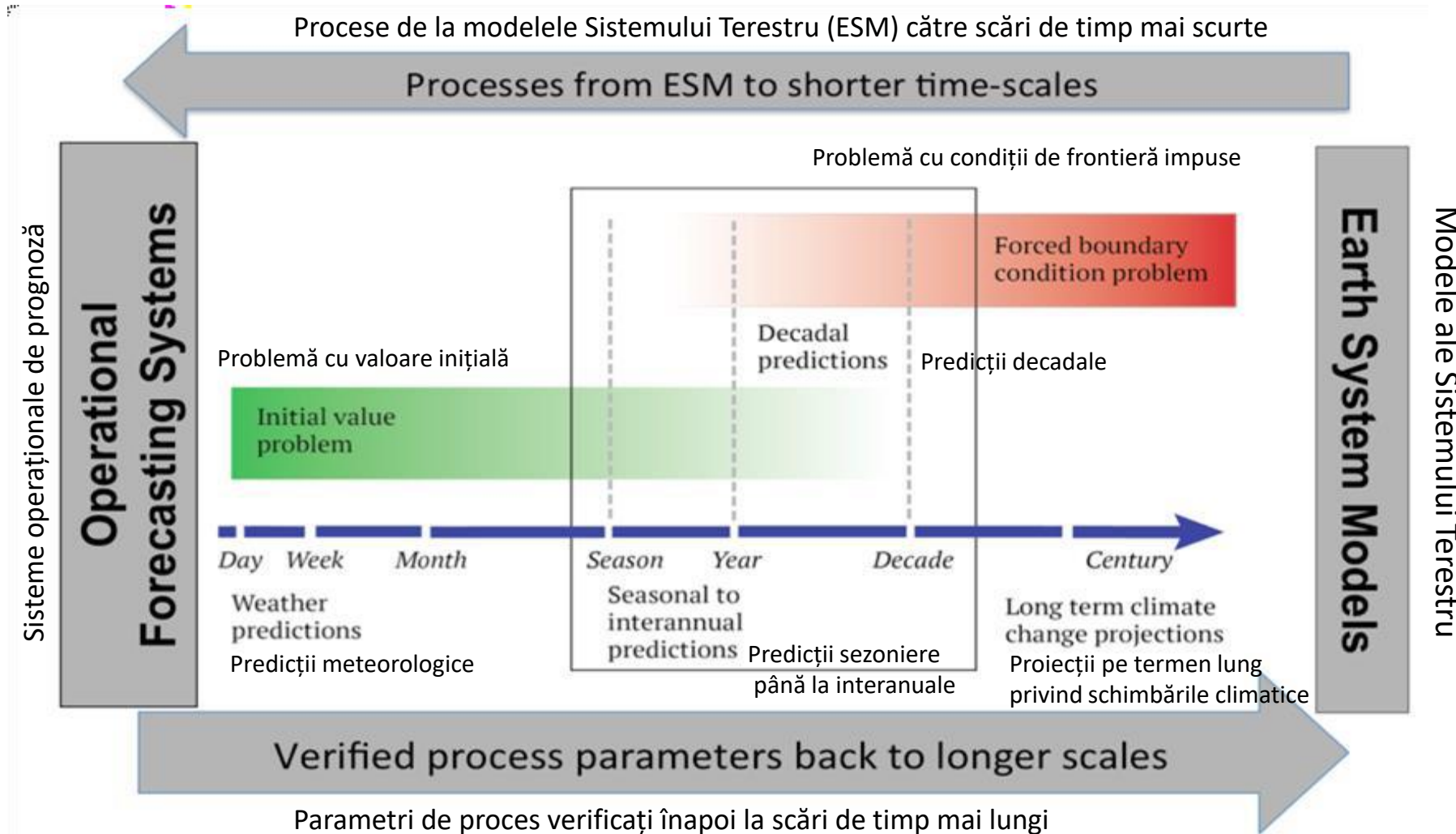
- La granițe, RCM-ul este (mai mult sau mai puțin) consistent cu GCM-ul care îl alimentează. În interiorul domeniului, RCM-ul simulează vremea în concordanță cu propria sa topografie, nucleul său dinamic, rezoluția și parametrizările sale și își dezvoltă propria variabilitate internă.
- Aceasta implică faptul că stările atmosferice la scară largă din interiorul domeniului modelului pot fi diferite de stările GCM-ului peste același domeniu. **În funcție de context, această „independență” poate fi dezirabilă sau indezirabilă.**
- Semnalul schimbării tmax al numărului mediu de zile cu val de căldură 2090:2099 – 1996-2005



Schimbările viitoare ale temperaturii valurilor de căldură de la rezoluție de 100 km la 3 km.

Incertitudinea asociată schimbărilor viitoare la diferite rezoluții.

From Sangelantoni et al., 2025



A. Alessandri, F. Catalano, M. De Felice, B. Van Den Hurk, F. Doblas Reyes, S. Boussetta, G. Balsamo, and P. Miller, 2017: Multi-scale enhancement of climate prediction over land by increasing the model sensitivity to vegetation variability in EC -Earth, Clim. Dyn, 49(4), 1215-1237. doi:10.1007/s00382-016-3372-4

<https://www.isac.cnr.it/en/temi-di-ricerca/Climate-modelling>



- Există numeroase surse de incertitudine.
- Ansamblele surprind această incertitudine prin rularea mai multor simulări.
- Metodele de generare a ansamblelor constau în perturbarea:
 - condițiilor inițiale,
 - fizicii modelului,
 - forțărilor externe,
 - luând în considerare mai multe modele.

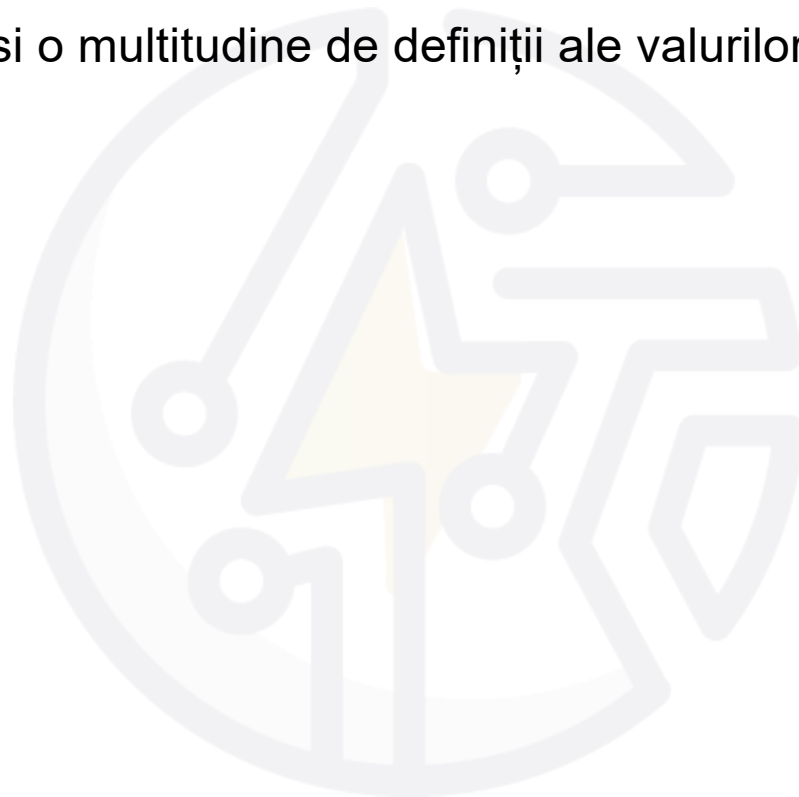
Soret et al., [2025](#)

Valurile de căldură



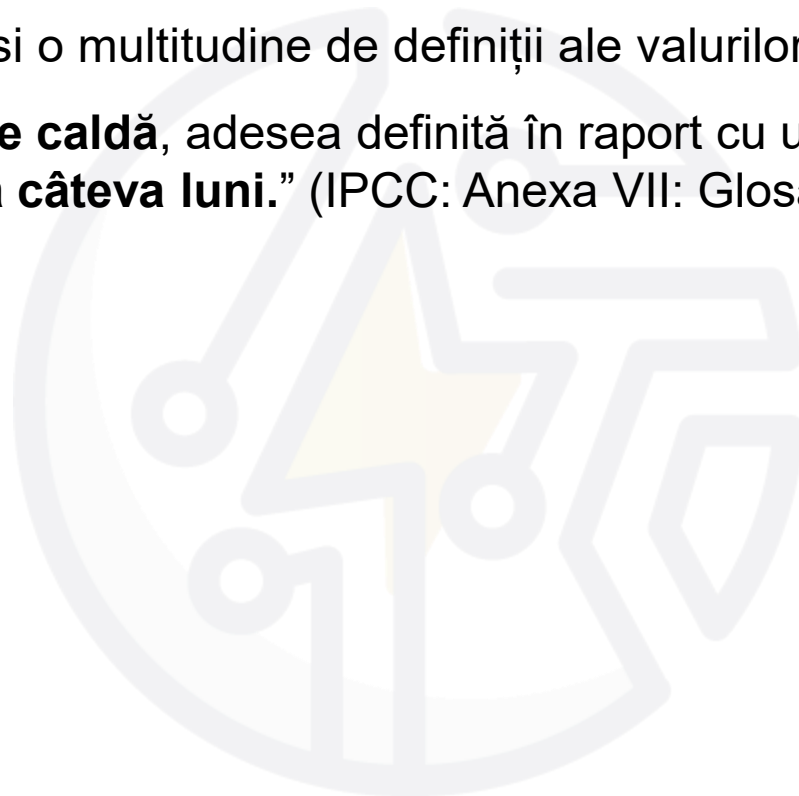
Definițiile valurilor de căldură (HW definition(s))

- ❑ În literatura științifică se poate găsi o multitudine de definiții ale valurilor de căldură.



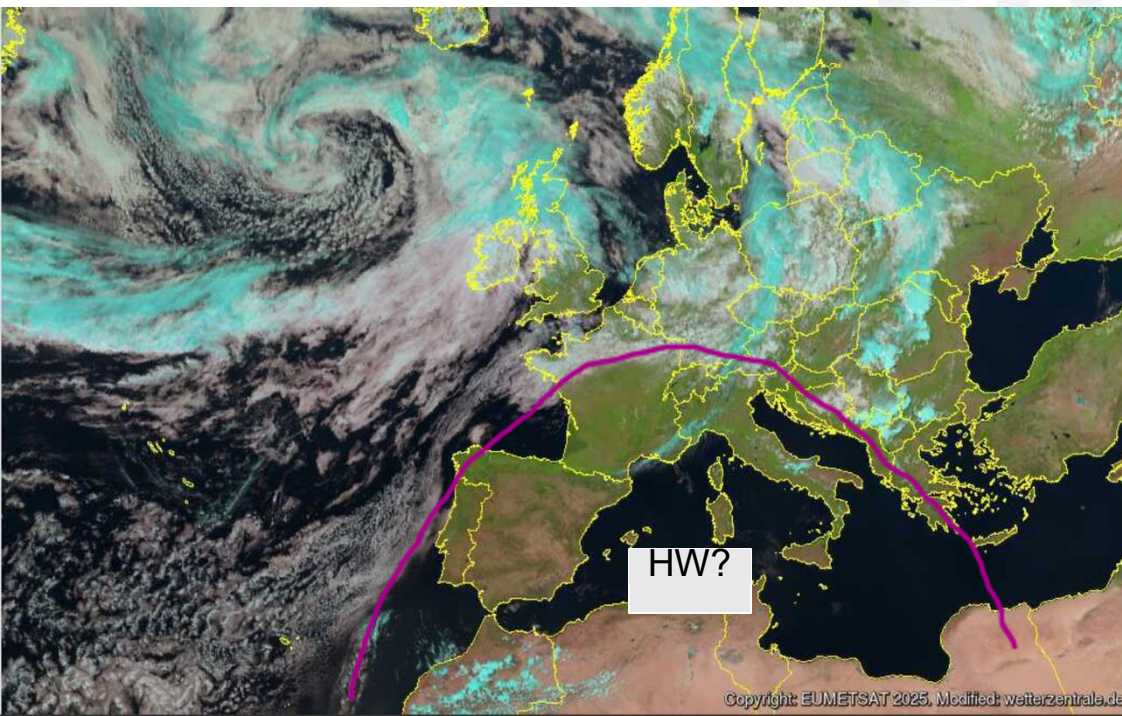
Definițiile valurilor de căldură (HW definition(s))

- ❑ În literatura științifică se poate găsi o multitudine de definiții ale valurilor de căldură.
- ❑ „O perioadă de **vreme anormal de caldă**, adesea definită în raport cu un prag relativ de temperatură, **care durează de la 2 zile până la câteva luni.**” (IPCC: Anexa VII: Glosar, 2021).



Definițiile valurilor de căldură (HW definition(s))

- ❑ În literatura științifică se poate găsi o multitudine de definiții ale valurilor de căldură.
- ❑ „O perioadă de **vreme anormal de caldă**, adesea definită în raport cu un prag relativ de temperatură, **care durează de la 2 zile până la câteva luni.**” (IPCC: Anexa VII: Glosar, 2021).



Ce ne împiedică să cădem de acord asupra a ceea ce este de fapt un val de căldură?

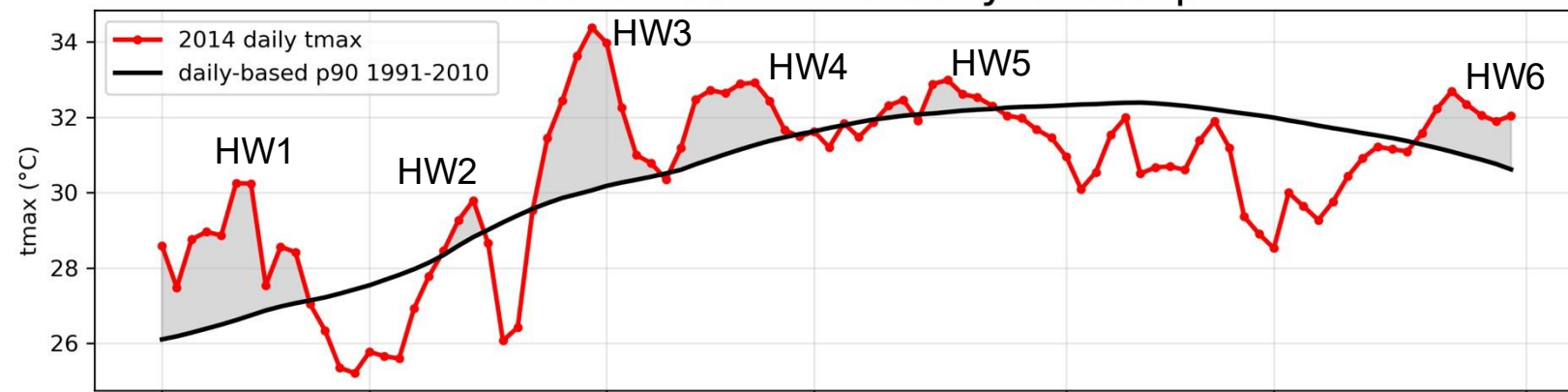
„Gradele de libertate” ale definiției HW

- **Variabile.** tmean | tmin | tmax?
- **Statistici:** p90 | p95 | p99? PDF construit pe întregul an sau doar pe zilele JJA?
- **Perioada de referință:** (de exemplu, 1961–1990 | 1991–2020)?
- **Persistență:** 2 | 3 | 5 | 7 zile consecutive?

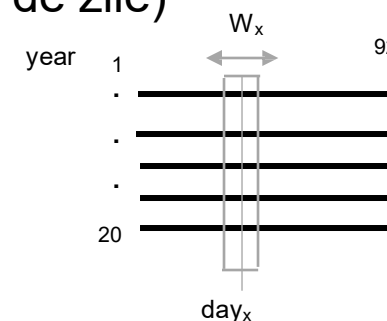
Aceasta face ca rezultatele să depindă foarte mult de studiul de caz...

Detectarea valurilor de căldură, în practică

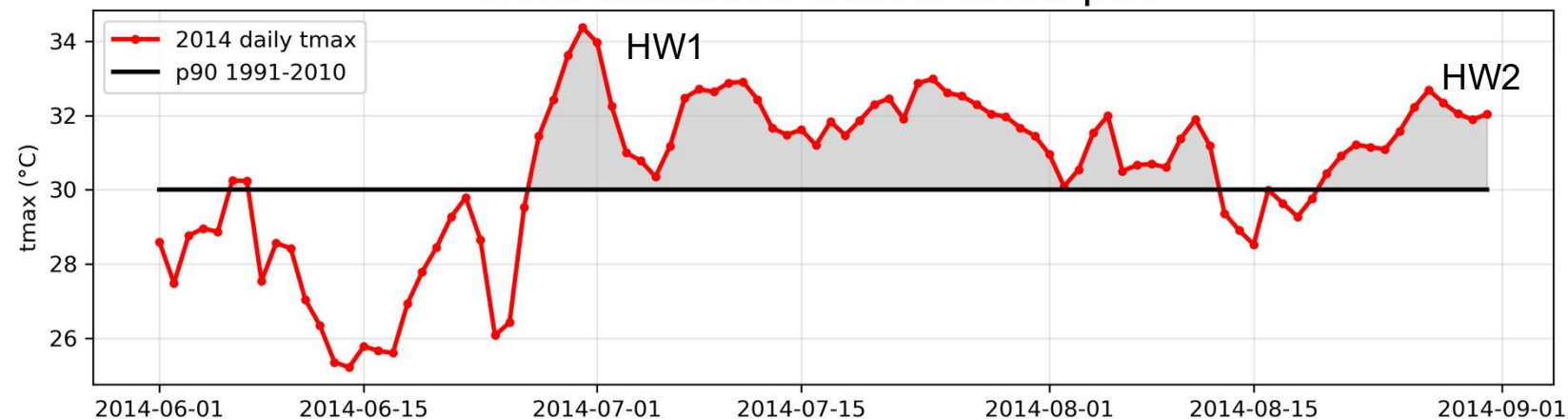
HWs detected with a daily-based p90



- Prag zilnic bazat pe p90 (fereaștră de 31 de zile)



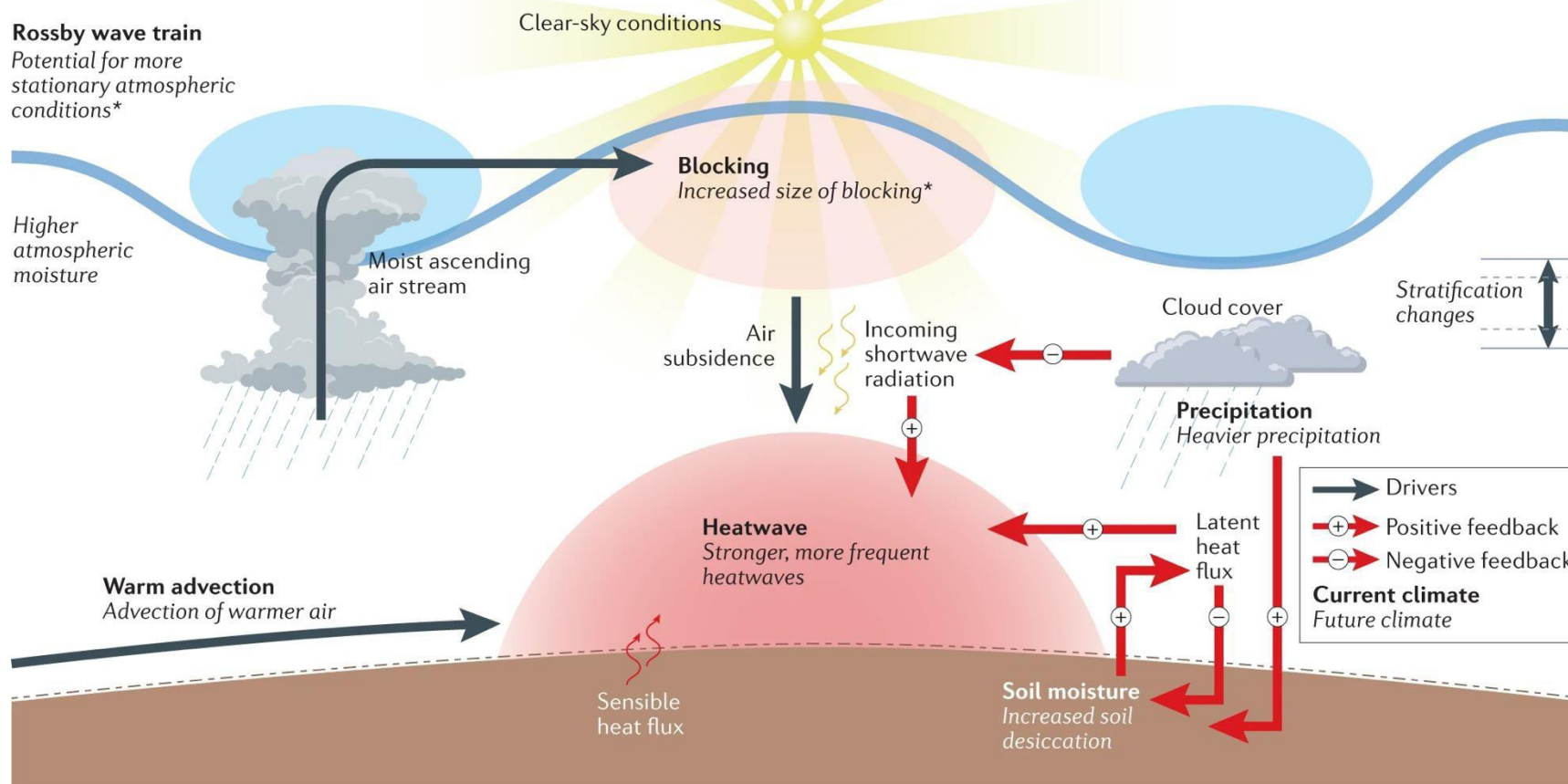
HWs detected with a fixed p90



- Prag fix p90 tmax.

