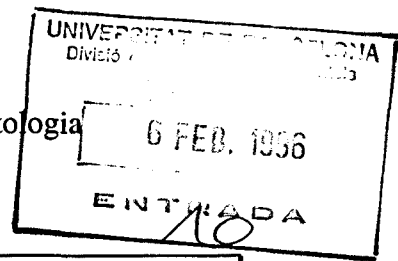


Departament de Geologia Dinàmica, Geofísica i Paleontologia  
UNIVERSITAT DE BARCELONA



**GEOLOGIA DE L'ILLA DE LIVINGSTON**  
**(SHETLAND DEL SUD,**  
**ANTÀRTIDA)**  
**Del Mesozoic al Present**

Treball fet per RAIMON PALLÀS i SERRA

dins del Departament de Geologia Dinàmica, Geofísica i Paleontologia  
de la Universitat de Barcelona  
sota la direcció del Dr. Francesc Sàbat i el Dr. Joan Manuel Vilaplana  
per optar al grau de Doctor en Geologia.

Barcelona, Gener de 1996

El Doctorand  
Raimon Pallàs i Serra

Els Directors  
Francesc Sàbat

Joan Manuel Vilaplana

043 PALLAS SERRA

Aquest treball ha estat finançat per una beca  
de Formació de Personal Investigador  
del Ministeri d'Educació i Ciència  
i s'emmarca dins de les Accions Especials ANT89-822E i ANT90-1095E  
i el Projecte d'Investigació ANT91-1270  
de la Comissió Interministerial de Ciència i Tecnologia (CICYT)

### 5.3.-ANÀLISI DE LES PLATAFORMES D'EROSIÓ MARINA DE LES ILLES SHETLAND DEL SUD

Un dels trets més destacats de la geomorfologia de les Illes Shetland del Sud és la presència de múltiples nivells de plataformes d'erosió marina emergides, situades a algun centenar de metres per damunt del nivell del mar actual. Tot i que es tracta d'un dels elements més importants del relleu de l'arxipèlag, també es tracta d'un dels elements més desconeguts. Hi ha una clara manca d'informació sobre aspectes tan fonamentals com són la dinàmica i edat d'aquests nivells i el mode, velocitat i origen de la seva emersió. En aquest apartat discutim i aportem noves idees sobre les plataformes d'erosió marina de les Illes Shetland del Sud i les utilitzem per acotar alguns aspectes de l'evolució tectònica recent de l'arxipèlag. Alguns d'aquests aspectes són tractats a Pallàs et al. (submitted) (vegeu l'Annex D).

Recomanem que, abans de llegir els següents apartats, feu un repàs dels conceptes teòrics sobre *variacions relatives del nivell del mar* que recollim a l'Annex C.

#### 5.3.1. Dinàmica de les plataformes

A partir d'observacions dutes a terme a la Península de Byers i a la Península de Fildes (Illa de King George), Hansom (1983) fa un estudi detallat de la dinàmica de les plataformes de les Illes Shetland del Sud. Aquest autor se centra en la plataforma marina actual i en la plataforma de fins a 17 m sobre el nivell del mar. Les conclusions obtingudes es poden esquematitzar de la manera següent:

- a) El fet que les plataformes de les Illes Shetland del Sud tenen el seu màxim desenvolupament en les àrees de costa protegides (badies) més que no pas en els sortints rocosos indica que, contràriament al què passa en les plataformes de latituds baixes, el procés que majoritàriament les modela no està directament relacionat amb l'efecte de l'onatge.
- b) Les plataformes de les Illes Shetland del Sud tenen un grau molt baix d'inclinació cap a mar obert (menor que les plataformes de latituds baixes, segons la mostra de Hansom, 1983 entre 2° i 13 °) per haver estat afectades pels següents processos: (1) El gel flotant, en fragments de dimensions molt variables (desde grans plaques d'entre 0.5 i 3.0 m de gruix fins a blocs de gel submètrics o runa glacial) és mogut pel vent i arrambat contra la costa durant la marea alta. Les oscil·lacions mareals, el vent i l'onatge fan que aquest gel flotant (que incorpora fragments de roca en la seva base) provoqui una intensa abrasió del substrat i acumuli fragments de roca en la zona de la platja emergida mitjançant un mecanisme de *bulldozing*. (2) Durant la marea baixa, hi pot haver una certa gelifracció del substrat en la zona intermareal. L'efecte d'aquest darrer procés té una importància secundària respecte a l'efecte del gel flotant.
- c) Les condicions *polars* a les quals està sotmesa la costa de les Illes Shetland del Sud permeten que el modelat de les plataformes sigui molt més efectiu que en àrees temperades dominades únicament per l'acció de l'onatge. El clima actual de l'arxipèlag és idoni perquè hi pugui haver un ràpid modelat de la plataforma. Per tant, els períodes interglacials tals com l'Holocè (sempre que siguin prou freds i permetin la presència de gel flotant) són els moments en què la formació de les plataformes és més afavorida.

Cal tenir en compte que en les porcions de costa corresponents al marge glacial (constituïdes per penya-segats de gel) el substrat rocós es troba protegit i no pot ser afectat de forma efectiva per la dinàmica marina ni l'acció erosiva del gel flotant. Així doncs, els períodes en què és més factible la formació de les plataformes d'erosió marina, són els interglacials o els períodes no glacials en què, degut al menor o nul recobriment glacial, el substrat rocós no es troba protegit i és susceptible de ser exposat a l'acció del gel marí.

El cert grau d'inclinació cap a mar de les plataformes d'erosió marina fa que els seus límits externs es trobin a altituds inferiors respecte als seus límits interns. Els límits externs de les plataformes emergides acostumen a formar escarpaments que són fàcilment reconeguts al camp i la foto aèria i que sovint s'utilitzen per detectar i caracteritzar aquestes plataformes. És important de ressaltar, però, que la posició i altitud de la part superior de l'escarpament d'una plataforma varien en funció del desenvolupament de les plataformes inferiors i, per tant, no ens dona una informació precisa sobre la plataforma que estem estudiant. El tret realment important i característic d'una plataforma d'erosió marina és el seu límit intern; aquesta és la línia que permet de definir amb més aproximació l'altitud a la qual es trobava el nivell del mar en el moment de la seva formació.

### 5.3.2. Edat de les plataformes

Tal com hem descrit en el Capítol 4, les plataformes d'erosió marina de l'Illa de Livingston es troben recobertes per sediments glacials que corresponen a fases glacials holocenes o anteriors. Això implica que la formació de les plataformes ha de tenir, com a mínim, una edat pleistocena (vegeu l'apartat 5.5.).

A l'Illa de Livingston les plataformes sempre tallen roques mesozoiques, i per tant la seva edat màxima queda pobrament acotada. Tot i això, les successions estratigràfiques més modernes que es troben en d'altres parts de les Illes Shetland permeten d'acotar millor l'edat de formació d'algunes de les plataformes que s'hi troben. A la localitat de Lions Rump (Illa de King George) hi ha un nivell fossilífer anomenat clàssicament *Pecten conglomerate* que es troba interstratificat en una successió de roques volcàniques i sedimentàries la qual, en la seva part superior, és tallada per una plataforma marina a una altitud de 150-180 m. A partir de la fauna de foraminífers i de la similitud amb un dipòsit de l'Illa de Cockburn (banda nord-est de la Península Antàrtica), a aquest conglomerat amb pectínids inicialment se li va assignar una edat de Pliocè (Barton 1965). D'acord amb aquesta datació, John & Sugden (1971) consideren que la plataforma de 150-180 m d'aquesta localitat té una edat màxima pliocena. Posteriorment, però, Birkenmajer (1980b, 1982) inclou aquesta successió en la *Formació Polonez Cove*, la qual, a partir d'estudis paleontològics i anàlisis K-Ar de les laves és datada com a Oligocè mitjà (Birkenmajer & Gazdzicki 1986, Birkenmajer et al. 1991). L'edat d'aquesta formació encara no està clara, ja que noves anàlisis Ar-Ar suggereixen que podria tenir una edat de Miocè inferior (J.L. Smellie, com. pers.). En tot cas, sigui quina sigui l'edat correcta de la *Formació Polonez Cove*, la successió en la zona de Lions Rump, és tallada per un megadíc que té una edat tant K-Ar com Ar-Ar de 22 Ma (Birkenmajer et al. 1986 i John Smellie, comunicació personal). Aquest dic queda també tallat per la plataforma d'erosió marina de 150-180 m i, per tant, l'edat màxima de la plataforma es pot establir com a Miocè inferior. Al Cap de Melville (Illa de King George), hi ha una plataforma a una alçada de 150 m que talla roques

sedimentàries i dics, els quals tenen edats compreses entre 19.9 i 23 Ma. Per tant, la plataforma d'aquesta àrea també té una edat màxima de Miocè inferior.

Així doncs, concloem que les plataformes d'erosió marina de les Illes Shetland del Sud es poden haver format entre el Miocè inferior i el Pleistocè superior, sense que de moment se'n pugui precisar l'edat de forma més acurada.

### 5.3.3. Com es produeix l'emersió de les plataformes?

#### Mode d'emersió

En l'apartat 4.3.3. hem destacat l'efecte d'una tectònica de blocs en l'àrea de la Península de Hurd. Algunes de les lineacions mostrades en les fotos aèries, es poden interpretar com a falles. La plataforma de 160-90 m de la costa oest de la Península de Hurd sembla afectada per aquest fallament (Fig. 4.6.). Així doncs, considerem que en d'altres àrees de les Illes Shetland del Sud l'efecte d'aquesta fracturació pot ser que es reflecteixi en diferències d'altitud entre les plataformes de diferents localitats.

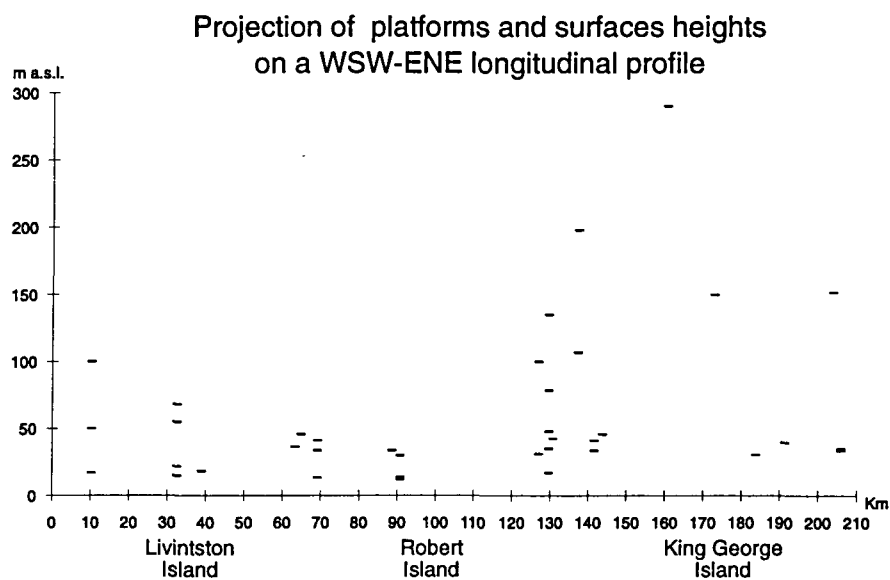
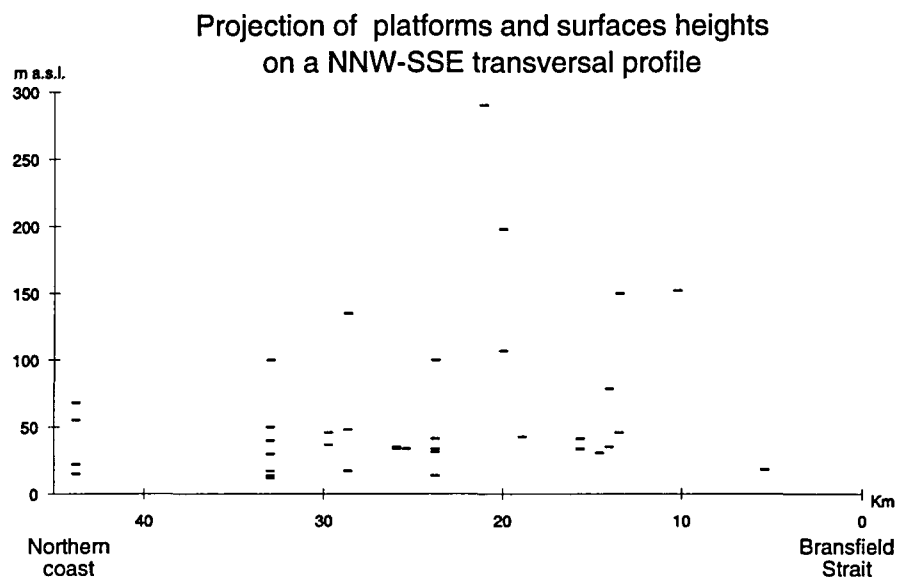
A part de la Península de Byers i del cap de Shirreff, a les Illes Shetland hi ha diverses àrees amb nivells de plataformes d'erosió marina ben desenvolupades formant una sèrie de, com a mínim, 4 plataformes (comptant la plataforma actual propera al nivell de 0 m). D'acord amb John & Sugden (1971) aquestes àrees són l'Illa Heywood (nord de l'Illa Robert), la Punta Harmony (a l'Illa Nelson) i la Península de Fildes (Illa de King George). La Taula 5.1. resumeix les altituds dels límits interns de les plataformes i posa de manifest diferències importants entre aquestes localitats.

	lower platforms				higher
Byers P.	0m	18m	50m	100m	
C. Shirreff	0m	15m	22m	55m	68m
Heywood I.	0m	12m	13,8m	29,9m	
Harmony P.	0m	13,5m	33,6m	48m	
Fildes P.	0m	17m	48m	135m	

**Taula 5.1.** Altituds dels límits interns de les diferents plataformes d'erosió marina, per les localitats en què hi ha una successió més completa. Les dades de l'Illa Heywood, la Punta Harmony i la Península de Fildes són extretes de John & Sugden (1971).

*Table 5.1. Height of the marine platforms' inner limit corresponding to sites in the South Shetland Islands where there is a complete succession of at least three emerged levels. Data from Heywood Island, Harmony Point and Fildes Peninsula are from John & Sugden (1971).*

En la figura 5.2. hi ha representades les altituds de les plataformes observades per John & Sugden (1971) a les Illes Shetland del Sud, conjuntament amb les altituds de les plataformes observades per nosaltres en l'Illa de Livingston. La figura 5.2.a permet de detectar possibles variacions en l'altitud de les plataformes transversalment a l'arxipèlag, mentre que la figura 5.2.b permet de detectar possibles variacions longitudinals. L'altitud de les plataformes no mostra cap relació clara amb la seva distribució geogràfica. Amb els espaiats altitudinals que hi ha no és possible d'aïllar grups de



**Figura 5.2.** Perfils transversal (a) i longitudinal a l'arxipèlag de les Illes Shetland del Sud (b), en què hem projectat les altituds a la qual es troben els límits interns de les plataformes i superfícies descrites per John & Sugden (1971).

**Fig. 5.2.** Transversal (a) and longitudinal (b) projection of the marine platforms and surfaces' inner limits across the South Shetland Islands archipelago. Platform height data after John & Sugden (1971).

plataformes de diferents alçades, els quals puguin correspondre a plataformes correlatives.

Aquesta aparent manca d'ordre en la distribució de les plataformes i els marcats desnivells entre les plataformes d'unes i altres localitats poden tenir dues causes: (1) no sempre es preserven ni tots ni els mateixos nivells de plataforma en les diferents localitats o (2) la distribució de les plataformes, no és el fruit d'un moviment d'emersió generalitzat, homogeni, del conjunt de l'arxipèlag, sinó d'una tectònica de blocs que té com a resultat unes VRNM diferents en cada localitat. Tot i que no es pot descartar que la primera possibilitat jugui un paper important, l'observació feta a la Península Hurd sobre el fallament que afecta la plataforma de 160-90 m (apartat 4.3.) i l'observació d'una compartimentació a nivell del conjunt de l'Illa de Livingston (apartats 4.8 i 5.2.1.) indica que bona part del desordre en l'altitud de les plataformes al llarg i ample de l'arxipèlag podria ser causat pel moviment tectònic diferencial entre els blocs que constitueixen l'arxipèlag.

A més, les diferències en els espaiats altitudinals entre les diferents plataformes suggereixen que l'efecte de la tectònica de blocs no s'hauria produït únicament amb posterioritat a l'emersió de les plataformes, sinó que els dos processos s'haurien produït sincrònicament.

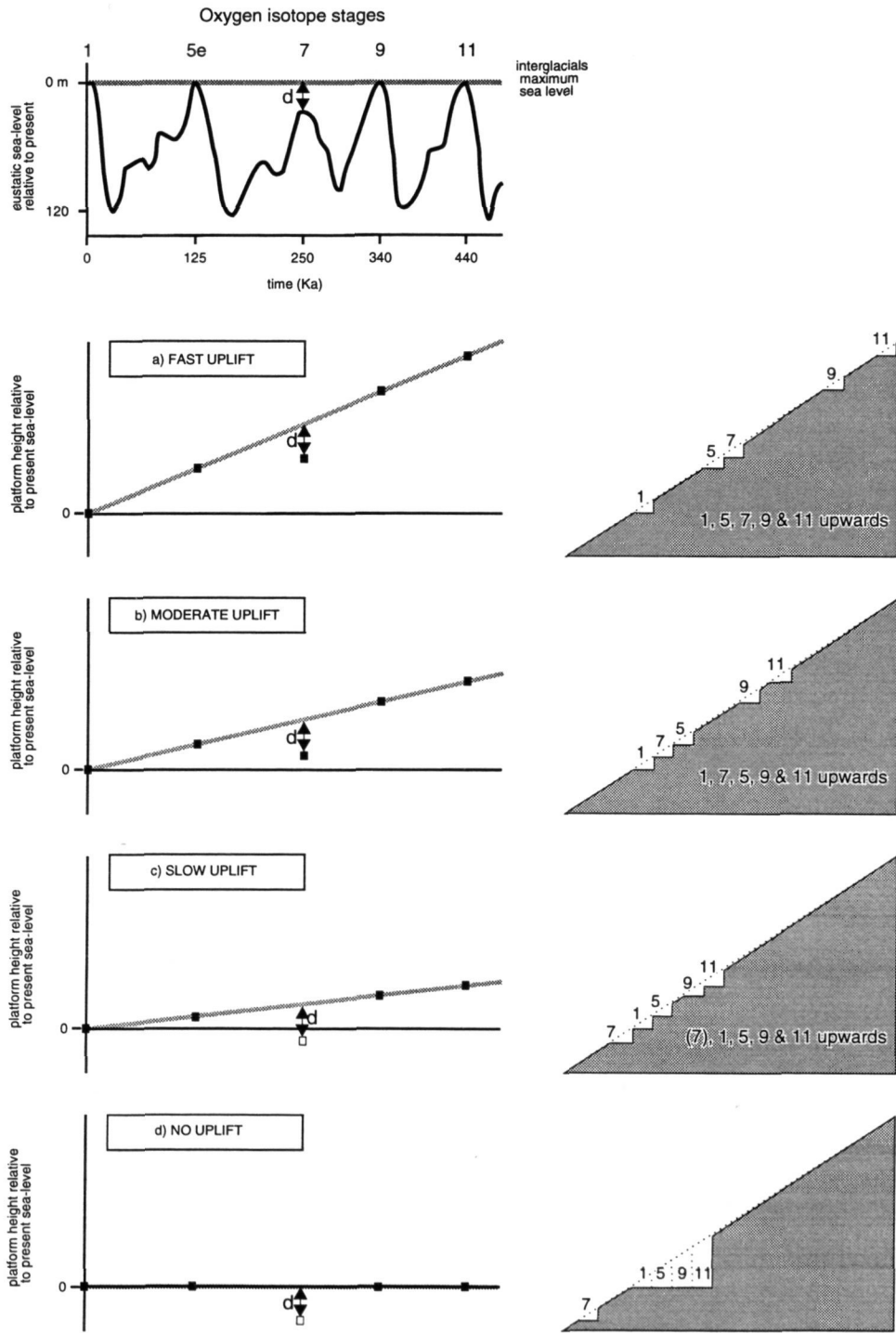
### Velocitats d'emersió

En l'apartat 5.3.2. hem dit que les plataformes d'erosió marina tant poden ser quaternàries com terciàries. A més, en cas que les plataformes d'erosió marina siguin quaternàries han de correspondre a les edats dels successius períodes interglacials perquè fora d'aquests períodes el recobriment glacial és massa extens per permetre el modelat del substrat rocós per part del mar. En principi, en una costa sotmesa a emersió, les plataformes inferiors haurien de ser més joves que les plataformes superiors. Amb aquesta idea simple, les plataformes d'alçades creixents es poden assignar temptativament als successius períodes interglacials quaternaris d'edats més antigues.

