

Mutamenti climatici dipendenti da fenomeni astronomico-astrofisici: effetti in epoca protostorica e storica

Elio Antonello

INAF – Osservatorio Astronomico di Brera

SIA – Società Italiana di Archeoastronomia

elio.antonello@inaf.it

Riassunto. Il clima varia con tempi scala di diverse migliaia e di decine di migliaia di anni in risposta alla variazione di insolazione dipendente dai parametri orbitali della Terra. Esiste inoltre l'ipotesi di una dipendenza delle variazioni climatiche su scala decennale e secolare dalla variabilità del Sole. Le discipline che studiano la storia umana prendono in considerazione le ipotesi del possibile legame sia dell'evoluzione dell'uomo sia delle crisi di antiche società e culture con tutte queste variazioni. Oggi si è aggiunto un contributo antropico all'andamento naturale proprio del clima, e si sottolinea la necessità di una presa di coscienza del problema.

Abstract. Climate changes occur at timescales of thousand and tens of thousand years owing to the variation of insolation depending on the orbital parameters of the Earth. There is also the hypothesis of a dependence of climate changes over decadal and secular timescales on the solar variability. The disciplines that study human history consider the hypothesis of a possible link between both the human evolution and the crisis of ancient societies with such variations. Presently there is also the anthropic effect added to the natural trend of the climate, and we remark the need of becoming aware of the problem.

1. Introduzione

Nei precedenti due ultimi convegni della SIA avevamo presentato una rassegna di vari studi effettuati negli scorsi decenni da molti ricercatori, riguardanti l'effetto delle variazioni del clima a lungo periodo sull'evoluzione umana (Antonello 2016a) e su quella delle prime civiltà (Antonello 2017). Avevamo messo in rilievo la dipendenza dei cambiamenti climatici da parametri astronomici, comunemente identificata con l'espressione *orbital forcing*, rimarcando che attualmente non esistono teorie credibili, o almeno plausibili, alternative a essa. Nel presente lavoro accenneremo agli effetti delle variazioni climatiche negli ultimi millenni, ma è ovviamente impossibile discutere in modo adeguato in poche pagine i molti articoli di paleoclimatologia, geologia, archeologia e storia connessi a tale problematica. Per lo stesso motivo, ci limiteremo agli effetti ipotizzati degli eventi climatici solamente sulle principali civiltà in Eurasia.

Riteniamo opportuno iniziare con un riassunto dei due lavori precedenti, e aggiungendo alcuni aggiornamenti necessari. Chiuderemo l'articolo con un richiamo alla situazione attuale del clima, ricordando ancora che i modelli costruiti per tentare previsioni globali dovranno tenere conto degli effetti astronomici.

2. Astronomia, astrofisica, paleoclima, evoluzione umana

L'orbita della Terra risente degli effetti gravitazionali degli altri corpi del Sistema Solare. Negli ultimi milioni di anni (presi in considerazione nei nostri lavori) l'eccentricità è variata con periodicità intorno

a 100 mila e a 400 mila anni, e l'obliquità dell'eclittica (inclinazione dell'asse di rotazione della Terra) con periodo intorno a 41 mila anni e ampiezza di circa un paio di gradi. La combinazione della precessione astronomica e dello spostamento degli apsidi (che si può visualizzare come rotazione dell'orbita sul suo piano) ha prodotto la precessione climatica con periodicità intorno a 23 mila anni. L'effetto risultante delle variazioni periodiche è stato di cambiare le condizioni di insolazione sulla superficie della Terra (*orbital forcing*; cicli di Milankovitch), per cui il sistema complesso costituito dall'insieme della superficie terrestre, con i continenti, gli oceani, l'atmosfera e le calotte di ghiaccio, deve aver risposto a tali sollecitazioni. L'analisi dei numerosi *proxy*, cioè gli indicatori climatici intermedi derivati dai carotaggi e dalle analisi stratigrafiche, effettuata negli ultimi decenni, ha confermato la presenza delle periodicità previste dalla teoria orbitale. In altre parole, le condizioni climatiche globali (come temperatura, piovosità e aridità) sono influenzate sul lungo periodo dai parametri astronomici.

Su scala temporale del millennio, o inferiore, potrebbe avere qualche effetto la variabilità solare, che è connessa in modo complesso alla attività del Sole e al suo campo magnetico. Il ciclo undecennale del numero di macchie solari dipende dalla variazione periodica del campo magnetico, ed è interpretato con il meccanismo della dinamo solare. Quando il campo è più intenso, il Sole è più attivo, ed è presente un maggior numero di macchie, cioè zone a temperatura più bassa e meno luminose della media fotosferica; sono però presenti anche delle zone a più alta luminosità (come le facole), per cui in totale il Sole è leggermente più luminoso rispetto a quando le macchie sono assenti. Su scala pluridecennale e secolare ci dovrebbero essere altre variazioni del campo magnetico, dedotte in base al diverso numero di macchie durante cicli undecennali contigui, osservati nei secoli scorsi. Un esempio è il basso numero di macchie nella serie di cicli tra il 1790 e il 1830 circa, indicato come Minimo di Dalton; invece durante il lungo intervallo (circa 1645 – 1715) del Minimo di Maunder le macchie erano state quasi assenti¹. Il campo magnetico ha anche un effetto schermo rispetto ai raggi cosmici provenienti dall'esterno del Sistema Solare, per cui, quando il campo magnetico è poco intenso il Sole è poco attivo, e oltre a esserci meno macchie, c'è un maggior numero di raggi cosmici che arrivano sulla Terra. Dalla loro interazione con i gas atmosferici si creano prodotti di decadimento radioattivo tra cui il carbonio-14 (¹⁴C), il quale entra nel ciclo del carbonio e viene assimilato dagli organismi viventi (il metodo della datazione ¹⁴C sfrutta questo fatto). Dall'analisi del ¹⁴C negli anelli di crescita degli alberi si è potuta dedurre la variazione del campo magnetico solare anche molti secoli fa. Attualmente si stanno effettuando diversi studi per cercare di verificare il possibile impatto dell'attività solare sul clima terrestre, impatto quindi forse legato alla piccola variazione di luminosità e/o agli effetti dei raggi cosmici sulla formazione delle nubi nell'atmosfera.

2.1. Evoluzione umana

I paleoantropologi si sono chiesti se le oscillazioni più o meno intense del clima abbiano avuto una qualche influenza anche sulla evoluzione del genere Homo, e hanno parlato di shock climatici: l'alternanza di ambienti umidi e aridi avrebbe spinto alcuni antenati verso la specie moderna, e avrebbe invece estinto altri (deMenocal 2011). L'analisi dei fossili e dei *proxy* africani ha fornito un quadro dell'evoluzione degli ominini negli ultimi milioni di anni in Africa orientale, dove sono stati trovati i primi resti dei principali generi (Maslin et al. 2015; Levin 2015). A fianco dell'evoluzione umana si è osservato un progressivo cambiamento di vegetazione, attribuito all'aumento graduale di aridità dovuto al sollevamento tettonico dell'Africa orientale (Maslin et al. 2014). Il sollevamento ha creato anche dei

¹ Dettagli su ciclo solare e relazione con il clima si possono trovare per esempio in: Hathaway (2015), Solanki et al. (2013), Usoskin (2008).

bacini lacustri: nella stratigrafia si osserva infatti la presenza periodica di grandi laghi profondi, con tempi scala di 400 mila e 800 mila anni attribuiti alla variazione di eccentricità orbitale. Più in generale, la stratigrafia in varie località della Terra mostra, quando le variazioni di eccentricità sono maggiori, cicli di precessione climatica caratterizzati da grande umidità (maggiore presenza di depositi alluvionali) alternata a forte aridità. Nella fase ‘umida’, connessa nelle regioni a regime monsonico alla maggiore insolazione, si ha la prevalenza dell’ambiente foresta, e nella fase arida la prevalenza dell’ambiente ‘savana’ (e praterie).

