

# Estadística en la Antártida

por

Ana Justel, Universidad Autónoma de Madrid y Equipo  
LIMNOPOLAR

La Antártida es el espacio protegido más grande del planeta, un gran laboratorio natural dedicado a la investigación científica. Especialistas de muy diversas disciplinas han colaborado en los últimos cien años para profundizar en el conocimiento de la Antártida en un marco de cooperación internacional y espíritu interdisciplinar. Biólogos, geólogos, físicos, son los típicos científicos que cualquier persona espera encontrar en este lugar, y se convierte en una sorpresa descubrir la presencia habitual de matemáticos en las campañas antárticas españolas. La pregunta que más se nos hace es “¿y qué hace un matemático en la Antártida?”. La respuesta no es fácil porque hacemos muchas cosas distintas. Se participa a muy distintos niveles, desde liderando grupos formados principalmente por matemáticos, hasta formando parte de equipos interdisciplinarios que investigan el medio físico o natural. Se trabaja en ecuaciones y también se aplican métodos estadísticos para el análisis de los datos polares. Entre los grupos de investigación españoles hay matemáticos modelizando la dinámica de los glaciares de la Isla Livingston, estudiando la vulcanología de la Isla Decepción, o analizando los datos ecológicos de la Península Byers.

En este trabajo se describen algunos de los estudios en los que se analizan con métodos estadísticos, clásicos y nuevos, los datos registrados por el equipo del proyecto Limnopolar. Un proyecto financiado por el Gobierno de España en el que se investigan los ecosistemas acuáticos no marinos de la Península Byers, en la Isla Livingston que pertenece al Archipiélago de las South Shetland en



la Antártida (ver [7]). Se trata de uno de los lugares donde las condiciones de trabajo son más extremas por el aislamiento, la dificultad de acceso y la meteorología. El objetivo final del proyecto es modelizar la relación entre los procesos biológicos y los ambientales para estudiar los efectos del cambio climático.



Durante las campañas antárticas la recogida de muestras es muy intensa y, posteriormente, convertir el trabajo de campo en números es muy costoso. Cuando finalmente se tiene el número, la estadística es una herramienta fundamental para el análisis y la extracción de conclusiones. Algunos de los problemas planteados por el proyecto a los que tratamos de dar respuesta con las matemáticas requieren: estimar el tiempo que permanece libre de hielo un lago antártico, estimar las condiciones ambientales óptimas de las especies polares para identificar bioindicadores de cambio climático, definir indicadores de impacto humano en áreas protegidas de la Antártida, o estudiar la tendencia de las temperaturas registradas en la Antártida que se incorporan a los escenarios de cambio climático.

Los métodos estadísticos con los que tenemos que trabajar para dar respuesta a estos problemas implican en algunos casos a los temas de investigación estadística más actual: series temporales, datos funcionales, robustez,... En estos casos los matemáticos estamos desarrollando nuevos métodos estadísticos, cuya aplicabilidad trasciende el marco de la investigación polar. Aunque la investigación antártica tiene como fin profundizar en el conocimiento del propio continente y en sus interacciones con el resto del planeta, la colaboración entre científicos de distintas disciplinas a veces genera estos importantes subproductos.

También la estadística más clásica, la que se enseña en cursos básicos de estadística aplicada, sirve para dar respuesta a algunos de los problemas planteados. Afortunadamente no siempre es necesario recurrir a métodos estadísticos sofisticados, tener que inventar técnicas nuevas, simplemente hay que hacer un buen uso de los métodos que son bien conocidos.

**Nuevos métodos estadísticos para:**

- Detección de cambios de variabilidad en series temporales para **predecir indirectamente el momento en que se congela/descongela un lago antártico, y estimar el número de días con actividad biológica**
- Analizar la tendencia de series temporales de datos funcionales en el **estudio de las temperaturas registradas en la región de la Península Antártica que se incorporan a los escenarios de cambio climático**