Factorii fizici care determină valurile de căldură

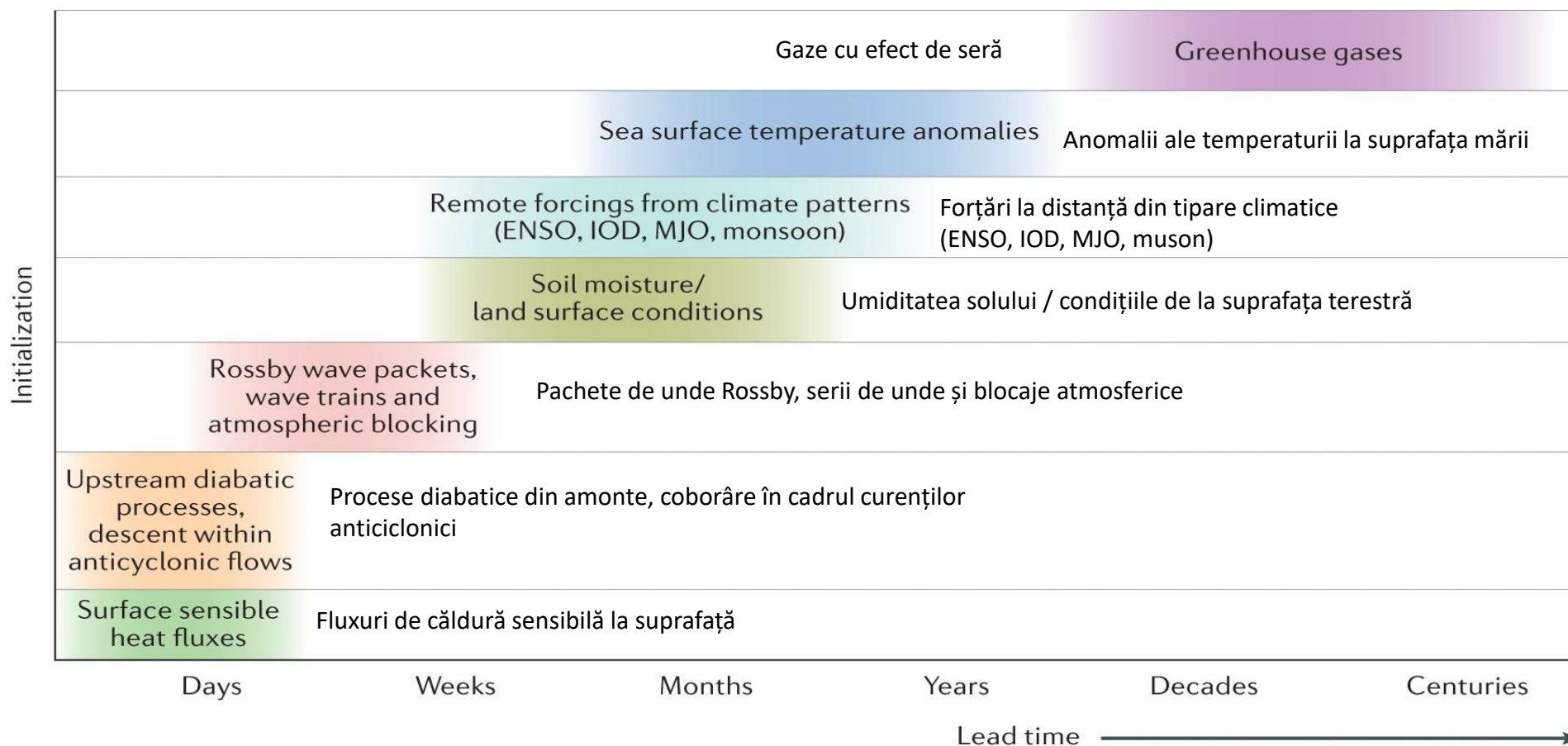
Factorii fizici ai valurilor de căldură



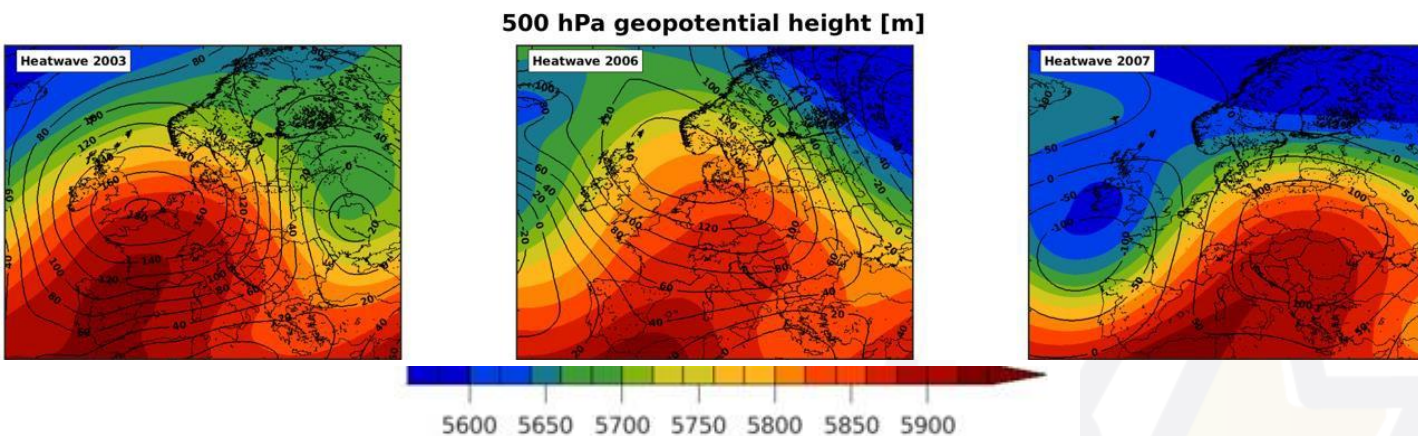
Domeisen et al., 2023

- Primul ingredient al unui val de căldură este apariția unor configurații specifice la scară mare, dominate de unde Rossby, care determină creste troposferice superioare de amplitudine mare.
- Creasta și blocajul la nivel superior favorizează valurile de căldură la suprafață prin: (i) cer senin și radiație ridicată, (ii) subsidență, compresia și încălzirea ulterioară a maselor de aer din nivelele superioare, (iii) advecția maselor de aer mai calde din punct de vedere climatologic din sud, și (iv) joacă un rol termodinamic prin încălzirea diabolică determinată de creșterea progresivă a fluxului de căldură sensibilă datorită uscării progresive a solului și reducerea ulterioară a căldurii latente.

Factorii fizici ai valurilor de căldură



Factorii fizici ai HWs. Forțare la scară mare

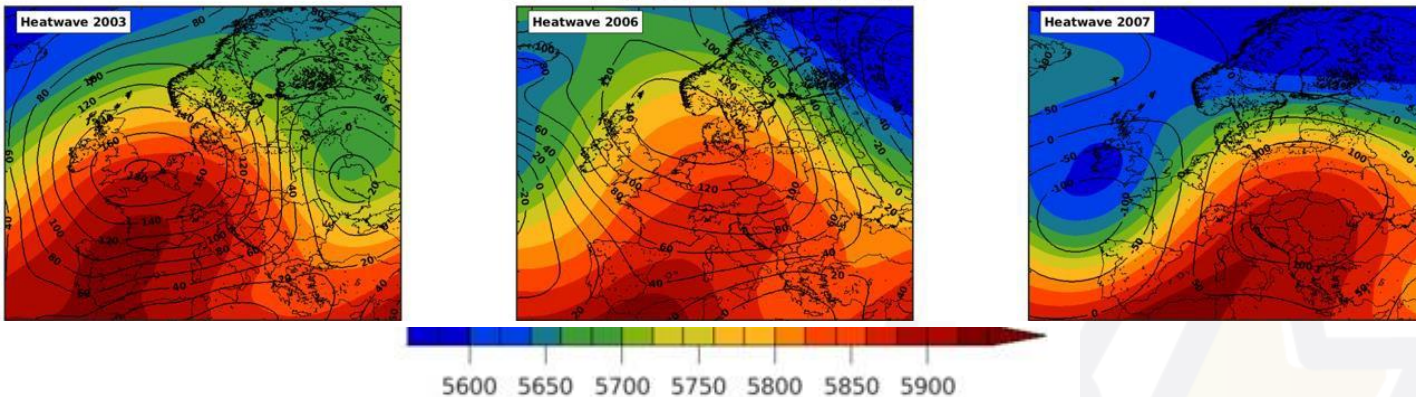


From Sangelantoni et al., 2023

- Un factor imperativ al valurilor de căldură este circulația atmosferică, care la rândul său poate modula gradul de influență al altor factori.

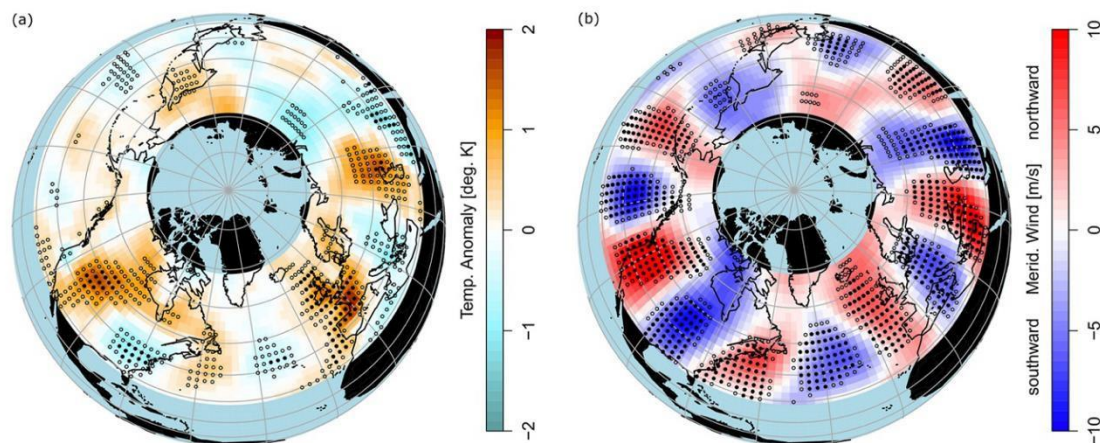
Factorii fizici ai HWs. Forțare la scară mare

500 hPa geopotential height [m]



- Un factor imperativ al valurilor de căldură este circulația atmosferică, care la rândul său poate modula gradul de influență al altor factori.

From Sangelantoni et al., 2023



- În regiunile de latitudini medii, valurile de căldură apar, în general, ca **o manifestare regională a unui tipar de unde Rossby cvasi-staționare.**
- Pachetele de unde Rossby emisferice cu amplitudine maximă locală și extindere zonală limitată sunt restrânse meridional prin efectul de ghid de undă al jetului

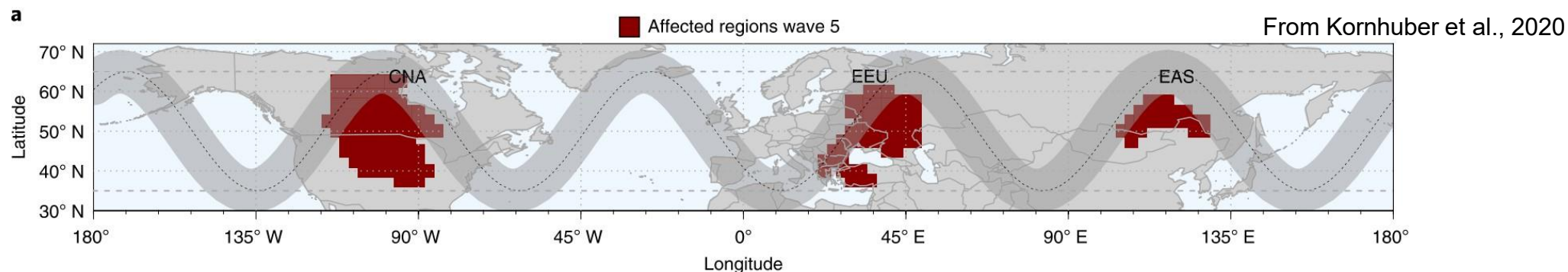
Compozite ale săptămânilor din iunie-iulie-august caracterizate prin evenimente cu număr de undă 7. Anomalia temperaturii la suprafață (a) și viteza corespunzătoare a vântului meridional la 300 hPa (1979–2018).

From Kornhuber et al., 2019

Factorii fizici ai HWs. Forțare la scară mare

- Ghidajele de undă din timpul verii pot ocoli întregul emisfer, stabilind teleconexiuni circumglobale (CGT, Branstator 2002). CGT-urile pot **persista** în timp, **sincronizând** extremele meteorologice în toată emisfera.

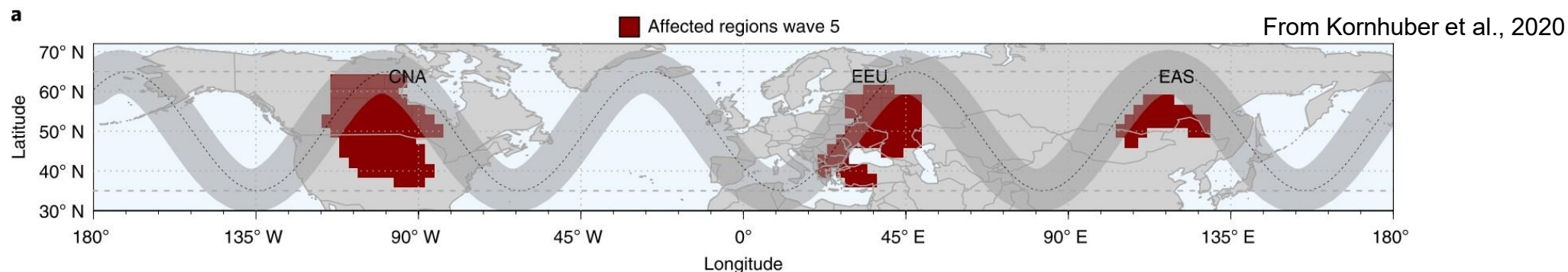
Coincidența valurilor de căldură în regiuni teleconectate prin unda 5



Factorii fizici ai HWs. Forțare la scară mare

- Ghidajele de undă din timpul verii pot ocoli întregul emisfer, stabilind teleconexiuni circumglobale (CGT, Branstator 2002). CGT-urile pot **persista** în timp, **sincronizând** extremele meteorologice în tot emisferul.

Coincidența valurilor de căldură în regiuni teleconectate prin unda 5

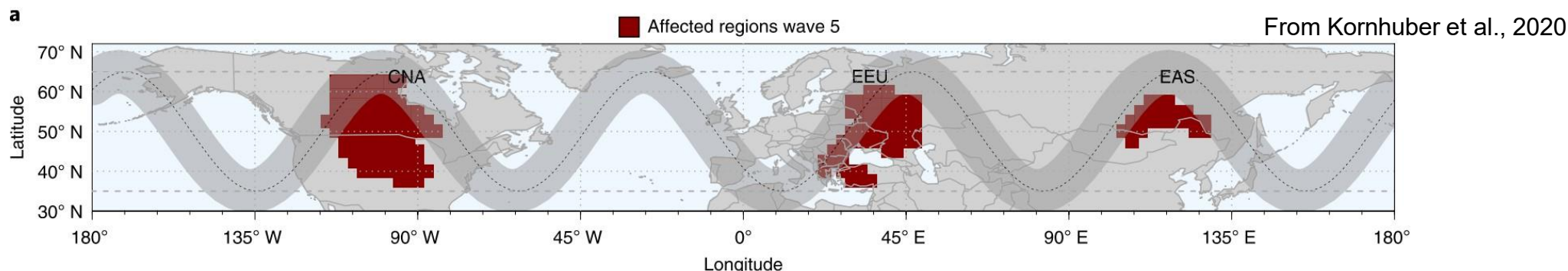


De ce CGT-urile ajung la o amplificare prin blocare de fază (phase locking)?

Factorii fizici ai HWs. Forțare la scară mare

- Ghidajele de undă din timpul verii pot ocoli întregul emisfer, stabilind teleconexiuni circumglobale (CGT, Branstator 2002). CGT-urile pot **persista** în timp, **sincronizând** extremele meteorologice în tot emisferul.

Coincidența valurilor de căldură în regiuni teleconectate prin unda 5



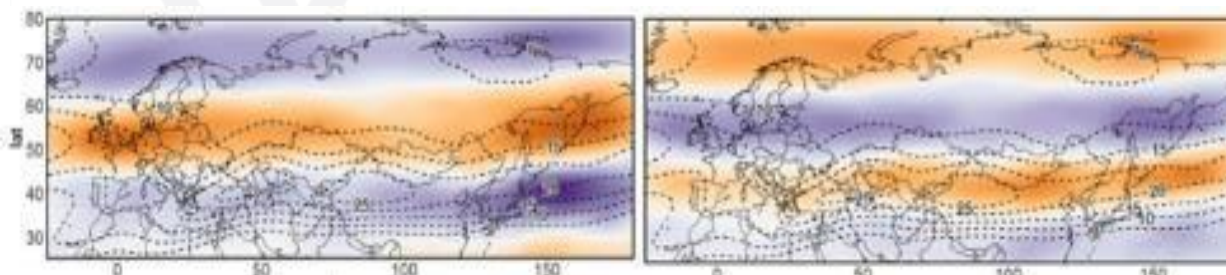
De ce CGT-urile ajung la o amplificare prin blocare de fază (phase locking)?

Două mecanisme principale:

- Slăbirea jeturilor zonale medii.
- Configurația dublu-jet (captarea undelor Rossby sinoptice libere cu $k \approx 6-8$ în interiorul ghidurilor de undă de latitudine medie).

