

DATOS DEL PROYECTO

Investigador Principal:	Francisco José Navarro Valero
Título del Proyecto:	Simulación numérica de procesos termo-mecánicos glaciares
Organismo:	Universidad Politécnica de Madrid
Centro:	ETSI de Telecomunicación
Departamento:	Matemática Aplicada a las Tecnologías de la Información
Fecha de Inicio:	1-1-2003
Fecha de Finalización:	31-12-2005
Subvenciona:	Plan Nacional de I+D+i (proyecto REN2002-03199)

MEMORIA. Resumen de los resultados del proyecto en relación con los objetivos propuestos

A. RESULTADOS EN RELACIÓN CON LOS OBJETIVOS PROPUESTOS:

Se listan a continuación los principales resultados conseguidos. Las referencias se detallan en las secciones C2 y C3:

1. Diseño y construcción de un sistema de sincronización mediante fibra óptica entre emisor y receptor de radioecosonda, que permite efectuar mediciones de la velocidad de las ondas electromagnéticas en el hielo mediante métodos del tipo punto medio común (CMP) o reflexión de gran ángulo (WAR), más precisos que los basados en análisis de hipérbolas de difracción. Se describe en Vasilenko et al. (2003).
2. Utilización de dicho sistema en glaciares del Ártico (Hansbreen, en Spitsbergen) y la Antártida (Johnsons-Hurd y Bowles Plateau, en Isla Livingston) para obtener, mediante el método CMP, determinaciones precisas de la velocidad de las ondas electromagnéticas en el hielo, que han permitido conocer con mayor exactitud los espesores de hielo de los citados glaciares (Lapazaran, 2004; Jania et al., 2005).
3. Determinación del contenido en agua líquida del hielo templado en glaciares templados de la Antártida y politérmicos del Ártico, mediante la relación entre el contenido en agua y la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en el hielo (Benjumea et al. 2003; Navarro et al., 2005a; Jania et al., 2005).
4. Desarrollo de una herramienta *software* efectiva para el procesamiento de datos de radioecosondeo obtenidos con los georradars VIRL (sistema de fabricación propia, fruto de la colaboración hispano-rusa) y Ramac/GPR (equipo comercial). También es válida para datos obtenidos con cualquier otro tipo de georradar, siempre que genere su salida en formatos estándar. La herramienta desarrollada consta de un módulo de pre-procesado basado en el software de libre distribución Seismic Unix, más programas propios escritos en C, y un módulo de procesado basado en el software comercial (de bajo coste) ReflexW. Esta herramienta se ha utilizado con éxito en el procesado de datos asociado a la tesis doctoral de Lapazaran (2004) y el artículo de Jania et al. (2005).
5. Estimación de la contribución de los procesos basales (deslizamiento basal, deformación de sedimentos subglaciales) al desplazamiento global de los glaciares, con particular atención a los de la Península Hurd (Isla Livingston, Antártida). Resultados preliminares en esta línea han sido publicados en Martín et al. (2004), si bien es una línea de investigación todavía abierta y con un gran potencial de desarrollo.
6. Desarrollo de algoritmos numéricos óptimos para la resolución del sistema algebraico no lineal (simétrico, pero indefinido) resultante de la discretización del problema de Stokes (que describe la dinámica glacial)

mediante una formulación mixta velocidad-presión del método de elementos finitos. Análisis de la convergencia y estabilidad de las soluciones y obtención de acotaciones del error. Los principales resultados en esta línea aparecen recogidos en Martín (2003), Martín et al. (2004) y Lapazarán (2005).

7. Obtención de una rutina de mallado automático tridimensional (orientada a elementos finitos) con criterios glaciológicos que combine eficiencia y bajo coste computacional. Todavía en desarrollo, pero ya utilizada preliminarmente en Martín et al. (2003).
8. Obtención de un programa que permite efectuar simulaciones numéricas tridimensionales del régimen termomecánico de los glaciares (sin utilizar la aproximación de hielos poco profundos) y su evolución temporal. Se ha aplicado, en su versión tridimensional en estado estacionario, en Martín et al. (2003) y, en su versión bidimensional y dependiente del tiempo, en Martín et al. (2005).
9. Evaluación de la respuesta de determinados glaciares a los cambios climáticos. Se ha analizado el cambio de flujo de hielo en Isla Roosevelt (plataforma de hielo de Ross) durante el Holoceno (Martín et al., 2005). Análisis similares para los glaciares de Isla Livingston no han sido todavía posibles, debido a la insuficiente caracterización de los procesos de desprendimiento de témpanos en los frentes glaciares.
10. Caracterización del flujo de hielo en las zonas próximas a las divisorias de hielos, de forma que el análisis de isocronas correspondiente permita estimar la evolución glacial durante el Holoceno.
11. Aplicación del análisis anterior a divisorias de hielo del manto de hielo de la Antártida Occidental (en particular, la divisoria de Isla Roosevelt) para determinar la época de inicio del flujo característico de divisoria, como contribución a la datación del retroceso del citado manto de hielo (Martín et al., 2005).

