

## Introduzione

Lo scopo della parte sperimentale del progetto è quello di realizzare un'applicazione Matlab dotata di interfaccia grafica.

L'applicazione sviluppata è in grado di effettuare delle richieste API in tempo reale per ottenere i dati dal Climate Data Store di Copernicus. In particolare l'app consente all'utente di scaricare e visualizzare i dati in live relativi alle previsioni climatiche del CMIP6 ristrette alle precipitazioni nevose in Basilicata.

L'app quindi mostrerà all'utente il grafico delle previsioni desiderate in funzione dell'arco temporale scelto e di alcuni parametri che a breve illustrerò.

Nello sviluppo dell'applicazione mi sono concentrato nella realizzazione della parte di BackEnd, ovvero la realizzazione di tutte le funzionalità che vengono chiamate dall'interfaccia con cui l'utente interagisce. Prima di vedere la struttura del backend farò una breve illustrazione del programma CMIP6 e del CDS.

## Global climate projections

Le proiezioni climatiche globali sono simulazioni del sistema climatico effettuate con modelli di previsione che emulano i processi fisici terrestri.

Questi modelli che coprono l'intero globo hanno lo scopo di mostrare gli effetti che le continue emissioni di gas serra avranno sul riscaldamento globale e sui cambiamenti del sistema climatico.

## CMIP

Il Coupled Model Intercomparison Project (CMIP), istituito nel 1995 dal World Climate Research Program (WCRP), è un database condiviso a livello internazionale di simulazioni di modelli climatici.

L'analisi dei dati CMIP consente di:

1. Migliorare la comprensione del clima
2. Migliorare la comprensione dell'impatto sui cambiamenti climatici a causa delle implicazioni sociali e ambientali
3. Valutare quanto siano realistici i diversi modelli nel simulare il passato recente.
4. Esaminare la prevedibilità del clima.

## CMIP6

Il CMIP6, sesta fase del Coupled Model Intercomparison Project, fornisce i dati delle proiezioni climatiche globali, giornaliere e mensili di un gran numero di esperimenti, modelli e periodi di tempo.

Il CMIP6 comprende 134 modelli provenienti da 53 centri di modellazione. La pubblicazione dei dati CMIP6 è iniziata nel 2019 e la maggior parte dei dati è stata completata nel 2022.

Un sottoinsieme di dati del CMIP6 è reso disponibile attraverso il Climate Data Store (CDS) per gli utenti del Copernicus Climate Change Service (C3S).

DATA DESCRIPTION	
Data type	Gridded
Projection	Regular latitude-longitude grid, ocean grid
Horizontal coverage	Global
Horizontal resolution	Varies between models
Vertical coverage	Single levels, pressure levels (1 - 1000 hPa)
Temporal coverage	From 1850 to 2014 for historical experiments From 2015 to 2100 for SSP experiments
Temporal resolution	Monthly, daily, fixed (no temporal resolution)
File format	NetCDF4
Conventions	Climate and Forecast (CF) Metadata Convention CF-1.7 CMIP-6.2
Versions	Latest version of the data is provided

## Global climate projections del CDS

Le proiezioni climatiche globali contenute nel Climate Data Store (CDS) sono un sottoinsieme dei dati CMIP6 sottoposti a una procedura di controllo di qualità che ne garantisce un elevato standard di affidabilità dei dati.

In particolare la nostra applicazione consente di scaricare i dati dal CDS in live tramite l'utilizzo dei metodi del **Climate Data Store Toolbox** sviluppato per **MATLAB**

Per il CDS sono state individuate 51 variabili fondamentali dell'archivio CMIP6, questi dati possono essere utilizzati per valutare i plausibili cambiamenti futuri del globo nell'ambito di una serie di percorsi socio-economici.

Noi utilizzeremo solo le variabili che hanno a che fare con le precipitazioni nevose ovvero le 3 seguenti variabili:

1. **Snow depth [m]**: indica lo spessore della neve in metri
2. **Snowfall flux [ $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ]** : indica la massa di acqua che precipita per unità di superficie sottoforma di neve.
3. **Surface snow amount [ $\text{kg m}^{-2}$ ]**: quantità di neve al suolo per unità di superficie

Parliamo ora dei SSP

## Shared Socioeconomic Pathways (SSPs)

Gli **SSP** sono scenari che descrivono gli sviluppi globali che portano a diverse sfide per la mitigazione e l'adattamento ai cambiamenti climatici e vengono utilizzati insieme alle simulazioni climatiche **RCP** per realizzare modelli di previsione.

