



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

La reconstrucción de la dinámica fluvial y su conexión con la variabilidad climática a partir de fuentes documentales y registros instrumentales

Juan Carlos Peña Rabadán

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tdx.cat) i a través del Dipòsit Digital de la UB (diposit.ub.edu) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX ni al Dipòsit Digital de la UB. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX o al Dipòsit Digital de la UB (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tdx.cat) y a través del Repositorio Digital de la UB (diposit.ub.edu) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR o al Repositorio Digital de la UB. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR o al Repositorio Digital de la UB (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tdx.cat) service and by the UB Digital Repository (diposit.ub.edu) has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized nor its spreading and availability from a site foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository is not authorized (framing). Those rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.

3. DATOS

3. DATOS

3.1. Base de datos de inundaciones en Suiza

3.1.1. Aspectos generales

Si bien es cierto que existen para Suiza detalladas descripciones de avenidas y grandes inundaciones (Hächler-Tanner, 1991; Röthlisberger, 1991; Lehmann y Naef, 2003; Gees, 1997 y 1998; Vischer, 2003; Burger, 2008; Hilker et al., 2009; Schmocker-Fackel y Naef, 2010a), e incluso el uso de diferentes índices hídricos como parámetros para estudios en variabilidad climática e hídrica (EuroClimHist, 2008; Schmocker-Fackel y Naef, 2010a, 2010b), se ha creado un índice estival basado en los daños producidos por las grandes avenidas que sintetiza tanto la severidad de los eventos como su extensión espacial. El objetivo es determinar la variabilidad y la frecuencia de las inundaciones a partir de una combinación de registros instrumentales con otros proxy-data. Con el fin de justificar el objeto estudiado, es conveniente citar los principales procesos relacionados con las inundaciones en los ámbitos de alta montaña. Son los que se presentan a continuación:

a)



Procesos predominantes en torrentes de montaña:

- Erosión vertical y lateral
- Bloqueos de vertiente
- Inundaciones dinámicas
- Flujos de derrubios

Foto: Rotlauhbach cerca de Guttannen (Bern), el 24 de agosto de 2005 (Fuente: Keusen)

b)



Procesos predominantes en los ríos de montaña:

- Erosión lateral
- Profundización del canal fluvial (erosión vertical)
- Elevación del canal fluvial (agradación)
- Inundaciones dinámicas
- Migración del canal fluvial

Foto: Landquart encima de Klosters (Grisons), el 25 de agosto de 2005 (Fuente: Schweizer Luftwaffe)

c)



Procesos predominantes en los fondos de valle:

- Erosión lateral
- Profundización del canal fluvial (erosión vertical)
- Elevación del canal fluvial (agradación)
- Inundaciones dinámicas
- Riesgo de rotura de los diques

Foto: Río Aare cerca de Meiringen (Bern) el 24 de Agosto de 2005 (Fuente: Schweizer Luftwaffe)

d)



Procesos predominantes en los lagos:

- Grandes áreas de flujo de madera
- Inundaciones estáticas

Foto: Lago Brienz el 24 de agosto de 2005 (Fuente: Schweizer Luftwaffe)

Figura 3.1. Principales procesos relacionados con las inundaciones en los ámbitos de alta montaña (Fuente: [Federal Office for the Environment, FOEN 2008](#)).

El índice desarrollado en este estudio se ha construido para el periodo 1800-2010 y se han utilizado dos fuentes de datos:

- La primera, una base de datos a partir de los daños producidos por las inundaciones desarrollada en la tesis doctoral de [Gees \(1997\)](#) abarcando el periodo entre 1800 y 1994, a partir de una investigación de carácter histórico, pero sobre todo a partir de los registros históricos compilados en los trabajos de [Hächler-Tanner \(1991\)](#) y en el de [Röthlisberger \(1991\)](#).
- Una segunda base de datos, también construida a partir de los daños producidos por las inundaciones en Suiza y recopilados por el estamento Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research (WSL, [Hilker et al, 2009](#)). La base de datos es de muy alta resolución a partir de varias fuentes documentales abarcando el periodo 1972-2010.

3.1.2. El catálogo de inundaciones para 1800-1994 (Gees, 1997)

El periodo comprendido entre los años 1800 y 1994 se ha cubierto en base al compendio que aparece en la tesis de [Andreas Gees \(1997\)](#). Se trata de un completo estudio en el que no sólo se presenta un detallado catálogo de avenidas e inundaciones para el conjunto de Suiza, sino que además se abordan otros temas como el análisis de los conceptos de riesgo y vulnerabilidad en función de la problemática hídrica, del cálculo de los periodos de retorno y de los procesos meteorológicos generadores de las grandes avenidas, las implicaciones climáticas y examina otros procesos complementarios como pueden ser la influencia de los suelos, la erosión y la actividad antrópica. La disponibilidad de datos instrumentales (calidad y extensión temporal) y el uso de los documentos históricos (antes de la existencia de los registros instrumentales sistemáticos) son otros temas que se analizan en profundidad.

El catalogo se basa en los registros históricos compilados por [Hächler-Tanner \(1991\)](#), [Röthlisberger \(1991\)](#) y el análisis de fuentes históricas directas extraídas del archivo federal, de los cantonales y los municipales (ver figura 3.2: Datos originales).

- En el trabajo de [Hächler-Tanner \(1991\)](#) se recogieron de forma sistemática unos 1.900 informes de inundaciones contenidos en más de 300 fuentes procedentes de: historias regionales y monografías locales, diarios, crónicas, informes oficiales de daños, actas de los Consejos, informes de ingeniería hidrológica, hidráulica y forestal, literatura científica, revistas cantonales y se consultaron también las fuentes manuscritas procedentes de los archivos cantonales de Uri, Valais y Ticino. Estas fuentes fueron evaluadas críticamente y clasificadas de acuerdo con su rango espacial y la magnitud de los daños. De esta manera, la tipificación de la inundación histórica se basa en su alcance y extensión de los daños, identificando cuatro tipos de eventos: leves, medios, severos y catastróficos. Los eventos clasificados como leves fueron excluidos del estudio debido a una falta de homogeneidad de la serie. Además en muchas ocasiones este tipo de información era irrelevante en el resultado final de la cronología. La inundación catastrófica se definió para aquellos eventos con unos daños similares o superiores al episodio registrado en Suiza en agosto de 1987.
- [Röthlisberger \(1991\)](#) por su parte aporta información sobre 2.256 eventos en base a los daños producidos por las inundaciones en

el periodo comprendido entre los años 563 y 1988. El objetivo principal de la recopilación era extraer experiencias de la historia pasada para una mejor estimación de los peligros naturales y de sus posibles consecuencias. En el estudio se diferenciaban las causas del evento, es decir, episodios debidos a tormentas, lluvias prolongadas o a la fusión de la nieve. La severidad del evento se definía en base a los daños producidos precisando tres categorías: moderada, severa y muy severa. Finalmente, la tipología estaba diferenciada entre los eventos debidos a una avenida o inundación, y los que están en relación al flujo de derrubios.

