

Reconstrucció de les temperatures superficials marines dels últims dos milions d'anys al Corrent de Benguela utilitzant l'índex TEX₈₆.

Autora: Elena Peña Peñalosa. Tutor: Dr. Antoni Rosell-Melé

Ciències Ambientals, Institut de Ciència i Tecnologia Ambiental, Universitat Autònoma de Barcelona

Abstract

In order to reconstruct and obtain a climatic evolution from the marine surface temperatures of the last two million years at Benguela Current (South African west coast), 60 samples have been analyzed from core ODP 175-1084. To do so, it has been used the new calibration of the index TEX₈₆ (Kim et al, 2007) and the results have been represented together with the values obtained from other indexes as MAAT, concerning the medium annual air temperatures, and BIT, which calculates the rate contribution of continental sediments to sea sediments. They have also been compared with temperature records from other studies at the same area obtained from different proxies. The results of TEX₈₆ show agreement with some of the values obtained in other studies and propose new hypotheses that relate in a direct way the three calculated indexes.

Abstract

Per tal de reconstruir i obtenir una evolució climàtica a partir de les temperatures superficials marines dels últims dos milions d'anys al Corrent de Benguela (costa oest sud-africana) s'han analitzat 60 mostres del testimoni amb ODP 175-1084. Per fer-ho, s'ha utilitzat la nova calibració de l'índex TEX₈₆ (Kim et al., 2007) i s'han representat els resultats juntament amb els valors obtinguts amb altres índexs referents a les temperatures mitjanes anuals de l'aire (MAAT) i el grau d'aportació sedimentària d'origen continental als sediments marins (BIT). També s'han comparat amb els registres de temperatura d'altres estudis en la mateixa àrea obtinguts a partir de *proxies* diferents. Els resultats del TEX₈₆ mostren certa concordança amb alguns dels valors obtinguts en altres estudis i proposen hipòtesis que relacionen de manera directa els tres índexs calculats.

Abstract

Con el fin de reconstruir y obtener una evolución climática a partir de las temperaturas superficiales marinas de los últimos dos millones de años en la Corriente de Benguela (costa oeste sudafricana), se han analizado 60 muestras del testigo con ODP 175-1084. Para hacerlo, se ha utilizado la nueva calibración del índice TEX₈₆ (Kim et al., 2007) y se han representado los resultados junto con los valores obtenidos por otros índices referentes a las temperaturas medias anuales del aire (MAAT) y el grado de aportación sedimentaria de origen continental a los sedimentos marinos (BIT). También se han comparado con los registros de temperatura de otros estudios en la misma área obtenidos a partir de *proxies* diferentes.

Los resultados del TEX₈₆ muestran cierta concordancia con algunos de los valores obtenidos en otros estudios y proponen hipótesis que relacionan de manera directa los tres índices calculados.

1. Introducció

El comportament del clima durant els darrers segles i la contribució humana al conegut Canvi Climàtic han esdevingut en els últims temps uns dels debats protagonistes. De forma atribuïble a aquest canvi climàtic, els processos naturals s'intensifiquen desencadenant episodis estacionals de risc. Tot i les evidències existents de l'impacte que les emissions antropogèniques han tingut en l'acumulació de gasos d'efecte hivernacle i en l'escalfament global, $0.76 \pm 0.2^\circ\text{C}$ de 1850 a 2005 (IPCC, 2007), els esforços també se centren en determinar la magnitud del canvi climàtic natural. La comprensió d'ambdues aportacions, antropogènica i natural, es considera com l'única via per tal de poder establir models climàtics que permetin predir les tendències climàtiques futures.

Se sap que l'atmosfera i l'oceà actuen com a sistemes interdependents connectats a través de bucles de retroalimentació complexos de forma que els corrents oceànics es poden relacionar amb models de vent atmosfèric. D'aquesta manera, temperatures més o menys elevades

tindrien una influència sobre les temperatures superficials dels oceans (SST) i, a la vegada, els oceans tindrien una funció reguladora sobre el clima degut al seu paper en l'intercanvi de calor per circulació oceànica i sobre el control del cicle de l'aigua i el règim de precipitacions (Thurman i Trujillo, 1999; Henderson, 2002).

A fi de determinar les SST es pot recórrer a la mesura instrumental directa tot i que les dades recollides resultaran relativament modernes (com a màxim 200 anys d'antiguitat) cosa que pot limitar l'estudi d'una evolució a llarg termini i a gran escala geogràfica.

Per tal de poder desenvolupar models climàtics que es remuntin a escales de temps de milions d'anys enrere calen registres que permetin fer aproximacions a les temperatures del passat. Així, és indispensable la recollida de materials diposats i acumulats durant mil·lennis que proporcionin marcadors sensibles als canvis de temperatura per tal que puguin ser utilitzats com a *proxies* de temperatura. Aquestes *proxies* actuarien com a indicadors mesurables per a reconstruir de forma indirecta un o diversos paràmetres climàtics o ambientals no observables directament (Wefer *et al.*, 1999).

Aquest projecte se centra en l'ús d'una d'aquestes *proxies* de temperatura, el TEX₈₆, combinada amb d'altres índexs en la zona coneguda com el Corrent de Benguela de la costa oest del continent africà.