Single jet

Double jet

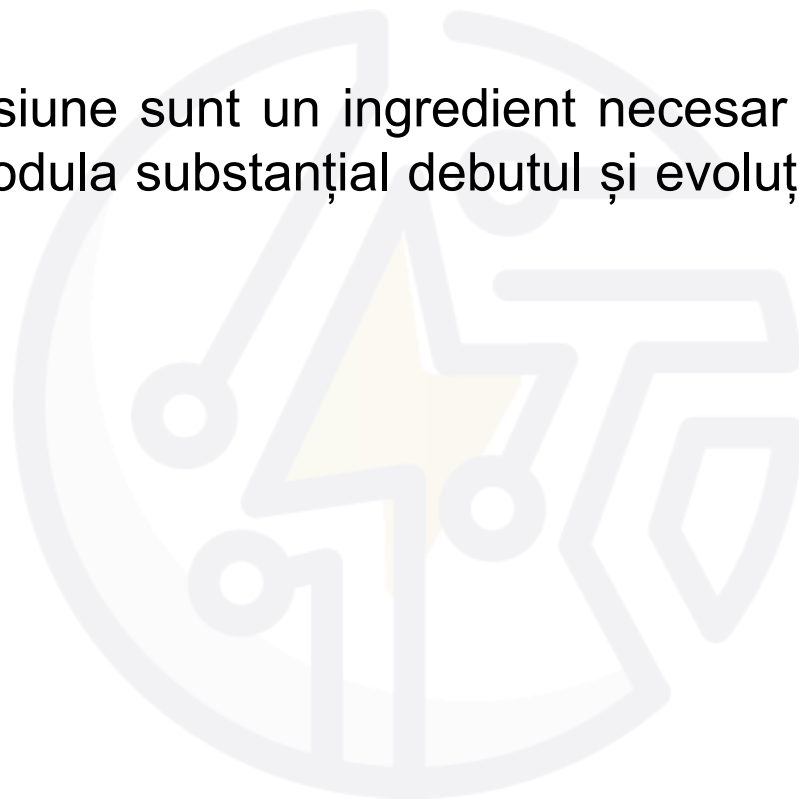


Rousi et al., 2022

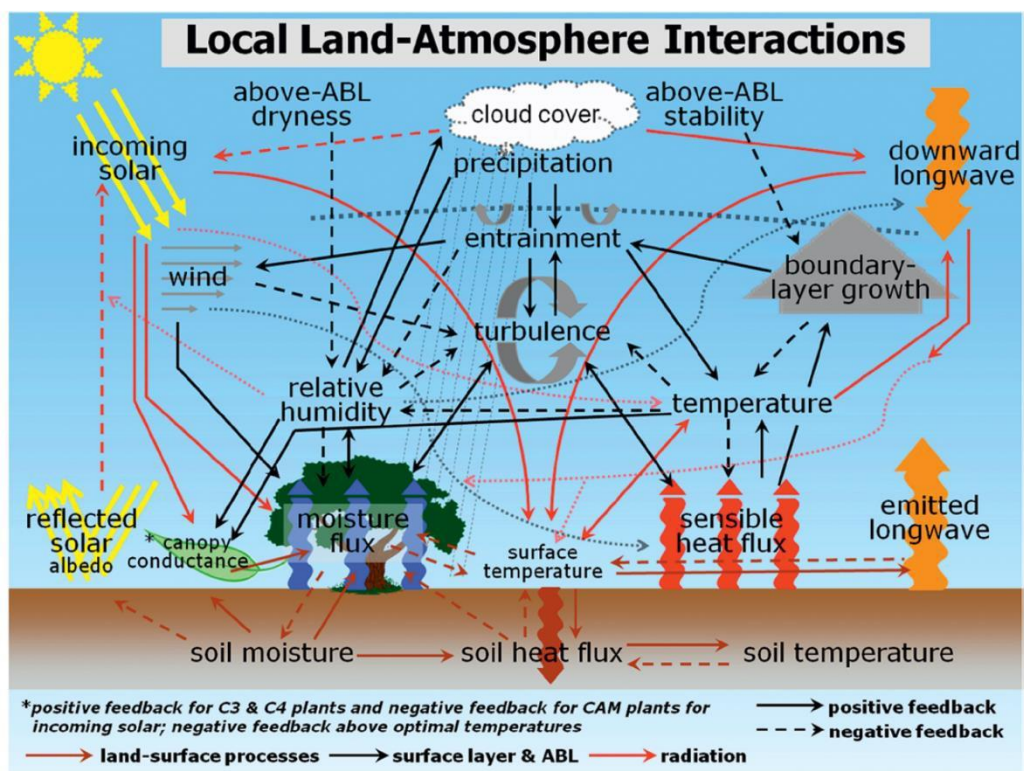
Aceste dinamici par a fi determinate în cele din urmă de un gradient termic redus ecuator-pol datorat amplificării arctice (Petoukhov et al., 2013 și Comou et al., 2014).

Fortăre de la scară regională la scară locală

...Deși sistemele de înaltă presiune sunt un ingredient necesar pentru dezvoltarea valurilor de căldură, factorii regionali pot modula substanțial debutul și evoluția acestora pe o gamă largă de scări temporale...



Fortăre de la scară regională la scară locală



Interacțiunile sol-atmosferă reprezintă schimburi de energie, masă și impuls la suprafața Pământului. Cuplarea sol-atmosferă **afectează evoluția stratului limită planetar (PBL sau ABL)**, convecția și nebulozitatea, care la rândul lor afectează generarea precipitațiilor și intensitatea și durata valurilor de căldură.

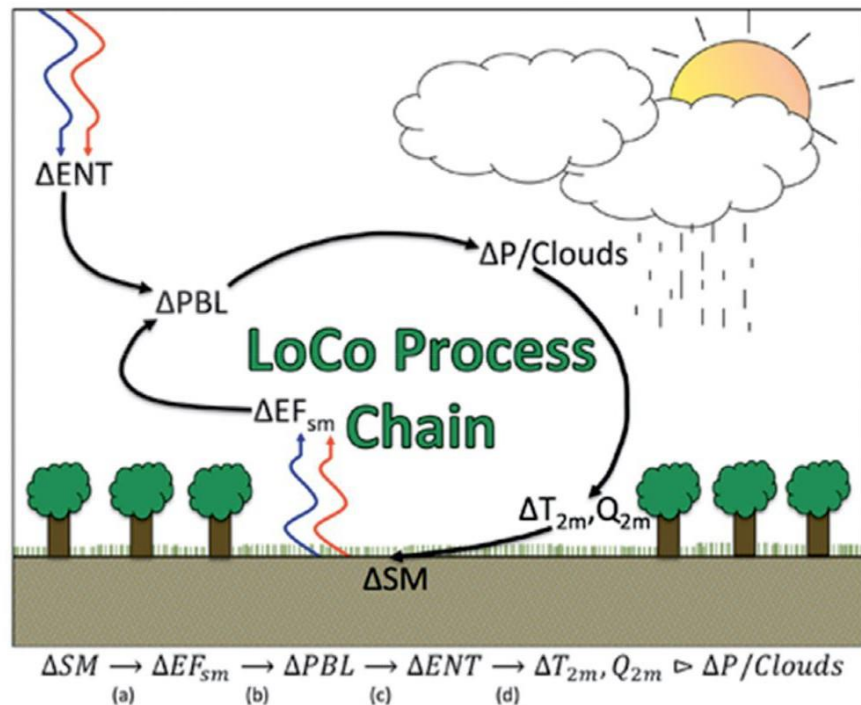
PBL: parte a troposferei direct afectată de condițiile de la suprafață, variind de la câteva sute de metri până la câțiva kilometri în adâncime. Se distinge de troposfera liberă de deasupra sa prin diferențe în curenți, proprietăți termodinamice și conținut chimic.

Schiță a interacțiunilor sol-atmosferă într-un regim sinoptic liniștit.

From Santanello et al., 2018

Fortăre de la scară regională la scară locală

Cum afectează starea suprafeței terestre atmosfera

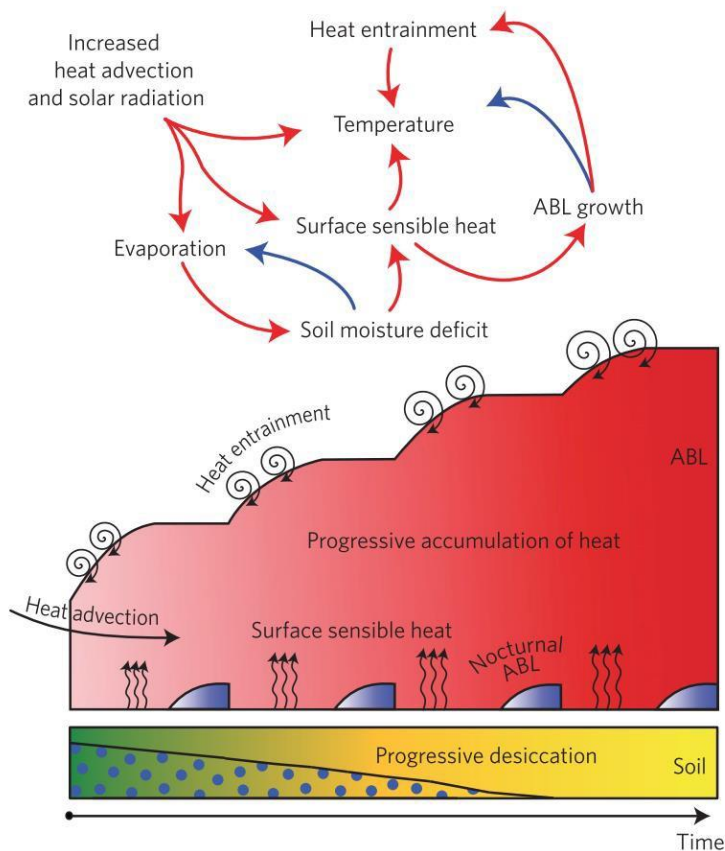


Prezentarea căilor care definesc relația SM–P (umiditatea solului–precipitații).

$$\Delta SM \xrightarrow{a} \Delta EF_{sm} \xrightarrow{b} \Delta PBL \xrightarrow{c} \Delta ENT \xrightarrow{d} \Delta T_{2m}, Q_{2m} \Rightarrow \Delta P, Cloud. \quad (1)$$

FIG. 2. Schematic of the LoCo process chain describing the components of L-A interactions linking soil moisture to precipitation and ambient weather (T_{2m} , Q_{2m}), where SM represents soil moisture; EF_{sm} is the evaporative fraction sensitivity to soil moisture; PBL is the PBL characteristics (including PBL height); ENT is the entrainment flux at the top of the PBL; T_{2m} and Q_{2m} are the 2-m temperature and humidity, respectively; and P is precipitation.

Forțare de la scară regională la scară locală



Bucula temperaturilor extreme într-un mega-val de căldură, feedback-uri sol-atmosferă care duc la amplificarea temperaturilor extreme printr-o memorie combinată multi-zilnică a suprafeței terestre și a PBL.

Figure 4 | Land-atmosphere interactions during mega-heatwaves revisited. Representation of the main soil moisture-air temperature interactions in the development of a mega-heatwave. Red and blue arrows represent positive and negative correlations, respectively.

From Miralles et al., 2014

Forțare de la scară regională la scară locală

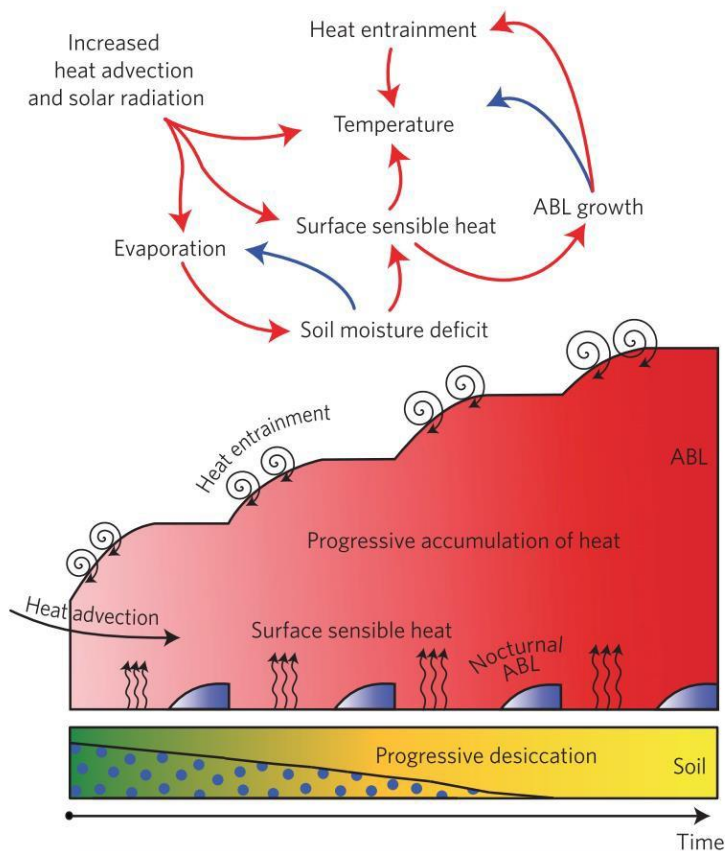


Figure 4 | Land-atmosphere interactions during mega-heatwaves revisited. Representation of the main soil moisture–air temperature interactions in the development of a mega-heatwave. Red and blue arrows represent positive and negative correlations, respectively.

From Miralles et al., 2014

Bucula temperaturilor extreme într-un mega-val de căldură, feedback-uri sol–atmosferă care duc la amplificarea temperaturilor extreme printr-o memorie combinată multi-zilnică a suprafeței terestre și a PBL.

Acest mecanism creează un **cerc de feedback pozitiv** (sub sisteme persistente de înaltă presiune):

Soluri mai uscate → mai multă căldură sensibilă → PBL mai adânc → mai multă advecție de aer cald → temperaturi și mai ridicate la suprafață.

Analiza valurilor de căldură în context regional: provocări, seturi de date disponibile, limitări

Lorenzo Sangelantoni

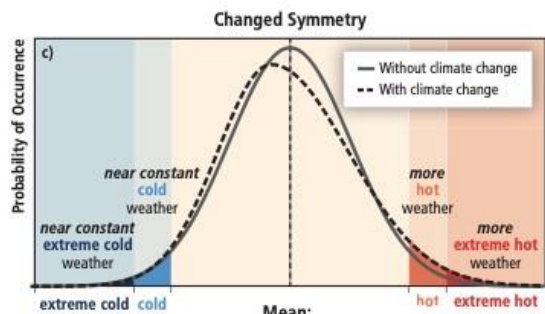
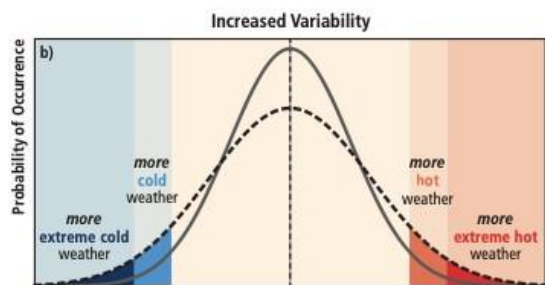
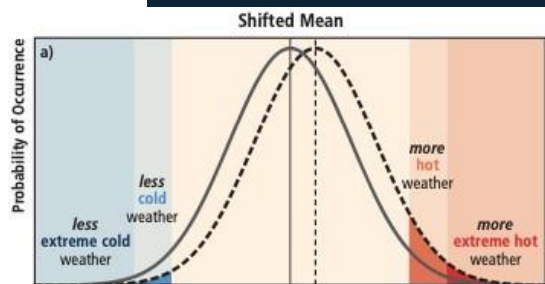
□ Valurile de căldură într-un climat în schimbare

- Tiparul regional al schimbărilor în valurile de căldură;
- Pot modelele climatice să reproducă tendințele observate ale valurilor de căldură?
- Principalele limitări/provocări

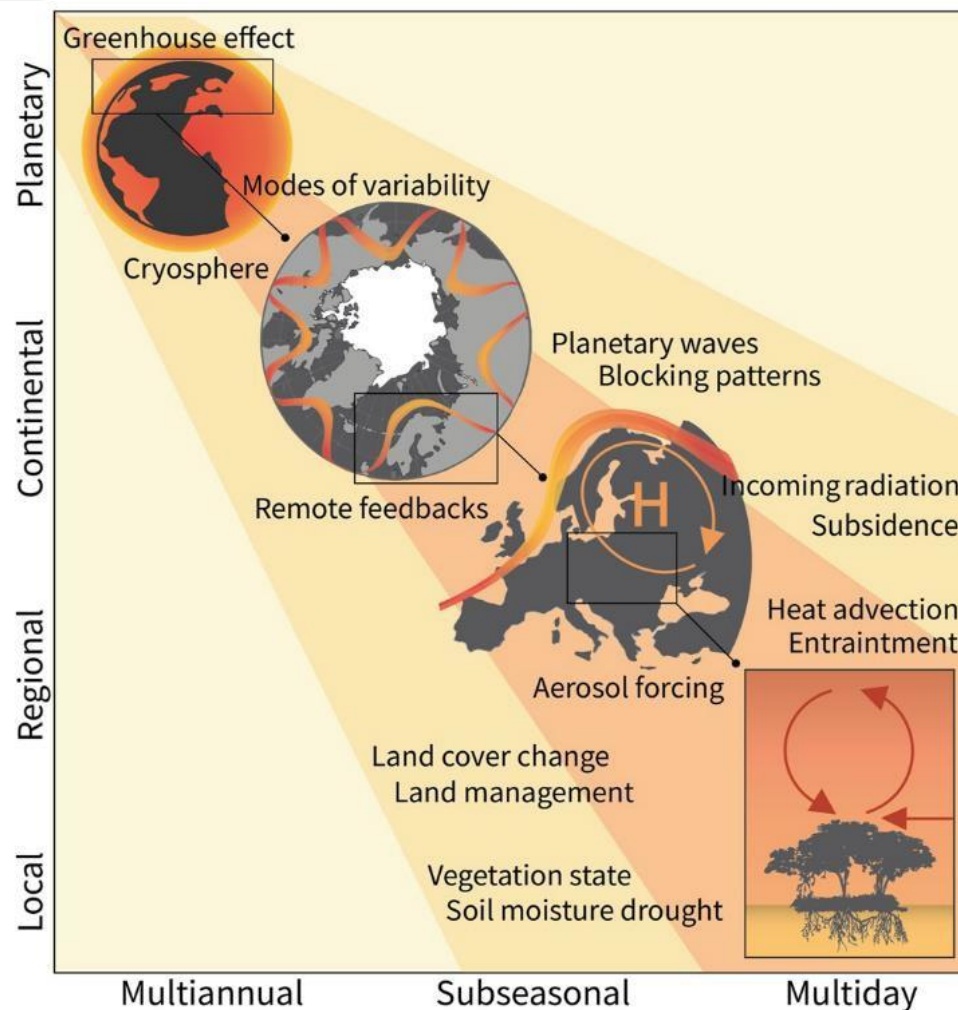
□ Accesul la simulări climatice pentru analiza valurilor de căldură

- CMIP6;
- CORDEX;
- ESGF;
- Copernicus CDS.