En base a esta información, [Gees \(1997\)](#) confeccionó un completo catálogo de inundaciones para Suiza con 1.944 entradas clasificadas a partir de la fecha (día, mes y año) y la ubicación (municipio, cuenca de drenaje o cantón). Para definir la intensidad del evento se tuvieron en cuenta los daños reseñados en las mencionadas recopilaciones, estableciendo hasta cinco categorías: leve, media, severa, muy severa y catastrófica. Las diferencias entre ellas se establecieron en base a los perjuicios provocados por la avenida o inundación contabilizados en millones de francos suizos, teniendo en cuenta la inflación tomando como base el año 1994. Además se reseña la causa que produjo los eventos, diferenciando entre tormenta, lluvia de larga duración, fusión de nieve o una combinación de ellas. Por último, hay una definición del tipo del evento diferenciando entre avenida, inundación o flujo de derrubios.

3.1.3. Periodo 1972-2010. Swiss Flood and Landslide Damage Database

Desde el año 1972, el Swiss Federal Research Institute for Forest (WSL) ha recopilado y almacenado de forma sistemática la información generada sobre inundaciones, flujos de derrubios, deslizamiento de tierras, y desde el año 2002, los perjuicios debidos a la caída de rocas ([Hegg et al., 2000](#)). Se estiman los daños económicos directos, así como los muertos debidos a estos eventos. La información es estructurada en una base de datos y ofrecida a las instituciones oficiales encargadas de la planificación territorial con el objetivo de mejorar la gestión de los riesgos naturales. Además, el análisis anual de los datos se divulga en la revista *Wasser Energie Luft* publicada por la Swiss Water Management Association (ver por ejemplo, [Hilker et al., 2008](#)). Por último, los datos también se integran regularmente en el catastro *Storme* ([Burren y Eyer,](#)

2000), una base de datos de orden superior que la Federal Office for the Environment (FOEN) pone a disposición de los cantones suizos, siendo un apoyo informático para la documentación y manejo de los procesos naturales.

La principal fuente de información es la procedente de aproximadamente 3.000 periódicos y revistas. Estos documentos son analizados por una empresa de monitoreo medioambiental para obtener la información sobre los daños causados por los procesos mencionados anteriormente. En algunos casos (por ejemplo, para validar los datos inciertos o en el caso de grandes eventos) se consultan también los datos procedentes de compañías de seguros, sitios oficiales o de Internet (por ejemplo, las páginas web de la policía y del cuerpo de bomberos).

La estructura de la base de datos es la siguiente: se genera un registro por evento y contiene la información ordenada por: localidad (municipio, cantón, cuenca fluvial y coordenadas), fecha, tipo de proceso que causa el evento, causas meteorológicas, descripción del evento, número de muertos, heridos y evacuados, bienes afectados y estimación directa de los daños. Estas estimaciones están basadas en gran medida en la experiencia y en las evaluaciones de seguros, peritos de daños, grupos de tareas de emergencia y de sitios oficiales. Si es posible, los costes están asociados a un determinado tipo de bienes afectados, que se clasifican en los tipos siguientes:

- Bienes materiales: edificios destruidos o dañados, estructuras de protección, vehículos, etc.
- Líneas de tráfico y de infraestructura: rutas de transporte, líneas de suministro eléctrico y telefónico, etc.
- Silvicultura y tierras agrícolas.

Junto a la evaluación de los daños económicos, otros campos pueden ser rellenados en el caso que las fuentes de información diesen detalles adicionales, por ejemplo, el número de casas residenciales afectadas o la longitud de carreteras afectadas. Remarcar que las pérdidas indirectas, medidas posteriores de reconstrucción y los daños intangibles (por ejemplo, muertes, daños irreparables a la naturaleza y el medio ambiente) no están incluidas en estas estimaciones. Finalmente señalar que la inflación se ha tenido en cuenta cogiendo el 2007 como año-base.

Toda esta información procedente del WSL, se transformó de acuerdo a la estructura de la base de [Gees \(1997\)](#) para conseguir una serie única y homogénea para el periodo 1800-2010, utilizable por el Grupo de investigación PaleoRisk para el Proyecto FluVAIps en el cual el Mountain Hydrology and Mass Movements Research unit del WSL participa de forma activa.

3.1.4. Matriz de inundaciones en Suiza a resolución cantonal: periodo 1800-2010

La figura 3.2 muestra el proceso de elaboración de la base de datos, el cual se describe a continuación. Para la creación de un índice de daños integrado que explique la variabilidad y la frecuencia de las inundaciones entre los años 1800 y 2010 (de ahora en adelante al índice le llamamos INU) se han utilizado las dos fuentes de datos arriba descritas. La información de avenidas e inundaciones procedente de la recopilación realizada por [Gees \(1997\)](#) que abarca el periodo comprendido entre 1800 y 1994, y la procedente del WSL para el periodo 1972-2010. Ambas fuentes de datos se basan en los daños causados por las avenidas e inundaciones.

En base a esta información, se ha construido una base de datos con una estructura de matriz, $[A(M \times N)]$, donde M filas indican la fecha del evento y cada una de las columnas N notifica la información de inundación para cada uno de los cantones suizos (ver la figura 3.3). Cada una de las celdas que componen la matriz queda señalada por la presencia/ausencia de un código, según la presencia/ausencia del evento para la fecha y el cantón considerado. El código (S) informa de la categoría de la avenida o de la inundación, en base a los daños producidos, teniendo en cuenta la inflación y cuantificados en millones de francos suizos ([Gees, 1997](#); [Hilker et al., 2009](#)):

- la avenida se categoriza como Leve (l), si el daño producido está por debajo de los 0,2 millones de francos suizos;
- se define como Media (m), si los daños se sitúan entre 0,2 y 2 millones;
- se cataloga como Severa (s) si se cuantifican los daños entre 2 y 20 millones;
- se clasifica como Muy Severa (vs) si los daños están entre 20 y 100 millones;

- y como Catastrófica (c) cuando el daño producido por la inundación supera los 100 millones de francos suizos.