L'índex TEX₈₆ permet reconstruir temperatures superficials marines a partir del nombre d'anells ciclopentans presents al Glicerol Dialkil Glicerol Tetraèter o GDGTs. Aquests compostos GDGTs consisteixen en tetraèters formats per 86 àtoms de carboni i són lípids sintetitzats per l'acció de les arquees hipertermofíliques formant part de les seves membranes. Les arquees termofíliques corresponen a les anomenades crenarqueotes marines que a més de biosintetitzar els diferents tipus de GDGTs amb entre 0 i 3 anells ciclopentans (I-IV), també sintetitzen el GDGT crenarqueol que conté un anell ciclohexà a més dels 4 anells ciclopentans corresponents (V; Schoeten *et al.*, 2000; Sinninghe Damsté *et al.* 2002). La biosíntesi dels anells en els lípids de membrana d'arquees termofíliques està considerada de forma generalitzada com a un mecanisme d'adaptació de la membrana front a canvis de temperatura (Schoeten *et al.* 2002; Wuchter *et al.* 2004).

Així, mesurant les quantitats relatives de GDGTs presents en sediments marins, és possible reconstruir la temperatura del moment en què les crenarqueotes vivien i produïen les seves membranes.

L'índex BIT (Branched and Isoprenoid Tetraether) intenta donar una estimació de la quantitat relativa de carboni orgànic d'aport terrestre en sediments oceànics, costaners i de llac. Es basa en el càlcul de l'abundància relativa dels GDGTs representatius d'ambients terrestres i marins que corresponen respectivament als GDGTs ramificats i al GDGT crenarqueol.

Aquesta informació resulta molt útil per tal de minimitzar la interferència produïda per GDGTs terrestres en els resultats d'índexs com el TEX₈₆ que utilitza exclusivament GDGTs marins produïts *in situ* per a l'estimació de les SST (°C).

Per últim els GDGTs ramificats produïts per un grup de bacteris anaeròbics encara desconeguts es distribueixen al llarg dels sediments proporcionant una nova *proxy* vàlida per a calcular les temperatures anuals mitjanes de l'aire, MAAT (Mean Annual Air Temperature).

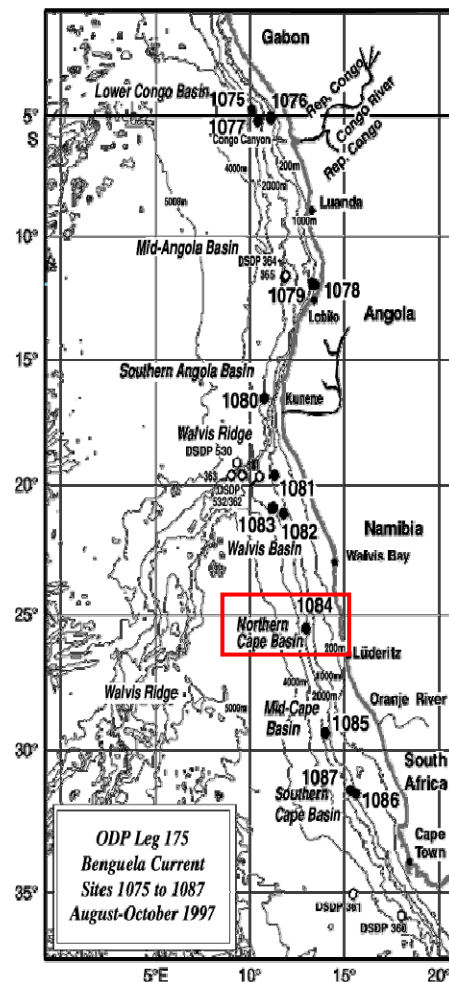


Figura 1: Mapa d'identificació dels punts d'extracció de sediments marins per a Leg 175. En vermell s'ha senyalitzat la zona d'interès per a aquest estudi. Font: Ocean Drilling Programme publications

1.1 Àrea d'estudi

El testimoni estudiat és l'identificat com ODP 175-1084 que com es pot observar a la Figura 1, es troba localitzat en la zona d'*upwelling* corresponent a la Northern Cape Basin pròxima a la cèl·lula d'aflorament de Lüderitz la qual es considera una de les més actives dins el sistema d'aflorament del Corrent de Benguela, a les costes de Namíbia. Degut al fenomen d'aflorament d'aigües profundes la productivitat és aproximadament de $180\text{gC/m}^2\text{yr}$ mentre la zona costanera del continent es caracteritza per constituir un dels deserts més àrids del món.

2. Objectius

Els principals objectius d'aquest projecte són:

1. Posar a punt el protocol en l'anàlisi de lípids GDGTs i determinar la viabilitat de l'aplicació d'aquesta nova *proxy* com a índex per mesurar les temperatures superficials marines.
2. Reconstruir les SST a partir de l'índex TEX_{86} així com les temperatures de l'aire a nivell terrestre utilitzant l'índex MAAT a partir de mostres de sediments oceànics del Corrent de Benguela, Namíbia.
3. Comparar ambdós índexs amb altres proxies per tal d'establir hipòtesis que justifiquin els resultats trobats i/o comprovar si hi ha coincidències amb altres estudis.
4. Conèixer la tendència general de les temperatures en els darrers dos milions d'anys per tal de poder-la comparar amb les tendències establertes en altres reconstruccions a escala global.

3. Metodologia

Les mostres han estat sotmeses a un pretractament i a una posterior anàlisi per separació, identificació i quantificació dels lípids d'interès, els GDGTs.

S'analitzen un total d 60 mostres amb una resolució aproximada de 33.000 anys. Aquestes, es troben ultracongelades i han hagut de passar per un procés de liofilització de 24 hores per tal de poder ser tractades.

Una vegada han estat preparades es procedeix a fer l'extracció de la matèria orgànica continguda en els sediments de manera que es pesen aproximadament 0,20g de cada mostra i s'afegeixen 5ml de barreja d'extracció DCM:MeOH en proporció 3:1.