Per dur això a terme, comptem amb la informació que proporcionen els estudis dels isòtops de l'oxigen dels sediments dels fons oceànics. Tal com expliquem detalladament en l'Annex C, les corbes de variació isotòpica de l'oxigen a més de ser la base per fer la divisió en estades del registre del Quaternari i del Pliocè superior, permeten de distingir entre períodes glacials i interglacials donant una idea molt ajustada de la seva edat i una idea aproximada de la seva *intensitat* relativa (veure Annex C). Els màxims interglacials més recents (segons Shackleton & Opdyke 1973) corresponen a les edats següents:

Estatge 1	0 Ka
Estatge 5e	125 Ka
Estatge 7	250 Ka
Estatge 9	340 Ka
Estatge 11	440 Ka

Aquests estudis posen de manifest que entre els períodes interglacials corresponents als estatges 1 (o actual), 5e, 9 i 11, no hi ha diferències apreciables del nivell glàcio-eustàtic, mentre que durant els estatges 7, 13, 15, 17 i 19, el nivell del mar podria haver estat més baix que en l'actualitat. Aquest fet, tal com suggereixen Shackleton & Opdyke (1973), pot provocar que en una costa sotmesa a emersió lenta, la plataforma marina corresponent a l'estatge 7 es pugui situar per sota de la plataforma corresponent a l'estatge 5e i que fins i tot es trobi submergida (per sota de la plataforma de l'estatge 1 o Holocè). Malauradament, les incerteses en la interpretació del registre de  $\delta^{18}\text{O}$  dels



**Figura 5.3.** Variació en l'ordenament de les plataformes que es produeix a mesura que s'incrementa la velocitat d'aixecament tectònic. Partim de la base que les plataformes d'erosió marina es formen durant els estades interglacials. La corba del  $\delta^{18}\text{O}$  (gràfic superior) indica que el nivell glàcio-eustàtic dels estades 1, 5e, 9 i 11 són equivalents, mentre que el nivell glàcio-eustàtic de l'estatge 7 era més baix, amb un desnivell  $d$  de valor desconegut. L'altra informació essencial que ens dona aquesta corba és l'espaiat temporal entre els diferents estades. Els esquemes  $d$  a  $a$  són els gràfics edat/altitud que resulten a mesura que s'augmenta la velocitat d'aixecament tectònic. Els triangles de la dreta mostren quin seria l'ordenament de les plataformes que teòricament es produiria en cadascun d'aquests casos.

**Fig. 5.3.** Diagram showing how platforms corresponding to different interglaciations may be arranged as tectonic uplift is increased. It is considered that marine erosion platforms can only develop during interglaciations (see text for a discussion). The  $\delta^{18}\text{O}$  curve (above) shows equivalent glacio-eustatic levels during stages 1, 5e, 9 and 11, while a lower eustatic level is indicated for stage 7 (to an unknown amount =  $d$ , see Annex C). This curve also indicates the age of the different interglaciations.

**a) to d)** are age/height diagrams showing how the distribution of platform levels varies as tectonic uplift is decreased. The resulting distribution on coastal land is represented by the triangles to the right.

foraminífers senyalades per Shackleton (1987) provoquen que el desnivell eustàtic entre els estatsges 7 i 1 sigui una incògnita i per tant no es pugui calcular l'alçada a la qual es trobaria la plataforma corresponent en funció d'una determinada velocitat d'emersió (Annex C).

Depenent de la velocitat d'emersió i del desnivell entre el nivell glàcio-eustàtic de l'estatge 7 i els estatsges 1, 5, 9 i 11, en una àrea sotmesa a una emersió aproximadament a ritme constant, els nivells marins corresponents als darrers estatsges interglacials es poden ordenar segons les tres possibilitats següents (vegeu la figura 5.3.).

- a) Les plataformes successivament més altes corresponen als estatsges 1, 5e, 7, 9 i 11.
- b) Les plataformes successivament més altes corresponen als estatsges 1, 7, 5e, 9 i 11.
- c) Les plataformes successivament més altes corresponen als estatsges 1, 5e, 9 i 11 (la plataforma corresponent a l'estatge 7 es troba submergida).

A la figura 5.4. hem representat gràficament l'aplicació d'aquestes possibilitats a les localitats de les Illes Shetland del Sud en què hi ha una successió de com a mínim tres plataformes emergides. En la Taula 5.2. es mostren, a partir de les hipòtesis formulades, els rangs en què es mouen els índexs mitjans i els índexs màxims d'emersió esperables a les Illes Shetland del Sud, derivats de l'anàlisi de la figura 5.4.

Site	mean emergence rate	maximum emergence rate between successive interglaciations	maximum emergence rate, from the last interglaciation to Present
Byers P.	0.19 m/ka to 0.30 m/ka	0.50 m/ka	0.4 m/ka
C. Shirreff	0.10 m/ka to 0.15 m/ka	0.33 m/ka	
Heywood I.	0.06 m/ka to 0.09 m/ka	0.16 m/ka	
Harmony P.	0.09 m/ka to 0.14 m/ka	0.26 m/ka	
Fildes P.	0.23 m/ka to 0.39 m/ka	0.87 m/ka	

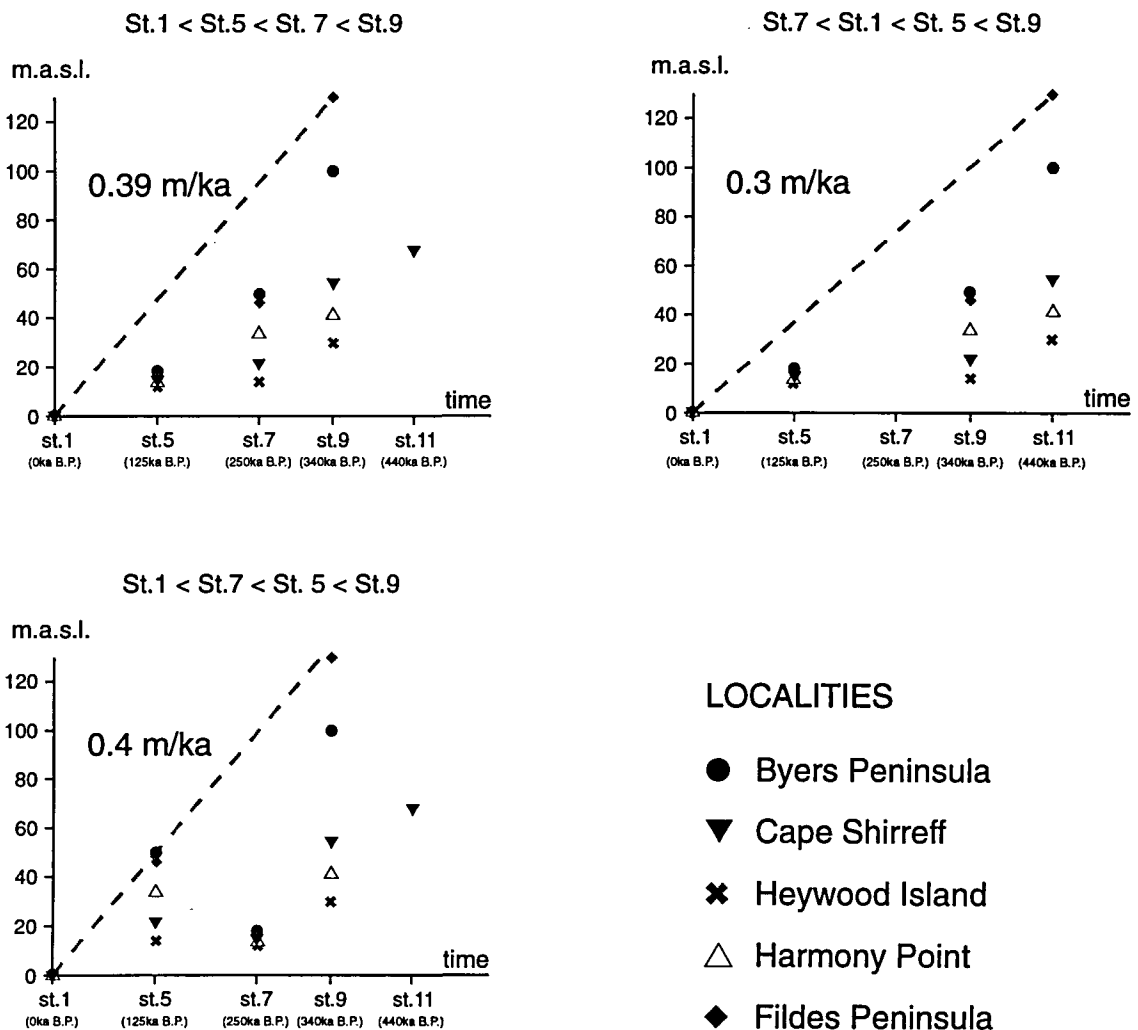
**Taula 5.2.** Resum dels índexs mitjans i màxims d'emersió per a les diferents localitats estudiades, quan a les plataformes se'ls assignen les edats dels estatsges interglacials quaternaris més recents.

*Table 5.2. Summary of the mean and maximum rates of emergence deduced from the analysis of marine platforms in the South Shetland Islands, when considering they correspond to the most recent Pleistocene interglaciations. See Fig. 5.4. These figures have to be considered extreme maximum values because platforms may be even Tertiary instead of late Pleistocene in age.*

És perfectament possible que les plataformes de les Illes Shetland del Sud corresponguin a períodes interglacials més antics que els assignats en les hipòtesis anteriors o fins i tot que les plataformes marines s'haguessin format durant el Terciari. Per tant, les velocitats d'emersió reflectides en la Taula 5.2. constitueixen valors màxims extrems.

Si a tall aproximatiu apliquem l'índex mitjà d'emersió més elevat (0.39 m/ka) a les platges residuals situades a una altitud de 275 m (observades per John & Sugden 1971), l'edat mínima resultant per aquests nivells marins és de 705 ka BP.





**Figura 5.4.** Gràfics edat/altitud corresponents a les diferents possibilitats d'ordenament de les plataformes d'erosió marina de les 5 localitats de les Illes Shetland del Sud en què hi ha un mínim de tres nivells emergits. Els tres gràfics corresponen a les tres possibilitats d'ordenament de les plataformes, quan se'ls assigna les edats dels darrers estats interglacials (corresponents a les possibilitats a, b i c de la figura 5.3.). Les diferents localitats estan representades pels símbols mostrats a la llegenda. La línia recta discontinua representa l'índex màxim d'aixecament tectònic esperable entre el darrer període interglacial i el Present, que resulta ser 0.4 m/ka o inferior. Per períodes més llargs, si es tenen en compte possibles variacions en la velocitat d'aixecament al llarg del temps, les plataformes de la Península de Fildes indiquen la possibilitat d'un índex d'aixecament màxim de 0.87 m/ka entre els estadis 11 i 9 (gràfic inferior). En qualsevol cas, però, els índex mitjans d'aixecament per totes les localitats i tenint en compte les tres possibilitats representades a la figura, oscil·len únicament entre 0.06 i 0.39 m/ka. Cal tenir en compte que les plataformes, enlloc de ser quaternàries, podrien ser terciàries i, per tant, considerem tots aquests índex com a valors extrems.

**Fig. 5.4.** Time/height diagrams showing the three possible arrangements of the marine erosion platforms at localities on the South Shetland Islands. The age of the most recent interglaciations has been tentatively applied to the increasingly higher platforms at localities where there are at least 3 emerged levels. Three different hypotheses have been considered to take into account for the fact that eustatic sea-level during stage 7 was lower than during stages 11, 9, 5e and 1 (or Holocene) (see Fig. 5.3.). Discontinuous straight lines represent the maximum tectonic uplift rate between the last interglaciation (stage 5) and the Holocene. The maximum tectonic uplift rate which can be deduced for this period is 0.4 m/ka. When considering longer periods and varying rates through time, the distribution of platforms in Fildes Peninsula indicates the possibility of a maximum tectonic rate of 0.87 m/ka (between interglaciations of stages 11 and 9, lower diagram). All three possibilities indicate average velocities between 0.06 and 0.39 m/ka. It has to be borne in mind that platforms may be Tertiary as well as Pleistocene and, consequently, all these figures should be considered as extreme maximum values.

### 5.3.4. Origen de l'emersió de les plataformes

La corba isotòpica de l'oxigen (Annex C) indica que al llarg de tot el Quaternari el nivell relatiu del mar durant els períodes interglacials s'ha mantingut, a grans trets, aproximadament a la mateixa altitud que en l'interglacial actual (Holocè). Això comporta que si les plataformes de les Illes Shetland del Sud s'haguessin format durant el Quaternari, la seva emersió hauria estat originada obligatòriament i únicament, per un procés d'aixecament tectònic. En aquest cas, els valors màxims en la velocitat d'emersió deduïts anteriorment es poden traduir directament a índexs d'aixecament tectònic. A més, com a primera aproximació, el moviment diferencial de blocs entre les 5 localitats de l'arxipèlag estudiades s'hauria pogut produir a unes velocitats relatives de com a màxim 0.77 m/ka (valor corresponent a la diferència de velocitats d'emersió de la Península Fildes i de l'Illa Heywood).

En cas que les plataformes s'haguessin format durant el Terciari, a part d'un origen tectònic, l'emersió de les illes també podria tenir un origen eustàtic. Tal com expliquem detalladament en l'Annex, segons Haq et al (1988) es produeix un descens eustàtic global des del Cretaci superior ençà. Segons aquests autors, entre l'Eocè inferior (53 Ma) i el Pliocè superior, l'envolvent dels màxims eustàtics ha davallat des d'aproximadament 225 m per sobre el nivell del mar actual fins als valors propers a 0 m, típics dels interglacials Pleistocens i de l'Holocè (Fig. C.1.). Aquest descens es considera que té un origen tecto-eustàtic (variació del volum de les dorsals oceàniques, vegeu l'Annex C). A més, cal pensar que com a mínim alguns dels cicles de segon ordre i cicles de major ordre assenyalats per aquests autors, deuen constituir realment cicles eustàtics (és a dir, amb efectes a escala global) i per tant també són susceptibles de quedar registrats en la distribució de les plataformes de les Illes Shetland del Sud. L'origen d'aquests cicles de segon ordre és glàcio-eustàtic.

Així doncs, en el cas que les plataformes de les Illes Shetland del Sud fossin terciàries no es pot descartar la presència d'un cert component tecto-eustàtic i/o glàcio-eustàtic. Tot i això, els processos eustàtics terciaris per si sols difícilment poden explicar la distribució actual de les plataformes. Les diferències en les altituds de les plataformes de les diferents localitats són probablement atribuïbles a l'efecte de la tectònica de blocs. A més, el fet que l'espaiament entre les plataformes sigui tan clarament diferenciat entre les diverses localitats suggereix que el moviment relatiu entre els blocs es deu haver produït en el mateix període que la formació de les plataformes, i no simplement com un retoc posterior.

Les plataformes de les Illes Shetland del Sud es disposen adjacentment a la línia de costa, tant a la banda que mira cap al Pas de Drake com la banda que mira en direcció cap a l'Estret de Bransfield. Per tant, són uns elements que s'han d'haver format posteriorment a la individualització de les diferents illes de l'arxipèlag respecte de la Península Antàrtica. Això implica que la seva formació ha d'haver estat sincrònica al procés d'obertura de la conca extensional de l'Estret de Bransfield. Les Illes Shetland del Sud es troben just al marge del rift de Bransfield i per tant, tal com hem discutit en l'apartat 5.2.4., és molt possible que experimentin aixecament tectònic originat per un mecanisme de tipus espatlla (veure Annex C).

## 5.4.-ANÀLISI DE LES PLATGES EMERGIDES DE LES ILLES SHETLAND DEL SUD

Les platges emergides són trets geomorfològics que ens donen una informació valuosa sobre la part d'història més recent de l'arxipèlag de les Illes Shetland del Sud. Per entendre com han actuat els processos geològics en aquesta àrea durant l'Holocè, és important de conèixer quina és la dinàmica de les platges actuals, l'edat de les platges emergides i quins són els mecanismes que n'han produït l'emersió. Bona part d'aquests aspectes són tractats a Pallàs et al. (1995a) i Pallàs et al. (submitted) (vegeu l'Annex D).

Recomanem que prèviament a la lectura dels següents apartats feu un repàs dels conceptes teòrics sobre *variacions relatives del nivell del mar* que recollim a l'Annex C.

### 5.4.1. Dinàmica de les platges

La dinàmica de les platges àrtiques o antàrtiques no es coneix tan bé com les de latituds més baixes. Segons Moore (1968) i Greene (1970) el fet que durant la major part de l'any el mar es trobi gelat fa que s'impedeixi l'acció intensa de les onades durant tot aquest període i que les tempestes d'hivern (que en la majoria de llocs són les més intenses) no puguin afectar de forma tant efectiva la morfologia de la platja. Tot i això, cal tenir en compte que el mar gelat pot tenir un paper molt important en el modelat de les platges. Segons Hansom (1983), durant l'hivern el mar gelat pot arribar a uns gruixos de 0.5 a 3 m. Aquestes plaques de gel flotant, es mouen en funció del vent o les mareas i, quan són empeses contra la costa, són capaces de modificar la morfologia costanera tot transportant material des de les parts baixes de la platja cap als crestons de les bermes. En algunes de les àrees costaneres de l'Àrtic canadenc, on les temperatures són prou baixes per mantenir el gel marí durant la major part de l'any, es formen cordons de fins a 9 m (!) d'altitud sobre el nivell del mar mitjançant aquest mecanisme de *bulldozing* (Hodgson et al. 1994). En el cas de les platges de les Illes Shetland, l'acció de les onades pot ser inhibida per la presència del gel marí durant alguns dels mesos d'hivern però és possible que l'acció de *bulldozing* permeti la construcció de les bermes de forma més efectiva que mitjançant l'acció de l'onatge, durant la resta de l'any.