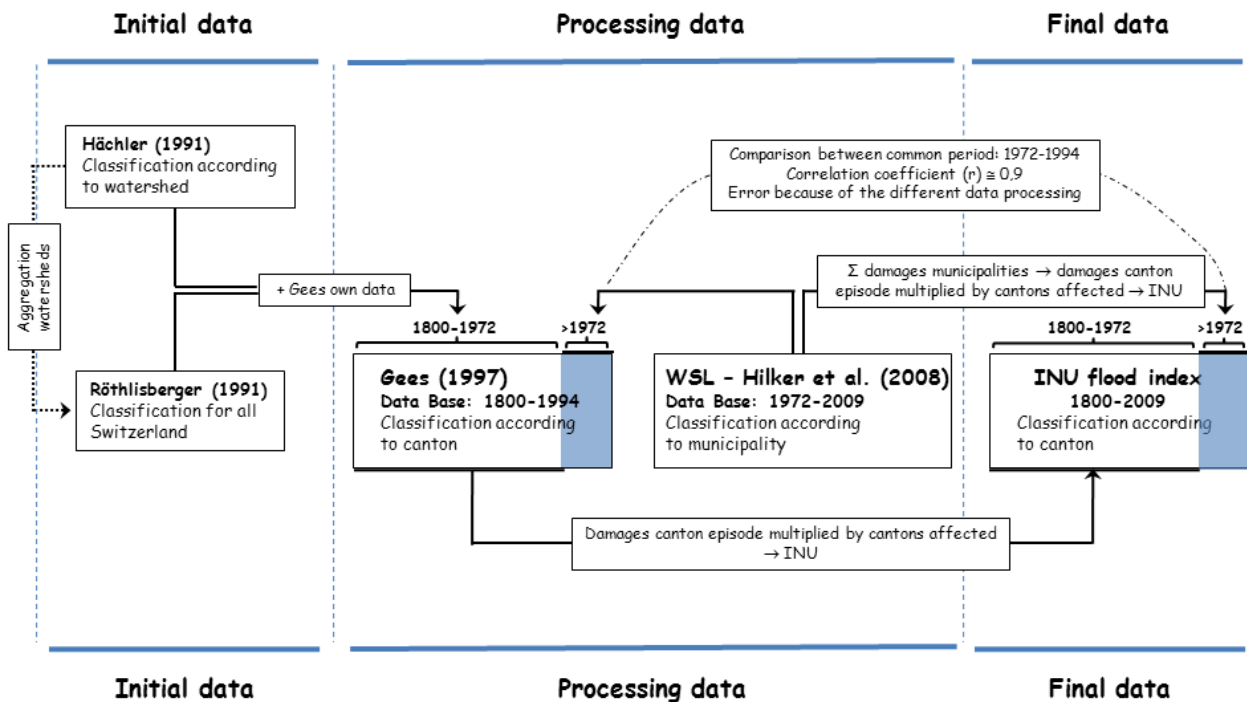


Figura 3.2. Esquema de las bases de datos que se han consultado para crear el índice INU. El coeficiente de correlación entre las dos bases de datos principales utilizadas (Gees, 1997: periodo 1800-1994; y WSL: periodo 1972-2010) es de 0,9. Este coeficiente se ha calculado a partir de los INU's estimados para ambas base de datos de manera separada en el periodo común 1972-1994 (ver el capítulo 5).

Además para cada uno de los eventos se añade la siguiente información adicional:

- el tipo de proceso (U) que causa el daño con los códigos siguientes:
 - w: avenida
 - b: flujo de derrubios
 - w+b: avenida y flujo de derrubios
- las condiciones meteorológicas (A) causantes del evento:
 - g: tormenta
 - dr: lluvia
 - s: fusión de nieve
 - dr+s: lluvia y fusión de nieve
- descripción del evento en base al número de personas afectadas (incluyendo muertos y heridos), los objetos afectados, los daños

causados e información adicional como pueden ser datos de altura de los caudales.

DÍA	MES	AÑO	AG	AI	AR	BS	BL	BE	FR	GE	GL	GR	JU	LU	NE	NW	OW	SH	SZ	SO	SG	TG	TI	UR	VS	VD	ZG	ZH	S	U	A
8	6	1800															x												l	unb	w
14	5	1801																						x					ss	unb	wb
25	5	1801																								x		"	g	w	
30	12	1801						x																				l	dr	w	
31	12	1801				x																						l	drs	w	
18	3	1805										x																l	unb	b	
24	5	1806											x															l	unb	w	
10	8	1806														x												ss	g	w	
2	9	1806																	x									k	unb	b	
1	7	1807								x																		s	unb	w	
30	11	1807										x																s	unb	w	
16	8	1808																					x					"	unb	w	
6	6	1809																							x			l	s	w	
15	6	1811																								x		l	g	w	
5	7	1811											x		x													s	g	wb	
27	8	1811						x																				l	g	w	
17	8	1812						x																				s	g	wb	
15	8	1812																			x							s	g	wb	
20	10	1812																								x		l	unb	w	

Figura 3.3. Extracto de la matriz para el tratamiento estadístico de las avenidas y las inundaciones. El código S se refiere a los daños, el código U al tipo de proceso que genera el evento y el código A reseña la meteorología causante del evento.

