



## Análisis de los ciclos de congelación y descongelación en la capa activa en el entorno de la BAE JCI. Periodo 2000-2011.

### Study of the active layer freezing and thawing cycles in the surroundings of the Spanish Antarctic Station JCI. 2000 to 2011.

M. Ramos<sup>(1)</sup>; M. A. De Pablo<sup>(2)</sup>; A. Molina<sup>(3)</sup>; G. Vieira<sup>(4)</sup>; A. Trindade<sup>(4)</sup>; A. Correia<sup>(5)</sup>

(1) Department of Physics. Alcalá University, [miguel.ramos@uah.es](mailto:miguel.ramos@uah.es)

(2) Department of Geology. Alcalá University.

(3) Center of Astrobiology. INTA-CSIC.

(4) Institute of Geography and Territorial Planning, University of Lisbon.

(5) Department of Physics. Évora University.

#### SUMMARY

Close to the Spanish Antarctic Station our research team drilled, at the 1999-2000 Antarctic campaign, a 2,30 m shallow borehole in quartzite bedrock. This borehole was instrumented with temperature data loggers (Tinytag model) that have allowed us to register the gradient thermal in a continuous regime evolution during the 2000-2011 period. The analysis of the temperature data allows to describe the temporal evolution of the freezing and thawing cycles in the active layer, as well as the N-Factor variability, related with the soil surface thermal behavior and its energy balance. In this work we discuss the different freezing and thawing mechanisms in monthly and annual periods. The study shows a important freezing and thawing inter annual variability,, the annual cumulative index showed values in the following intervals: freezing index,  $I_f$  (-700, -300 °C day) and thawing index  $I_t$  (400, 700 °C day).

#### 1. INTRODUCCIÓN

La Isla Livingston (62° 39' S; 60° 21' W) forma parte del archipiélago de las Shetland del Sur situado al norte de la península antártica en la región bioclimática que se denomina como Antártida marítima. Su clima está caracterizado por inviernos largos con temperaturas por debajo del punto de fusión del agua en condiciones normales (0°C) y breves veranos con periodos de fusión. Las precipitaciones son abundantes y pueden ser líquidas en verano, teniendo un valor en régimen anual medio, de entre 470 y 700 mm de agua equivalente; siendo el régimen de innivación muy variable de un año para otro (Styszynska et al., 2004). La distribución del permafrost en la zona de estudio básicamente es función de las características geológicas, edafológicas y topográficas del terreno habiendo una aproximada distribución altitudinal que estaría representada por una zona costera con permafrost ocasional (0 a 100 m s.n.m.), otra de permafrost discontinuo (100 a 175 m s.n.m.) y encontrando por encima de esta cota permafrost continuo (Vieira et al., 2010). Además, la posición latitudinal de esta isla se encuentra en el tránsito de la isoterma estacional del aire -1°C, que tiene como consecuencia la existencia de permafrost (Bockheim., 1995) (Figura 1).

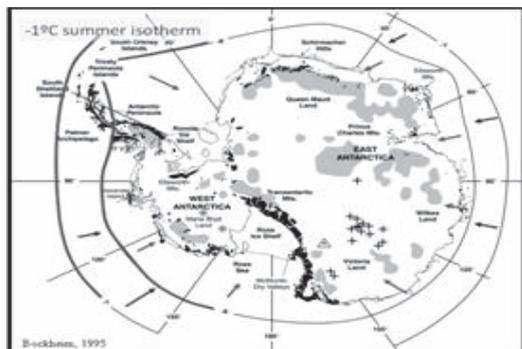


Figura 1 - Posición de la isoterma de la temperatura media anual del aire -1°C, característica de la presencia de permafrost en estas latitudes, y su variación durante el verano y el invierno. Mapa base, distribución del permafrost en la Antártida según Bockheim (1995).

La tendencia de la temperatura media anual de los últimos 50 años nos ofrece un incremento regional de aproximadamente

0,25°C/década (Turner et al., 2005) (Figura 1), para unas temperaturas medias anuales del aire a nivel del mar, en esta zona, dentro del intervalo (-2,6°C, -1,9°C) (ver Tabla 1).