A continuació s'introdueixen en un bany d'ultrasons durant 15 minuts seguit d'una

centrifugació que es realitza a 2200 revolucions per minut durant 5 minuts. Les mostres s'evaporen un cop centrifugades utilitzant un concentrador de buit rotatori que elimina la fracció líquida i concentra les substàncies d'interès.

Aprofitant les diferències de polaritat dels compostos presents en la mostra es realitza una extracció líquid-líquid en columna utilitzant com a dissolvent apolar l'Hexà:DCM en proporció 9:1 i com a dissolvent polar el DCM:MeOH en proporció 1:1. Els lípids GDGTs es dissolen i recullen en la fracció polar que després de diversos assecats i redissolucions es filtra per $0,45\mu\text{m}$.

Per a l'anàlisi dels extractes de sediments s'utilitza un HPLC acoblat a un espectrofotòmetre de masses equipat amb una font APCI (Atmospheric Pressure Chemical Ionization). Es programa un gradient de fase mòbil apolar amb un temps d'elució total de 30 minuts, 4 dels quals transcorren amb un flux de $0,3\text{ml/min}$ de fase mòbil en proporció hexà:*n*-propanol 98,5:1,5 i a pressió de 59 bar. En aquest temps els GDGTs presents en l'extracte se separen per afinitat amb la fase estacionària polar i elueixen. Durant els següents 9 minuts la pressió es fa augmentar fins a 125bar amb un flux de fase mòbil constant i una proporció hexà:*n*-propanol de 95:5. Durant els següents 6 minuts es torna a augmentar la proporció de propanol fins a 90:10 i es manté el mateix flux. En aquesta fase es produeix un rentat dels compostos que puguin haver quedat retinguts a la columna. Finalment, a partir del minut 20 es restableixen les condicions inicials.

Els senyals que s'obtenen en el detector són traduïts en cromatogrames que han de ser integrats per tal de conèixer valors quantitatius dels elements presents i poder-ne calcular els índexs descrits.

L'equip d'anàlisi treballa amb un rang lineal d'entre 0 a 1020 ppb utilitzant com a patró el GDGT-0 (1302) i amb un volum d'injecció de $10\mu\text{l}$. La precisió és de 0,007 pel TEX_{86} (DER 1,1%) amb una diferència de SST igual a $0,36^\circ\text{C}$ i pel BIT és de 0,002 (DER 0,3%). La reproductibilitat pel TEX_{86} ha estat de 0,008 (DER 1,7%) que equival a una diferència de $0,45^\circ\text{C}$ i per al BIT ha estat de 0,0003 (DER 4,1%).

4. Resultats i discussió

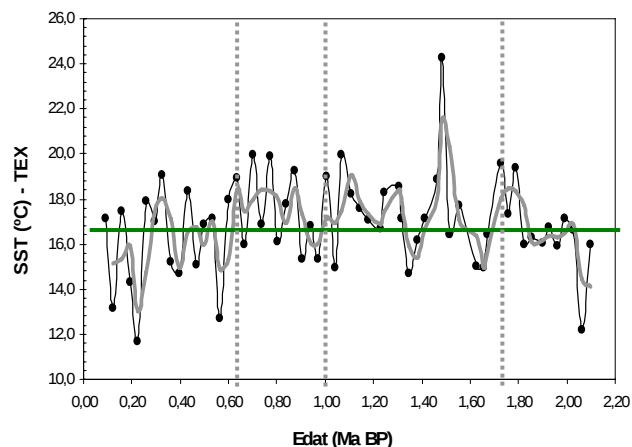
4.1. Implicacions dels índexs TEX_{86} , MAAT i BIT

El resultat entre 2,1 i 1,73 Ma BP mostren una tendència al augment de les temperatures tot i que es troba molt determinada per una

forta variabilitat que enregistra amplituds força elevades. És possible que la resolució amb què s'han pres les mesures, 33.000 anys, no sigui la suficient per conèixer la vertadera variabilitat dels resultats i les fluctuacions necessitin més valors per poder definir-se amb precisió. També és probable que aportis continentals de sediments que es recullen als resultats del BIT puguin estar confonent les SST cap a valors més elevats dels reals. Aquesta idea podria esdevenir una hipòtesi, sobretot si tenim en compte la relació temporal existent entre els pics d'augment de les SST entre 1,63 i 1,82 Ma BP i el pic pronunciat ascendent del BIT i descendent del MAAT dins el mateix període. La matèria orgànica d'origen terrestre que arriba als sediments marins conté de manera freqüent GDGTs I i V' (GDGT-0 i regio-isomer del crenarqueol) i, com a conseqüència, els valors del TEX₈₆, que en teoria només ha de reflectir la productivitat *in situ*, poden quedar esbiaixats cap a temperatures més elevades (Kim *et al.*, 2007). Si de forma hipotètica exclouéssim els dos pics de temperatura més pronunciats en l'interval 1,63 i 1,82 Ma BP estariem parlant, doncs, d'una tendència a la disminució de les SST i no del seu augment. Per reforçar aquesta hipòtesi, també les temperatures anuals de l'aire resultants de l'aplicació de l'índex MAAT mostren una tendència a la disminució, factor en relació directe amb les temperatures superficials marines. Igualment, el MAAT mostra pics pronunciats de disminució sobtada en els mateixos moments que el BIT i un d'ells en el mateix interval que el TEX₈₆. Aquest fet podria suggerir una correlació entre els períodes freds amb l'exacerbació del sistema d'afiorament causat, entre d'altres factors, per forts vents que, a la vegada, podrien estar transportant sediments terrestres cap a oceà.