Dado el carácter de la información utilizada de tipo documental e histórico, se puede pensar que aparezcan heterogeneidades en las series temporales de inundaciones debido a una menor precisión y posibles lagunas en los datos de los registros para los periodos iniciales. Sin embargo, diversos autores (ver Pfister y Hächler-Tanner, 1991 o Gees, 1997) señalan que esta falta de homogeneidad afecta sobre todo a las inundaciones calificadas con las categorías leve y media, mientras que los eventos muy severos y catastróficos no muestran este efecto debido a las siguientes razones:

1. El aumento de la sensibilidad de la población debido a un incremento de las inundaciones durante la primera mitad del s. XIX.
2. La aplicación de la Ley Federal Suiza sobre corrección de los ríos aplicada a partir del año 1854.
3. La mejora en la transmisión de información por parte de la prensa y, por tanto, un acceso más rápido y directo a la información.
4. La gestión de la mitigación de inundaciones, como la construcción de diques, embalses de retención, desvío de los ríos en grandes lagos puede influir en la frecuencia de las

inundaciones desde el s. XVIII y mejorado durante el s. XX (Pfister, 1999; Wetter et al., 2011; Schulte et al., 2015).

5. Otros factores, como el sellado del suelo en la canalización de los cauces y la exposición de la infraestructura pública han podido incrementar los daños durante el s. XX. debido a un aumento de la escorrentía.

Es difícil estimar cómo estos efectos opuestos se compensan parcialmente entre sí. Es importante señalar que la regulación de los ríos a partir del año 1854, puede mitigar los daños causados por las inundaciones leves, medias y severas, pero no puede impedir el impacto producido por las categorías muy severas y catastróficas como ocurrió, por ejemplo, durante los eventos de los años 1987 y 2005. De nuestra investigación sobre la dinámica de las inundaciones y la evolución de la morfología delta de los ríos Lütchine y Hasli Aare desde 1480 (Schulte et al., 2015), se observa que la frecuencia de inundaciones muy graves y catastróficas no muestran cambios sustanciales, mientras que las pequeñas y medianas se registran con mayor precisión a partir del s. XIX.

Señalar que para validar los datos de las inundaciones históricas que aparecen en la matriz con el fin de construir el índice INU para el periodo 1800-2010, todos los eventos de las categorías muy severas y catastróficas se comprobaron si eran citados por diferentes fuentes y si los daños se produjeron simultáneamente en diferentes sitios. De los 91 eventos que componen la matriz relacionados con estas dos categorías, sólo el evento del 4 de agosto de 1868 fue excluido. Por último, cabe decir que la base de datos de inundaciones del WSL (1972-2010) se tiene que considerar como completa.

3.2. Reanálisis de las configuraciones atmosféricas

3.2.1. NCEP/NCAR y proyecto 20th Century Reanalysis. Periodo: 1871-2010

Con el fin de reanalizar las configuraciones sinópticas de eventos extremos, la comunidad meteorológica recurría hasta hace pocos años a análisis basados en las previsiones a tiempo real. Esta manera de proceder provocaba muchas heterogeneidades en las series construidas a partir de los mapas sinópticos debido a los grandes avances en los sistemas de asimilación de los datos, causando graves trastornos en el momento de una interpretación de las situaciones meteorológicas en

tiempo pasado. Con el fin de homogeneizar la manera de proceder en el Reanálisis de las configuraciones sinópticas, nació el proyecto NCEP/NCAR Reanalysis (Kalnay et al., 1996). Se trata de un proyecto conjunto entre el National Centers for Environmental Prediction (NCEP) y el National Center for Atmospheric Research (NCAR). El objetivo de este trabajo conjunto fue producir nuevos análisis atmosféricos a partir de datos históricos (cubriendo el periodo del año 1948 en adelante) y así producir un análisis completo e históricamente homogéneo del estado de la atmósfera. El problema principal estriba en el periodo reconstruido (a partir del año 1948 hasta el presente), ya que no se tenían en cuenta muchos de los eventos importantes que caracterizaron las fases finales de la Pequeña Edad de Hielo (segunda mitad del S.XIX).

Los datos diarios de los distintos niveles atmosféricos que se han utilizado en la tesis, han sido adquiridos del proyecto 20th Century Reanalysis (20CRP; Compo et al., 2011). Se trata de un proyecto sostenido por el Earth System Research Laboratory Physical Sciences Division (ESRL/PSD) de la National Oceanic Atmospheric Administration (NOAA, Climate Program Office) y la University of Colorado CIRES Climate Diagnostics Center, siendo un esfuerzo conjunto para producir un Reanálisis de mapas de tiempo a escala mundial abarcando desde el año 1871 hasta el año 2012, asimilando observaciones de presión, la temperatura de la superficie del mar y la distribución del hielo marino. La base de datos proporciona las primeras estimaciones de la troposfera mundial y la variabilidad de la estratosfera desde el último cuarto del s. XIX, con una resolución temporal de seis horas y espacial de 2° x 2°, con la finalidad de contextualizar los patrones de circulación atmosférica actuales en una perspectiva histórica¹.

3.2.2. Reconstrucciones climáticas. Periodo: 1659-1999

La circulación atmosférica en latitudes medias es el factor dominante para los cambios regionales en la temperatura, la precipitación y otras variables climáticas (Luterbacher et al., 2002). De esta manera, el análisis de la variabilidad natural del clima del pasado a una resolución espacial y temporal elevada es importante para evaluar las últimas tendencias

¹ Para más información acerca de ambos proyectos y descargas de datos consultar la página Web: http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/20thC_Rean/.

climáticas. Para conseguir un análisis altamente resolutivo, se han utilizado las reconstrucciones de los mapas de presión media a nivel del mar (MSLP) y de la altura geopotencial de 500 hectopascales (hPa) procedentes de Luterbacher et al. (2002) con la finalidad de correlacionar los periodos comunes con el 20CRP y obtener patrones atmosféricos que cubran el periodo 1800-2010.

Luterbacher et al. (2002) presentan una cuadrícula de la presión reducida a nivel del mar con una resolución mensual entre los años 1659 y 1999 y de resolución estacional para el periodo 1500-1658. La reconstrucción afecta la región nordeste del Atlántico europeo (de 30° W a 40° E y de 30° N a 70° N). Las rejillas fueron desarrolladas utilizando un análisis de regresión de componentes principales en base a la combinación de los datos recopilados (presión, temperatura y precipitación) en distintas localidades europeas para el Early Instrumental Period (EIP), es decir, el periodo instrumental antes de las observaciones institucionales, y los datos proxy documentales y naturales de Eurasia. Las correlaciones se obtuvieron para el periodo de calibración 1901-1960 y se verificaron entre los años 1961 y 1990. Bajo el supuesto de estacionariedad de las relaciones estadísticas, los autores utilizaron una función de transferencia derivada en el periodo 1901-1990 para reconstruir los campos de presión en superficie y la altura geopotencial a 500 hPa para el periodo 1500-1999. Las pruebas de significación estadística indicaron reconstrucciones fiables a lo largo de todo el periodo, especialmente durante el periodo invernal².

