

I forzanti e il clima visti dall'Osservatorio Climatico di Lampedusa

L'ENEA effettua dal 1992 misure dei parametri climatici nel Mediterraneo presso l'isola di Lampedusa. L'evoluzione di questi parametri permette di quantificare il contributo di fattori naturali ed antropici alla variabilità climatica su scala regionale e su scala globale, e di mettere in luce le incertezze associate alla comprensione di alcuni processi-chiave.

DOI 10.12910/EAI2016-004

di **Fabrizio Anello, Carlo Bommarito, Salvatore Chiavarini, Lorenzo De Silvestri, Tatiana Di Iorio, Alcide di Sarra, Daniela Meloni, Francesco Monteleone, Giandomenico Pace, Salvatore Piacentino e Damiano Sferlazzo, ENEA**

L'*Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* è il gruppo di esperti di tutto il mondo che, su iniziativa dell'Organizzazione delle Nazioni Unite, periodicamente sintetizza le conoscenze relative agli aspetti scientifici, agli impatti e ai metodi di mitigazione e di adattamento ai cambiamenti climatici. L'IPCC ha pubblicato l'ultimo rapporto, il quinto, nel 2013-2014. La sintesi dell'IPCC [1], raccogliendo i risultati di un amplissimo numero di studi scientifici, mette in evidenza i

segnali più chiari dei cambiamenti legati al clima.

Variazioni osservate nel clima globale e mediterraneo

Su scala globale si osserva un aumento significativo della temperatura media globale dell'atmosfera vicino alla superficie, T , da quando ci sono misure affidabili, cioè dalla fine del 19° secolo. L'incremento di temperatura osservato tra il 1880 ed il 2012 è di $0,85\text{ °C}$, ed è di $0,72\text{ °C}$ per il periodo 1951-2012. L'aumento di

temperatura è particolarmente sensibile in Artide, dove si osserva una forte riduzione del ghiaccio marino e della copertura nevosa. La riduzione di estensione del ghiaccio marino artico, stimata in $-3,8 \pm 0,3\%$ per decennio, è associata ad una consistente decrescita di spessore e volume del ghiaccio. La riduzione annuale della massa di ghiacci in Groenlandia è passata da 34 Gt/a nel periodo 1992-2001 a 215 Gt/a nel periodo 2002-2011; in Antartide è passata da 30 Gt/a (1992-2001) a 147 Gt/a (2002-2011).



© UNITED NATIONS PHOTO

Ghiaccio polare sulle Isole Svalbard (Norvegia)
Fonte: UN Photo/Mark Garten

Il livello medio globale del mare è cresciuto di 19 cm dal 1901 a causa dell'espansione termica e del contributo di fusione del ghiaccio terrestre. Negli ultimi decenni si osservano incrementi significativi nel contenuto di calore degli oceani, dell'atmosfera e della criosfera; l'aumento di calore degli oceani è un ordine di grandezza maggiore che nelle altre due componenti [2].

Le misure mostrano inoltre un incremento del vapor d'acqua atmosferico [4], con implicazioni per il ciclo idrologico, le proprietà delle nubi, le precipitazioni ecc. Vari studi mostrano anche modificazioni del regime degli eventi estremi (temperatura, precipitazione, siccità), maggior-



Alba su radiometro solare
Fonte: ENEA, Osservatorio Climatico di Lampedusa



Una veduta dell' Osservatorio Climatico di Lampedusa. Sullo sfondo, il faro

mente evidenti su scala regionale. I dati più recenti mostrano che la temperatura globale ha raggiunto valori record negli anni 2014 e 2015. Il 2015 è risultato, in parte anche per l'influenza dell'intenso fenomeno di El Niño, l'anno più caldo nella serie (+0,89 °C rispetto alla T media del 20° secolo). Il Mediterraneo, un bacino semi-chiuso circondato da regioni con orografia complessa, caratterizzate da una forte pressione antropic, è stato indicato tra le regioni maggiormente sensibili ai cambiamenti climatici. Vari studi