Questi scenari sono sviluppati per fornire contesti socio-economici coerenti con diverse prospettive sul futuro, consentendo di valutare gli impatti dei cambiamenti climatici in diversi contesti di sviluppo economico e sociale.

Ci sono cinque scenari SSP principali nel CMIP6, designati da SSP1 a SSP5, ognuno dei quali rappresenta un diverso percorso di sviluppo socio-economico futuro:

### SSP1 (Sustainability)

- Prevede tendenze ottimistiche per lo sviluppo umano in cui si assiste ad un crescente spostamento verso pratiche sostenibili.
- Basse sfide di mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici.

### SSP2 (Middle of the Road)

- Rappresenta un percorso di sviluppo medio in cui le tendenze continuano i loro schemi storici senza deviazioni sostanziali.
- Sfide intermedie di mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici.

### SSP3 (Regional Rivalry)

- Prevede tendenze di sviluppo più pessimistiche, con scarsi investimenti nell'istruzione e nella salute, una popolazione in rapida crescita e un aumento delle disuguaglianze.
- Le sfide di mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici sono elevate.

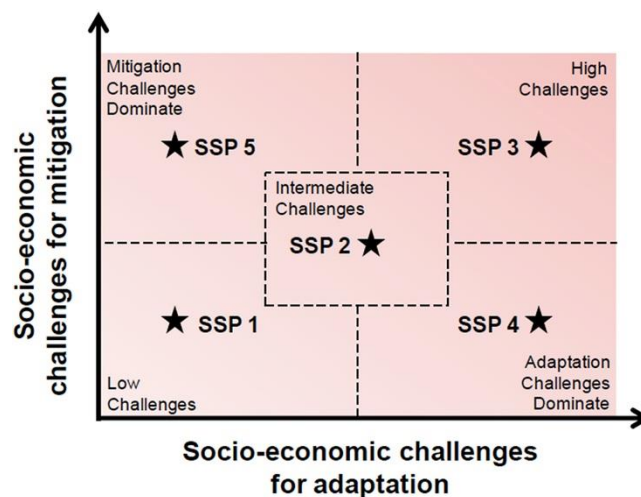
### SSP4 (Inequality)

- Prevede tendenze di sviluppo pessimistiche in cui dominano le grandi disuguaglianze tra i paesi che portano ad una società altamente vulnerabili ai cambiamenti climatici.
- Dominano le sfide dell'adattamento ai cambiamenti climatici.

### SSP5 (Fossil-Fueled Development)

- Prevede tendenze relativamente ottimistiche ma presuppone un'economia fortemente basata sui combustibili fossili.

Questi scenari sono stati sviluppati per essere utilizzati dai modelli climatici globali al fine di generare proiezioni climatiche coerenti con le diverse condizioni socio-economiche previste. Con gli SSP si riesce a simulare un'ampia gamma di possibili scenari futuri e a comprendere gli impatti dei cambiamenti climatici in contesti diversi.



### RCP

Gli RCP (Representative Concentration Pathways) sono degli scenari di emissione, ovvero delle rappresentazioni plausibili del futuro sviluppo delle concentrazioni dei gas a effetto serra.

Questi rappresentano un indicatore dell'andamento delle concentrazioni dei gas a effetto serra e degli aerosol in termini di forzante radiativo nel 2100 che corrisponde a sua volta a un determinato andamento delle emissioni umane.

**Il forzante radiativo** misura l'influenza di un fattore, ad esempio l'aumento dell'anidride carbonica o altri gas serra nell'atmosfera, nell'alterazione del bilancio tra energia entrante ed energia uscente nel sistema Terra-atmosfera.

Un forzante positivo è associato ad un riscaldamento della superficie terrestre, mentre un forzante negativo è associato ad un raffreddamento. È generalmente espresso in  $\text{W/m}^2$  e le variabili forzanti possono essere di origine antropica o naturale.

L'entità delle future emissioni antropiche dipende fortemente dalle decisioni prese sul piano politico a livello internazionale, dall'evoluzione della popolazione e dal progresso tecnologico. Queste incertezze sono rappresentate attraverso diversi scenari di emissione.

Tra i diversi scenari RCP troviamo:

#### **RCP2.6(Consequente protezione del clima)**

- Vengono presi provvedimenti in favore della protezione del clima attenuando l'aumento di gas ad effetto serra nell'atmosfera.
- Prevede un forzante radiativo nel 2100 di a  $2,6 \text{ W/m}^2$ .