3.2.3. Proyecto EMULATE. Reanálisis grid: 1850-2003.

Como apoyo a los dos Reanálisis presentados, se tuvo en cuenta el creado en el marco del proyecto EMULATE (Ansell et al., 2006; European and North Atlantic daily to MULTidecadal climATe variability).

Se trata de un proyecto financiado por la Comunidad Europea (contrato EVK2.CT2002-00161) entre los años 2002 y 2005, dirigido por el Doctor Phil Jones (Unidad de Investigación Climática de la Universidad de East Anglia) y con participación del Hadley Centre (UK), la

² Para más información acerca del proyecto y descarga de datos, consultar la página WEB:
<https://www.ncdc.noaa.gov/paleo/pubs/luterbacher2002/luterbacher2002.html>

Universidad de Augsburgo (Alemania), la Universidad de Bern (Suiza), la Universitat Rovira i Virgili (España), la Universidad de Stockholm (Suecia), la Universidad de Goeteborg (Suecia) y el Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (Francia).

El objetivo inicial del proyecto EMULATE fue definir los patrones de circulación atmosférica característicos en la región de Europa y el Atlántico Norte. Los estudios previos a EMULATE han estado limitados por la falta de una rejilla de presión media a nivel del mar con una resolución temporal suficiente. El objetivo central del EMULATE fue, por lo tanto, el desarrollo de una rejilla a resolución diaria de datos de presión media reducida a nivel del mar entre los años 1850 y 2003. Los campos de presión media son una combinación de 86 estaciones continentales e insulares con observaciones de presión con 5° x 5° de precisión y para la región comprendida entre los 70° W y los 50° E, y de los 25° N a 70° N.

De esta manera, el proyecto EMULATE amplía la disponibilidad de registros históricos sobre el Atlántico extratropical y Europa con un objetivo final del proyecto claramente estipulado: mejorar la capacidad de predicción, particularmente en el contexto del actual calentamiento global y en la ocurrencia de los fenómenos meteorológicos extremos en escenarios futuros³.

3.3. Registros instrumentales: datos de precipitación y temperatura

3.3.1. Rejilla a resolución diaria de precipitación a escala europea (E-OBS versión 11)

E-OBS es una rejilla de un conjunto de datos diarios observacionales para Europa de precipitación, temperatura y presión a nivel del mar basado en la información procedente del ECA&D (European Climate Assessment & Dataset project, Haylock et al., 2008). Este proyecto constituye la columna vertebral del abastecimiento de datos climáticos

³ Para más información acerca del proyecto y descarga de datos, consultar la página WEB: <http://www.cru.uea.ac.uk/projects/emulate/>

del Centro Regional Climático (RCC), región VI (Europa y Oriente Medio) de la Organización Mundial de Meteorología (OMM) desde el año 2010. Los datos y los productos obtenidos a partir de ellos asisten al Marco Mundial para los Servicios Climáticos (MMS). En la actualidad, está recibiendo datos de 66 participantes de 62 países y el conjunto de datos contiene 41.600 observaciones procedentes de estaciones meteorológicas distribuidas por Europa y el Mediterráneo. El 77% de estas series diarias se pueden descargar gratuitamente desde el sitio web del proyecto⁴ para fines no comerciales, es decir, investigación y educación.

La versión 11 del E-OBS abarca el periodo comprendido entre el 1 de enero de 1950 hasta el 31 de diciembre de 2014. En un principio fue desarrollado y actualizado como parte de los proyectos europeos ENSEMBLES (EU-FP6) y EURO4M (EU-FP7). En la actualidad es mantenido como parte del proyecto europeo UERRA (EU-FP7). Este último proyecto aborda el Reanálisis de las observaciones meteorológicas, incluyendo la recuperación de los datos históricos (especialmente del siglo pasado), la estimación de la incertidumbre de los nuevos análisis y entornos amigables para la consulta de los datos.

3.3.2. IDAweb. Base de Datos de MeteoSwiss: the Swiss Federal Office of Meteorology and Climatology

IDAweb es una herramienta con el objeto de acceder a las variables climáticas (mediciones en superficie) de MeteoSwiss. Se trata de un interfaz desarrollado en un entorno web que permite el acceso a los datos a través de Internet sin la necesidad de instalación de un software concreto. El acceso a IDAweb es gratuito para instituciones oficiales y universidades. En el marco del Proyecto FluVALps se ha tenido acceso a los datos a partir de un convenio. Es importante señalar que los datos contenidos en IDAweb han pasado un proceso de depuración y homogeneización, es decir, preparados para su utilización en estudios de tipo climático⁵. A partir de los datos obtenidos de IDAweb, se ha creado una base de datos a resolución diaria para Suiza a partir de los registros de precipitación, el objetivo de la cual es de disponer de una red densa

⁴ Se ha utilizado la rejilla de anomalías de precipitación procedentes de:
http://eca.knmi.nl/download/ensembles/data/Version10.0/Grid_0.50deg_reg/

⁵ Para más información y descarga de datos, consultar la página WEB:
http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/en/services/data_portal/idaweb.html

para evaluar la variabilidad temporal y espacial de la pluviometría. Se han seleccionado todas aquellas estaciones en las que el inicio de la serie fue el año 1900 o anterior. La base de datos, cumpliendo el requisito reseñado, consta de 128 estaciones, siendo los primeros datos del año 1863 (dos estaciones pero aumentando a 14 durante el 1864). Además, la base de datos se completa con 17 estaciones que tienen su inicio con posterioridad al 1900, pero que se utilizan de refuerzo en cantones donde la densidad de estaciones no es tan importante (especialmente, los cantones de Ticino y Valais).

La evolución del número de estaciones contenidas en la base de datos con respecto al tiempo (ver figura 3.4), señala que es a partir del año 1900 cuando se produce el incremento más significativo, alcanzando la máxima representación espacial durante el año 1966 y sufriendo un pequeño retroceso a partir de esa fecha (por ejemplo, el año 2010, último año seleccionado, queda representado por 119 estaciones).