A partir dels 1,73 Ma i fins aproximadament 1,05 Ma el que s'esperaria seria una periodicitat cíclica dels episodis glacials-interglacials amb una freqüència de 41Ka. Els resultats obtinguts presenten certa ambigüitat en aquesta qüestió degut al mateix motiu comentat anteriorment referent a la resolució amb què es distribueixen les mostres de sediments. Al ser aquesta de 33.000 anys, possibles fluctuacions de 41.000 anys podrien estar quedant suavitzades i/o emmascarades al no disposar de dades suficients per descriure-les. En aquest estudi és possible que aquestes puguin estar representades insuficientment per un únic valor.

Pel que fa als resultats obtinguts amb el MAAT, es reconeix inicialment una recuperació de les temperatures en relació al període anterior i una



Figures 4.1 i 4.2: Representació de les temperatures superficials marines (SST °C) i mitjanes anuals de l'aire (°C) al llarg del temps estimades a partir dels índexes TEX₈₆ i MAAT (MBT i CBT). Els valors de l'índex es representen en negre, mentre els valors en gris corresponen a la línia de tendència calculada com la mitjana per cada dos valors d'aquest. Les línies divisòries verticals indiquen canvis en la tendència dels resultats de l'índex. La línia horitzontal representa el valor mitjà per a tot el període estudiat. Font: elaboració pròpia

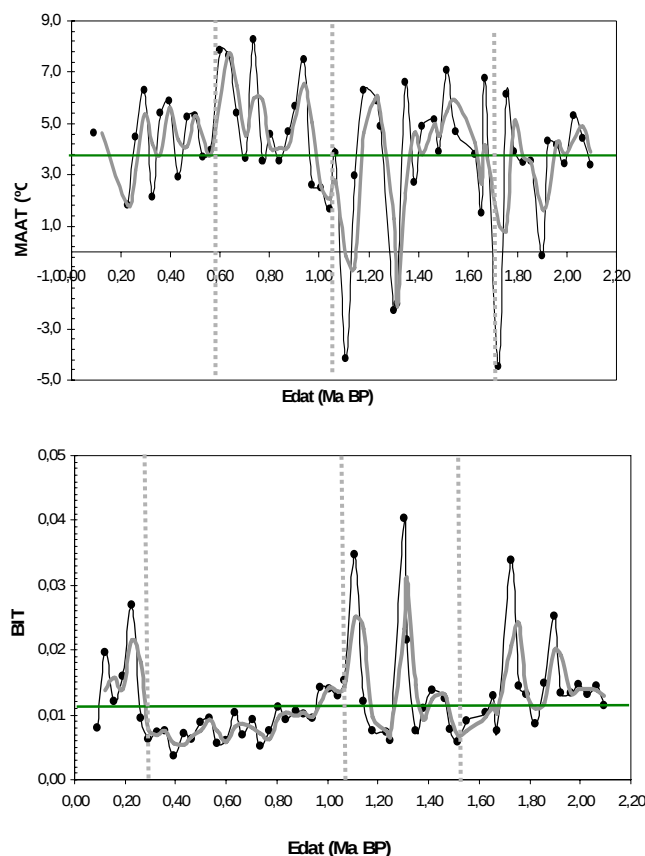


Figura 4.3: Gràfica que mostra l'índex qualitatiu BIT per a l'estimació del grau d'aportació de material sedimentari per part dels continents. Els valors de l'índex es representen en negre, mentre els valors en gris corresponen a la línia de tendència calculada com a la mitjana per cada dos valors d'aquest. Les línies divisòries verticals indiquen canvis en la tendència de les SST. La línia horitzontal representa el valor de BIT mitjà per a tot el període estudiat. Font: elaboració pròpia

posterior disminució progressiva d'aquestes fins al 1,05 Ma BP. De forma inversa, el BIT registra valors ascendents quant a l'aport de matèria orgànica terrestre als sediments marins analitzats. Aquest fet reforça la hipòtesi formulada anteriorment que proposa com a causant l'enfortiment dels vents, el conseqüent enfortiment del procés d'aflorament d'aigües fredes profundes del Corrent de Benguela i el refredament de les capes d'aire continental sense oblidar-se del major transport de sediments terrestres vers l'oceà.

Aquest període presenta addicionalment dos pics pronunciats als 1,3 i 1,1 Ma BP enregistrats en ambdós índexs i amb concordança temporal però amb tendències inverses que podrien donar suport a l'argument defensat anteriorment. D'altra banda i de la mateixa manera com s'ha comentat en el període anterior, l'esperat seria que els valors de les SST es veiessin modificats per aquest aport continental, però, degut a la variabilitat mencionada resulta complicat arribar a una conclusió precisa. El mateix succeeix a l'hora de donar una orientació als resultats de les SST.

Es podria afirmar que les temperatures es mantenen en mitjana al voltant dels 17°C com a període de transició cosa que també s'ha interpretat com a una pausa en el transcurs del refredament i ha estat mencionat en altres estudis de temperatura amb *proxies* diferents com en el cas de les alquenones (Marlow, 2001).

En l'interval que va de **1,05 Ma BP a 0,63 Ma BP** les SST tendeixen a augmentar lleugerament en uns 3°C i presenten una major definició de la variabilitat dels cicles glacials-interglacials. Els valors enregistrats pel MAAT es relacionen de forma lògica amb els del TEX₈₆ i registren valors ascendents en uns 5°C mentre que els del BIT disminueixen com seria l'esperat. Aquest canvi en la freqüència dels cicles també s'observa en els resultats pel BIT i el MAAT cosa que suggereix que es tracta d'un canvi en la periodicitat d'aquests que fins al primer terç de l'època Pleistocè era de 41Ka i que a partir d'aquest moment, conegut com la Revolució del Pleistocè Mitjà, passa a ser de 100ka amb amplituds més elevades (Berger i Jansen, 1994; Broecker i Van Donik, 1970). Malgrat que existeixen diverses teories sobre la causa d'aquest canvi en la periodicitat i sobre el motor que desencadena aquests cicles, encara no es disposa d'una resposta contrastada per aquesta qüestió.