John & Sugden (1971) descriuen que el nivell de platja de 18'5 m a la Península de Fildes (Illa King George) té associat un solc de rere-berma a 12 m . Segons aquests autors l'única manera d'explicar l'alçada d'aquesta berma és mitjançant una lleugera transgressió marina. No obstant això, Shepard (1973) indica que en les típiques platges de graves es poden formar crestons a una alçada de 6 m per damunt del nivell de la marea alta (sense intervenció del gel marí i amb estabilitat del nivell relatiu del mar). Aquest desnivell entre el crestó i el nivell de marea alta registrat per Shepard és gairebé de la mateixa magnitud que el del crestó de 18'5 m de John i Sugden i per tant sembla que aquest es pot explicar sense la necessitat de cap transgressió. D'acord amb Shepard, creiem que la morfologia en bermes i terrasses de les Illes Shetland del Sud és perfectament explicable sense la intervenció de períodes transgressius o d'estabilitat relativa del nivell marí. La variació al llarg del temps de les condicions marines i el probable efecte de *bulldozing* efectuat pel gel marí durant l'hivern, possiblement permet d'explicar la morfologia de les platges encara que el moviment general del nivell relatiu del mar no hagués estat altre que el d'un descens continuat.

Tal com hem observat a l'Illa de Livingston, el límit superior de la platja activa (zona amb graves fresques, no colonitzades per líquens ni gramínies) es troba entre 1.5 i 4.5 m per damunt del nivell de marea alta (Fig. 4.5.). Tenint en compte que l'amplitud de la marea en aquesta àrea és de l'ordre de 3 m, es dedueix que la diferència entre el nivell mitjà del mar i la part superior de la platja activa és de, com a mínim, 3 m. Segons això, la possible acció combinada de les ones i del gel marí tenen la capacitat de sedimentar material a una altitud de com a mínim 3 m sobre el nivell mitjà del mar.

Cal pensar que aquesta conclusió és també aplicable a les platges elevades més antigues, desconnectades del nivell del mar actual. Per una berma situada a 18 m d'altitud, el nivell del mar corresponent s'havia de trobar a una altitud màxima de 15 m sobre el nivell del mar actual.

### 5.4.2. Edat de les platges

En el Capítol 4 hem vist que en diverses localitats de l'Illa de Livingston hi ha una clara interrelació entre sediments glacials i els nivells de platja emergits. Això ens ha permès, per a aquestes localitats, d'establir una cronologia relativa entre diversos nivells de platges i les fases glacials. El següent pas en la nostra anàlisi és establir una cronologia absoluta de les platges del conjunt de l'arxipèlag, per tal d'intentar acotar les edats dels diferents esdeveniments geomorfològics que s'hi relacionen (vegeu els apartats 5.5.1. i 5.5.2.).

#### Dificultats en la datació de les platges de les Illes Shetland del Sud

Les platges de les Illes Shetland del Sud tenen una gran quantitat de material datable en superfície. Majoritàriament es tracta d'ossos de mamífers marins (balenes i foques), ossos d'aus (majoritàriament pingüins) i fragments de fusta (de naufragis). Malgrat això, moltes d'aquestes mostres no són utilitzables de cara a datar la platja on es troben pel fet següent: Principalment entre els anys 1906 i 1925, en la zona de les Illes Shetland del Sud, hi va haver una activa indústria balenera (Antarctic Pilot, 1974) a causa de la qual un gran nombre de restes d'esquelets de balena van ser transportats antròpicament cap a nivells de platja elevats. Això fa que les mostres que es troben damunt del dipòsit, sense estar-hi incloses, no es considerin aptes per a la datació del nivell de platja. Les úniques mostres que es poden utilitzar per a la datació de platges són les que es troben enterrades o parcialment incloses en el sediment i, malauradament, aquestes no són gaire abundants.

Les edats obtingudes mitjançant el mètode del radiocarboni no són directament traduïbles a l'escala de temps del calendari solar, a causa de les següents dificultats:

- a) Els ossos de mamífers marins que habiten en aigües antàrtiques sembla que tendeixen a donar edats radiomètriques superiors a les que realment tenen (Bjorck et al., 1991). Aquest fenomen, anomenat *efecte de reservori*, ve determinat per un alentiment en la dinàmica del cicle del carboni que té lloc en els mars freds, com els que envolten l'Antàrtida. Segons (Bjorck et al., 1991 i Gordon & Harkness, 1992) la correcció mínima que cal aplicar per a les datacions d'ossos procedents de l'àrea de les Illes Shetland del Sud és de 1.000 anys, podent arribar a ser de 1.250-1.300 anys.
- b) A l'Hemisferi Sud, les datacions de radiocarboni tendeixen, sistemàticament, a donar edats amb un envelliment aproximat de 30 anys respecte les edats que s'obtenen a l'Hemisferi Nord. Aquesta diferència es creu que és deguda a què a

l'Hemisferi Sud, l'interfície oceà-atmosfera és major i permet un intercanvi de carboni més efectiu entre aquests dos reservoris. La poca efectivitat en la barreja de masses d'aire entre els dos hemisferis fa que es mantinguin unes certes diferències entre ells (Bowman 1990). Així doncs, cal restar 30 anys a les edats de radiocarboni obtingudes a partir de mostres recollides a l'Hemisferi Sud, per tal de poder-les equiparar amb l'escala radiocarbònica de referència (construïda a l'Hemisferi Nord).

- c) La relació entre l'escala de temps radiocarbònica i l'escala de temps del calendari solar no és lineal perquè la concentració de radiocarboni no s'ha mantingut constant al llarg del temps. El  $^{14}\text{C}$  es produeix a les capes altes de l'atmosfera a causa del bombardeig per part dels raigs còsmics. L'efectivitat d'aquest procés i la incorporació del radiocarboni en l'atmosfera depenen de dos factors variables en el temps, tals com la intensitat dels raigs còsmics i la intensitat del camp magnètic terrestre. Les anàlisis d'alta precisió de mostres amb una edat perfectament coneguda a partir d'altres mètodes (dendro-cronologia), han permès d'elaborar corbes d'equivalència entre les edats radiocarbòniques i l'escala del temps solar. Aquestes corbes es basen en les anàlisis dels anells de troncs d'arbre i s'han pogut construir amb precisió per edats posteriors als 7 ka BP (Pearson et al. 1986, Pearson & Stuiver 1986 i Stuiver & Pearson 1986). Aquestes corbes indiquen que hi ha alguns punts de l'escala radiocarbònica als quals els corresponen diverses edats de l'escala sidèria, de manera que en fer la conversió (el que anomenem *calibració*), el rang d'edats en l'escala sidèria pot augmentar sensiblement respecte al rang d'edats de l'escala radiocarbònica. Les edats radiocarbòniques s'expressen simplement com a "edats BP", mentre que un cop calibrades s'expressen mitjançant edats "*cal BP*", "*cal B.C.*" o "*cal AD*".
- d) L'acció antròpica ha influït de dues maneres la concentració global de radiocarboni. (1) L'ús a gran escala de combustibles fòssils ha provocat un augment de  $\text{CO}_2$  "antic" (amb un contingut nul de  $^{14}\text{C}$ ) i, per tant, una disminució en la proporció de  $^{14}\text{C}$  en l'atmosfera (el que anomenem *efecte Suess*). Aquesta alteració es detecta en els resultats de les anàlisis de mostres d'organismes morts posteriorment a l'any 1950. Aquesta és la raó per la qual convencionalment s'ha establert la data AD 1950 com a zero de l'escala de temps de les datacions de radiocarboni (0 anys BP o *before present*). (2) Una alteració dràstica de la concentració del radiocarboni a escala global (el que anomenem *efecte bomba*) ha estat causada pels assajos de bombes nuclears duts a terme a partir de la dècada dels anys 60. Els neutrons alliberats durant les explosions, en col·lidir amb nuclis de  $^{14}\text{N}$ , produeixen  $^{14}\text{C}$  a una velocitat molt superior a la de la producció natural en les capes altes de l'atmosfera. Per tant, la combinació dels efectes *Suess* i *bomba*, provoca que els resultats de les anàlisis radiomètriques de les mostres amb edats posteriors als anys 1950, no siguin comparables amb els resultats obtinguts per mostres més antigues.

A tall d'exemple, les mostres recollides corresponents a les platges actualment actives de diverses localitats de la Península de Hurd i la costa est de la Badia Falsa i datades al Laboratori de Radiocarboni de la Universitat de Barcelona-Institut d'Estudis Catalans donen les edats següents:  $1.340 \pm 40$  anys BP (UBAR-246),  $1180 \pm 40$  anys BP (UBAR-245),  $1120 \pm 45$  anys BP (UBAR-247) i  $320 \pm 70$  anys BP. Les tres primeres mostres corresponen a fragments d'ossos de balena, mentre que la darrera correspon a un fragment de tronc d'arbre i per tant no és afectada per l'envelliment associat a l'*efecte de*

*reservori*. Per obtenir una descripció detallada d'aquestes mostres i dels resultats de la seva calibració consulteu Pallàs (1993).

### Revisió de les datacions de radiocarboni

Clapperton & Sugden (1989) fan un recull de totes les datacions radiocarbòniques corresponents a les platges aixecades que han estat efectuades fins aquest moment en el conjunt de les Illes Shetland del Sud i hi apliquen una correcció de -850 anys per l'efecte reservori. Aquesta correcció es troba per sota dels valors suggerits posteriorment per Björk et al. (1991b) i Gordon & Harkness (1992) i pot donar unes edats de 150 a 450 anys més joves que les edats reals.

Per tal d'obtenir edats radiocarbòniques i edats en anys sideris el més fiables possible, en aquest treball fem una revisió de les edats subministrades per altres autors tot aplicant les correccions i calibracions necessàries explicades anteriorment. En la Taula 5.3. hi ha un resum de la informació més rellevant sobre les datacions absolutes de les platges de les Illes Shetland del Sud i les correccions efectuades per nosaltres.

### 5.4.3. Origen de l'emersió de les platges

L'anàlisi de les plataformes emergides de les Illes Shetland del Sud (apartat 5.3.) ens indica que l'aixecament tectònic de l'arxipèlag entre el darrer interglacial i l'Holocè, en cas d'haver-se produït, ha d'haver estat a unes velocitats lentes (índexs màxims de 0.4 m/ka). Per tant, tot i que ens trobem en l'àrea tectònicament activa de la vora de la conca extensional de Bransfield, no sembla que les deformacions tectòniques hagin pogut ser prou ràpides per haver tingut un paper decisiu en l'emersió de les platges durant l'Holocè. Amb aquests índexs d'aixecament, únicament es podria explicar un màxim de 2.5 m d'emersió durant els darrers 6.4 ka, la qual cosa correspondria a menys d'un 16 % de l'emersió observada.

L'àrea de les Illes Shetland del Sud i de la Península Antàrtica mostra indicis clars d'haver estat afectada per un enllaçament molt major que l'actual (p.ex. Fig. 4.1.). Per tant, cal pensar que les variacions en la càrrega glacial del final del Pleistocè hi poden haver induït variacions glàcio-isostàtiques més o menys importants (vegeu l'apartat 5.5.). A part dels efectes directes de la càrrega glacial sobre el mateix arxipèlag, és possible que les illes se situïn dintre de la zona deprimida glàcio-isostàticament per flexió litosfèrica, més enllà del marge glacial de la Península Antàrtica (vegeu l'Annex C). John & Sugden (1971) també plantegen la possibilitat que, les Illes Shetland del Sud es trobessin en l'àrea de la protuberància externa al voltant de la Península Antàrtica. A més, durant el procés de desglaçament posterior al darrer màxim glacial, l'increment de la càrrega d'aigua sobre les àrees oceàniques adjacents a les Illes Shetland del Sud hauria tendit a deprimir isostàticament les àrees adjacents a l'arxipèlag. Tot i que potencialment l'amplitud de les oscilacions hidro-isostàtiques és menor que les glàcio-isostàtiques (vegeu l'Annex C), el fet que les Illes Shetland del Sud tenen una àrea molt reduïda comparada amb l'àrea de les zones oceàniques que les rodegen fa pensar que el component hidro-isostàtic hi pot haver tingut un paper important. Cal remarcar que aquest component hidro-isostàtic actua de forma contrària al possible component glàcio-isostàtic associat al procés de desglaçament dels casquets glacials que recobreixen les illes.

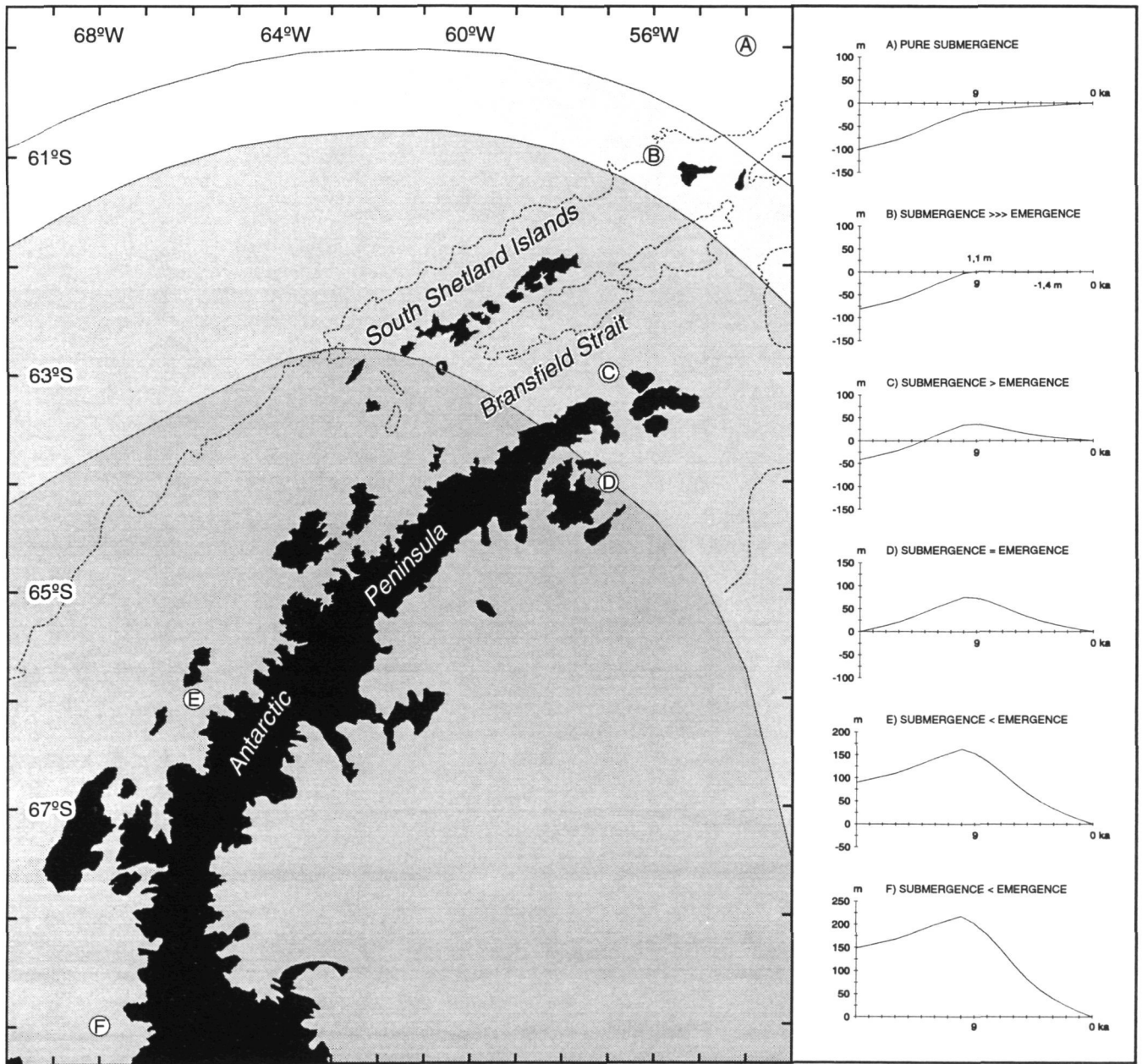
Beach height (m)	site	dated material	sample number	radio-carbon age	reference	corrected age for the radio-carbon reservoir effect according to Clapperton & Sugden (1988)	corrected age for the minimum radiocarbon reservoir effect (-1000 years) (Gordon & Harkness 1992)	correction for the S hemisphere effect (-30 years)	calibrated age according to the two sigma error probability (95.4% probability)	calibrated age according to the one sigma error probability (68.3% probability)	calibrated age according to the one sigma error probability (68.3% probability) calendar BP
18	Fildes Peninsula	penguin bone	HD9425-9100	BP 6650±90	Barsh & Mausbacher (1986)	BP 5800±90	BP 5650±90	BP 5620±90	cal B.C. 4687 (cal B.C. 4460)	cal B.C. 4536 (cal B.C. 4460)	cal BP 6486 (cal BP 6410)
18	Fildes Peninsula	penguin bone	HD8426-9106	BP 6560±55	Barsh & Mausbacher (1986)	BP 5710±55	BP 5560±55	BP 5530±55	cal B.C. 4463 (cal B.C. 4354)	cal B.C. 4451 (cal B.C. 4354)	cal BP 6401 (cal BP 6304)
10.3	Byers Peninsula	penguin bone	SRR-1086	BP 2823±40	Hansom (1979)	BP 1973±40	BP 1823±40	BP 1793±40	cal AD 132 (cal AD 243)	cal AD 218 (cal AD 243)	cal BP 1732 (cal BP 1707)
10.1	Byers Peninsula	penguin bone	SRR-1087	BP 3121±35	Hansom (1979)	BP 2271±35	BP 2121±35	BP 2091±35	cal B.C. 191 (cal B.C. 91, 83, 68)	cal B.C. 163 (cal B.C. 91, 83, 68)	cal BP 2113 (cal BP 1993)
7.6	Byers Peninsula	whale bone	I-7870	BP 2530±85	Curl (1980)	BP 1680±85	BP 1530±85	BP 1500±85	cal AD 404 (cal AD 596)	cal AD 448 (cal AD 596)	cal BP 1502 (cal BP 1354)
6-5	Nelson Island	tree trunk	Birm-14	BP 802±43	Sugden & John (1973)	cal AD 1215 cal AD 1260		BP 772±43	cal AD 1213 (cal AD 1277)	cal AD 1232 (cal AD 1277)	cal BP 718 (cal BP 673)
6-7	Barton Peninsula	whale bone	Birm-224	BP 1390±140	Sugden & John (1973)	cal AD 1280 cal AD 1465	BP 390±140	BP 360±140	cal AD 1307 (cal AD 1511, 1600, 1616)	cal AD 1430 (cal AD 1511, 1600, 1616)	cal BP 520 (cal BP 518)
6	Maxwell Bay	whale bone	Dic-373	BP 1440±55	Curl (1980)	cal AD 1295 cal AD 1410	BP 440±55	BP 410±55	cal AD 1419 (cal AD 1462)	cal AD 1439 (cal AD 1462)	cal BP 511 (cal BP 488)
6	Maxwell Bay	whale bone	Dic-371	BP 1360±165	Curl (1980)	cal AD 1285 cal AD 1510	BP 360±165	BP 330±165	cal AD 1302 (cal AD 1525, 1558, 1631)	cal AD 1432 (cal AD 1525, 1558, 1631)	cal BP 518 (cal BP 518)
3	Byers Peninsula	whale bone	Birm-50	BP 1056±130	Sugden & John (1973)	cal AD 1520 cal AD 180	BP 56±130	BP 26±130	present	present	present
2.5-3	Maxwell Bay	whale bone	Dic-368	BP 1200±110	Curl (1980)	cal AD 1440 cal AD 1660	BP 200±110	BP 170±110	cal AD 1477 (cal AD 1680, 1753, 1804, 1937, 1954)	cal AD 1647 (cal AD 1680, 1753, 1804, 1937, 1954)	cal BP 303 (cal BP 303)
2.5-3	Maxwell Bay	whale bone	Dic-369	BP 1210±55	Curl (1980)	cal AD 1450 cal AD 1540	BP 210±55	BP 180±55	cal AD 1644 (cal AD 1678, 1772, 1801, 1941, 1954)	cal AD 1661 (cal AD 1678, 1772, 1801, 1941, 1954)	cal BP 289 (cal BP 289)

**Taula 5.3.** Resum de les dades més rellevants sobre les datacions radiocarbòniques de les mostres incloses en els nivells de platges emergides de les Illes Shetland del Sud. En el text agrupem les localitats de la *Península Fildes* i de l'*Illa Nelson* dins la *Badia de Maxwell*. A l'esquerra de la doble línia divisòria vertical hi ha la informació referent a treballs anteriors. Aquelles mostres per a les quals es desconeix el factor de correcció per l'efecte reservori (mostres d'algues Birm-16 i Birm-17 corresponents a la platja de 6-5 m de la localitat de Marian Cove a l'Illa King George) no són representades en la taula. Clapperton & Sugden (1989) únicament mostren els intervals d'edats corresponents a les calibracions segons un sigma.