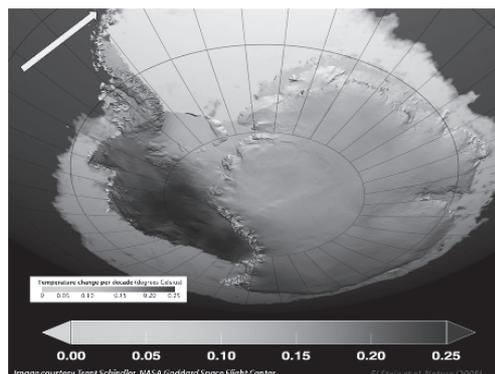


Figura 2 - Variación de la temperatura media superficial por décadas, distribuida a lo largo de la Antártida, se aprecia la fuerte tendencia positiva en la zona de la península antártica (Steig et al., 2009).

Tabla 1 - Temperaturas medias anuales del aire para diferentes periodos y emplazamientos en la zona de la península antártica ([www.antarctica.ac.uk/met/READER/surface/stationpt.html](http://www.antarctica.ac.uk/met/READER/surface/stationpt.html)).

\*MAAT.- Mean Annual Air Temperature.

Antarctic Station	Latitude	Longitude	Height (m) asl	Period	MAAT (°C)
Esperanza	63.4°S	57.6°W	13	1960-2006	-5.2
Faraday/Vernadsky	65.4°S	64.4°W	11	1947-2004	-3.9
Arctowski	62.1°S	59°W	-	1977-1996	-1.6
Ferraz	62.1°S	58.4°W	-	1986-2005	-1.8
Great Wall	62.2°S	59.6°W	10	1987-2006	-1.9
King Sejong	62.2°S	58.7°W	11	1988-2006	-1.8
Marsh	62.4°S	58.9°W	10	1987-2006	-2.3
Jubany	62.2°S	58.6°W	4	1987-2006	-1.6
Bellingshausen	62.2°S	58.9°W	16	1968-2006	-2.4
Deception	63.0°S	60.7°W	8	1959-1967	-3.2

Ta (°C):MAAT=-2,6 °C

Ta (°C):MAAT, sin datos de Faraday, Esperanza y Deception = -1,9 °C

Durante la campaña antártica 1999-2000 se realizó una perforación somera (230 cm de profundidad) en las proximidades de la Base Antártica Española Juan Carlos I en un afloramiento rocoso de cuarcita denominado Incinerador (62° 39' 51,2'' S; 60° 23' 09,0'' W) (35 m s.n.m.) (Ramos and Vieira., 2003, 2004 and 2009). El

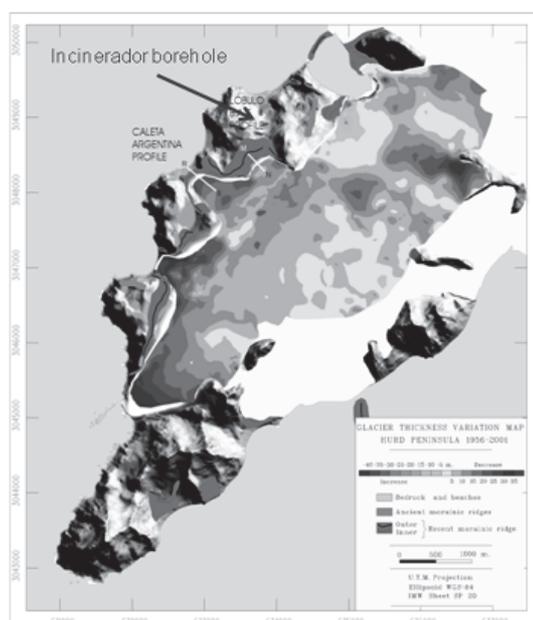
objetivo era realizar la medida de la evolución temporal del gradiente térmico en la capa activa, no afectada en este caso por los procesos de congelación/descongelación de agua, ya que la roca cuarcita tiene una porosidad muy baja y una fracturación residual, que, aunque podría contener reservorios de agua su volumen sería despreciable.

