

# **Análisis del microclima de la Península Byers, isla Livingston, Antártida, en el marco del proyecto LIMNOPOLAR**

**Manuel Bañón<sup>(1)</sup>, Ana Justel<sup>(2)</sup>, Antonio Quesada<sup>(3)</sup>**

(1) Instituto Nacional de Meteorología, Murcia. E-mail: mbg@inm.es

(2) Dept. de Matemáticas, Universidad Autónoma de Madrid. E-mail: ana.justel@uam.es

(3) Dept. de Biología, Universidad Autónoma de Madrid. E-mail: antonio.quesada@uam.es

## **Introducción**

La Antártida es el continente más alto, seco, frío y ventoso del planeta, con un clima que difiere enormemente entre el alto plateau interior, la costa y la Península Antártica, que es la región más cálida del continente. Los sistemas de bajas presiones, que forman un anillo de mal tiempo en las regiones costeras del continente, se forman sobre el océano y se mueven en dirección SE hacia la costa. La precipitación cae principalmente en forma de nieve, aunque algunas zonas costeras reciben agua en forma líquida durante el verano. Excepto en la costa, el aire es extremadamente seco. El estudio del clima se complica especialmente en la Antártida, no sólo por los problemas técnicos que conlleva, sino por los múltiples e interrelacionados procesos físicos que participan en su modulación (Schwerdtfeger, 1984)

El archipiélago Shetland del Sur y el sector noroccidental de la Península Antártica, son regiones con un clima claramente delimitado del resto del continente. Es el más templado de los antárticos debido a la influencia atemperadora de las aguas marinas libres de hielos, que se deja sentir a lo largo de todo el año. La localización de la región justo al sur del paralelo 60°S condiciona las características del campo bórico, siendo una zona de elevada ciclogénesis (Turner, 2004; Simmonds et al, 2003). La región se encuentra ligeramente al norte de la posición media del cinturón circumpolar de bajas presiones, que se ubica por término medio entorno a los 66°S. El valor anual de la presión desciende hasta 987 hpa, fruto del constante tránsito de ciclones. La precipitación en esta zona climática es de carácter frontal (Turner, 1995; Braun, 2001) y se produce normalmente en forma nivosa aunque, durante el verano, cuando las temperaturas superan con frecuencia los 0°C, pueden caer en forma de lluvia líquida. La nubosidad es muy elevada, siendo la mediana anual el 62.8%, gracias al abundante vapor de agua disponible y al paso frecuente de ciclones móviles sobre la región.

Los datos del British Antarctic Service, BAS, y del proyecto Reference Antarctic Data for Environmental Research, READER (Turner, 2004), muestran que en la Península Antártica y las islas Shetland la tendencia al calentamiento es clara. Rau (2002) detecta un aumento en la altitud donde aparece la nieve seca, asociado al aumento de periodos cálidos entre 1991-2000. Otros estudios, como el de Kejna (2003), confirman este aumento de temperatura en la Península Antártica. En la isla Livingston, Calvet (1999) ha comprobado, de forma indirecta, que la regresión glaciaria en la isla es de un 4,31% desde 1956 a 1996. En precipitación, pese a la dificultad de su medida y la gran variabilidad interanual, también se detectan ligeras tendencias de aumento en la zona de la Península y Shetland con un mayor número de días de precipitación líquida durante el verano y ligero

decrecimiento de días con nieve durante el invierno (Quintana y Carrasco, 1997; King, 1997).

En el año 2001 se inicia el proyecto LIMNOPOLAR, con el que se pretende realizar un estudio detallado de la ecología de las masas de agua continentales en el entorno de la isla Livingston, centrándose, especialmente, en la Península Byers. El objetivo final es detectar la sensibilidad de estos ecosistemas al cambio climático. Los efectos que el aumento de temperatura puede producir en los ecosistemas están actualmente bajo discusión, aunque si parece claro que las variaciones ambientales serán de suficiente magnitud como para inducir cambios fundamentales en la dinámica y estructura de los ecosistemas antárticos (Huiskes, 2002). El calentamiento de la zona y la aparición de nuevas zonas colonizables pueden significar la llegada de nuevas especies, así como alterar drásticamente las comunidades preexistentes. Lewis-Smith (1984) demostró la aparición de nuevas especies en zonas termales de la Isla Decepción (Archipiélago Shetland del Sur) tras la erupción volcánica que allí tuvo lugar en 1970.

Los estudios de bio-sensibilidad ante el cambio climático requieren de periodos largos de observación o, alternativamente, poder combinar información sobre la respuesta de los organismos a distintas latitudes. El Continente Antártico es un lugar especialmente apropiado para este tipo de estudios ya que sobre cualquier proceso biológico sólo inciden un pequeño número de factores, convirtiéndolo en un gran laboratorio natural. Por tanto, uno de las prioridades del estudio limnológico en Byers ha sido el registro de datos meteorológicos *in situ* con una nueva estación meteorológica, asociada a la red de estaciones que funcionan con el mismo objetivo en las zonas de trabajo de equipos canadienses y neozelandeses. Con objeto de poder combinar la información meteorológica/biológica procedente de estudios en distintas latitudes polares (meta-análisis), es particularmente importante que las características y programación de la estaciones sean homogéneas. La estación situada en la Península Byers, además de los sensores atmosféricos habituales, incluye otros que describen con precisión algunas de las condiciones físicas a que están sometidos los organismos acuáticos.

En este artículo se caracterizan las condiciones meteorológicas y climáticas de la Península Byers. El estudio detallado de los datos micrometeorológicos permite estimar la duración de la actividad biológica a lo largo del año, lo que indudablemente permite mejorar el conocimiento sobre la dinámica y funcionamiento de estos ecosistemas más allá de los periodos de muestreo que siempre se realizan en el verano austral. En la sección 2, se describe la zona de trabajo y las técnicas utilizadas para conseguir los datos. En la sección 3, se analizan los datos anuales y

estacionales registrados en la Península Byers. En la sección 4, se analizan los datos de la Base Antártica Española Juan Carlos I (BJCI), en la que existe una estación meteorológica de características similares a la instalada en la Península Byers y que proporciona registros desde el año 1988. La proximidad geográfica entre ambas estaciones, situadas en la misma isla a una distancia de 40 Km., hace pensar que los registros pueden ser similares. En la sección 5 se estudia la correlación entre los registros de Byers y la BJCI, como un primer análisis exploratorio de la posibilidad de usar las series más largas de BJCI en la caracterización climática de Byers. Finalmente, en la sección 6 se presentan las conclusiones de este trabajo.

## 2. Área de estudio y sistema de toma de datos

### 2.1 Características geográficas de la isla Livingston y Península Byers

La península de Byers se encuentra en el extremo occidental de la isla Livingston del archipiélago Shetland del Sur, Figura 1, entre las latitudes 62°34'35" y 62°40'35" S, y las longitudes 60°54'14" y 61°13'07" W, ocupando una extensión de 67,5 Km<sup>2</sup> (Serrano, 2001).

