

# DINÁMICA FLUVIAL Y VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN LOS ALPES SUIZOS DURANTE EL HOLOCENO SUPERIOR

L. Schulte<sup>1</sup>, H. Veit<sup>2</sup>, F. Burjachs<sup>3</sup>, R. Julià<sup>4</sup> y R. Burrull<sup>5</sup>

- (1) Department of Physical Geography and Institute of Landscape Research, University of Barcelona, Baldiri Reixac s/n, E-08028 Barcelona, Spain. E-mail: schulte@ub.edu; fax: +34 93 449 57 48.
- (2) Institute of Geography, University of Bern, Hallerstrasse 12, CH-3012 Bern, Switzerland. E-mail: veit@giub.unibe.ch; fax: +41 31 631 85 11.
- (3) Institut Català de Recerca i Estudis Avançats (ICREA), Àrea de Prehistòria, Universitat Rovira i Virgili, Plaça Imperial Tàrraco 1, E-43005 Tarragona, Spain. E-mail: burjachs@icrea.es; fax: +34 977 55 95 97.
- (4) Institute of Earth Science "Jaume Almera", Lluís Solé i Sabarís, E-08028 Barcelona, Spain. E-mail: ramon.julia@ija.csic.es; fax: +34 93 410 02 12.
- (5) Institute of Landscape Research, University of Barcelona, Baldiri Reixac s/n, E-08028 Barcelona, Spain. E-mail: rburrull@pie.xtec.es; fax: +34 93 449 57 48.

**RESUMEN:** La historia deposicional y de la vegetación del abanico aluvial del río Lüttschine muestra cambios importantes durante el Holoceno superior. A pesar de la influencia antrópica, las variables independientes CaO y polen arbóreo méxico muestran un comportamiento similar entre los 2400 y 1000 años cal BP que puede interpretarse como una respuesta natural a las condiciones climáticas. A partir de las correlaciones entre los distintos *proxies* estudiados en el abanico y las anomalías de radiocarbono, se observa como a) algunos óptimos climáticos (anomalías negativas de radiocarbono) están indicados por horizontes de turba; b) otros óptimos están representados por valores máximos de polen arbóreo méxico y horizontes ricos en materia orgánica; c) el deterioro climático (anomalías positivas) correlaciona con horizontes de gravas, depositados durante paleocrecidas. A partir del siglo XI el impacto antrópico continuo se sobrepone a la señal climática. Sin embargo, los aportes del abanico aluvial del río Lüttschine aumentaron durante los eventos holocenos más fríos, como el avance glaciario a inicios del Subatlántico (periodo Göschen I), el avance glaciario medieval temprano (periodo Göschen II) y la Pequeña Edad de Hielo.

**Palabras clave:** Holoceno superior, dinámica fluvial, anomalías de radiocarbono, polen, Alpes Suizos.

## Late Holocene fluvial dynamics and climate variability in the Swiss Alps.

**ABSTRACT:** *The Late Holocene depositional and vegetation history of the Lüttschine alluvial fan records important environmental changes. Despite of the anthropogenic influence the independent variables CaO and mesic pollen percentages show a similar pattern from 2400 to 1000 yr cal BP and could be interpreted as natural response to climate forcing. Therefore, correlation between the alluvial fan proxy data and the radiocarbon anomalies are established. The peat horizons correspond to the*

*climate optimums indicated by the negative radiocarbon anomalies. Other climate optimums are represented by the maximum values of mesic trees and by organic rich horizons. Gravel layers, deposited during paleo-floods, correlate with positive radiocarbon anomalies (climate pessimum). By contrast, the continuous anthropogenic impact after the 11<sup>th</sup> century masks the climate signal during the second Millennium. However, fluvial processes of the Lütschine river system increased during the cooler Holocene climate events such as the Early Subatlantic Ice Advance (Göschen I period), Early Medieval Ice Advance (Göschen II period) and the Little Ice Age.*

