

PAISAJE NATURAL Y PISOS GEOECOLÓGICOS EN LAS ÁREAS LIBRES DE HIELO DE LA ANTÁRTIDA MARÍTIMA (ISLAS SHETLAND DEL SUR)

Enrique Serrano Cañadas

Departamento de Geografía. Universidad de Valladolid

RESUMEN

Las islas Shetland del Sur, archipiélago glaciado de la Antártida marítima, posee un sistema morfoclimático frío y húmedo que propicia una activa dinámica periglaciaria. Los procesos morfogenéticos, las formas, el permafrost, los suelos y la vegetación presentan una organización en estrechas bandas altitudinales que posibilitan establecer una sucesión de cuatro pisos geoecológicos: tundra abierta en playas holocenas y plataformas inferiores, plataformas y laderas intermedias en ambientes de permafrost continuo con tundra abierta de briófitos, desierto polar en ambientes de permafrost continuo y tapiz líquénico, y desiertos polares en ambientes de permafrost continuo en altura. La distribución altitudinal de los pisos geoecológicos conforman el paisaje de las zonas libres de hielo de la Antártida marítima.

Palabras clave: Paisaje natural, medios fríos, pisos geoecológicos, Antártida marítima.

ABSTRACT

Natural landscape and geoecological belts on ice free areas of maritime Antarctica (South Shetland Island). The South Shetland Island is a glaciated archipelago of maritime Antarctic with a cold and wet morphoclimatic system. The geomorphic processes, landforms, permafrost, soils and vegetation are organized in narrow altitudinal belts. In this work we have defined four geoecological belts: open tundra on holocene beaches and lower platforms, medial

Fecha de recepción: mayo 2003

Fecha de admisión: julio 2003

platforms and slopes in continuous permafrost environment with open tundra, polar dessert in continuous permafrost environment with lichens, and high polar dessert in continuous permafrost environment. The altitudinal geoeological belts distribution make up the landscape of ice free areas of maritime Antarctic.

Key-words: Natural landscape, cold environment, geoeological belts, maritime Antarctica.

1. INTRODUCCIÓN

En la amplia extensión de la Antártida, que se extiende desde los 50° S hasta el polo, dominan los paisajes glaciares, si bien en sus márgenes existen pequeñas porciones libres de hielo, deglaciadas más o menos recientemente. Este vasto y homogéneo continente, cuya belleza y atractivo emana de la simplicidad de sus componentes básicos, dominados por el hielo, el mar y el cielo, y del dinamismo y efectividad de los procesos implicados en su funcionamiento, propicia una diversidad geográfica que permite diferenciar entre la Antártida continental, extensa, uniforme y monótona, y la Antártida marítima, donde el cinturón de borrascas, las variaciones estacionales y sobre todo la presencia de humedad, configuran el espacio de mayor biodiversidad y geodiversidad de las altas latitudes del hemisferio sur.

El escalonamiento altitudinal de elementos y procesos naturales en altas latitudes ha sido estudiado desde perspectivas biológicas y geomorfológicas. Se han reconocido pisos geomorfodinámicos en altas latitudes en función de los factores edáficos, el sustrato, la humedad en el suelo o la vegetación, pero no de cambios climáticos altitudinales. Para Stablein (1984) no existen, en Groenlandia, cinturones altitudinales regionales y las variaciones morfodinámicas periglaciares dependen más de parámetros climáticos locales condicionados por factores orográficos, edáficos y geoeológicos que de límites altitudinales. Sin embargo han sido establecidas «zonaciones altitudinales» del permafrost, la vegetación o ámbitos ecológicos en altas latitudes (Stablein, 1984; King, 1986, André, 1993) y se han establecido pisos de vegetación en las zonas libres de hielo de la Antártida marítima, definidas como «comunidades montanas» (Lewis, 1993, en Olech, 2002, p. 229) o «zonas» (Olech, 2002). En ellas intervienen factores locales como la proximidad del mar o la distribución de colonias faunísticas. En las Islas Shetland del Sur se han descrito variaciones en altitud, climáticas —atmosféricas y en el suelo (descenso de la Tⁿ media anual, ritmos de fusión nival, penetración de la onda de frío en el suelo)—, de los ecosistemas terrestres, de los sistemas morfodinámicos y del permafrost (Rackusa-Suszczewski, 1993; Serrano y López Martínez, 1996; Olech, 2002; Ramos et al. 2002; Serrano et al. 2002). A partir del trabajo de campo sobre 16 áreas libres de hielo de las islas Shetland del Sur, y el análisis de los componentes básicos, su estructura y dinámica, en este trabajo se pretende una aproximación geoeológica al medio de la Antártida marítima en las islas Shetland del Sur, al norte del círculo polar antártico, que ha permitido detectar una organización en pisos geoeológicos.

Las Islas Shetland del Sur se localizan al norte de la península Antártica entre los 62° 45' W y 57° 40' W de longitud y los 61° 59' S y 63° 40' S de latitud, y son once islas mayores alineadas en dirección SW-NE de 4.700 km² de extensión (Figura 1). Está constituido por rocas

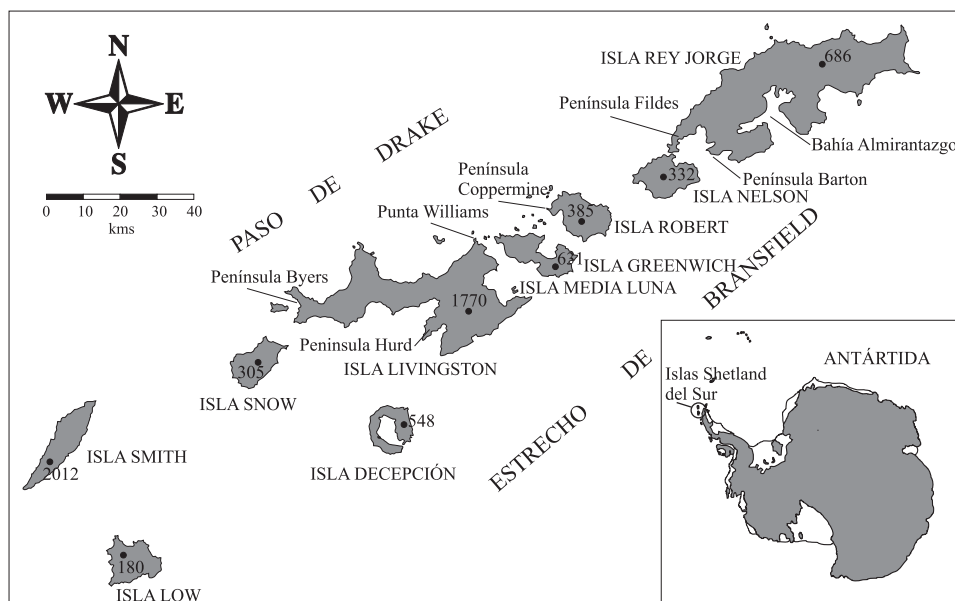


Figura 1. Mapa de situación de las islas Shetland del Sur y lugares mencionados en el texto. Al este se encuentran las islas Elefante, Clarence y Gibbs, que completan el archipiélago.

sedimentarias, metamórficas y plutónicas de edades finipaleozoico-triásicas a cuaternarias. En el archipiélago alternan los amplios domos de hielo de las islas bajas con montañas recubiertas por glaciares de pared y de valle que alcanzan el mar o sus proximidades. En las zonas bajas se sitúan las zonas libres de hielo, que representan el 10% de su extensión. Estos sectores se caracterizan por la presencia de amplias plataformas de erosión marina escalonadas entre el nivel del mar y los 250 m de altitud (John y Sudgen, 1971; Barsch y Maüsbacher, 1986; López-Martínez et al. 1992, 1996), con relieves de resistencia que confieren energía a los cabos y penínsulas, y no superan los 400 m s.n.m.

2. LAS CONDICIONES AMBIENTALES: EL CLIMA Y LOS GLACIARES

La ubicación del archipiélago determina unas condiciones sinópticas singulares para el conjunto de la región antártica. A medida que las masas de aire frías y secas procedentes de la Antártida continental se desplazan hacia la periferia, se inestabilizan y conectan con masas de aire del Pacífico (Tahití, Australia), más cálidas y húmedas. El cinturón subpolar de bajas presiones genera borrascas con desplazamientos dominantes hacia el este, rolando hacia el sureste al atravesar el paso de Drake. El desplazamiento del cinturón fluctúa hacia el norte y el sur entre los 50º y 70º de latitud Sur, pero el mayor número de ciclogénesis se concentra entre los 55º y los 65º (King y Turner, 1997), localización del archipiélago. En este cinturón es común la presencia de familias de ciclones que implican dos tipos de tiempo, la ciclogé-

nesis del oeste, con frentes procedentes del noroeste —del Drake— y del suroeste —de la península Antártica—, y anticiclones de bloqueo ubicados al sur de Las Malvinas, que detienen la ciclogénesis y favorecen la llegada de masas de aire del sur y suroeste, más secas y frías.

El régimen de temperaturas del archipiélago se caracteriza por la variabilidad interanual e interdiaria en todas las estaciones, y una amplitud térmica entre 8° y 10°C (Figura 2). Las estaciones más próximas al mar presentan temperaturas medias anuales por encima de los -2°C, mientras aquellas situadas por encima de los 10 m s.n.m. registran temperaturas medias anuales por debajo de -2°C. La mayor parte de las zonas libres de hielo se localizan en la isoterma -2°C, con sólo unos pocos espacios entre las isotermas de -1°C y -2° C (cuadro 1). Las temperaturas medias estivales (diciembre a marzo) están por encima de los 0°C y alcanzan el máximo a finales de enero y principios de febrero, con medias en torno a los 0,6°/1°C (Simonov, 1977; Bello, 1996). Estas temperaturas permiten la fusión del manto nival, la presencia de ciclos de hielo-deshielo y la existencia de una capa activa en el suelo. Los registros de ciclos de hielo-deshielo son muy variables, con 120 días de media anual (Qingsong, 1989; Blümel y Eitel, 1986), pero amplias variabilidades entre años con más de 120 ciclos sólo en el verano o ausencia de los mismos en las playas bajas (Hall, 1992, 1993; Serrano et al. 1996), con una variabilidad de la probabilidad media de ocurrencia de temperaturas bajo cero entre 30% y el 5% (Aguilar y Brunet, 1997). Los valores extremos oscilan entre 2°C para las medias máximas, y -8°C para las medias mínimas invernales, y las máximas absolutas se ubican en los 8°/10° C y las mínimas en torno a -27° C (Schwerdtfeger, 1970; Simonov, 1977; Bañón, 1992; Rakusa-Suszczewski, 1993; Bello et al. 1996). La amplitud térmica diaria es muy reducida, con un promedio estival de 1,8°C en la isla Livingston (Bañón, 1992; Aguilar, 1995).

Cuadro 1
DATOS CLIMÁTICOS DE LAS ISLAS SHETLAND DEL SUR

Localización	Tª media Anual (°C)	Pp. media anual (mm)	Pp. media estival (mm)	Altitud (m s.n.m)	Referencia
DECEPCIÓN	-2,8	398	171	4	Schwerdtfeger, 1970
COLLINS (Fildes, R.J.)	-2,5	476	173	17,2	Bello et al. 1992
BELLINHAUSEN (Fildes, R.J.)	-2	773	193	6	Simonov, 1977
MARCH (Fildes, R.J.)	-2,7	460	—	6	Blümel y Eitel, 1989
PRATS (Greenwich)	-2,4	—	—	—	Rodríguez y Llasat, 1994
ARTOWSKI (Rey Jorge)	-1,8	510	137	—	Rakusa-Suszczewski, 1993
JUAN CARLOS I (L)	-1,5	—	107	13	Bañón, 1992, 2001

R.J., isla Rey Jorge. L, isla Livingston.