RESULTADOS NO PREVISTOS INICIALMENTE:

Los cuatro principales resultados no previstos inicialmente han sido:

1. La aplicación, inédita en glaciología, de la relación de Riznichenko que caracteriza las propiedades elásticas de una mezcla de dos componentes, para determinar el contenido en agua del hielo templado a partir del análisis de la velocidad de propagación de las ondas sísmicas compresionales en el hielo. Éste ha sido uno de los resultados más relevantes publicados en Benjumea et al. (2003) y Navarro et al. (2005a).
2. La estimación de la estructura del glaciar Aldegondabreen (en Spitsbergen, Ártico) y la determinación de su reducción de extensión, espesor y volumen en el periodo 1936-1990, como respuesta al calentamiento experimentado en el archipiélago de Svalbard tras la finalización (tardía en esta región) de la Pequeña Edad de Hielo. Estos resultados han sido publicados en Navarro et al. (2005b).
3. La introducción de ciertos parámetros energéticos reflectivos, como el BRPN y el IRE, derivados de los estándares BRP e IRP, que permiten una mejor caracterización de la estructura reflectiva de la columna de hielo y la interfaz hielo-lecho de los glaciares, particularmente los templados y politérmicos. Estos parámetros fueron introducidos en la tesis doctoral de Lapazarán (2004) y en el artículo de Jania et al. (2005). Nuevos avances en esta línea constituyen la base de un artículo en preparación, para remitir a *Geophysical Research Letters*.
4. La identificación, en la bibliografía, de usos no adecuados de la ecuación de Looyenga (y derivadas), que caracteriza la permitividad de mezclas de dos sustancias, especialmente en sus aplicaciones a hielo templado, y la propuesta de usos alternativos de las mismas. Estos resultados se introdujeron en la tesis doctoral de Lapazarán (2004) y su elaboración posterior constituye la base de otro artículo en preparación, para remitir a *Geophysical Research Letters*. El interés fundamental de estas relaciones es la determinación del contenido en agua del hielo templado a partir del análisis de la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en el hielo.

B. RESULTADOS MÁS RELEVANTES ALCANZADOS EN EL PROYECTO

1. El resultado más relevante del proyecto ha sido la obtención de un programa que permite efectuar simulaciones numéricas tridimensionales del régimen termomecánico de los glaciares (sin utilizar la aproximación de hielos poco profundos) y su evolución temporal. Su aplicación más destacable efectuada en el contexto del proyecto ha sido la publicación sobre datación del retroceso, durante el Holoceno, del manto de hielo de la Antártida Occidental, aceptado para publicación en la revista, de alto índice de impacto, *Journal of Geophysical Research*.
2. Un segundo resultado de gran interés, desde el punto de vista instrumental, ha sido el diseño y construcción de un sistema de sincronización mediante fibra óptica entre emisor y receptor de radioecosonda, que permite efectuar mediciones de la velocidad de las ondas electromagnéticas en el hielo

mediante métodos del tipo punto medio común (CMP) o reflexión de gran ángulo (WAR), más precisos que los basados en análisis de hipérbolas de difracción. Este equipo se ha utilizado con éxito en diversas campañas árticas (Spitsbergen-Hansbreen 2004 y Spitsbergen-Fridtjovbreen 2005) y antárticas (Livingston 2003-2004 y 2004-2005) y ha proporcionado datos de campo que han sido la base de las publicaciones Martín et al. (2004) y Jania et al. (2005).

3. Por último, cabe destacar como relevantes los resultados no previstos inicialmente, y descritos más arriba, especialmente los numerados 1, 3 y 4.

C. RESUMEN DE LOS RESULTADOS DEL PROYECTO

C1. FORMACIÓN DE PERSONAL CON RELACIÓN AL PROYECTO.