mostrano che nel Mediterraneo l'incremento di T presenta una forte variabilità su scala regionale e sub-regionale, ma è comunque maggiore che a scala globale. Cambiamenti di lungo periodo si osservano anche nella temperatura superficiale del mare. Misure da satelliti mostrano un incremento di 0,035 °C/a nel periodo 1982-2012; cambiamenti significativi di temperatura e salinità si osservano negli ultimi decenni anche nelle acque profonde. Misure dirette mostrano un incremento del livello del mare tra 1,1 e 1,8 mm/a [3]; questo incremen-

to è minore di quello osservato su scala globale (circa 3 mm/a tra il 1993 ed il 2009). Nel Mediterraneo si osservano anche cambiamenti nella frequenza delle ondate di calore, degli eventi di precipitazione intensa, e dei periodi di siccità.

Misura dei parametri climatici a Lampedusa

Il clima della Terra è determinato dal bilancio tra la radiazione solare assorbita dal sistema e radiazione infrarossa (IR) uscente, e dai modi



in cui l'energia e la materia sono re-distribuite all'interno del sistema. I meccanismi che regolano il clima coinvolgono tutte le componenti del sistema terra (atmosfera, oceano, biosfera, criosfera, geosfera) attraverso interazioni con la radiazione e meccanismi di retroazione complessi. Il clima alle diverse scale spaziali e temporali dipende da una serie di processi fisici, chimici, radiativi e biologici spesso interconnessi. A causa di questa grandissima complessità, vari aspetti del sistema climatico sono ancora non compresi.

L'Organizzazione Meteorologica Mondiale, tramite il *Global Climate Observing System*, ha identificato le cosiddette variabili climatiche essenziali (<https://www.wmo.int/pages/prog/gcos/index.php?name=EssentialClimateVariables>), che sono le grandezze che è necessario misurare per studiare e quantificare i cambiamenti climatici e per fornire informazioni a coloro che debbono fare delle scelte per contrastarli. Le variabili climatiche essenziali permettono di studiare la variabilità dei forzanti climatici e dei principali processi ed effetti prodotti.

L'ENEA ha attivato nel 1992 un programma di campionamenti di aria per la misura dei gas ad effetto serra sull'isola di Lampedusa. Nel 1997 ha attivato una stazione di misura permanente dedicata allo studio del clima (<http://www.lampedusa.enea.it>), localizzata a Capo Grecale, lungo la costa nord-orientale dell'isola (35,52°N, 12,63°E). La misura di tutte le variabili climatiche essenziali atmosferiche è attiva da anni presso la Stazione di Lampedusa, che contribuisce a varie reti di misura europee e globali. Nel 2015 è stata