El estudio de la señal climática en el interior de la capa activa durante los últimos 11 años es el propósito de este trabajo, analizando los periodos de congelación (temperaturas inferiores a 0°C) y descongelación (temperaturas superiores a 0°C) en los diferentes niveles de profundidad del suelo así como en el aire. Además se estudiarán los índices acumulados de congelación/descongelación para cada periodo invierno/verano y se realizará un análisis comparativo durante dicho periodo de tiempo extrayendo las conclusiones climáticas pertinentes.

## 2. MÉTODO

Durante la campaña antártica 1999-2000 se realizó una perforación en afloramiento rocoso de cuarcita situado en las proximidades de la Base Antártica Española Juan Carlos I (62° 39' 51,2" S; 60° 23' 09,0" W), a unos 35 m s.n.m., mediante el sistema de rotación con cabezal de diamante con un diámetro de 125 mm alcanzándose una profundidad de 230 cm (ver *Figura 3*; Ramos y Vieira., 2003, 2004 y 2009).

En su interior se instalaron sensores de temperatura conectados a sistemas de adquisición de datos autónomos y de reducido tamaño, tipo Tinytag (<http://www.gemindataloggers.com/>) basados en termistores (0,06°C de resolución y 0,2°C de precisión), dichos sistemas autónomos han sido reemplazados periódicamente para evitar errores de calibración y deriva. La posición y el periodo de lectura de los mismos fue variando en sucesivas campañas hasta normalizarse, a partir del año 2003, en medidas horarias en los niveles (5, 15, 40, 90, 150 y 230 cm), además se registraron valores de la temperatura del aire a 160 cm de altura con un sistema de adquisición de datos similar, con la misma frecuencia de registro y precisión (*Figura 4*).



*Figura 3* – Posición del sondeo Incinerador en península Hurd, la base cartográfica corresponde a la variación de los frentes glaciares en el área de trabajo entre 1956 y 2001 (Navarro et al., 2005).



*Figura 4* –Evolución temporal del gradiente térmico en el interior del sondeo Incinerador durante 2005. Se aprecian los periodos de congelación y descongelación en la intersección con 0°C, además de la atenuación de la amplitud de la señal climática con la profundidad así como su desfase temporal debido a la inercia térmica del suelo.

Considerando que la cuarcita no varía sus parámetros termodinámicos, en particular su difusividad térmica, estacionalmente y considerando lineal el proceso de transmisión del calor en su interior, se ha extrapolado el valor de la temperatura en la superficie  $x=0$  (1) mediante la aplicación de la ley de Fourier utilizando los niveles (15 cm y 40 cm), comunes durante todo el periodo de registro, ya que el registro en la profundidad 5 cm no ha sido continuo durante todo el periodo de medida.

$$T(x=0) = T(40) - \frac{T(x=40) - T(x=15)}{25} * 40 \quad (1)$$

A partir de los valores medios diarios de la temperatura ambiente, superficial y de las temperaturas para los diferentes niveles, se han analizado los periodos de congelación ( $T_{\text{dia}} < 0^\circ\text{C}$ ) y descongelación ( $T_{\text{dia}} > 0^\circ\text{C}$ ) para calcular en cada nivel los índices de congelación y descongelación (2). Siendo  $T_f = 0^\circ\text{C}$  la temperatura de fusión del agua en condiciones normales

$$I_{\text{cong / des}} = \int_{\text{cong / des}} (T - T_f) dt \quad (2)$$

Así como el factor-N (Andersland and Ladanyi, 1994) correspondiente (3):

$$FN = \frac{I_{\text{suelo}}}{I_{\text{aire}}} \quad (3)$$

Este parámetro nos indica el acoplamiento entre la variación térmica del suelo y el aire, está por lo tanto estrechamente relacionado con las condiciones de aislamiento de la superficie del suelo (capa de nieve) y el régimen de intercambio de energía entre el suelo y el aire.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante el periodo completo de registros (25/02/2000 a 10/01/2012) la temperatura media del aire registrada fue de  $-1,7^\circ\text{C}$ , algo superior a la media histórica regional que aparece en la Tabla 1, y la temperatura media de la superficie del suelo extrapolada mediante (1) arroja un valor de  $-0,3^\circ\text{C}$ .