È in questo possibile contesto che vari autori hanno cercato di inserire le diverse ipotesi evolutive degli ominini, privilegiando certi fattori ambientali, per esempio il caldo oppure il freddo persistenti, e certe risposte evolutive. Negli ultimi decenni è stato dato molto peso al fattore aridità, legato al progressivo lento cambiamento ambientale da foresta a ‘savana’, con sovrapposto il carattere oscillante dei cicli precessionali. In particolare, secondo Potts (2013) sarebbe stata appunto l’instabilità ambientale legata ai cicli di 23 mila anni del clima a costringere le specie a un adattamento, o a far evolvere organismi maggiormente in grado di adattarsi. A questo proposito, un indicatore sarebbe l’eccesso dell’isotopo di carbonio-13, $\delta^{13}\text{C}$, nello smalto di denti fossili. Esso permette di distinguere tra diete basate in modo prevalente su vegetazione con ciclo di fotosintesi C3 e quelle basate invece su vegetazione con ciclo C4². Secondo deMenocal (2014), l’*Homo erectus* utilizzava una grande varietà di alimenti, aveva cioè una dieta flessibile, una caratteristica poi trasmessa geneticamente fino a noi. Altre specie di ominini vivevano invece con una dieta strettamente legata alla nicchia di vegetazione specifica, e si sarebbero estinte. Secondo diversi autori, la variazione climatica avrebbe inoltre costretto il genere *Homo* a sviluppare un cervello più grande, un’evoluzione accompagnata da altri cambiamenti verso una maggiore flessibilità e abilità a colonizzare nuovi ambienti.

Risultati paleoantropologici molto recenti suggeriscono la presenza di individui affini all’*Homo sapiens* circa 300 mila anni fa in Marocco (Hublin et al. 2017), e fuori dall’Africa (nel Levante) circa 180 mila anni fa (Hershkovitz et al. 2018). Tuttavia l’analisi genetica sembra suggerire che le caratteristiche dell’*Homo sapiens* moderno in Eurasia, America, Oceania, derivino da un unico esodo dall’Africa avvenuto tra 80 mila e 40 mila anni fa (Lamb et al. 2018); questo però non esclude precedenti migrazioni, che non avrebbero lasciato una traccia genetica. L’analisi dei fossili ha invece dimostrato l’esistenza di incroci con *Homo neandertalensis* nel Vicino Oriente e in Europa, dove questa specie già risiedeva; non per caso, le attuali popolazioni europee, asiatiche e americane, hanno tutte una piccola percentuale di DNA neandertaliano (Gibbons 2011).

I nostri antenati del Paleolitico superiore, 40 mila anni fa hanno vissuto di caccia, pesca e raccolta, ma hanno dimostrato anche una certa creatività, come dimostra l’arte parietale, per cui molti antropologi ritengono avessero le nostre stesse capacità intellettive. Ci si può allora chiedere con Renfrew (2007) perché mai abbiano atteso fino a poche migliaia di anni fa prima di creare le civiltà complesse. La possibile risposta potrebbe essere quella data da Neubauer et al. (2018), secondo i quali la scatola cranica ‘globosa’ di noi moderni, che ci distingue dagli *Homo sapiens* estinti e si forma durante il periodo immediatamente prenatale e primo post-natale insieme alle connessioni neurali e allo sviluppo cognitivo, si sarebbe evoluta gradualmente tra 100 mila e 35 mila anni fa. L’*Homo sapiens* avrebbe quindi acquisito queste ultime caratteristiche evolutive durante la lunga fase glaciale (caratterizzata da instabilità climatica), e poi, quando il clima si è stabilizzato diventando caldo-umido dopo il disgelo, avrebbe messo a frutto le sue nuove capacità adattandosi a un ambiente ormai completamente diverso.

² Piante con ciclo C4, rispetto a quelle con ciclo C3, utilizzano meno acqua e si sono specializzate a vivere in ambienti caldi e aridi, come per esempio l’erba delle savane.

2.2. Epoca neolitica

La situazione della fase caldo-umida dell'ultimo ciclo astronomico precessionale in Africa è riassunta brevemente da deMenocal (2011). Da 15000 a circa 5000 anni fa, l'attuale Sahara non era un deserto, ma aveva grandi laghi permanenti, e vegetazione con fauna abbondante. L'accresciuta insolazione estiva aveva rinvigorito il monzone, producendo maggiori quantità di piogge in Africa; ciò lo si deduce anche dai depositi organici (*sapropels*, in ambiente anossico) del Nilo nel Mediterraneo orientale, risalenti a questa epoca. La successiva fase arida del ciclo precessionale ha visto l'aumento della desertificazione del Sahara (e dei deserti extratropicali, come il Gobi) e dell'Arabia. C'è stato cioè un progressivo indebolimento del monzone finché si sono raggiunte condizioni simili a quelle attuali, con aridità estrema nelle aree oggi occupate dai deserti (Brooks 2006).

La coltivazione di cereali selvatici è iniziata nel periodo caldo-umido, più precisamente tra 11500 (poco dopo l'inizio dell'Olocene) e 11000 anni fa nella Mezzaluna Fertile, comprendente il Levante, la zona collinare-montagnosa dell'Anatolia meridionale, del nord Iraq, fino ai monti Zagros in Iran (Willcox 2013; Riehl et al. 2013). Ha fatto poi seguito la domesticazione dei cereali, tra 11000 e 10000 anni fa nella stessa area, selezionati in base alla resa, alla facilità di semina, raccolta e conservazione; quindi si fa generalmente risalire la nascita dell'agricoltura proprio a quest'epoca neolitica (Willcox 2014). Per Cauvin (2000: 3) è appunto in questa rivoluzione del Neolitico che troviamo le radici dello stato presente della specie umana, non solo nella nostra capacità di dominazione e sfruttamento dell'ambiente, ma anche nei fondamenti della nostra cultura e mentalità.

Secondo Weninger et al. (2009) gli archeologi hanno ragione a legare l'inizio dell'agricoltura e dell'allevamento nel primo Olocene nel Vicino Oriente ai cambiamenti sostanziali nell'organizzazione sociale delle comunità, ma sono più riluttanti a riconoscere l'altro legame, quello con le condizioni climatiche favorevoli. Per Liverani (2011: 57), per esempio, i mutamenti climatici "costituiscono lo scenario del mutamento tecnologico ed economico, più che la sua causa. Infatti ad uno stesso problema, varie comunità possono dare risposte diverse, e proprio in questa diversità di scelte e strategie consiste la storia umana".