A partir dels 0,63 Ma BP les temperatures superficials marines comencen a disminuir així com també ho fan les de l'aire mantenint la periodicitat dels cicles glacials comentada. En canvi, el BIT continua descendant de forma

progressiva fins als 0,3Ma aproximadament, moment en què torna augmentar l'aport terrestre als sediments marins sense que s'observin efectes sobre el registre de SST.

Els processos d'aflorament tenen a veure amb el gradient de temperatures oceàniques entre l'equador i els pols, així com els conseqüents moviments de masses d'aigua i aire que, al seu torn, fan que aigües profundes i fredes riques en nutrients ascendeixin fins a la superfície. La major part d'aquesta activitat es desenvolupa adjacent a la costa de Namíbia com a resposta davant el procés de transport d'Ekman induït pel vent. Tal i com s'ha comentat al llarg dels diferents períodes, l'ocurrència i enfortiment dels processos d'aflorament han estat un dels determinants en la disminució acusada de les temperatures marines i de l'aire adjacent (Ocean Drilling Programme publications, Leg 175 Site 1084). Per tal de corroborar aquesta hipòtesi, s'han portat a terme estudis basats en *proxies* com les alquenones, els isòtops d'oxigen en foraminífers bentònics o la productivitat mateixa d'aquestes àrees per tal de testar i comprovar els efectes en les zones d'aflorament.

4.2. Índex $U_{37}^{K'}$ en alquenones

Utilitzant els valors obtinguts per Marlow *et al.*, 2001 per a l'índex $U_{37}^{K'}$ en alquenones representem i comparem els valors de SST calculats per ambdós índexs.

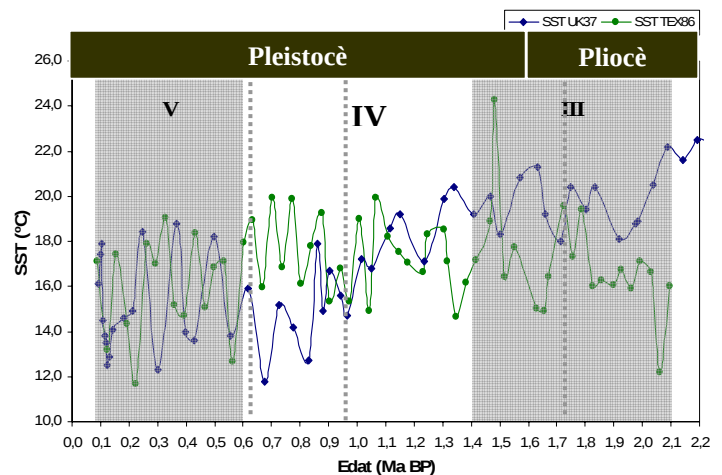


Figura 4.4: Evolució dels valors obtinguts per a la SST (°C) al llarg dels darrers 2,1 Ma en la zona del Corrent de Benguela, testimoni 175-1084. Es representen els valors determinats a partir de l'índex $U_{37}^{K'}$ (Marlow, 2001) i TEX₈₆ del present estudi. Les línies de divisió verticals corresponen a les diferents tendències descrites per les SST TEX₈₆. Les franges bicolor corresponen a les divisions realitzades per J.R. Marlow. Font: Elaboració pròpia, dades SST (°C $U_{37}^{K'}$) a partir de Marlow *et al.* (2001).

S'observa com fins a arribar als 0,9-1 Ma BP existeix força variabilitat i les tendències no resulten ser del tot comparables tot i que, com a constant, els valors de les alquenones es mantenen per sobre dels valors de les arquees.

La fase IV de les alquenones inclouria el període conegut com Revolució del Pleistocè Mitjà en aquest cas reflectint una disminució de les SST de $U_{37}^{K'}$ d'uns 4°C i un augment considerable de l'amplitud dels cicles glacials així com la disminució de la freqüència d'aquests fins a uns 100Ka. Aquest fet té relació amb els resultats del TEX_{86} encara que les temperatures pateixen un augment en comptes d'un descens i se situen per primer cop per sobre de les calculades per les alquenones. Aquest resultat és important degut a que mentre l'índex $U_{37}^{K'}$ calcula les SST(°C) a partir de la senyal de les alquenones als primers metres de la columna d'aigua, l'índex TEX_{86} utilitza els lípids de membrana de les arquees de la capa mescla (primers 100 metres). La senyal esperada, doncs, per a les alquenones seria més superficial que la del TEX_{86} i probablement també més elevada que aquesta.

Es veu com aproximadament aquesta suposició es compleix al llarg de tots els intervals establerts per a les SST del TEX_{86} a excepció del tercer en què apareixen valors més elevats. Resulta interessant observar la coincidència d'aquest fet amb el canvi en la periodicitat dels cicles que comencen a disminuir i ampliar-se.

D'altra banda, durant la fase V la variabilitat inicial continua per al registre de $U_{37}^{K'}$ i, d'igual manera que en el TEX_{86} , es registren cicles de 100Ka de freqüència i d'entre 5°C i 7°C d'amplitud.