Los registros paleoclimáticos de la zona y la gran cantidad de cantos rodados arrastrados por el hielo sugieren expansiones glaciares en momentos más fríos (Martínez et al., 1996). La península está rodeada por playas que en sucesivos niveles alcanzan unos 10 m de altura y una meseta ondulada en su zona interior que oscila entre los 70 y 90 m de altitud. Durante el verano desaparece la nieve dejando ver multitud de pequeños lagos. El resto de la isla, con una extensión de unos 1100 Km<sup>2</sup>, está cubierta permanentemente de glaciares, excepto en verano que queda un 5% libre de hielos (Serrano, 2001).

En la misma isla, a unos 50 km, se encuentra el monte Friesland que alcanza la altitud de 1770 m, y al oeste y SO de Livingston, a escasa distancia de Byers se encuentran la isla Snow, con un domo glaciar de altura inferior a los 300 m, y la isla Smith, que es una montaña emergiendo del océano de altitud 2012 m.

El observatorio de la península Byers se encuentra situado a latitud 62° 38' 50" S y longitud 61° 6' 37" O, a 70 m de altitud y abierta en todas las direcciones. Su distancia al mar es de 2 Km aproximadamente y está entre los lagos Somero y Limnopolar.

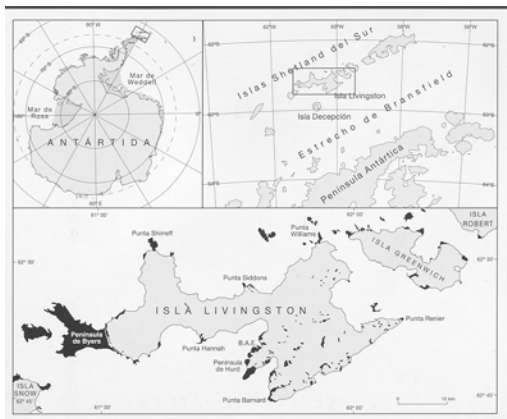


Fig. 1: Posición de la isla Livingston

La BJCI, está situada a latitud 62° 39' 46" S y longitud 60° 23' 20" O, a una altitud de 12 m y a unos 50 m de la orilla Este de Bahía Sur. La bahía está abierta en la dirección NNE-SSO, y a espaldas del observatorio hay una barrera montañosa que alcanza los 300 m junto a la Base y posteriormente va aumentando su altura hasta llega al Friesland a unos 10 Km de distancia.

### 2.2 Instalación de un sistema automático de adquisición de datos meteorológicos

El frecuente cambio del personal y su falta de entrenamiento adecuado en algunas ocasiones es un hecho común en todos los observatorios. Este hecho, unido a la dureza del clima antártico y a que los registros suelen ser bastante cortos y las estaciones antárticas han sufrido numerosas vicisitudes que han provocado cambios en periodos de apertura y cierre, instrumentación que se renueva debido a mejoras técnicas, etc., nos explica la presencia de numerosas lagunas al estudiar las series de datos de las estaciones existentes en casi todas las estaciones y a que muchas de estas series ofrezcan dudas sobre la calidad de los datos.

Se ha optado por instalar un nuevo sistema automático de adquisición de datos meteorológicos en la zona de muestreo biológico. Este sistema está diseñado para funcionar ininterrumpidamente de forma totalmente autónoma desde el punto de vista energético y con un mantenimiento anual (Bañón, 2004). Hecho tan simple, se convierte en un gran problema debido a la dureza de las condiciones meteorológicas y de accesibilidad.

Las variables meteorológicas que se miden son la temperatura y la humedad del aire, la velocidad y la dirección del viento, la radiación global y PAR y la temperatura junto al suelo. También se mide la conductividad y la temperatura del agua en el lago Somero. Posteriormente se ha incluido sensores para medir la altura de nieve y la radiación PAR a un metro de profundidad en el lago. Todos los datos se registran con un datalogger CR10X de la casa Campbell. Se descartó medir la precipitación ya que durante la mayor parte del año es en forma de nieve y la zona es muy ventosa. Durante las estancias en el campamento se midió la precipitación manualmente, cada 24 horas. La estación tampoco incluye barómetro porque esta variable ya se registra en la BJCI.

El protocolo de medidas y la instalación de los instrumentos se recogen en la Tabla 1. Se ha seguido el Regional Sensitivity to Climate Change In Antarctic Terrestrial and Limnetic Ecosystems (RiSCC, 2002) y las normas de la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 1983). La estación graba los datos cada media hora y proporciona valores resumen cada 24 horas. Los estadísticos diarios se obtienen a partir de los datos medidos cada 30s.

La estación tuvo un excelente funcionamiento desde su instalación hasta abril de 2003, cuando aparecen lagunas en los datos por falta de energía en el sistema, que no se solucionan hasta el inicio de la campaña 2003-04. Puesto que sólo tenemos datos de un año completo, se presentan estadísticos de resumen anual para los datos de 2002 y por estaciones climatológicas

VARIABLE	SENSOR		INTERVALO DE MEDIDA		OBSERVACIONES (Los datos de valores extremos son obtenidos de los muestreos efectuados cada 30 s)
	TIPO	MODELO	MUESTREO	DATO	
TEMPERATURA	Pt100	HMP45 C	30 s	30 m	Datos de temperatura media, máxima y hora, mínima y hora cada 24 horas. Instalación a 1.70 m sobre el suelo. Con garita de protección de radiación
	THERMISTOR	107 PROBE	30s	30 m	Datos de temperatura media, máxima y hora, mínima y hora cada 24 horas. Instalación a 10 cm sobre el suelo. Con garita de protección de radiación
HUMEDAD	HUMICAP	VAISALA HUMICAP 180	30 s	30 m	Datos de humedad media cada 24 horas. Con garita de protección de radiación. Instalación a 1.70 m sobre el suelo
VIENTO		YOUNG 05103	30 s	30 m	Datos de velocidad y dirección de viento máxima cada 30 m y cada 24 horas. Instalación a 2.50 m sobre el suelo
RADIACIÓN PAR	Termoeléctrico	SKP215	1 s	Integración cada 30 m	Datos integrados cada 24 horas. Instalación a 190 m sobre el suelo
					Datos integrados cada 24 horas. Instalación a 1 m de profundidad en el lago
RADIACIÓN GLOBAL	Termoeléctrico	CMS	1 s	Integración cada 30 m	Datos integrados cada 24 horas. Instalación a 190 m sobre el suelo
CONDUCTIVIDAD		CS547	30 s	30 m	Datos de conductividad promedio, máxima y mínima cada 24 horas. Instalación a 1 m de profundidad
TEMPERATURA DEL AGUA	Thermistor	Integrado en CS547	30 s	30 m	Datos de temperatura del agua promedio, máxima y mínima cada 24 horas. Instalación a 1 m de profundidad
ALTURA DE NIEVE		SR50		24 horas	Datos de altura de nieve cada 24 horas. Instalación a 2 m de altura.