3. Eventi climatici

Episodi su scala temporale del migliaio di anni erano stati evidenziati in particolare da Bond et al. (1997), con il suggerimento, ulteriormente ribadito da Bond et al. (2001) e Bond (2009), del loro possibile legame con la variabilità solare. Gli autori avevano rilevato in due carotaggi nel Nord Atlantico una serie di concentrazioni di granuli litici spiegabili solo con l'improvviso rilascio in mare, da parte dei grandi ghiacciai artici, di numerosi iceberg, i quali, sciogliendosi, avevano depositato sul fondo marino i detriti da essi trasportati (IRD, *ice rafted debris*). Tali eventi erano associati a raffreddamento climatico, indicato dalla presenza di specifiche specie di foraminiferi planctonici, e dovuto probabilmente al blocco della circolazione oceanica nel Nord Atlantico³. Erano avvenuti intorno a circa 1400, 2800, 4200, 5900, 8100, 9400, 10300 e 11100 anni fa, ma bisogna comunque tenere presente un'incertezza temporale almeno dell'ordine del secolo. Bond et al. (2001) avevano poi aggiunto la Piccola Era Glaciale, durata alcuni secoli e con un massimo intorno a circa 350 anni fa. Anche Mayewski et al. (2004) avevano parlato di rapidi cambiamenti (*rapid climate changes*) dedotti dall'analisi di dati paleoclimatici, e le epoche erano in parte coincidenti con i tempi elencati da Bond et

³ La circolazione oceanica atlantica, grossolanamente lungo i meridiani (*meridional*), trasporta l'acqua dalle zone dei tropici verso Nord, e ciò comporta un riscaldamento ad alte latitudini. Su questo meccanismo ci sono molte discussioni e un'estesa letteratura; si veda per esempio Smeed et al. (2018).

al. (1997); ma si trattava di un primo studio, da migliorare con analisi statistiche e aggiungendo nuovi dati osservativi.

Discutendo la possibile origine degli eventi, Bond et al. (2001) escludevano un legame con una oscillazione propria, specifica, della calotta glaciale, e invece suggerivano la variabilità solare come *forcing mechanism* su scala del millennio. Avevano studiato vari *proxy* nel Nord Atlantico, gli isotopi ^{14}C rilevati negli anelli di crescita degli alberi e gli isotopi ^{10}Be (prodotti sempre dall'interazione dei raggi cosmici con l'atmosfera) rilevati nei ghiacci della Groenlandia. I tempi del massimo di IRD e minimo di attività e luminosità solare con massimo di raggi cosmici appaiono corrispondere a quelli degli eventi segnalati, ma a volte solo grossolanamente. La variabilità solare è quindi un'ipotesi ancora da corroborare adeguatamente, anche perché la variazione di luminosità stimata del Sole è molto piccola. Nel precedente lavoro (Antonello 2017) abbiamo accennato a diversi altri meccanismi proposti; ad ogni modo, è noto che la Piccola Era Glaciale ha coinciso con il Minimo di Maunder delle macchie solari.

Alcuni archeologi hanno messo in relazione l'abbandono di siti neolitici con gli eventi climatici di freddo e aridità intorno a 10200, 8200 e 5900 anni fa, come discusso nel nostro lavoro precedente; in particolare per l'evento di 8200 anni fa ci sono numerosi e precisi riscontri paleoclimatici e archeologici. In base a tali dati si può inoltre supporre che i vari episodi non abbiano avuto la stessa intensità e quindi lo stesso impatto, per cui non ci si deve aspettare gli stessi effetti per tutti gli eventi. Nelle Sezioni seguenti discuteremo brevemente gli episodi successivi a quello di 5900 anni fa.

4. L'evento di 4200 anni fa

Nella Mezzaluna Fertile già da qualche tempo la popolazione stava facendo fronte alla progressiva aridità. Non potendo contare su una sufficiente quantità di piogge, bisognava unire in qualche modo le forze per costruire canali artificiali, con lo scopo sia di regolare le acque nelle zone alluvionali della pianura mesopotamica non ancora sfruttate, sia per irrigare. Costruire tali canali richiede molte persone, e attività coordinate e specializzate per realizzare gli attrezzi necessari, per cui è comprensibile la necessità dell'aggregazione urbana. Brooks (2013) nota che, nella Mesopotamia settentrionale, l'agricoltura invece venne sostituita con il pastoralismo nomade; in tal caso furono forse fattori geografici o topografici, o mancanza di essenziali risorse, a rendere impraticabile l'irrigazione. Il periodo tra 5800 e 5200 anni fa vide fiorire la cultura urbana di Uruk e delle città sumeriche nella Mesopotamia meridionale. Con il re Sargon, circa 4300 anni fa, fu Akkad a prevalere, ma il dominio durò meno di un paio di secoli e fu seguito dal suo crollo. DeMenocal (2001), in base ai dati del paleoclima (Cullen et al., 2000) e a quelli archeologici, ha descritto l'arrivo, intorno a 4200 anni fa, e il perdurare per circa tre secoli, di un periodo di forte aridità, al quale la società accadica non riuscì a far fronte. Weiss (2012: 14), che aveva scavato nell'alta valle dell'Eufrate trovando diverse indicazioni di aridità in questa epoca, aveva affermato che, grazie all'accumulo di dati archeologici e paleoclimatici, probabilmente si sarebbe potuto testare l'ipotesi secondo la quale la difficoltà ambientale aveva prima forzato la formazione dell'impero accadico, e poi ne aveva causato il crollo. Città del nord della Mesopotamia vennero abbandonate (e sostituite nei secoli successivi da piccoli villaggi), e gli abitanti andarono a ingrossare la popolazione della Mesopotamia meridionale; successivamente, però, anche le città sumeriche decadde.

Nella stessa epoca ci fu il passaggio dall'Antico Regno al Medio Regno in Egitto, anch'esso segnato da problemi legati al clima (Hassan 2007; Marshall et al. 2011). L'economia agricola egiziana dipendeva dalla presenza regolare delle inondazioni annuali del Nilo, perché esse rendevano fertili le aree

adiacenti al fiume. La scarsità di piogge implicava l'assenza delle inondazioni, con conseguenti carestie.

Sempre nella stessa epoca, dati ricavati dagli *speleothems cinesi* mostrano il blocco dei monsoni in Asia meridionale, in coincidenza con il crollo della civiltà neolitica locale (Wang et al. 2005). Bisognerebbe pensare a una prolungata instabilità climatica a livello regionale: in alcune aree si ebbero forti siccità, e in altre ci furono frequenti alluvioni, altrettanto disastrose per l'agricoltura (Wenxiang, Tungsheng, 2004; Huang et al. 2011)⁴. Infine, ci sono cambiamenti in corso da qualche secolo che porteranno più lentamente alla fine della civiltà di Harappa in India, circa 3900 anni fa (Giosan et al. 2012; Schug et al., 2013; Kathayat et al. 2017; Dixit et al. 2018). Si tratta comunque di un'interazione complessa tra clima e storia culturale, i cui tempi sono determinati dalle situazioni specifiche locali, per cui una valutazione critica “of the climate-culture link at these scales can only be achieved through comprehensive and coordinated assessments of the archeological and paleoclimate data” (Kathayat et al. 2017).