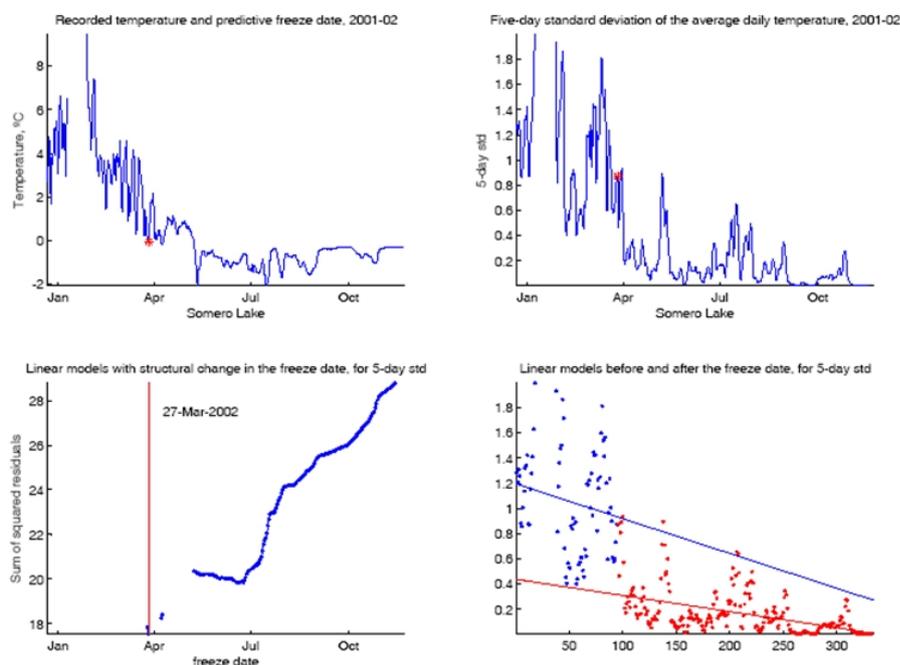
**Métodos estadísticos clásicos para:**

- Estimación robusta de **los óptimos ambientales de especies polares para identificar bioindicadores de cambio climático**
- Análisis de la varianza para seleccionar **indicadores de impacto en áreas protegidas de la Antártida**

## 1. Predicción de la cobertura de hielo en un lago antártico

En la Península Byers se produjo un retroceso glaciar hace miles de años, formándose una cantidad de lagos que no se encuentran en ningún otro lugar de la Antártida. Durante el verano austral se deshielan y se convierten en laboratorios naturales. La vida es tan escasa que las interacciones entre los fenómenos físicos y biológicos que dominan la dinámica de los lagos se pueden controlar mucho mejor que en los ambientes no polares.

Los datos que se registran durante las campañas australes no son suficientes para explicar toda la dinámica de los lagos, tenemos que inferir de las fuentes de información de que disponemos durante la parte del año en que no es posible la presencia humana. Una estación meteorológica registra datos automáticamente cada media hora durante todo el año y, por ejemplo, mide la temperatura del agua en el lago Somero. Esta serie temporal sirve para estimar indirectamente cuando se congela el lago Limnopolar, sobre el que se realizan los experimentos más importantes del proyecto. Esta variable es muy importante porque determina el tiempo que dura el ciclo de actividad biológica. Sin embargo, nunca hemos estado allí para verlo. Estimamos el momento en el que se produce el cambio en la variabilidad de la serie de temperaturas del agua como indicador de la congelación (ver [4]). Incluso este método indirecto presenta muchos problemas ya que la falta de energía durante algunos inviernos ha provocado fallos en los registros, la serie tiene muchos datos atípicos y “missing”.



Estimación del día en que se congela el lago Somero en 2002.

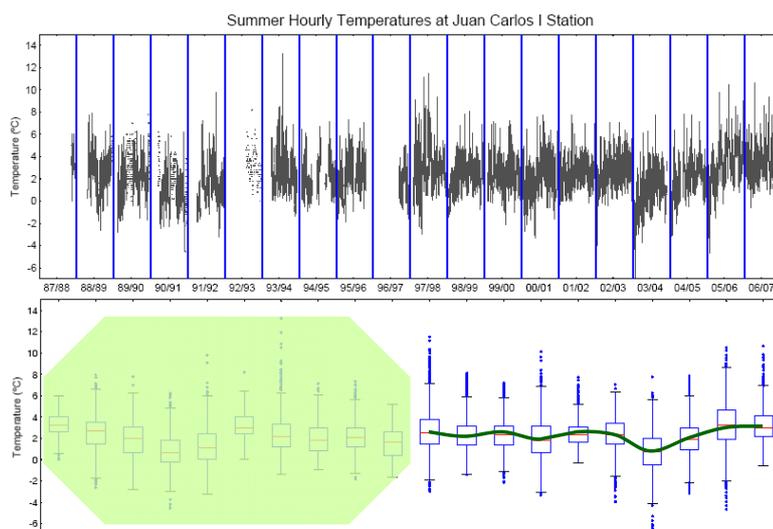
## 2. Tendencias en las temperaturas registradas en la Antártida

En los estudios sobre cambio climático existe poca información sobre la evolución de las temperaturas en la Antártida. Las principales conclusiones señalan un incremento en la Península y zona oeste del continente, mientras que en el resto muestran una cierta tendencia al enfriamiento.