Tabla 1 : Protocolo de medidas en Byers

considerando los datos de 2002, 2003 y 2004. El verano corresponde a los meses de diciembre, enero y febrero, el otoño a marzo, abril y mayo, el invierno a junio, julio y agosto y la primavera a los tres meses restantes. Además, hay que tener en cuenta que la pluviosidad se mide únicamente en verano. Se utiliza como estadístico resumen la media y, en ocasiones, la mediana por ser más robusta frente a observaciones atípicas.

### 3. Condiciones microclimáticas de la península Byers

#### 3.1 Ciclo anual

En la Tabla 2 se presentan los estadísticos resumen de los datos de 2002. Se observa que la temperatura media anual en Byers ha sido -3,1°C, con valores que oscilan entre -22°C y 5°C. Las temperaturas

junto al suelo son en valores medios ligeramente superiores, pero más extremadas en sus valores mínimo y máximo, donde alcanzan los -25,5 °C y 8,2 °C. La humedad relativa media es muy elevada, la cercanía a los lagos afecta a esta variable y casi siempre oscila en torno al 90%.

El viento es moderado en la península, con una velocidad media de 24 Km/h. La velocidad media diaria más elevada alcanzada ha sido 68 Km/h, y en temporales se alcanzan hasta los 139 Km/h. La rosa de vientos indica que los vientos dominantes se sitúan en el eje NE-SO. La radiación es un parámetro destacable, con una media diaria anual de 6722 Kj/m<sup>2</sup> y máximos superiores a 27000 en el solsticio de verano, que desaparecen durante el invierno hasta quedar la zona en casi oscuridad. Las horas de oscuridad del invierno se compensan por la abundancia de luz solar durante el verano. La radiación fotosintéticamente

	AÑO BYERS 2002									
	T	Hum	Ts	Par	R	V	Vmx	Ta	C	LL
	°C	%	°C	µmol/m <sup>2</sup>	Kj/m <sup>2</sup>	Km/h	Km/h	°C	µS/cm	l/m <sup>2</sup>
Media	3,1	89	-2,8	14,5	6722	24	54	0,4	0,133	119,5(sumas)
Máxima	5,0	99	2,1	55	27329	68	139	11,7	0,636	15,2
Mínima	-21,7	66	-12,1	0,4	16	2	5	-2,7	0,004	0
Mediana	-2,0	90	-1,7	8,5	4422	23	53	-0,3	0,123	1,4

Tabla 2: Resumen de los datos meteorológicos en Byers para el ciclo anual del 2002<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Las abreviaciones empleadas en las tablas se corresponden con: Temperatura, T, humedad, Hum, temperatura junto al suelo, Ts, velocidad del viento, V, radiación global, R, radiación PAR, PAR, temperatura del agua, Ta, conductividad del agua, C y precipitación, LL. Los sufijos de cada abreviatura serían: md, valor medio, mx, valor máximo, mn, valor mínimo. Así Vmx representaría el valor de la racha máxima. La lluvia que figura como media es la suma de la recogida durante el verano.

activa, PAR, tiene una media de 14  $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ , pero con picos de hasta 55  $\mu\text{mol}/\text{m}^2$  en los días próximos al solsticio.

Los parámetros no meteorológicos de temperatura y conductividad del agua, medidos a 1 m de profundidad, proporcionan el momento de congelación del lago, que se produce en abril y permanecen bajo cero hasta principios de verano.

### 3.2 Ciclo estacional

Durante el verano es el momento en que tenemos más datos registrados y podemos explorar con más precisión sus características. Los estadísticos resumen de los datos de los tres veranos se presentan en la Tabla 3. Aunque la existencia de heladas es un hecho habitual, lo cierto es que las temperaturas suelen ser superiores a 0°C, siendo la única región antártica que goza de esta bondad térmica. En todos los parámetros de temperatura se observa que el verano 2003-04 fue anormalmente frío, lo que coincide con los registros de la BJCI. Las temperaturas medias junto al suelo son algo superiores a las aéreas, y los valores extremos son inferiores en las mínimas y superiores en las máximas, excepto en el verano 2003-04 debido a que el hielo se mantuvo sobre el suelo hasta finales de diciembre. La humedad ronda permanentemente el 90%.

El viento es moderado, siendo el verano más ventoso el de 2001-02, con una media de 26 Km/h. Durante el verano 02-03 se alcanzó la racha máxima con 139 Km/h.

La radiación global alcanza los valores más elevados en esta época con más de 20 horas de sol sobre el horizonte. Con valores medios que oscilan entre los 11000 y 13000  $\text{Kj}/\text{m}^2$  y máximos que superan los 29000  $\text{Kj}/\text{m}^2$ . La radiación PAR sigue la misma pauta, con valores medios entre 23 y 30 y máximos de hasta 62  $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ . El gran aumento de la radiación en el último verano podría estar relacionado con la presencia de la cubierta de nieve hasta mediados de enero que daba lugar a un su elevado albedo y la abundancia de nubes bajas capaces de reflejar la radiación de onda corta procedente del suelo.

La precipitación es muy variable en los tres veranos, aunque hay que pensar que la longitud de los registros también ha cambiado en esta variable, registrada únicamente de forma manual. El primer verano, la precipitación fue muy abundante, 190  $\text{l}/\text{m}^2$ , y abarca desde el 8 de diciembre al 11 de febrero, mientras que los dos siguientes, con estancias que comienzan el 14 de enero y 28 de diciembre y terminan el 17 y 14 de febrero, se recoge menos lluvia.

VERANO BYERS 2001-02											
	T °C	Hum	Ts °C	PAR $\mu\text{mol}/\text{m}^2$	R $\text{Kj}/\text{m}^2$	V $\text{Km}/\text{h}$	Vmx $\text{Km}/\text{h}$	Ta °C	C $\mu\text{S}/\text{cm}$	LL $\text{l}/\text{m}^2$	
Media	1,4	91	1,4	23,1	11596	26	56	4,1	0,194	190,4(suma)	
Máxima	5,0	98	8,2	51,1	29952	46	104	11,7	0,305	15,2	
Mínima	-1,9	77	-3,4	3,2	1142	9	21	-1,8	0,079	0,0	
Mediana	1,4	92	1,5	21,5	10938	26	57	3,8	0,198	1,5	
VERANO BYERS 2002-03											
	T °C	Hum	Ts °C	PAR $\mu\text{mol}/\text{m}^2$	R $\text{Kj}/\text{m}^2$	V $\text{Km}/\text{h}$	Vmx $\text{Km}/\text{h}$	Ta °C	C $\mu\text{S}/\text{cm}$	LL $\text{l}/\text{m}^2$	
Media	1,1	91	1,5	28,9	13066	22	50	3,7	0,142	75,1(suma)	
Máxima	5,6	99	9,2	54,9	26568	52	139	16,4	0,347	11,4	
Mínima	-4,8	76	-4,1	0,1	2963	7	18	-0,4	0,030	0,0	
Mediana	1,2	93	1,7	29,0	12630	21	46	4,0	0,157	0,4	
VERANO BYERS 2003-04											
	T °C	Hum	Ts °C	PAR $\mu\text{mol}/\text{m}^2$	R $\text{Kj}/\text{m}^2$	V $\text{Km}/\text{h}$	Vmx $\text{Km}/\text{h}$	Ta °C	C $\mu\text{S}/\text{cm}$	LL $\text{l}/\text{m}^2$	
Media	0,2	90	1,0	30,2	12759	22	46	1,5	0,243	87,7(suma)	
Máxima	4,9	100	7,7	62,1	29275	45	90	9,2	0,412	11,1	
Mínima	-8,3	69	-5,7	3,3	368	7	17	-0,4	0,079	0,0	
Mediana	0,4	91	1,0	29,6	13075	22	46	0,7	0,211	0,3	