**Key words:** Late Holocene, fluvial dynamics, radiocarbon anomalies, pollen, Swiss Alps.

## 1. INTRODUCCIÓN

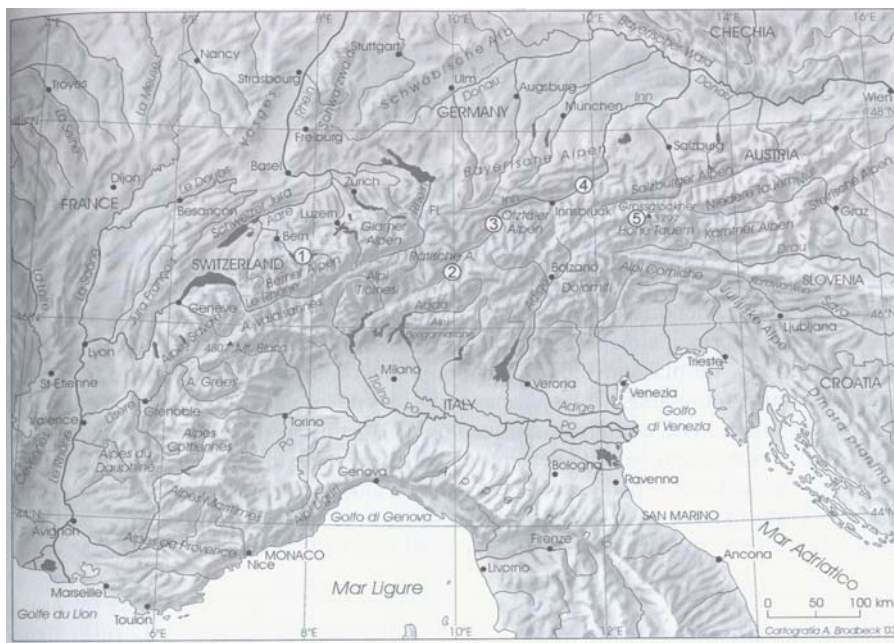
Las cuencas hidrográficas son sensibles a la variabilidad climática, a cambios de las condiciones fisiográficas y a la actividad humana. En sistemas montañosos de latitudes medias húmedas las están relacionadas con la ocurrencia de altas y frecuentes precipitaciones, fusión de nieve, fusión glaciaria, obturación de valle por deslizamiento y de intensas lluvias en suelos helados. Además, los procesos periglaciares influyen sobre la cubierta vegetal del piso subalpino y sobre la inestabilidad de las vertientes de la cuenca hidrográfica.

Cambios en la circulación de la atmósfera a escala global durante el Holoceno pueden influir decisivamente en estos factores, particularmente en el caso de los Alpes. Estas montañas, limítrofes entre las latitudes medias húmedas con influencia atlántica y la zona subtropical mediterránea, son especialmente sensibles a eventos de precipitaciones extremas e inundaciones catastróficas (Pfister, 1999).

Durante las últimas dos décadas un elevado número de estudios sobre la historia fluvial holocena de Europa Central se han centrado en sistemas fluviales localizados en los llanos y en las montañas medias (por ejemplo valles de los ríos Rin, Danubio, Weser, Wisloka etc.; Starkel, 1983; Schellmann, 1994). Muchas de las investigaciones publicadas hacen referencia a las posibles correlaciones entre la dinámica fluvial y las variaciones de los glaciares de los Alpes. En cambio, se presta poca atención a los sistemas fluviales alpinos que deberían estar mucho más relacionados con la historia glaciaria. Los primeros estudios enfocados en esta línea de investigación se realizaron en los Altos Tauern (Veit, 1988), en el valle del río Inn (Patzelt, 1994), en los Alpes de Ötztal (Geitner, 1999) y en los Alpes Réticos (Burga et al., 1997; Fig. 1).

## 2. EL MARCO FISIOGEOGRÁFICO

El presente estudio se centra en la dinámica fluvial y geocológica del abanico aluvial del río Lütschine (601 - 564 m s.n.m.) durante los últimos 2400 años (Fig. 1). Desde el retroceso del sistema glaciario del río Aare durante el Tardiglaciario, el río Lütschine drena la vertiente septentrional del Macizo de la Jungfrau (4158 m s.n.m.) hacia el río Aare (Handtke, 1992) y construyó el abanico aluvial que separa el lago Thun del lago Brienz. En la actualidad un 19,5 % de la cuenca hidrográfica del río Lütschine, que comprende una superficie de 379 km<sup>2</sup>, está cubierta por glaciares. Las variaciones longitudinales del Glaciario Bajo de Grindelwald durante los últimos 2800 años fueron minuciosamente estudiadas por Holzhauser y Zumbühl