Secondo Brooks (2006), l'evidenza archeologica e paleoambientale è consistente con l'idea di uno sviluppo delle società complesse durante il Medio Olocene quale conseguenza, in larga parte, della risposta delle prime società al deteriorarsi delle condizioni ambientali. Il lento deterioramento era dovuto principalmente all'indebolirsi della fascia monsonica nell'emisfero settentrionale, indotto dall'effetto orbitale. L'archeologo-storico Liverani descrive in modo dettagliato i risultati degli scavi e degli studi riguardanti il Medio Oriente e, con riferimento a questa epoca in Mesopotamia, insegna infatti che: “Il fattore climatico, in passato demonizzato come anti-storico, sta acquistando maggiore credibilità man mano che si dispone di dati paleo-ecologici più sicuri” (Liverani 2011: 251).

Pur se teniamo conto di questa importanza del fattore climatico, può comunque sorprendere la recente decisione dei geologi della International Commission on Stratigraphy (ICS, deputata alla definizione delle suddivisioni geologiche) di dividere l'Olocene in tre età, l'ultima delle quali, il Meghalayan, è iniziata appunto 4250 anni fa⁵. La decisione ha suscitato controversie forse perché inizialmente era stato fatto un riferimento esplicito ad aridità e collassi di civiltà in modo generalizzato, una motivazione in apparenza archeologica più che geologica; si vedano per esempio Voosen (2018a) e Middleton (2018). Non entriamo nei termini della controversia perché non abbiamo la competenza. Notiamo solo che, in base ai diversi articoli consultati, i paleoclimatologi tendono a parlare di instabilità climatiche più o meno intense (aridità oppure alluvioni) a seconda delle zone, mentre gli archeologi nei dettagli tendono a parlare non solo di crollo o collasso, ma spesso di ristrutturazioni delle società che a volte possono consistere in semplice resilienza, o capacità di adattamento, con loro specifiche scale temporali.

5. L'evento di 3200 anni fa

Il successivo periodo di grande crisi è la fine dell'Età del Bronzo, ed è riferito generalmente al 1200 a.C. circa, 3200 anni fa. Quindi, pur tenendo conto di incertezze nelle date, l'evento datato da Bond et al. (1997) a 2800 anni fa sembrerebbe distante nel tempo. Ricordiamo subito come, nel caso della fine dell'Età del Bronzo, gli archeologi siano meno propensi ad appoggiare il fattore climatico; per esempio, secondo Liverani (2011: 540) in quell'epoca le “difficoltà demografiche e produttive andavano di pari

⁴ Un *proxy* che permette di ottenere dati particolarmente accurati è ricavato dalle sezioni di *speleothems* come le stalagmiti; si veda per esempio Cheng et al. (2016). Un recente lavoro di Zhang et al. (2018) confronta osservazioni accurate di *speleothems* con previsioni di modelli relativi alla fine dell'ultima era glaciale, e fornisce una spiegazione plausibile del comportamento complesso del monzone asiatico in Cina.

⁵ <http://www.stratigraphy.org/index.php/ics-news-and-meetings/125-formal-subdivision-of-the-holocene-series-epoch>. Più esattamente: 4250 anni prima dell'anno 2000.

passo con la crisi sociale, che su un piano logico e cronologico può considerarsi la causa prima di tutto il collasso”. Weninger et al. (2009) hanno analizzato in dettaglio i rapidi cambiamenti climatici nel Mediterraneo orientale durante l'Olocene, e, quando discutono di questi secoli, notano la distruzione quasi simultanea intorno al 1200 a.C. dei principali palazzi micenei, il collasso dell'impero ittita nell'Anatolia Centrale, le città saccheggiate e bruciate a Cipro e nel Levante, i raid catastrofici in tutto il Mediterraneo orientale documentati da abbondanti reperti, e, come non bastasse, c'è una sequenza di terremoti catastrofici nel Peloponneso. Quindi ci sono così tante evidenze di guerre e distruzioni tutte operanti tra il 1250 e 1100 a.C. “that we have no need for climate deterioration, on top of all this, to further complicate our understanding of these complex processes” (Weninger et al. 2009: 44). Tuttavia, dopo aver discusso in dettaglio i casi di Troia, della Tracia e della Grecia in relazione a un evento climatico intorno a 3000 anni fa, concludono che uno stress legato al clima potrebbe essere stato effettivamente operativo, ma sempre comunque assieme ad altri fattori.

A favore, invece, di un'ipotesi climatica più robusta ci sono risultati recenti di Langgut et al. (2014); gli autori hanno cercato di fornire una datazione accurata insieme ad un'alta risoluzione temporale, in quanto i lavori precedenti spesso non avevano tali requisiti. L'analisi dei pollini di un carotaggio nel Lago di Tiberiade, per un'epoca dal 3000 al 500 a.C., mostra che l'intervallo tra il 1250 e il 1100 a.C. è quello segnato dalla maggiore aridità. Inoltre, anche per questo come per l'evento precedente, Huang et al. (2011) trovano le indicazioni di una serie di inondazioni straordinarie in un'area della Cina. Secondo gli autori, il collasso della dinastia Shang avvenuto poco prima del 1000 a.C. non andrebbe attribuito alla sola aridità (rilevata lungo il medio e basso Fiume Giallo), in quanto sia le severe siccità sia le inondazioni estreme hanno fatto parte della stessa instabilità climatica.

6. Piccole Ere Glaciali

Negli ultimi 2000 anni il clima sembra aver oscillato su scala di vari secoli, perché generalmente si parla di periodi relativamente caldi in epoca romana e in pieno medioevo, e di periodi freddi alla fine dell'Impero Romano d'Occidente e alla fine del Rinascimento.

6.1. 1400 anni fa

L'evento riportato da Bond et al. (1997), circa 600 d.C., potrebbe corrispondere all'epoca delle invasioni barbariche. Büntgen et al. (2016) identificano l'intervallo dal 536 a circa il 660 d.C. come la piccola era glaciale dell'antichità (*Late Antique Little Ice Age*, LAILA), e, rispetto alla Piccola Era Glaciale recente, dovrebbe avere avuto effetti anche più severi. Questi sarebbero dovuti alla concomitanza del minimo di attività solare (e ai connessi effetti di IRD e circolazione oceanica) con episodi ravvicinati di intense eruzioni vulcaniche negli anni 536, 540 e 547 d.C. Il lavoro si basa su una estesa analisi di anelli di crescita di alberi nei Monti Altai (larici siberiani) confrontati con dati riguardanti le Alpi, e sulle ceneri vulcaniche rilevate nei ghiacci (Sigl et al. 2015). Secondo gli autori, la fase fredda sarebbe stata un fattore ambientale aggiuntivo che avrebbe contribuito al diffondersi della peste (di Giustiniano), alla trasformazione dell'impero d'oriente, al collasso dell'impero sasanide, alle migrazioni dalle steppe asiatiche e dalla penisola arabica, alla dispersione delle popolazioni slave e alle sollevazioni in Cina. Ricordiamo come le intense eruzioni o esplosioni di vulcani possono avere un impatto sul clima; nei casi storicamente noti si tratta però di effetti con durata limitata di pochi anni. Per esempio nel 1816, l'anno successivo all'eruzione del vulcano Tambora, si ebbero varie difficoltà e

carestie in Europa dovute all'estate piuttosto fredda⁶. L'effetto climatico sarebbe una conseguenza della riduzione della radiazione solare da parte delle polveri vulcaniche in sospensione nella stratosfera. Una recente monografia di Harper (2017), dedicata alla fine dell'Impero Romano d'Occidente, cerca di metterne in rilievo il legame con cambiamenti climatici e pestilenze.