Tabla 3: Resumen de los datos meteorológicos en Byers para los veranos de 2002, 2003 y 2004

El agua está líquida, al menos a 1 m de profundidad, y llega a alcanzar, puntualmente, los 16 °C. Al inicio de la estación se registran valores inferiores a los 0°C, cuando el agua aun está congelada. En 2004 esta situación se mantuvo hasta mediados del mes de enero, con espesores de hielo de 1 m en algunos lagos.

Las estadísticas de resumen de los datos de otoño se recogen en la, tabla 4. Se ha eliminado el año 2003 por la falta de representatividad de los registros. La estación comenzó a fallar en abril y apenas hay datos de mayo, faltando los días más fríos de la estación. Durante el otoño la temperatura disminuye por debajo de 0°C, hasta los -13°C, con días muy fríos, de -12°C de media. Las máximas siguen apareciendo

ocasionalmente por encima de 0°C, aunque la mediana aparece rondando los 0°C y los valores más altos alcanzan los 5°C. La temperatura junto al suelo tiene valores similares a las de garita, con mínimas algo más bajas y máximas algo superiores. La humedad ronda permanentemente el 90%.

La radiación disminuye rápidamente sus valores de forma que la media en la radiación global pasa a menos de 5000  $\text{Kj}/\text{m}^2$  y sus valores máximos se reducen a menos de la mitad de los alcanzados en el verano. También se reduce la radiación PAR por debajo de los 10  $\mu\text{mol}/\text{m}^2$  y sus valores máximos alcanzan un 50% aproximadamente. La velocidad media del viento resulta ser algo superior a la del verano, unos

26 Km/h y sigue habiendo temporales que superan los 100 Km/h y la temperatura del agua continua con valores medios superiores a los 0°C y las máximas diarias apenas superan 1°C.

Respecto a los datos de invierno, tabla 4, vamos a utilizar sólo los referentes a 2002, puesto que en el año 2003 sólo tenemos en esa época datos de agosto y septiembre y no de días completos. En esta estación las temperaturas alcanzan los mínimos, con valores medios por debajo de -7°C y extremos de -21°C. En las máximas aparecen días con valores superiores a los 0°C, pero la mediana ya está en -7°C. En la temperatura junto al suelo alcanzamos valores similares, aunque los extremos son algo inferiores en las mínimas y superiores en las máximas. La humedad ronda permanentemente el 90%.

La radiación baja a sus valores mínimos. No olvidemos que, en el solsticio, el sol muy bajo y no más de 3 horas sobre el horizonte. Los valores medios apenas alcanzan los 1000 KJ/m<sup>2</sup> con máximos de 4000, habiendo días en los que la radiación es casi despreciable. El viento está en los valores medios anuales, 24 Km/h y se siguen superando los 100 Km/h ocasionalmente. La temperatura del agua está claramente por debajo del punto de congelación y las máximas no superan este límite.

Durante la primavera de 2003, tabla 4, la estación funcionó correctamente, excepto en septiembre, cuando hay carencia de datos en las horas nocturnas principalmente. Por ello los datos sobre los que nos basaremos son los de 2002 principalmente.

OTOÑO BYERS 2002									
	T	Hum	Ts	PAR	R	V	Vmx	Ta	C
	°C	%	°C	µmol/m <sup>2</sup>	Kj/m <sup>2</sup>	Km/h	Km/h	°C	µS/cm
Media	-2,0	87	-2,3	5,7	2685	26	59	0,7	0,200
Máxima	3,6	99	4,2	27,0	13141	47	102	7,1	0,636
Mínima	-13,1	69	-13,7	0,7	47	7	21	-2,7	0,006
Mediana	-1,0	87	-1,3	3,7	1683	25	56	0,6	0,224
OTOÑO BYERS 2004									
	T	Hum	Ts	PAR	R	V	Vmx	Ta	C
	°C	%	°C	µmol/m <sup>2</sup>	Kj/m <sup>2</sup>	Km/h	Km/h	°C	µS/cm
Media	-1,4	91	-1,5	6,7	325	26	55	0,7	0,274
Máxima	5,3	100	6,8	32,5	1492	53	115	8,6	0,760
Mínima	-11,3	71	-13,2	0,5	24	3	17	-0,3	0,135
Mediana	-1,0	92	-1,1	4,7	235	24	53	0,4	0,210
INVIERNO BYERS 2002									
	T	Hum	Ts	PAR	R	V	Vmx	Ta	C
	°C	%	°C	µmol/m <sup>2</sup>	Kj/m <sup>2</sup>	Km/h	Km/h	°C	µS/cm
Media	-7,4	88	-7,6	2,2	1031	24	56	-1,1	0,055
Máxima	1,2	98	-0,3	9,3	4008	55	108	-0,4	0,293
Mínima	-20,7	69	-25,5	0,4	16	2	5	-2,1	0,009
Mediana	-6,9	90	-7,2	0,9	492	23	52	-1,1	0,049
PRIMAVERA BYERS 2002									
	T	Hum	Ts	PAR	R	V	Vmx	Ta	C
	°C	%	°C	µmol/m <sup>2</sup>	Kj/m <sup>2</sup>	Km/h	Km/h	°C	µS/cm
Media	-3,8	89	-2,6	25,5	10930	22	48	-0,4	0,103
Máxima	2,9	99	0,7	55,0	27329	68	127	-0,3	0,293
Mínima	-21,7	66	-10,6	5,3	2351	5	17	-1,1	0,022
Mediana	-3,1	90	-2,1	23,2	9701	21	46	-0,4	0,108
PRIMAVERA BYERS 2003									
	T	Hum	Ts	PAR	R	V	Vmx	Ta	C
	°C	%	°C	µmol/m <sup>2</sup>	Kj/m <sup>2</sup>	Km/h	Km/h	°C	µS/cm
Media	-2,7	90	-1,7	26,6	12010	26	55	-0,2	0,496
Máxima	2,9	100	0,0	54,3	25445	50	107	0,1	0,908
Mínima	-12,5	70	-8,3	1,6	2148	8	16	-0,3	0,030
Mediana	-2,1	92	-1,4	25,1	11123	25	55	-0,2	0,410

Tabla 4: Resumen de los datos meteorológicos en Byers para el otoño, invierno y primavera

La temperatura sigue siendo negativa, con medias cercanas a los -4°C, aunque la mediana está en los -3 °C. Las mínimas siguen alcanzando valores muy bajos, de unos -22°C y las máximas superan a veces los 0°C. No obstante la mínima y máxima tienen sus medianas en unos -5°C y -1°C. Si atendemos a la temperatura junto al suelo se observa que supera en más de un grado a la media obtenida a 1,70 m. La media de las mínimas es -3,4°C, 3°C inferior y la media de máximas -1,8°C, similar a las existente en la garita a mayor altura. Igualmente mucho más moderado en las extremas. Todo ello debido, posiblemente, al efecto amortiguador sobre la temperatura que realiza el suelo cubierto por una capa de hielo y nieve que cubre sensor y abrigo que lo cobija.