**Figura 1.** Localización de la cuenca hidrográfica del río Lütchine y de otros casos de estudio acerca de la dinámica fluvial alpina durante el Holoceno. 1 = río Lütchine (presente publicación); 2 = Delta de Isola y Valle Fedoz según Burga et al. (1997); 3 = Vall de Horlach según Geitner (1999); 4 = Valle del río Inn según patzelt (1994); 5 = valle de Isel según Veit (1988).

(1996). La litología de la cuenca hidrográfica del río Lütchine se caracteriza al norte por rocas carbonatadas (margas y calizas) del manto helvético, mientras que en el sector intermedio comprende areniscas del Manto de Wildhorn y, además, una franja estrecha de margas que pertenece al *Ultrahelveticum*. Finalmente, en los sectores meridionales de la cuenca aparece el Granito de Aare, mayoritariamente cubierto por los glaciares.

### 3. MÉTODOS

La reconstrucción de la evolución y de la dinámica del abanico aluvial del río Lütchine se basa en una cartografía morfológica de campo a escala 1:10.000, interpretación de fotos aéreas de los años 1928, 1944 y 1946, el análisis sedimentológico de perfiles y sondeos, la determinación de los elementos mayoritarios y trazas mediante la fluorescencia de rayos X, 43 mapas históricos publicados entre 1496 y 1900, inventarios catastrales de edificios históricos y análisis polínicos. La cronoestratigrafía de los procesos deposicionales se ha establecido a partir de dataciones  $^{14}\text{C}$  convencionales y AMS, documentación histórica y artefactos. Se integran los datos obtenidos y los de otros casos de estudio en una estratigrafía regional. Además, se establecen correlaciones entre los *proxies* del abanico aluvial con las anomalías de radiocarbono descritas por Stuiver et al. (1997).

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Sedimentología y geomorfología

Los depósitos del abanico aluvial del río Lütschine, estudiados en los cortes y sondeos de hasta 17 m de profundidad, muestran diferentes ciclos sedimentarios que se inscriben desde  $4420 \pm 40$  yr BP hasta la actualidad. El corte de referencia IN-2 de 90 m de extensión (Fig. 2) comprende una secuencia detallada de sedimentos palustres, ricos en materia orgánica, depositados entre  $2200 \pm 70$  y  $1980 \pm 30$  yr BP; cuatro horizontes de turba datados en  $1980 \pm 30$ ,  $1810 \pm 20$ ,  $1650 \pm 20$  y  $1160 \pm 20$  yr BP, separados por depósitos fluviales y palustres; y en la parte superior depósitos aluviales y coluviales. Los cambios en las condiciones sedimentarias se deben principalmente, entre otras razones, al desplazamiento de los canales del río Lütschine. Estos desplazamientos se han podido reconstruir a partir de cartografía morfológica de campo, fotografías aéreas, mapas históricos de los años 1578, 1734, 1750 y 1796 yr AD y la localización de yacimientos arqueológicos y edificios históricos. El análisis integral de los diferentes datos permite detectar un alejamiento de los canales del río Lütschine del corte IN-2 situado en la parte central del abanico aluvial. El brazo occidental se desplazó hacia el oeste durante la época romana y edad media temprana mientras que el canal oriental más próximo fue abandonado durante el siglo XVIII.

### 4.2. Análisis geoquímicos

La relación inversa entre los contenidos en  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y CaO, determinados por fluorescencia de rayos X indica un control litológico de la geoquímica de las muestras de sedimentos del perfil IN-2 (Fig. 2). Las variaciones resultan predominantemente de la acumulación de siliciclastos, sedimentos carbonatados y procesos edafológicos en los horizontes de turba. Las concentraciones de los diferentes metales Cr, Pb, Ni, Nb, Zn, Cu,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{TiO}_2$  muestran un comportamiento semejante. Las concentraciones máximas corresponde a los horizontes ricos en materia orgánica y de turba que fijan los metales. El análisis de correspondencia de ordenación (COA) de la composición química de las muestras del perfil IN-2 corrobora el control litológico (Fig. 3). Las muestras ricas en turba y materia orgánica contienen metales, las muestras de limos CaO y Sr y las muestras de arenas y gravas  $\text{SiO}_2$ , Zr y  $\text{Na}_2\text{O}$ .