4.3. Índex $\delta^{18}O$ en foraminífers bentònics

De la comparació de la Figura 4.5 amb la Figura 4.1 es poden extreure correlacions pel que fa a la identificació dels esdeveniments més importants. De forma general es pot comprovar el refredament al llarg del temps dels primers 100m de l'oceà i la Revolució del Pleistocè Mitjà, representada per una disminució sobtada de les SST cap al 1Ma BP seguit d'una etapa de transició on les temperatures mitjanes es mantenen. Cap al 0,6Ma BP també es poden relacionar ambdues figures per l'augment de l'amplitud dels cicles glacials així com la disminució de la periodicitat d'aquests. En definitiva, es veu com el model obtingut pel TEX_{86} es relaciona força acuradament amb els registres antàrtics utilitzant altres *proxies* com la dels isòtops d'oxigen en closques de foraminífers bentònics.

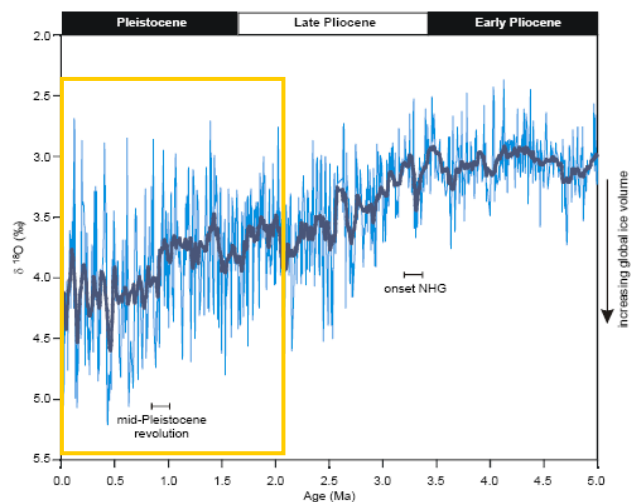


Figura 4.5: Registres d'isòtops d'oxigen en foraminífers bentònics ($\delta^{18}O$) com a *proxy* per a determinar l'evolució del volum global de gel per a l'ODP 659 (Oceà Atlàntic Nord-Est). La línia fina representa les dades originals (Tiedemann *et al.*, 1994), la línia gruixuda és la correcció per cada 20 valors. El requadre delimita l'interval de temps que inclou el present estudi. Font: modificada a partir de J.R.Marlow, 2001.

4.4. Índex de productivitat pel contingut de carboni orgànic.

L'índex de massa acumulada pel contingut total de carboni orgànic (MAR Corg) és una *proxy* per a la determinació de la productivitat total i sembla ser paral·lela al refredament general amb una intensificació de l'acumulació associada amb esdeveniments ocorreguts durant les fases II i III de J.R.Marlow, 2001

Donat el supòsit que els cicles glacials tenen una repercussió en les temperatures mitjanes del mar, és evident que també s'hi registraran conseqüències en la productivitat marina. Les aigües que ascendeixen com a producte de l'enfortiment del procés d'aflorament són aigües subsuperficials que es caracteritzen per disposar d'un alt contingut en nutrients i tenir una temperatura inferior. També se sap que aquestes zones d'*upwelling* són especialment productives. És molt probable que els nutrients que ascendeixen amb l'aigua profunda siguin la causa de l'augment en la productivitat al proporcionar les condicions idònies per a la producció de matèria orgànica en grans quantitats. Així, la relació que existiria entre temperatura i productivitat seria de tipus inversa augmentant la productivitat amb la disminució de les temperatures.

Aquest fet s'observa en la majoria dels casos representats a la Figura 4.6. Cap als 2Ma BP Marlow *et al.*, 2001 ja apuntava la abrupta disminució de les temperatures, cosa que en els resultats del TEX_{86} no es pot observar per la falta de dades anteriors. En canvi, els resultats de la productivitat recolzen aquesta observació

5. Conclusions

Donat que no existeix una única interpretació ni una única resposta en relació als resultats obtinguts en els diferents estudis, la comparació entre ells a vegades resulta subjectiva i les teories que se'n desprenen s'han d'entendre com a hipòtesis.

D'una banda, el refredament natural del clima enregistrat de forma global per molts altres estudis no sembla ser la causa única justificativa dels processos que es donen al Corrent de Benguela (Marlow et al., 2001). El fet que en aquesta zona es donin processos d'upwelling i que aquests pateixin episodis d'augment de l'ocurrència i d'enfortiment han estat un dels determinants en la disminució acusada de les temperatures marines i de l'aire adjacent (Ocean Drilling Programme publications, Leg 175, Site 1084).

Es pot concloure que els índexs utilitzats, TEX_{86} , MAAT i BIT, mantenen una coherència en els seus resultats i que, combinats, fan possible el desenvolupament d'una teoria. Es podria suggerir l'existència d'una correlació entre els episodis freds, enregistrats a l'aire continental (MAAT), i l'exacerbació del sistema d'aflorament amb una conseqüent disminució de les temperatures superficials marines (TEX_{86}) per l'ascens d'aigües fredes més profundes. Aquest fet possiblement estigui causat, entre d'altres factors, per forts vents que, a la vegada, podrien estar transportant sediments terrestres cap a oceà (BIT).

Si, com s'ha comentat, s'exclouen els pics problemàtics del primer període de les SST i es considera que la tendència principal és la disminució de les temperatures superficials es podria considerar la hipòtesi de Marlow et al. (2001) que defineix un període de transició entre les fases II i III marcat per una sobtada disminució de les SST coincidint amb l'inici de períodes glacials més intensos.

Els valors per al tercer període en el registres de SST comentats a capítol anterior mostren una certa concordança amb les teories plantejades per altres autors que afirmen l'existència d'un canvi en la periodicitat dels cicles glacials-interglacials.

Aquest canvi es produiria al final del primer terç de l'època Pleistocè, moment conegut com la Revolució del Pleistocè Mitjà, en què la periodicitat passa de 41Ka a 100Ka amb amplituds més elevades (Berger i Jansen, 1994; Broecker i Van Donik, 1970; Marlow, 2001).