A la dreta de la doble línia divisòria hi ha el conjunt de correccions i calibracions efectuades en aquest treball. Les edats calibrades expressades entre parèntesi corresponen a la calibració del valor de l'edat radiocarbònica, mentre que els valors sense parèntesi corresponen a la calibració dels seus errors. Quan hi ha diversos valors entre parèntesi és que l'edat radiocarbònica correspon a diversos edats de l'escala sidèria. Els valors *cal AD 1955\** indiquen que la mostra pot haver estat afectada per l'efecte bomba. Cal destacar que dins del rang suggerit per Gordon & Harkness (1992) la correcció per l'efecte reservori que hem aplicat és la mínima i, per tant, les mostres podrien tenir edats de fins a 250 o 300 anys més joves respecte les indicades en les tres columnes de l'extrem dret de la taula. Les edats que apliquem en aquest treball són les representades en els dos requadres remarcats de la dreta (ja corregides tant pels efectes de reservori com hemisferi sud i calibrades segons 1 sigma). La calibració de les mostres s'ha efectuat pel mètode d'intersecció automatitzat de Stuiver & Reimer (1993).

**Table 5.3.** *Review of the radiocarbon data available from the South Shetland Islands beaches. Fildes Peninsula, Nelson Island and Barton Peninsula are all labelled as Maxwell Bay in this paper. Information available prior to this paper is summarized to the left of the vertical double line. To the right we include the information relating to the new corrections and calibrations. Note that new ages are significantly older than those suggested in Clapperton & Sugden (1988). The radiocarbon reservoir correction applied is the minimum suggested by Gordon & Harkness (1992) and, in consequence, samples may even be 250 to 300 years younger than the ages shown on the column to the right. Calibrations have been calculated according to the automated intersection method of Stuiver & Reimer (1993). Ages in brackets correspond to calibrated ages and are located between error dates. As some radiocarbon ages intersect the calibration curve at more than one point, several calibrated ages are possible for a single date. 1955\* denotes the bomb effect influence.*





**Figura 5.5.** Mapa de la Terra de Graham i de les Illes Shetland del Sud en què es distingeix la distribució areal dels 5 tipus diferents de resposta de les variacions relatives del nivell del mar (VRNM) predites pel model ICE-3G, pel període posterior al darrer màxim glacial pleistocè (vegeu l'Annex C). En el rectangle de la dreta s'hi representen algunes de les corbes tipus de les VRNM predites pel model, corresponents a les localitats marcades mitjançant cercles i lletres majúscules en el mapa (A a F). L'eix vertical indica l'altitud o profunditat del nivell del mar respecte al seu nivell actual (0 m), mentre que en l'eix horitzontal s'hi representa l'escala de temps del període comprès entre el darrer màxim glacial (18 ka) i el present (0 ka). La situació aproximada del marge continental es mostra mitjançant el contorn batimètric de 1000 m, en traç fi i discontinu.

**Fig. 5.5.** Map of Graham Land and the South Shetland Islands showing the predictions of the ICE-3G model of glacio-hydro-isostatic deformation (see Annex C). Shadings indicate the areal extent of the different relative sea level (RSL) histories predicted by the model, which have been classified according to the relative amount of submergence and emergence. The curves at the right correspond to the points labelled A to F on the map and indicate the predicted relative sea-level variations with respect to present sea-level (0 m) from 18 ka to present. The model considers a gradual decrease in ice-thickness from 9 ka to 4 ka. The approximate position of the continental margin is shown by the 1000 m bathymetric contour (thin, dashed line).

El model ICE-3G (vegeu l'Annex C) ens dóna la possibilitat de conèixer, amb la millor aproximació possible en aquest moment, quin ha estat l'efecte dels processos desencadenats per les oscil·lacions d'origen glacial (interrelació entre oscil·lacions glàcio-eustàtiques, glàcio-isostàtiques, hidro-isostàtiques i deformacions del geòide), en el comportament de les VRNM de qualsevol punt del planeta. Si coneixem quin és el potencial d'aquest grup de processos per a induir l'emersió de les platges de les Illes Shetland del Sud podem, de manera indirecta, aïllar la importància que hi hagi pogut tenir el component tectònic i, per tant, tenir o no una comprovació de les conclusions obtingudes mitjançant l'anàlisi de les plataformes marines emergides. A més, l'aplicació del model ICE-3G ens permet de tenir una idea de fins a quin punt les Illes Shetland del Sud poden estar afectades per la descàrrega glàcio-isostàtica d'àrees allunyades de l'arxipèlag (com la Península Antàrtica) o per exemple fins a quin punt l'arxipèlag pot ser afectat per la càrrega hidro-isostàtica en les àrees oceàniques adjacents. A continuació, fem una anàlisi detallada de la informació que ens aporta el model ICE-3G per la zona de la Península Antàrtica i les Illes Shetland del Sud pel període posterior a 18 ka BP.

### **Aplicació del model ICE-3G a la Península Antàrtica i les Illes Shetland del Sud**

En Tom James de la Geophysics Division del Geological Survey of Canada ens ha proporcionat un gran volum de corbes de VRNM predites per l'ICE-3G corresponents a l'àrea de la Península Antàrtica. Disposem d'una primera xarxa de 252 corbes corresponents a l'àrea compresa entre les latituds 60°00'S i 73°00'S i les longituds 52°00'O i 70°00'O (amb un espaiat d'un grau), i d'una segona xarxa, més detallada i centrada en les Illes Shetland del Sud, amb un total de 140 corbes corresponents a l'àrea compresa entre les latituds 61°00'S i 64°00'S i les longituds 53°30'O i 63°00'O (amb un espaiat de mig grau).

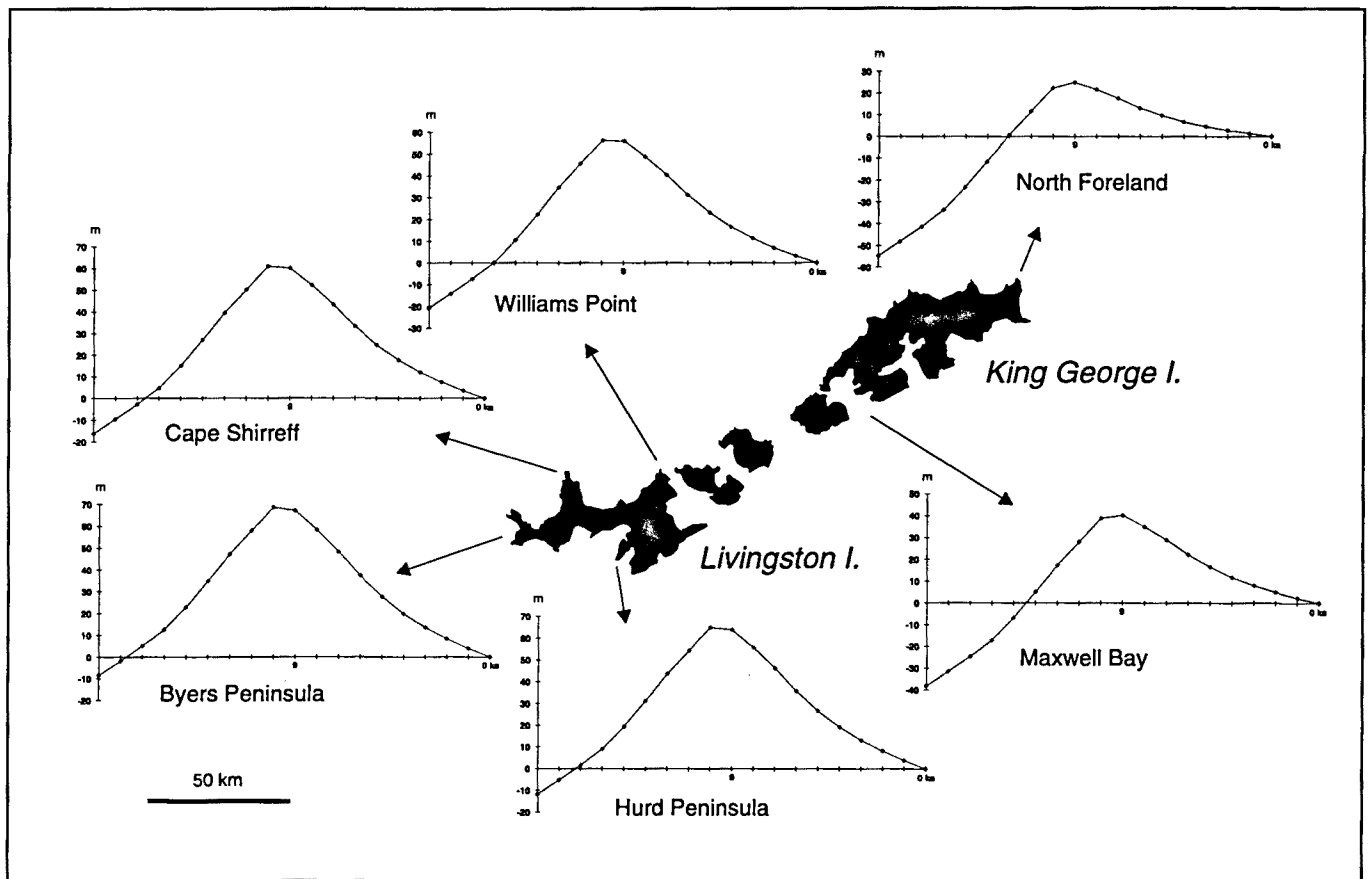
#### *Descripció de les prediccions del model ICE-3G*

Per tota l'àrea de la Península Antàrtica el model ICE-3G prediu una variació perfectament gradual en el comportament de les VRNM (Fig. 5.5.).

Totes les corbes tenen els mateixos punts d'inflexió. Entre 18 i 13 ka BP i entre 7 i 0 ka BP les corbes són concaves cap amunt, mentre que en les seves parts centrals, entre 13 i 7 ka BP, les corbes són convexes. Totes les corbes tenen un comportament molt semblant entre 18 ka i 10 ka BP. En aquest període, el conjunt de l'àrea analitzada mostra una clara submersió. L'amplitud total d'aquesta submersió augmenta de sud cap a nord i se situa entre 65 m i 78 m.

Entre 10 ka i 0 ka BP hi ha diferències molt acusades entre les corbes d'àrees diferents, la qual cosa permet de distingir entre 5 tipus de resposta de les VRNM (Fig. 5.5.).

- a) submersió pura. Entre 18 i 0 ka BP hi ha una submersió contínua.
- b) submersió >>> emersió. Hi ha un gran predomini de la submersió, però entre 9 i 4 ka BP hi ha una lleugera emersió d'aproximadament 3 m d'amplitud.
- c) submersió > emersió. La submersió entre 18 i aproximadament 9 ka BP té una amplitud superior a l'amplitud de l'emersió entre 9 i 0 ka BP. L'emersió té una amplitud aproximada que varia entre 3 i 75 m.
- d) submersió = emersió. La submersió entre 18 i 10 ka BP, i l'emersió entre 10 i 0 ka BP tenen la mateixa amplitud, la qual se situa al voltant dels 75 m.



**Figura 5.6.** Mapa de les Illes Shetland del Sud en què es mostra la variació espacial en les variacions relatives del nivell del mar (VRNM) predites pel model ICE-3G. La màxima variació es troba al llarg de transectes NE-SO. La corba corresponent a la Península de Byers indica que la màxima submersió s'hauria produït a 10 ka BP, en un moment en què la superfície marina s'hauria trobat 68 m per damunt del nivell del mar actual. En canvi, la corba corresponent al North Foreland de l'illa King George indica que la màxima submersió s'hauria produït a 9 ka BP en un moment en què la superfície marina s'hauria situat 25 m per damunt del nivell del mar actual. Per tant, el model suggereix que podria haver-hi diferències acusades en el comportament de les VRNM al llarg de l'arxipèlag.

**Fig. 5.6.** Relative sea-level variations predicted by the ICE-3G model at several localities on the South Shetland Islands. Note the strong differences in the predicted amplitude of Holocene marine limit between widely separated localities. According to the model, the maximum variation is found along NE-SW transects. The maximum submergence in Byers Peninsula would have taken place around 10 ka BP with an amplitude of 68 m a.s.l. In contrast, according to the model, at North Foreland (in King George Island) the maximum submergence occurred around 9 ka BP at a height of only 25 m.

- e) submersió < emersió. La submersió entre 18 i 10 ka BP té una amplitud inferior a l'amplitud de l'emersió entre 10 i 0 ka BP. L'emersió posterior als 10 ka varia de nord cap a sud aproximadament entre 75 m i 250 m.

La distribució geogràfica dels diferents tipus de corbes indicades pel model queda reflectida en la figura 5.5. Hi ha submersió pura en les àrees oceàniques més allunyades de la Península Antàrtica. Hi ha submersió molt més gran que emersió en una franja estreta que inclou les illes Elephant i Clarence. Hi ha submersió més gran que emersió en una franja més ampla que inclou l'extrem de la Península Trinity i les Illes Shetland del Sud (excepte les illes Smith i Low). Hi ha més emersió que submersió en una àrea extensa aproximadament centrada en la Península Antàrtica.