Valurile de căldură într-un climat în schimbare, de la statistică la fizică



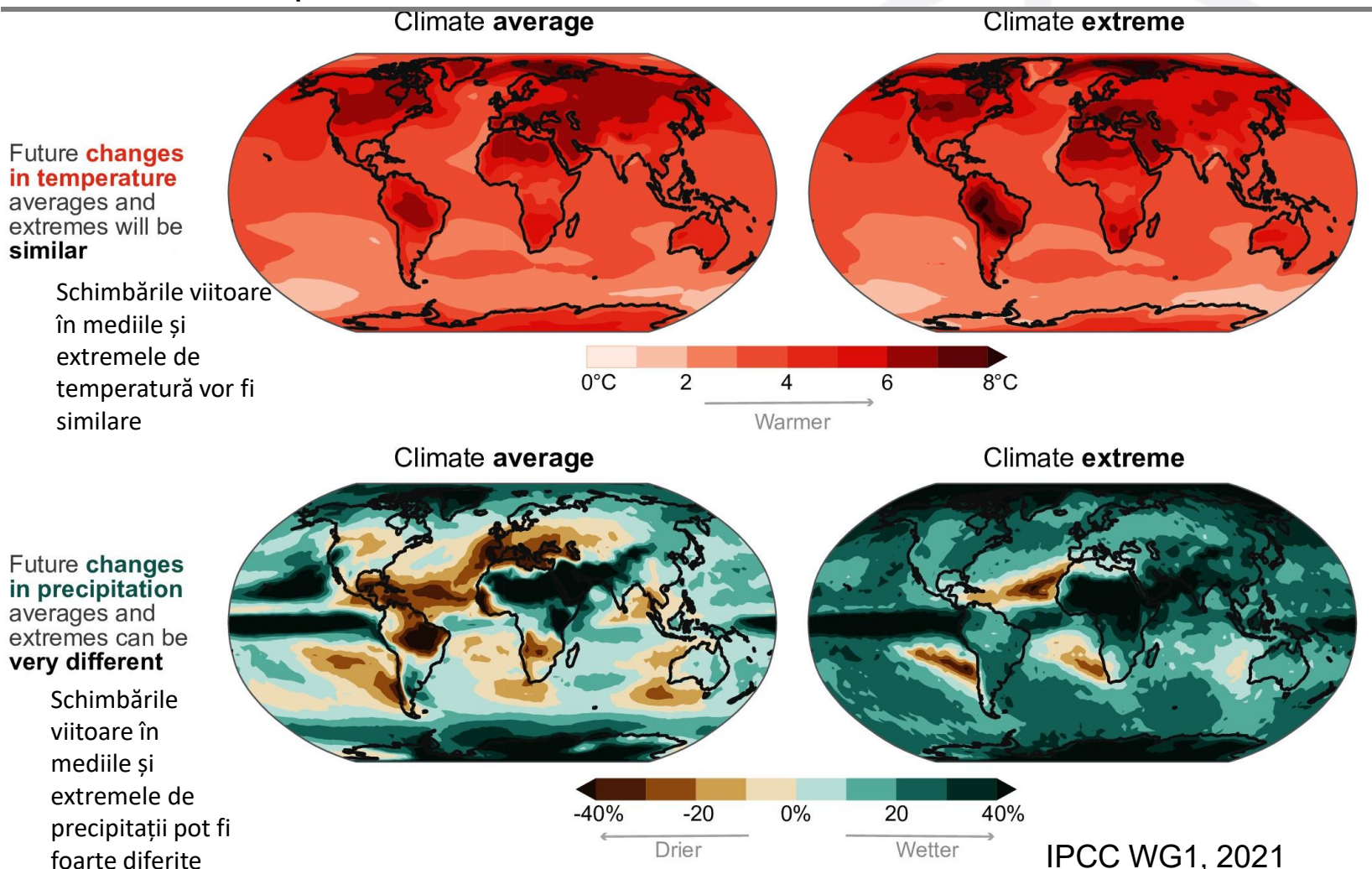
Mean: without and with weather change



Barriopedro et al., 2023

Valurile de căldură într-un climat în schimbare

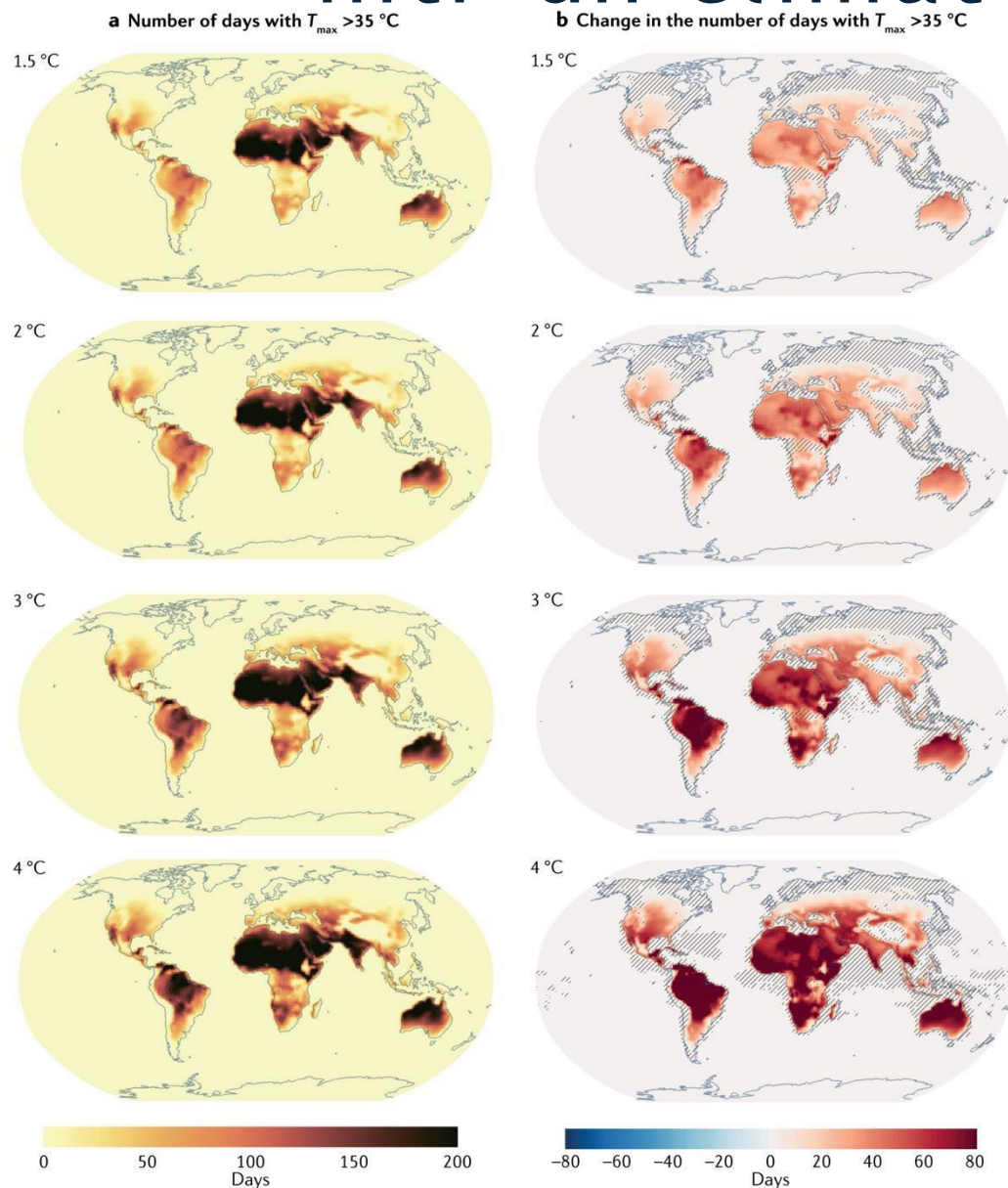
Cum se vor compara schimbările în extremele climatice cu schimbările în mediile climatice?



- Schimbările **regionale** pot depăși temperaturile medii globale.
- Schimbările **sezoniere** pot diferi de cele anuale medii.
- Schimbările pot fi diferite pentru diferite părți ale **distribuției**.

Ansamblul median CMIP6 cu o încălzire globală de 4 °C față de 1850–1900. Temperaturile extreme T2m se referă la cea mai fierbinte zi din an. Precipitațiile se referă la cea mai mare precipitație zilnică din an.

Valurile de căldură (HWs) într-un climat în schimbare

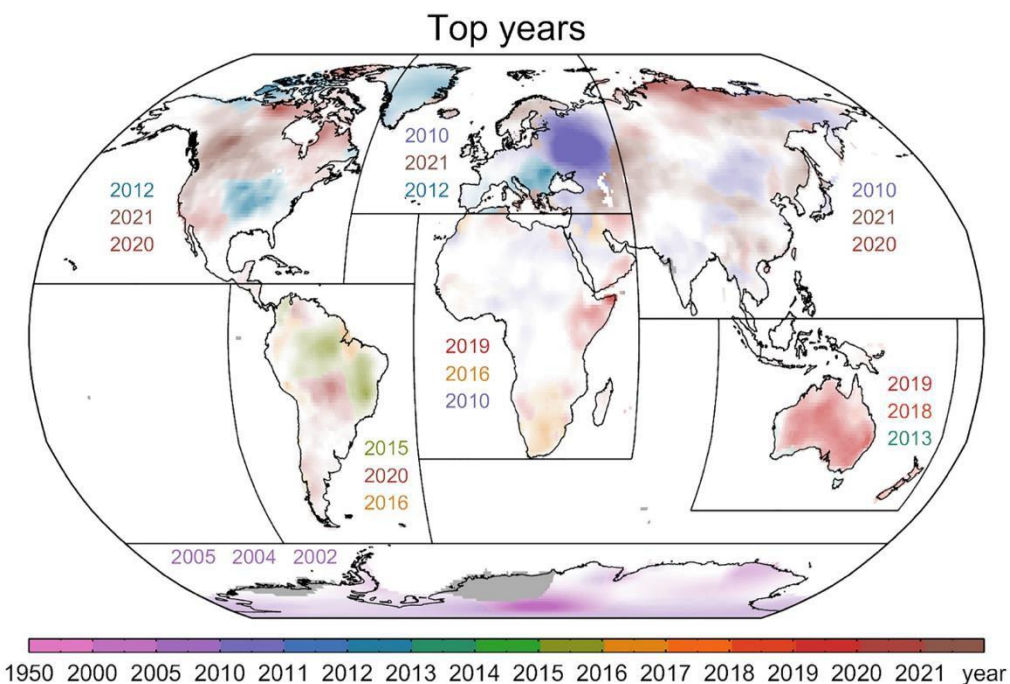
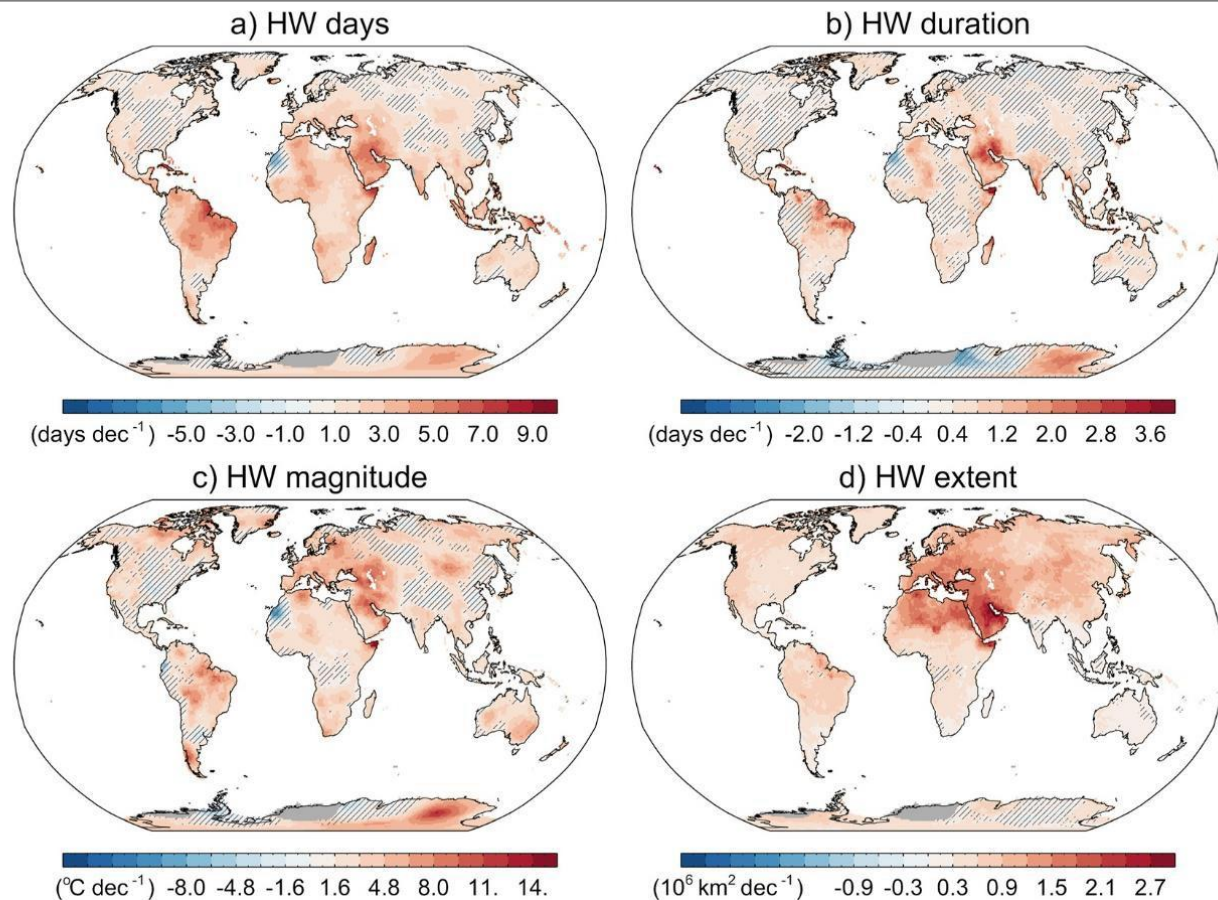


Apariția zilelor foarte fierbinți la diferite niveluri de încălzire.

- Numărul proiectat de zile pe an cu temperaturi maxime peste 35°C pe uscat pentru (de sus în jos) niveluri de încălzire de $1,5^{\circ}\text{C}$, 2°C , 3°C și 4°C . Nivelurile de încălzire reprezintă temperaturile medii globale relative la perioada 1850–1900 din modelele CMIP6 din scenariul SSP5-8.5.
- Schimbările în numărul de zile pe an cu temperaturi maxime peste 35°C pe uscat în raport cu perioada de referință 1850–1900. Hașurarea reprezintă regiunile cu acord scăzut între modele.

Valurile de căldură (HWs) într-un climat în schimbare

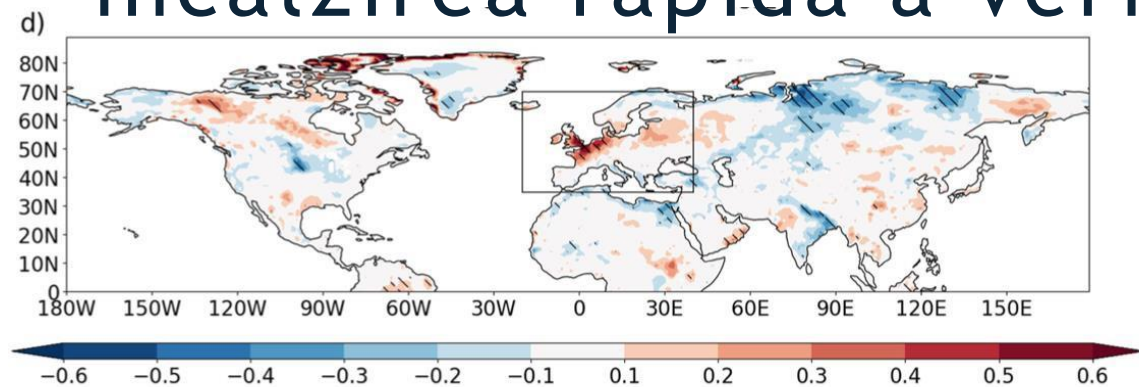
From Barriopedro et al., 2023



Tendențe (1950–2021) în caracteristicile valurilor de căldură din sezonul cald: (a) frecvența zilelor cu valuri de căldură; (b) durata maximă a valurilor de căldură într-un an; (c) magnitudinea valurilor de căldură; (d) extinderea areală maximă anuală.

Primele trei ani din perioada 1950–2021 pentru fiecare continent, clasificați după magnitudinea valurilor de căldură. Culoarea corespunde anului de apariție.

Valurile de căldură (HWs) într-un climat în schimbare – încălzirea rapidă a verilor europene



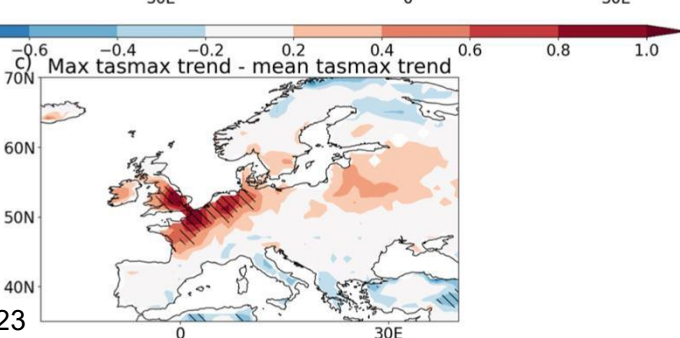
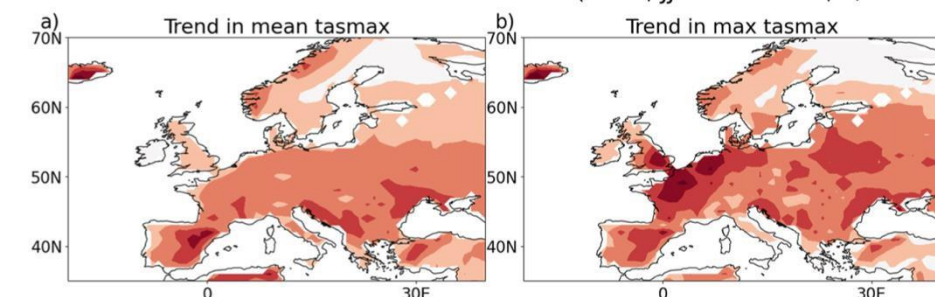
Global emergence of regional heatwave hotspots outpaces climate model simulations

Kai Kornhuber^{a,b,c,1} , Samuel Bartusek^{b,d} , Richard Seager^b , Hans Joachim Schellnhuber^{a,1} , and Mingfang Ting^{b,c} 

North-West Europe Hottest Days Are Warming Twice as Fast as Mean Summer Days

Matthew Patterson¹ 

Trend in max tasmax vs trend in mean tasmax (ERA5, JJA 1960-2021, K/decade)



Acceleration of daily land temperature extremes and correlations with surface energy fluxes

 Check for updates

Chris Huntingford¹  , Peter M. Cox^{2,3} , Paul D. L. Ritchie^{2,3} , Joseph J. Clarke² ,
Isobel M. Parry²  ² & Mark S. Williamson^{2,3} 

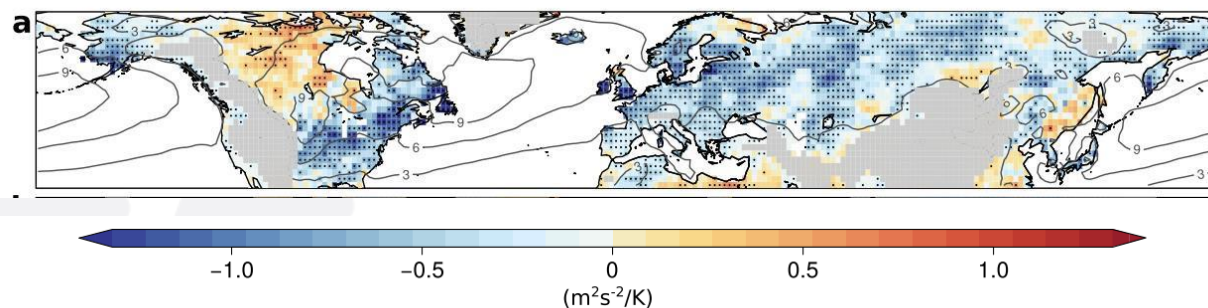
Slăbirea circulației estivale din emisfera nordică (NH)

The weakening summer circulation in the Northern Hemisphere mid-latitudes

Dim Coumou,^{1*} Jascha Lehmann,^{1,2} Johanna Beckmann^{1,2}

Rapid warming in the Arctic could influence mid-latitude circulation by reducing the poleward temperature gradient. The largest changes are generally expected in autumn or winter, but whether significant changes have occurred is debated. Here we report significant weakening of summer circulation detected in three key dynamical quantities: (i) the zonal-mean zonal wind, (ii) the eddy kinetic energy (EKE), and (iii) the amplitude of fast-moving Rossby waves. Weakening of the zonal wind is explained by a reduction in the poleward temperature gradient. Changes in Rossby waves and EKE are consistent with regression analyses of climate model projections and changes over the seasonal cycle. Monthly heat extremes are associated with low EKE, and thus the observed weakening might have contributed to more persistent heat waves in recent summers.

„Panta regresiei cuantile între anomaliile EKE și temperatură în timpul verii (p90)

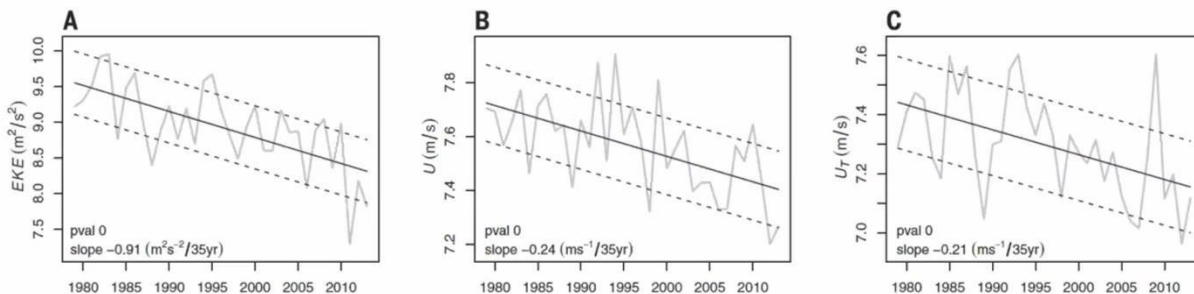


From Lehmann & Coumou 2015

Cele mai fierbinți luni de vară sunt asociate cu o energie cinetică eddică (EKE) scăzută

Cele mai fierbinți luni de vară sunt asociate cu o energie cinetică eddică (EKE) scăzută.

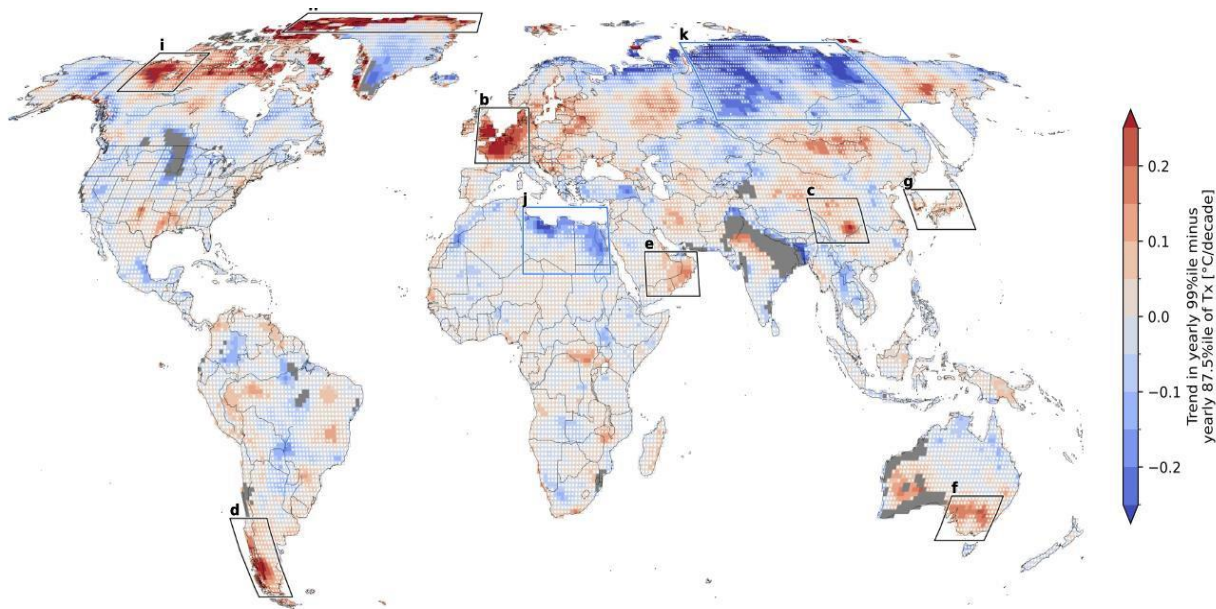
Schimbări absolute în (A) EKE, (B) vântul zonal U și (C) vântul termic UT în perioada 1979–2013, vara. Variabilele sunt calculate la 500 mb și mediate între 35°N și 70°N pe toate longitudinile; liniile gri reprezintă observațiile, iar liniile negre solide – tendința liniară



Sunt modelele climatice capabile să reproducă tiparele regionale ale încălzirii accelerate din sezonul estival?