6.2. 350 anni fa

Infine, accenniamo brevemente alla Piccola Era Glaciale (*Little Ice Age*, LIA). Ci sono molti studi basati anche sulle testimonianze dirette dell'epoca, e Shindell (2009) ne riassume alcuni. Durante questo periodo le temperature su buona parte dell'Europa furono insolitamente fredde, ci fu l'avanzamento dei ghiacciai alpini, e i fiumi furono più spesso ghiacciati che non durante l'epoca medioevale o nell'ultimo secolo e mezzo. Descrizioni più dettagliate dei fenomeni nelle cronache dell'epoca e del loro impatto sulla società si possono trovare in Behringer (2010). Qui è opportuno ricordare che eventi meteorologici estremi si trovano sempre nelle cronache di ogni epoca, a prescindere dalla tendenza specifica del clima, ma senza dubbio durante la LIA hanno prevalso gli episodi legati al freddo. Poiché le registrazioni storiche esistenti riguardano l'Europa e l'America di nord-est, si è poi supposta una globalità del raffreddamento. Oggi si conoscono però delle diversità regionali del fenomeno, con tempi scala diversi, e con presenza di riscaldamento in alcune aree; per una rassegna recente si veda PAGES 2k, Ahmed et al. (2013). Le diversità spiegano anche perché non ci sia un preciso accordo tra i vari autori sull'inizio e la fine della LIA. Osservazioni in aree dell'emisfero sud confermano comunque il raffreddamento anche a tali latitudini; si veda per esempio l'analisi accurata dei ghiacci in Antartide da parte di Rhodes et al. (2012). Ad ogni modo, globalmente i dati suggeriscono il massimo del freddo intorno alla fine del Seicento, con i ghiacciai alpini che hanno continuato ad espandersi fino a metà Ottocento.

Anche l'origine della LIA è stata spesso attribuita alla concomitanza di un minimo solare e di eruzioni vulcaniche più o meno intense, ma si tratta di ipotesi ancora da confermare.

7. Clima attuale e psicologia umana

Da qualche decennio si parla di riscaldamento globale, con discussioni anche molto accese data la rilevanza delle decisioni politiche, altrettanto globali, che sarebbero necessarie per farvi fronte. Di certo, l'anidride carbonica è un gas con effetto serra, e la sua presenza nell'atmosfera terrestre sta crescendo rapidamente, sia per effetto antropico sia per ragioni del tutto naturali. Negli ultimi 800 mila anni circa, fino a qualche decina di anni fa, il valore dell'anidride carbonica nell'aria aveva oscillato sempre tra un minimo intorno a 180 parti per milione (ppm) durante le ere glaciali, e un massimo intorno a 280 ppm negli intervalli caldi interglaciali, come l'Olocene fino a qualche decennio fa⁷. Poi ha iniziato a crescere rapidamente ben oltre 280 ppm. Nel 1980 la media annuale era stata di 340 ppm, e nel 2000 aveva raggiunto 370 ppm; oggi (fine 2018) sta arrivando a 410 ppm⁸. Quaranta milioni di anni fa il valore naturale era stato di un migliaio di ppm, ma pure l'ambiente era molto diverso da oggi, data la temperatura più alta: per esempio, l'Antartide e l'Artico non erano ghiacciati (Zachos et al. 2001), e infatti si trovano fossili di piante e animali di quell'epoca nelle regioni a paleo-latitudini sopra 80 gradi. Quindi è del tutto presumibile che, continuando oggi la tendenza in corso, l'impatto

⁶ Può essere interessante segnalare la conferma di questa anomalia termica dalle osservazioni di temperatura effettuate all'Osservatorio Astronomico di Brera a Milano. Durante i decenni del Minimo di Dalton i mesi estivi più freddi furono quelli del 1816: la temperatura media misurata non superò 24 °C, e quella massima non andò oltre 28 °C (dati da Buffoni et al. 1996).

⁷ Dati da <http://ncdc.noaa.gov/paleo/study/17975>

⁸ <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/full.html>

ambientale sarà sempre più forte, e forse dovremmo cominciare a parlare di lenta “catastrofe”. In ogni caso, la società umana dovrà adattarsi progressivamente alle nuove situazioni⁹.

Già ora le condizioni meteorologiche estreme sempre più frequenti, come ondate di calore e inondazioni, in varie parti del globo, sono argomenti urgenti di studio per il loro impatto sociale (Schiermeier 2018). Ci sono vari programmi di calcolo in corso di sviluppo che cercano di rappresentare in modo sempre più preciso il comportamento complesso del clima (Voosen 2018b); bisognerà tentare poi di fare previsioni affidabili, almeno a livello globale, e a periodo più o meno lungo, tenendo conto anche dei parametri astronomici. Sono colpito, come astronomo, dal fatto che in quasi tutti i grafici dei paleoclimatologi, contenenti decine di curve colorate rappresentanti l’andamento nei millenni dei molti parametri fisici e chimici derivati da *proxy*, troviamo immancabilmente la curva teorica della variazione dell’insolazione. Si tratta di un riferimento essenziale per cercare di inquadrare il clima a lungo periodo, e si intuisce come sia l’astronomia a guidare in qualche modo i fenomeni. Capire realmente il processo secondo il quale si passa dall’astronomia agli specifici andamenti dei *proxy* è però una cosa molto complessa; Meyers (2017) ad ogni modo esprime un commento incoraggiante sulla possibilità di decifrare “*the palaeoclimate archive’s code*”, grazie appunto anche alla regolarità dei fenomeni astronomici.

Ritengo indispensabile questo tipo di ricerca, perché nel caso non svolgessimo ora questa attività, i nostri discendenti come ci giudicheranno? Temo diranno: ma guarda i nostri antenati, avevano i mezzi informatici e i dati interdisciplinari (astronomia, climatologia, geologia, archeologia, storia) necessari almeno per tentare delle previsioni ragionevoli e iniziare a operare di conseguenza, e invece hanno passato il tempo ognuno a difendere con le unghie e con i denti la propria disciplina (o sub-disciplina), e gli archeoastronomi, in particolare, a discutere accanitamente problemi come: le piramidi di Giza sono o non sono basate sulla cintura di Orione?...