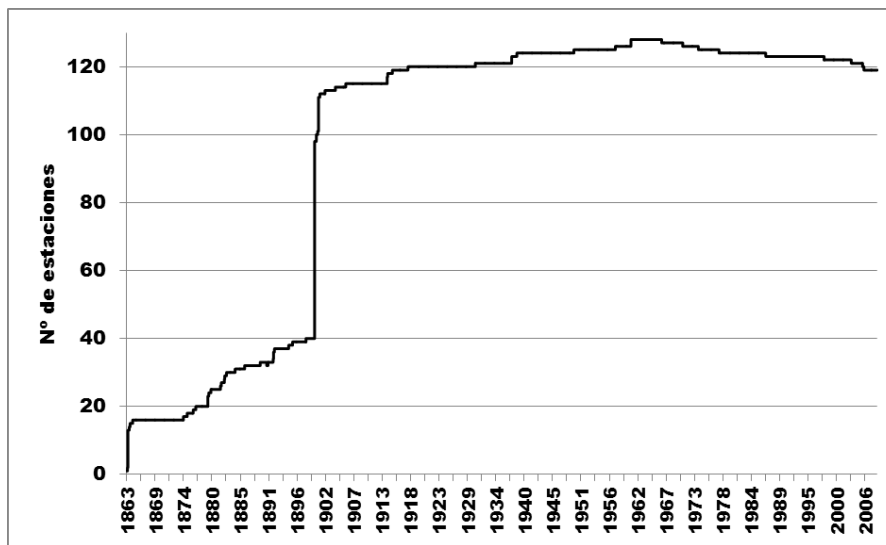
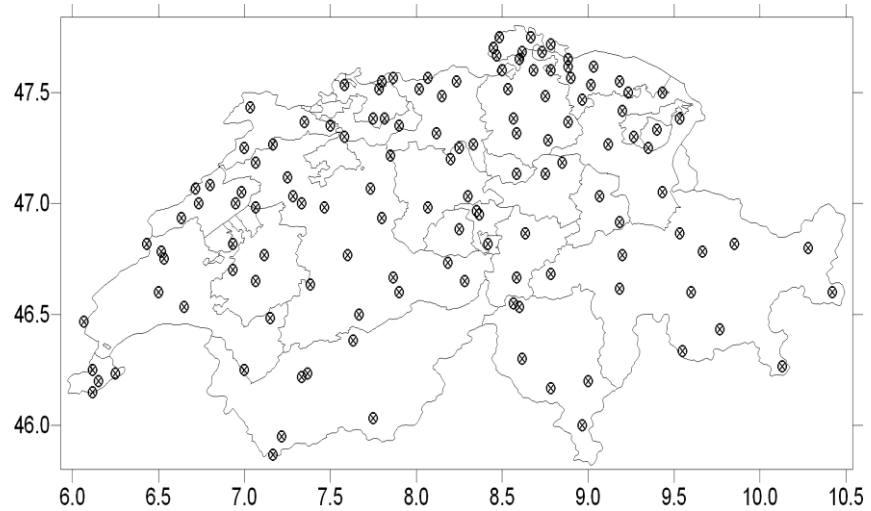


Figura 3.4. Evolución temporal del número de estaciones adquiridas de IDAweb.

El análisis de la distribución espacial de las estaciones pluviométricas utilizadas en el estudio (ver figura 3.5) indica que la densidad varía de mayor a menor en un transecto nordeste a sudoeste y señalando que el número de estaciones es significativamente mayor en la mitad norte del país, tomando como barrera de separación la cordillera de los Alpes. A pesar de esta discrepancia espacial, la distribución es bastante homogénea en todos los cantones, salvo el vacío que se observa en cuadrante nord-occidental de los cantones de Tesino y Valais.

Figura 3.5. Distribución de las 128 estaciones pluviométricas utilizadas.



La estructura de la base de datos es en forma de matriz con el objetivo de facilitar su tratamiento estadístico. El número de estaciones es de 128, con un total de 5.180.415 registros de precipitación. El cantón de Berna es el que tiene un mayor número de estaciones (16; 12% del total; 648.671 registros de precipitación) mientras que el cantón de Zug tiene una sola estación (35.884 registros de precipitación).

La matriz se ha almacenado en un fichero Excel (ver figura 3.6), en donde la fecha en formato ‘aaaammdd’ aparece en la filas, mientras que en las columnas están las estaciones agrupadas por cantón. Cada estación se identifica por un código de tres letras. La precipitación está registrada en mm (unidad equivalente a litros por metro cuadrado) y la precisión del registro es de un decimal, mientras que los días sin precipitación se han rellenado con ceros.

Figura 3.6. Extracto de la base de datos de precipitación (unidades en mm) a partir de los registros obtenidos de IDAweb (Meteoswiss).

	Aargau								Appenzel_Inn		Appenzel_Aus		Basel			
DATA	BZN	FRI	LFB	MOH	MUR	RHF	UBB	UNK	APP	SAE	URN	ARI	BAS	EPT	WAB	
19660101	2.3	2.7	1.8	1.2	5.2	1.4	4.6	6.5	5.8	19.1	6.0	0.9	1.2	5.5	1.3	
19660102	11.1	3.5	3.9	2.6	7.0	2.8	6.0	13.3	8.4	21.2	8.0	2.5	3.1	8.2	9.8	
19660103	3.1	4.2	3.6	2.3	8.2	1.7	3.4	8.5	27.0	43.8	8.0	2.0	1.8	4.2	8.2	
19660104	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
19660105	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
19660106	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
19660107	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
19660108	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
19660109	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
19660110	1.5	2.3	1.2	0.5	2.0	3.6	9.0	3.5	2.0	2.1	3.0	3.1	1.5	5.8	4.2	
19660111	15.1	10.5	10.5	11.9	12.2	10.0	24.4	13.1	17.0	11.0	13.5	5.5	16.4	1.4	9.5	
19660112	0.3	1.1	0.0	0.0	1.2	0.4	0.0	1.1	6.7	1.8	8.0	0.3	0.2	0.0	1.2	
19660113	0.2	0.2	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	
19660114	0.0	0.0	0.1	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	1.2	0.0	
19660115	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
19660116	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
19660117	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

3.3.3. Multi-centennial climate variability in the Alps (ALP-IMP)

El proyecto ALP-IMP⁶ tiene como objetivo aprovechar el potencial que ofrece la gran densidad de datos proxy e instrumentales en los Alpes e integrar la información en una base de datos. De esta manera, el periodo que abarca no sólo se reduce al instrumental sino que se combina con proxies alpinos como los dendrocronológicos, isotópicos y la variabilidad glaciar, bajo unos estrictos requerimientos de calidad y homogeneidad de las series. El periodo reconstruido abarca los últimos 1.000 años. En el proyecto se ejecutaron modelos climáticos regionales de alta resolución junto a un análisis estadístico sofisticado para estudiar los patrones de variabilidad climática interna mesoescalar en la región, así como el clima alpino en su conjunto frente a la variabilidad Europea a escala global. El objetivo final fue crear una rejilla espacial de varias variables climáticas (ver figura 3.7).