Tendință în lărgirea extremă a cozii distribuției temperaturilor ridicate (p99–p87.5)

Trend in extreme heat tail-widening (p99-p87.5)



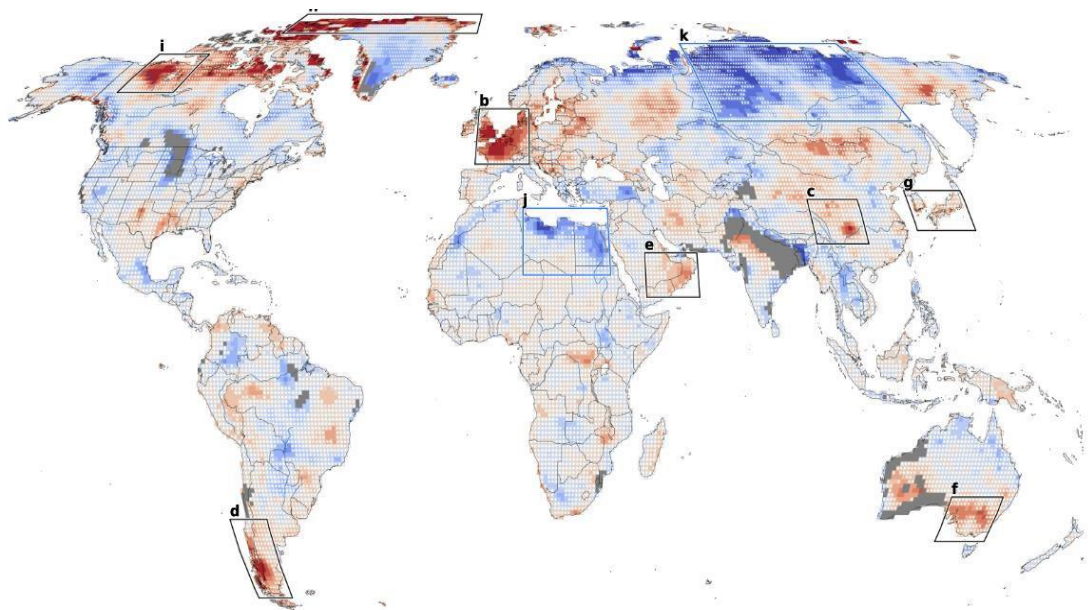
From Kornhuber et al., 2024

Tendințe regionale în **lărgirea extremă a cozii de căldură**, estimate prin calcularea tendințelor pe termen lung ale diferențelor dintre **percentila anuală 99** a temperaturii maxime zilnice (Tx) și **percentila anuală 87,5** a Tx (mediana din cuartilul superior delimitat de percentilele 75 și 100), la fiecare punct de rețea, pentru perioada 1958–2022.

Sunt modelele climatice capabile să reproducă tiparele regionale ale încălzirii accelerate din sezonul estival?

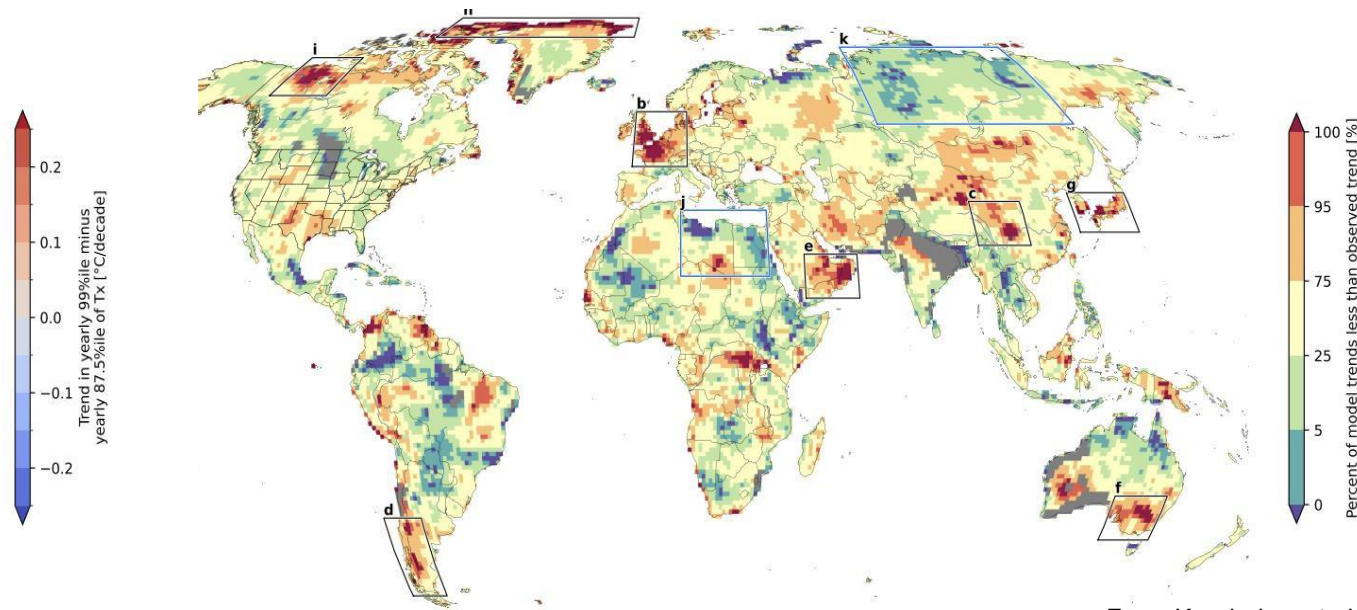
Tendință în lărgirea extremă a cozii distribuției temperaturilor ridicate (p99–p87.5)

Trend in extreme heat tail-widening (p99-p87.5)



Procentul modelelor care subestimează lărgirea extremă a cozii de căldură

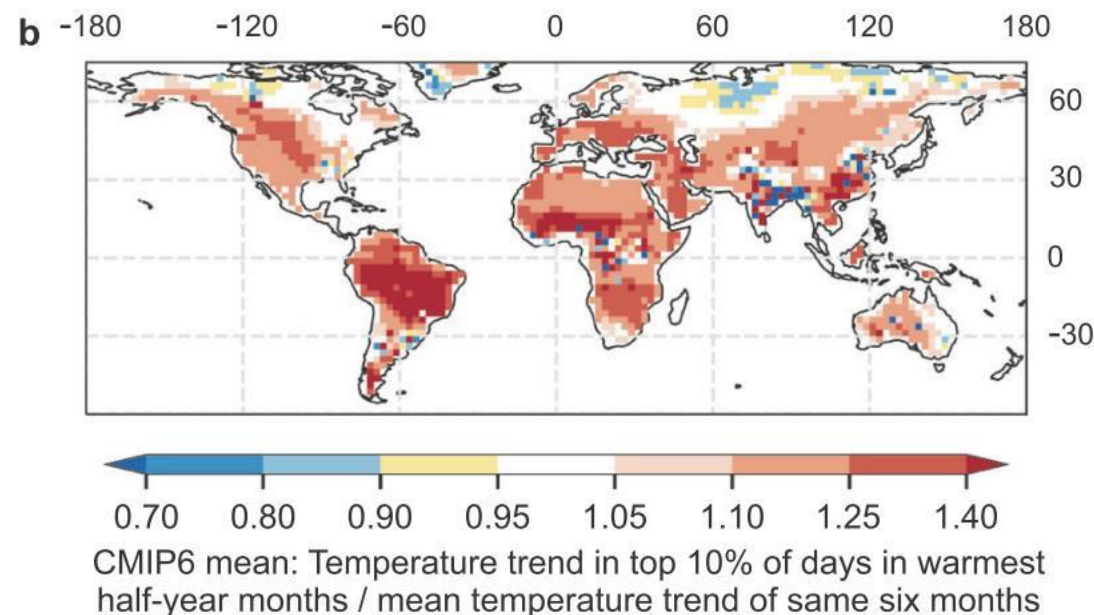
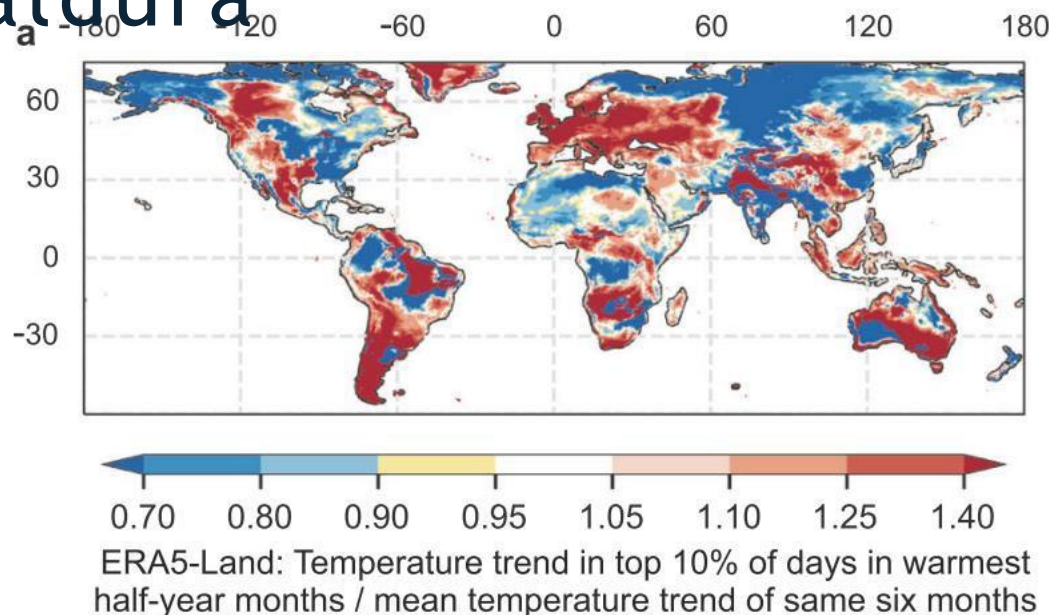
Percentage of models underestimating extreme heat tail-widening



From Kornhuber et al., 2024

Tendințe regionale în **lărgirea extremă a cozii de căldură**, estimate prin calcularea tendințelor pe termen lung ale diferențelor dintre **percentila anuală 99** a temperaturii maxime zilnice (Tx) și **percentila anuală 87,5** a Tx (mediana din cuartilul superior delimitat de percentilele 75 și 100), la fiecare punct de rețea, pentru perioada 1958–2022.

Valurile de căldură (HWs) într-un climat în schimbare, apariția globală a punctelor fierbinți ale valurilor de căldură



Tendințe pentru punctele terestre din datele ERA5-Land și din subsetul de ansamblu CMIP6 pentru anii 1950–2021. Tendințele se referă la cele mai calde șase luni din an și la cele mai calde 10% dintre zilele din acele șase luni.

From Huntingford et al., 2024

Ce este în neregulă cu modelele climatice globale (GCMs)?

Heat extremes in Western Europe increasing faster than simulated due to atmospheric circulation trends

Vautard et al., 2023

Extremele de căldură din Europa de Vest cresc mai rapid decât au fost simulate, din cauza tendințelor circulației atmosferice

circulation changes shows that there is a large dynamical contribution to this observed trend, which is underestimated in all the 170 climate simulations analyzed, explaining a large part of the discrepancy in trend between models and observations. By contrast, models and observational trends are broadly consistent in terms of the thermodynamic contribution to the trend in mean temperatures. Although it

Summertime Rossby waves in climate models: substantial biases in surface imprint associated with small biases in upper-level circulation

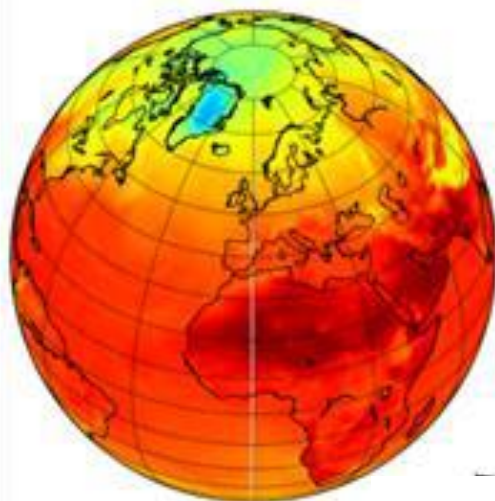
Luo et al., 2022

cesses. Focusing on wave 5 and wave 7, we show that while the wave's position and magnitude are generally well represented during high-amplitude (> 1.5 SD) episodes, the associated surface anomalies are substantially underestimated.

Reprezentarea temperaturii de vară și a valurilor de căldură (HWs) în modelele climatice regionale (RCMs)

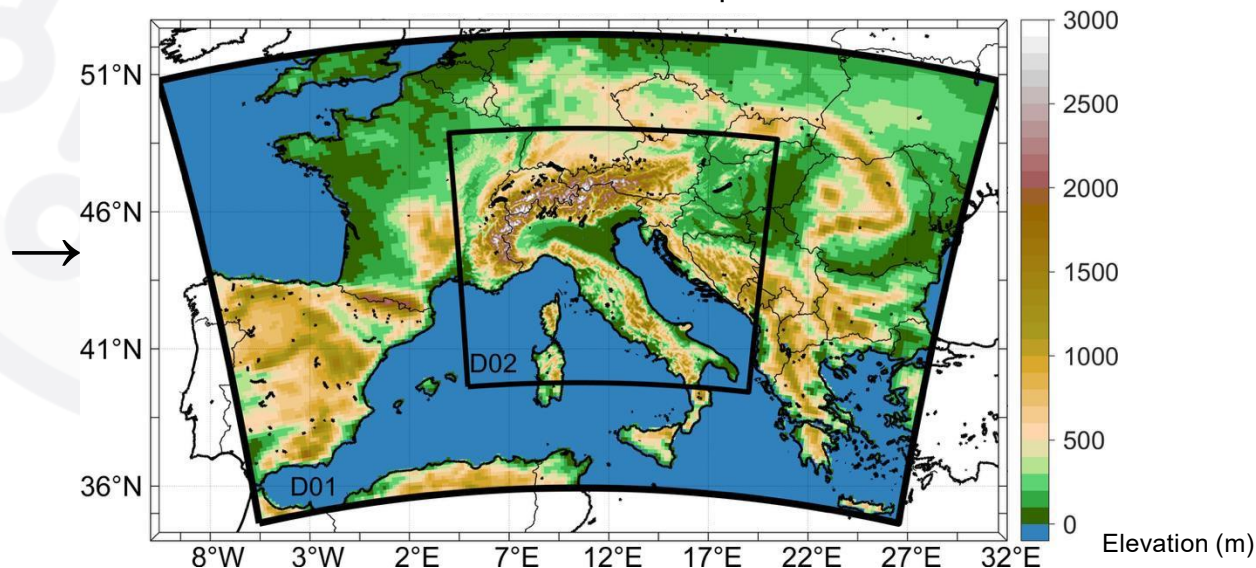
Reducere dinamică a rezoluției (Dynamical downscaling)

Model climatic global sau reanaliză care furnizează condițiile inițiale și de frontieră pentru modelul (modelele) climatic(e) regional(e) înglobat(e)



RCM-uri înglobate – WRF 15 km | WRF 3 km

Nested RCMs – WRF 15 km | WRF 3 km



Sangelantoni et al., 2023

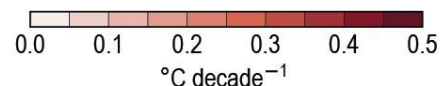
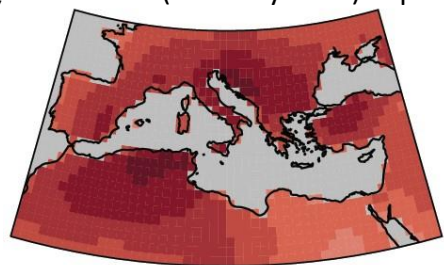
Reprezentarea temperaturii de vară și a valurilor de căldură (HWs) în RCM-uri

Tendențele temperaturii aerului la suprafață în timpul verii

(d) Observed trend (BerkeleyEarth)

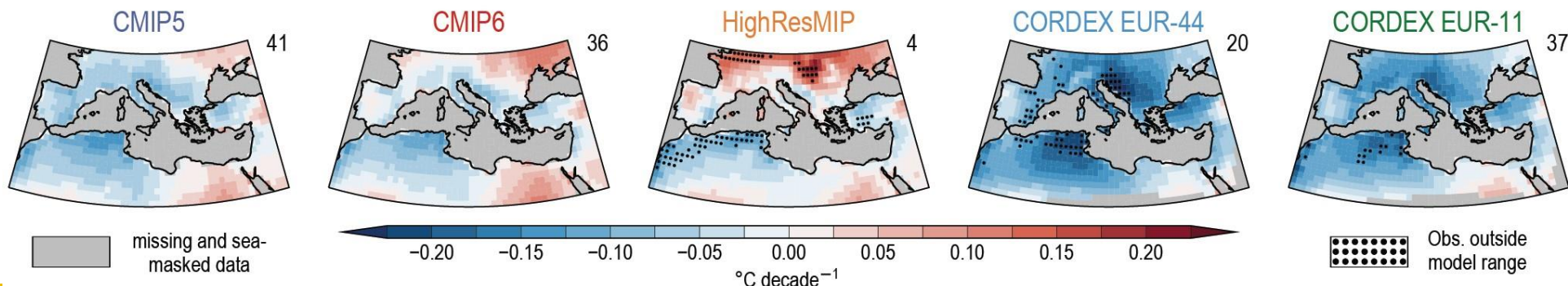
Past period (1960-2014)

Tendența observată (BerkeleyEarth) în perioada trecută



Diferențele dintre tendința medie a ansamblului și tendința observată

(g) Ensemble mean trend differences with respect to the observed trend ((d), 1960-2014)

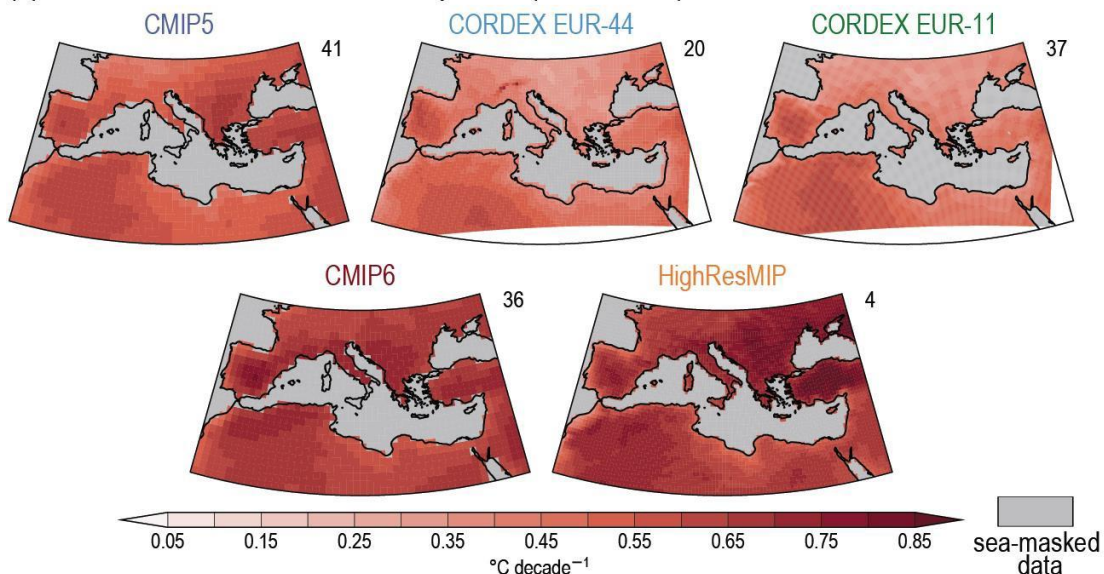


Reprezentarea temperaturii de vară și a valurilor de căldură (HWs) în RCM-uri

Semnalul schimbării viitoare a sezonului estival în RCM-uri față de GCM-uri

Tendințe medii ale ansamblului pentru perioada viitoare

(c) Ensemble mean trends future period (2015-2050)