Los registros de precipitación también son muy variables, con valores medios en Fildes entre 476 y 773 mm. En cualquier caso, la disponibilidad de las precipitaciones estivales supera los 100 mm y la humedad relativa media, homogénea y constante para todo el año, es de 80-90% año (Schwerdtfeger, 1970, Simonov, 1977, Rakusa-Suszczewski, 1993, Bello et al. 1996) (cuadro 1).

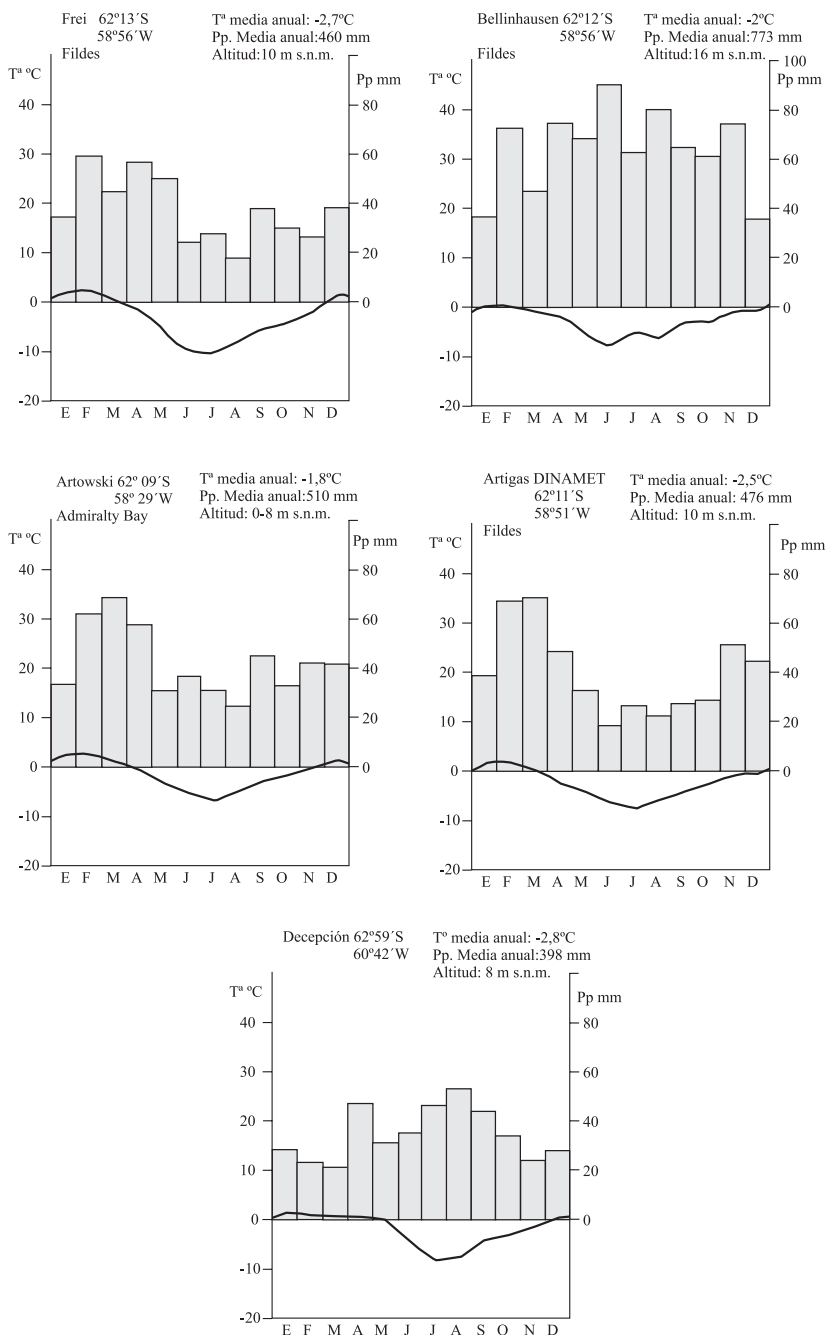


Figura 2. Climodiagramas de varias estaciones de las islas Shetland del Sur, situadas en las islas rey Jorge (península Fildes y bahía Almirantazgo) y Decepción.

En las zonas costeras libres de hielo, entre los domos glaciares y el mar, son significativos los vientos catabáticos locales, aunque sólo en periodos estables, pues las situaciones sinópticas ciclónicas son más capaces que los vientos catabáticos. En verano son poco significativos, pues la temperatura del mar deshelado ocasiona una brisa marina que se opone a unos vientos catabáticos debilitados por el calentamiento de la radiación solar estival, pero en invierno la menor temperatura del mar, el congelamiento en las bahías y ensenadas del archipiélago, y el descenso de la radiación solar, con breves horas diurnas y fuerte nubosidad, genera vientos catabáticos más intensos ((Bañón, 1992; Bello, 1996; King y Turner, 1997).

Las condiciones climáticas sitúan a las islas Shetland del Sur en un sistema morfoclimático frío y húmedo (figura 2), glaciar por encima de los 200-300 metros s.n.m y periglaciar, de carácter crionival en las porciones inferiores. Se caracteriza por las temperaturas medias anuales próximas a los -2° C en la línea de costa, una elevada disponibilidad hídrica estival, tanto en el suelo como en la atmósfera, y frecuentes ciclos de hielo-deshielo. Todo ello posibilita un medio muy favorable para el desarrollo de glaciares y, en las zonas recientemente deglaciadas, de procesos periglaciares, permafrost y una capa activa estival, con formaciones superficiales frecuentemente saturadas.

El 90% de las islas Shetland del Sur, más de 4.200 km², están ocupadas por glaciares que se distribuyen desde el nivel del mar hasta las cumbres (Figura 3). La costa es predominantemente glaciar y el interior de las islas, totalmente glaciado, presenta un espesor máximo de hielo de 400 metros en la isla Livingston. En el archipiélago hay una amplia variedad de glaciares (Martínez de Pisón et al., 1992) que hemos sintetizado en tres tipos básicos: domos coalescentes, domos simples y glaciares de montaña. En las islas mayores o más complejas (Livingston, Greenwich, Rey Jorge) los domos coalescentes ocupan las zonas centrales de las islas y descienden mediante lenguas de desbordamiento sobre la costa (figura 3). Las islas más pequeñas y las penínsulas individualizadas de Rey Jorge y Livingston están ocupadas en su práctica totalidad por domos simples (Snow, Low, Robert, Nelson, Hurd). Los glaciares de montaña ocupan la isla Smith y el Friesland (isla Livingston), donde existen glaciares de valle con lenguas de decenas de kilómetros de longitud que superan los cinco de anchura. En altura se ubican glaciares de pared, en las zonas culminantes hongos de hielo y en las zonas montañosas de menor altitud, glaciares de circo, restos de glaciares mayores hoy alojados en sus cabeceras (penínsulas Keller, Hurd, Byers).

Las zonas libres de hielo de las islas Shetland del Sur han estado ocupadas por glaciares hasta épocas muy recientes y se ha podido reconstruir la evolución glaciar y paleoclimática en detalle (ver Serrano, 2000a, pp. 159-162). Las glaciaciones más antiguas se remontan al Eoceno inferior y el Plioceno (Clapperton, 1990; Birkenmaier, 1992; Dingle y Lavelle, 1998) y durante el último máximo glaciar, entre 87.000 y 15.000 años B.P., los glaciares ocupan toda la superficie de las islas mediante domos coalescentes que alcanzaban una altitud media de 590 metros, de la que sobresaldrían las cumbres más elevadas (Sudgen y Clapperton, 1977). Se suceden retrocesos glaciares y avances menores de los domos locales, con un retroceso rápido que culmina con la deglaciación de Fildes y Byers entre 6.000 y 4.000 años B.P. y un retroceso paulatino producido desde 1.500 años B.P. interrumpido por la Pequeña Edad del Hielo (Cuadro 2). Esta pulsación glaciar deposita morrenas frontales y laterofrontales que reposan sobre los niveles más bajos de playas y genera cordones de bloques, inversiones de bermas y playas de alta energía ligados a los cambios morfodinámicos glaciares.

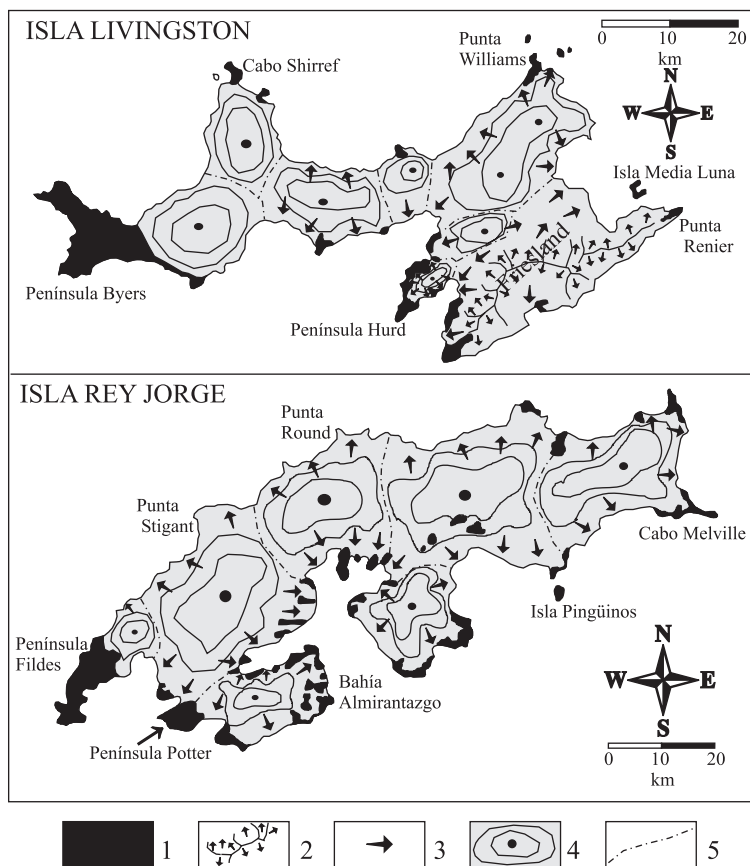


Figura 3. Los glaciares de la isla Livingston y Rey Jorge. 1, áreas libres de hielo. 2, glaciares alpinos. 3, dirección de flujo glaciar. 4, glaciares de domo. 5, divisorias glaciares.

Desde hace 200 años B.P., el último retroceso glaciar ha permitido la desconexión de los frentes de hielo y sus morrenas más recientes en todo el archipiélago y desde finales de los años cincuenta hasta hoy se ha observado una aceleración de retroceso glaciar en las zonas frontales de los glaciares y un ascenso de la línea de equilibrio glaciar (Calvet et al 1992; Braun y Gossmann, 2002). En la actualidad el límite de equilibrio glaciar del archipiélago varía entre 100 y 370 metros, con variaciones locales incluso en cada domo, como se ha puesto de relieve en el Glaciar Johnson, donde varía la línea de equilibrio glaciar entre 150 y 250 m dependiendo de los sectores (Furdada et al. 1999). Teniendo en cuenta los registros previos (Orheim y Govorukha, 1982; Braun y Gross, 2002) y nuestras observaciones de campo, se puede establecer que la altitud de la línea de equilibrio glaciar se sitúa en torno a los 175 m s.n.m, pudiendo encontrarse más bajo en los glaciares de valle y de circo de las zonas de montaña.