La representación gráfica de la temperatura del aire,  $T_a$ , respecto de la temperatura extrapolada de suelo,  $T_s(x=0)$ , se presenta en la *Figura 5*, mostrando una ligera tendencia lineal con pendiente aproximada de 0,74.

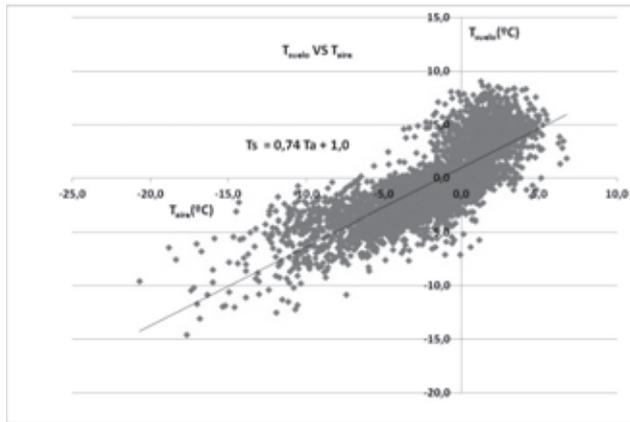


Figura 5 – Nube de distribución de puntos en la representación de la temperatura del aire,  $T_a$ , respecto de la temperatura de la superficie del suelo,  $T_s(x=0)$  extrapolada a partir de las temperaturas de sub-suelo registradas durante el periodo completo de registro 2000-2011. Se aprecia una ligera tendencia lineal de pendiente 0,74, que está relacionada con el valor promedio del factor-N durante el intervalo total de tiempo analizado.

Para realizar un primer estudio de la variabilidad interanual de los índices de congelación/descongelación del suelo, se han calculado y representado en la Figura 6 los valores mensuales de los índices de descongelación (positivos) y congelación (negativos) durante todo el periodo de medidas. A partir de los anteriores resultados observamos que hay una mayor variabilidad interanual en los registros de congelación que en los de descongelación para el mismo periodo, posiblemente relacionados con la variabilidad de la capa nival que produce un efecto aislante sobre la superficie del suelo en el intercambio energético con la capa límite superficial del aire (Goodrich, 1982).

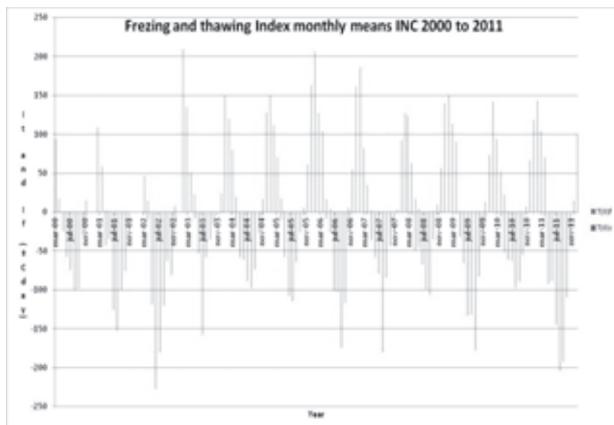


Figura 6 – Valores de los índices de congelación y descongelación mensuales durante el periodo completo de registros 2000-2011.

Dicha variabilidad queda manifestada también en la representación de los índices anualizados según se representan en las Figuras 7 (congelación) y Figura 8 (descongelación), donde la máxima variación interanual de  $I_a$  alcanza valores de unos 500 °Cdía para el caso de la congelación y de sólo 300 °Cdía en los periodos de descongelación. Se ha representado el periodo 2003-2011 exclusivamente ya que es en el que la serie de datos presenta mayor homogeneidad.