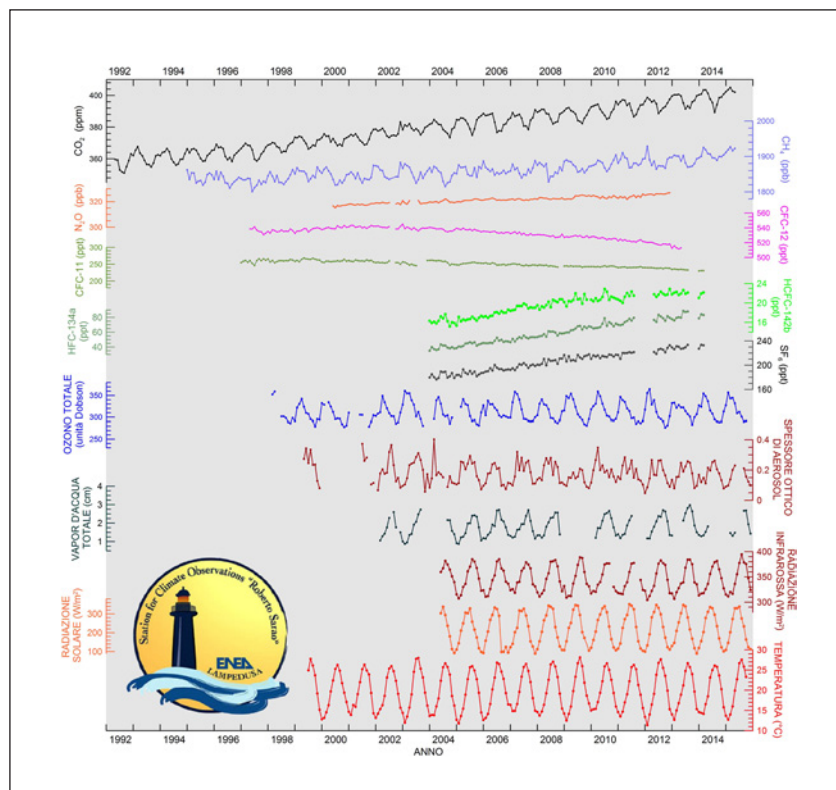


Fig. 1 Medie mensili di varie grandezze misurate presso la Stazione di Osservazioni Climatiche ENEA a Lampedusa

installata a sud-ovest di Lampedusa (35,49°N, 12,47°E) una boa oceanografica che servirà per integrare gli studi sul clima estendendoli alle variabili climatiche essenziali oceanografiche ed allo studio delle interazioni aria-mare.

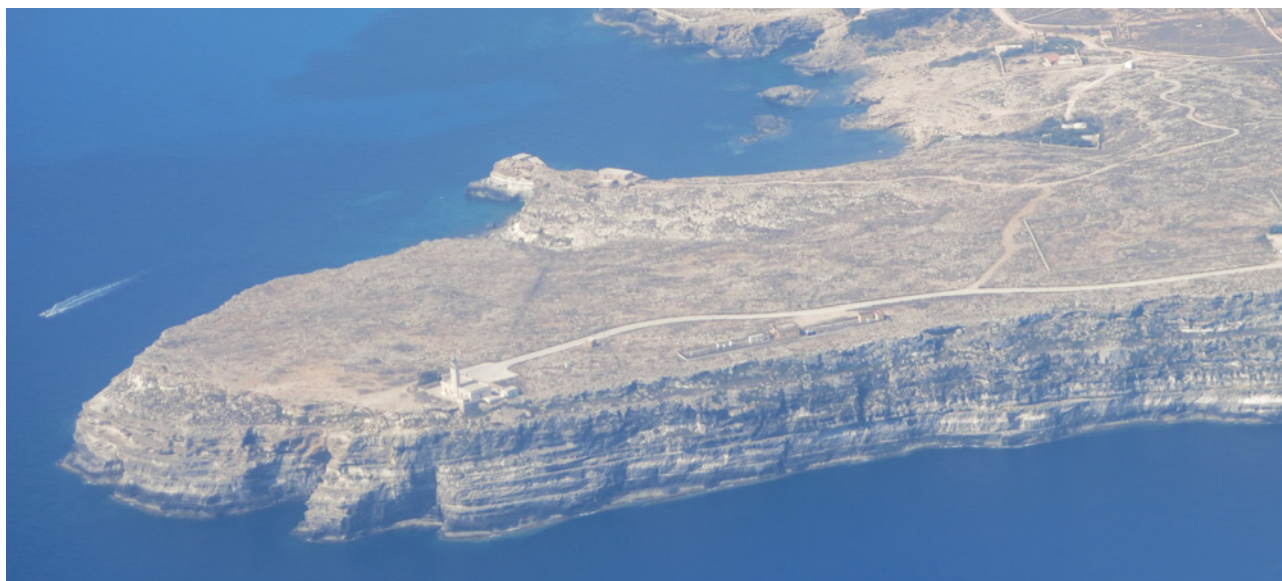
Lampedusa è un'isola di ridotte dimensioni, lontana da sorgenti rilevanti di inquinanti antropici, distante più di 100 km dal continente più vicino. Di conseguenza, le misure effettuate a Lampedusa sono rappresentative del Mediterraneo centrale e delle condizioni di fondo regionale.