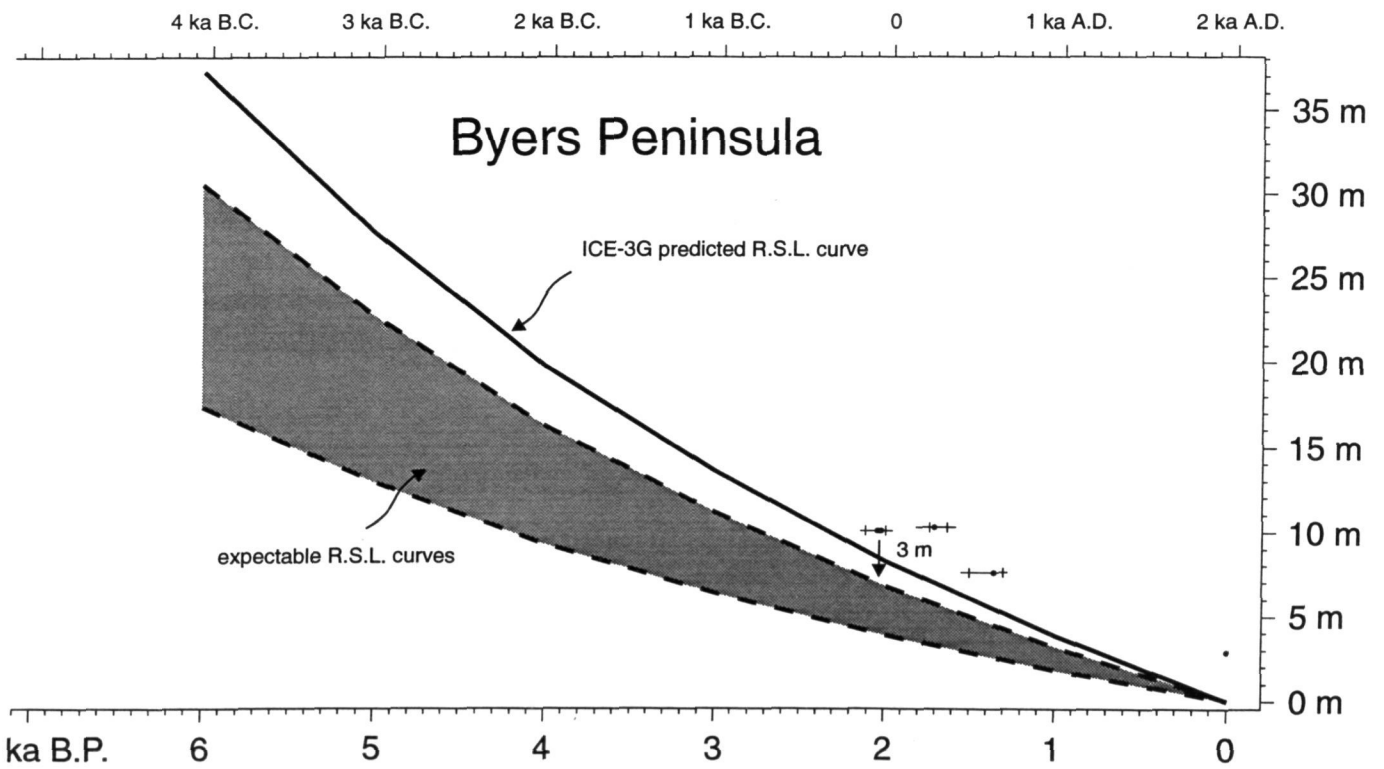
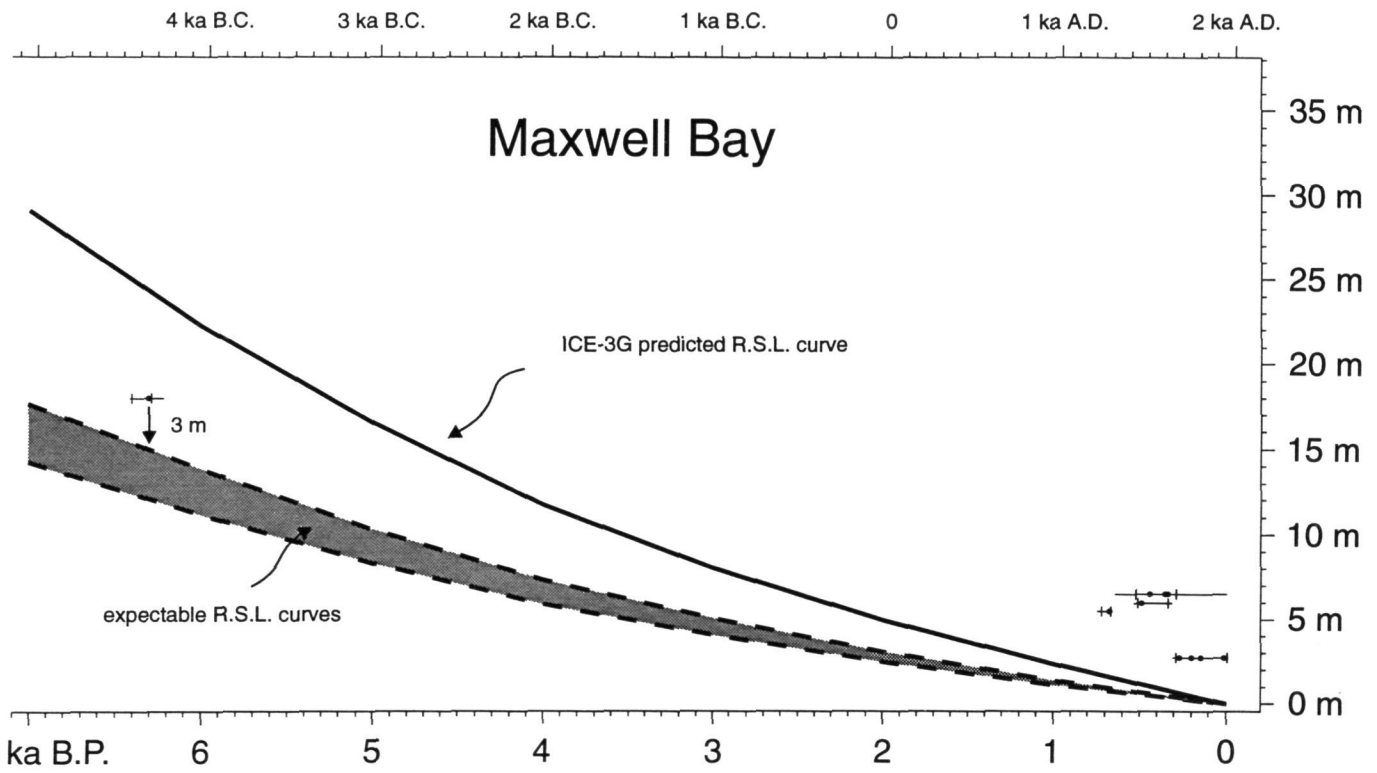
A la zona de les Illes Shetland del Sud la màxima variació entre les corbes es troba al llarg de la direcció NE-SO, subparal·lelament a la direcció de les illes (Fig. 5.5.). Les prediccions per la Península de Byers indiquen que en aquesta zona la màxima submersió es dona a 10 ka BP i que des d'aquest moment hi ha una emersió de 68 m (Fig 5.6.). En canvi, les prediccions per la banda NE de l'illa King George indiquen que la màxima submersió es produeix a 9 ka BP i que l'emersió subseqüent té una amplitud de 25 m. A la Badia de Maxwell (entre King George i l'Illa de Nelson) l'amplitud de l'emersió posterior a 9 ka B.P és de 40 m. Per tant, segons el model ICE-3G, les diferents illes podrien estar sotmeses a unes VRNM d'amplituds clarament diferents, i fins i tot els moments de màxima inundació podrien no ser exactament coincidents (Fig. 5.6.).

A les Illes Shetland del Sud hi ha dues localitats principals amb platges datades, que són Maxwell Bay amb 8 datacions i la Península de Byers (Illa de Livingston) amb 6 datacions (Taula 5.3.). En la figura 5.7. es comparen les prediccions del model ICE-3G amb aquestes 12 datacions. A la Badia de Maxwell (concretament a la Península de Fildes), la platja datada més alta i antiga és la de 18 m que té una edat de 6400-6290 cal BP. Aquesta datació la situa 6 m per sota de la corba predita pel model. Les altres datacions d'aquesta localitat corresponen a platges molt més baixes i modernes, que se situen a un màxim de 5 m per sobre la corba predita pel model. A la Península de Byers, la platja datada més alta és la de 10 m, té una edat de 2110-1630 cal BP i, de la mateixa manera que la resta de platges més baixes i recents, se situa a un màxim de 3 m per damunt de la corba predita pel model.

Cal ressaltar que les datacions de les platges, a mesura que es fan més modernes, no tendeixen a fer-se asimptòtiques cap a l'altitud de 0 m, sinó que tendeixen a una alçada situada entre 3 i 5 m.

#### *Interpretació de les prediccions del model ICE-3G*

La variació gradual en les VRNM predites pel model ICE-3G per l'àrea de la Península Antàrtica és deguda a la variació en la càrrega de gel, entre les àrees oceàniques situades al nord de les Illes Shetland del Sud (no susceptibles d'haver estat englaçades durant el darrer màxim glacial) i les àrees intensament englaçades de la Península Antàrtica.



**Figura 5.7.** Comparació entre les datacions de les platges emergides de les de les Illes Shetland del Sud i les corbes de variacions relatives del nivell del mar predites mitjançant el model ICE-3G (període comprès entre 7 ka BP i el Present). La corba esperable la situem com a mínim 3 m per sota de la platja de 18 m que és la distància mínima observada entre el nivell mitjà del mar i la berma de la platja actualment activa. Els punts negres corresponen a la calibració de les edats radiocarbòniques, les barres verticals corresponen a la calibració dels seus errors segons 1 sigma (probabilitat del 68.4%), mentre que la barra horitzontal abraça les edats corresponents a la calibració dels errors segons 2 sigma (probabilitat del 94.4%). La corba predita pel model se situa per damunt del que seria d'esperar a partir de la datació de la platja de 18 m de la Badia de Maxwell.

*Fig. 5.7. Time/height diagrams for the last 7 ka comparing the age of the dated beaches with the ICE-3G predicted relative sea level (RSL) history for Maxwell Bay and Byers Peninsula. Dated beaches are shown by black dots (calibrated ages), thin vertical bars (one sigma error intervals) and horizontal bars (two sigma error intervals). The expected RSL curves lie at least 3 m below all the dated beaches, which is the observed minimum distance between present-day mean sea level and the active beach. Note that, in both localities, the emergence predicted by the ICE-3G model is larger than the expected one.*

La submersió entre 18 i 10 ka BP mostrada en la zona que analitzem és el reflex directe de l'augment glàcio-eustàtic produït per la fusió dels casquets de gel de l'Hemisferi Nord. En aquest període no es considera que hi hagi cap desglaçament significatiu a l'Antàrtida i, per tant, no hi ha ni descàrrega de gel ni moviments glàcio-isostàtics significatius en la Península Antàrtica. La lleugera disminució en l'amplitud de la submersió a mesura que anem de nord cap a sud és probablement deguda a què en les àrees oceàniques més allunyades del marge continental hi ha una major depressió hidro-isostàtica. A causa de la conseqüent readaptació del geoide, aquesta major depressió produeix una submersió d'amplitud més gran que en àrees més properes al continent, no tan afectades per les deformacions hidro-isostàtiques.

Les diferències en l'amplitud de l'emersió són controlades principalment per la distància respecte a les àrees de major englaçament. El major grau d'emersió de les zones del sud de la Península Antàrtica és causada per una major descàrrega de gel en aquestes àrees i, per tant, un major aixecament glàcio-isostàtic que les àrees situades més cap al nord. Les prediccions del model indiquen que posteriorment a 9 ka es produeix una emersió de les Illes Shetland del Sud que interpretem com el resultat conjunt d'una recuperació glàcio-isostàtica associada tant a la depressió flexural litosfèrica de les àrees marginals de la Península Antàrtica com a la recuperació glàcio-isostàtica local del mateix arxipèlag (Figs 5.5. i 5.6.).

Les corbes que són asimptòtiques a l'eix de 0 m indiquen que la recuperació glàcio-isostàtica s'ha dut a terme totalment. Part de les corbes de tipus C i les corbes de tipus D, E i F no són totalment asimptòtiques al nivell de 0 m i, per tant, suggereixen que la recuperació glàcio-isostàtica es podria estar duent a terme encara actualment. Per les Illes Shetland, les prediccions del model indiquen velocitats d'emersió actual inferiors als 3.9 mm/any.

La predicció del model ICE-3G es desvia substancialment respecte de les datacions de la platja de 18 m de la Badia de Maxwell. La corba predita es troba 6 m per sobre de la platja de 18 m. Aquesta diferència és important si, tenint en compte les observacions

sobre la dinàmica de les platges, considerem que el nivell del mar s'hauria de situar a una altitud inferior respecte a la berma mostrejada de 18 m d'alçada, amb una diferència igual o superior a 3 m (vegeu l'apartat 5.4.1.). La desviació entre la corba predita i la corba esperable a partir de les condicions imposades per la platja de 18 m ens indica que el model ICE-3G prediu una emersió holocena excessiva per a aquesta àrea. La resta de platges datades, totes força més baixes, queden clarament per damunt de la corba predita pel model (tant a la Badia de Maxell com a la Península de Byers), amb uns marges perfectament compatibles amb les observacions sobre la dinàmica de les platges (Fig. 5.7.).

Per tal d'avaluar adequadament la validesa de les prediccions del model ICE-3G, l'ideal seria disposar de platges amb datacions properes a 9 o 10 ka BP, de manera que es pogués comprovar si les amplituds de la màxima submersió de les prediccions es corresponen amb la realitat. Tot i això, la platja de 18 m, amb una edat de 6.4 ka *cal* BP ja ens permet d'observar que les prediccions del model impliquen una emersió holocena excessiva respecte a la realment esdevinguda en aquesta àrea. El nivell predit per la platja de 6.4 ka *cal* BP és de 24 m, mentre que el nivell del mar esperable corresponent a la berma de 18 m cal situar-lo a 15 m. Això ens indica que l'emersió predita pel model per la Badia de Maxwell i aquest període de temps correspon a un 160 % respecte a l'emersió real (Fig.4.3.).

#### *Grau de fiabilitat del model ICE-3G en la Península Antàrtica i les Illes Shetland del Sud*

En l'Annex C hem explicat amb detall quines són les limitacions més destacades del model ICE-3G. En la zona de la Península Antàrtica, les limitacions més importants, que poden provocar les desviacions observades entre les prediccions del model i la realitat geològica, són les següents:

- a) Gruix litosfèric invariable: Les variacions en el gruix litosfèric entre la Península Antàrtica, l'Estret de Bransfield i les Illes Shetland del Sud observades mitjançant mètodes geofísics (Capítol 2) no són tingudes en compte pel model ICE-3G. El fet que aquesta zona de gruix litosfèric variable coincideix aproximadament amb el marge del casquet glacial (la zona en què la resistència flexural litosfèrica intervé en les deformacions glàcio-isostàtiques de forma més crítica) pot produir errors apreciables en les prediccions del model que són difícils de quantificar.
- b) Subacotament del model per manca de dades: El model de desglaçament de l'Antàrtida està poc recolzat tant per dades d'extensió i gruix glacial com per dades de VRNM. El model de la càrrega glacial de les Illes Shetland del Sud utilitzat en el model ICE-3G és únicament aproximat.

Cal tenir en compte que aquestes limitacions provoquen que, a nivell quantitatiu, les prediccions del model ICE-3G no siguin fiables. No podem esperar que paràmetres tals com l'amplitud de la submersió o les velocitats d'emersió holocenes predites pel model s'ajustin a la realitat. Tot i això, el model ICE-3G ens informa sobre d'altres paràmetres tals com (1) la forma general de les corbes de VRNM i (2) la distribució en el temps de les tendències a la submersió, estabilitat relativa i emersió. Aquests paràmetres depenen majoritàriament de factors extrínsecs a l'àrea de la Península Antàrtica i, per tant, no estan afectats per les limitacions esmentades anteriorment.

*Informació aportada pel model ICE-3G sobre les Illes Shetland del Sud*

A nivell qualitatiu, l'aplicació del model ICE-3G suggereix el següent:

- a) La zona de les Illes Shetland ha estat afectada per submersió entre 18 ka i aproximadament 10-9 ka BP i per una emersió entre 10-9 ka BP i el present. El període de màxima submersió holocena, per tant, s'hauria produït al voltant de 10-9 ka BP. Actualment encara es podria estar produint una certa emersió, tot i que, probablement, a unes velocitats molt lentes.
- b) Les Illes Shetland del Sud es troben dintre la zona d'influència de la recuperació flexural litosfèrica produïda per la descàrrega glacial en la Península Antàrtica.
- c) Aquesta recuperació glàcio-isostàtica, combinada amb la recuperació associada a la descàrrega local de l'arxipèlag permet d'explicar l'emersió de les platges de les Illes Shetland del Sud (uns 15 m en aproximadament 6.000 anys) sense la necessitat d'un component tectònic.
- d) Les diferents illes de les Shetland del Sud es troben a distàncies diferents de les àrees de màxim englaçament de la Península Antàrtica i per tant poden experimentar VRNM lleugerament diferents les unes respecte les altres.
- e) En un principi les platges a l'Illa de Livingston es podrien trobar a una alçada superior respecte a les correlatives a l'Illa King George.

**5.4.4. Nivell de màxima inundació durant l'Holocè**

La platja datada més alta de tot l'arxipèlag de les Illes Shetland del Sud és la platja de 18 m de la Badia de Maxwell. Les platges situades a altituds d'entre 24 i 54 m (vegeu l'apartat 2.3.1.) no han pogut ser datades.

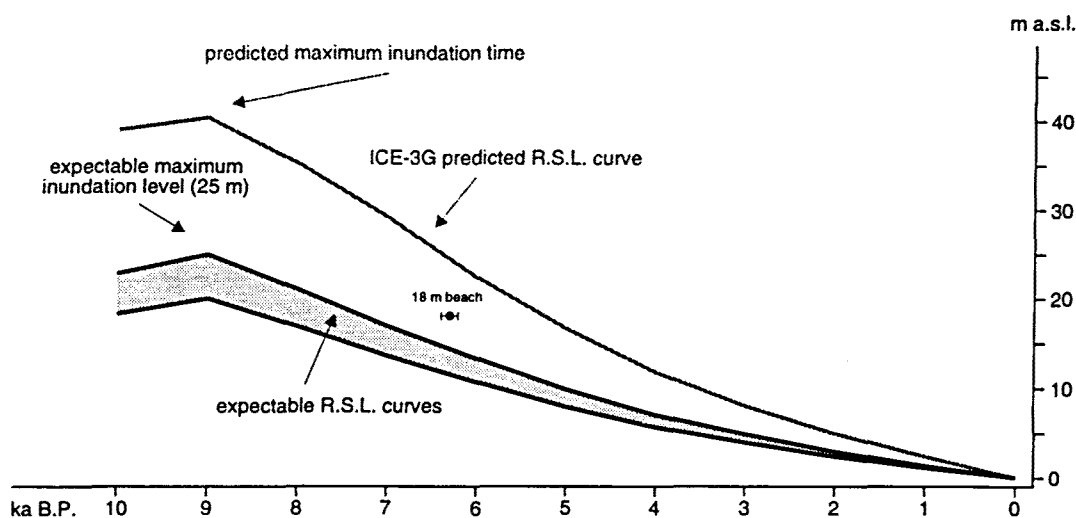
John & Sugden (1971) consideren, que aquestes darreres platges es van sedimentar durant l'Holocè. El criteri utilitzat per aquests autors és que aquestes platges, tot i trobar-se sensiblement més degradades que les platges a les altituds de 17-20 m, encara conserven parcialment la seva morfologia. No obstant això, John & Sugden (1971) també mostren que la família de nivells de platges que va del nivell del mar actual fins l'altitud de 18-20 m destaca per estar representada de forma generalitzada en molts llocs de l'arxipèlag i que, en grau d'alteració i conservació, contrasten netament respecte a les platges situades a altituds immediatament superiors. A més, segons les descripcions dels mateixos autors, no sembla que hi hagi un contrast clar entre el grau d'alteració de les platges superiors als 20 m i les *platges residuals*. Per tant, tal com suggereixen Mäusbacher et al. (1989), considerem que seria perfectament compatible amb les observacions que els nivells de platja amb altituds superiors als 24 m fossin preholocens i, en lloc d'haver-se sedimentat durant el descens relatiu del nivell del mar posterior al darrer cicle glacial, s'haguessin sedimentat durant el darrer període interglacial.

Aquesta hipòtesi és afavorida per les dades aportades pel model ICE-3G. El model suggereix que el moment de màxima submersió durant l'Holocè en tota la zona de la Península Antàrtica, s'hauria produït entre 9 i 10 ka BP, un cop s'hagués acabat la fusió massiva dels casquets glacials de l'Hemisferi Nord, i durant les primeres fases de desglaçament a l'Antàrtida. La datació de la platja de 18 m de la Badia de Maxwell imposa una corba de les VRNM amb un pendent molt suau entre 0 i 6.4 ka BP. No hi ha cap raó per pensar que aquesta tendència hagués d'haver estat sensiblement diferent durant el període comprès entre 6.4 i 9 ka BP i, per tant, es fa difícil d'acceptar que el



nivell del mar hagués pogut arribar a altituds gaire superiors durant l'Holocè. Tal com hem vist anteriorment, el nivell del mar predit pel model es troba amb un error mínim del 160 % respecte al nivell del mar corresponent a la platja de 18 m. Si a tall aproximatiu apliquem aquest mateix factor de correcció al nivell del mar predit pel model corresponent a l'edat de 9 ka BP, arribem a la conclusió que a la Badia de Maxwell, el nivell del mar durant l'Holocè difícilment hauria pogut sobrepassar l'altitud de 26 m (Fig. 5.8.). Si apliquem el mateix factor de correcció a l'índex d'aixecament màxim indicat pel model ICE-3G (3.9 mm/any) obtenim, com a primera aproximació, que l'índex d'aixecament glàcio-isostàtic actual ha de ser inferior a 2.4 mm/any.