Cuadro 2
EVOLUCIÓN GLACIAR DE LAS ISLAS SHETLAND DEL SUR

Edad B.P.	Dinámica glaciár	
87.000-15.000	Último Máximo Glaciár	Domos coalescentes
35.000-15.000	Retrocesos y avances	Domos locales
14.000	Retroceso	Deglaciación Estrecho de Bransfield
11.000	Avance	Pulsación fría, avance de domos locales
8.000	Avance	Avance domos locales Byers, Fildes
6.000-4.000	Retroceso	Deglaciación rápida: desaparición de domos en Fildes y Byers. Playas de alta energía: tómbolos y flechas.
4.000-1.500	Equilibrio	Estabilización Óptimo Climático
1.500	Retroceso	Deglaciación paulatina
800-500	Pulsación menor	Avance Domo Rotch (Livingston)
360-200	Pequeña Edad del Hielo	Avance menor Ocupación de playas holocenas
200	Retroceso glaciár	Desconexión de frentes glaciares y morenas Desaparición de glaciares.

Síntesis a partir de Clapperton y Sudgen, 1988; Mausbacher et al. 1989; Bjork et al. 1991b, 1996; Martínez de Pisón et al. 1996; Arche et al., 1996; Serrano y López, 1997a, 1997b.

3. LAS FORMAS Y LOS PROCESOS MORFOGENÉTICOS

La escasez de terrenos emergidos libres de hielo durante la mayor parte del Pleistoceno implica un modelado periglaciár reciente, de edad Holocena. Las primeras huellas periglaciares son coetáneas con el proceso de deglaciación de las zonas libres de hielo, iniciado a mediados del Holoceno, entre 8.000 y 6.000 años B.P.

Hace 6.000 años B.P. se inicia una intensa actividad periglaciár centrada en los bordes glaciares y en las plataformas de 20 metros, zonas de permafrost continuo con desarrollo de suelos ordenados. Al tiempo, en las zonas montañosas (Keller, Hurd) se desarrollan procesos gelifluidales intensos y glaciares rocosos. Hacia los 4.000 años B.P., se inician intensos procesos periglaciares y se desarrollan amplios campos de suelos ordenados en las plataformas altas en la mayor parte de las actuales tierras libres de hielo. Los sedimentos lacustres de Byers y Fildes señalan la presencia del Óptimo Climático mediante un incremento de la productividad que denota un periodo menos frío y húmedo entre 4.000-2.000 años B.P., que condicionó el tránsito del dominio glaciár hacia el periglaciár en las zonas libres de hielo, con génesis de glaciares rocosos e intensificación de los procesos de geliflujión. Al Óptimo Climático le continúa un periodo frío, de sequedad relativa respecto al periodo anterior, con un pequeño avance del Domo Rotch, entre 800 y 500 años B.P., y continuidad de los procesos periglaciares. La Pequeña Edad del Hielo implica un recrudescimiento periglaciár en las zonas altas que no afecta a los sectores costeros. En este periodo todas las zonas libres de hielo, salvo las porciones de playas holocenas por debajo de 10 metros, estarían ocupadas por permafrost continuo, y con el retroceso de las lenguas glaciares desde finales del siglo XIX se inicia una atenuación de los procesos periglaciares. La brevedad del tiempo transcurrido

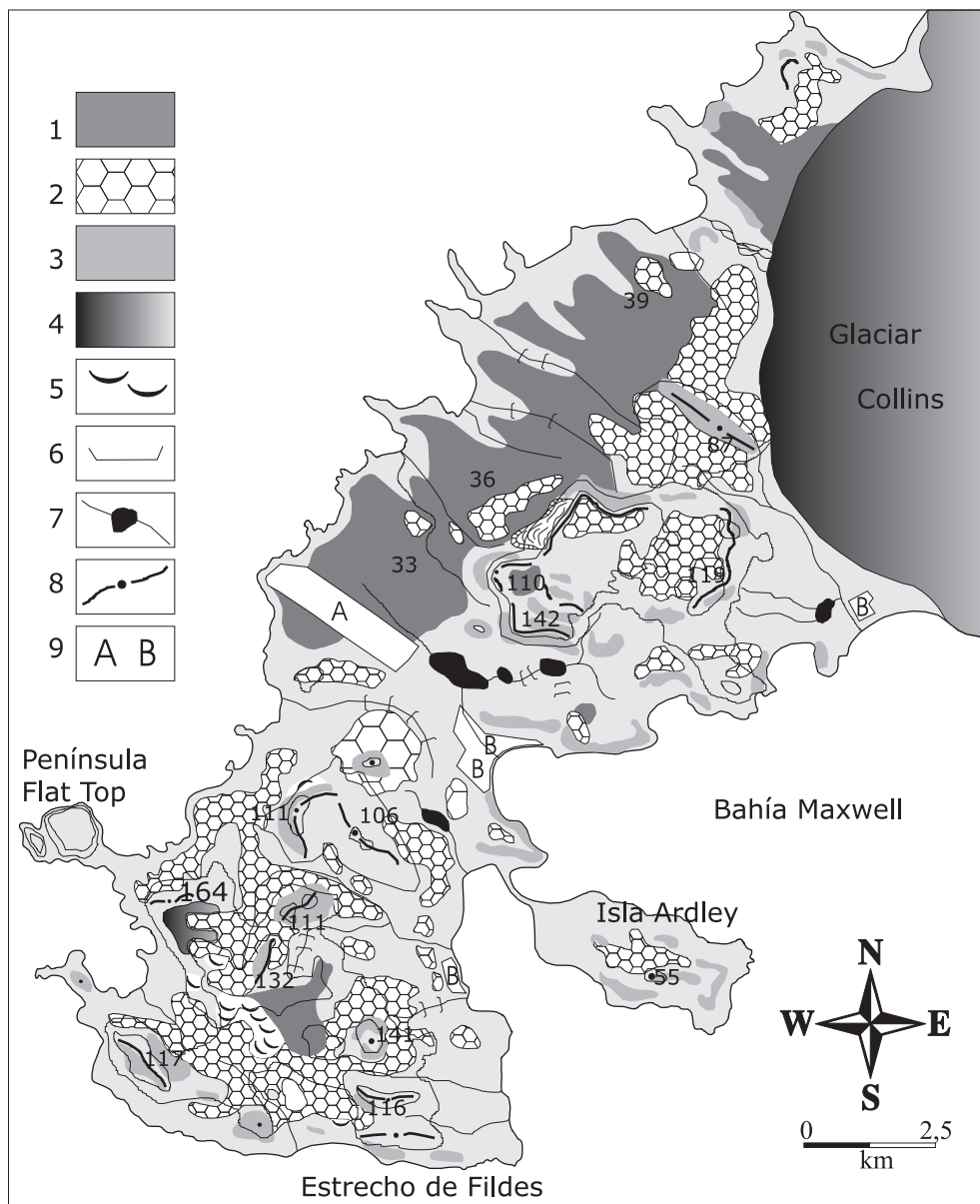


Figura 4. Mapa geomorfológico de la península Fildes, isla rey Jorge (Serrano et al. 2002). 1, mantos de clastos superficiales. 2, suelos ordenados. 3, taludes y conos de derrubios. 4, glaciares. 5, lóbulos de derrubios y dominio gelifluidal. 6, valles de fondo plano. 7, lagos y arroyos. 8, crestas y cordales. 9, bases (B) y aeropuerto (A).

Cuadro 3
PROCESOS Y FORMAS DEL SISTEMA MORFOGENÉTICO PERIGLACIAR
EN LAS ISLAS SHETLAND DEL SUR

SISTEMA	PROCESOS	FORMAS	
		Laderas	Plataformas
Metorización del sustrato	Humectación Salinidad Crioclastia		— Clastos geométricos — Laminaciones, microfiguraciones en lajas — Tors — Terrazas de crioplanación
Gravitacional	Caídas Desprendimientos	— Taludes de derrubios. — Conos de derrubios	
Nival	Nivación	— Nichos de nivación — Enlosado nival — Morrenas de nevero	— Nichos de nivación — Enlosado nival — Valles de fondo plano — Valles disimétricos Hoyos de fusión — Sandur
	Aludes	— Canales — Conos mixtos	
	Soliflucción	— Bloques aradores — Solifluction sheets — Solifluction lobes	
Permafrost y capa activa	Geliflucción Levantamientos por helada Crioreptación	— Derrubios afectados por flujo — Glaciares rocosos — Suelos estriados Suelos estriados gruesos Suelos estriados finos — Lóbulos de derrubios — Lóbulos de geliflucción — Corrientes de bloques	
	Flujos de derrubios	— Canales-leveés — Conos digitados	
	Crioturbación		— Suelos ordenados: Círculos de piedras Suelos poligonales: Polígonos de piedras Polígonos de tierra — Hoyos de fusión — Mantos de clastos superficiales — Terrazas de crioplanación — Láminas de geliflucción

impide el desarrollo de formas periglaciares complejas en las zonas recientemente deglaciadas, pero sin embargo estas sí aparecen en las zonas más altas. Se han localizado suelos ordenados en Punta Hespérides, en ambientes deglaciados con posterioridad a 1956, y en la península Potter intensos procesos de segregación en zonas deglaciadas con posterioridad a la Pequeña Edad del Hielo.

La diversidad de formas y procesos periglaciares (cuadro 3) constituye una característica esencial del medio frío y húmedo, propio de la Antártida marítima, que contrasta con los medios periglaciares de la Antártida continental. El medio periglaciario húmedo de las islas Shetland del Sur es muy activo, con procesos intensos a partir de 10 m de altitud que encuentran su máxima expresión en las laderas y plataformas entre 30 y 100 m a.s.l. La riqueza y diversidad de formas y procesos periglaciares se debe a la presencia del permafrost, la nivación, la topografía (orientación, pendientes, etc.), las litologías, los condicionantes ambientales (principalmente la temperatura media anual del aire próxima a los -2°C al nivel del mar), la elevada humedad atmosférica y la disponibilidad hídrica. Dominan los procesos gravitacionales, gelifluidales, nivales y de crioturbación, que generan formas (figura 4) asociadas a las laderas y a plataformas (Serrano et al. 1996, 2002; Serrano y López, 1998, 2000).

Las formas de origen periglaciario ocupan un 24% de la extensión de los terrenos libres de hielo de las islas Shetland del Sur (el 3% de su superficie total). Las formas más frecuentes en el conjunto de las islas son los suelos ordenados (el 47,4% del total de formas periglaciares), incluyendo en este término polígonos, suelos estriados y círculos de piedras, en todas sus variedades, distribuidos entre los 10 y los 100 metros. Los mantos de clastos superficiales, que siguen en importancia a los suelos ordenados, se localizan entre los 20 y 50 m, en relación con las plataformas, rellanos y laderas de escasa pendiente, tanto en ambientes secos como muy húmedos (Miotke, 1984, Serrano et al., 1996).

En el archipiélago se observa una organización altitudinal de las formas y los procesos periglaciares, con variaciones altitudinales menores, del rango de 20 m. El escalonamiento de los procesos periglaciares (Cuadro 4) denota un dominio de los suelos ordenados y formas evolucionadas asociadas a la capa activa en las cotas más altas, y un dominio de los procesos nivales en las más bajas (Figura 4). La meteorización, la crioclastia y los procesos gravitacionales son dominantes hasta los 15-20 metros; la gravedad, la geliflución, los suelos ordenados y la acumulación de finos por lavado en las plataformas, hasta los 50 metros; y los suelos ordenados y procesos gelifluidales por encima de 50 m (Serrano y López-Martínez, 1998).

Cuadro 4
PORCENTAJE DE OCUPACIÓN DE LAS FORMAS PERIGLACIARIAS EN ALTITUD
(SERRANO Y LÓPEZ-MARTÍNEZ, 1998)

	0-20	20-50	50-100	>100
A %	1	3	9	10
B %	6	13	38	43

- A. Porcentaje de ocupación de las formas periglaciares sobre el total de tierras emergidas libres de hielo en cada rango altitudinal.
- B. Porcentaje de ocupación de las formas periglaciares sobre el total de formas periglaciares existentes en las zonas estudiadas.