La Figura 1 mostra l'evoluzione dei valori medi mensili di alcune delle grandezze osservate a Lampedusa negli ultimi 24 anni. Tra queste

troviamo i principali forzanti del clima, sia naturali che antropici, ed i flussi di radiazione, che permettono di osservare e quantificare gli effetti prodotti da modificazioni nella composizione chimica e struttura dell'atmosfera sul bilancio energetico.

Nubi, vapor d'acqua, altri gas ad effetto serra, aerosol e ozono sono i principali costituenti atmosferici in grado di influenzare il bilancio della radiazione ed il clima.

Le variazioni di lungo periodo più evidenti si osservano per CO₂, N₂O, e CH₄. Il contenuto atmosferico di CO₂ è aumentato di circa 45 parti per milione (ppm) in 23 anni. Il tasso di crescita e l'ampiezza del ciclo annuale mostrano una gran-



Una veduta dall'alto di Capo Grecale con al centro l'Osservatorio Climatico di Lampedusa

de variabilità interannuale, legata anche a fenomeni globali, come El Niño, ed a fenomeni di trasporto [4]. Per determinare il tasso di crescita medio è stato calcolato un *fit* della concentrazione media mensile di CO₂ con la funzione $f(t)=A + B t + C \sin(2\pi t + \varphi)$ dove *t* è il tempo. Il tasso di crescita annuale, *B*, è di 1,87 ppm/a. Applicando lo stesso *fit* ai dati mensili di CH₄ si ottiene un tasso di crescita annuale medio di 3,3 parti per miliardo (ppb) /a. Anche il protossido di azoto, N₂O, mostra una crescita rapida, di circa 0,7 ppb/a; CFC-11 e CFC-12 mostrano una progressiva riduzione dopo l'applicazione del Protocollo di Montreal e degli accordi successivi. Alcune specie, sostituti dei CFC e potenti gas ad effetto serra, mostrano invece una crescita molto rapida. È il caso di vari idroclorofluorocarburi (HCFC, sostituti dei CFC di prima generazione, la cui produzione è stata vietata nella Unione Europea dal 2010), e degli idrofluorocarburi (HFC, che hanno sostituito i HCFC

in quanto non contengono elementi dannosi per l'ozono).

La Figura 1 mostra la crescita degli ultimi anni di un HCFC (HCFC-142b), di cui si vede un rallentamento nella crescita a partire dal 2008, di un HFC (HFC-134a, usato principalmente nei sistemi di refrigerazione, è quello che sta crescendo più rapidamente, con un tasso di circa 8,5%/a), e di SF₆. La loro concentrazione è ancora molto bassa (dell'ordine di parti per 10¹² molecole, ppt), ma la loro presenza in atmosfera è dovuta quasi esclusivamente alle emissioni antropiche e sta rapidamente aumentando.

Tutti questi gas ad effetto serra hanno registrato una crescita notevolissima a seguito dello sviluppo industriale, a partire dal 1750. Il contenuto di CO₂ è passato da circa 280 ppm nel 1750 a 400 ppm nel 2014; la crescita è dovuta principalmente all'uso dei combustibili fossili e, in minor misura, alla produzione di cemento: da queste due sorgenti dal 1750 ad oggi sono stati emessi circa 375 miliardi

di tonnellate di CO₂; metà di questo quantitativo è stato emesso dagli anni '80 ad oggi. Il totale delle emissioni antropiche di CO₂ corrisponde a un contenuto addizionale in atmosfera di circa 580 ppm [5]. In media metà di queste emissioni rimane in atmosfera, un quarto viene assorbito dalla vegetazione terrestre ed un quarto dagli oceani.