#### **RCP4.5 (Limitata protezione del clima)**

- L'emissione di gas a effetto serra è arginata, ma le loro concentrazioni nell'atmosfera aumentano ulteriormente nei prossimi 50 anni.
- nel 2100 il forzante radiativo ammonterà a  $4,5 \text{ W/m}^2$

#### **RCP8.5 (Nessuna protezione del clima)**

- Non viene preso alcun provvedimento in favore della protezione del clima e le emissioni di gas a effetto serra aumentano in modo continuo.
- Corrisponde a un forzante radiativo di  $8,5 \text{ W/m}^2$  nel 2100.

Gli esperimenti dello scenario SSP del CMIP6 possono essere intesi in termini di due percorsi, un percorso socioeconomico condiviso (SSP) e un percorso di concentrazione rappresentativo (RCP). I due percorsi sono rappresentati dalle tre cifre che compongono il nome dell'esperimento.

1. SSP: è la prima cifra e rappresenta la trama del SSP per le sfide socio-economiche di mitigazione e adattamento che l'esperimento rappresenta.
2. RCP: è la seconda e la terza cifra, rappresentano la forzante climatica che l'esperimento segue.

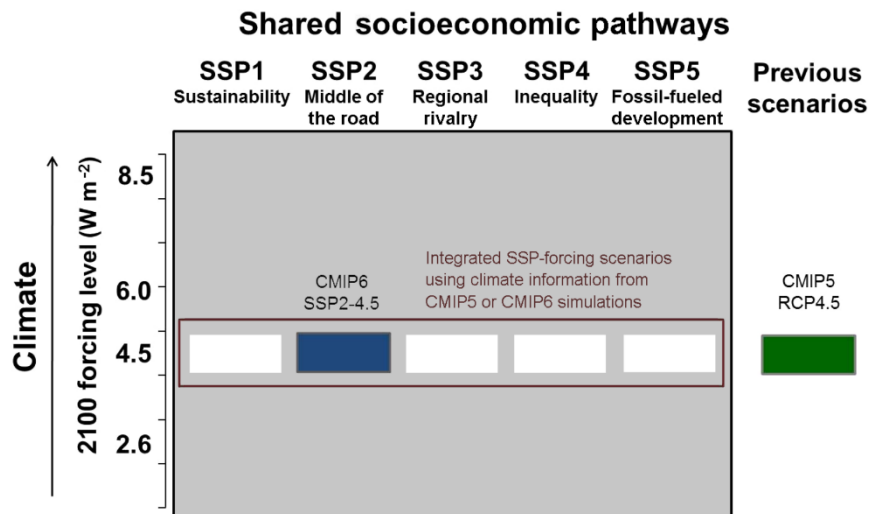
Ad esempio, l'esperimento **ssp245** segue l'**SSP2**, ovvero una trama con sfide intermedie di mitigazione e adattamento, e l'RCP4.5 che porta a un forcing radiativo di  $4,5 \text{ Wm}^{-2}$  entro il 2100.

#### **Esperimenti nel CDS**

1. Historical
  - a. L'esperimento storico è una simulazione del passato recente, dal 1850 al 2014
  - b. La simulazione storica viene utilizzata per valutare le prestazioni del modello rispetto al clima attuale e ai cambiamenti climatici osservati.
2. SSP
  - a. Gli esperimenti SSP del CMIP6 sono esperimenti relativi ad uno scenario che si estende al prossimo futuro, dal 2015 al 2100.

Gli esperimenti SSP del CMIP6 sono costituiti quindi da una combinazione di percorsi socioeconomici condivisi (SSP) e da percorsi di concentrazione rappresentativi (RCP).

La Figura seguente mostra come le SSP possono essere combinate con le simulazioni climatiche del CMIP6, utilizzando l'esempio di un percorso di forzante radiativo stabilizzato a  $4,5 \text{ W m}^{-2}$



In generale ogni combinazione di percorsi SSP rappresenta uno scenario di cambiamenti futuri del clima e della società che viene utilizzato per studiare l'impatto sugli ecosistemi.

Di seguito possiamo vedere la lista di SSP implementati nella nostra applicazione, in totale abbiamo 8 diversi scenari dal **SSP1-1.9** che rappresenta lo scenario più ottimistico possibile sull'evoluzione climatica fino ad arrivare al **SSP3-7.0** che è lo scenario più pessimistico.