La formación de personal más significativa ha sido la referida los tres doctores que desarrollado su tesis doctoral en el marco del proyecto, relacionados en el apartado C2. El primero de ellos, Dr. Carlos Martín, fue becario de FPU y ha conseguido recientemente (incorporación en enero de 2006) un contrato de investigación (post-doctoral), por tres años, en el prestigioso British Antarctic Survey. El segundo, Dr. Javier Lapazaran, continúa sus tareas docentes en la Universidad Pontificia de Salamanca (campus de Madrid), y las investigadoras en nuestro grupo de la Universidad Politécnica de Madrid. El tercero, Dr. Miguel Ángel Ortega, ha sido transferido a la industria, en el campo de la ingeniería civil.

C2. TESIS DOCTORALES REALIZADAS TOTAL O PARCIALMENTE EN EL PROYECTO

TÍTULO: Modelización numérica de la dinámica de los glaciares templados y análisis de su respuesta a los cambios climáticos

DOCTORANDO: Carlos Martín García

UNIVERSIDAD: Politécnica de Madrid

FACULTAD/ESCUELA: E.T.S.I. de Telecomunicación

FECHA DE LECTURA: Octubre 2003

CALIFICACIÓN: Sobresaliente cum laude por unanimidad

DIRECTORES: Francisco José Navarro Valero y María Isabel de Corcuera Labrado

TÍTULO: Técnicas de procesamiento de datos de georradar y su aplicación al estudio del régimen termodinámico de los glaciares fríos y politérmicos

DOCTORANDO: Javier Jesús Lapazaran Izargain

UNIVERSIDAD: Politécnica de Madrid

FACULTAD/ESCUELA: E.T.S.I. de Telecomunicación

FECHA DE LECTURA: Septiembre 2004

CALIFICACIÓN: Sobresaliente cum laude por unanimidad

DIRECTOR: Francisco José Navarro Valero.

TÍTULO: Análisis del pandeo de pilares en régimen no lineal mediante splines generalizados

DOCTORANDO: Miguel Ángel Ortega Sánchez

UNIVERSIDAD: Politécnica de Madrid

FACULTAD/ESCUELA: E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos

FECHA DE LECTURA: Septiembre 2004

CALIFICACIÓN: Sobresaliente cum laude por unanimidad

DIRECTOR: José Luis Romero Martín

C3. ARTÍCULOS CIENTÍFICOS EN REVISTAS

(en orden cronológico)

- Benjumea, B., Macheret, Yu. Ya., Navarro, F.J. & Teixidó, T. (2003). Estimation of water content in a temperate glacier from radar and seismic sounding data. *Ann. Glaciol.*, **37**, 317-324.
- Vasilenko, E.V., Glazovskiy, A.F., Macheret, Yu.Ya., Navarro, F.J., Sokolov, V.G. & Shiraiwa T. (2003). Georadar VIRL for radio-echo sounding of glaciers. *Mat. Glyatsiol. Issled. (Data Glaciol. Studies)*, **94**, 225-234 (en Ruso).
- Martín, C., Navarro, F.J., Otero, J., Cuadrado, M.L. & Corcuera, M.I. (2004). Three-dimensional modelling of the dynamics of Johnsons glacier (Livingston Island, Antarctica). *Ann. Glaciol.*, **39**, 1-8.
- Navarro, F.J., Macheret, Yu. Ya. & Benjumea, B. (2005a). Application of radar and seismic methods for the investigation of temperate glaciers. *J. Appl. Geophys.*, **57**, 193-211.
- Jania, J., Macheret, Yu.Ya., Navarro, F. J., Glazovskiy, A.F., Vasilenko, E.V., Lapazaran, J., Glowacki, P., Migala, K., Balut, A. & Piwowar, B.A. (2005). Variations of hydrothermal structure of polythermal Hansbreen in Spitsbergen. *Mat. Glyatsiol. Issled. (Data Glaciol. Studies)*, **99**, 81-94 (en Ruso).
- Navarro, F. J., Glazovskiy, A.F., Macheret, Yu. Ya., Vasilenko, E.V., Corcuera M.I. & Cuadrado, M.L. (2005b). Ice volume changes 1936-1990 and structure of Aldegondabreen, Spitsbergen. *Ann. Glaciol.*, **42**, en prensa (paper 42A061).