El nivell de màxima inundació de 26 m podria haver sedimentat platges a una altitud màxima d'uns 30 m. Les platges que es troben per damunt d'aquesta altitud i que John & Sugden (1971) interpreten com a holocenes, probablement són pre-holocenes i es deurien haver sedimentat anteriorment al descens relatiu del nivell del mar associat a la descàrrega glàcio-isostàtica del darrer cicle glacial.



**Figura 5.8.** Càlcul del nivell de màxima inundació holocena esperable a partir de la informació proporcionada pel model ICE-3G. La platja de 18 m indica que la corba de les variacions relatives del nivell del mar real ha de passar un mínim de 3 m per sota de la corba predita pel model. Acceptant que el model prediu correctament que el període de màxima inundació es va haver de produir al voltant de 9 ka BP i aplicant el factor de correcció deduït a partir de la platja de 18 m es pot determinar que la màxima inundació a les Illes Shetland del Sud no deuria sobrepassar els 26 m d'altitud, la qual cosa hauria permès la sedimentació de materials de platja a una altitud màxima d'aproximadament 30 m.

*Fig. 5.8. Time/height diagram for the last 10 ka showing the relative sea level (RSL) curve resulting from scaling the ICE-3G prediction to agree with the 18 m, 6 Ka observation at Maxwell Bay (King George Island). Note that the mean sea level responsible for the 18 m beach berm must have been at a maximum height of 15 m. If the correlation of beaches suggested by John & Sugden (1971) is accepted, the expected maximum inundation level in the whole South Shetland Islands archipelago would be about 26 m or lower. This would explain beach deposition at a maximum height of only about 30 m.*

### 5.4.5. Acotament de l'edat de les platges de l'Illa de Livingston

Segons el model ICE-3G seria d'esperar que les platges correlatives es trobessin a major altitud en l'Illa de Livingston que a l'Illa King George. John & Sugden (1971) fan una correlació entre les platges del conjunt de l'arxipèlag basant-se principalment en el grau de desenvolupament morfològic dels diferents nivells, i observen que les platges que a l'Illa King George es troben majoritàriament a 18 m, a l'Illa de Livingston es troben a altituds lleugerament superiors, properes als 20 m. John & Sugden (1971) escriuen: *there is possibly some significance in the fact that the remnants tend to be higher in the west than in the east*. L'aplicació del model ICE-3G suggereix que aquesta lleugera, gairebé imperceptible, diferència d'altitud és deguda a què l'Illa de Livingston es troba més propera als centres de major enllaçament de la Península Antàrtica que l'Illa King George i, per tant, en el mateix període ha experimentat una recuperació glàcio-isostàtica lleugerament major. L'altitud de 20 m de les platges mesurades per John & Sugden (1971) a l'Illa de Livingston correspon a l'altitud de 22 m que nosaltres hem establert per la platja de la localitat de la B.A.E. (Península de Hurd) i a la de 18.6 m indicada per López-Martínez et al. (1991). Per tant, dins de l'error de mesura i d'acord amb la correlació de John & Sugden (1971) la platja de ≈20m de l'Illa de Livingston correspon a la platja de 18 m de la Badia de Maxwell (Illa King George) i se li pot assignar una edat de 6400-6290 *cal* BP (Taula 5.4.).

La correlació entre les platges de 18 i ≈20 m de les illes King George i Livingston respectivament, indica que, malgrat les prediccions del model ICE-3G les possibles diferències en les VRNM entre aquestes dues illes són gairebé inapreciables. Per tant, cal pensar que el nivell de màxima inundació holocena d'aproximadament 30 m que hem determinat per l'Illa King George, és també aplicable a l'Illa de Livingston.

Segons el model ICE-3G, no són d'esperar diferències significatives en les VRNM experimentades durant l'Holocè en les diferents localitats de l'Illa de Livingston. Per tant, podem correlacionar altitudinalment les platges de les diferents localitats estudiades (Byers, Hannah, Hurd, Barnard, Siddons i Shirreff) i assignar-los les edats de les platges de 10, 7.6 i 3 m de la Península de Byers. Pels darrers 2 ka, no és d'esperar que hi hagi una diferència apreciable en les edats de les platges entre les illes de King George i Livingston i, per tant, podem assignar a la platja de 5-6 m de Livingston l'edat de 720-330 *cal* BP de les platges que es troben a aquesta altitud a la Badia de Maxwell.

La taula 5.4. mostra un resum de les edats dels nivells de platja més ben representats a l'Illa de Livingston.

beach (m a.s.l.)	criteria	age range (years BP)
≈20	morphologic correlation with 18 m beach at Maxwell Bay (John & Sugden 1971) + Barsch & Mäusbacher + correction + calibration	6400-6290 <i>cal</i> BP
10	Hansom (1979) + correction + calibration	2110-1630 <i>cal</i> BP
7.6	Curl (1980) + correction + calibration	1500-1300 <i>cal</i> BP
5-6	Curl (1980) + correction + calibration and altitudinal correlation with Maxwell Bay beaches	720-330 <i>cal</i> BP
3	Sugden & John (1973) + correction + calibration + observations on present-day beach dynamics	300-present

**Taula 5.4.** Edats de les platges emergides de l'Illa de Livingston i resum dels criteris utilitzats.

*Table 5.4. Ages of beaches in Livingston Island and summary of the criteria used in their determination.*

## 5.5. FASES GLACIALS A LES ILLES SHETLAND DEL SUD

En el Capítol 4. hem vist com les diferents localitats de l'Illa de Livingston han estat afectades per diverses fases glacials. En aquest apartat primerament discutim la correlació entre les fases establertes en les diferents localitats i la relació amb les establertes a la resta de les Illes Shetland del Sud. Posteriorment, fem una sèrie de consideracions crítiques sobre el model de fases glacials establert anteriorment per d'altres autors.

### 5.5.1. Fases glacials recents a l'Illa de Livingston i correlació amb les fases neoglacials de l'Illa de King George

L'anàlisi dels esquemes geomorfològics de diverses localitats de l'Illa de Livingston ens ha permès d'establir una cronologia relativa entre els sediments glacials recents i alguns nivells de platja (Capítol 4.). Posteriorment, hem establert la cronologia radiomètrica dels diferents nivells de platja representats a l'Illa de Livingston (Capítol 5.4.) i, per tant, disposem d'una informació suficient per proposar una cronologia absoluta de les fases glacials recents.

En totes les localitats de l'Illa de Livingston que hem estudiat en el Capítol 4. hi ha sediments glacials recents associats al marge glacial actual. Aquests sediments són morrenes poc alterades, colonitzades de forma incipient per vegetació i disposades en cordons morfològicament ben desenvolupats. En la majoria de les localitats (la Punta Siddons, la Punta Hannah, Península de Hurd i Costa est de la Badia Falsa), aquestes morrenes es divideixen en dos cordons ben diferenciats (o conjunts de cordons, en el cas de la Badia Falsa, A i B a Fig. 5.9.). El més intern d'aquests cordons generalment mostra un nucli de gel mentre que el més extern és el més ben desenvolupat morfològicament i es troba lleugerament més alterat i colonitzat. Aquest desdoblament de les morrenes en dos cordons ben diferenciats indica que hi ha hagut dues fases de reavenç o estabilització recent.

Aquests dos cordons no són sempre distingibles en totes les localitats. Tant el marge glacial del Cap de Shirreff com el de la Península de Byers mostren un únic conjunt de cordons morrènics frescos amb nucli de gel. Al Cap de Shirreff, on no hi ha cap cordó morrènic amb una posició externa respecte al conjunt de cordons amb nucli de gel, sembla que les dues fases glacials recents deuen estar registrades per aquestes morrenes supraglacials. És possible que al marge de la Glacera del Rotch Dome, a la Península de Byers hi passi el mateix que al Cap de Shirreff i que les morrenes supraglacials d'aquestes dues localitats siguin equivalents al parell de cordons morrènics recents observats a la resta de localitats de l'Illa de Livingston (A i B a les figures 5.9. i 5.10.). El fet que aquestes dues localitats tinguin una representació diferent de les fases glacials recents respecte a la resta de l'illa és, possiblement, degut a diferències en el flux glacial determinades per la topografia suau del casquet, la relativa llunyania respecte als centres de màxima acumulació de gel i l'inexistència de relleus de roca abruptes en els quals la sedimentació glacial hi hagi pogut enregistrar les variacions en el gruix de la gelera.

**Figura 5.9.** Mapa sintètic interpretatiu dels dipòsits glacials de les localitats de la Península de Hurd, la Punta Barnard i la costa est de la Badia Falsa. Llegendra: (1)- àrees emergides totalment cobertes per les glaceres en els períodes de màxim enllaçament, (2)- cims que en els períodes de màxim enllaçament constituïen nunataks, (3)- till de la Punta Salisbury, (4)- morrena més externa de la vall de la B.A.E., retreballada per la platja de ≈20 m, (5)- altres cordons morrènics d'edat situada entre C i B, a la vall de la B.A.E., i probablement entre B i A, entre la vall de la B.A.E. i el Johnsons Dock), (6)- morrenes corresponents a les fases glacials recents, les quals sovint se subdivideixen en dos cordons morrènics (A, amb nucli de gel, i B).

Els cordons més externs de les morrenes recents i els cordons correlatius submergits són senyalats amb la lletra **B**. Aquests cordons corresponen a una fase glacial en què els fronts de les glaceres principals de les valls de la Badia Falsa es trobaven entre 3 i 4 km més avançats respecte a la seva situació actual. Aquests cordons es van sedimentar dins del període de sedimentació de la platja de 5-6 m, i l'avenç i retrocés subseqüent que registren es van haver de produir entre 720 i 330 anys *cal BP*.

Els cordons més interns de les morrenes recents són marcats amb la lletra **A**. Aquests cordons han de ser posteriors a les morrenes recents externes (**B**) i possiblement tenen una edat d'entre 300 *cal BP* i el Present.

El cordó morrènic **C**, ha de ser o bé anterior o bé sincrònic a la sedimentació de la platja de 22 m de la vall de la B.A.E. i per tant ha de tenir una edat anterior o igual a 6290 anys *cal BP*.

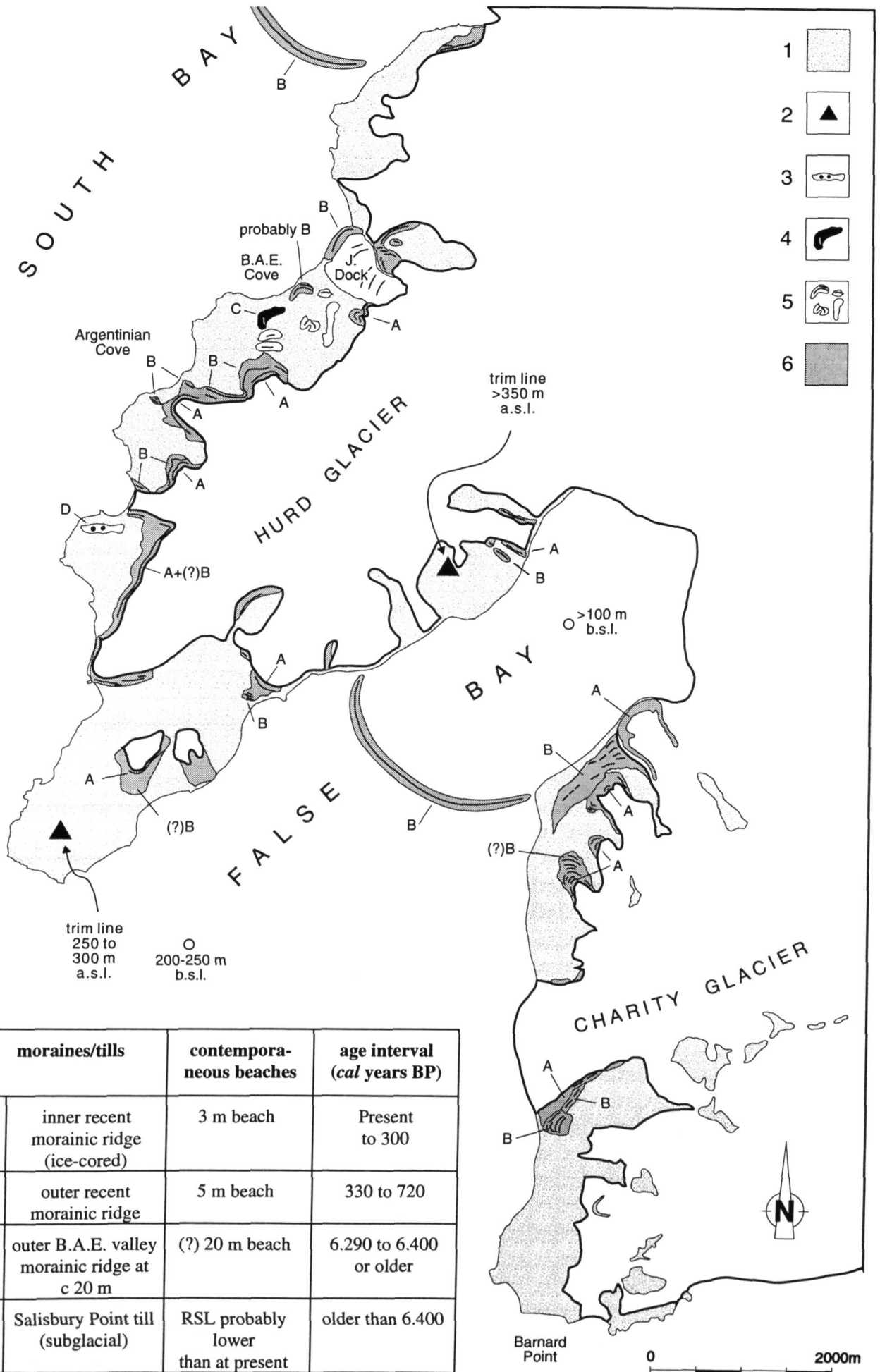
El till senyalat amb la lletra **D** ha de correspondre a la sedimentació subglacial en un període en què totes les àrees emergides (excepte els nunataks marcats en l'esquema) s'havien de trobar cobertes de gel. Aquest període cal situar-lo entre el darrer període de màxim enllaçament a nivell global (21-18 ka BP) i les primeres fases de desglaçament de l'Holocè.

*Fig. 5.9. Synthetic interpretative map of the glacial deposits of Hurd Peninsula, eastern False Bay coast and Barnard Point. Legend: (1)- emerged areas which have been covered by ice during periods of maximum thickness and ice extent, (2)- summits corresponding to nunataks during the periods of maximum thickness and extent of ice, (3)- Salisbury Point till, (4)- outer moraine at B.A.E. cove, reworked by the ≈20 m beach, (5)- other moraines with an intermediate age between moraines labelled C and B in B.A.E. cove and probably between B and A at the valley located between B.A.E. cove and Johnsons Dock (6)- moraines corresponding to recent glacial phases, generally subdivided into two ridges (A, ice cored, and B).*

*The outermost of the recent morainic ridges and the correlative submerged morainic arcs are labelled as B. These moraines correspond to a phase during which the glacial fronts of False and South Bays advanced from 3 to 4 km with respect to their present position. Relationships with beach sediments and correlation to glacial phases in King George Island reported by Clapperton & Sugden (1988) indicate that these moraines were formed during the period in which beaches at 5-6 m were deposited. Thus, the advance and subsequent retreat of the ice margins associated with this glacial phase took place within the period between 720 and 330 years cal BP. The innermost ridges of the recent moraines are labelled as A. These ridges are younger than B and are aged between 300 years cal BP and the Present.*

*The moraine labelled as C is reworked to the beach at ≈20 m and, therefore, is older or synchronous with it, and is aged at 6290 years cal BP or older.*

*The subglacial till labelled as D must have been deposited during a period of maximum ice-extent, when most of the present-day emerged areas were covered by ice. It is probably aged between the Last Glacial Maximum and the early phases of deglaciation during the Holocene.*



### Fase glacial associada a la platja de 5-6 m

De tota l'Illa de Livingston, la zona emergida en què hi ha un desenvolupament més important de sediments glacials recents és la costa est de la Badia Falsa, on les geleres que hi drenen procedeixen directament dels relleus d'alta muntanya de la Serralada del Friesland. La batimetria de la Badia Falsa indica que, durant la més antiga de les fases glacials recents, el front de la glacera principal va arribar a tenir una posició avançada 4 km respecte la situació del front glacial actual (Fig. 5.9.). La relació amb els sediments de platja indica que aquest reavenç i el retrocés posterior van haver de tenir lloc durant, o posteriorment a, la sedimentació de la platja de 10 m i sincrònicament o anteriorment a la sedimentació de la platja de 5 m.

A l'Illa King George, John & Sugden (1971) també distingeixen una fase de reavenç glacial relacionada amb la platja de 5-6 m. Anàlogament al que observem a la Badia Falsa, aquests autors indiquen que en diverses localitats es pot observar com en una situació més interna respecte als cordons morrènics s'hi disposa la platja de 5-6 m. Al mateix temps, en un aflorament privilegiat de la localitat de Potter Cove observem com un till associat a aquest reavenç glacial se superposa a la platja de 6 m. Aquestes relacions entre platges i morrenes indiquen que el reavenç i posterior retrocés del front glacial a King George es va produir sincrònicament al període de sedimentació de la platja de 5-6 m. Cal tenir en compte que les fluctuacions glacials es poden produir molt ràpidament (Calvet et al. 1992, Corbera et al. 1992, Corbera 1995) i que, per tant, un avenç glacial i el retrocés posterior es poden produir, en conjunt, en un període de temps molt més curt que el de sedimentació d'un únic nivell de platja.

És factible pensar que l'episodi de reavenç que observem a la Badia Falsa deu ser correlacionable amb l'observat per John & Sugden (1971) a l'Illa King George. D'aquesta manera, proposem que el complex morrènic lateral i el cordó submergit de la Badia Falsa deuen ser sincrònics a la platja de 5-6 m i, per tant, han de tenir una edat situada entre 720 i 330 cal BP (Taula 5.4.).

A la vall de la B.A.E. de la Península de Hurd, el marge de la glacera corresponent al període de sedimentació de la platja de 5-6 m s'havia de trobar entre la platja de ≈20 m i el marge glacial actual (Fig. 5.9.). Dels dos cordons morrènics recents, el més extern s'allarga cap a la vall de la Caleta Argentina on la seva disposició indica que ha de ser anterior a la platja de 4 m. Aquesta edat mínima, el fet que aquest cordó morrènic sigui el més ben desenvolupat de tota aquesta àrea i que es tracti del cordó més extern de les morrenes recents, permeten de correlacionar aquesta morrena amb el complex morrènic lateral i el cordó morrènic submergit de la Badia Falsa i de la Badia Sud (B a la figura 5.9.).

A la vall del Johnsons Dock, el cordó morrènic submergit més ben desenvolupat és el més extern, actualment retreballat parcialment per l'acció marina i que ha de ser anterior o sincrònic a la platja de 5 m. Això ens permet d'interpretar que aquest cordó deu ser correlatiu amb els cordons morrènics submergits de les badies Falsa i Sud (B a la figura 5.9.).