Los procedimientos estadísticos que se han empleado hasta el momento requieren series largas y continuadas. Sin embargo, esto sólo sucede en una pequeña proporción de los datos. Los datos se tratan agregados en medias anuales o mensuales que suelen estar muy sesgadas por la abundancia de rachas de "missing data". Las principales conclusiones se basan en el ajuste por mínimos cuadrados de tendencias lineales deterministas, lo que implica asumir la hipótesis poco realista de que la evolución de la temperatura es determinista. Sorprende la poca presencia de estadísticos entre los grupos que han realizado los estudios más relevantes sobre la tendencia de parámetros meteorológicos en la Antártida.

El análisis de las temperaturas registradas en la Base Antártica Española Juan Carlos I desde su apertura en 1987 y en la Península Byers desde 2001 pone de manifiesto la necesidad de desarrollar nuevos métodos estadís-

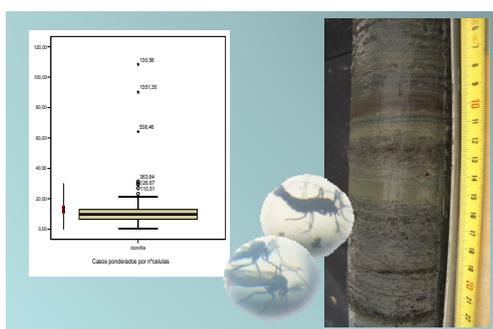
ticos que nos permitan aprender de datos problemáticos y escasos (ver [1]). Suponemos que existe una curva/función de temperatura para cada verano que se observa únicamente en periodos discretos de tiempo debido a las limitaciones que imponen los aparatos de medida. El objetivo es estudiar si una serie temporal de datos funcionales tiene o no tendencia (ver [3]).



Temperaturas registradas en la Base Antártica Española Juan Carlos I (BAE-JCI).

### 3. Óptimos ambientales de especies polares bioindicadoras

En los estudios de paleolimnología realizados en lagos antárticos se elaboran funciones de transferencia que permiten reconstruir la evolución de determinadas variables ambientales en el pasado a partir de los óptimos y tolerancias de organismos subfósiles del sedimento, como las diatomeas (algas) o los quironómidos (insectos). Necesitamos conocer cuáles son las condiciones óptimas para que se desarrolle cada una de las especies que se han acumulado en el testigo de sedimento a lo largo de la historia del lago.



Estimaciones robustas del óptimo y la tolerancia en especies polares aplicadas a testigos de sedimentos.

La forma en que hasta ahora se han estimado los óptimos ambientales se basa en una media de la variable ambiental ponderada por la abundancia de la especie. Igualmente para el rango de tolerancia se emplea la desviación típica ponderada. La representación de los datos en barras de error se emplea habitualmente para decidir qué especies son bioindicadoras.

La falta de robustez de los estimadores empleados tiene como principal consecuencia que se desechen la mayor parte de las especies por la presencia de numerosos datos atípicos en la muestra. Proponemos emplear la mediana y el rango intercuartílico ponderados como estimadores del óptimo y la tolerancia de una especie. Ahora una representación en diagramas de caja si permite seleccionar indicadores con un método que es resistente a la presencia de datos atípicos (ver [2]).

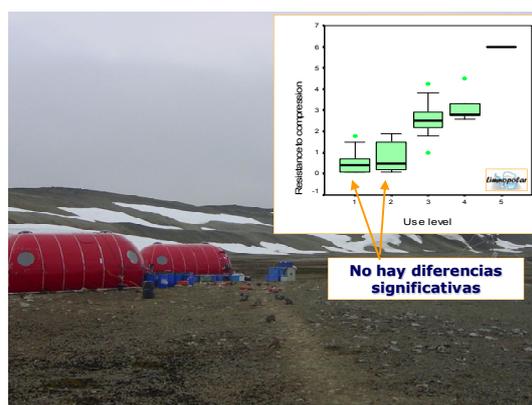
#### 4. Indicadores de impacto en áreas protegidas de la Antártida

La Península Byers tiene un régimen de protección especial dentro del Tratado Antártico por su alto interés científico, recogido en el plan de gestión del Antarctic Special Protection Area No. 126 (SCAR, 2003). Cualquier actividad que se vaya a realizar debe contar con la autorización de alguno de los países firmantes del Tratado Antártico, que exigen una evaluación previa de los impactos potenciales sobre el ecosistema. Sin embargo, apenas existen estudios científicos que midan y evalúen el impacto humano en ambientes polares.