4. EL PERMAFROST

La localización de la isoterma anual de -2°C por encima de los 10 m s.n.m. implica unas condiciones óptimas para el desarrollo del permafrost continuo y discontinuo. Los suelos ordenados, glaciares rocosos y derrubios afectados por flujo señalan la existencia de un activo medio periglacial con permafrost continuo y discontinuo, que se extiende desde las playas holocenas hasta el ámbito glacial. El permafrost ocupa el 17% de las zonas libres de hielo, y se asocian a su presencia el 72% de las formas periglaciares existentes en el archipiélago, si bien, en la actualidad, no existen unas condiciones idóneas para su formación en altitudes por debajo de los diez metros. Por encima de los 50 metros, todas las formas, los procesos y la dinámica natural (física, química y biológica) están condicionados por la existencia del permafrost (Serrano et al. 2002).

Las formas periglaciares, los frentes de los glaciares rocosos y los sondeos mecánicos y eléctricos (Serrano et al. 1996, 2002; Bergamín et al. 1997, Serrano y López Martínez, 1998), permiten establecer la distribución altitudinal del permafrost en las Islas Shetland del Sur (Cuadro 5). En los niveles más bajos de las playas holocenas, por debajo de 10 m, el permafrost es esporádico, y en la Isla Decepción, en las cotas más bajas, ha mostrado un bajo grado de humedad, con hielo epigenético y agradacional y una estructura térmica uniforme, próxima al punto de helada, con presencia de agua líquida. Es un permafrost inestable y muy sensible a los cambios ambientales (Serrano et al., 2002b). Entre los 10-15 m de altitud y aproximadamente 30 m s.n.m., domina el «permafrost discontinuo». Constituye una zona de transición, de modo que en las cotas inferiores el permafrost se aloja en localizaciones preferenciales (orientación, umbría, sobreacumulaciones nivales), mientras con la altitud pasa a ser dominante y son las zonas libres de permafrost las que se ajustan a los condicionantes locales. Por encima de los 30 metros es el dominio del «permafrost continuo».

Cuadro 5
DISTRIBUCIÓN ALTITUDINAL DEL PERMAFROST EN LAS ISLAS SHETLAND DEL SUR
(SERRANO ET AL. 2002)

TIPO DE PERMAFROST	ALTITUDES	ESTADO DEL PERMAFROST (hipotético)
ESPORÁDICO DISCONTINUO CONTINUO	0-20 m 10/15- 30/35 m 25/30 m>30 m	Inestabilidad Equilibrio inestable Equilibrio, con huellas de inestabilidad o fusión parcial, termokarst, flujos de derrubios (penínsulas Byers, Hurd, Robert)

Junto a la presencia de permafrost, la capa activa y su dinámica térmica son determinantes en los procesos morfodinámicos. Las influencias térmicas atmosféricas alcanzan en el suelo entre 50-60 y 250 cm de profundidad (Ramos et al. 2002; Serrano et al., 2002b), y en función de la presencia o ausencia de permafrost y el espesor de la capa activa, varían el régimen térmico del suelo y los procesos de crioturbación. El espesor de la capa activa varía entre 25-30 cm en las plataformas y de 1 a 3 m en las laderas y glaciares rocosos, no tanto en rela-

ción con los condicionantes climáticos, como, prioritariamente, con los procesos geomorfológicos y los aportes de materiales (Serrano et al. 2002).

5. LA VEGETACIÓN Y LOS SUELOS

Las zonas libres de hielo de la Antártida marítima presentan una escasa cobertura vegetal que ha inducido a clasificarlas como un «desierto helado» o «polar» (Greene, 1964, en Sudgen, 1982 p. 111). Sin embargo, la presencia de abundantes precipitaciones, la disponibilidad hídrica estival con una porción considerable de zonas saturadas o lacustres, la elevada humedad atmosférica y la radiación, con ritmos propios de latitudes por encima del círculo polar, implica que el frío es el factor limitante exclusivo. A diferencia de las zonas deglaciadas del interior del continente (Dry Valleys), donde al factor térmico se suma la absoluta sequedad atmosférica y la ausencia de agua líquida, la Antártida marítima muestra una mayor complejidad que se concreta en la presencia de hábitats y formaciones vegetales más variadas, con múltiples microambientes edáficos y vegetales, a menudo de sólo unos pocos metros o centímetros cuadrados (Blümel y Eitel, 1989; Beyer y Bölter, 2002), que ha sido clasificado como «semidesierto polar» (Rakusa-Suszczewski, 1983; Law, 1984). Son las condiciones propias de la «tundra abierta antártica», en un ambiente climático marítimo frío, formación característica de los medios deglaciados de las islas Shetland del Sur.

5.1. Los suelos

Las condiciones climáticas y el sustrato del archipiélago condicionan la existencia de suelos, que dirigen la colonización vegetal. Los principales procesos edafogenéticos son la meteorización crioclastica y la bioturbación (Blume et al. 2002) seguidos de la presencia de plantas vasculares, criptógamas y briófitos que favorecen su desarrollo, aunque con una influencia muy limitada (Capeen y Schroeter, 2002), de modo que lo más frecuente es que la morfogénesis no pase de las etapas iniciales. Everett (1977) señala tres tipos básicos de suelos en función del drenaje, con desarrollo de auténticos suelos en zonas bien drenadas. En combinación con el drenaje, las características estructurales y texturales del sustrato, la intensidad de la meteorización, la crioturbación, la soliflucción y la cobertura vegetal (Blume et al. 2002) determinan la evolución del suelo. El drenaje de los suelos está estrechamente relacionado con el permafrost y la capa activa, de modo que la presencia de hielo, junto a las características anteriores, conforman una gran variedad de suelos, con cambios y extensiones métricas (Everett, 1977; Walton, 1984; Blümel y Eitel, 1989; Blume et al. 2002). Se pueden establecer tres grandes grupos (Cuadro 6).

- Suelos pardos antárticos: constituyen un suelo zonal, de desarrollo maduro (Walton, 1984; Barsch et al. 1985; Blümel y Eitel, 1989). Derivado de la meteorización física y química, en esta última tienen una vital importancia los líquenes, la percolación de agua líquida y la producción de sedimentos finos, que son los factores esenciales en su formación. Se generan sobre sustrato volcánico con buenas condiciones de drenaje, donde están presentes la crioturbación y la colonización líquénica, y se localiza únicamente en zonas bien drenadas de laderas suaves o rellanos, colonizados por líquenes y musgos.

- Criosoles: están en estrecha relación con el permafrost y son suelos con un horizonte de finos a más de 25 cm de profundidad, bajo una cubierta de clastos y matriz de grano grueso. En su génesis dominan los procesos de crioturbación y no existe horizonte húmico. El espesor y evolución estival de la capa activa, determinan su «maduración».
- Suelos ornitogénicos: se asocian a las colonias de aves que ocupan las zonas deglaciadas del archipiélago. Los aportes de materia mineral, como cantos y finos para elaborar los nidos, y la acumulación de excrementos, plumas, fragmentos de las cáscaras de huevos y restos de animales, en torno a colonias de grandes dimensiones, generan formaciones ricas en materia orgánica y minerales, con fuertes aportes de fosfatos, muy ácidas, abundantes en las pingüíneas (*Pygoscelis papua* y *Pygoscelis antártica* predominantemente), cormoraneras (*Phalacrocorax atriceps branfieldensis*), nidificaciones de petrel (*Macronectes giganteus*, *Thalassoica antarctica* entre otras), charrán (*Stena vittata* y *Stena paradisea*), págalo (*Catharacta maccormicki* y *Catharacta skua*), etc, sobre todo cerca de las playas, pero también en las plataformas, acantilados y base de los mismos. La riqueza orgánica permite su colonización por numerosas especies vegetales.

Cuadro 6
LOS SUELOS EN LA ISLAS SHETLAND DEL SUR

TIPO DE SUELO	CARACTERÍSTICAS	VEGETACIÓN
Sin drenaje (ahúmicos)	suelos minerales, sin hierro libre	Musgos y algas.
Pobremente drenados (ahúmicos)	En laderas estables, parcialmente saturados, afectados por gelifluxión y crioturbación, son menos ácidos que los siguientes.	Sin vegetación o con musgos y líquenes.
Pardos antárticos (húmicos)	Sobre sustratos volcánicos. Horizonte húmico con un contenido en materia orgánica de 4,5%. Suelos ácidos. Eluviación de arcillas.	Tundra antártica de fanerógamas
Bien drenados		
Criosoles (ahúmicos)	Sobre sustratos metamórficos y graníticos. Suelos grises a amarillentos, con horizonte de finos.	Líquenes y musgos.
Ornitogénicos (húmicos)	Ricos en materia orgánica y ácidos.	Diversidad de especies.

Síntesis de Everett, 1976; Walton, 1984; Blümel y Eitel, 1989; Blume et al. 2002.

5.2. La vegetación:

La luminosidad, incidencia de radiación solar, la temperatura, el viento, las precipitaciones, la disponibilidad hídrica, los suelos, la dinámica geomorfológica, la fauna y la proximidad del mar son los principales factores que intervienen en la distribución de las formaciones vegetales antárticas. Estas componen un mosaico de unidades de pequeña superficie que limitan entre sí o con zonas carentes de vegetación, formando una tundra abierta, donde las formaciones vegetales se localizan dispersas entre amplias zonas no vegetadas.

La luminosidad, factor muy importante para la criovegetación, está en relación con la nubosidad, muy elevada en el archipiélago, y con los ritmos de radiación, diurno-nocturnos durante todo el año, dada su posición por encima del Círculo Polar Antártico. Ambos factores se complementan para dar amplios periodos con radiación y luminosidad.

La temperatura es el principal factor limitante, pues sólo se registran tres meses con temperaturas medias por encima de los 0°C y ninguno por encima de 2,5°C, lo que constituye un periodo vegetativo muy breve, que requiere largos periodos latentes, favorecidos por el poder aislante de la nieve, pero limitados por la presencia del permafrost. Bajo la cobertura nival no se registran los cambios de temperatura estival y durante la primavera y el verano la temperatura en los neveros y bajo ellos ronda los 0,6°C, de modo que favorece la presencia de plantas en estado latente, en espera de la fusión del manto nival. Sin embargo, cuando existe permafrost, su influencia térmica enfría la superficie del suelo y la zona inferior del manto nival, de modo que llega a impedir el mantenimiento de las especies vegetales. Sólo las más resistentes al frío, los líquenes, son capaces de mantener la fotosíntesis a temperaturas por debajo del punto de helada.

Las precipitaciones son un elemento fundamental en la distribución de las formaciones vegetales, aunque condicionada por el drenaje y la disponibilidad hídrica. Las precipitaciones de las Islas Shetland del Sur son suficientes (400-800 mm) y el régimen anual, oceánico, con dominio de la nieve en invierno y de la lluvia en verano, no supone limitaciones para el desarrollo de la vegetación.

El viento condiciona la temperatura local y la humedad, por lo que determina el régimen térmico y la disponibilidad hídrica en las zonas venteadas. Como la presencia de viento constante condiciona la evaporación y mayor o menor sequedad, constituye, junto a la acción abrasiva y el transporte de finos, en función de su intensidad y constancia, un factor limitante también de primer orden. Por otra parte, colabora eficazmente en el transporte y propagación de las especies vegetales, y por tanto en la colonización de las zonas libres de hielo.