### 4.3. Análisis polínico

El diagrama polínico confeccionado a partir de las muestras tomadas del perfil IN-2 a un intervalo de 10 cm, registra la dinámica de la vegetación durante los últimos  $2200 \pm 70$  yr BP. Se distinguen dos zonas principales: I) la zona inferior muestra una cubierta vegetal densa compuesta predominantemente por bosques de coníferas (*Picea*, *Abies*, *Pinus*), árboles mésicos (*Fagus*, *Quercus* caducifolios, *Carpinus*, *Corylus*) y árboles de ribera (*Alnus*). Desde el principio de la secuencia la actividad del hombre se inscribe en el paisaje mediante pequeñas talas del bosque, actividad agrícola local (*Cerealia*, *Linum*, *Cannabaceae*) y ganadería (*Plantago*, *Asphodelus*); sin embargo, el ecosistema vegetal es todavía sostenible como muestra la periódica recuperación del polen arbóreo. II) la zona superior abarca el período de  $1160 \pm 20$  yr BP hasta la actualidad, que registra una deforestación continua como

# Perfil IN-2: Abanico aluvial del río Lüttschine, Alpes suizos

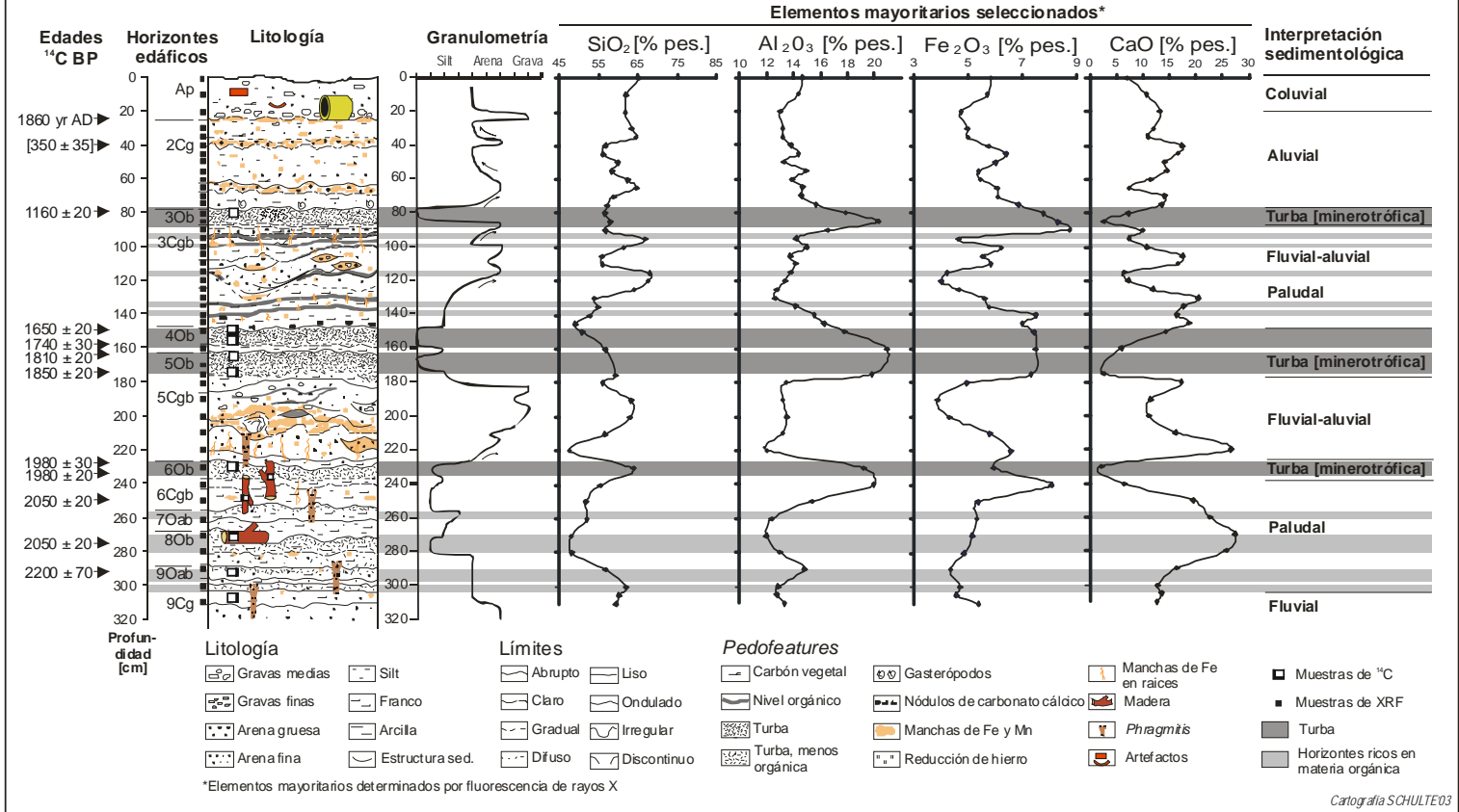
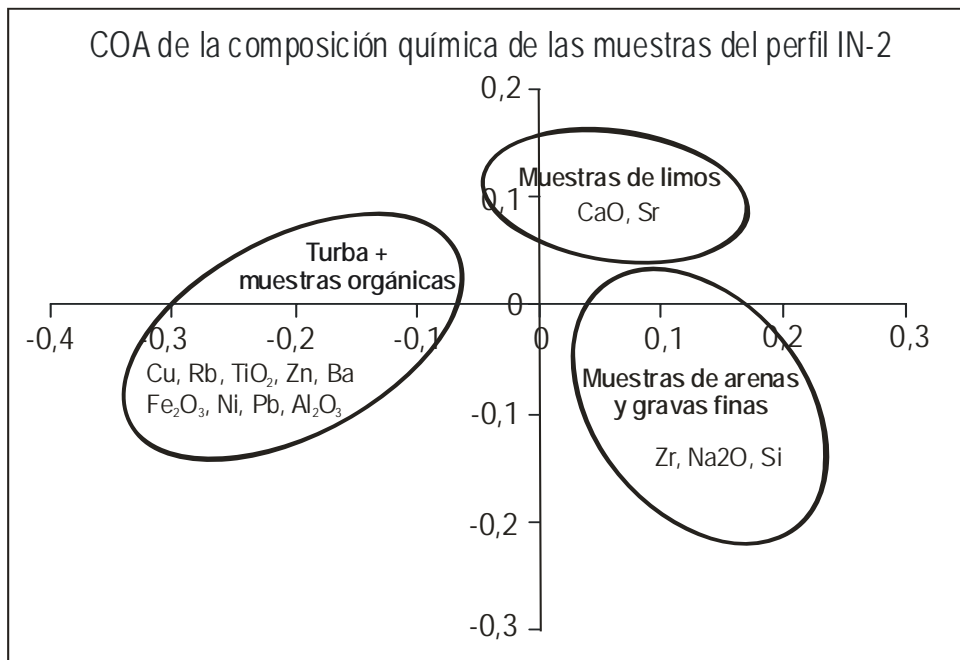


Figura 2. Sedimentología, cronología y elementos mayoritarios del perfil IN-2.