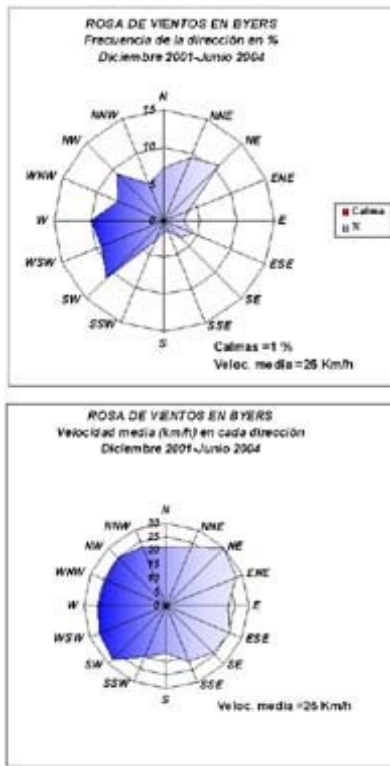
La radiación vuelve a aumentar rápidamente y alcanza valores medios de 11000 kJ/m<sup>2</sup> con valores extremos de 27000 al final de la estación. En la radiación PAR ocurre igual, aproximándonos a los valores medios y máximos del verano. El viento sigue en los valores anteriores, con medias de 22 km/h la primavera de 2002 y de 27 en 2003 y con temporales de hasta 127

km/h. El agua sigue congelada, con temperaturas inferiores a los 0°C y un solo registro de +0,1°C en la primavera de 2003.

### 3.3 El viento en la península de Byers

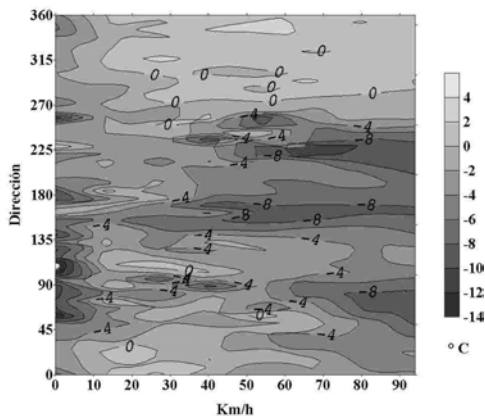
Las rosas de viento de todos los datos, figura 2, así como las estacionales son, básicamente, similares. Ausencia de vientos al sur del eje formado por las direcciones SO-NE, posiblemente, relacionados con la presencia de la isla Snow, con alturas de 2000 m, al SSO y la cadena montañosa de la isla Livingston, con alturas de 1600 m al E, ambas a una distancia de unos 40 Km, así como la influencia de la península antártica, a poco más de 100 Km, que supone una barrera para los vientos del segundo cuadrante.

En general predominan las direcciones SO y NE, que llevan asociadas las velocidades máximas. Si lo analizamos por estaciones, en verano domina el primer y cuarto cuadrante, siendo más frecuentes los vientos del W. El resto del año dominan las direcciones



**Fig. 2: Rosa de vientos en Byers** SW y NE, que en primavera se reparten con el NW. Es destacable la rosa de invierno, en la que las direcciones SW y WSW predominan claramente.

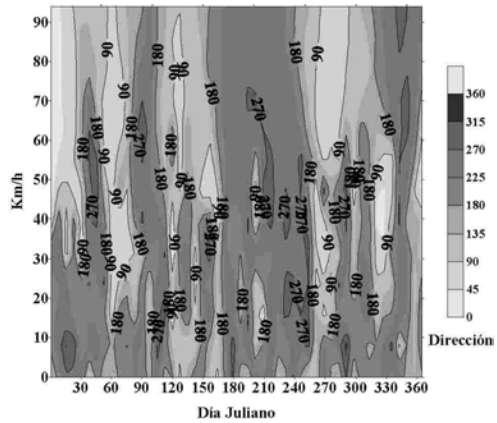
En el periodo de datos analizado se tiene que la velocidad media máxima alcanza varios meses una velocidad media igual o superior a los 30 Km/h en todas las estaciones del año. La velocidad media del viento es de 24 Km/h aunque aparecen días muy ventosos con valores medios de 68 Km/h y siendo frecuentes los temporales con rachas superiores a los 100 Km/h, que alcanzaron su máximo con los 139 Km/h en diciembre de 2002. La fuerza del viento es similar en todas las direcciones, con un bajo nivel de calmas, el 1%, que parece ser mayor durante el núcleo del invierno en el que, en septiembre de 2002 llega al 9%, aunque ello puede ser debido a problemas de congelación del anemómetro.



**Figura 3. Temperatura en función de la velocidad y dirección del viento**

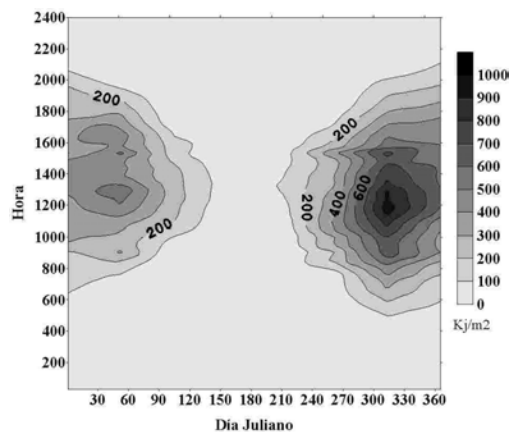
### 3.4 Relación entre parámetros meteorológicos y evolución anual

Si analizamos la temperatura en función de la velocidad y dirección del viento, Figura 3, observamos que las advecciones cálidas proceden del primer y cuarto cuadrante, independientemente de su velocidad, y las frías del segundo y tercer cuadrante, pero en Byers, donde la velocidad media del viento es elevada, se observan temperaturas muy bajas para vientos encalmados sin dependencia de la dirección, consecuencia del enfriamiento radiactivo. También aparecen, con vientos fuertes, advecciones frías con vientos del Este.



**Figura 4. Evolución anual de la dirección y velocidad del viento**

Cuando el estudio lo hacemos viendo la dirección del viento en función de su velocidad a lo largo del año, Figura 4, se observa una dependencia importante de la estación. Los vientos flojos del tercer cuadrante que hay durante todo el año, se convierten en predominantes durante el invierno para todas las velocidades y en primavera para los vientos más bajos, pues los vientos más fuertes proceden del norte. También hay dominio de los vientos del tercer cuadrante a principios de verano en todo el espectro de velocidades.