La dinámica geomorfológica condiciona la distribución de la vegetación, pues el viento, como ya hemos indicado, los movimientos en masa, la crioturbação, la arroyada difusa y los procesos periglaciares constituyen en unas ocasiones factores limitantes, en otras perturbaciones en la distribución de las formaciones. La existencia de permafrost y de dinámicas periglaciares superficiales (crioclastia, derrubios, flujos, ordenación) o procesos nivales —la propia permanencia estival de neveros— impide el desarrollo de líquenes, musgos o fanerógamas. Sin embargo la existencia de lóbulos, con incremento de finos y dinámica muy lenta, o suelos ordenados inactivos, con acumulaciones de finos en su centro, favorecen el desarrollo de formaciones edáficas y la colonización de musgos en un primer estadio de colonización.

La disponibilidad hídrica depende de las precipitaciones, la temperatura, la evaporación, las condiciones geológicas y las formaciones vegetales. En la Antártida marítima es frecuente la elevada humedad atmosférica y baja evapotranspiración, y se concentra sobre todo durante el verano, con la fusión del manto nival y de la capa activa, y la mayor parte de las precipitaciones líquidas. En este momento la elevada circulación de agua en el subsuelo, con limitaciones para la infiltración por la existencia de permafrost, ocasiona zonas saturadas en rellanos, muy frecuentes, y laderas mal drenadas, lugares donde también se producen limitaciones al desarrollo de la vegetación.

Las colonias de aves cambian la composición del sustrato y varían la composición florística. La producción de guano genera nutrientes, que atraen a una amplia diversidad de especies, y la escorrentía y el agua las distribuyen por el entorno. De este modo, los niveles de nutrientes en el suelo de las zonas altas y los cantiles, no son un factor limitante para el crecimiento y distribución de las plantas, pues son sustituidos y enriquecidos por los aportes de las aves. Por último, el mar es una fuente de nutrientes complementaria (Na, K y Mg) para las zonas alcanzadas por las aguas marinas mediante el oleaje y la dispersión por el viento, además de aportar una alta concentración de sales que limitan el crecimiento a briófitos.

La distribución de las formaciones vegetales está condicionada prioritariamente por la disponibilidad hídrica y las características edáficas, en las que tiene una vital importancia el drenaje y los aportes orgánicos procedentes de aves y mamíferos. En ellas están representadas dos plantas vasculares, *Colobanthus quitensis* y *Deschampsia antarctica*; más de 60 especies de musgos (siete de ellas hepáticas) de las 106 existentes en la Antártica; 11 especies hepáticas; más de 190 especies de líquenes; 54 hongos y más de 400 especies de algas, dos de ellas terrestres (Lindsay, 1971; Pickard y Seppelt, 1984; Olech, 2002). Estas especies se combinan en dos tipos de formaciones vegetales básicas, la tundra criptógama antártica, consti-

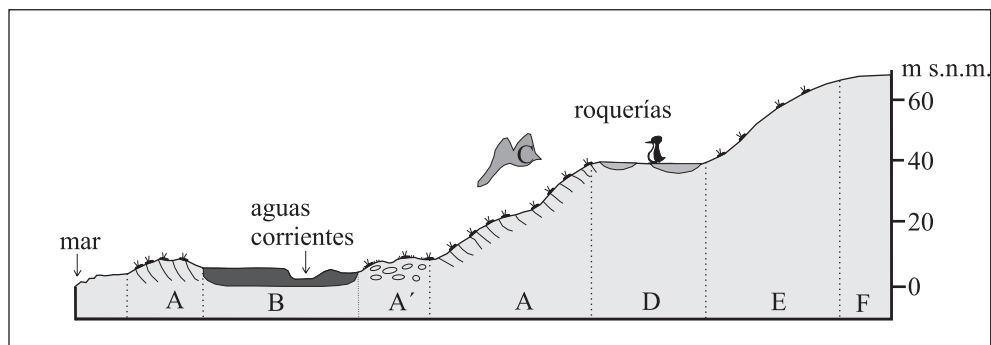


Figura 5. Organización de la vegetación en las zonas deglaciadas (Según Olech, en Rakusa-Suszczewski, 1993, modificado). A. Playas, escarpes y plataformas rocosas colonizadas por *Deschampsia antarctica* y *Colobanthus quitensis*. B. Zonas encharcadas con *Calliergon sarmento* y *Calliergidium austrostramineum*. C. Escarpes y paleoescollos colonizados por *Caloplaca regalis* y *Xanthoria elegans*. D. Rellanos y plataformas con colonias de aves, ocupado por *Prasiola crispa* y *Deschampsia antarctica*. E. Taludes y laderas rocosas colonizadas por *Deschampsia antarctica* y *Usnea ssp.* F. Zonas altas, colonizadas por *Usnea antarctica*.

tuida por una decena de subformaciones, y la tundra fanerógama antártica, representada por las dos únicas plantas vasculares y la presencia de suelos pardos (Cuadro 7). La vegetación forma un mosaico de plantas que ocupan áreas pequeñas en retazos y configuran una sucesión de formaciones y subformaciones vegetales adaptadas a las condiciones físicas del medio (figura 5).

6. DISTRIBUCIÓN ALTITUDINAL DE PISOS GEOECOLÓGICOS

El medio semidesértico polar y glaciario de las islas Shetland del Sur presenta significativos cambios ambientales en altitud y hacia el interior de islas y penínsulas libres de hielo, y se organiza en estrechas bandas altitudinales dirigidas por la evolución morfogenética reciente, la dinámica periglaciaria, la distribución del permafrost y de las distintas formaciones vegeta-

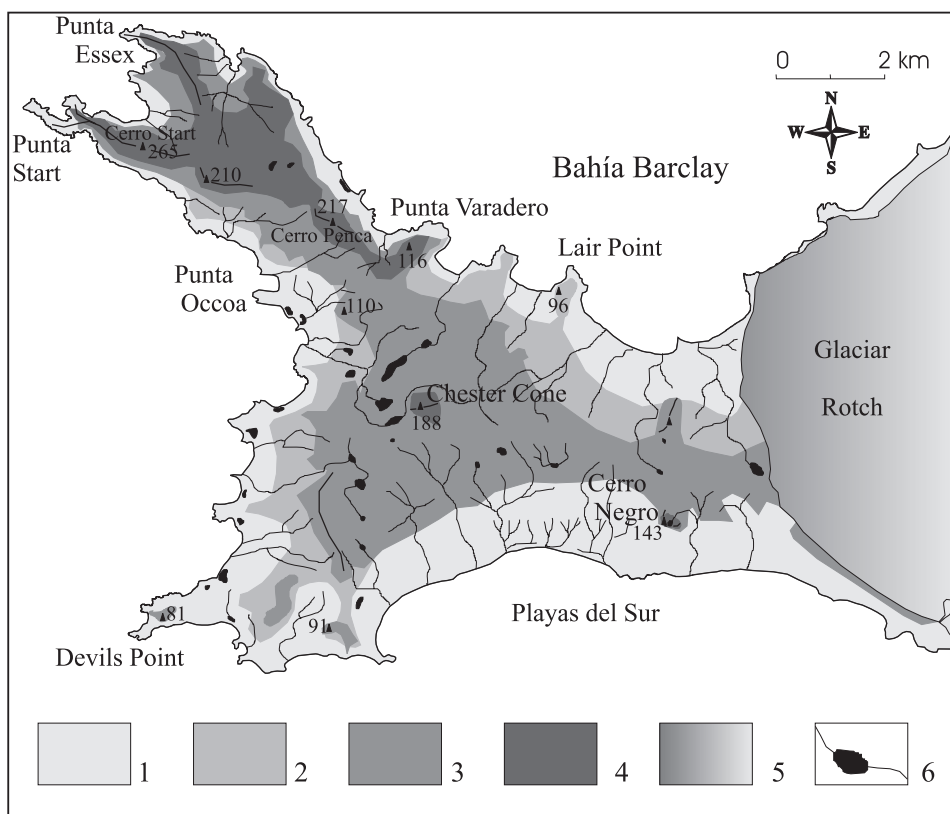


Figura 6. Distribución de los pisos geocológicos en la península Byers (isla Livingston). 1, tundra abierta en playas holocenas y plataformas inferiores. 2, plataformas y laderas intermedias en ambientes de permafrost continuo con tundra abierta de briófitos. 3, desierto polar en ambientes de permafrost continuo y tapiz líquénico. 4, desiertos polares en ambientes de permafrost continuo en altura. 5, glaciares. 6, lagos y arroyos.

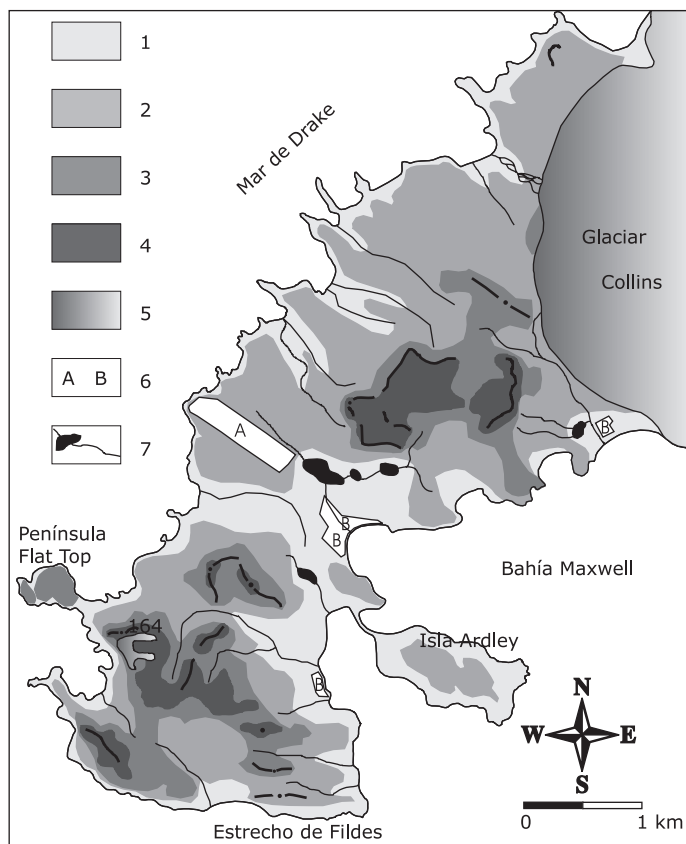


Figura 7. Distribución de los pisos geoeológicos en la península Fildes (isla Rey Jorge). 1, tundra abierta en playas holocenas y plataformas inferiores. 2, plataformas y laderas intermedias en ambientes de permafrost continuo con tundra abierta de briófitos. 3, desierto polar en ambientes de permafrost continuo y tapiz líquénico. 4, desiertos polares en ambientes de permafrost continuo en altura. 5, glaciares. 6, ámbitos fuertemente humanizados, B, bases, A, aeropuerto. 7, lagos y arroyos.

les, en relación con la disponibilidad hídrica, las características del suelo y la influencia de las aves. En razón de lo expuesto en los apartados anteriores, podemos establecer un escalonamiento altitudinal en pisos geoeológicos (figuras 6 y 7) característicos, junto al dominante piso glaciar, del paisaje de la Antártida marítima.