**Figura 3.** Análisis de correspondencia de ordenación (COA) de la composición química de las muestras del perfil IN-2.

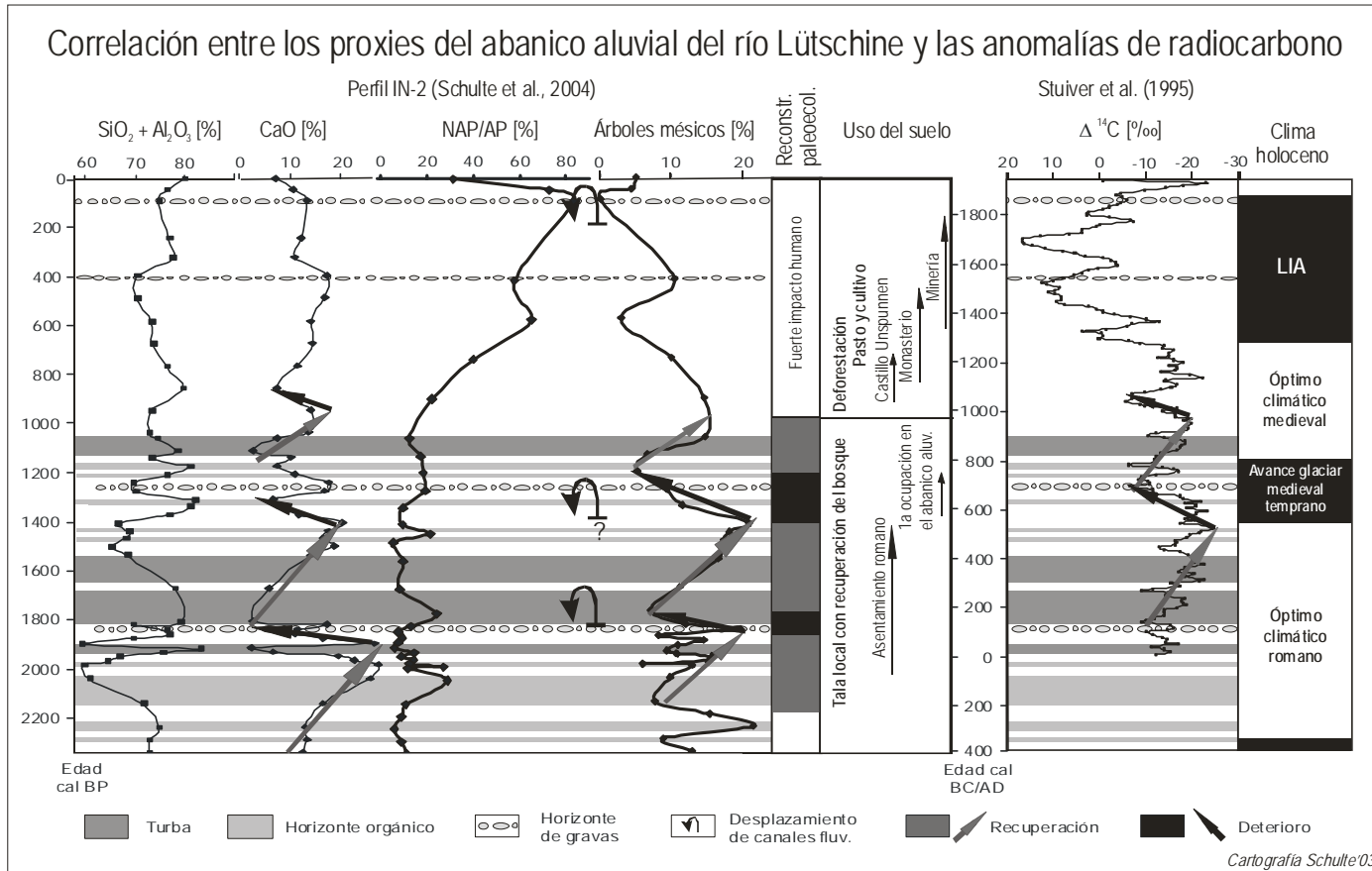
consecuencia del fuerte impacto humano a partir del siglo XII, relacionado con la prosperidad económica del monasterio Interlaken. La desviación parcial del río, junto a otras actividades antrópicas, con el consecuente cambio del régimen sedimentario, acabaron con la mayor parte de zonas húmedas (palustres y bosques de ribera).

## 5.DISCUSIÓN

### 5.1. Evolución de los registros fluviales del río Lütshine y correlación con las anomalías de radiocarbono

La historia deposicional y de vegetación del abanico aluvial del río Lütshine registra cambios importantes en el medio natural. A pesar de la influencia antrópica las variables independientes CaO y polen arbóreo méxico señalan tendencias semejantes en cuanto al deterioro y recuperación climática antes de los 1000 yr cal BP (Fig. 4) y pueden ser interpretados como una respuesta natural a la variabilidad climática.