- Jania, J., Macheret, Yu.Ya., Navarro, F. J., Glazovskiy, A.F., Vasilenko, E.V., Lapazaran, J., Glowacki, P., Migala, K., Balut, A. & Piwowar, B.A. (2005). Temporal changes in the radiophysical properties of a polythermal glacier in Spitsbergen. *Ann. Glaciol.*, **42**, en prensa (paper 42A140).
- Martín, C., Hindmarsh, R.C.A. & Navarro, F.J. (2005). Dating ice-flow change near the flow divide at Roosevelt Island, Antarctica, using a thermomechanical model to predict radar stratigraphy. *J. Geophys. Res.*, en prensa.

C4. CONFERENCIAS EN CONGRESOS, SIMPOSIOS Y REUNIONES (POR INVITACIÓN)

AUTOR: Francisco José Navarro Valero

ACTO: Conferencia invitada en el "Maratón La Antártida"

TÍTULO: Glaciología: claves del pasado y ventana al futuro

LUGAR DE CELEBRACIÓN: Museo Nacional de Ciencia y Tecnología, Madrid

AÑO: 2003

PRESIDENCIAS DE SESIÓN EN CONGRESOS:

CONGRESO: Congresso de Métodos Computacionais em Engenharia 2004 (incorporando VIII Congresso Nacional de Mecânica Aplicada e Computacional y VI Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería)

TÍTULO DE LA SESIÓN: Fluidos não Newtonianos e Glaciologia

presidente de la sesión:

LUGAR DE CELEBRACIÓN: Lisboa

AÑO: 2004

CONGRESO: VII Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería

TÍTULO DE LA SESIÓN: Fluidos no Newtonianos y Glaciología

LUGAR DE CELEBRACIÓN: Granada

AÑO: 2005

D. COLABORACIONES CON OTROS GRUPOS DE INVESTIGACIÓN

En el desarrollo del proyecto se ha continuado la colaboración, ya previamente establecida, con:

- El Dr. Richard Hindmarsh, del British Antarctic Survey, y sus colegas el Dr. Hilmar Gudmundsson y el Dr. Robert Antherm, en simulación numérica de glaciares y mantos de hielo.
- El grupo de glaciología especializado en técnicas de radioecsonda del Instituto de Geografía de la Academia Rusa de Ciencias (Dr. Yury Macheret, Dr. Andrey Glazovskiy e Ing. Evgeny Vasilenko).
- El Departament de Geodinàmica i Geofísica de la Universitat de Barcelona; en particular. los Dres. Jaume Calvet, Josep Maria Casas y el Ldo. David García Sellés.

Las anteriores colaboraciones se han plasmado en la realización de publicaciones conjuntas (relacionadas en el aptdo. C3) y en la participación de investigadores de estos grupos en campañas antárticas españolas (Casas y García, campaña 2002-2003; Macheret y Vasilenko, campaña 2002-2004; Glazovskiy, campaña 2004-2005) o españoles, de nuestro grupo, en campañas conjuntas en el Ártico (Navarro, campañas de verano de 2003 y primavera de 2004 en Spitsbergen).

Adicionalmente, se han establecido nuevas colaboraciones, con:

- El Dr. Andreas Ahlstrøm, del Departamento de Sistemas Electromagnéticos de la Universidad Técnica de Dinamarca, en cuestiones de georradar, balance de masas e hidrología de glaciares. Participó en la campaña antártica española 2003-2004.
- El Dr. Piotr Glowacki, del Departamento de Investigación Marina y Polar del Instituto de Geofísica de la Academia Polaca de Ciencias, especialista en análisis de testigos de sondeos y el Prof. Jacek Jania, de la Universidad de Silesia, especialista en morfología glaciar, balance de masas y dinámica e hidrología glaciar, y sus colaboradores suyos el Dr. Adam Balut, geodesta, y el Dr. Kristoff Migala. Las campañas árticas del verano de 2003 y la primavera de 2004, en las que participó el Dr. Navarro, fueron desarrolladas conjuntamente con estos investigadores polacos y con el soporte logístico de la estación polar polaca en Hornsund (Spitsbergen). Esta colaboración ha dado lugar a publicaciones conjuntas (véase aptdo. C3).

Además de las colaboraciones internacionales reseñadas, hay que destacar la participación de nuestro grupo en el proyecto internacional "The dynamic response of Arctic glaciers to global warming" (GLACIODYN), relativo al Año Polar Internacional, liderado por el Prof. Johannes Oerlemans, de la Universidad de Utrecht, en el que participan grupos de investigación de 17 países y que ha recibido el reconocimiento de proyecto-IPY.