Ma perché non riusciamo a convincerci della gravità della presente situazione? Questa mancanza di preoccupazione, molto diffusa nel pubblico, può apparire sorprendente. A tale proposito, la testimonianza di giornalisti secondo i quali sui ‘social’ prevalgono invece le discussioni su argomenti molto futili è illuminante: “La futilità della discussione pubblica rende insostenibilmente pesanti argomenti che riguardano i nostri figli e nipoti, non i nostri discendenti dei prossimi millenni, se arriveranno [...]”¹⁰. Non si tratterebbe di una cosciente mancanza di volontà da parte del pubblico, ma di un nostro limite psicologico, mentale. Da qualche tempo gli psicologi, infatti, si sono chiesti come mai non siamo capaci di renderci conto dei pericoli legati al cambiamento climatico. Per esempio, Van der Linden et al. (2015) scrivono: “Despite being one of the most important societal challenges of the 21st century, public engagement with climate change currently remains low in the United States. Mounting evidence from across the behavioral sciences has found that most people regard climate change as a nonurgent and psychologically distant risk—spatially, temporally, and socially—which has

⁹ Secondo Crist (2018), la Terra è alle prese con un evento di estinzione di massa e uno sconvolgimento climatico, e rischia di finire in condizioni “that will be extremely challenging, if not catastrophic, for complex life”; si veda anche Steffen et al. (2018).

¹⁰ A. Cazzullo, *Corriere della Sera* di venerdì 19 ottobre 2018: “Il riscaldamento del pianeta è tanto evidente che neppure Donald Trump lo nega più (si limita a dire che non è colpa dell’uomo e quindi non ci si può fare nulla). Però in due anni avrò ricevuto ventimila lettere sui migranti e neppure una sul cambiamento climatico, che è tra le cause delle migrazioni. Pubblico alcune reazioni raccolte sui social del Corriere [...] perché mi sembrano utili a una riflessione non tanto sul tema, ormai conclamato, quanto sull’indifferenza che lo circonda [...] Alla prima nevicata si faranno ironie; ma è come negare la fame nel mondo solo perché si è appena mangiato un piatto di fettuccine. Non ce ne occupiamo perché il problema riguarda l’avvenire. E l’avvenire al tempo della rete non è contemplato. [...] La futilità della discussione pubblica rende insostenibilmente pesanti argomenti che riguardano i nostri figli e nipoti, non i nostri discendenti dei prossimi millenni, se arriveranno [...]”.

led to deferred public decision making about mitigation and adaptation responses”. Secondo Daniel Gilbert il nostro cervello è predisposto a rispondere rapidamente ai pericoli immediati, e non è in grado di reagire nelle situazioni complesse con tempi scala lunghi; questo è un risultato della nostra evoluzione, e, nel caso del clima, “the threat produces apathy, not action”¹¹. Il *global warming* mancherebbe cioè di quattro caratteristiche: 1) non è una minaccia sociale diretta come le varie forme di terrorismo; 2) non viola le nostre intuizioni morali come il fare direttamente del male; 3) non è una minaccia che richiede la risposta immediata; 4) non è rilevato dal nostro cervello, data la gradualità del fenomeno¹². Recentemente, Clayton e Manning (2018) hanno raccolto in un volume vari aspetti della psicologia umana, studiati negli anni scorsi da diversi autori, in relazione al rapporto problematico con il clima¹³.

Stephen Hawking negli ultimi tempi era molto preoccupato della situazione sulla Terra, e sosteneva con forza l’urgente necessità di lavorare tutti insieme per proteggere, a fronte delle “sfide ambientali spaventose”, l’unico pianeta che abbiamo; perché solo tra qualche secolo “forse” avremo colonie umane tra le stelle¹⁴. Si potrebbe forse estendere l’appello di Hawking e dire che è necessario mettere insieme, in un certo senso, tutta la cultura umana, non solo quella scientifico-tecnologica-economica ma anche quella umanistica, per cercare di sopperire con essa ai limiti evolutivi fissati da madre natura. Infatti il calcolo dei modelli climatici deve tenere conto di tutti i dati della storia passata, inclusi, per esempio, quelli derivati dall’archeologia. Questo “lavorare tutti insieme” è necessario affinché “i nostri figli e nipoti” possano vivere; in altre parole, sarà forse grazie alla cultura se essi potranno ancora mangiare.

8. Considerazioni finali

Ricercatori cinesi e indiani appaiono tra i più sensibili all’impatto sociale del clima, e il motivo è evidente. La fascia dei monsoni nei vari continenti all’epoca del Neolitico era estesa verso nord, e in Africa includeva il Sahara; poi, obbedendo all’*orbital forcing*, si è progressivamente ridotta verso i tropici. Oggi coinvolge la vita di miliardi di persone in India e in Cina, per cui i ricercatori locali si interrogano in quale modo il monsone sia influenzato appunto dall’*orbital forcing* e dall’attività solare, e cercano di capire come si comporterà in futuro¹⁵. Ci si potrebbe anche chiedere: se il monsone divenisse instabile come qualche migliaio di anni fa, cosa succederebbe? Sarebbe forse da presumere la migrazione di centinaia di milioni di persone?

La domanda che forse qualche lettore interessato all’astronomia culturale si sarà invece posta è: perché quanto abbiamo riportato nei nostri lavori dedicati ad astronomia, paleoclimatologia ed evoluzione, dai

¹¹ www8.gsb.columbia.edu/decisionsciences/newsn/3318/your-brain-on-climate-change-why-the-threat-produces-apaty-not-action.

¹² Columbia University, <https://blogs.ei.columbia.edu/2012/01/09/evolutionary-psychology-of-climate-change/>

¹³ Come semplice nota a parte sui ‘difetti’ dell’evoluzione della nostra specie e della sua psicologia, segnalo che negli anni scorsi abbiamo menzionato, un po’ timidamente, il problema della separazione e la conseguente arroganza delle varie discipline (Antonello 2016b: 167), e abbiamo poi discusso della psicopatologia della cultura con riferimento all’astronomia culturale (Antonello, Fontana 2014).

¹⁴ https://www.repubblica.it/economia/2016/12/07/news/le_e_lite_imparino_l_umilta_o_il_populismo_sara_trionfante-153609352/

¹⁵ Gupta et al. (2013) notano che il monsone “has a direct bearing on the socioeconomic conditions of people of South Asia which houses one-third of world population”, e concludono che il loro studio “highlights the importance of solar variability in driving changes in Indian summer monsoon wind strength that will have a pronounced impact on precipitation and thus on food security of the agrarian economies of the South Asian region”. Mohtadi et al. (2016) scrivono: “Reliable prediction of summer monsoons is critical to mitigating the often catastrophic consequences of monsoon rainfall anomalies, such as floods and droughts, famine, and economic losses. Yet, despite its pivotal role in the livelihood of billions of people, summer monsoon rainfall remains difficult to predict”.

primi ominini fino a oggi, sarebbe importante per questo campo? In astronomia culturale si è studiata e si studia la rilevanza del cielo per tutte le società di tutte le epoche, ed è generalmente intesa in senso strettamente culturale, cioè in quale modo l'umanità si è rapportata con il cosmo, il sole e gli astri, in termini di miti, credenze religiose, simbolismo e utilità pratica immediata per la vita; l'evoluzione non sembra c'entri molto.