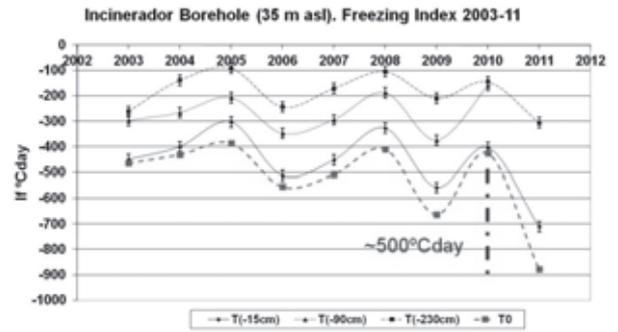


Figura 7 – Evolución de los índices de congelación anuales durante el periodo 2003-2011, para el aire, la superficie del suelo y los diferentes niveles de profundidad.

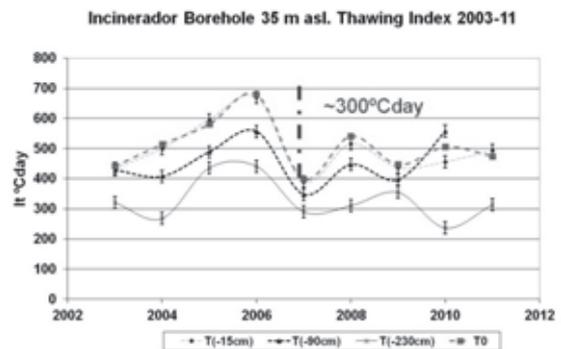


Figura 8 – Evolución de los índices de descongelación anuales durante el periodo 2003-2011, para el aire, la superficie del suelo y los diferentes niveles de profundidad.

El estudio de la tendencia de los registros de los índices de congelación/descongelación para el suelo y el aire muestra una tendencia diferenciada entre los periodos de congelación y descongelación. Para el caso del periodo de congelación se aprecia en la Figura 9 una tendencia al enfriamiento, más acusada y continua en el caso de la superficie del suelo que en el aire durante el periodo 2003-2011 y una pendiente aproximada de  $-34,2^\circ\text{Cdía/año}$ .

En el caso de los índices de descongelación, durante el mismo periodo de registros, la tendencia es también hacia el enfriamiento pero en forma mucho más moderada y casi inapreciable, con una pendiente, para el índice de la superficie del suelo, de  $-4,95^\circ\text{Cdía/año}$  (Figura 10).

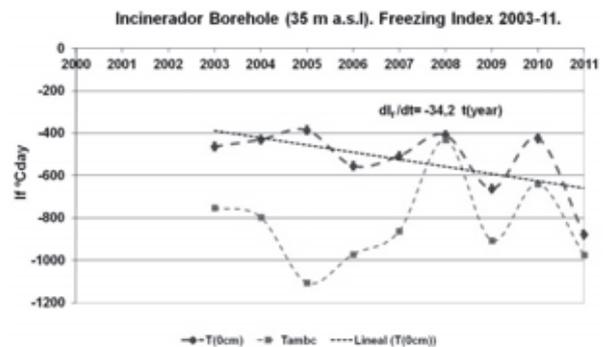
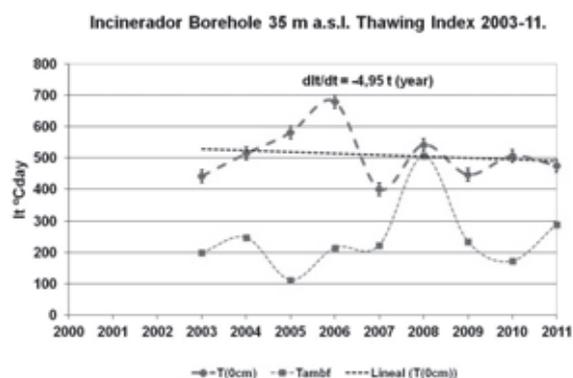
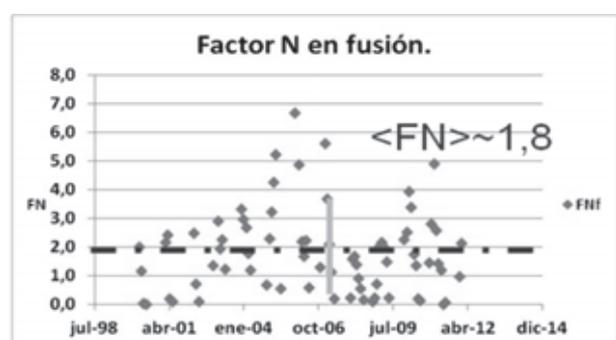