Es veu com el model obtingut pel TEX_{86} es relaciona parcialment amb els registres de productivitat i força acuradament amb els registres antàrtics que utilitzen altres proxies com la dels isòtops d'oxigen en closques de

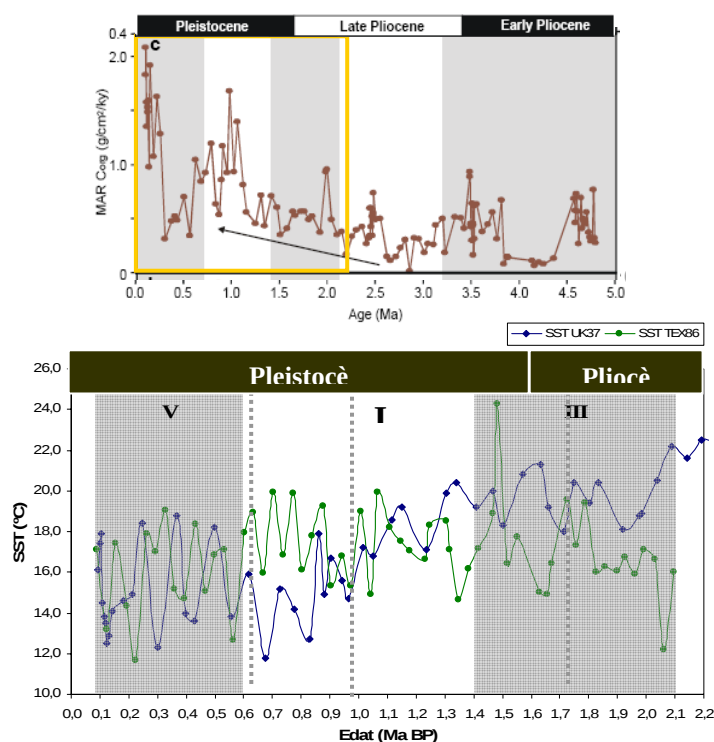


Figura 4.6: Evolució de la productivitat al llarg dels darrers 5 Ma en la zona del Corrent de Benguela, testimoni 175-1084. Es representen els valors determinats a partir de l'índex MAR (Corg) (Marlow, 2001). També es consideren els valors per a les SST mesurades pel TEX_{86} i el $U_{37}^{K'}$. Les línies de divisió verticals corresponen a les diferents tendències descrites per les SST del TEX_{86} . Les franges bicolor corresponen a les divisions de tendències realitzades per Marlow et al. (2001). Font: Figura superior modificada a partir de J.R. Marlow, 2001. Figura inferior d'elaboració pròpia incloent valors de Marlow (2001).

produint-se un augment molt pronunciat dels valors resultants. No obstant, tot i la gran dependència dels processos d'aflorament amb la productivitat, no es pot atribuir tota la responsabilitat a aquesta causa. Part d'aquests processos venen donats per un canvi a nivell global que proporciona les condicions necessàries per la inestabilitat dels fenòmens i la intensificació dels efectes de l'aflorament.

És interessant discutir l'interval de temps de 2 a 1,6 Ma BP en què la productivitat augmenta enregistrant una alçada màxima cap als 1,7 Ma BP tornant després a descendir fins a arribar als 1,5 Ma BP. Si s'observa la figura per a les SST i es té en compte la hipòtesi que l'ascens tèrmic en aquest interval fos una possible desviació per un cert aport de sediments d'origen terrestre, seria possible doncs relacionar aquest augment de la productivitat amb una disminució de les temperatures marines emmascarada pel factor confusor del BIT o, com a mínim, enfortir la teoria que en aquest període de temps la tendència de les SST és a disminuir excloent les dos pics problemàtics.

foraminífers bentònics. No obstant, també s'observa un cert allunyament respecte les teories que afirmen que les SST (°C) calculades a partir de l'índex TEX86 han de trobar-se per sota de les calculades per l'índex UK'37 sent aquestes últimes més elevades degut a la menor profunditat en la columna d'aigua dels marcadors biològics utilitzats. Els resultats mostren intervals de temps on aquesta suposició no es compleix i les temperatures calculades pel TEX86 resulten ser majors.

Seria necessària una anàlisi amb més profunditat i més resolució per tal de poder donar consistència a les hipòtesis i idees plantejades, de la mateixa manera que la comparació dels resultats amb altres estudis desenvolupats en la zona d'estudi podrien aportar noves qüestions a investigar i intentar resoldre.

