

DISS. ETH No. 23630

THE IMPACT OF ATMOSPHERIC
CIRCULATION VARIABILITY ON OBSERVED
AND SIMULATED CLIMATE TRENDS

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by
CLAUDIO SAFFIOTI
(MSc in Physics, University of Bologna, Italy)
born on 12.09.1987
citizen of Italy

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Reto Knutti, examiner
Dr. Erich M. Fischer, co-examiner
Prof. Dr. Christoph Raible, co-examiner
Prof. Dr. David W. J. Thompson, co-examiner

2016

ABSTRACT

As the ever increasing amount of evidence substantiates the effect of anthropogenic forcing on climate, the main focus of scientific research is rapidly shifting from detection and attribution of climate change to the quantification of its impact at the regional and local scales, where a major limit to the skill of projections is posed by internal variability. This arises from the interaction between the various components of the climate system in absence of any external forcing and constitutes the major source of uncertainty in the first decade for global projections and up to several decades over many regions, where it can conceal or enhance short-term forced trends.

High confidence has been achieved in the identification of the response to anthropogenic forcing of the global temperature pattern, which is primarily controlled by thermodynamic processes. In contrast, regional changes are strongly influenced by internal variability, whose response to anthropogenic forcing remains unclear.

An essential component of internal variability is represented by large-scale atmospheric circulation. This influences temperature and precipitation variability on the regional scale and plays a prominent role in the onset of extreme events, thus representing a key factor in climate predictions and in the assessment of risks related to climate change. As the uncertainty in model simulations related to atmospheric circulation is essentially irreducible, an in-depth understanding of its potential effects on climatic trends and variability is of paramount importance to provide impact-relevant information.

This thesis investigates the influence of atmospheric circulation on observed and simulated climate trends from the local to the hemispheric scale.

The circulation-induced contribution to temperature and precipitation is estimated and removed from data by means of dynamical adjustment

based on empirical orthogonal function analysis of sea level pressure. Five versions of dynamical adjustment are introduced and compared by applying them to an initial condition ensemble from a fully-coupled global climate model. Differences in atmospheric circulation in 40 CMIP5 climate models are investigated and it is shown that a substantial fraction of the uncertainty in projected temperature and precipitation trends over Europe is attributable to sea level pressure variability. A statistically significant response of atmospheric circulation to anthropogenic forcing is then identified in the multi-model ensemble.

The impact of atmospheric circulation on the observed short-term trends in temperature and precipitation over Europe is identified and the strong winter cooling experienced by the continent in recent years is attributed to sea level pressure variability. The effect of circulation on winter precipitation trends is shown to be strongly dependent on location and orography.

Dynamical adjustment is also applied to temperatures in the Northern Hemisphere extratropics to explain the pronounced seasonal and geographical asymmetry of the slowdown in the increase of the global mean temperature observed in recent years. This warming hiatus was mainly caused by a strong boreal winter cooling over land, while warming or near-zero trends were observed elsewhere and in other seasons. Although large-scale atmospheric circulation explains a substantial fraction of the winter cooling detected during the hiatus period, we show that missing observations led to a considerable underestimation of seasonal and annual mean temperature trends on the global scale.

Internal variability must be taken into account when comparing trends among model simulations and between models and observations. Dynamical adjustment can be effectively applied to reveal underlying forced trends, thus advancing the time of emergence of climate change, and to identify the impact of large-scale atmospheric circulation on local climatic conditions.

SOMMARIO

In conseguenza delle sempre più numerose conferme dell'effetto delle attività umane sul clima, l'attenzione della comunità scientifica si sta rapidamente reindirizzando dall'individuazione ed attribuzione dei cambiamenti climatici alla valutazione del loro impatto alle scale regionale e locale, operazione resa difficile dalla variabilità interna. Quest'ultima trae origine dall'interazione fra le varie componenti del sistema clima in assenza di forzanti esterne e rappresenta la maggiore fonte di incertezza per le proiezioni climatiche per il primo decennio a livello globale e per diversi decenni in molte regioni del pianeta, dove sul breve termine può oscurare o intensificare i *trend* forzati.

La risposta alla forzante antropica del campo di temperatura superficiale globale è stato identificato con grande precisione. Essa è principalmente controllata da processi di natura termodinamica, mentre le variazioni del clima su scala regionale sono fortemente influenzate dalla variabilità interna, la cui risposta alla forzante antropica rimane poco chiara.

Una componente essenziale della variabilità interna è data dalla circolazione generale dell'atmosfera. Questa influisce sui campi di temperatura e precipitazione su scala regionale e ricopre un ruolo fondamentale nella generazione di eventi estremi, rappresentando un fattore chiave nella stima dei rischi legati ai cambiamenti climatici. Essendo sostanzialmente irriducibile l'incertezza nelle proiezioni climatiche legata alla circolazione atmosferica, una comprensione profonda dei suoi potenziali effetti su variabilità e *trend* è di fondamentale importanza per un'efficace valutazione dell'impatto dei cambiamenti climatici.

Questa tesi indaga l'effetto della circolazione atmosferica sui *trend* osservati e simulati dalla scala locale a quella emisferica. L'impatto della circolazione sui valori di temperatura e precipitazione è stimato e rimosso per mezzo di un metodo di aggiustamento dinamico basato sull'analisi empirica ortogonale dei campi di pressione al livello del mare. Cinque

diversi approcci a tale metodo sono descritti e comparati applicandoli ad un gruppo di simulazioni alle condizioni iniziali da un modello climatico accoppiato. Si individuano quindi le differenze fra la circolazione atmosferica simulata da 40 modelli CMIP5 e si mostra che una frazione rilevante dell'incertezza nelle proiezioni di temperatura e precipitazione è da attribuirsi alla variabilità della pressione al livello del mare. Analizzando i modelli si individua inoltre una risposta statisticamente significativa della circolazione atmosferica alla forzante antropica.

Si identifica l'effetto della circolazione sui *trend* a breve termine di temperatura e precipitazione in Europa e si attribuisce la diminuzione della temperatura media invernale sul continente negli ultimi anni alla variabilità del campo di pressione al livello del mare. Si mostra inoltre come l'effetto della circolazione sulle precipitazioni invernali dipenda fortemente dalla posizione geografica e dall'orografia.

Il metodo dell'aggiustamento dinamico è applicato al campo di temperatura extratropicale dell'emisfero boreale per spiegare l'asimmetria geografica e stagionale del rallentamento dell'aumento della temperatura media globale negli ultimi anni. Tale iato è legato ad una forte diminuzione della temperatura media invernale nelle masse continentali dell'emisfero nord, mentre *trend* positivi o nulli sono stati osservati in altre regioni e stagioni. Malgrado la circolazione atmosferica abbia giocato un ruolo rilevante in tale diminuzione delle temperature invernali, si mostra che la parziale mancanza di misurazioni ha comportato una sostanziale sottostima delle variazioni delle temperature medie annuale e stagionali a livello globale.

La variabilità interna rappresenta un fattore di fondamentale importanza nel comparare *trend* tra simulazioni e tra simulazioni ed osservazioni. L'aggiustamento dinamico è uno strumento utile per identificare variazioni forzate del clima, per diminuire i tempi di emersione dei cambiamenti climatici e per stimare l'effetto della circolazione atmosferica sulle condizioni locali.