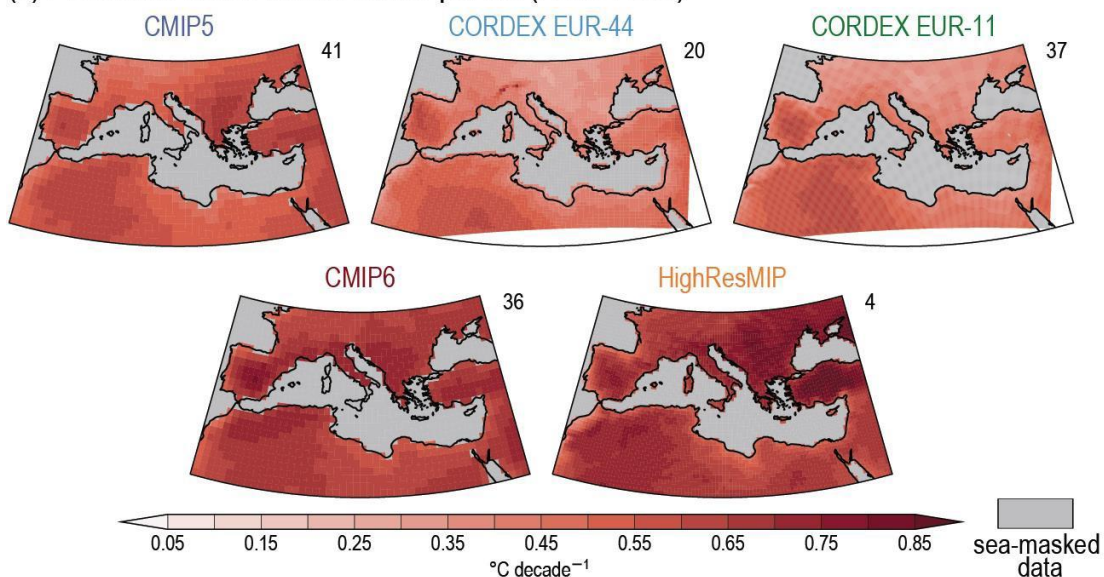
IPCC AR6 2021 chap. 10

Reprezentarea temperaturii de vară și a valurilor de căldură (HWs) în RCM-uri

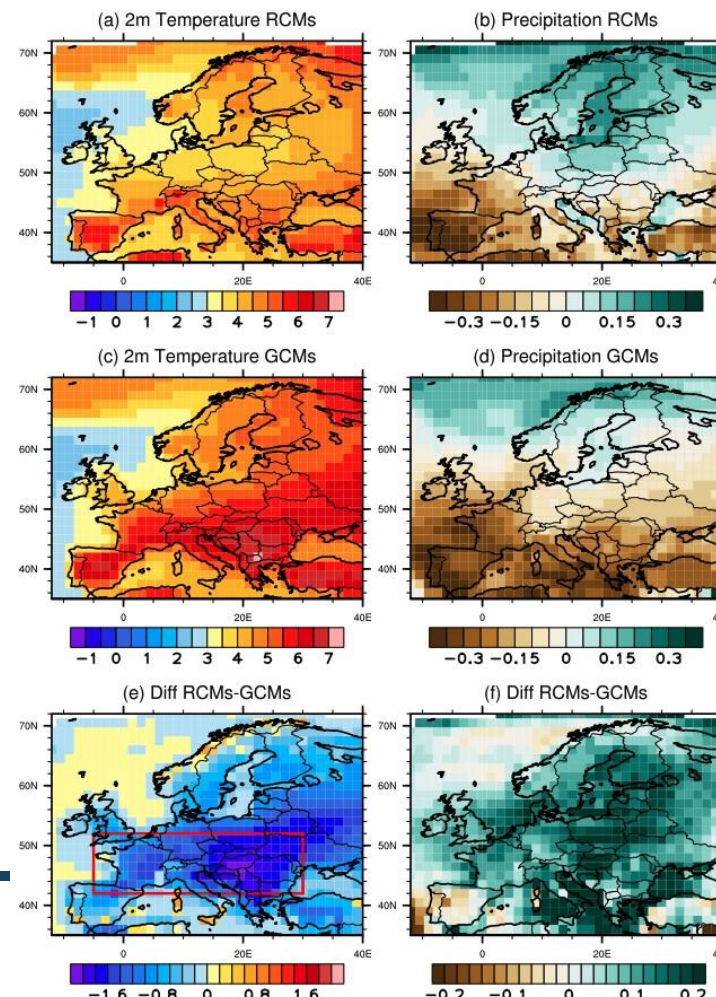
Semnalul schimbării viitoare a sezonului estival în RCM-uri față de GCM-uri

Tendințe medii ale ansamblului pentru perioada viitoare

(c) Ensemble mean trends future period (2015-2050)



IPCC AR6 2021 chap. 10









Schimbări medii de ansamblu în temperatura de vară (K) și precipitațiile relative asupra Europei între 2070–2099 și 1970–1999

Boé et al., 2020

Ce ar putea fi în neregulă în RCM-uri?

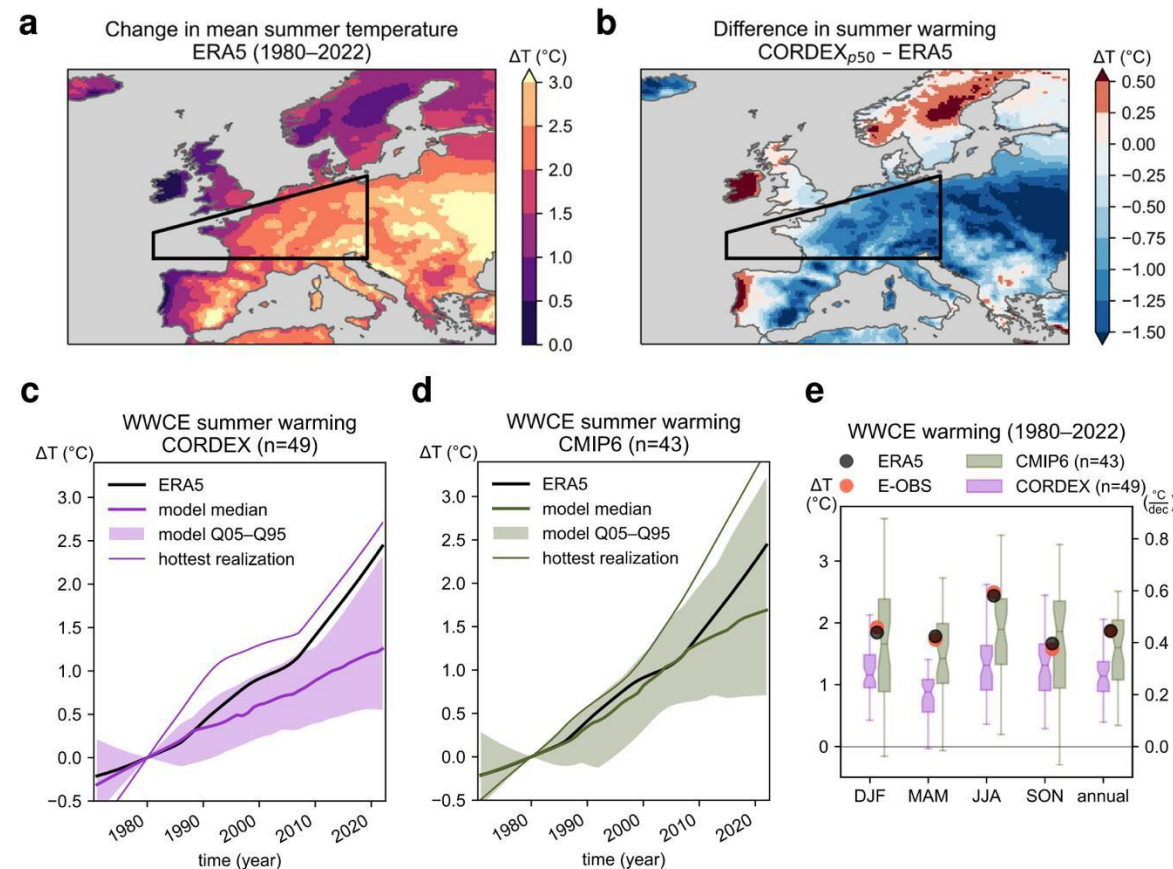
Exacerbated summer European warming not captured by climate models neglecting long-term aerosol changes

 Check for updates

Dominik L. Schumacher , Jitendra Singh , Mathias Hauser , Erich M. Fischer , Martin Wild  & Sonia I. Seneviratne 

S-a constatat că media multimodel CORDEX subestimează creșterea observată a radiației solare directe descendente, deoarece majoritatea RCM-urilor nu iau în considerare aerosolii care evoluează în timp.

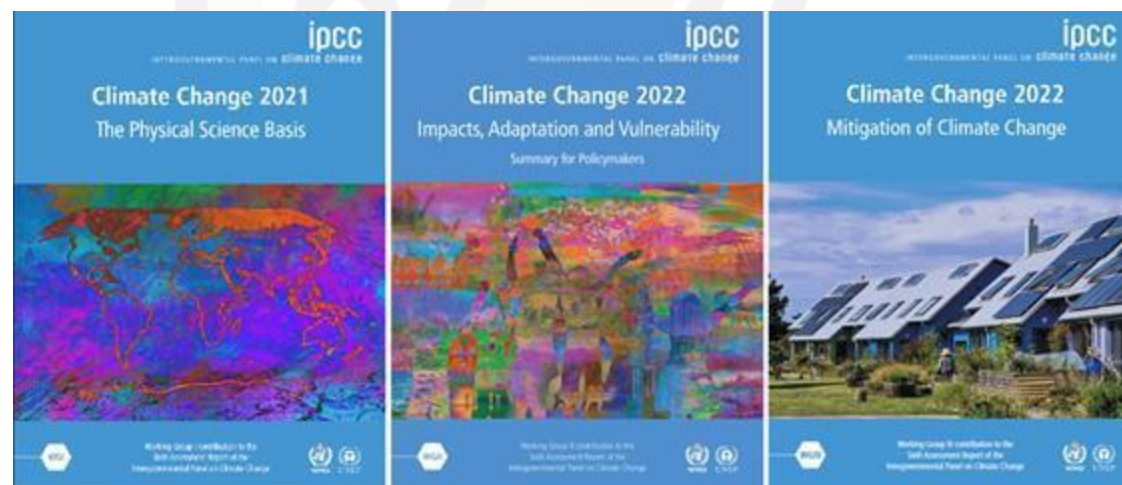
From Schumacher et al., 2024



Seturi de date disponibile pentru analiza valurilor de căldură (HWs)

În cadrul Programului Mondial de Cercetare a Climei (WCRP), Grupul de Lucru pentru Modelare Cuplată (WGCM) a stabilit **Proiectul de Intercomparare a Modelelor Cuplate (CMIP)** ca protocol experimental standard pentru studiul rezultatelor **modelelor de circulație generală atmosferă–ocean cuplate (AOGCMs)**.

Rezultatele modelelor sunt utilizate pentru a efectua cercetări relevante pentru oamenii de știință implicați în elaborarea **Rapoartelor de Evaluare ale Panelului Interguvernamental privind Schimbările Climatice (IPCC-AR)**

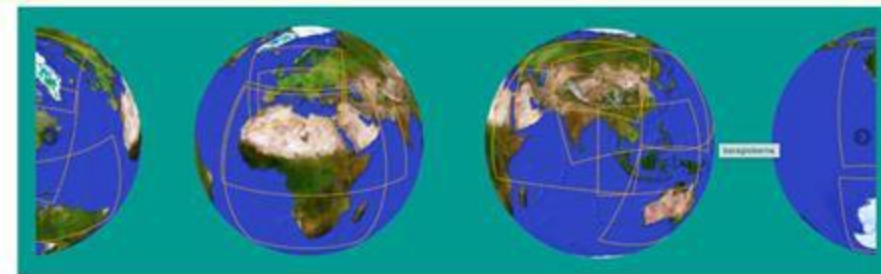


Experimentul coordonat de reducere regională a rezoluției climatice (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment)

Oferă ansambluri de proiecții climatice istorice și viitoare de înaltă rezoluție pentru diverse regiuni ale globului, prin reducerea dinamică a rezoluției unui set de modele GCM CMIP5.

RCM-urile din CORDEX au de obicei o rezoluție orizontală cuprinsă între 50 și 10 km.

[Guidance for EURO-CORDEX](#)



EURO-CORDEX:

Resolution	Regional Climate Models	Driving Global Coupled Models								
		ERA-INT (ECMWF)	HadGEM2-ES (MOHC)	EC-EARTH (ICHEC)	CNRM-CM5 (CNRM-CERFACS)	NorESM1-M (NCC)	MPI-ESM-LR (MPI)	IPSL-CM5A-MR (IPSL)	CanESM2 (CCCma)	MIROC5 (MIROC)
0.11°	RCA4 (SMHI)									
	CCLM4-8-17 (CLMcom-BTU)									
	CCLM4-8-17 (CLMcom)									
	COSMO-crCLIM-v1-1-1 (CLMcom-ETH)									
	REMO2009 (MPI-CSC)									
	REMO2015 (GERICS)									
	RACMO22E (KNMI)									
	HIRHAM5 (DMI)									
	WRF361H (UHOH)									
	WRF381P (IPSL)									
	ALADIN63 (CNRM)									
	RegCM4-6 (ICTP)									
	HadREM3-GA7-05 (MOHC)									



Earth System Grid Federation

An [open source](#) effort providing a robust, distributed data and computation platform, enabling world wide access to Peta/Exa-scale scientific data.

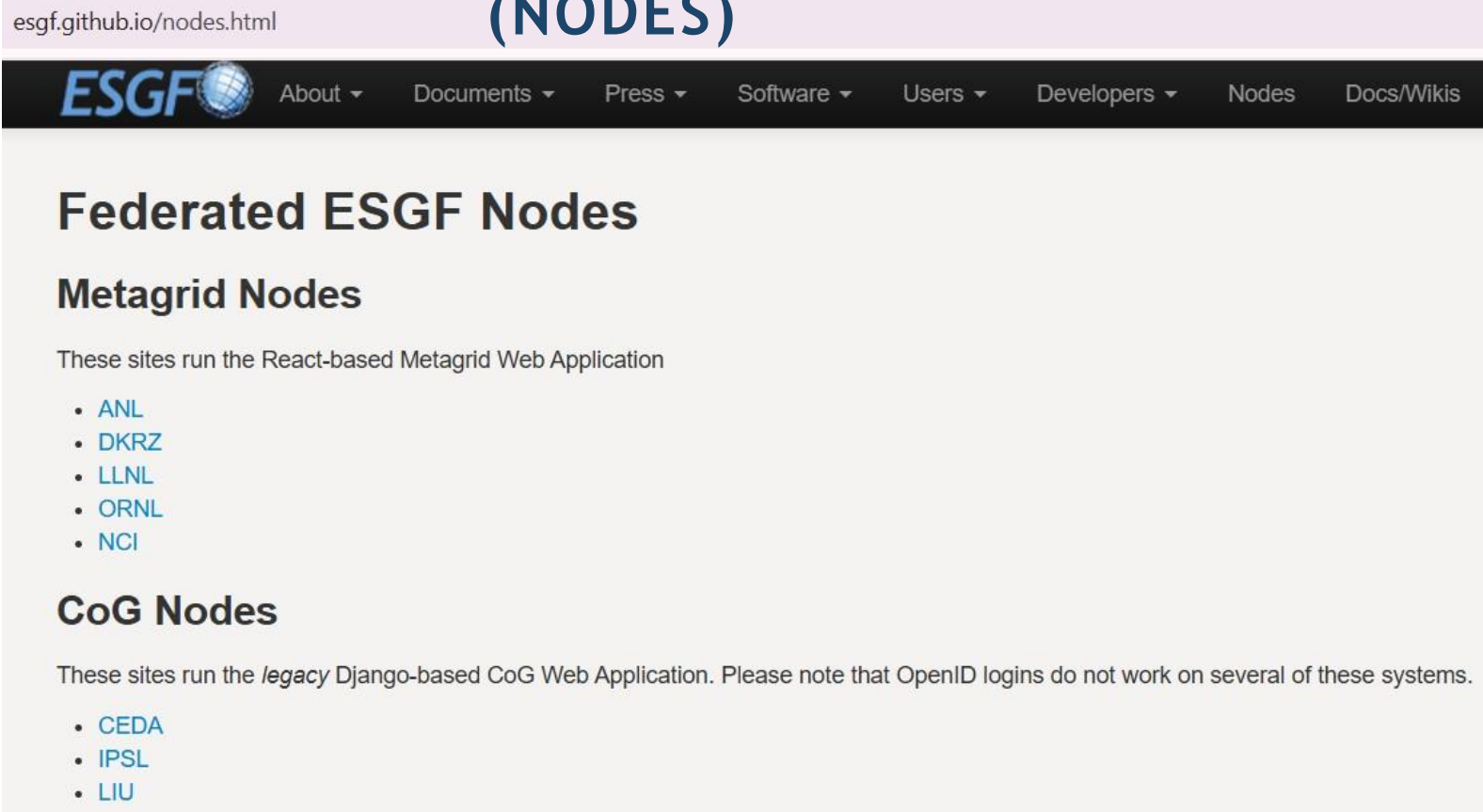
ESGF Mission

The Earth System Grid Federation (ESGF) is an international collaboration for the software that powers most global climate change research, notably assessments by the [Intergovernmental Panel on Climate Change](#) (IPCC).

ESGF manages the first-ever decentralized database for handling climate science data, with multiple petabytes of data at dozens of federated sites worldwide. It is recognized as the leading infrastructure for the management and access of large distributed data volumes for climate change research. It supports the [Coupled Model Intercomparison Project](#) (CMIP), whose protocols enable the periodic assessments carried out by the IPCC.

Using a system of geographically distributed peer nodes—independently administered yet united by common protocols and interfaces—the ESGF community holds the premier collection of simulations and observational and reanalysis data for climate change research. —

esgf.github.io/nodes.html



The screenshot shows the ESGF Nodes website. At the top is a navigation bar with the ESGF logo and menu items: About, Documents, Press, Software, Users, Developers, Nodes, and Docs/Wikis. The main content area is titled 'Federated ESGF Nodes' and is divided into two sections: 'Metagrid Nodes' and 'CoG Nodes'. Under 'Metagrid Nodes', it states 'These sites run the React-based Metagrid Web Application' and lists five nodes: ANL, DKRZ, LLNL, ORNL, and NCI. Under 'CoG Nodes', it states 'These sites run the legacy Django-based CoG Web Application. Please note that OpenID logins do not work on several of these systems.' and lists three nodes: CEDA, IPSL, and LIU.