6. Referències

- Berger, W.H., Wefer, G., Richter, C., Lange, C.B., Giraudeau, J., Hermelin, O., and Shipboard Scientific Party, 1998. The Angola-Benguela upwelling system: paleoceanographic synthesis of shipboard results from Leg 175. *In* Wefer, G., Berger, W.H., and Richter, C., *et al.*, *Proc. ODP, Init. Repts.*, 175: College Station, TX (Ocean Drilling Program), 505–531.
- Diester-Haass, L., Meyers, P.A., and Rothe, P., 1992. The Benguela Current and associated upwelling on the southwest African margin: a synthesis of the Neogene–Quaternary sedimentary record at DSDP Sites 362 and 352. *In*
- Dowsett, H., and Willard, D., 1996. Southeast Atlantic marine and terrestrial response to middle Pliocene climate change. *Mar. Micropaleontol.*, 27:181–193.
- Gliozzi, A., Paoli, G., DeRosa, M. i Gambacorta, A., 1983. Effect of isoprenoid cyclization on the transition temperature of lipids in thermophilic archaeobacteria. *Biochimica et Biophysica Acta.* 735 234-242.
- Hay, W.W., and Brock, J.C., 1992. Temporal variation in intensity of upwelling off southwest Africa. *In* Summerhayes, C.P., Prell, W.L., and Emeis, K.C. (Eds.), *Upwelling Systems: Evolution Since the Early Miocene*. Geol. Soc. Spec. Publ. London, 64:463–497.
- Henderson, G. M. (2002), New oceanic proxies for paleoclimate, *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 203, 1-13.
- Herndl, G. J., T. Reinthaler, E. Teira, H. van Aken, C. Veth, A. Pernthaler, and J. Pernthaler (2005), Contribution of Archaea to total prokaryotic production in the deep Atlantic Ocean, *Appl. Environ. Microbiol.*, 71, 2303-2309.
- Hinrichs, K.-U., Schneider, R.R., Müller, P.J., and Rullkötter, J., 1999. A biomarker perspective on paleoproductivity variations in two Late Quaternary sediment sections from the Southeast Atlantic Ocean. *Org. Geochem.*, 30:341–366.
- Hopmans, E. C., S. Schouten, R. D. Pancost, M. T. J. Van der Meer, and J. S. Sinninghe Damsté (2000), Analysis of intact tetraether lipids in archaeal cell material and sediments by high performance liquid chromatography/atmospheric pressure chemical ionization mass spectrometry, *Rap. Commun. Mass Spectr.*, 14, 585-589.
- Hopmans, E.C., Weijers, J.W.H., Schefuss, E., Herfort, L., Damsté, J.S.S. i Schouten, S., 2004. A novel proxy for terrestrial organic matter in sediments based on branched and isoprenoid tetraether lipids. *Earth And Planetary Science Letters* 224(1-2), 107-116.
- Huguet 2006, An improved method to determine the absolute abundance of glycerol dibiphytanyl glycerol tetraether lipids. Carne Huguet a,*, Ellen C. Hopmans a, Wilma Febo-Ayala b, David H. Thompson b, Jaap S. Sinninghe Damsté a, Stefan Schouten
- Kirst, G., Müller, P.J., Schneider, R.R., and von Storch, I., 1999. Late Quaternary temperature variability in the Benguela Current System derived from Alkenones. *Quat. Res.*, 52:92–103.
- Lange, C.B., Berger, W.H., Lin, H.-L., Wefer, G., and Shipboard Scientific Party, 1999. The early Matuyama diatom maximum off SW Africa, Benguela Current System (ODP Leg 175). *Mar. Geol.*, 161:93–114.
- Lea, D.W., (2003) Elemental and isotopic proxies of past ocean temperatures. The oceans and marine geochemistry. Elderfield. Elsevier, New York. 365-390.
- Lutjeharms, J.R.E., and Stockton, P.L., 1987. Kinematics of the upwelling front off southern Africa. *S. Afr. J. Mar. Sci.*, 5:35–49.
- Marlow, J.R., Lange, C.B., Wefer, G., and Rosell-Mele, A., 2000. Upwelling intensification as part of the Pliocene-Pleistocene climate transition. *Science*, 290:2288–2291.
- Marlow J.R., P. Farrimond, and A. Rosell-Melém 2001. Analysis of lipid biomarkers in sediments from the Benguela current coastal upwelling system (site 1084). Wefer, G., Berger, W.H., and Richter, C. (Eds.) *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results Volume 175*
- Schouten, S., Hopmans, E.C., Schefuss, E. i Damsté, J.S.S., 2002. Distributional variations in marine crenarchaeotal membrane lipids: a new tool for reconstructing ancient sea water temperatures? *Earth and Planetary Science Letters* 204(1-2), 265-274.

Shannon, L.V., 1985. The Benguela ecosystem, Part I: Evolution of the Benguela, physical features and processes. *Annu. Rev. Oceanogr. Mar. Biol.*, 23:105–182.

Summerhayes, C.P., Prell, W.L., and Emeis, K.C. (Eds.), *Upwelling Systems: Evolution Since the Early Miocene*. Geol. Soc. Spec. Publ. London, 64:331–342.

Summerhayes, C.P., Kroon, D., Rosell-Melé, A., Jordan, R.W., Schrader, H.-J., Hearn, R., Villanueva, J., Grimalt, J.O., and Eglinton, G., 1995. Variability in the Benguela Current upwelling system over the past 70,000 years. *Prog. Oceanogr.*, 35:207–251.

Thurman, H. V. and A. Trujillo Air Sea interaction, in *Essentials of oceanography, 6th ed.* Macmillan Publishing company, a division of Macmillan, Inc. pp171-204, 1999.

Wefer, G., Berger, W.H., Bijma, J. i Fischer, G., 1999. Clues to ocean history: a brief overview of proxies. Use of proxies in paleoceanography: examples from the South Atlantic. 734p

Weijers, J.W.H., Schouten, S., van den Donker, J.C., Hopmans, E.C. i Sinninghe-Damsté, J.S., 2007. Environmental controls on bacterial tetraether membrane lipid distribution in soils. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 71 703–713.

Weijers, J. W. H., S. Schouten, O. C. Spaargaren, and J. S. Sinninghe Damsté (2006), Occurrence and distribution of tetraether membrane lipids in soils: Implications for the use of the TEX86 proxy and the BIT index, *Org. Geochem.*, 37, 1680-1693.

Wuchter, C., Schouten, S., Coolen, M.J.L., Sinninghe Damsté, J.S., 2004. Temperature-dependent variation in the distribution of tetraether membrane lipids of marine Crenarchaeota: implications for TEX86 paleothermometry. *Paleoceanography* 19, PA4028, doi:10.1029/2004PA001041.