Il contenuto atmosferico di metano è passato da circa 700 ppb nel periodo pre-industriale ai valori attuali di circa 1850 ppb.

Si stima che l'incremento di CO₂, CH₄, N₂O e degli altri gas ad effetto serra (incluso l'ozono) dovuto alle attività umane dal periodo pre-industriale ad oggi abbia prodotto una perturbazione al bilancio radiativo planetario infrarosso medio annuale alla tropopausa di quasi 3 W/m². Per convenzione il segno del flusso verso il basso è positivo: di conseguenza una perturbazione positiva alla tropopausa corrisponde ad una diminuzione del flusso uscente (dovuta in questo caso ad un incremento dell'o-

pacità dell'atmosfera nell'IR). La diminuzione di flusso uscente è associata ad un incremento dell'energia radiativa intrappolata in troposfera (un incremento di effetto serra cui è associato un aumento di T).

Il vapor d'acqua è responsabile di circa il 50% dell'effetto serra naturale, e partecipa in numerosi processi, tra cui quelli legati alla formazione delle nubi, che giocano un ruolo importantissimo nel bilancio della radiazione, sia nello spettro solare che infrarosso. Il vapor d'acqua, inoltre, svolge un ruolo fondamentale nell'amplificare il riscaldamento prodotto dai gas ad effetto serra a vita lunga attraverso un potente meccanismo di retroazione positiva. Come appare in Figura 1, l'andamento del vapor d'acqua nel Mediterraneo presenta una forte componente stagionale. La tendenza alla crescita che appare in Figura 1 va verificata, poiché queste misure sono ottenute con strumenti diversi e non sono state ancora verificate nel dettaglio.

Anche l'ozono totale, misurato a Lampedusa con uno spettrofotometro Brewer, mostra un evidente ciclo annuale, con un massimo in primavera ed un minimo autunnale.

L'aerosol atmosferico presenta una forte variabilità stagionale ed interannuale, con massimi in primavera-estate legati soprattutto al trasporto di particelle minerali dal deserto del Sahara [6]. Le misure di spessore ottico dell'aerosol mostrano una piccola tendenza alla diminuzione, non statisticamente significativa.

Le misure di T, iniziate nel 1999 a Lampedusa, mostrano una significativa variabilità interannuale; sono evidenti estati particolarmente calde nel 2003, 2009, 2012 e 2015, ed inverni caldi nel 2006-2007 e 2009-2010.

Forzanti climatici ed evoluzione del clima

La variabilità della concentrazione delle specie di Figura 1 è il risultato di numerosi fattori, tra cui l'intensità e distribuzione delle sorgenti naturali ed antropiche e dei processi di rimozione, la vita media di ogni composto in atmosfera, e il trasporto.

La Figura 1 mostra anche l'evoluzione della densità di flusso di radiazione solare ed infrarossa (componenti verso la superficie), che risentono degli effetti delle variazioni di tutte le specie atmosferiche (incluse le nubi) e costituiscono contributi essenziali al bilancio energetico superficiale. I gas ad effetto serra, ad esempio, influenzano il bilancio energetico IR; vapor d'acqua e ozono, oltre che nell'IR, presentano bande di assorbimento nello spettro solare. Aerosol e nubi interagiscono in maniera complessa sia con la radiazione solare che IR. Questi processi radiativi contribuiscono a determinare l'evoluzione di T, che a sua volta influenza dinamica, radiazione, evaporazione, e numerosi altri processi.