### SSP1-1.9

Costituito da:

1. Scenario SSP1
2. sul RCP1.9, un percorso futuro con un forzamento radiativo di  $1,9 \text{ W/m}^2$  nell'anno 2100.

Utile per valutare il possibile obiettivo di limitare il riscaldamento medio globale a  $1,5^\circ\text{C}$  al di sopra dei livelli preindustriali, sulla base dell'accordo COP21 di Parigi.

### SSP1-2.6

Costituito da:

1. Scenario SSP1
2. RCP2.6, un percorso futuro con un forcing radiativo di  $2,6 \text{ W/m}^2$  nell'anno 2100.

Scenario a bassa forzatura, ottimistico dal punto di vista della sostenibilità.

### SSP2-4.5

Costituito da:

1. Scenario SSP2
2. RCP4.5, un percorso futuro con un forcing radiativo di  $4,5 \text{ W/m}^2$  nell'anno 2100.

Scenario che rappresenta la parte media dei percorsi di forzatura futuri plausibili.

### SSP3-7.0

Costituito da:

1. Scenario SSP3
2. RCP7.0, un percorso futuro con un forcing radiativo di 7,0 W/m<sup>2</sup> nell'anno 2100.

Lo scenario SSP3-7.0 costituisce un modello piuttosto pessimistico dal punto di vista della sostenibilità.

### **SSP4-3.4**

Costituito da:

1. Scenario SSP4
2. RCP3.4, un percorso futuro con un forcing radiativo di 3,4 W/m<sup>2</sup> nell'anno 2100.

### **SSP4-6.0**

Costituito da:

1. Scenario SSP4
2. RCP6.0 con un forcing radiativo di 6,0 W/m<sup>2</sup> nell'anno 2100.

### **SSP5-3.4OS**

Costituito da:

1. Scenario SSP5
2. RCP3.4-over, un percorso futuro con un picco e un declino del forcing verso un forcing radiativo finale di 3,4 W/m<sup>2</sup> nell'anno 2100.

Lo scenario SSP5-3.4OS effettua simulazioni a partire dall'anno 2040 fino al 2100.

### **SSP5-8.5**

Costituito da:

1. Scenario SSP5
2. RCP8.5 con un forcing radiativo di 8,5 W/m<sup>2</sup> nell'anno 2100.

## **Modelli**

Il sottoinsieme CDS-CMIP6 contiene svariati modelli di previsione addestrati sui dati sottoposti alla procedura di controllo di qualità del CMIP6, noi ci siamo limitati a considerare i modelli facenti parte della sfera europea. In particolare la lista dei modelli considerati è la seguente:

### **Europei**

1. EC-Earth3-AerChem (Europe)
2. EC-Earth3-Veg (Europe)
3. EC-Earth3 (Europe)
4. EC-Earth3-CC (Europe)
5. EC-Earth3-Veg-LR (Europe)

### **Francesi**

1. CNRM-CM6-1-HR (France)
2. CNRM-CM6-1 (France)
3. CNRM-ESM2-1 (France)

Italiani

1. CMCC-CM2-SR5 (Italy)

Tedeschi

1. AWI-CM-1-1-MR (Germany)

Norvegesi

1. NorESM2-MM (Norway)

Inglese

1. HadGEM3-GC31-LL (UK)
2. HadGEM3-GC31-MM (UK)

Ulteriori dettagli per quanto riguarda gli esperimenti e i modelli possono essere reperiti al seguente link:

<https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/CMIP6%3A+Global+climate+projections>

## Codice

Allo scopo di sviluppare l'applicazione proposta mi sono servito del Climate Data Store Toolbox con cui è possibile implementare le richieste API direttamente nel codice Matlab.

### Struttura del backEnd

Il backEnd è costituito da una serie di funzioni Matlab che implementano i casi d'uso dell'app e gestiscono le operazioni di calcolo. Di seguito una breve descrizione delle funzioni principali:

```
[experiment, variable, years, models] = selezionaParametri(esperimento, variabile, startYear, endYear);
```

E' la funzione che si occupa di tradurre le scelte dell'utente in stringhe formattate idonee alla creazione della richiesta API. Restituisce la lista di modelli idonei in seguito alle scelte dell'utente.

```
[model] = selezionaModello(models,modello);
```

Seleziona modello scelto completando la costruzione della richiesta con i parametri selezionati.

```
[pathDataset,F] = makeRequest(experiment,variable,model,years_string);
```

Il metodo makeRequest prende in input la scelta dell'utente e inoltra i parametri al metodo climateDataStoreDownloadAsync del toolbox CDS che formatta ed invia la richiesta API. Come risultato restituisce il percorso contenente il dataset appena scaricato.

```
[time,lat,lon,snw] = leggiDati(pathDataset);
```

Successivamente troviamo il metodo leggi dati che si occupa di aprire e leggere il contenuto del file netCDF contenente i dati della richiesta andando ad importare le variabili necessarie per visualizzare la previsione.

```
plotDati(snow_basilicata,variable,time,years_string)
```

Infine il metodo plotDati che va a realizzare il grafico delle previsioni in base alla variabile e alla finestra temporale scelta.