En el marco de la presente tesis, y con el objetivo de identificar los periodos fríos y cálidos en el periodo 1800-2010, se ha determinado la temperatura media anual de Suiza basada en los datos obtenidos de este proyecto. La temperatura media utilizada es la media aritmética de los puntos de la cuadrícula que corresponden al territorio suizo (ver la figura 3.7).

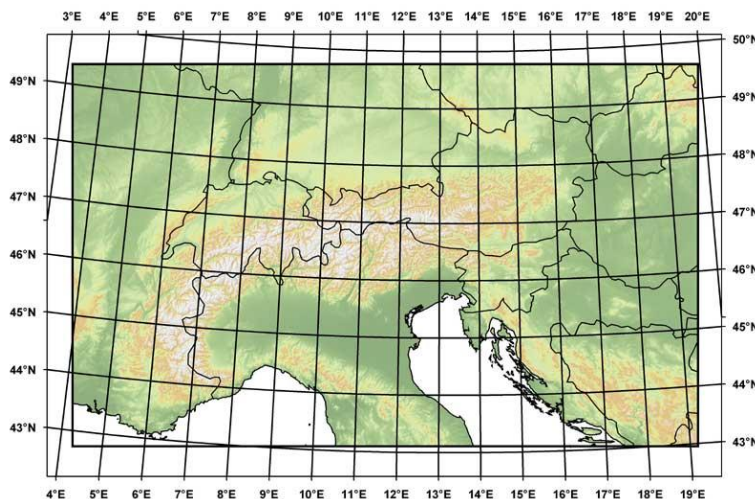


Figura 3.7. Proyecto ALP-IMP. Área de estudio: *European Greater Alpine Region (GAR)* en el centro del dominio.

Fuente: <http://www.zamg.ac.at/ALP-IMP/>

⁶ Para más información acerca del proyecto y descarga de datos, consultar la página WEB: <http://www.zamg.ac.at/ALP-IMP/>

3.3.4. Las variaciones de temperatura de verano en los Alpes

La falta de datos instrumentales antes de mediados del S. XIX limita nuestro conocimiento de las tendencias actuales del calentamiento global. En ausencia de mediciones directas, se han utilizado proxies procedentes de archivos naturales o históricos en donde quedan registrados los cambios climáticos pasados. La dendrocronología se basa en la reconstrucción climática a partir de un análisis exhaustivo de los anillos de los árboles (Briffa et al., 1988).

Büntgen et al., (2006) reconstruyen las temperaturas medias de verano con una resolución anual en los Alpes, abarcando el periodo 755-2004. La reconstrucción se basa en 180 series dendrocronológicas de la especie *Larix decidua* Mill., utilizando el método estandarizado de la curva regional para preservar las variaciones decadales. Las series provienen de cuatro valles alpinos en Suiza y los Alpes austríacos occidentales. Estas regiones se caracterizan por una homogeneidad espacial en relación a la temperatura. Las buenas correlaciones obtenidas a partir del ancho anual de los anillos (RW), la máxima densidad de los anillos (MXD) con la temperatura (entre 0,65 y 0,86) después de un suavizado de la serie reconstruida con las estaciones meteorológicas ubicadas por encima de los 1.500 metros (desde 1864), indican una respuesta óptima de la cronología de las temperaturas medias de junio a agosto.

El registro proxy revela condiciones cálidas desde antes del año 1000 hasta el s. XIII, seguido de un periodo de enfriamiento prolongado, alcanzando valores mínimos en la década de 1820, y una tendencia hacia el calentamiento en el s.XX. La Comparación con otras reconstrucciones a diversas escalas (regional, continental y hemisféricas) revela importantes similitudes respecto a la variabilidad decadal (ver figura 3.8).

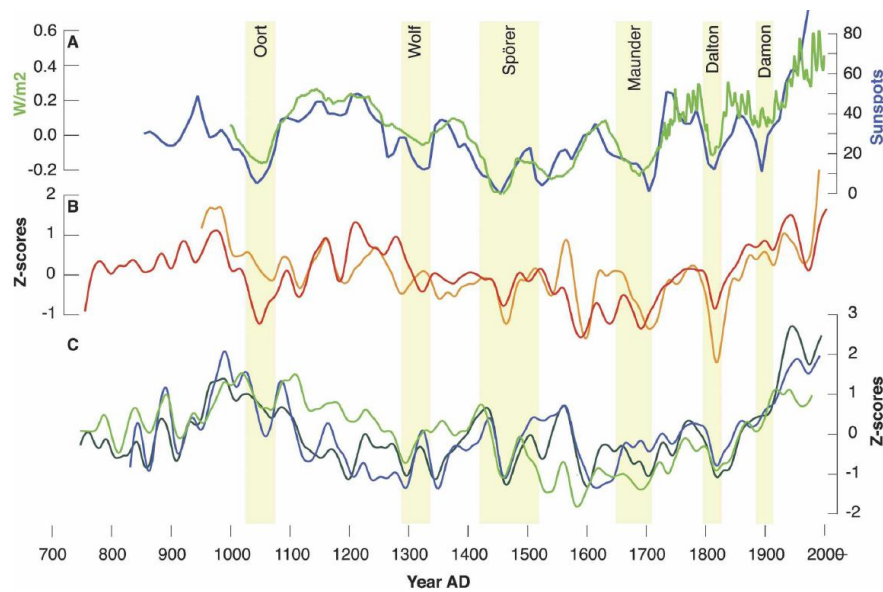


Figura 3.8. Fuente original: Büntgen et al., (2006).