Le variazioni relative di aerosol e vapor d'acqua su scala stagionale sono dell'ordine del 200-300%, e sono molto maggiori di quelle delle altre specie (2,5% per CO₂; circa 20% per l'ozono). La perturbazione radiativa prodotta dalle modificazioni stagionali di vapor d'acqua è significativa (nell'IR circa +25 W/m² alla superficie, e +10 W/m² alla tropopausa passando da 1 a 2 cm di vapor d'acqua). Vari studi effettuati a Lampedusa permettono di quantificare gli effetti radiativi prodotti dagli aerosol nel Mediterraneo. La perturbazione radiativa media giornaliera prodotta dal particolato nella regione spettrale solare è di circa -8 W/m² alla

tropopausa, e di circa -20 W/m² alla superficie, parzialmente compensata da effetti nell'IR [7, 8]. La perturbazione radiativa associata alle variazioni stagionali degli aerosol è di ampiezza simile. Gli effetti radiativi delle nubi sono ancora maggiori rispetto a quelli dell'aerosol.

Comparativamente, la variazione stagionale di CO₂ produce una perturbazione radiativa dell'ordine di +0,12 W/m² alla superficie, e +0,16 W/m² alla tropopausa.

Di conseguenza, gli effetti radiativi delle variazioni stagionali di nubi, aerosol e vapor d'acqua sono molto maggiori di quelli prodotti dalle variazioni stagionali dei gas ad effetto serra antropici. C'è da tenere presente che, a differenza dei gas ad effetto serra persistenti, aerosol e nubi hanno una vita media breve, ed anche i loro effetti radiativi variano su scala locale e regionale.

Certezze, incertezze, e proiezioni future

L'individuazione delle cause del riscaldamento globale e delle altre variazioni in atto è uno degli aspetti di grande complessità della scienza del clima. L'attribuzione dell'aumento di temperatura all'incremento antropico dei gas ad effetto serra è basato su varie indicazioni, alcune delle quali sono molto robuste.

Molti esperimenti con modelli climatici mostrano che non sia possibile ricostruire l'aumento di T osservato negli ultimi 100 anni senza includere l'incremento dei gas ad effetto serra [ad es., 9]. Una delle indicazioni forti che il riscaldamento globale sia dovuto ai gas ad effetto serra è fornita da una specie di impronta caratteristica, che è quella che descrive la dipendenza con quota e



Una panoramica della strumentazione sul tetto dell'Osservatorio Climatico di Lampedusa

(nell'oceano) profondità e latitudine delle variazioni di temperatura [ad es., 10]. Processi diversi produrrebbero dipendenze diverse nella crescita della temperatura.

Recentemente, inoltre, sono state presentate le prime osservazioni dirette della perturbazione radiativa prodotta alla superficie dall'incremento di CO₂ avvenuta tra il 2000 ed il 2010 (22 ppm). Queste osservazioni mostrano una variazione di alcune strutture spettrali IR, e le caratteristiche degli spettri rendono inequivocabile l'attribuzione delle variazioni all'incremento antropico di CO₂ [11].

Data la complessità del sistema, rimangono tuttavia ancora vari aspetti e meccanismi solo parzialmente compresi. In particolare, esistono incertezze significative nella determinazione della sensibilità climatica, che è la quantificazione della risposta termica al raddoppio del contenuto atmosferico di CO₂. La determinazione della sensibilità climatica è particolarmente complessa a causa dell'alto grado di interconnessione e dell'esistenza di numerosi meccanismi di retroazione, che agiscono su differenti scale spaziali e temporali. Gli aspetti maggiormente critici nella determinazione della sensibi-

lità climatica, e quindi nella comprensione del funzionamento del clima, sono legati al ruolo di aerosol e nubi [12]. Come abbiamo visto, i loro effetti radiativi sono grandi (per gli aerosol, in particolar modo nel Mediterraneo), e piccole variazioni nella distribuzione e proprietà di queste due componenti possono aver influenzato nel passato, e possono influenzare nel futuro il clima. Variazioni passate delle caratteristiche di aerosol e nubi, molto difficili da determinare, possono aver compensato parte del riscaldamento prodotto dai gas ad effetto serra; una riduzione del loro effetto di compensazione potrebbe produrre un riscaldamento maggiore di quanto previsto [12].