La risposta è che il gran numero di pubblicazioni nelle diverse discipline ci hanno fatto intuire la tremenda importanza che gli effetti di origine astronomica su clima e ambiente hanno (o possono aver) avuto sulla stessa evoluzione umana in senso fisico, e in senso culturale nella sua accezione più ampia di comportamento sociale. Cioè le caratteristiche nostre e delle nostre società sono dipese anche dall'andamento dei parametri astronomici. A questa deduzione si può arrivare solo se si ragiona in termini strettamente interdisciplinari.

Mi pare quindi di poter concludere che, se l'umanità è così come è, e la sua storia è stata quella che è stata, ciò è successo anche perché l'evoluzione dell'*Homo sapiens* e delle sue società è avvenuta in un contesto ambientale regolato in un ben determinato (questo e non altro) modo da parametri astronomici.

Bibliografia¹⁶

Ahmed, M. et al. (PAGES 2k) (2013), "Continental-scale temperature variability during the past two millennia", *Nature Geoscience* 6, 339-346.

Antonello, E. (2016a), "Astronomia, paleoclimatologia ed evoluzione umana", *Atti XVI Convegno SIA 2016, Politecnico Milano*, in stampa.

Antonello, E. (2016b), "L'astronomia culturale e l'archeoastronomia dai convegni lincei a oggi", in *Lo sguardo sugli astri. Scienza, cultura e arte, Convegno organizzato dal Centro Linceo Interdisciplinare Beniamino Segre, Roma, 2 aprile 2012*, Atti dei Convegni Lincei 288, pp. 163-173.

Antonello, E. (2017), "Astronomia, mutamenti climatici ed evoluzione delle civiltà", *Atti XVII Convegno SIA 2017, Roma La Sapienza*, in preparazione.

Antonello, E., Fontana, S. (2015), "Astronomia culturale e psiche umana", in V. Girotto, G. Rosada (a cura di) *Il Cielo in Terra ovvero della giusta distanza. XIV Convegno della Società Italiana di Archeoastronomia (SIA)*, Padova University Press, pp. 179-187.

Behringer, W. (2010), *Storia culturale del clima. Dall'era glaciale al riscaldamento globale*, Bollati Boringhieri 2013.

Bond, G. (2009), "Millennial climate variability", in V. Gornitz (ed.), *Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments*, pp. 568-573.

Bond, G., Kromer, B., Beer, J., Muscheler R., Evans, M.N. et al. (2001), "Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene", *Science* 294, pp. 2130-2136.

Bond, G., Showers, W., Cheseby, M., Lotti, R., et al. (1997), "A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates", *Science* 278, pp. 1257-1266.

Brooks, N. (2006), "Cultural responses to aridity in the Middle Holocene and increased social complexity", *Quaternary International* 151, pp. 29-49.

¹⁶ Per ulteriori riferimenti bibliografici e preprints si veda: <http://www.brera.inaf.it/utenti/antonello/papers.html>

- Brooks, N. (2013), "Beyond collapse: climate change and causality during the Middle Holocene Climatic Transition, 6400–5000 years before present", *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography* 112, No. 2, pp. 93-104.
- Buffoni, L., Chlistovsky, F., Maugeri, M. (1996), *1763-1995, 233 anni di rilevazioni termiche giornaliere a Milano-Brera*, Edizioni CUSL.
- Büntgen, U., Myglan, V.S., Ljungqvist, F.C., McCormick, M., Di Cosmo, N. et al. (2016), "Cooling and societal change during the Late Antique Little Ice Age from 536 to around 660 AD", *Nature Geoscience* 9, pp. 231-236.
- Cauvin, J. (2000), *The birth of the gods and the origins of agriculture*, Cambridge Univ. Press.
- Cheng, H., Lawrence Edwards, R., Sinha, A., Spötl, Ch., Yi, L. et al. (2016), "The Asian monsoon over the past 640,000 years and ice age terminations", *Nature* 534, pp. 640-648.
- Clayton, S., Manning, C. (2018), *Psychology and Climate Change: Human Perceptions, Impacts, and Responses*, Academic Press Elsevier.
- Crist, E. (2018), "Reimaging the human", *Science* 362, pp. 1242-1244.
- Cullen, H.M., deMenocal, P.B., Hemming, S., Hemming, G., Brown, F.H., Guilderson, T., Sirocko, F. (2000), "Climate change and the collapse of the Akkadian empire: evidence from the deep sea", *Geology* 28, pp. 379-382.
- deMenocal, P.B. (2001), "Cultural Responses to Climate Change During the Late Holocene", *Science* 292, pp. 667-673.
- deMenocal, P.B. (2011), "Climate and Human Evolution", *Science* 331, pp. 540-542.
- deMenocal, P.B. (2014), "Climate shocks", *Scientific American*, September 2014, pp. 48-53 (ediz. italiana Le Scienze, Novembre 2014).
- Dixit, Y., Hodell, D.A., Giesche, A., Tandon, S.K., Gázquez, F. et al. (2018), "Intensified summer monsoon and the urbanization of Indus Civilization in northwest India", *Scientific Reports* 8:4225 DOI:10.1038/s41598-018-22504-5
- Gibbons, A. (2011), "A new view of the birth of Homo sapiens", *Science* 331, pp. 392-394.
- Giosan, L., Clift, P.D., Macklin, M.G., Fuller, D.Q., Constantinescu, S. et al. (2012), "Fluvial landscapes of the Harappan civilization", *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109, pp. E1688-E1694; www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1112743109.
- Gupta, A.K., Mohan, K., Das, M., Singh, R.K. (2013), "Solar forcing of the Indian summer monsoon variability during the Allerød period", *Scientific Reports* 3 : 2753 | DOI: 10.1038/srep02753, pp. 1-5.
- Harper, K. (2017), *The Fate of Rome. Climate, Disease, and the End of an Empire*, Princeton University Press.
- Hassan, F.A. (2007), "Drought, famine and the collapse of the Old Kingdom: re-reading Ipuwer", *The Archaeology and Art of Ancient Egypt*, Vol. I, Conseil Suprême des Antiquités de l’Égypte, Le Caire, pp. 357-377.
- Hathaway D.H. (2015), "The solar cycle", *Living Reviews in Solar Physics* 12, DOI 10.1007/lrsp-2015-4, pp. 4-87.
- Hershkovitz, I., Weber, G.W., Quam, R., Duval, M., Grün, R. (2018), "The earliest modern humans outside Africa", *Science* 359, pp. 456-459.