<https://esgf-node.cels.anl.gov/>

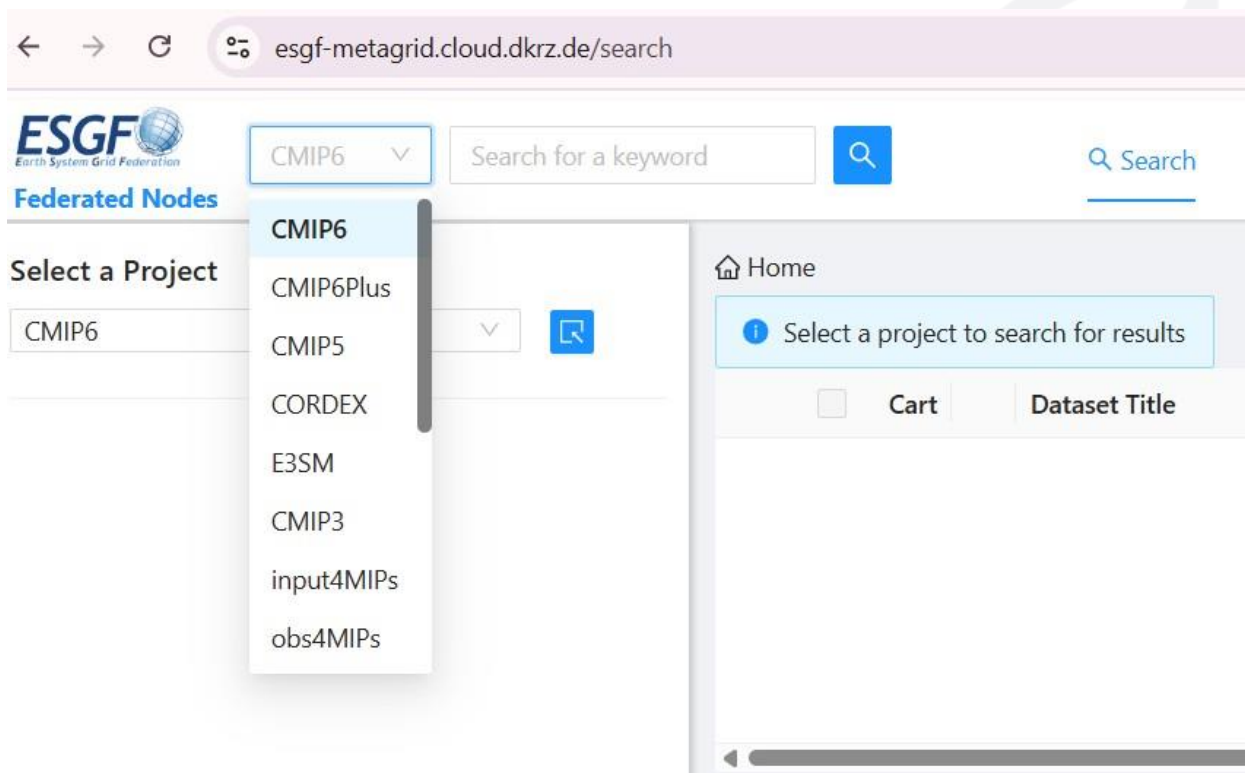
<https://esgf-node.llnl.gov/>

<https://esgf-node.ornl.gov/>

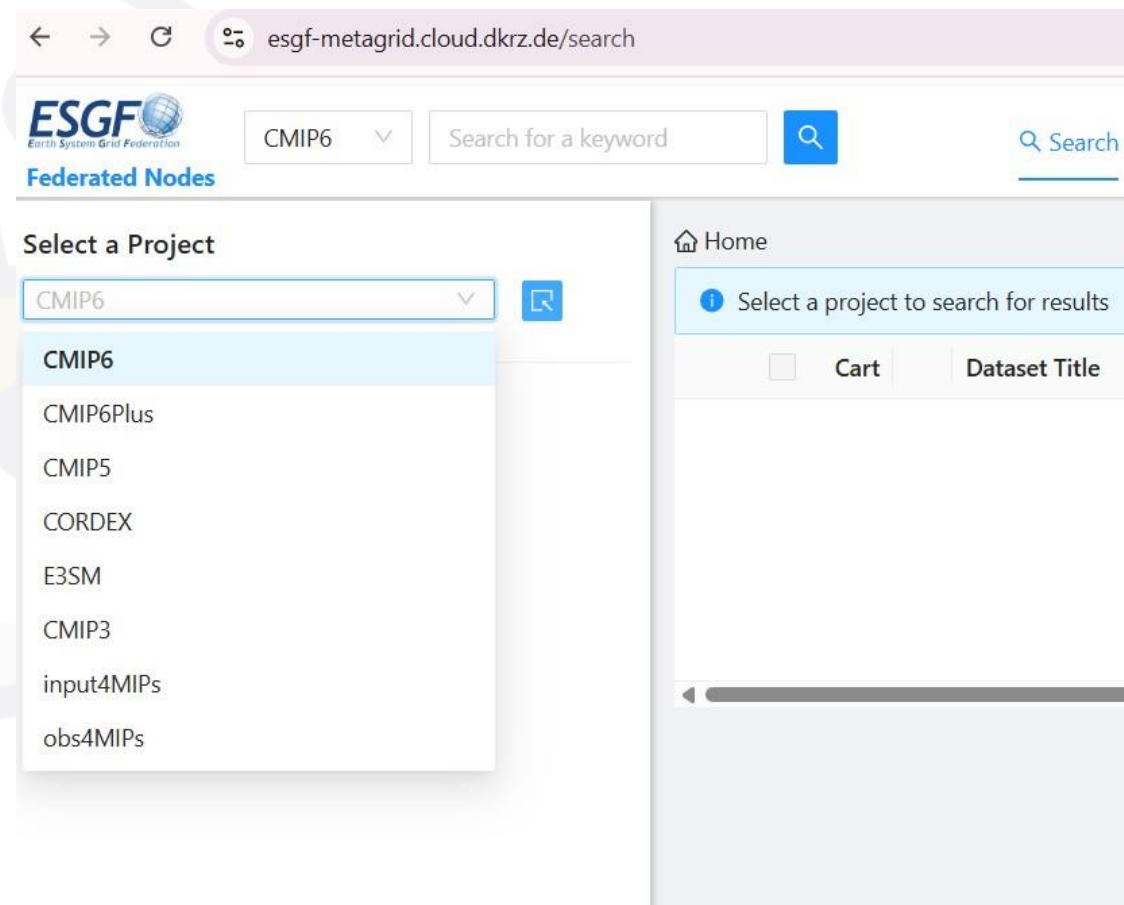
<https://esgf-metagrid.cloud.dkrz.de/>

<https://esgf.nci.org.au/>

Începe prin selectarea proiectului (de exemplu: CMIP6, CORDEX).
Reține că pot exista mici diferențe în interfață în funcție de nod.
Am selectat CMIP6



The screenshot shows the search page at `esgf-metagrid.cloud.dkrz.de/search`. The ESGF logo and 'Federated Nodes' are visible. A search bar contains 'Search for a keyword' and a search icon. A dropdown menu is open under 'Select a Project', listing options: CMIP6, CMIP6Plus, CMIP5, CORDEX, E3SM, CMIP3, input4MIPs, and obs4MIPs. The 'Home' section contains a message: 'Select a project to search for results' and buttons for 'Cart' and 'Dataset Title'.



The screenshot shows the same search page, but with a different layout for the 'Select a Project' dropdown menu. The dropdown menu lists the same project options as the first screenshot. The 'Home' section contains a message: 'Select a project to search for results' and buttons for 'Cart' and 'Dataset Title'.

← → ↻ 🌐 aims2.llnl.gov/search

Filter By Transfer Options

Any Only Globus Transferrable

Filter with Facets Expand All

- > General
- > Identifiers
- > Resolutions
- > Labels
- > Classifications
- ▼ Additional Properties
 - Version Type ⓘ: Latest ▼
 - Result Type ⓘ: Originals and Replicas ▼
 - Version Date Range ⓘ: Start da... → End date 📅
- > Filename

▼ General

Data Node 📄: Select option(s) ▼

Activity ID 📄: Select option(s) ▼

▼ Identifiers

Sub Experiment ID 📄 ⓘ: Select option(s) ▼

Experiment ID 📄: Select option(s) ▼

Source Type 📄: Select option(s) ▼

Institution ID 📄: Select option(s) ▼

Source ID 📄: Select option(s) ▼

▼ Resolutions

Nominal Resolution 📄: Select option(s) ▼

▼ Labels

Variant Label 📄: Select option(s) ▼

Grid Label 📄: Select option(s) ▼

▼ Classifications

CF Standard Name 📄: Select option(s) ▼

Table ID 📄: Select option(s) ▼

Frequency 📄: Select option(s) ▼

Variable ID 📄: Select option(s) ▼

Realm 📄: Select option(s) ▼

▼ Additional Properties

Version Type ⓘ: Latest ▼

Result Type ⓘ: Originals and Replicas ▼

Version Date Range ⓘ: Start da... → End date 📅

Începe prin selectarea **ACTIVITY ID** (de exemplu: ScenarioMIP, HighResMIP, DCPD...). Ține cont că nu toate modelele sunt disponibile pe fiecare nod de date ESGF - acest lucru este în special valabil pentru CORDEX. Totuși, fiecare interfață MetaGrid (de exemplu: <https://esgf-metagrid.cloud.dkrz.de/search>) oferă acces la întreaga rețea ESGF, permițând navigarea și descărcarea datelor de la toate nodurile, indiferent de punctul de pornire.

← → ↻ aaims2.llnl.gov/search

Filter By Transfer Options

Any Only Globus Transferrable

Filter with Facets Expand All

- > General
- > Identifiers
- > Resolutions
- > Labels
- > Classifications
- ▼ Additional Properties

Version Type: Latest

Result Type: Originals and Replicas

Version Date Range: Start da... → End date

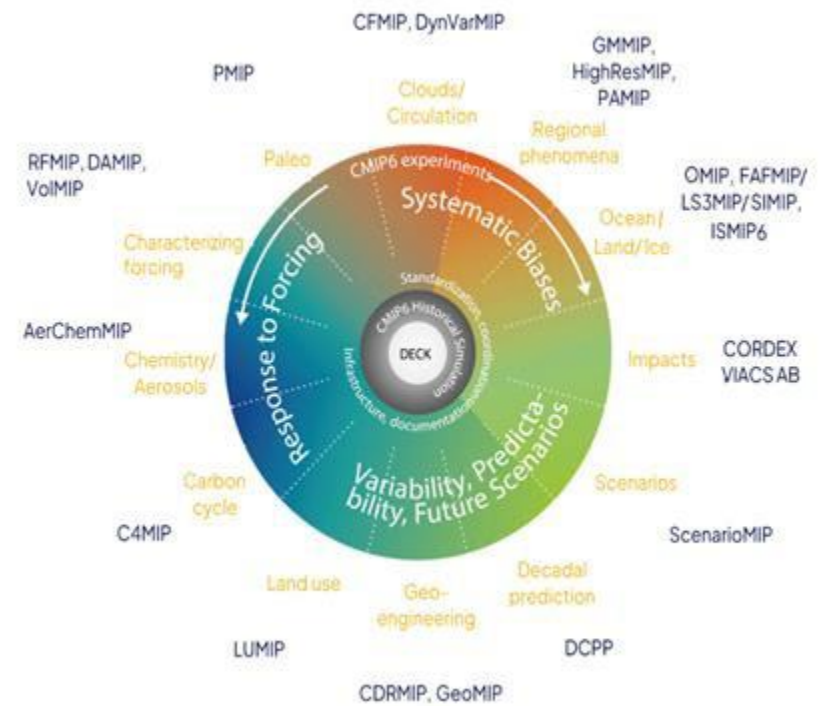
> Filename

▼ General

Data Node: Select option(s)

Activity ID: ScenarioMIP (2000501) × HighResMIP (95996) × DCPD (6945740) ×

DCPD	(6945740)	✓
PAMIP	(6653918)	
ScenarioMIP	(2000501)	✓
CMIP	(1459369)	
DAMIP	(1253793)	
AerChemMIP	(767400)	
VolMIP	(291147)	
C4MIP	(149961)	



← → ↻ aims2.llnl.gov/search

Filter By Transfer Options

Any Only Globus Transferrable

Filter with Facets Expand All

- > General
- > Identifiers
- > Resolutions
- > Labels
- > Classifications
- ▼ Additional Properties
 - Version Type ⓘ: Latest
 - Result Type ⓘ: Originals and Replicas
 - Version Date Range ⓘ: Start da... → End date
- > Filename

După selectarea **ACTIVITY ID** (ScenariMIP în cazul nostru), trebuie să selectăm EXPERIMENT ID și SOURCE ID.

După aceasta, se poate selecta membrul ansamblului (uneori modelul oferă doar un singur membru). Literele **r**, **p** și **f** oferă informații despre realizare (realization), fizică (physics) și forțări (forcings).

▼ Identifiers

Sub Experiment ID ⓘ: Select option(s) ▼

Experiment ID ⓘ: ssp585 (6) × ▼

Source Type ⓘ: Select option(s) ▼

Institution ID ⓘ: Select option(s) ▼

Source ID ⓘ: ACCESS-CM2 (3) ×
CanESM5 (3) × ▼

▼ Resolutions

Nominal Resolution ⓘ: Select option(s) ▼

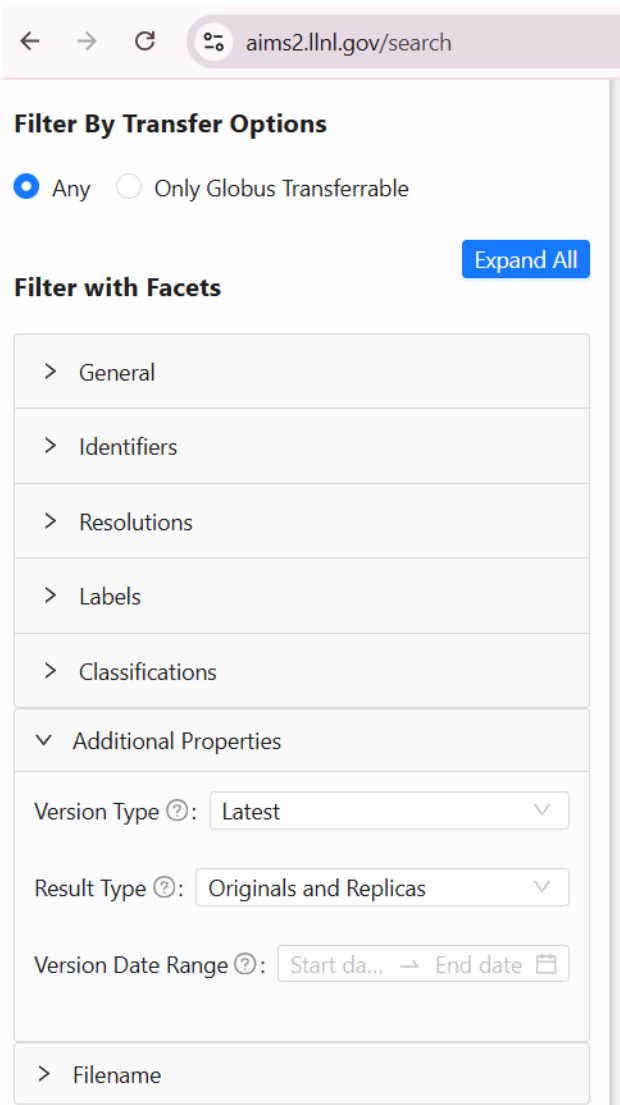
▼ Labels

Variant Label ⓘ: Select option(s) 🔍

Grid Label ⓘ: SS

r1i1p1f1	(1304)
r1i1p2f1	(1168)
r10i1p1f1	(1123)
r2i1p1f1	(1115)
r5i1p1f1	(1115)
r6i1p1f1	(1112)
r7i1p1f1	(1094)
r4i1p1f1	(1088)

În final, se poate filtra și după frecvența temporală, numele variabilei și dacă se afișează doar seturile de date originale sau și replicile.



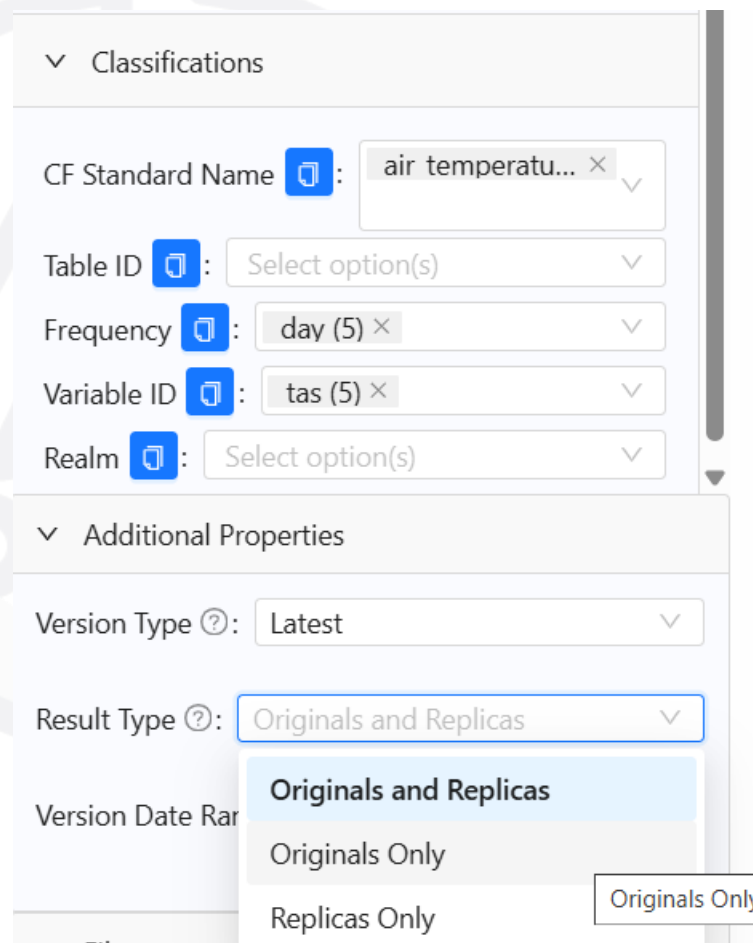
← → ↻ aims2.llnl.gov/search

Filter By Transfer Options

Any Only Globus Transferrable

Filter with Facets [Expand All](#)

- > General
- > Identifiers
- > Resolutions
- > Labels
- > Classifications
- ▼ Additional Properties
 - Version Type ⓘ: Latest
 - Result Type ⓘ: Originals and Replicas
 - Version Date Range ⓘ: Start da... → End date
- > Filename



▼ Classifications

CF Standard Name ⓘ: air temperatu... ×

Table ID ⓘ: Select option(s) ▼

Frequency ⓘ: day (5) ×

Variable ID ⓘ: tas (5) ×

Realm ⓘ: Select option(s) ▼

▼ Additional Properties

Version Type ⓘ: Latest ▼

Result Type ⓘ: Originals and Replicas ▼

Version Date Range ⓘ: Start da... → End date

- Originals and Replicas
- Originals Only
- Replicas Only

Originals Only

Selected Number of Files: 15

Selected Files Size: 16.29 GB

<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	CMIP6.ScenarioMIP.CCCma.CanESM5.ssp585.r1i1p1f1.day.pr.gn	2	1.67 GB	wget	<input type="button" value="Download"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	CMIP6.ScenarioMIP.CCCma.CanESM5.ssp585.r1i1p1f1.day.tasmax.gn	2	1.49 GB	wget	<input type="button" value="Download"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

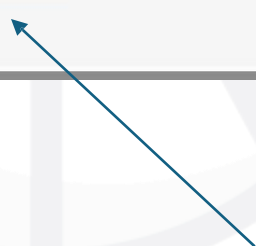
< 1 > 10 / page

Download Your Cart

Select datasets in your cart and confirm your download preference. Speeds will vary based on your bandwidth and distance from the data node serving the files.

wget

Metagrid Version: v1.5.1



În cele din urmă, poți descărca fișierele selectate folosind GLOBUS sau poți obține un script wget.