Per questa ragione è necessario continuare le osservazioni dell'evoluzione del clima e gli studi che permettono di comprendere i processi e le interazioni ancora non ben compresi.

Ringraziamenti

Le misure a Lampedusa sono state supportate negli anni, oltre che da ENEA, da finanziamenti del Ministero dell'Istruzione, Università e Ricerca (negli ultimi anni i Progetti

NextData e RITMARE), del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, dell'Agenzia Spaziale Italiana, dell'Unione Europea. Lampedusa contribuisce al Programma *Global Atmosphere Watch*, dell'Organizzazione Meteorologica Mondiale, ed alle infrastrutture di ricerca Europee *Integrated Carbon Observation System*, *European Multidisciplinary Seafl oor and water column Observatory*, e *Aerosol, Clouds, and Trace gases*, oltre che a varie reti europee e globali di osservazione. La stazione di misura ospita strumentazione di vari Istituti di ricerca Internazionali. Si ringraziano Paolo Chamard, per aver avviato e seguito le attività a Lampedusa per numerosi anni, Florinda Artuso per il contributo alla misura di gas ad effetto serra, e Stefano Rinaldi e Claudio Chiodi per il supporto nella gestione e funzionalità della Stazione di misura. Si ringraziano inoltre il Comune di Lampedusa e Linosa e l'Area Marina Protetta delle Isole Pelagie per la proficua collaborazione e per aver favorito la crescita dell'infrastruttura ENEA a Lampedusa.

Per saperne di più:
alcide.disarra@enea.it

BIBLIOGRAFIA

1. IPCC (2014), "Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", 151 pp., IPCC, Geneva, Switzerland
2. S. Levitus, J.I. Antonov, J. Wang, et al. (2001), "Anthropogenic warming of Earth's climate system", *Science*; 292, 267-270
3. M. Tsimplis, M. Marcos, S. Somot, B. Barnier (2008), "Sea level forcing in the Mediterranean Sea between 1960 and 2000", *Global Planet. Change*, 63, 325-332
4. F. Artuso, P. Chamard, S. Piacentino, et al. (2009), "Influence of transport and trends in atmospheric CO₂ at Lampedusa", *Atmos. Environ.*, 43, 3044-3051
5. C. Le Quéré, R. Moriarty, R.M. Andrew et al. (2015), "Global carbon budget 2014", *Earth Syst. Sci. Data*, 7, 47-85
6. T. Di Iorio, A. di Sarra, D.M. Sferlazzo, et al. (2009), "Seasonal evolution of the tropospheric aerosol vertical profile in the central Mediterranean and role of desert dust", *J. Geophys. Res.*, 114, D02201
7. A. di Sarra, C. Di Biagio, D. Meloni, et al. (2011), "Shortwave and longwave radiative effects of the intense Saharan dust event of 25-26 March, 2010, at Lampedusa (Mediterranean sea)", *J. Geophys. Res.*, 116, D23209
8. D. Meloni, W. Junkermann, A. di Sarra, et al. (2015), "Altitude-resolved shortwave and longwave radiative effects of desert dust in the Mediterranean during the GAMARF campaign: Indications of a net daily cooling in the dust layer", *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 3386-3407
9. G.S. Jones, P.A. Stott, N. Christidis (2013), "Attribution of observed historical near-surface temperature variations to anthropogenic and natural causes using CMIP5 simulations", *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 4001-4024
10. B.D. Santer, K.E. Taylor, T.M.L. Wigley, et al. (1996), "A search for human influences on the thermal structure of the atmosphere", *Nature*, 382, 39-46
11. D.R. Feldman, W.D. Collins, P.J. Gero, et al. (2015), "Observational determination of surface radiative forcing by CO₂ from 2000 to 2010", *Nature*, 519, 339-343
12. J. Hansen, M. Sato, P. Kharecha, K. von Schuckmann (2011), "Earth's energy imbalance and implications", *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 13421-13449