**Figura 5. Irradiación global horaria durante el año**

Al estudiar la irradiación solar, Figura 5, vemos que el máximo de la misma se produce antes del solsticio de verano, con la máxima irradiación entre las 11 y las 16 horas, ligeramente desplazada del mediodía solar. Los valores horarios disminuyen rápidamente y prácticamente desaparecen en invierno,

mientras que en verano se observan valores por encima de los 100 KJ/m<sup>2</sup> en media hora entre las 5 y las 22 horas.

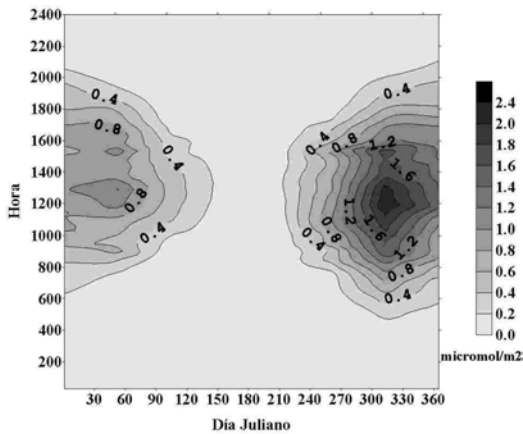


Figura 6. Radiación PAR horaria durante el año

Si hacemos la misma representación con la radiación PAR, Figura 6, vemos que ocurre de manera similar a la radiación global. Se comienza a apreciar radiación PAR, aunque débil, en el mes de septiembre. Los máximos horarios aparecen antes de solsticio y existe otro máximo otro máximo relativo, menos potente durante gran parte del día de los meses de enero y febrero.

En la Figura 7, se analiza la relación entre la temperatura junto al suelo y la temperatura del aire a

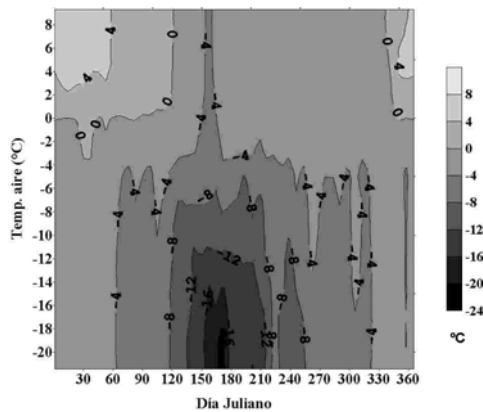


Figura 7. Relación entre las temperaturas junto al suelo y en el aire durante el año

1,70 m a lo largo del año. En verano esta relación es directa y se observa más claramente, pero durante el resto del año, cuando el suelo está cubierto de nieve, la temperatura junto al suelo es más independiente de la del aire, se observan los mínimos en ambos sensores, pero se pueden dar temperaturas sobre cero en el aire, mientras que junto a suelo la temperatura sigue permaneciendo bajo cero, mostrando mayor inercia a los cambios.

Finalmente, se estudia la relación entre la conductividad y la temperatura del agua, Figura 8. Aunque no es un parámetro meteorológico, si nos informa de los procesos físicos que ocurren en el lago y del momento en que se produce la congelación, con las consecuencias para la vida en él existente.

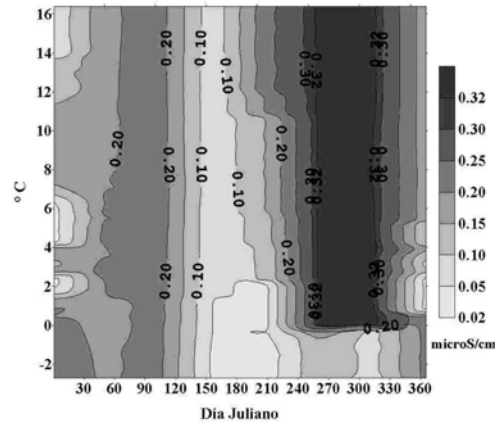


Figura 8. Conductividad y temperatura del agua durante el año

Vemos que con temperaturas por debajo de cero el agua está congelada en invierno y la conductividad es muy baja. La congelación del lago se produce en abril y dura hasta bien entrado el verano. Los valores de conductividad altos que se registran en verano con temperaturas inferiores a 0°C, posiblemente se deben al efecto de arrastre de materiales por la descongelación de la nieve que alimenta con agua líquida el lago, que en esa época se encuentra descongelado o cercano a la descongelación.

#### 4. Condiciones climáticas de la BAE Juan Carlos I

Si observamos los datos existentes en la BJCI podemos hacer un estudio similar al existente en Byers pero con un número de años más importante, en concreto en la estación de verano, donde tenemos registros de hasta 17 años, por debajo de los 30 recomendados por la WMO en los estudios climáticos, pero que, en variables como la temperatura, empiezan a ser válidos (Bañón, 1989, 1991, 1993, 2001 y 2004).

Sólo vamos a hacer referencia al parámetro de presión, que no se mide en Byers y al de precipitación, con registros muy cortos en Byers y sólo de verano en BJCI. En el análisis de la precipitación hay que tener en cuenta que es un meteoro muy complicado de medir, en especial en el caso de existencia de viento y precipitaciones débiles y, aún más si la precipitación es en forma de nieve. Ello hace que sólo tengamos valores aproximados en verano, cuando se alcanzan valores medios que pueden superar los 110 l/m<sup>2</sup> y alcanzar hasta los 220 l/m<sup>2</sup>. La lluvia suele caer de forma débil y en forma líquida y abundan los días lluviosos, pero se han dado casos de precipitaciones líquidas intensas al menos en dos ocasiones, en febrero de 1999, cuando cayeron más de 30 mm en poco más de 2 horas y en febrero de 2003, cuando se registraron más de 50 mm en menos de 6 horas, lo que, en esas latitudes viene ser excepcional.. Durante los primeros años, cuando se hacían observaciones convencionales, se registraba precipitación débil el 80% de los días, situación que cambia radicalmente cuando analizamos solamente los datos de la estación automática, ya que al ser la mayor parte de ella de carácter débil y muchas veces con cantidad inapreciable se escapan a la observación automática. Aunque la precipitación suele ser líquida es normal la presencia de nieve y nieve granulada.

La evolución de la presión anual en los años de registro, no sigue la pauta marcada para la región antártica, quizás por encontrarse en el extremo norte de la misma, con máximos barométricos en enero y junio, de forma que tenemos un máximo en julio, junto a otro al principio de la primavera y otoño, con mínimos en abril y noviembre. Lo que si es característico es el gran rango de amplitud en las presiones registradas que alcanzan los 1032 hpa en su máximo y los 950 hpa en los registros mínimos. Es habitual el paso rápido y continuo de borrascas que provocan grandes oscilaciones de presión con tendencias que pueden llegar a descensos de más de 20 mb en 12 horas seguidas de similar aumento en las 12 horas siguientes, lo que entraría en la definición de las llamadas bombas meteorológicas (Simmonds et al., 2003).