- Huang, C.C., Pang, J., Zha, X., Su, H., Jia, Y. (2011) ,“Extraordinary floods related to the climatic event at 4200 BP on the Qishuihe River, middle reaches of the Yellow River, China”, *Quaternary Science Reviews* 30, pp. 460-468.
- Hublin, J.J., Ben-Ncer, A., Bailey, S.E., Freidline, S.E., Neubauer, S. et al. (2017), “New fossils from Jebel Irhoud, Morocco and the pan-African origin of Homo sapiens”, *Nature* 546, pp. 289-292.
- Kathayat, G., Cheng, H., Sinha, A., Yi, L., Li, X. et al. (2017), The Indian monsoon variability and civilization changes in the Indian subcontinent, *Science Advances* 3: e1701296.
- Lamb, H.F., Bates, C.R., Bryant, C.L., Davies, S.J., Huws, D.G. et al. (2018), “150,000 year palaeoclimate record from northern Ethiopia supports early, multiple dispersals of modern humans from Africa”, *Scientific Reports* 8:1077 | DOI:10.1038/s41598-018-19601-w.
- Langgut, D., Finkelstein, I., Thomas, L. (2014), “Climate and the Late Bronze Collapse: New Evidence from the Southern Levant”, *Tel Aviv - Journal of the Institute of Archaeology of Tel Aviv University* 40 (2013), pp. 149-175.
- Levin, N.E. (2015), “Environment and climate of early human evolution”, *Annual Reviews Earth Planetary Science* 43, pp. 405-429.
- Liverani, M. (2011), *Antico oriente. Storia società economia*, Roma-Bari.
- Marshall, M.H., Lamb, H.F., Huws, D., Davies, S.J., Bates, R. (2011), “Late Pleistocene and Holocene drought events at Lake Tana, the source of the Blue Nile”, *Global and Planetary Change* 78, pp. 147-161.
- Maslin, M.A., Brierley, C.M., Milner, A.M., Shultz, S., Trauth, M.H., Wilson, K.E. (2014), “East African climate pulses and early human evolution”, *Quaternary Science Reviews* 101, pp. 1-17.
- Maslin, M.A., Shultz, S., Trauth, M.H. (2015), “A synthesis of the theories and concepts of early human evolution”, *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 370, 20140064.
- Mayewski, P.A., Rohling, E.E., Stager, C., Karlén, W., Maascha, K.A (2004), “Holocene climate variability”, *Quaternary Research* 62, pp. 243-255.
- Meyers, S. (2017), “Cracking the palaeoclimate code”, *Nature* 546, pp. 219-220.
- Middleton, G.D. (2018), “Bang or whimper?”, *Science* 361, pp. 1204-1205.
- Mohtadi, M., Prange, M., Steinke, S. (2016), “Palaeoclimatic insights into forcing and response of monsoon rainfall”, *Nature* 533, pp. 191-199.
- Neubauer, S., Hublin, J.J., Gunz, P. (2018), “The evolution of modern human brain shape”, *Science Advances* 4: eaao5961.
- Potts, R. (2013), “Hominin evolution in settings of strong environmental variability”, *Quaternary Science Reviews* 73, pp 1-13.
- Renfrew, C. (2007), *Prehistory. The making of the human mind*, London, Phoenix; trad. it., 2011, *Preistoria. L'alba della mente umana*, Torino.
- Rhodes, R.H., Bertler, N.A.N., Baker, J.A., Steen-Larsen, H.C., Sneed, S.B. et al. (2012), “Little Ice Age climate and oceanic conditions of the Ross Sea, Antarctica from a coastal ice core record”, *Climate of the Past* 8, pp. 1223-1238.

- Riehl, S., Zeidi, M., Conard, N.J. (2013), "Emergence of agriculture in the foothills of the Zagros Mountains of Iran", *Science* 341, pp. 65-67.
- Schug, G.R., Blevins, E., Cox, B., Gray, K., Mushrif-Tripathy, V. (2013), "Infection, disease, and biosocial processes at the end of the Indus Civilization", *PLoS ONE* 8(12): e84814. doi:10.1371/journal.pone.0084814.
- Schiermeier, Q. (2018), "Climate as culprit", *Nature* 560, pp. 20-22.
- Sigl, M., Winstrup, M., McConnell, J.R., Welten, K.C., Plunkett, G. et al. (2015), "Timing and climate forcing of volcanic eruptions for the past 2,500 years", *Nature* 523, pp. 543-549.
- Shindell, D.T. (2009), "Little Ice Age", in V. Gornitz (ed.), *Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments*, pp. 520-522.
- Smeed, D.A., Josey, S.A., Beaulieu, C., Johns, W.E., Moat, B.I. et al. (2018), "The North Atlantic Ocean is in a state of reduced overturning", *Geophysical Research Letters* 45, pp. 1527–1533, <https://doi.org/10.1002/2017GL076350>.
- Solanki, S.K., Krivova, N.A., Haigh, J.D. (2013), "Solar irradiance variability and climate", *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics* 51, pp. 311-351.
- Steffen, W., Rockström, J., Richardson, K., Lenton, T.M., Folke, C. et al. (2018), "Trajectories of the Earth System in the Anthropocene", *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115, pp. 8252–8259.
- Usoskin, I.G. (2008), "A history of solar activity over millennia", arXiv:0810.3972, pp. 1-84.
- Van der Linden, S., Maibach, E., Leiserowitz, A. (2015), "Improving public engagement with climate change: five 'best practice' insights from psychological science", *Perspectives on Psychological Science* 10(6), pp. 758–763.
- Voosen, P. (2018a), "New geological age comes under fire", *Science* 361, pp. 537-538.
- Voosen, P. (2018b), "The Earth machine", *Science* 361, pp. 344-347.
- Wang, Y., Cheng, H., Edwards R.L., He, Y., Kong, X., et al. (2005), "The Holocene Asian Monsoon: links to solar changes and North Atlantic climate", *Science* 308, pp. 854-857.
- Weiss, H. (2012), "Quantifying collapse: the late third millennium Khabur Plains", in H. Weiss (ed.), *Seven Generations Since the Fall of Akkad*, Harrassowitz Verlag-Wiesbaden, pp. 1-24.
- Weninger, B., Clare, L., Rohling, E.J., Bar-Yosef, O., Böhner, U. et al. (2009), "The Impact of Rapid Climate Change on prehistoric societies during the Holocene in the Eastern Mediterranean", *Documenta Praehistorica* 36, pp. 7-59; DOI: 10.4312/dp.36.2.
- Wenxiang, W., Tungsheng, L. (2004), "Possible role of the 'Holocene Event 3' on the collapse of Neolithic Cultures around the Central Plain in China", *Quaternary International* 117, pp. 153-166.
- Willcox, G. (2013), "The roots of cultivation in Southwestern Asia", *Science* 341, pp. 39-40.
- Willcox, G. (2014), "Les premiers indices de la culture des céréales au Proche-Orient / The beginnings of cereal cultivation in the Near East", in C. Manen, T. Perrin, J. Guilaine (eds) *La transition néolithique en Méditerranée / The Neolithic transition in the Mediterranean*, Errance–AEP, pp. 47-58.

Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E., Billups, K. (2001) “Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present”, *Science* 292, pp. 686-693.

Zhang, H., Griffiths, M.L., Chiang, J.C.H., Kong, W., Shitou, W., et al. (2018), “East Asian hydroclimate modulated by the position of the westerlies during Termination I”, *Science* 362, pp. 580–583.