Tal com hem indicat en l'apartat 4.3.3., la morrena situada entre la B.A.E. i el Johnsons Dock, en contacte amb la platja de 5 m, podria ser també correlativa amb la resta de cordons morrènics indicats amb la lletra B a la Figura 5.9. Considerem que aquesta interpretació és la més plausible per raó de: (1) el bon desenvolupament d'aquest cordó morrènic, (2) la seva frescor morfològica, (3) la similitud en la situació del front respecte al cordó parcialment submergit del Johnsons Dock, i (4) el fet que s'hauria

pogut dipositar damunt i posteriorment a la platja de 5 m (malgrat que aparentment no incorpori còdols marins). Tot i això, la major colonització pels líquens en comparació a les *morrenes recents* fa que no es pugui descartar del tot la possibilitat que aquest cordó morrènic sigui, a grans trets, contemporani amb alguna de les *morrenes antigues* que se situen a altituds superiors als 50 m a la vall de la B.A.E.

Així doncs, interpretem que els cordons morrènics marcats amb la lletra B a la figura 5.9. es van dipositar en un període en què la platja de 5-6 m s'estava sedimentant i que, per tant, tenen una edat situada entre 720 i 330 cal BP (Taula 5.4.).

Cal remarcar el diferent comportament dels fronts glacials de les diverses localitats al llarg del procés de desglaçament. Segons la reconstrucció que proposem, els lòbuls glacials que tenien la base submergida van experimentar unes oscil·lacions molt més ràpides i àmplies (com a mínim pel que fa als retrocessos del front) que no pas els lòbuls glacials situats a les valls emergides. Els cordons morrènics frontals submergits de les badies Falsa i Sud (B a la Figura 5.9.) es troben a una distància del marge glacial actual d'aproximadament 4 km. En canvi, el cordó correlatiu de la vall de la B.A.E. es troba a una distància màxima de 150 m respecte el front glacial actual. Una situació intermèdia és la del lòbul del Johnsons Dock, on el retrocés glacial net durant el mateix període és d'aproximadament 825 m.

Si la morrena situada entre la B.A.E. i el Johnsons Dock correspon a la mateixa fase que les morrenes anteriors (possibilitat que considerem altament probable), la velocitat de retrocés del front glacial d'aquesta vall hauria estat molt més alta que la dels lòbuls glacials de les altres valls emergides. Aquest retrocés relativament ràpid es pot explicar considerant que el reompliment glacial d'aquesta vall hauria estat fortament controlat pel lòbul glacial del Johnsons Dock. En períodes propers a la sedimentació del cordó morrènic submergit més extern, el lòbul del Johnsons Dock deuria vessar cap a l'est tot superant el coll de 80 m d'alçada que el separa de la vall veïna (vegeu Servicio Geográfico del Ejército 1991a). A través d'aquesta transfluència, el mateix reavenç glacial que hauria format el cordó morrènic submergit més extern del Johnsons Dock hauria pogut formar la morrena més externa de la vall veïna. El posterior desglaçament del lòbul parcialment submergit del Johnsons Dock hauria provocat la desconexió de la massa de gel de la vall veïna que, pobrament alimentada, s'hauria anat aprimant i retraient amb rapidesa, fins a desaparèixer.

Les glaceres rocalloses de la costa est de la Badia Falsa i de l'extrem sud de la Península de Hurd no mostren una relació clara amb cap nivell de platja. Malgrat tenir una dinàmica que possiblement no deu ser directament assimilable a la resta de morrenes marginals, la situació més externa respecte els cordons morrènics amb nucli de gel suggereix fortament que aquestes morrenes rocalloses s'haurien pogut formar en el mateix període que l'avenç glacial contemporani amb la platja de 5 m. És amb aquest criteri que a la figura 5.9. les senyalem amb la lletra (?)B. Tot i haver-se format anteriorment a 300 cal BP, és possible que actualment aquestes morrenes encara siguin actives i, per tant, no és d'estranyar que puguin recobrir morrenes contemporànies o fins i tot posteriors al seu període de formació (tal com passa just al sud de la Glacera de Charity).



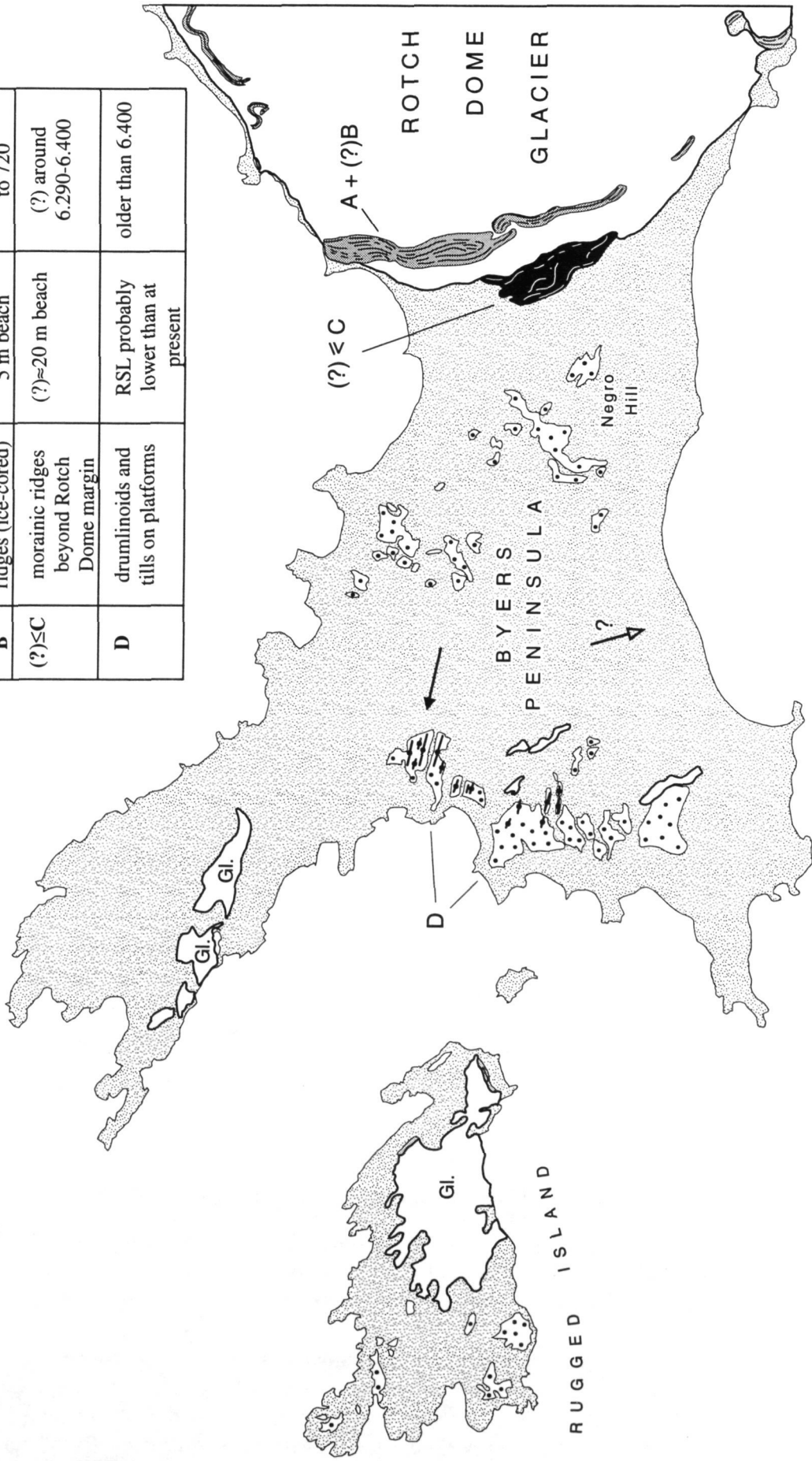
**Figura 5.10.** Mapa sintètic interpretatiu de la distribució dels sediments glacials a la Península de Byers i la seva atribució a les diferents fases glacials. Llegendà: (1)- àrees englaçades durant els períodes de màxim englaçament, (2)- possible direcció del glaç corresponent a les fases de major englaçament (sugerida per Curl 1980), (3)- tills probablement corresponents al període comprès entre l'Últim Màxim Glacial i el desglaçament holocè de la Península de Byers, (4)- camp de drumlinoides, (5)- direcció del glaç durant la sedimentació del camp de drumlinoides, (6)- morrenes probablement més joves o sincròniques a la deglaciació de les àrees costaneres de la Península de Byers, (7)- morrenes corresponents a fases glacials recents, amb nucli de gel.

Pels sediments glacials que poden ser correlatius amb els de la Península de Hurd i la Badia Falsa hem aplicat les mateixes lletres (A, B i C) i les mateixes trames que en la figura 5.9.

**Fig. 5.10.** *Synthetic interpretative map of the glacial deposits of Byers Peninsula. Legend: (1)- emerged areas which have been covered by ice during periods of maximum thickness and ice extent, (2) possible ice-flow direction as suggested by Curl (1980), (3)- tills probably deposited between the Last Glacial Maximum and the early phases of the Holocene deglaciation, (4)- drumlinoids field, (5)- ice flow direction consistent with drumlinoids, (6)- moraines probably younger or synchronous to deglaciation of the coastal areas of Byers Peninsula, (7)- recent, ice cored supra-glacial moraines.*

*The same capital letters and patterns have been used to indicate moraines that may be correlative to the ones labelled A to C in Fig. 5.9.*

moraines/tills		contemporaneous beaches	age interval (cal years BP)
A+(?) B	recent morainic ridges (ice-cored)	3 m beach 5 m beach	Present to 720
(?) ≤ C	morainic ridges beyond Rotch Dome margin	(?) ≈ 20 m beach	(?) around 6,290-6,400
D	drumminoids and tills on platforms	RSL probably lower than at present	older than 6,400



- 1 [Stippled pattern]
- 2 [Arrow pointing up]
- 3 [Irregular shape with dots]
- 4 [Diagonal lines]
- 5 [Arrow pointing right]
- 6 [Dark shaded area]
- 7 [Light shaded area]



0 2000m

El cordó morrènic més extern de les localitats de la Punta Hannah i la Punta Siddons (Figures 4.10. i 4.11.), per analogia amb el què s'observa amb criteris prou concloents a la Badia Falsa i la Península de Hurd, es pot interpretar com a resultat de la mateixa fase glacial, contemporània amb la platja de 5-6 m.

Segons Clapperton & Sugden (1988) la fase glacial associada a la platja de 6 m té una edat de 700-450 *cal* BP. Segons les noves correccions i calibracions que hem aplicat per a les datacions de radiocarboni (vegeu apartat 5.4.) l'edat d'aquesta fase glacial la podem resituar dins del període comprès entre 720 i 330 *cal* BP. Aquest període continua essent correlatiu amb la Petita Edat del Gel registrada a l'Hemisferi Nord.

### Fase glacial subactual

El més intern dels dos *cordons morrènics recents* (marcat amb la lletra A a la figura 5.9.) ha de correspondre a una fase glacial posterior a l'edat de 720-330 *cal* BP, que és l'edat que hem determinat pel cordó morrènic recent extern. Únicament en el lòbul més septentrional de la costa est de la Badia Falsa hem observat el contacte entre el cordó corresponent a aquesta darrera fase d'avenç glacial i els nivells de platges inferiors. En aquest cas, la platja de 5 m es troba retreballada per la morrena.

Segons Clapperton & Sugden (1988) a l'illa King George també hi ha registrada una fase de reavenç glacial posterior a la fase associada amb la platja de 5-6 m. Aquests autors indiquen que a la capçalera d'alguns *fiords* de l'illa King George s'observa com durant aquesta fase més recent els fronts de les glaceres van arribar a una posició avançada 0.25 a 1 km respecte el front actual i que els tills que s'hi associen han de ser posteriors a la platja de 3 m.

Tant la presència de nucli de gel com la proximitat amb el front glacial actual suggereixen que el cordó morrènic més intern deu correspondre a una fase glacial subactual. La correlació directa amb la fase glacial definida per Clapperton & Sugden (1988) a l'illa King George suggereix que l'edat màxima d'aquesta fase d'avenç ha de coincidir amb l'edat màxima de la platja de 3 m, que se situa, segons les nostres correccions i calibracions, aproximadament a 300 *cal* BP o edats més recents (Taula 5.4.). Tal com destaquen Calvet et al. (1992), el cordó morrènic amb nucli de gel sembla coincidir o ser molt proper a la posició del marge glacial observable a les fotografies aèries dels anys 1956-1958. Això suggereix que el cordó morrènic subactual podria correspondre a la superposició de diverses pulsacions o fases d'estabilització glacial recents, les quals haurien pogut tenir lloc des del període de 300 *cal* BP fins al Present.

Les dues fases d'avenç glacial associades als *cordons morrènics recents* (A i B a la figura 5.9.) tenen lloc al llarg d'un període equivalent amb les fases d'avenç glacial de la Petita Edat del Gel definides a l'Hemisferi Nord.

### 5.5.2. Fases del desglaçament associades a la platja de ≈20 m

La distribució de les platges altes a la Península de Byers (entre 17 i 21 m) ens indica que en el període en què el nivell del mar es trobava a aquesta alçada, les zones costaneres d'aquesta localitat ja havien d'estar desglaçades. Per tant, d'acord amb les edats que hem atribuït a les platges de l'illa de Livingston (Taula 5.4.), el marge glacial ja havia retrocedit cap a parts més interiors de la Península de Byers al voltant de 6.400-6.290 *cal* BP. Posteriorment a aquesta edat, les àrees centrals haurien pogut quedar, durant un cert període de temps, cobertes per gel mort, desconnectat del casquet del Rotch Dome. Possiblement aquest període de temps no deuria ser gaire llarg i tal com

dedueixen Björk et al. (1991a) a partir de la datació de sediments basals del llac de Midge Lake (situat immediatament a l'oest de Chester Cone), les parts més altes de la Península de Byers en cap cas haurien estat cobertes de gel posteriorment als 4000 BP (Fig. 4.8.). Els canals d'aigües de fusió que, amb una distribució aproximadament radial, drenen la zona del Chester Cone s'haurien pogut formar durant la fusió d'aquesta massa de gel estàtica. La formació d'aquests canals no hauria de ser, forçosament, el resultat de les aigües de fusió d'un únic cicle glacial, sinó que podria correspondre a l'efecte acumulat de l'erosió associada a diversos cicles. A més, aquesta interpretació és suportada pel fet que com més alta (i en principi més antiga) és la plataforma, més alt és el nombre i grau d'encaixament dels canals de fusió.

La morrena més externa de la vall de la B.A.E. (Península de Hurd, C a Fig. 5.9.) es troba retreballada per la platja de  $\approx 20$  m, de forma que tant pot ser sincrònica com anterior a 6290-6400 *cal* BP (Taula 5.4.) El fet de no trobar platges més altes en la zona de la B.A.E. es pot interpretar de dues maneres:

- a) Anteriorment a 6.290-6.400 *cal* BP el gel ocupava tota la vall de la B.A.E. i, submergit parcialment per sota el nivell del mar, no permetia la sedimentació marina. La platja de  $\approx 20$  m s'hauria sedimentat just quan el front del lòbul glacial haugués retrocedit fins aquesta altitud i, per tant, la platja i el cordó morrènic tindrien la mateixa edat. Això implica que el front glacial del lòbul de la B.A.E. hauria tingut aquesta posició al voltant de 6400 *cal* BP.
- b) O bé les platges no es van poder sedimentar (a causa del fort pendent a la vall de la B.A.E. entre les cotes de 20 i 30 m), o bé, un cop sedimentades, van ser posteriorment retreballades per processos gravitacionals i/o recobertes pels materials de degradació de vessant.

Per tant, concloem que el cordó més extern de la vall de la B.A.E. (Fig. 5.9.) ha de ser sincrònic o anterior a 6300 *cal* BP. Aquest cordó conjuntament amb la resta de *cordons morrènics antics* de la vall de la B.A.E. a la Península de Hurd podrien ser correlacionables amb els cordons morrènics adjacents al marge glacial del Rotch Dome (Fig. 5.10.). Tot i això, no hi ha prou criteris que permetin recolzar aquesta hipòtesi.

### 5.5.3. Períodes de màxim enllaçament

En el Capítol 4. hem vist com en diverses àrees de l'Illa de Livingston hi ha enregistrades fases glacials d'extensió i gruixos de gel molt superiors als actuals.

En les àrees submergides situades al sud de l'Illa de Livingston és on hi ha unes evidències més clares d'aquestes fases de màxim volum glacial. La interpretació de les dades batimètriques indica que les badies Falsa, Sud i Walker en moments de màxim enllaçament s'havien de trobar totalment ocupades pel gel fins a profunditats superiors als 400 m (Fig. 4.1.). El gruix de gel màxim a la vall glacial de la Badia Falsa es pot deduir a partir de l'altitud de la *trim line* a la Península de Hurd (250-300 m) respecte els fons de les valls glacials submergides (200-250 m, Fig 5.9.). El gruix de les llengües glacials estimat d'aquesta forma és d'aproximadament 500 m. Aquest gruix hauria pogut ser de fins a 700 m a la confluència de les diverses valls glacials, on el substrat es troba sobre-excavat. Cal pensar que tot i que possiblement la base d'aquesta massa de gel es deuria trobar per sota del nivell marí, aquest casquet glacial hauria pogut ser perfectament estable sempre que hagués tingut una bona alimentació i més de 1/9 de la columna total de gel s'hagués mantingut emergida. Aquesta darrera condició s'hauria

complet mentre el nivell del mar relatiu no hagués sobrepassat la cota aproximada de 240 m sobre el nivell del mar actual.

La resta d'àrees emergides no enllaçades de l'Illa de Livingston mostren de forma evident que han estat totalment enllaçades. La Península de Byers proporciona informació sobre les fases d'enllaçament major; El flux glacial de direcció NNO-SSE suggerit per Curl (1980) hauria de correspondre a una fase de màxim enllaçament en què, d'acord amb les interpretacions de John & Sugden (1971), el centre de màxima acumulació de gel s'hauria situat al nord de l'arxipèlag. No obstant això, la direcció suggerida per Curl (1980) cal considerar-la únicament com a temptativa, ja que (1) les evidències de camp semblen poc concloents i (2) la Península de Byers es troba en una posició central respecte la reconstrucció del casquet glacial indicada per John & Sugden (1971) (vegeu la figura 2.19). En qualsevol cas, si la direcció NNO-SSE fós correcta, sembla que hauria de correspondre a una fase de màxim enllaçament, anterior al flux glacial de direcció ONO-ESE i compatible amb la dispersió dels blocs erràtics procedents del turó de Chester Cone indicada per John & Sugden (1971). Aquesta fase hauria de ser anterior a la formació del camp de *drumlins* (Fig. 5.10.) el qual, altrament, difícilment s'hauria preservat. Aquesta cronologia relativa entre fluxos glacials és compatible amb la suposició raonable segons la qual, en fases lleugerament anteriors al desglaçament de la Península de Byers, el marge glacial hauria hagut de retrocedir d'oest cap a l'est amb una disposició aproximadament paral·lela al marge de l'actual glacera de Rotch Dome. La direcció de glaç compatible amb aquest retrocés hauria permès la formació i preservació del camp de *drumlins*. Això suggereix que el camp de *drumlins* i, possiblement la resta de tills i blocs erràtics de la Península de Byers, s'haurien pogut sedimentar posteriorment a les fases de major enllaçament de l'illa i, fins i tot, podrien correspondre a fases glacials properes al desglaçament holocè de la península (Fig. 5.10.). En qualsevol cas, tots aquests sediments i estructures glacials es deuriem emplaçar i formar anteriorment a 6.400 cal BP, que és l'edat en què les àrees costaneres de la península ja es trobaven desglaçades.