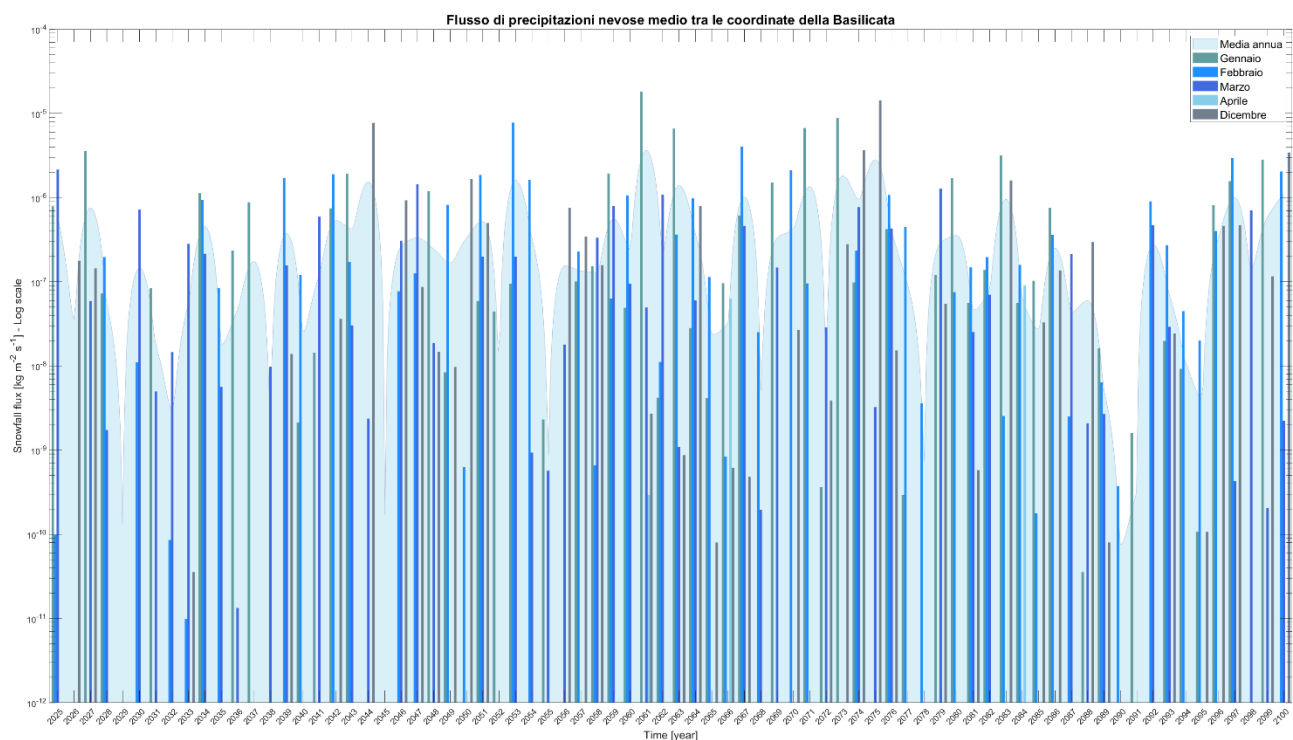
## Esempio query

In questa slide possiamo vedere un esempio del grafico mostrato dall'applicazione confrontando l'esperimento costituito dallo scenario più ottimistico e quello più pessimistico.

Nei seguenti grafici abbiamo il plot dell'andamento del flusso delle precipitazioni nevose dal 2025 al 2100 nell'area geografica della Basilicata.

### SSP1-1.9

Possiamo vedere quindi come in uno scenario che pone alla base il cambiamento climatico si riescano a conservare le precipitazioni nevose da qui a una settantina di anni.



### SSP3-7.0

Diversamente accade con l'esperimento SSP3-7.0 in cui si può facilmente notare una notevole riduzione delle precipitazioni nevose ed addirittura un azzeramento di esse a partire dal 2096 in poi.