Figura 9 –Evolución temporal y tendencia de los índices de congelación, de la superficie del suelo y del aire, durante el periodo 2003-2011.

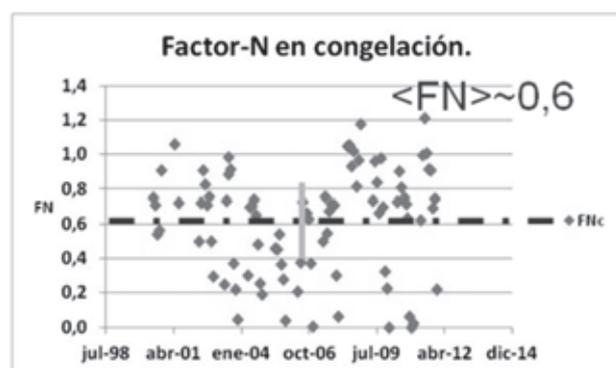


**Figura 10** –Evolución temporal y tendencia de los índices de descongelación, de la superficie del suelo y del aire, durante el periodo 2003-2011.

Finalmente la representación temporal de los Factores-N (FN) en los procesos de congelación (Figura 11) y descongelación (Figura 12) nos muestran un valor medio, durante el periodo completo de registros, más elevado ( $FN \approx 1,8$ ) y con mayor variabilidad para el caso de la fusión que en el caso de los periodos de congelación ( $FN \approx 0,6$ ). El valor superior a la unidad de  $FN > 1$  durante el verano manifiesta la pérdida de calor de la superficie del suelo que es transferida al aire debido fundamentalmente a la absorción de radiación solar por parte de la superficie, el valor menor de la unidad,  $FN < 1$ , en este periodo está relacionado con una transferencia de energía desde el aire al suelo. Durante el periodo de congelación, el valor menor que la unidad de  $FN < 1$  muestra que el sentido del intercambio de energía, las temperaturas del suelo son superiores a las del aire, parte del suelo hacia el aire, invirtiéndose en el caso en el que  $FN > 1$ . Dicha variación nos muestra la importancia del aislamiento térmico provocado por la capa nival durante el invierno frente a la absorción de energía solar por la superficie del suelo sin nieve durante el verano.



**Figura 11** –Evolución temporal del Factor-N durante los periodos de descongelación (fusión) en la superficie del suelo del sondeo incinerador 2000-2011. Valor del promedio de este valor durante el periodo de registro 2000-2011.



**Figura 12** –Evolución temporal del Factor-N durante los periodos de congelación en la superficie del suelo del sondeo incinerador 2000-2011. Valor del promedio de este valor durante el periodo de registro 2000-2011.

#### 4. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos podemos concluir:

- El método de medida de la evolución del gradiente térmico en la capa activa del permafrost nos permite analizar la onda térmica propagada a través de la capa límite del suelo en su contacto con la capa límite atmosférica como parámetro integrante del balance de energía intercambiado entre el suelo y el aire.

- Durante el periodo de medida 2000-2011 la temperatura media del aire en nuestra instalación es un poco superior a la temperatura media regional del aire registrada en los últimos 50 años.