Cuadro 7
FORMACIONES VEGETALES DE LAS ISLAS SHETLAND DEL SUR

Formación vegetal	Subformación	Especies principales	Condiciones ecológicas	Distribución geográfica
Tundra criptogámica antártica	Líquenes fruticosos y musgos almohadillados.	Usnea ssp./ Andreaea ssp. Schistidium apocarpum S. Hialino/ Tortula saxícola. Potia heimii/ Placopsis contortuplicata.	Zonas libres de güano. Nitrófbos	Lejos de la costa zonas altas
	Céspedes musgosos	Chorisodontium aciphillum Plyrichum rellanos amplios	Manantiales y zonas húmedas bien drenadas,	Plataformas holocenas, rellanos.
	Musgos en alfombra	Saniona uncinata Calliergon sam. Calliergidium austrotramineum	Zonas encharcadas y cursos de agua dulce en medios templados	Plataformas más bajas en zonas libres de hielo.
	Musgos acuáticos	Bryum pseudotriutum-Calliergon sarmmentosum. Drenanocadus uncinata	Lagos y charcas de hasta 2 m de prof. Aguas ricas en güano y pobres en algas	Lagunas de las plata formas holocenas, encharcamientos de plataformas medias.
	Líquenes crustáceos: (1) Omitocropófilos (nitrófilos) (2) omitocropófbos (nitrófbos) (3)Halófilos	(1) Xanthoria elegans Haematomma erythromma. Rizoplaca ssp (2) Placopsis contortuplicata. Lecidea ssp. Rhizocarpon geographicum (3) Verrucaria ssp. /caloplaca sublobulata /Xanthoria elegans	(1) Junto a colonias de aves (2) Sin restos animales, acidófilas (3) Salinas, zonas alcanzadas por las olas y vientos marinos.	En sustrato y paredes, sin persistencia de nieve. A todas las altitudes. (3) Zonas costeras, intermareales y lavadas por las olas
	Líquenes musgosos		Parasitan musgos en alfombra	Plataformas bajas costeras
	Miscelánea de criptógamos	Hepáticas, líquenes nitrófilos, Verrucaria ssp	Suelos ornitogénicos, nidos de aves.	Colonias y nidos de aves
	Algas terrestres	Prasiola crispa	Colonias de aves, nitrófilos	Playas y proximidad al mar
	Criófitas: (1) algas de nieve rojas (2) Algas de nieve verdes	(1) Chlamidomonas antarcticus wille (2) Algas y hongos, muy variadas.	Nieve, hielo, clorófitas. Asociadas a la fina película de aguas de fusión.	Superficies de neveros (2) Divisoria hielo.
Tundra fanerógama antártica		Deschampsia antártica (poácea) Collobanthus quitensis (carofilácea)	Laderas y rellanos próximos a playas. Asocoados a fauna de aves y mamíferos.	<100 m de altitud. Plataformas intermedias y bajas donde hay fauna.

Síntesis a partir de Lindsley, 1971; Walton, 1984; Rakusa-Suszczewski, 1993, Pereira y Putzke, 1994; Olech, 2002.

6.1. Tundra abierta en playas holocenas y plataformas inferiores

Representa aproximadamente el 30% de las zonas libres de hielo del archipiélago y configura un espacio muy característico de la Antártida marítima, entre el nivel del mar y los 20-25 metros de altitud. El clima se caracteriza por las temperaturas medias anuales más altas, entre $-1,5^{\circ}\text{C}$ y -3°C , y una temperatura del mes más cálido entre -10°C y 4°C . Aunque existen amplios niveles de playas expuestos al viento, en general son zonas abrigadas que poseen vientos locales moderados.

La morfología está determinada por los niveles de playas levantadas del Holoceno, en sucesiones de bermas escalonadas entre el nivel del mar y los 10-15 metros, en playas predominantemente de gruesos. En las porciones superiores las plataformas de abrasión marina confieren planitud a estos ámbitos, donde la morfología glaciaria está muy poco señalada, y sólo en algunas playas se han depositado morrenas y depósitos morrénicos, casi todos ellos pertenecientes a la Pequeña Edad del Hielo. Las plataformas y playas alternan con los acantilados costeros, muy frecuentes en toda la costa del archipiélago.

Todo el conjunto se inscribe en un medio crionival caracterizado por el dominio de la meteorización, la crioclastia y los procesos gravitacionales, con ausencia de cobertura nival durante la mayor parte del verano, frecuentes ciclos de hielo deshielo, haloclastia, permafrost discontinuo y una transferencia de sedimentos atenuada, dirigida prioritariamente por las aguas de fusión. Las formas y procesos periglaciares ocupan el 19% de la superficie de esta zona y sólo representan el 1% de las formas.

En el sistema morfodinámico periglaciario dominan los procesos gravitacionales (67% de los procesos periglaciares), superando a los porcentajes de cotas superiores. En menor medida, están representados los procesos gelifluidales, seguidos de los mantos de clastos superficiales, mientras los suelos ordenados están muy poco representados (<1%). Las formas periglaciares más representativas son los taludes y conos de derrubios, ligados a los escarpes de las plataformas y a relieves estructurales, muy frecuentes en la Isla Media Luna, la Península Coppermine y la Punta Williams. También se localizan los frentes de los glaciares rocosos, ligados a la existencia de permafrost, que en las islas Livingston y Rey Jorge reposan sobre las playas holocenas. En los dominios periglaciares más extensos, en las penínsulas Byers y Fildes, entre 0 y 20 m se desarrollan tan sólo el 6% y el 5% de las formas periglaciares respectivamente. Sólo esporádicamente, en las Playas del Sur de la Península Byers, en la Isla Media Luna y en la Isla Decepción, existen suelos ordenados por debajo de los 10 m. En la Isla Decepción se ha confirmado la existencia de permafrost a 5 m sobre el nivel del mar, pero el permafrost es esporádico por debajo de los 10-15 metros, y discontinuo por encima, con unas condiciones térmicas muy inestables y una marcada variabilidad de la tabla del permafrost.

En este piso, caracterizado por su proximidad del mar y la abundancia de fauna, aves y mamíferos dependientes del mar para su alimentación, tienen una gran importancia la salinidad y la actividad biológica. Es en esta zona donde se encuentra la más amplia tipología de formaciones vegetales que configura un paisaje vegetal en mosaico. En función de los factores limitantes, como la temperatura media anual y la del mes más cálido, el número de ciclos de hielo-deshielo o la deglaciación reciente con ausencia de suelos, y factores favorables, como las precipitaciones estivales, la fusión del manto nival y la colonización por fauna marina, la vegetación se organiza en geotopos característicos.

- Zonas encharcadas y lagoon: Las zonas con deficientes drenajes están colonizadas por algas terrestres, sobre todo donde hay colonias de aves, siempre cerca del mar, y musgos en alfombra que ocupan amplias extensiones y caracterizan, con sus verdes intensos el paisaje de las playas holocenas vegetadas.
- Rasas bajas, con afloramiento de sustrato y suelos ornitogénicos, en las que están presentes rodales de plantas vasculares (*Deschampsia* antártica) de escaso desarrollo, junto a la presencia de algas terrestres.
- Playas de cantos: Las bermas formadas por cantos redondeados con escasos finos y, por tanto sin desarrollo edáfico, pero con una pronta fusión nival, están colonizadas por líquenes crustáceos, generalmente halófitos (*Caloplaca* ssp., *Xanthoria elegans*) variando hacia *Usnea* ssp., cuando la influencia salina y animal es menor, y con *Verrucaria* cuando existen colonias próximas.
- Bermas holocenas con finos: En las bermas de playas con finos, con presencia de suelos pardos y próximos o en colonias de mamíferos y aves, se desarrolla la tundra fanerógama, caracterizada por las praderas que pueden superar los 10 m² dominados por la *Deschampsia* antártica, con presencia *Colobanthus quitensis* y *Polytrichum alpinum*.
- Plataformas y laderas suaves con disponibilidad hídrica y bien drenadas: Dominan los céspedes musgosos, que llegan a colonizar lóbulos de geliflujión de finos, con espesores de varios centímetros de espesor, y, cuando existe desarrollo edáfico, de la tundra de fanerógamas.
- Cantiles: En los cantiles se alojan líquenes crustáceos halófilos, con musgos briófitos.

Es en estos ámbitos donde se producen la mayor parte de las intromisiones y agresiones humanas, centradas en la actividad científica y política (Serrano, 2000b, 2001) y el turismo (Hall y Johnston, 1995; Serrano 2001, 2002), que se extienden al piso superior inmediato. Estas se concentran prioritariamente en la colonización vegetal y el sistema morfodinámico, afectando, en particular en la península Fildes, a extensas zonas.

6.2. Plataformas y laderas intermedias en ambientes de permafrost continuo con tundra abierta de briófitos

Este rango altitudinal comprende el 21% de las zonas libres de hielo y se localiza aproximadamente entre los 20/25 y los 50 m de altitud. En las plataformas de abrasión marina colgadas por encima de los 20-25 metros se produce un significativo empobrecimiento vegetal, con un recubrimiento mucho menor que en las plataformas inferiores, proporcional al incremento de los procesos periglaciares y el alejamiento de la influencia marina y de la fauna. Las condiciones ambientales son más extremas, las temperaturas medias anuales, siempre por debajo de los -2,5°C, implican periodos vegetativos extremadamente cortos, la permanencia de la cobertura nival durante gran parte del año, condiciones ambientales propicias para el permafrost discontinuo y continuo y una intensa influencia térmica del subsuelo.

Las formas dominantes son las plataformas de abrasión marina, caracterizadas por los afloramientos del sustrato fuertemente meteorizado, con profusión de finos. Estas plataformas alternan con laderas, en los escarpes de las plataformas y en las zonas montuosas, en ocasiones remodeladas por la acción glaciaria en cubetas de sobreexcavación, umbrales y en

menor medida, artesas glaciares. La variedad de formas, de origen marino y glaciar, implica una amplia diversidad topográfica. En la actualidad dominan los procesos glaciares y periglaciares, ordenación y acumulaciones de finos por meteorización y lavado, crioturbación y procesos nivales. Entre las formas periglaciares, que representan la mayor extensión en los pisos del archipiélago (32%), dominan los suelos ordenados y los mantos de clastos superficiales (73%), en un medio dominado por los procesos relacionados con la capa activa, y un incremento de la geliflujión respecto a cotas inferiores. La intensa nivación genera múltiples procesos y formas (suelos estriados, valles de fondo plano, nichos) y los procesos gravitacionales son menos eficaces, con dominio de morfosecuencias dirigidas por la gravedad, la geliflujión, la crioturbación y la acción nivotorrencial, en un dinámico pero lento sistema de transferencia de derrubios. El permafrost continuo es dominante, con permafrost discontinuo en orientaciones desfavorables y cotas más bajas.

La intensidad de los procesos geomorfológicos, la variabilidad del espesor de la capa activa, la innivación y el alejamiento de la costa generan unos suelos pobres, sólo favorecidos por la combinación de la meteorización mecánica y la crioturbación, así como las colonias de aves. Por todo ello, los ámbitos colonizables por la vegetación son exiguos, y ha sido denominada, desde los 15 y hasta los 100 m de altitud, «zona de *Usnea antarctica*» (Olech, 2002). En este ámbito existen tres geotopos diferenciados:

Plataformas medias, próximas al mar: La presencia de las colonias de aves favorece la presencia de nutrientes y las especies nitrófilas colonizan estas plataformas, con suelos ornitogénicos, donde domina la presencia de algas terrestres (*Prasícola crispa*) junto a plantas vasculares (*Deschampsia antártica*) en rodales de escaso desarrollo.

Laderas bien drenadas: Dominadas también por rodales pequeños de fanerógamas y en ocasiones, sobre suelos estriados con finos, céspedes de musgos y musgos almohadillados.

Escarpes y afloramientos del sustrato: En los escarpes y afloramientos, lejos ya de la influencia de las aves, dominan los musgos almohadillados y los líquenes crustáceos, con predominio del *Usnea antártica*.

6.3. Desierto polar en ambientes de permafrost continuo y tapiz líquénico

Configura las tierras altas, ampliamente representadas en las plataformas llanas de las islas Rey Jorge —Fildes (figura 7), Weaver, Barton—, Livingston —Byers (figura 8), Hurd, Williams—, Robert y Nelson. Constituye el 37% de las áreas libres de hielo del archipiélago y comprende aproximadamente entre los 50 y 100 metros de altitud. Las condiciones climáticas son rigurosas, con espacios venteados e innivados la mayor parte del año, y unas condiciones térmicas propias de un ambiente con permafrost continuo, aunque no existen registros en estas altitudes.