El control litológico de los *proxies* geoquímicos podría resultar del mecanismo siguiente: a) durante las fases templadas-húmedas (incremento de polen arbóreo méxico, anomalías negativas) el río recibe más aporte de material procedente de las áreas bajas de la cuenca hidrográfica del río Lütshine, formadas predominantemente por rocas carbonatadas (*Helveticum*); b) durante las fases frías-secas el control del caudal y de su carga sólida está proporcionalmente más influenciada por el aporte glaciar y por la escorrentía superficial de la zona periglacial más amplia. Ambas fuentes de carga fluvial se sitúan sobre rocas cristalinas y siliciclásticas (Granito de Aare y areniscas del Manto de Wildhorn).



**Figura 4.** Correlación entre *los proxies* del abanico aluvial del río Lütshine y las anomalías de radiocarbono descritas por Stuiver et al (1997).

En la figura 4 establecemos correlaciones entre los *proxies* del abanico aluvial y las anomalías de radiocarbono generadas por la actividad solar. Los horizontes de turba corresponden a los óptimos climáticos indicados por las anomalías negativas de radiocarbono. Sin embargo, algunos óptimos climáticos no están representados en el perfil IN-2 por capas turbosas sino por valores máximos de taxones arbóreos méxicos y horizontes orgánicos. Los horizontes de grava, depositados durante paleocrecidas, correlacionan con las anomalías positivas de radiocarbono (*pessimum* climático) en torno a los 1800, 1200 y 400 yr cal BP. Igualmente, los desplazamientos de los canales del río Lütschine, detectados a partir de mapas históricos y la localización de los edificios históricos, se llevaron a cabo durante fases de deterioro climático (Fig. 4).

En cambio, el impacto antrópico continuo a partir del siglo XI oculta la señal climática durante el segundo milenio.

## **5.2. Los registros fluviales del río Lütschine en el ámbito de los Alpes**

A pesar del control climático de los procesos fluviales antes de los 1000 yr cal BP es difícil establecer correlaciones entre las variaciones de la dinámica fluvial del río Lütschine y la variabilidad de los registros fluviales de los Alpes occidentales (Delta de Isola y Valle Fedoz según Burga et al., 1997) y orientales (Valle de Horlach según Geitner, 1999; valle del río Inn según Patzelt, 1994; y Valle de Isel según Veit, 1988).

En el caso del abanico aluvial estudiado los aportes del río Lütschine aumentaron durante los eventos holocenos más fríos, como el avance glaciar a inicios del Subatlántico (período Göschen I, 2800 - 2350 yr cal BP), el avance glaciar medieval temprano (período Göschen II, 1400 - 1150 yr cal BP) y la Pequeña Edad de Hielo (650 - 80 yr cal BP). En cambio, durante el óptimo climático romano (2350 - 1400 yr cal BP) y medieval (1400 - 650 yr cal BP) las inundaciones y el aporte sedimentario fueron menos significativos dando paso a la formación de turba.

Se detecta una coincidencia entre los registros fluviales de los Alpes occidentales acerca del período de formación de turba del óptimo climático romano y la fase de acumulación fluvial durante el período Göschen II. En cambio, las secuencias del Delta de Isola y del Valle Fedoz no registran procesos edáficos durante el óptimo climático medieval. Las comparaciones de nuestros datos con los registros de los Alpes orientales no señalan ninguna correlación, excepto en el caso de la Pequeña Edad de Hielo, durante la cual tanto en los valles alpinos orientales (Valle de Horlach, Inn y Isel) como en el abanico aluvial del río Lütschine se registran procesos de acumulación importantes. Respecto a las correlaciones entre el río Lütschine y el Glaciar Bajo de Grindelwald (Holzhauser y Zumbühl, 1996), que forma parte de la cuenca hidrográfica de este río, se llega a observar procesos divergentes. Durante unos avances glaciares se incrementó el aporte sedimentario, mientras que durante otros avances la ausencia de los procesos de acumulación benefició la formación de turberas. Concluimos que las configuraciones fisiográficas individuales de los diferentes ecosistemas alpinos son posiblemente las causas de un comportamiento diferenciado de los agentes morfológicos.