- La variabilidad de la evolución temporal de los índices de congelación es superior a aquellos de descongelación, posiblemente asociado a la variabilidad de la capa nival que genera un efecto aislante sobre la superficie del suelo.

- La tendencia de los índices anuales de congelación y descongelación durante el periodo 2003-2011 se dirige hacia el enfriamiento, mostrando los índices de congelación una tendencia más pronunciada que los de descongelación.

- La evolución de los valores de los factores-N durante los periodos de congelación/descongelación muestran una tendencia diferente. En el caso de la congelación el valor menor que la unidad ( $FN < 1$ ) nos expresa el aislamiento térmico del suelo debido a la capa nival, que además reduce la amplitud de las señales térmicas propagadas hacia el suelo y por lo tanto reduce la variabilidad del factor-N en estos casos. Durante los periodos de descongelación el valor mayor que la unidad del factor-N ( $FN > 1$ ) nos indica la importancia de la absorción de la radiación solar por la superficie del suelo desnuda de nieve durante el verano y su alta variabilidad.

#### 5. REFERENCIAS

- Andersland, O.B; Ladanyi, B, (1994). An Introduction to Frozen Ground Engineering. Chapman & Hall. ISBN: 0-412-98201-3
- Bockheim, J., (1995). Permafrost distribution in Southern circumpolar region and its relation to the environment: a review and recommendations for further research, Permafrost Periglac., 6, 27-45.
- Goodrich, L. E., (1982). The influence of snow cover on the ground thermal regime, Can. Geotech. J., 19, 421-432.
- Navarro, F., Macheretb, Y, y Benjumea, B., (2005). Application of radar and seismic methods for the investigation of temperate glaciers, Journal of Applied Geophysics, 57(3), 193-211.
- Ramos, M. and Vieira, G., (2003). Active layer and permafrost monitoring in Livingston Island, Antarctica. First results from 2000 and 2001, En: Permafrost – Proc. 8th International Conference on Permafrost, edita: Phillips, M., Springman, S. M., and Arenson, L. U., Zurich, Switzerland, Balkema, Lisse, Rotterdam, 929-933.
- Ramos, M. y Vieira, G., (2004). Variabilidad térmica de la capa activa y evaluación de la energía perdida por el suelo durante el proceso de congelación en la isla Livingston (Antártida), Inviernos 2000, 2001 y 2002, Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural, (Sec. Geología), 99, 1-4, 83-92.
- Ramos, M y Vieira, G., (2009). Evaluation of the ground surface Enthalpy balance from bedrock temperatures (Livingston Island, Maritime Antarctic). The Cryosphere, 3, 133-145.
- Styszynska, A., (2004). The origin of coreless winters in the South Shetlands area (Antarctica). Polish Polar Research, 25, 45-66.
- Steig, E.J., D.P. Schneider, S.D. Rutherford, M.E. Mann, J.C. Comiso, y D.T. Shindell, 2009: Warming of the Antarctic ice-sheet surface since the 1957 International Geophysical Year. Nature, 457, 459-462.
- Turner, J., Colwell, S. R., Marshall, G. J., et al., (2005). Antarctic climate change during the last 50 years, Int. J. Climatol., 25, 279-294.
- Vieira, G; Bockheim, J; Guglielmin, M; Balks, M; Abramov, A; Boelhouwers, J; Cannone, N; Ganzert, L; Gilichinsky, DA; Gotyachkin, S; Lopez-Martinez, J; Meiklejohn, I; Raffi, R; Ramos, M; Schaefer, C; Serrano, E; Simas, F; Sletten, R; y Wagner, D (2010). Thermal State of Permafrost and Active-layer Monitoring in the Antarctic: Advances During the International Polar Year 2007-2009. Permafrost And Periglacial Processes. 21(2), 182-197.

*Agradecimientos:* A la agencia financiadora del Ministerio Español de Ciencia y tecnología a través de los proyectos POL2006-01918 y CTM2009-10165. Así como al programa polar español y sus medios logísticos.