Las formas dominantes son las plataformas de origen marino, retocadas por el glaciarismo en cubetas y umbrales, bien representadas en las plataformas altas de la península Byers, en las Tierras Altas de la península Fildes, o en las penínsulas Barton, Weaver o Coppermire. En las zonas de relieves enérgicos, el modelado glaciar es dominante, alternando los circos y artesas heredados con morrenas y plataformas de abrasión marina más o menos retocadas. Estas formas heredadas soportan en la actualidad un medio morfodinámico periglacial, donde los procesos y las formas de este origen ocupan un 28% de la superficie libre de hielo.

En este ámbito dominan los procesos asociados a la capa activa, que representan una superficie del 79% respecto al total de formas periglaciares. Suelos ordenados, mantos de clastos superficiales y formas de geliflujión son dominantes y los procesos gravitacionales se reducen considerablemente (14%) respecto a la zona anterior, a pesar de ser muy numerosos debido a su extensión. Es el dominio de los suelos ordenados en las plataformas y los procesos gelifluidales en las laderas, en un ámbito de permafrost continuo, con una importante influencia de la capa activa en los procesos geomorfológicos. En esta zona se localiza la altitud media de la raíz de los glaciares rocosos y los derrubios afectados por flujo, que alternan con los suelos ordenados en las zonas llanas. Los lóbulos, coladas, corrientes de bloques, derrubios afectados por flujo y glaciares rocosos son las formas representativas, así como los procesos de nivación que retocan la ordenación superficial. Los procesos de transferencia de sedimentos son rápidos, predominando la geliflujión y la caída libre, y generando alternancia de finos y gruesos en su incorporación hacia el fondo de las laderas mediante la combinación de geliflujión, nivación y gravedad.

La vegetación de las plataformas y laderas es muy escasa y está dominada prácticamente por los líquenes, es la «zona Usnea antarctica». La cobertura nival, que perdura gran parte del verano, el permafrost, las bajas temperaturas, y la enérgica dinámica geomorfológica periglacial, limitan la colonización vegetal, que ocupa sólo los espacios favorables, bien por la pronta fusión del manto nival, en zonas venteadas, bien por la presencia de avifauna, o bien por el desarrollo de suelo en formaciones superficiales favorables (morrenas, derrubios inactivos). Estos factores permiten diferencia tres geotopos principales:

Rellanos menores y afloramientos del sustrato: islas vegetales asociadas a presencia de aves (petreles, palomas, charranes, págalos) con suelos ornitógenos o pardos que permiten el desarrollo de formaciones mixtas, con criptógamas y *Deschampsia* antártica en extensiones de 0,5-5 m². Sobre las plataformas con suelos ordenados inactivos, los líquenes nitrófilos colonizan los clastos. Es el dominio de la *Usnea*, que ocupa amplias plataformas (Byers, Fildes, Barton, Weaver).

Paredes y escarpes: Colonizados en exclusiva por líquenes, sólo allí donde la nieve no persiste una amplia porción del verano, prácticamente es *Usnea antarctica* la especie dominante y que caracteriza los paisajes vegetales de las zonas altas de cumbres y paredes en Livingston, Rey Jorge, Robert y Nelson.

Rellanos sobre depósitos superficiales venteadas y bien derenadas, colonizadas por líquenes allí donde la nieve desaparece durante el verano y la dinámica geomorfológica es atenuada.

6.4. Desiertos polares en ambientes de permafrost continuo en altura

Por encima de 100 m se localiza tan sólo el 12% de las tierras libres de hielo del archipiélago, en las Tierras altas y zonas montañosas, allí donde las condiciones climáticas son muy rigurosas, con temperaturas medias estivales entre -5 y -8°C y una cobertura nival persistente la mayor parte del año. Es el dominio de los glaciares, con presencia de áreas deglaciadas en orientaciones preferentes al norte. Las formas dominantes son las plataformas más altas, retocadas por la erosión glaciar, y las formas de erosión glaciar, circos, crestas, artesas, umbrales y cubetas de sobreexcavación. Las formas periglaciares

ocupan un 17% de las superficies libres de hielo, dominando, pues, las formas glaciares y los procesos asociados a la deglaciación, en una cota ya muy próxima a la línea de equilibrio glaciar.

En las zonas libres de hielo dominan los suelos ordenados en las escasas plataformas (Byers, Barton y Fildes) y los procesos gravitacionales en el resto. La suma de formas asociadas a la capa activa representan en extensión el 72% de las formas periglaciares, y son menos significativos los procesos gravitacionales y gelifluidales, dominando entre estos últimos los derrubios afectados por flujo. El permafost es continuo y determina todos los procesos, tanto en las plataformas como en las laderas, si bien la capa activa está determinada más por los procesos geomorfológicos que por su dinámica interna. Es el dominio, pues, de los extensos campos de suelos ordenados y de las laderas muy activas, dominadas por la geliflucción y la nivación, si bien su representatividad en el conjunto es muy pequeña, pues en esta banda altitudinal dominan los glaciares. Es la denominada «zona de *Usnea aurantiaco-atra*», donde la vegetación es muy escasa —aunque se han citado la *Deschampsia* antártica a 330 m y *Colobanthus* a 160 m en Rey Jorge (Olech, 2002)—, y está ausente por encima de los 350 metros. Sólo el *Usnea*, de modo esporádico, puede colonizar las paredes, entrando ya en el dominio glaciar.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en el ámbito de los proyectos del PNIA en los que participo desde el año 1991, así como del proyecto REN2001-0643 del Plan Nacional de I+D+I. Deseo expresar mi agradecimiento por su inestimable ayuda en el trabajo de campo a los compañeros de las campañas antárticas, así como a las dotaciones y personal científico de los campamentos, las bases (B.A.E. Juan Carlos I, B.A.E. Gabriel de Castilla, Base Cámara, Base Artigas, Base King Sejong, Base Ferraz) y el B.I.O. Hespérides, desde los que se ha desarrollado la investigación.

BIBLIOGRAFÍA

- AGUILAR, E. (1995): *Aproximación a la caracterización estival del campo térmico. Sector de Johnsons Dock. Isla Livingston. Antártida*. Dpto. Historia y Geografía, Universidad Rovira i Virgili, Tesis de Licenciatura.
- AGUILAR, E. y BRUNET, M. (1997): «Aproximación al análisis del campo térmico estival de la B.A.E. Juan Carlos I. (Isla Livingston, Islas Shetland del Sur, Antártida)». *Boletín Real Sociedad Española de Historia Natural*. nº 93 (1-4), págs. 173-179.
- ANDRÉ, M.F. (1993): *Les versants du Spitzberg. Approche géographique des paysages polaires*. Nancy, Press Universitaires de Nancy.
- ARCHE, A.; LÓPEZ-MARTÍNEZ, J.; SERRANO, E. y MARTÍNEZ DE PISÓN, E. (1996): «Marine landforms and deposits». *Geomorphological map of Byers Peninsula, Livingston Island*. BAS GEOMAP Series, Sheet 5-A, Geomorphological map of Byers Peninsula, Livingston Island. Cambridge, British Antarctic Survey, págs. 35-42.
- BAÑON, M. (1992): «El clima en las Shetland del Sur y el norte de la Península Antártica. Caso de la B.A.E. «Juan Carlos I»». *La Meteorología*, año II nº 7-8, págs. 38-45.

- BAÑÓN, M. (1994): «El clima en la zona de influencia de la base Antártica Española Juan Carlos I». *Papeles de Geografía*, nº 20, págs. 27-47.
- BAÑÓN, M. (2001): *Observaciones meteorológicas en la B.A.E. Juan Carlos I*. Madrid, Mº de medio Ambiente-I.N.M.
- BARSCHE, D. y MAUSBACHER, R. (1986): «New data on the relief development of the South Shetland Island, Antarctic». *Interdisciplinary Science Review*, nº 11(2), págs. 211-218.
- BARSCHE, D., BLÜMEL, W.D., FLÜGEL, W.A., MAUSBACHER, R., STÄBLEIN, G. y ZICK, W. (1985): «Untersuchungen zum Periglazial auf der König-Georg-Insel, Südschettlandinseln, Antarktika». *Ber Polarforsch*, nº 24, págs. 1-75.
- BELLO, S.; BIDEGAIN, M. y LOBATO, H. (1996): *Características climatológicas de la Bahía Collins (Isla Rey Jorge, Antártida)*. Montevideo. Dirección General de Meteorología del Uruguay.
- BERGAMÍN, J.F.; DURÁN, J.J.; GONZÁLEZ CASADO, J.M. y LÓPEZ-MARTÍNEZ, J. (1997): «Morfología y estructura del basamento precuaternario de la Caleta española, Península Hurd, Isla Livingston». *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural (Secc. Geol.)*, nº 93 (1-4), págs. 189-196.
- BEYER, L. y BÖLTER, M. (2002): *Geocology of Antarctic Ice Free Coastal landscapes*. Berlín, Springer Verlag.
- BIRKENMAJER, K. (1992): «Cenozoic glacial history of the South Shetland Island and Northern Antarctic peninsula». In López-Martínez, J. (ed.). *Geología de la Antártida Occidental*. Salamanca, III Congreso Geológico de España, Simposios, T-III, págs. 251-260.
- BJORK, S.; HAKANSSON, H.; ZALE, R.; KARLEN, W. y JÖNSSON, B.L. (1991): «A Late Holocene lake sediment sequence from Livingston Island, South Shetland Islands, with palaeoclimatic implications». *Antarctic Science* nº 3, págs. 61-72.
- BJORK, S.; HJORT, C.; INGOLFSSON, O.; ZALE, R. y ISING, J. (1996): «Holocene deglaciation chronology from lake sediments». En López-Martínez, J.; Thomson, M.R.A.; Thomson, J.W. (Eds.). *Geomorphological map of Byers Peninsula, Livingston Island*. BAS GEOMAP Series, Sheet 5-A, 1:25.000, with supplementary text. Cambridge, British Antarctic Survey, págs. 49-51.
- BLUME, H.P.; KHUN, D. y BÖLTER, M. (2002): «Soils and Landscapes». En Beyer, L. y Bølter, M. (eds.). *Geocology of Antarctic Ice Free Coastal landscapes*. Berlín, Springer Verlag. págs. 91-114.
- BLÜMEL, W.D. y EITEL, B. (1989): «Geocological aspects of maritime-climatic and continental periglacial regions in Antarctica (S-Shetland, Antarctic Peninsula and Victoria Land)». *Geoökodynamic*, nº 10, págs. 201-214.
- BRAUN, M. y GOSSMANN, H. (2002): «Glacial Changes in the areas of Admiralty Bay, Potter Cove, King George Island, Maritime Antarctica». En Beyer, L. y Bølter, M. (eds.). *Geocology of Antarctic Ice Free Coastal landscapes*. Berlín, Springer Verlag. págs. 75-90.
- CALVET, J.; CORBERA, J.; FURDADA, G. (1992): «Variación del frente glaciar en Bahía Sur y Punta Siddons entre 1956 y 1991, Isla Livingston, Islas Shetland del Sur». En López-Martínez, J. (ed.). *Geología de la Antártida Occidental*, Salamanca, III Congreso Geológico de España, Simposios, T-III, págs. 283-292.
- CLAPPERTON, Ch.M. y SUDGEN, D.E. (1988): «Holocene glacier fluctuations in south America and Antarctica». *Quaternary Science Reviews*, vol. 7:185-198.