### 5. Comparación de las condiciones meteorológicas de la península Byers y la BAE Juan Carlos I

Analizadas las características climatológicas en Byers y la BAE Juan Carlos I, el paso siguiente es estudiar si hay una relación consistente entre los datos obtenidos entre ambas estaciones durante el periodo de observaciones que haga posible extrapolar los datos de Byers al periodo de medidas en Juan Carlos I.

Para ello hemos hecho dos tipos de correlaciones lineales: Entre los valores simultáneamente tomados entre ambas estaciones y entre los valores de los resúmenes diarios obtenidos. En ambos casos se obtiene una buena correlación, Tabla 5, aunque bastante mejor en el caso de los valores diarios. Este hecho parece incongruente, pero su explicación puede estar en la existencia de un retardo entre las variaciones que se registran en uno y otro lugar debido a la distancia o a los fenómenos locales que se pueden dar.

La lluvia tiene la menor correlación debido a causas meteorológicas, como las distintas condiciones del entorno local, y técnicas, ya que se mide manualmente en Byers a intervalos de 24 h, desde las 8 h a las 8 h locales del día siguiente, mientras que los valores de la BAE Juan Carlos I corresponden a los valores de 0 a 24 horas locales y son medidos por la estación automática.

La radiación presenta una buena correlación en valores diarios, mientras que desciende en los semihorarios, pero las condiciones locales hacen que la nubosidad, simultáneamente, sea muy distinta en las dos estaciones. La estación BJCI, está situada a la falda de la montaña, lo que da lugar a un forzamiento del ascenso de viento muy húmedo que hace aumentar esa cubierta de nubes en el segundo cuadrante y que la radiación media sea algo inferior a la de Byers.

La primera comparación entre ambos observatorios habrá de hacerse en el periodo común de datos para ver el comportamiento existente en ambos puntos durante el mismo. Si estudiamos los estadísticos resultantes de estas diferencias obtenemos la tabla 6. En ella podemos observar que la temperatura es, por lo general, más alta en la BJCI que en Byers, con un valor medio de 1°C. Lo mismo ocurre con los valores máximos y mínimos, con diferencias acusadas, en

algunas ocasiones, que alcanzan los 8 °C en la máximas y los 11 en las mínimas.

Con la humedad ocurre lo mismo, unas 10 unidades más elevada en la BJCI, lo que puede deberse a la diferencia de temperatura entre ambos observatorios, y respecto a la velocidad de viento medio es prácticamente el doble en Byers, con una diferencia

Variable diaria	R	Variable diaria	R
Tmd	0,97	Vmd	0,78
Tmx	0,89	Vmx	0,83
Tmn	0,95	Rad	0,91
Hum	0,78	Ts	0,89
Lluvia	0,53	Tsmx	0,95
		Tsmn	0,94

Tabla 5: Correlación entre los datos de Byers y la BAE Juan Carlos I

que alcanza los 12 km/h. En las rachas máximas la diferencia disminuye a 7 Km/ a favor de Byers. Respecto a la radiación global se observa que es más abundante en Byers ya que se trata de una zona menos cubierta de nubes que la BJCI, aunque en esta última los valores más elevados pueden superar a Byers debido a la orografía de Bahía Sur y la situación del observatorio, donde el sensor tiene una visión completa del cielo, que hace que en un día despejado y con las laderas con nieve pueda haber una parte importante de energía reflejada. La temperatura junto al suelo también es superior en la BJCI, con diferencia similar en valores medios a la de la temperatura a 1,7 m de altura. Algo similar ocurre en los valores de máximas y mínimas junto al suelo, aunque en el caso de las máximas la diferencia sólo tiene un valor medio de 0,4 °C.

La precipitación no admite una buena comparación por los distintos periodos de medida, pero en el 2002 se recogieron más del doble de litros por metro cuadrado de lluvia en la BJCI que en Byers. Eso resulta lógico de la situación de Juan Carlos I en la ladera de la montaña, frente a Byers que está situada en una zona llana y lejos de cualquier elevación.

Se puede observar que disminuyen apreciablemente las diferencias en las temperaturas del aire desde la primavera de 2003 y aumentan desde el invierno de 2002 las de las temperaturas medias junto al suelo. Es destacable que la mayor diferencia en la radiación registrada entre ambas estaciones se da durante la primavera.

### 6. Conclusiones

El interés científico en las zonas polares y en especial la Antártida sigue vigente y en especial en un momento en el que se está preparando el cuarto año polar internacional y cuando la comunidad internacional ha declarado el continente antártico como destinado a la Ciencia.

La dificultad de trabajar con series de datos antárticos es un hecho general en todas las estaciones. Las series son cortas y con lagunas, además, muchas veces hay que poner en duda los datos existentes. Los sistemas de observación han de tender a automatizarse en lo posible con el fin de evitar la influencia del frecuente cambio de personal o su escasa preparación



	T	Tmx	Tmn	H	V	Vmx	R	Ts	Tsx	Tsn
Media	0,9	1,4	1,0	-10	-12	-7	-769	1,0	0,4	1,0
Máxima	4,2	8,1	11,2	15	20	55	12107	8,2	5,4	11,8
Mínima	-1,7	-3,0	-4,0	-25	-32	-60	-10030	-2,4	-3,7	-3,7
STD	0,8	1,5	1,4	5	7	12	2979	1,3t	1,6	1,9

Tabla 6: Diferencias entre los datos diarios de BJCI y Byers

en algunas ocasiones.

La instalación de una EMA, que en nuestras latitudes es relativamente simple, se convierte en un reto para las zonas polares. Los problemas logísticos y de mantenimiento y consumo eléctrico limitan cualquier actuación en ese sentido, por lo que el diseño y dimensionamiento de dicha estación es un elemento fundamental para intentar garantizar, dentro de lo posible, el éxito del trabajo.

Los objetivos planteados por el proyecto Limnopolar son de gran interés en una zona en la que se está produciendo uno de los mayores calentamientos del planeta en los últimos años. Aunque la serie meteorológica en la Península de Byers es corta, su estudio climatológico se puede abordar al existir estaciones cercanas en la isla, como la BAE Juan Carlos I e islas cercanas, como Rey Jorge. No somos capaces de deducir tendencias climáticas en la isla Livingston por la brevedad de la serie, pero por el comportamiento de estaciones existentes en las islas Shetland (Turner et al., 2005) y efectos indirectos como el retroceso glaciar (Calvet et al., 1999), es presumible un fuerte calentamiento en la isla Livingston con las consecuencias derivadas de este hecho para los ecosistemas presentes en la misma, como la modificación de los mismos y aparición de otros ecosistemas correspondientes a latitudes más bajas.