Al igual que la Antártida se considera como un gigantesco laboratorio para biólogos, geólogos y físicos, también presenta esta característica a la hora de medir el impacto humano. Apenas existen interacciones con factores no controlados ya que nadie más que los investigadores pisan el terreno y probablemente las áreas de estudio nunca fueron pisadas previamente. Hemos analizado la degradación

del suelo en la superficie que ocupa el campamento Byers y en otros senderos creados por los investigadores para acceder a las áreas de muestreo.

Los tres indicadores diseñados muestran que el impacto siempre crece cuando aumenta el número de pisadas. Existe una alta correlación entre las medidas de dos de ellos por lo que se simplifica el sistema de indicadores.



El análisis de la varianza permite sacar conclusiones relevantes de manera simple y comprensible para muchos investigadores no especialistas en métodos estadísticos. Las principales conclusiones son que la presencia de los investigadores supone un impacto estadísticamente significativo sobre los frágiles suelos antárticos (ANOVA p-valor  $<0,0001$ ), aunque la alteración no es estadísticamente apreciable con un uso ocasional del terreno. La resistencia a la compresión depende de la distancia al centro del sendero y no es homogénea entre todos los senderos (two-way Anova p-valores:  $<0,0001$  y  $0,002$ , respectivamente). En la recuperación del sendero principal del campamento se observa una reducción de la compresión del terreno hasta niveles que no son significativamente distintos a los de un uso ocasional, aunque si son distintos cuando se comparan con las zonas no usadas (ver [5] y [6]).

## Agradecimientos

Los trabajos de investigación descritos en este trabajo se han podido llevar a cabo gracias a la financiación del Ministerio Español de Ciencia e Innovación (proyectos REN2000-0435ANT, REN2002-11617-E, CGL2004-20451-E, CGL2005/06549/02/01-ANT, CGL2007-28761-E/ANT y POL2006-06635), al trabajo de los compañeros de Limnopolar, el apoyo logístico prestado por la Unidad Técnica Marina (UTM) del CSIC y las dotaciones del Buque de Investigación Oceanográfica Las Palmas de la Armada Española.



## Bibliografía

- [1] M. Bañón, A. Justel y A. Quesada, *Análisis del topoclima y microclima de la isla Livingston, Antártida, en el marco del proyecto Limnopolar*, Manuscrito, 2009.
- [2] M. E. Cristóbal, A. Justel, M. Toro y S. Velasco, *Tolerancia y óptimos robustos de taxones en estudios de Limnología*, Manuscrito, 2009.
- [3] R. Fraiman, A. Justel y P. Llop, *Trends in series of functional data: Testing Antarctic climate change*, Manuscrito, 2009.
- [4] A. Quesada, A. Camacho, E. Fernández-Valiente, C. Rochera, A. Justel, M. Toro, E. Rico y M. Bañón, *Maritime Antarctic lake dynamics in three years under different climatic conditions*, Manuscrito, 2009.
- [5] P. Tejedó, A. Justel, J. Benayas, E. Rico, P. Convey y A. Quesada, *Soil trampling in an Antarctic Specially Protected Area: tools to assess levels of*

human impact, *Antarctic Science* **21**(3) (2009) 229–236.

[6] P. Tejedo, A. Justel, E. Rico, J. Benayas y A. Quesada, Measuring Impacts on Soils by Human Activity in an Antarctic Special Protected Area, *Terra Antarctica Reports* **11** (2005) 57–62.

[7] M. Toro, A. Camacho, C. Rochera, E. Rico, M. Bañón, E. Fernández, E. Marco, A. Justel, W. Vicent, C. Avendaño, Y. Ariosa y A. Quesada, Limnological characteristics of the freshwater ecosystems of Byers Peninsula, Livingston Island, in maritime Antarctica, *Polar Biology* **30** (2007) 635–649.

**Ana Justel Eusebio**

Universidad Autónoma de Madrid  
Departamento de Matemáticas  
Facultad de Ciencias  
Campus de Cantoblanco, 28049 Madrid  
e-mail: [ana.justel@uam.es](mailto:ana.justel@uam.es)  
<http://www.uam.es/ana.justel>  
Proyecto Limnopolar:  
<http://www.uam.es/limnopolar>