- CLAPPERTON, C.M., SUDGEN, D.E. (1990): «Late Cenozoic glacial history of the Ross Embayment, Antarctica». *Quaternary Science Review*, nº 9, págs. 253-272.
- DINGLE, R.V. y LAVELLE, M. (1998): «Antarctic Peninsular cryosphere: Early Oligocene (c.30 Ma) initiation and a revised glacial chronology». *Journal of the Geological Society*, nº 155, págs. 433-437.
- EVERETT, K.R. (1976): «Survey of the soils in the region of the South Shetland Island and adjacent parts of antarctic peninsula». *Report Institute of Polar Studies* nº 48. Ohio, Ohio State University.
- FURDADA, G.; POURCHET, M. y VILAPLANA, J.M. (1999): «Study of Johnsons glacier (Livingston Island, Antarctica) by means of shallow ice cores and their tephra and by analysis of ¹³⁷Cs content». *Acta Geológica Hispánica*, v. 34, nº 4, págs. 391-401.
- HALL, K. (1993): «Enhanced bedrock weathering in association with late-lying snowpatches: evidence from Livingston Island, Antarctica». *Earth Surface Processes and Landforms*, nº 18, págs. 121-129.
- HALL, K. (1993): «Rock moisture data from Livingston Island (Maritime Antarctic) and implications for weathering studies». *Permafrost and Periglacial Processes*, nº 4, págs. 245-253.
- HALL, K. (1992): «Mechanical weathering in the Antarctic: a maritime perspective». En Dixon, J.C. y Abrahams, A.D. (eds.): *Periglacial Geomorphology*. Nueva York, Wiley and Sons, págs. 103-123.
- JOHN, B.S. y SUDGEN, D.E. (1971): «Raised marine features and phases of glaciation in the South Shetland Islands». *British Antarctic Survey Bulletin*, nº 24, págs. 45-111.
- KAPPEN, L. y SCHROETER, B. (2002): «Plants and lichens in the antarctic, their way of life and their relevance to soil formation». En Beyer, L. y Bölter, M. (eds.). *Geoecology of Antarctic Ice Free Coastal landscapes*. Berlín, Springer Verlag, págs. 327-374.
- KING, J.C. y TURNER, J. (1997): *Antarctic Meteorology and Climatology*. Cambridge, Cambridge University Press.
- KING, L. (1986): «Zonation and ecology of high mountain permafrost in Scandinavia». *Geografiska Annaler*, nº 68 A03, págs. 131-139.
- LAWS, R.M. (1984): *Antarctic Ecology*. Londres, Academic Press.
- LINDSLAY, DC. (1971): «Vegetation of the South Shetland Island». *British Antarctic Survey Bulletin*, nº 25, págs. 59-83.
- LÓPEZ-MARTÍNEZ, J.; MARTÍNEZ DE PISÓN, E. y ARCHE, A. (1992a): «Geomorphology of Hurd Peninsula, Livingston Island, South Shetland Islands». En Yoshida, Y.; Kaminuma, K.; Shiraishi, K. (eds.). *Recent Progress in Antarctic Earth Science*, Tokio, Terrapub, págs. 751-756.
- LÓPEZ-MARTÍNEZ, J.; VILAPLANA, J.M.; MARTÍNEZ DE PISÓN, E.; CALVET, J.; ARCHE, A.; SERRAT, D. y PALLÁS, R. (1992b): «Geomorphology of selected areas in Livingstone Island, South Shetland Islands». En López-Martínez, J.(ed.). *Geología de la Antártida Occidental*, Salamanca, III Congreso Geológico de España, Simposios, T-III. págs. 271-282.
- LÓPEZ-MARTÍNEZ, J.; THOMPSON, A.M.R.; MARTÍNEZ DE PISÓN, E. and others. (1996): *Geomorphological map of Byers Peninsula, Livingston Island*. BAS GEOMAP Series, Sheet 5-A, 1:25.000, with supplementary text. Cambridge, British Antarctic Survey.

- LÓPEZ-MARTÍNEZ, J.; RAMOS, M.; CRIADO, C.; SERRANO, E. y NICOLÁS, P. (1996): «Anomalías geotérmicas y permafrost en la Isla Decepción, Antártida». *V Simposio de Estudios Antárticos*, Madrid C.I.C.Y.T., págs. 223-234.
- LÓPEZ MARTÍNEZ, J.; SERRANO, E.; REY, J. y SMELLIE, J.L. (1999): «Geomorphological map of Deception Island, E. 1/25.000». *BAS Geomap series*, 7B. Cambridge, British Antarctic Survey.
- LÓPEZ MARTÍNEZ, J.; SERRANO, E. e IK LEE, J. (2002): *Geomorphological map of Barton and Weaver Peninsulas, King George Island, Antarctica (1/10.000)*. Seúl, Polar Science Laboratory, Korea Antarctic Research Program.
- MARTÍNEZ DE PISÓN, E.; LÓPEZ, J. y ARCHE, A. (1992): «Relieve, unidades y tipos glaciares de la Isla Livingston. Islas Shetland del Sur». En López-Martínez, J. (ed.). *Geología de la Antártida Occidental*. Salamanca, III Congreso Geológico de España, Simposios, T-III, págs. 261-270.
- MARTÍNEZ DE PISÓN, E. (1992): *La Antártida y las regiones glaciares del globo*. Madrid, Universidad Autónoma de Madrid.
- MARTÍNEZ DE PISÓN, E.; ARCHE, A.; SERRANO, E. y LÓPEZ-MARTÍNEZ, J. (1996): «Glacial geomorphology». *Geomorphological map of Byers Península, Livingston Island*. BAS GEOMAP Series, Sheet 5-A. Cambridge, British Antarctic Survey, págs. 23-27.
- MAUSBACHER, R.; MULLER, J.; MUNNICH, M. y SCHMIDT, R. (1989): «Evolution of postglacial sedimentation in Antarctic lakes (King Georges Island)». *Zeitschrift für Geomorfologie*, nº 33, págs. 219-234.
- MIOTKE, F.D. (1984): «Slope morphology and slope forming processes in South Victoria Land, Antarctica». *Polar Geography and Geology*, nº 8, págs. 1-53.
- OLECH, M. (2002): «Plant Communities on King George Island». En Beyer, L. y Bölter, M. (eds.). *Geocology of Antarctic Ice Free Coastal landscapes*. Berlín, Springer Verlag. págs. 215-232.
- ORHEIM, O.; GOVORUKHA, L.S. (1982): «Present day glaciation in the South Shetland island». *Annals of Glaciology*, nº 3, págs. 233-238.
- PEREIRA, A.; PUTZKE, J. (1994): «Floristic composition of Stinker Point, Elephant Island. Antarctic». *Korean Journal of Polar Research*, vol. 5, nº 2, págs. 37-47.
- PICKARD, J. y SEPPELT, R.D. (1984): *Phytogeography of Antarctic*. *Journal of Biogeography*, nº 11, págs. 83-102.
- QINGSONG, Z. (1989): «A comparison of periglacial landforms between the Vestfold Hills, East Antarctica and the Fildes Península of King George Island, west Antarctica». *Proceedings International Symposium on Antarctic Research*, Chinese Committee on Antarctic Research, Beijing, Chinese Ocean Press, págs. 74-81.
- RAKUSA-SUSZCZEWSKI, S. (ed.). (1993): *The maritime Antarctic coastal ecosystem of Admiralty Bay*. Department of Antarctic Biology, Warsaw, Polish Academy of Sciences.
- RAMOS, M.; VIEIRA, G.; CRESPO, F. y BRETÓN, L. (2002): «Seguimiento de la evolución temporal del gradiente térmico de capa activa en las proximidades de la BAE Juan Carlos I (Antártida)». En Serrano, E. y García, A. (Eds.) *Periglacialismo en montaña y altas latitudes*. Valladolid. IPA-España-Dpto Geografía Universidad de Valladolid, págs. 257-276.
- SCHWERDTFEGGER, W. (1970): «The climate of Antarctic». En Landsberg, H.E. (ed.) *World Survey of Climatology*, Amsterdam, Orvig Editor, págs. 253-355.

- SERRANO, E. (2000a): «Registros paleoclimáticos en la Antártida: datos indirectos y testigos de hielo». En García, J.C. (coord.) *La reconstrucción del clima de época preinstrumental*. Santander, Universidad de Cantabria, págs. 147-178.
- SERRANO, E. (2000b): «Ciencia y ocupación del territorio en las islas Shetland del Sur (Antártida marítima): implicaciones territoriales y ambientales de las bases científicas». *Polígonos*, nº 10 págs. 85-116.
- SERRANO, E. (2001): «Espacios protegidos y política territorial en las Islas Shetland del Sur (Antártida)». *Boletín AGE*, nº 31 págs. 5-21.
- SERRANO, E. (2002): «Hielo, montañas, mar y fauna: el turismo en las islas Shetland del Sur (Antártida marítima)». *Revue de Géographie Alpine*, nº 1, t-90, págs. 9-24.
- SERRANO, E.; MARTÍNEZ DE PISÓN, E. y LÓPEZ-MARTÍNEZ, J. (1996): «Periglacial and nival landforms and deposits». En López-Martínez, J.; Thomson, M.R.A.; Thomson J.W. (eds.). *Geomorphological map of Byers Peninsula, Livingston Island*. BAS GEO-MAP Series, Sheet 5-A, Cambridge, British Antarctic Survey. págs. 28-34.
- SERRANO, E. y LÓPEZ-MARTÍNEZ, J. (1997): «Evolución de las formas de relieve y los depósitos superficiales cuaternarios en la Isla Media Luna. Islas Shetland del Sur». *Boletín Real Sociedad Española de Historia Natural (Secc. Geol.)*, nº 93 (1-4), págs. 207-218.
- SERRANO, E. y LÓPEZ-MARTÍNEZ, J. (1997): «Geomorfología de la Península Coppermine, Isla Robert, islas Shetland del Sur, Antártida». *Serie Científica INACH*, nº 47, págs. 19-29.
- SERRANO, E. y LÓPEZ-MARTÍNEZ, J. (1998): «Caracterización y distribución de las formas y los procesos periglaciares en las Islas Shetland del Sur (Antártida)». Gómez A.; Salvador, F.; Schulte, L.; García, A. (eds.). *Procesos biofísicos actuales en medios fríos. Estudios recientes*. Barcelona, Universidad de Barcelona, págs. 181-204.
- SERRANO, E. y LÓPEZ-MARTÍNEZ, J. (2000): «Rock glaciers in the South Shetland Islands, Western Antarctica». *Geomorphology*, nº 35, págs. 145-162.
- SERRANO, E.; GINER, J.; GUMIEL, P. y LÓPEZ-MARTÍNEZ, J. (2002): «Morfoodinámica y clasificación de laderas en las Islas Shetland del Sur (Antártida marítima)». En Serrano, E. y García de Celis, A. (eds.) *Periglacialismo en montaña y altas latitudes*. Valladolid, IPA-España-Dpto. Geografía Universidad de Valladolid, págs. 231-256.
- SERRANO, E.; GINER, J.; GUMIEL, P. y LÓPEZ-MARTÍNEZ, J. (2002): «Permafrost en las islas Shetland (Antártida marítima). Distribución y dinámica actual». En Serrano, E. y García de Celis, A. (eds.) *Periglacialismo en montaña y altas latitudes*. Valladolid, IPA-España-Dpto. Geografía Universidad de Valladolid, págs. 277-296.
- SIMONOV, I.M. (1977): «Physical-geographic description of the Fildes Peninsula (South Shetland Islands)». *Polar Geography*, nº 1, págs. 223-242.
- STÄBLEIN, G. (1984): «Geomorphic altitudinal zonation in the arctic-alpine mountains of Greenland». *Mountain Research and Development*, nº 4, págs. 319-331.
- SUDGEN, D. (1982): *Arctic and Antarctic. A modern geographical synthesis*. Oxford, Blackwell.
- WALTON, D.W.H. (1984): «The terrestrial Ecosystem». En Laws, R.M. (ed.). *Antarctic Ecology*. Londres, Academic Press, págs. 1-60.