## **6. CONCLUSIONES**

Los archivos fluviales y polínicos del abanico aluvial del río Lütschine pueden interpretarse para el período comprendido entre los 2400 y 1000 yr cal BP como una señal paleoclimática y, además, correlacionan con la actividad solar. Los horizontes de turba se

generan durante los óptimos climáticos indicados por las anomalías negativas de radiocarbono. Otros óptimos climáticos están representados por valores máximos de polen arbóreo méxico y horizontes ricos en materia orgánica. En cambio, los horizontes de gravas depositados durante las crecidas más importantes corresponden a las anomalías positivas de radiocarbono (*pessimum* climático). Sin embargo, todavía no se pueden establecer correlaciones concluyentes entre los diferentes archivos fluviales y glaciares de los Alpes occidentales y orientales.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la Alexander von Humboldt-Foundation (Alemania, V-3.FLF-DEU/1070630) y por el Departamento de Geografía de la Universidad de Berna (Suiza). Quisiéramos expresar nuestra gratitud a Thomas Stocker y René Fischer (Physikalisches Institut, Abteilung Klima- und Umweltphysik, Universität Bern) por la realización de las dataciones convencionales de radiocarbono. Igualmente expresamos nuestro agradecimiento a Ivan Mercolli (Institut für Geologie, Universität Bern) por poner a nuestra disposición el laboratorio de fluorescencia de rayos X. Daniel Sax (Geographisches Institut, Universität Bern) asumió el procesamiento de los análisis geoquímicos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Burga, C.A.; Perret, R.; Gehrig, S.; Vogel, H.-H.; Magetti, B.; Fitze, P.; Maisch, M. & Graf, K. (1997). Geoökologische und klimamorphologische Untersuchungen im Alpenraum. Schlussbericht NFP, 31. Hochschulverlag ETH Zürich. 57 pp.
- Geitner, C. (1999). Sedimentologische und vegetationsgeschichtliche Untersuchungen an fluviatilen Sedimenten in den Hochlagen des Horlachtales (Stubai Alpen/Tirol). Münchener Geographische Abhandlungen, Reihe B, 31. Geobuch-Verl. München. 247 pp.
- Hantke, R. (1992). Eiszeitalter. Teil 2: Letzte Warmzeiten, Würm-Eiszeit, Eisabbau und Nacheiszeit der Alpen-Nordseite vom Rhein- zum Rhone-System. Ecomed Fachverlag, Landsberg/Lech. 703 pp.
- Holzhauser, H.; Zumbühl, H.J. (1996). To the history of the Lower Grindelwald glacier during the last 2800 years – palaeosols, fossil wood and historical pictorial records – new results. Z. Geomorph. N.F. Suppl.-Bd., 104. 95-127.
- Patzelt, G. (1994). Holocene development of alluvial fans and the floor of the Inn valley, Tyrol. En: Aulitzky, H.; Heuberger, H.; Patzelt, G. (eds.), Mountain hazard geomorphology of Tyrol and Voralberg, Austria. Mountain Research and Development, 14. 283-284. Boulder.
- Pfister, Ch. (1999). Wetternachhersage. 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen. Haupt, Bern. 304 pp.
- Starkel, L. (1983). The reflection of hydrologic changes in the fluvial environment of the temperate zone during the last 15,000 years. En: Gregory, K.J. (ed.), Background to Palaeohydrology, John Wiley & Sons Ltd. 213-235.
- Schellmann, G. (1994). Wesentliche Steuerungsmechanismen würemzeitlicher und holozäner Flussdynamik im deutschen Alpenvorland und Mittelgebirgsraum. En: Schellmann, G. (ed.), Beiträge zur jungpleistozänen und holozänen Talgeschichte im deutschen Mittelgebirgsraum und Alpenvorland. Düsseldorfer Geographische Schriften, 34. Geographisches Institut Universität Düsseldorf, 123-146.

- Stuiver, M.; Braziunas, T.F.; Grootes, P.M. & Zielinski, G.A. (1997). Is there evidence for solar forcing of climate in the GISP2 oxygen isotope record? *Quaternary Research*, 48. 259-266.
- Veit, H. (1988). Fluviale und solifluidale Morphodynamik des Spät- und Postglazials in einem zentralalpiner Flusseinzugsgebiet (südliche Hohe Tauern, Osttirol). *Bayreuther Geographische Arbeiten*, 13. Bayreuth. 167 pp.
- et al. (1997).