Descărcarea datelor cu wget în bash

bash wget*.sh -s
-s omite securitatea

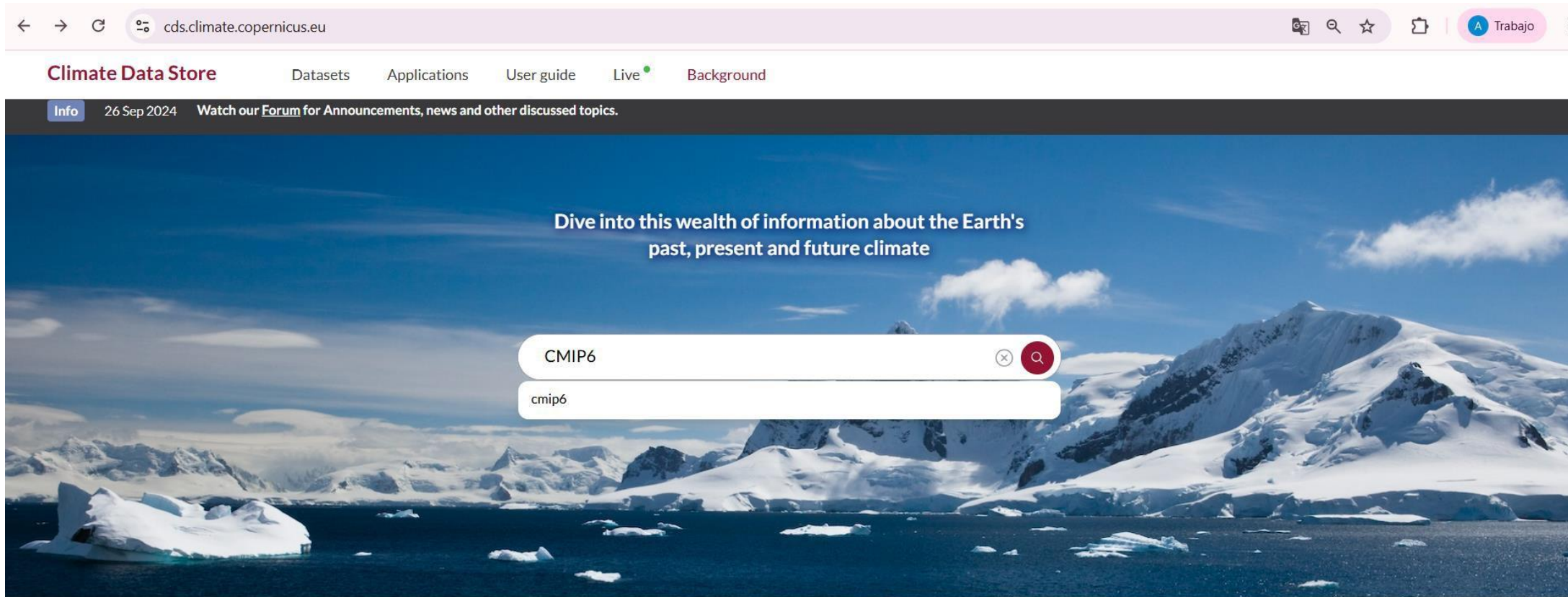
```
/downloads/historical_download/CMCC-CM2-VHR4]> bash wget_script_2025-1-30_0-22-33.sh -s
```

```
*****
*
* Note that new functionality to allow authentication without the need for
* certificates is available with this version of the wget script. To enable,
* use the "-H" option and enter your OpenID and password when prompted:
*
* $ wget_script_2025-1-30_0-22-33.sh -H [options...]
*
* For a full description of the available options use the help option:
*
* $ wget_script_2025-1-30_0-22-33.sh -h
*
*****
Running wget_script_2025-1-30_0-22-33.sh version: 1.3.2
Use wget_script_2025-1-30_0-22-33.sh -h for help.

Script created for 65 file(s)
(The count won't match if you manually edit this file!)

pr_day_CMCC-CM2-VHR4_hist-1950_r1i1p1f1_gn_19500101-19501231.nc ..Downloading
--2025-07-06 19:08:03-- https://esgf.ceda.ac.uk/thredds/fileServer/esg_cmip6/CMIP6/HighResMIP/CMCC/CMCC-CM2-VHR4/hist-1950/r1i1p1f1/day/pr/gn/v20210308/pr_day_CMCC-CM2-VHR4_hist-1950_r1i1p1f1_gn_19500101-19501231.nc
Resolving esgf.ceda.ac.uk (esgf.ceda.ac.uk)... 130.246.128.97
Connecting to esgf.ceda.ac.uk (esgf.ceda.ac.uk)|130.246.128.97|:443... connected.
HTTP request sent, awaiting response... 206 Partial Content
Length: 1012955932 (966M), 1003302808 (957M) remaining [application/octet-stream]
Saving to: 'pr_day_CMCC-CM2-VHR4_hist-1950_r1i1p1f1_gn_19500101-19501231.nc'

01-19501231.nc          5%[+===>] 49.12M  2.46MB/s  eta 6m 20s
```



<https://cds.climate.copernicus.eu/>

← → ↻ 📄 cds.climate.copernicus.eu/datasets?q=CMIP6

Climate Data Store Datasets Applications User guide Live ● Background

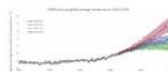
We found 13 results 0 on ADS 0 on EWDS

Filter by

- Product type** ▼
- Provider** ▼
- Sector** ▼
- Spatial coverage** ▼
- Temporal coverage** ▼
- Variable domain** ▼

CMIP6 climate projections

Updated on 10 January 2025

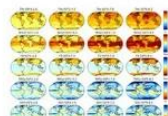


This catalogue entry provides daily and monthly global climate projections data from a large number of experiments, models and tim the sixth phase of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6). CMIP6 data underpins the Intergovernmental Panel on Clin

✓ Quality Assurance |
 Climate projections
Global
Future
Past
Present
Atmosphere (surface)
Atmosphere (

Climate extreme indices and heat stress indicators derived from CMIP6 global climate projections

Updated on 31 January 2025

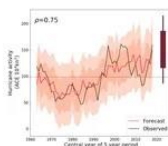


The dataset provides climate extreme indices related to temperature and precipitation as defined by the Expert Team on Climate Ch well as selected heat stress indicators (HSI). The indices are provided for historical and future climate projections (SSP1-2.6, SS...

Climate indices
Climate projections
Global
Future
Past
Land (biosphere)

CMIP6 predictions underpinning the C3S decadal prediction prototypes

Published on 23 March 2021



This catalogue entry provides daily and monthly global climate model data from Decadal Climate Predictions Project (DCPP) experir Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6). The decadal data in the Climate Data Store (CDS) are a quality-controlled subset

Climate projections
Global
Future
Past
Present
Atmosphere (surface)
Atmosphere (upper air)

CMIP6 climate projections

Overview

Download

Quality

Documentation

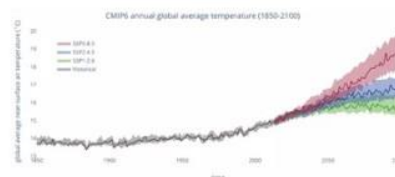
This catalogue entry provides daily and monthly global climate projections data from a large number of experiments, models and time periods computed in the framework of the sixth phase of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6).

CMIP6 data underpins the Intergovernmental Panel on Climate Change 6th Assessment Report. The use of these data is mostly aimed at:

- addressing outstanding scientific questions that arose as part of the IPCC reporting process;
- improving the understanding of the climate system;
- providing estimates of future climate change and related uncertainties;
- providing input data for the adaptation to the climate change;
- examining climate predictability and exploring the ability of models to predict climate on decadal time scales;
- evaluating how realistic the different models are in simulating the recent past.

The term "experiments" refers to the three main categories of CMIP6 simulations:

- Historical experiments which cover the period where modern climate observations exist. These experiments show how the GCMs performs for the past climate and can be used as a reference period for comparison with scenario runs for the future. The period covered is typically 1950-2014.



Quality Assurance

Data Management

Data records

Metadata

Documentation

References

[Citation and attribution](#)

DOI: [10.24381/cds.c866074c](https://doi.org/10.24381/cds.c866074c)

Licence

[CMIP6 - Data Access - Terms of Use](#)

Publication date

2021-03-23

<https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/projections-cmip6?tab=overview>

CMIP6 climate projections

Overview

Download

Quality

Documentation

The Quality information is work in progress, and the content for this release was prepared based on the previous operational version of the CDS. The CDS datasets are assessed by the Evaluation and Quality Control (EQC) function of C3S independently of the data supplier.

Fitness for purpose

Evaluated on 20/03/2025

The CMIP6 initiative brings together state-of-the-art Global Climate Models (GCMs) to enhance our understanding of past, present, and future climate dynamics driven by natural variability and changes in anthropogenic radiative forcing. GCMs are fully coupled, namely, they are idealised for reproducing the complex interactions among the different components of the climate system (atmosphere, sea, land, ice, sea-ice).

Key strengths

- **Global coverage:** GCMs produce self-consistent climate simulations over the entire Globe for a wide spectrum of variables belonging to the different climate system components (atmosphere, sea, land, ice). For the atmospheric variables, different pressure levels can be selected.
- **Temporal coverage:** CMIP6 provide climate integrations over long periods. This is essential to a proper evaluation of internal climate variability and the inherent statistical robustness of trends.
- **Multiple scenarios:** Future projections uncertainty can be covered by considering different hypotheses of future radiative forcing (SSPs). This informs about the dependency of future change trajectories on future societal paths (scenario uncertainty).
- **Multi-model ensemble:** The large number of GCMs present in CMIP6 allows to cover the uncertainty due to the model response to a given level of radiative forcing (model uncertainty).

Key limitations

- **Relatively coarse resolution:** GCMs are idealised to study the response of the large-scale circulation and teleconnections to changes in radiative forcing. Still, relatively coarse resolution (from 80 km to 250 km) hinders the possibility of directly connecting their outputs to regional/local scale impact studies like hydrology, agriculture, tourism and energy sectors. For instance, if the user question is whether an alpine valley can be favourable for wind power installation under future climate conditions, GCMs may be a sub-optimal tool for this type of analysis.

Quality Assurance

[Data Management](#) [Data records](#) [Metadata](#) [Documentation](#) 

References

[Citation and attribution](#)

DOI: [10.24381/cds.c866074c](https://doi.org/10.24381/cds.c866074c)

Licence

[CMIP6 - Data Access - Terms of Use](#)

Publication date

2021-03-23

Update date

2025-01-10

Standard metadata

[STAC](#) 

CMIP6 climate projections

Overview

Download

Quality

Documentation

Complete all required fields before submitting the request.

Temporal resolution

At least one selection must be made

 Monthly Daily Fixed (no temporal resolution)

Experiment

At least one selection must be made

 Historical SSP1-1.9 SSP1-2.6 SSP4-3.4 SSP5-3.4OS SSP2-4.5 SSP4-6.0 SSP3-7.0 SSP5-8.5

Variable

At least one selection must be made

 Air temperature Daily maximum near-surface air temperature Eastward near-surface wind Evaporation including sublimation and transpiration Grid-cell area for atmospheric grid variables Capacity of soil to store water Daily minimum near-surface air temperature Eastward wind Geopotential height Grid-cell area for ocean variables

Quality Assurance

[Data Management](#)[Data records](#)[Metadata](#)[Documentation](#)

References

[Citation and attribution](#)DOI: [10.24381/cds.c866074c](https://doi.org/10.24381/cds.c866074c)

Licence

[CMIP6 - Data Access - Terms of Use](#)

Publication date

2021-03-23

Update date

Model [Clear all](#)

- ACCESS-CM2 (Australia)
- AWI-CM-1-1-MR (Germany)
- BCC-CSM2-MR (China)
- CAMS-CSM1-0 (China)
- CanESM5-CanOE (Canada)
- CESM2-FV2 (USA)
- CESM2-WACCM-FV2 (USA)
- CMCC-CM2-HR4 (Italy)

- ACCESS-ESM1-5 (Australia)
- AWI-ESM-1-1-LR (Germany)
- BCC-ESM1 (China)
- CanESM5 (Canada)
- CESM2 (USA)
- CESM2-WACCM (USA)
- CIESM (China)
- CMCC-CM2-SR5 (Italy)

Year [Select all](#) [Clear all](#)

1850-1899

1900-1949

1950-1999

2000-2049

[Clear all](#)

<input type="checkbox"/> 2000	<input type="checkbox"/> 2001	<input type="checkbox"/> 2002	<input type="checkbox"/> 2003	<input type="checkbox"/> 2004
<input type="checkbox"/> 2005	<input type="checkbox"/> 2006	<input type="checkbox"/> 2007	<input type="checkbox"/> 2008	<input type="checkbox"/> 2009
<input type="checkbox"/> 2010	<input type="checkbox"/> 2011	<input type="checkbox"/> 2012	<input type="checkbox"/> 2013	<input type="checkbox"/> 2014
<input checked="" type="checkbox"/> 2015	<input checked="" type="checkbox"/> 2016	<input checked="" type="checkbox"/> 2017	<input checked="" type="checkbox"/> 2018	<input checked="" type="checkbox"/> 2019
<input checked="" type="checkbox"/> 2020	<input checked="" type="checkbox"/> 2021	<input checked="" type="checkbox"/> 2022	<input checked="" type="checkbox"/> 2023	<input checked="" type="checkbox"/> 2024
<input checked="" type="checkbox"/> 2025	<input checked="" type="checkbox"/> 2026	<input checked="" type="checkbox"/> 2027	<input checked="" type="checkbox"/> 2028	<input checked="" type="checkbox"/> 2029

API request

Please go to the [documentation page](#) for information as to how to use the CDS API.

</> Hide API request code

```
import cdsapi

dataset = "projections-cmip6"
request = {
    "temporal_resolution": "daily",
    "experiment": "ssp5_8_5",
    "variable": "daily_maximum_near_surface_air_temperature",
    "model": "access_cm2",
    "year": [
        "2015", "2016", "2017",
        "2018", "2019", "2020",
        "2021", "2022", "2023",
        "2024", "2025", "2026",
        "2027", "2028", "2029",
        "2030", "2031", "2032",
        "2033", "2034", "2035",
        "2036", "2037", "2038",
        "2039", "2040", "2041",
        "2042", "2043", "2044",
        "2045", "2046", "2047",
        "2048", "2049"
    ],
    "month": [
        "01", "02", "03",
        "04", "05", "06",
        "07", "08", "09",
        "10", "11", "12"
    ],
    "day": [
        "01", "02", "03",
        "04", "05", "06",
        "07", "08", "09",
        "10", "11", "12",
        "13", "14", "15",
        "16", "17", "18",
        "19", "20", "21",
```

- În **CDS**, unele seturi de date includ **mai puține variabile** și **membri ai ansamblului** decât în ESGF; **datele zilnice** nu sunt disponibile pentru fiecare variabilă (de exemplu: umiditatea solului).
- În **CDS**, utilizatorii pot **selecta o regiune** și o **perioadă de interes** înainte de descărcare.
- CDS include în prezent mai **puține activități CMIP** comparativ cu **ESGF**.
- CDS oferă, de asemenea, **produse specifice și adaptate** pentru uz comunitar (de exemplu: indici ai extremelor climatice și indicatori de stres termic derivați din proiecțiile climatice globale CMIP6). (e.g. [Climate extreme indices and heat stress indicators derived from CMIP6 global climate projections](#))
- Unele seturi de date din CDS includ o **filă „Quality”** cu informații despre **adecvarea pentru scop, asigurarea calității și detalii privind evaluarea calității**.

Inspectarea rezultatelor modelelor climatice

Pauză interactivă - împărtășirea experienței noastre de programare

- Cu ce **limbaje de programare** ești familiar(ă)? (ex: Python, R, Fortran, MATLAB...)
- Lucrezi cu **fișiere NetCDF**?
- Ai folosit instrumente precum *ncview* pentru a vizualiza rapid datele?
- Ești familiar(ă) cu platforme precum **ESGF** sau **Copernicus Climate Data Store (CDS)**?
- Folosești **CDO** (*Climate Data Operators*) pentru procesarea datelor?
- Lucrezi în **JupyterLab** sau medii similare de tip notebook?
- Cunoști **bash**? Îl folosești pentru scripturi sau rularea fluxurilor de lucru?

- Barriopedro D, García-Herrera R, Ordóñez C, et al (2023) Heat Waves: Physical Understanding and Scientific Challenges. *Rev Geophys* 61:.
<https://doi.org/10.1029/2022rg000780>
- Boé J, Somot S, Corre L, Nabat P (2020) Large discrepancies in summer climate change over Europe as projected by global and regional climate models: causes and consequences. *Clim Dyn* 54:2981–3002. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05153-1>
- Bordoni S, Kang SM, Shaw TA, et al (2025) The futures of climate modeling. *npj Clim Atmos Sci* 8:6–11. <https://doi.org/10.1038/s41612-025-00955-8>
- Branstator G (2002) Circumglobal Teleconnections, the Jet Stream Waveguide, and the North Atlantic Oscillation. *J Clim*
- Cohen J, Screen J a., Furtado JC, et al (2014) Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. *Nat Geosci* 7:627–637. <https://doi.org/10.1038/ngeo2234>
- Coumou D, Lehmann J, Beckmann J (2015) The weakening summer circulation in the Northern Hemisphere mid-latitudes
- Coumou D, Petoukhov V, Rahmstorf S, et al (2014) Quasi-resonant circulation regimes and hemispheric synchronization of extreme weather in boreal summer. *Proc Natl Acad Sci*. <https://doi.org/10.1073/pnas.1412797111>
- Domeisen DIV, Eltahir EAB, Fischer EM, et al (2023) Prediction and projection of heatwaves. *Nat. Rev. Earth Environ.* 4:36–50
- Ghil M, Lucarini V (2020) The Physics of Climate Variability and Climate Change. *Rev Mod Phys* 92:
- Graf M, Arnault J, Fersch B, Kunstmann H (2021) Is the soil moisture precipitation feedback enhanced by heterogeneity and dry soils? A comparative study. *Hydrol Process* 35:.
<https://doi.org/10.1002/hyp.14332>
- Hohenegger C, Brockhaus P, Bretherton CS, Schär C (2009) The soil moisture-precipitation feedback in simulations with explicit and parameterized convection. *J Clim* 22:5003–5020. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2604.1>
- Huntingford C, Cox PM, Ritchie PDL, et al (2024) Acceleration of daily land temperature extremes and correlations with surface energy fluxes. *npj Clim Atmos Sci* 7:.
<https://doi.org/10.1038/s41612-024-00626-0>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2023) Linking Global to Regional Climate Change. In: *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, pp 1363–1512

- Kornhuber K, Bartusek S, Seager R, et al (2024) Global emergence of regional heatwave hotspots outpaces climate model simulations. *Proc Natl Acad Sci* 121:.
<https://doi.org/10.1073/pnas.2411258121>
- Kornhuber K, Osprey S, Coumou D, et al (2019) Extreme weather events in early summer 2018 connected by a recurrent hemispheric wave-7 pattern. *Environ Res Lett* 14:.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab13bf>
- Lafon T, Dadson S, Buys G, Prudhomme C (2013) Bias correction of daily precipitation simulated by a regional climate model: A comparison of methods. *Int J Climatol* 33:1367–1381. <https://doi.org/10.1002/joc.3518>
- Lhotka O, Kyselý J, Plavcová E (2018) Evaluation of major heat waves' mechanisms in EURO-CORDEX RCMs over Central Europe. *Clim Dyn* 50:4249–4262.
<https://doi.org/10.1007/s00382-017-3873-9>
- Luo F, Selten F, Wehrli K, et al (2022) Summertime Rossby waves in climate models: Substantial biases in surface imprint associated with small biases in upper-level circulation. *Weather Clim Dyn* 3:905–935. <https://doi.org/10.5194/wcd-3-905-2022>
- Miralles DG, Gentile P, Seneviratne SI, Teuling AJ (2019) Land–atmospheric feedbacks during droughts and heatwaves: state of the science and current challenges. *Ann N Y Acad Sci* 1436:19–35. <https://doi.org/10.1111/nyas.13912>
- Miralles DG, Teuling AJ, Van Heerwaarden CC, De Arellano JVG (2014) Mega-heatwave temperatures due to combined soil desiccation and atmospheric heat accumulation. *Nat Geosci* 7:345–349. <https://doi.org/10.1038/ngeo2141>
- Neelin, 2011. *Climate Change and Climate Modeling*, Cambridge UP
- Patterson M (2023) North-West Europe Hottest Days Are Warming Twice as Fast as Mean Summer Days. *Geophys Res Lett* 50:.
<https://doi.org/10.1029/2023GL102757>
- Perkins SE, Alexander L V. (2013) On the measurement of heat waves. *J Clim* 26:4500–4517. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00383.1>
- Petoukhov V, Rahmstorf S, Petri S, Joachim H (2013) Quasiresonant amplification of planetary waves and recent Northern Hemisphere weather extremes.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1222000110/-/DCSupplemental>. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1222000110

- Sangelantoni L, Sobolowski S, Lorenz T, et al (2023) Investigating the representation of heatwaves from an ensemble of km-scale regional climate simulations within CORDEX-FPS convection. *Clim Dyn*. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06769-9>
- Sangelantoni L, Sobolowski SP, Soares PMM, et al (2025) Heatwave Future Changes From an Ensemble of Km-Scale Regional Climate Simulations Within CORDEX-FPS Convection. *Geophys Res Lett* 52:.. <https://doi.org/10.1029/2024GL111147>
- Santanello JA, Dirmeyer PA, Ferguson CR, et al (2018) Land-atmosphere interactions the LoCo perspective. *Bull Am Meteorol Soc* 99:1253–1272. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0001.1>
- Schär C, Vidale PL, Lüthi D, et al (2004) The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* 427:332–336. <https://doi.org/10.1038/nature02300>
- Schumacher DL, Seneviratne SI, Singh J, et al (2024) Exacerbated summer European warming not captured by climate models neglecting long-term aerosol changes. *Commun Earth Environ*. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01332-8>
- Seneviratne SI, Zhang X, Adnan M, et al (2021) Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Clim Chang 2021 Phys Sci Basis Contrib Work Gr I to Sixth Assess Rep Intergov Panel Clim Chang* 366
- Shaw TA, Voigt A (2015) Tug of war on summertime circulation between radiative forcing and sea surface warming. *Nat Geosci* 8:560–566. <https://doi.org/10.1038/ngeo2449>
- Soret A, Martínez-Botí A, Marcos-Matamoros R, et al 2025. Sub-seasonal and seasonal climate predictions for a sporting goods retailer company: Co-development of a climate service from scratch. *Climate Services*, 39, 100583. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2025.100583>
- Taylor CM, De Jeu RAM, Guichard F, et al (2012) Afternoon rain more likely over drier soils. *Nature* 489:423–426. <https://doi.org/10.1038/nature11377>
- Vautard R, Cattiaux J, Hap   T, et al (2023) Heat extremes in Western Europe increasing faster than simulated due to atmospheric circulation trends. *Nat Commun* 14:.. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42143-3>