De la mateixa manera interpretem els sediments glacials alterats que es troben a la resta de localitats actualment no enllaçades de l'illa. Tant el till de la Punta Salisbury (Península de Hurd) com la majoria de materials d'origen glacial que entapissen les àrees de plataforma del Cap de Shirreff es poden incloure, de forma àmplia, al període comprès entre la darrera fase d'enllaçament major i el temps que aquestes àrees van quedar lliures de gel (Fig. 5.9.).

Una excepció a aquesta regla general són les bossades de còdols i blocs del Cap de Shirreff. Aquests dipòsits es troben entre 35 i 45 m d'alçada, a desenes de metres per damunt de la platja emergida més alta (17 m) i sempre per sobre del nivell de la màxima submersió marina holocena que hem deduït en l'apartat 5.4.4. ( $\approx$  30 m). Això implica que l'arrodoniment per part del mar d'aquests dipòsits no es va poder produir durant l'Holocè. Únicament durant algun dels períodes interglacials anteriors a l'Holocè (gràcies a l'efecte de l'aixecament tectònic, Capítol 5.3.), el nivell relatiu del mar hauria pogut ser prou elevat per afectar les cotes de 35 a 45 m. Per tant, pensem que les bossades de còdols i blocs es van haver de sedimentar, com a mínim, anteriorment al darrer període interglacial i que han estat parcialment preservades tot i el fet d'haver estat recobertes pel gel durant la darrera glaciació.

#### 5.5.4. Model de fases glacials i interrelació amb el nivell marí

L'anàlisi del registre glacial indica que l'illa de Livingston havia estat coberta per un casquet glacial de grans dimensions que ocupava les àrees actualment submergides fins a una profunditat de més de 400 m. Aquestes observacions estan d'acord amb les reconstruccions de l'extensió de glaç proposades per John & Sugden (1971).

John & Sugden (1971), John (1972) i Sugden & John (1973) consideren que les Illes Shetland del Sud han estat afectades per un mínim de dues fases glacials. Durant la fase glacial més antiga (o fases), anomenada *Glaciació Principal*, el conjunt de l'arxipèlag hauria estat recobert per un únic casquet glacial, centrat just al NO de les illes. Aquest casquet de grans dimensions hauria estat el responsable de la formació de la major part de trets erosius reflectits tant en l'encaixament dels estrets que separen les diferents illes com en la formació de les valls actualment submergides, excavades en el substrat. Aquesta fase glacial major correspondria a la penúltima glaciació i seria correlacionable a nivell global amb les glaciacions registrades a l'Hemisferi Nord corresponents a l'estatge isotòpic 6. Posteriorment, durant el darrer període interglacial (corresponent a l'estatge isotòpic 5) l'arxipèlag de les Illes Shetland del Sud hauria estat majoritàriament cobert pel mar, de manera que s'haurien sedimentat materials marins (les *platges residuals*) fins a una altitud de 275 m. Aquest període interglacial hauria anat seguit de la darrera glaciació, anomenada *Glaciació Local*. Durant aquesta darrera glaciació, totes les àrees actualment no enllaçades haurien estat recobertes pel glaç però els casquets glacials haurien tingut un abast únicament local, centrats individualment sobre cada una de les illes. Segons John & Sugden (1971) aquesta fase glacial hauria estat la responsable de la sedimentació dels blocs erràtics i els tills que es troben de forma extensa en totes aquestes àrees.

De l'esquema proposat per John & Sugden (1971), és essencial la separació de les dues fases d'enllaçament (*principal* i *local*) mitjançant un període interglacial (amb nivell marí elevat). Aquest esquema es basa principalment amb les idees següents: Per una banda, hi ha indicis clars que les *platges residuals* han estat recobertes pel gel i per tant han de ser anteriors, com a mínim, a la *Glaciació Local*; per altra banda, hi ha *platges residuals* que es troben en alguns dels vessants dels estrets i *fiords* excavats durant la *Glaciació Principal*. John & Sugden (1971) consideren que les *platges residuals*, en conjunt, han de ser posteriors al període majoritàriament erosiu de la *Glaciació Principal* ja que, altrament, no s'haurien preservat. Segons aquesta interpretació les *platges residuals* corresponen a un període de nivell marí relatiu elevat (fins a 275 m!) el qual separa les dues glaciacions.

L'esquema proposat per John & Sugden (1971), John (1972) i Sugden & John (1973) implica alguns punts xocants que, a la llum del coneixement aportat en el present treball, el fan difícilment acceptable:

- a) Resulta molt casual la coincidència entre l'altitud de les *platges residuals* i l'altitud de les plataformes més elevades. Tot i que ambdós arriben a una alçada màxima de 275 m, en l'esquema proposat per aquests autors, les plataformes es consideren molt més antigues (possiblement terciàries) i no s'associen temporalment a les *platges residuals*.
- b) Basant-nos en la informació proporcionada pel registre isotòpic de l'oxigen (vegeu l'Annex C), resulta francament difícil acceptar que durant el darrer període

interglacial el nivell del mar relatiu pogués arribar a una altitud de 275 m sobre el nivell del mar actual.

Els mecanismes suggerits per explicar l'elevació del nivell del mar relatiu fins aquesta altitud són (1) un aixecament tectònic generalitzat de l'arxipèlag (John & Sugden 1971), (2) un suposat efecte de col.lapse de la protuberància marginal al voltant del continent antàrtic que s'hauria produït posteriorment a la penúltima glaciació (Sugden & John 1973) i (3) un simple aixecament glàcio-isostàtic associat a la descàrrega de gel local de l'arxipèlag (Curl 1980).

Tal com hem argumentat en l'apartat 5.3. el nivell relatiu del mar durant el darrer període interglacial només podria ser lleugerament més alt que l'actual, i l'origen d'aquesta desnivellació hauria de ser tectònic. Els índex màxims d'aixecament tectònic calculats a partir de l'anàlisi de les plataformes d'erosió marina emergides (apartat 5.3.) en cap cas permeten d'acceptar una diferència de 275 m entre el nivell relatiu del mar corresponent a l'holocè i el del darrer estatge interglacial.

Els models de deformació glàcio-hidro-isostàtica consideren que la protuberància externa experimentada per la litosfera a la vora d'un casquet glacial té una altitud màxima d'una desena de metres respecte la situació de l'escorça no deformada (Walcott 1970). A més, si les Illes Shetland del Sud es trobessin realment dins de l'àrea afectada per la protuberància externa, durant l'Holocè haurien hagut d'experimentar submersió enlloc de l'emersió indicada per les platges. El model ICE-3G apunta que les Illes Shetland del Sud, més que en la zona afectada per la protuberància externa associada al continent antàrtic, es troben dins l'àrea de depressió litosfèrica adjacent a la càrrega glacial de la Península Antàrtica.

A la llum dels coneixements actuals, és preferible considerar que les *platges residuals* (especialment les més altes) deuen ser contemporànies a les plataformes d'erosió marina que es troben a altituds similars. Per tant, aquests sediments poden ser força més antics que el darrer estatge interglacial i han d'haver estat recoberts per les glaceres al llarg de diverses glaciacions. Cal pensar que l'apreciació qualitativa sobre la relativa frescor dels còdols d'aquests sediments marins no ha de ser un obstacle major per acceptar aquesta conclusió ja que no hi ha estudis quantitius sobre les velocitats d'alteració i erosió que poden experimentar els sediments en condicions subglacials, sota el mantell nival o inclosos dins del sòl, en una zona com les Illes Shetland del Sud. No es pot descartar que el recobriment glacial durant una proporció de temps important, més que no pas a degradar, hagi pogut ajudar a preservar aquests dipòsits marins.

Amb els arguments anteriors, la separació entre una *Glaciació Principal* (amb recobriment del conjunt de l'arxipèlag per un únic casquet extens) i una *Glaciació Local* (amb diversos casquets localitzats sobre les illes individualment) perd el seu fonament. L'estratigrafia isotòpica de l'oxigen (vegeu Annex C) indica que, a nivell global, la darrera glaciació és tant o més intensa que les glaciacions anteriors i per tant no sembla raonable que la darrera glaciació en les Illes Shetland del Sud hagués d'implicar un volum de gel menor. Conceptualment, sembla més probable que les dues glaciacions distingides per Sugden & John (1972) corresponguin a dues fases de la mateixa glaciació (o múltiples glaciacions amb volums de gel similars)

El registre sedimentari d'un cicle glacial és molt poc perdurable perquè tendeix a ser destruït per l'efecte erosiu del cicle glacial posterior. Aquesta és la causa que a nivell global actualment tinguem molta més informació sobre la darrera glaciació (entre 125 i

10 ka BP) que no pas sobre la resta de les glaciacions pleistocenes. El que és realment perdurable, és l'efecte *erosiu* de les glaciacions. Cal tenir en compte que els resultats de l'erosió glacial que observem actualment no són únicament deguts a l'efecte de les glaciacions més recents sinó a l'efecte acumulat de la llarga successió de períodes glacials que han tingut lloc durant, com a mínim, els darrers 2 Ma. Per tant, l'intens modelat glacial *erosiu* de les Illes Shetland del Sud l'interpretem com l'efecte acumulat de totes les glaciacions que hagin tingut prou entitat per poder cobrir el conjunt de l'arxipèlag. Possiblement la darrera glaciació deuria ser una més d'entre aquestes glaciacions, i l'últim màxim glacial (situat globalment entre 21 i 18 ka BP) deuria constituir el darrer període en què el volum de gel va ser prou important per recobrir tot l'arxipèlag de les Illes Shetland del Sud.

Cal pensar que els tills i blocs erràtics actualment exposats en superfície es deurién sedimentar probablement en el període que comprèn l'última glaciació pleistocena i, al més tard, els inicis de l'Holocè.









## **CAPÍTOL 6**

### **CONCLUSIONS**

Una part important dels resultats d'aquest treball els hem presentat en forma gràfica en les figures dels capítols 3. i 4.

En el Capítol 5. hem discutit en detall alguns dels aspectes que es desprenen de les descripcions sobre les diferents localitats de l'Illa de Livingston i hem fet una sèrie de consideracions sobre diversos aspectes de l'evolució geològica del conjunt de les Illes Shetland del Sud.

En aquest capítol presentem de forma sintètica les conclusions més destacades a què hem arribat.

## Relacions cronoestratigràfiques i estructurals

- ☞ Bona part dels afloraments de l'Illa de Livingston (zona del Mont Bowles, la Punta Renier, la Punta Williams, la Punta Siddons, el Cap de Shirreff i la Punta Hannah) estan formats per roques corresponents al *Grup Volcànic de la Península Antàrtica*. La successió del Cap de Shirreff (pertanyent a l'arc volcànic) és probablement correlativa amb la *Formació Negro Hill* del *Grup de Byers* (corresponent a la sedimentació a la vora de la conca d'avant-arc) o bé és correlativa amb les roques subvolcàniques que s'hi intrueixen. Totes les roques del *Grup Volcànic de la Península Antàrtica* de l'illa tenen una edat de Cretaci superior, tot i que a la Punta Hannah també hi podria haver roques corresponents a la base del Terciari.
  
- ☞ El *Grup Volcànic de la Península Antàrtica* és clarament discordant sobre la *Formació Miers Bluff* però localment es troben relacions més complexes. A la banda est de la Península de Hurd, entre aquestes dues unitats hi afloren les Bretxes del Pic Moores que tant poden formar part de la *Formació Miers Bluff* com constituir una unitat a part, anàloga a les formacions del *Botany Bay Group* de la Península Trinity. A la Península de Hurd, el contacte entre la *Formació Miers Bluff* i la *Formació Mount Bowles* (inclosa dins del *Grup Volcànic de la Península Antàrtica*) s'explica adequadament mitjançant una falla, però no es pot descartar la possibilitat que es tracti d'una discordança basculada. Les estructures de la *Formació Miers Bluff* i les de part del *Grup Volcànic de la Península Antàrtica* (per exemple al Cap de Shirreff) són incompatibles amb una mateixa fase de deformació.
  
- ☞ És possible que l'erosió hagi aprofundit més intensament en la successió estratigràfica a la banda occidental de les Illes Shetland del Sud que a la banda oriental. Això permet d'explicar perquè a l'Illa de Livingston hi afloren les unitats estratigràfiques més antigues de l'arxipèlag. Aquesta hipòtesi també permet d'explicar la tendència al rejuveniment de les edats radiomètriques del *Grup Volcànic de la Península Antàrtica* cap al NE, sense la necessitat d'una migració dels focus volcànics o d'una migració de l'aturada del vulcanisme.

## Relació entre l'evolució estructural neògena i el relleu

- ☞ L'Illa de Livingston està compartimentada en diversos blocs tectònics. Les falles que limiten aquests blocs estan associades a vulcanisme d'edat quaternària (*Formació Inott Point*), tenen un component extensional i estan directament relacionades amb l'obertura de la conca neògena de Bransfield.
  
- ☞ La tectònica de blocs condiona (1) variacions en el grau d'erosió de les diferents àrees, (2) l'aflorament de nivells més o menys profunds de la successió estratigràfica i, conjuntament amb l'erosió diferencial, (3) la distribució de les unitats fisiogràfiques.

- ☞ L'altitud de la Serralada del Mont Friesland no es pot explicar únicament a partir d'un aixecament de tipus espatlla, associat a l'obertura de la Conca de Bransfield. La diferència d'altitud respecte les àrees adjacents deu ser en part deguda a un fenomen d'erosió diferencial i a un possible aixecament independent mitjançant el moviment de falles que podrien separar aquesta serralada dels blocs de la Península de Hurd i del Mont Bowles.

### Relació entre aixecament, fases glacials i nivell marí

- ☞ Les plataformes d'erosió marina de les Illes Shetland del Sud situades per sota dels 120-130 m d'altitud (que formen una successió de com a màxim quatre nivells diferents) tenen una edat difícil de precisar, que se situa entre el Miocè inferior i el Pleistocè superior. Aquestes plataformes s'han d'haver tallat durant períodes interglacials o bé durant períodes no glacials.
- ☞ Probablement, les Illes Shetland del Sud deuen haver experimentat un aixecament tectònic de forma continuada com a mínim des dels inicis de l'obertura de la conca extensional de Bransfield, d'edat neògena. Aquest aixecament tectònic s'ha d'haver produït a unes velocitats mitjanes inferiors als 0.4 m/ka, mentre que les velocitats màximes esperables entre dos períodes interglacials successius dins del Quaternari haurien estat inferiors a 0.9 m/ka. A aquest aixecament tectònic relativament lent s'hi han anat sobreimposant de forma cíclica d'altres moviments verticals, d'origen glàcio-isostàtic, molt més ràpids, associats a les fluctuacions glacials del Terciari superior i del Quaternari.
- ☞ Els nivells marins de les Illes Shetland del Sud que es troben a major altitud (tals com les *platges residuals* de John & Sugden 1971, situades a 275 m sobre el nivell del mar) tenen una edat mínima de 705 ka BP (en lloc dels  $\leq 120$  ka BP suggerits anteriorment).
- ☞ Durant el darrer màxim glacial global, al voltant de 18 ka, el conjunt de l'Illa de Livingston i de les Illes Shetland del Sud deuria estar totalment enllaçat a excepció d'alguns nunataks. El gruix de gel en les àrees de sobreexcavació deuria ser d'entre 500 i 700 m. Aquesta massa de gel devia descansar sobre el substrat rocós fins a una profunditat de més de 400 m per sota de la superfície del mar actual. Això és compatible amb la presència de diversos casquets glacials coalescents que haurien cobert el conjunt central de l'arxipèlag i, probablement, l'Illa Decepción.
- ☞ Entre 18 ka i 10 ka el nivell del mar relatiu a les Illes Shetland del Sud devia passar d'estar situat a desenes de metres per sota del seu nivell actual a una altitud màxima durant l'Holocè. Aquest ascens del nivell relatiu del mar és originat per l'augment glàcio-eustàtic associat a la fusió dels casquets glacials de l'hemisferi Nord. El desglaçament de les Illes Shetland del Sud i de la Península Antàrtica va provocar una recuperació glàcio-isostàtica que va donar lloc a l'emersió holocena de l'arxipèlag. Si, tal com s'accepta actualment, l'inici del desglaçament en aquesta regió no es va produir fins al voltant de 10 ka BP, l'emersió holocena deuria tenir una amplitud màxima d'entre 25 i 30 m. Aquesta emersió va permetre la

sedimentació de platges a mesura que les diferents valls glacials van anar quedant lliures de gel. En la majoria de localitats actualment desglaçades això no va tenir lloc fins al voltant de 6.4 ka BP, quan el nivell relatiu del mar va baixar per sota dels 20 m d'alçada.

- ☞ D'acord amb aquest esquema evolutiu, les platges situades a altituds superiors als 30 m es deurién sedimentar anteriorment a l'Holocè i corresponen a períodes interglacials o interstadis anteriors. Cal acceptar que aquestes platges haurien hagut de sobreviure al possible efecte erosiu de les glaceres al llarg d'un o de diversos períodes d'englaçament.
- ☞ A diferència del que s'havia proposat anteriorment, no considerem probable que entre els diferents cicles glacials/interglacials quaternaris hi hagi hagut diferències substancials en el volum d'englaçament de les Illes Shetland del Sud. La major altitud dels dipòsits marins pre-holocens respecte a la dels holocens, més que no pas a moviments verticals glàcio-isostàtics de major amplitud que els associats a la darrera fase glacial, l'atribuïm al lent aixecament tectònic de l'arxipèlag.
- ☞ L'índex d'aixecament actual de l'arxipèlag ha de ser inferior als 2.8 mm/any (corresponent a 0.4 mm/any del màxim component d'aixecament tectònic + 2.4 mm/any corresponents al màxim component d'aixecament glàcio-isostàtic).
- ☞ Entre com a mínim 6.4 ka BP i el Present, les Illes Shetland del Sud han experimentat diverses fases de reavenç i/o estabilització glacial. Hem observat dues fases d'avenç glacial associables a la Petita Edat del Gel, les quals se situen entre les edats de 720-330 anys BP (dins del període de sedimentació de les platges de 5-6 m) i de 300 anys BP al Present (dins del període de sedimentació de la platja de 3 m).