Desde el punto de vista climático, el hecho característico en la zona es la existencia de un verano con temperaturas superiores a 0°C y precipitaciones de agua líquida. Este verano suele abarcar diciembre, enero y febrero, aunque puede acortarse, especialmente por comenzar algo más tarde. La variabilidad interanual en las temperaturas y precipitación es muy elevada. La península de Byers es alrededor de 1° C más fría que la BAE Juan Carlos I y los valores extremos son más altos, entre 1 y 1,5°C, en general, en la BJCI, pero lo más destacable es que la velocidad media del viento es el doble, 25 Km/h en Byers frente a 13 de la BJCI. Ello no se da en vientos extremos, donde las diferencias en las rachas máximas no son significativas. No obstante la rosa de vientos es similar en ambos lugares, lo que destaca la importancia de la protección de las montañas situadas al este de la Base, a sus espaldas, en la protección frente al viento en el enclave de la BJCI.

La amplitud térmica diaria es muy baja, de unos 2°C, y en el caso de la presión, por el paso de continuas borrascas, es un hecho normal la presencia de grandes ascensos y descensos de la misma, con tendencias sostenidas de más de 1 hpa/hora que, en ocasiones, llevan asociados fuertes temporales de viento y precipitación. En los últimos años han aparecido durante el verano episodios de precipitación muy intensos, de hasta 50 mm en menos de 12 horas en la BJCI, extraños para estas latitudes y asociados a los fenómenos denominados bombas meteorológicas

(Simmonds et al., 2003), lo que constituye un fenómeno digno de estudio por la violencia que los caracteriza.

En el caso de la irradiación global solar resulta significativo el que los máximos horarios suelen aparecer antes del solsticio de verano, posiblemente por ser ésta una estación de más nubosidad y más lluviosa que la primavera, al penetrar más al sur durante el verano el cinturón de bajas presiones que rodea el continente antártico.

**Agradecimientos.** Este estudio es parte del proyecto REN2000-0435 ANT de la CICYT. Los autores agradecen la ayuda prestada por los compañeros de LIMNOPOLAR que han atendido la estación meteorológica y a la UTM y el buque Las Palmas que han hecho posible la realización de todo el proyecto. Hemos de agradecer a la Dra. Manola Brunet sus comentarios y críticas al artículo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Bañón, M. (1989). *Observaciones meteorológicas en la B.A.E. Juan Carlos I*. Paralelo 37°. Revista de Estudios Geográficos.
- Bañón, M. (1991). *El clima de las Shetland del Sur y Norte de la Península Antártica. Caso de la B.A.E. Juan Carlos I*. III SIMPOSIUM DE ESTUDIOS ANTARTICOS.
- Bañón, M. (1993). *Resúmenes climatológicos de las campañas desarrolladas en la B.A.E. Juan Carlos I*. V SIMPOSIUM ESPAÑOL DE ESTUDIOS ANTARTICOS.
- Bañón, M. (2001). *Observaciones meteorológicas en la B.A.E. Juan Carlos I*. Instituto Nacional de Meteorología.
- Bañón, M. (2004). *Introducción al clima de la península de Byers Isla Livingston, Antártida. Comparación con la BAE Juan Carlos I*. Trabajo de suficiencia investigadora del Instituto Universitario de Geografía. Universidad de Alicante.
- Braun M. (2001). *Ablation on the ice cap of King George Island (Antarctica)*. Doctoral tesis. F. of Earth Sciences Albert-Ludwigs – Universität Freiburg I BR.
- British Antarctic Service. <http://www.nerc-bas.ac.uk/public/icd/gjma/>

- Calvet J., García Sellés D. y Corberá J.(1999). *Fluctuaciones de la extensión del casquete glacial de la isla Livingston (Shetland del Sur) desde 1956 hasta 1996*. Acta Geológica Hispánica, vol. 34, ° 4. Huiskes, A(2002). *Regional Sensitivity to Climate Change In Antarctic Terrestrial and Limnetic Ecosystems*. Unit for Polar Ecology Netherlands Institute of Ecology Yerseke, The Netherlands September 2002
- IPCC(2001). *Informe especial del IPCC. Impactos regionales del cambio climático. Evaluación de la vulnerabilidad*. PNUMA/OMM.
- IPCC(2001). *Tercer Informe de Evaluación. Cambio climático 2001. La base científica*. PNUMA/OMM.
- Kejna, M.(2003). *Trends of air temperature of the Antarctic during the period 1958-2000*. Polish Polar Research, Vol. 24, n° 2.
- King J.(1994). *Recent climate variability in the vicinity of the Antarctic Peninsula*. International Journal of Climatology, vol 14.
- King J.C. and Turner J.(1997). *Antarctic Meteorology and Climatology*. Cambridge University Press.
- Lewis Smith, at al.(1984). *Populations of Antarctic Hairgrass (Deschampsia antarctica) Show Low Genetic Diversity*. Bioone Journals, Vol. 35
- Martinez de Pison E., Serrano E., Arche A., and Lopez-Martinez, J.(1996). *Glacial Geomorphology*. Geomorphological Map of Byers Peninsula, Livingston Island, BAS GEOMAP 5A, p. 23-27.
- Quintana J. y Carrasco J.(1997). *Estudio de la temperatura superficial del aire en la Península Antártica entre 1961 y 1994*. Gestión de sistemas oceanográficos del Pacífico Oriental.
- Quintana J. y Carrasco J.(2004). *Temperature and precipitation behavior during 1961-1998 period at the Northern tip of Antarctic Peninsula*. American Meteorological Society. Meeting Annual, 2004.
- Rau F. and Braun M.(2002). *The Regional distribution of the dry snow zone on the Antarctic Peninsula north of 70° South*. Annals of Glaciology 34 (2002).
- Regional Sensitivity to Climate Change In Antarctic Terrestrial and Limnetic Ecosystems (RiSCC) Manual*. Version 1.0 25/09/2002.
- Schwerdtfeger W.(1984). *Weather and Climate of the Antarctic, Developments in Atmospheric Sciences*. Elsevier Science Publishing Company Inc.
- Serrano E. (2001). *Espacios protegidos y política territorial en las islas Shetland del Sur (Antártida)*. Boletín de la A.G.E. n° 31.
- Simmonds I. and al.(2003). *Synoptic activity in the seas around the Antarctic*. Monthly Weather Review, Vol.131.
- Turner J. and al.(2004). *The SCAR READER Project. Toward a HighQuality Database of Mean Antarctic Meteorological Observations*. Journal of Climate, Vol. 17. July 2004.
- Turner J. and al.(2005). *Antarctic climate change during the last 50 years*. International Journal of Climatology, vol. 25.
- Turner J. and Pendlebury S.(2000). *The International Antarctic Weather Forecasting Handbook Version 1.1*. OMM, August 2000.
- Turner J.(1996). *The Antarctic First Regional Observing Study of the Troposphere (FROST) proyect*. Bulletin of the American Meteorological Society, vol 77,n° 9, September 1996.
- Turner J., Lachlan-Cope T.A. et al.(1995). *The synoptic origins of precipitation over the Antarctic Peninsula*. Antarctic Science 7(3).
- WMO (). *GUIDE TO METEOROLOGICAL INSTRUMENTS AND METHODS OF OBSERVATION*. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Nº 8.