A) Estimación de la actividad solar (línea de color verde; Crowley 2000) y número de manchas solares números (línea de color azul. Usoskin et al 2003).

B) Reconstrucción de la temperatura alpina basada en el MXD (línea de color roja; Büntgen et al., 2006) y en base al RW (naranja; Büntgen et al 2005).

C) Reconstrucciones de temperatura a gran escala (línea de color azul, Esper et al 2002; línea de color verde, Moberg et al 2005; y línea de color verde oscuro, D'Arrigo et al 2006).

El sombreado amarillo señala los mínimos solares más destacados (Stuiver y Braziunas 1989).

3.4. Proxies solares y climáticos

3.4.1. Número medio anual de manchas solares (1700 – 2011)

Los datos de manchas solares se han obtenido del World Data Center for the Sunspot Index, centro de datos desarrollado y difundido por el Solar Influences Data Analysis Center (SIDC) perteneciente al Royal Observatory de Bélgica. A rasgos generales, la finalidad del centro es avanzar en el conocimiento sobre el Sol y su influencia en el sistema solar, a través de investigaciones y observaciones, difundiendo el conocimiento y experiencia a la comunidad científica y a la sociedad, en general⁷.

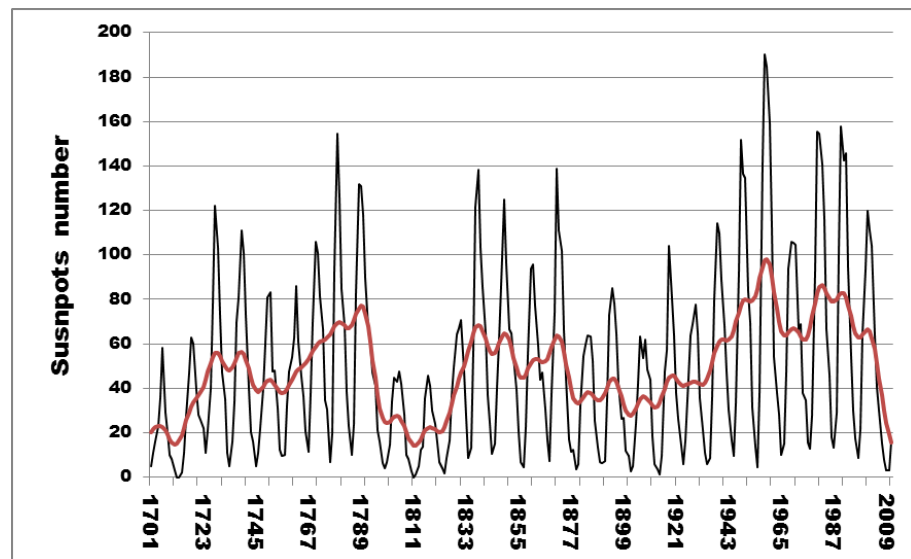
⁷ El acceso a los datos y pronósticos a SIDC están exentos de cualquier cargo, tanto para las instituciones públicas como las científicas a través de la siguiente dirección Web: <http://sidc.be/silso/datafiles>.

Los datos tienen como base el número de manchas solares recopiladas por Rudolph Wolf durante la primera mitad del s. XIX. El promedio anual se calcula a partir de una sencilla media aritmética del número total diario de manchas de los días de cada año. Señalar que durante los primeros años, en particular, antes de 1749, las medias se basaban en datos mensuales y anuales, y entre 1749 y 1818 no se podían calcular con la muestra total de 365 días, porque no se disponía observación para todos los días del año. El número diario de manchas solares está derivado de la fórmula:

$$R = 0,6 * (N_s + 10 * N_g), \quad (1)$$

donde N_s es el número de manchas y N_g es el número de grupos contados sobre todo el disco solar. El factor de escala 0,6 es un factor de conversión para poder comparar el número de manchas solares actuales con el de manchas solares originales obtenidas por Rudolph Wolf. Por definición, el índice no puede tomar valores entre 0 (no se observa ninguna mancha en el disco solar) y 7 (cuando se observa una sola mancha, $R = 0.6 * 11$).

Figura 3.9. Número de manchas solares anuales (periodo 1701-2011). Se ha aplicado un filtro gaussiano de paso bajo de 11 años (línea continua roja).



La evolución temporal del registro señala claramente los periodos de 11 años (ciclo Schwabe, línea negra en la figura 3.9). Pero se observa una variabilidad cíclica en estos ciclos primarios, mostrando unos mínimos y unos máximos (línea roja en la figura 3.9). Hay que destacar los mínimos de principios de los siglos XVIII, XIX, XX y XXI, presentando un periodo medio de 87 años (ciclo Gleissberg).

3.4.2. Datos anuales de ^{10}Be : 1800-1994. NGRIP Ice Core 600 Year Annual ^{10}Be Data

La deposición del radionucleido ^{10}Be atmosférico en las capas de hielo polares es un archivo natural con resolución anual sobre la actividad solar y constituye una aproximación para comprender las posibles conexiones entre la variabilidad solar y climática en el pasado (Beer et al, 1990). La concentración de ^{10}Be en el hielo depende de la intensidad de la radiación cósmica, además del transporte y de la precipitación atmosférica (Vonmoos et al., 2006). Se ha observado una correlación inversa entre la actividad solar y la concentración de ^{10}Be , por lo que picos máximos en la concentración del radionucleido corresponderían a fases de baja actividad solar, y viceversa. Este hecho es debido a que los rayos solares dificultan el paso de la radiación cósmica intergaláctica y amortiguan su llegada a la atmósfera terrestre (McCracken et al., 2002, 2007).

A pesar de la amplia utilización de ^{10}Be como la fuente de información más significativa sobre la actividad solar del pasado, sólo hay dos registros que con una resolución anual abarcan varios siglos, ambos medidos a partir de testigos de hielo extraídos de Groenlandia: el Dye-3, que abarca el periodo de 1428 a 1985 (Beer et al., 1990, 1998) y el NGRIP que comprende los años 1389 y 1994 (Berggren et al. 2009). Es justo señalar que existen otros registros pero abarcan periodos temporales mucho más cortos (por ejemplo, Steig et al., 1996; Aldahan et al., 1998; Smith et al., 2000; Moraal et al., 2005; Heikkilä et al, 2008).

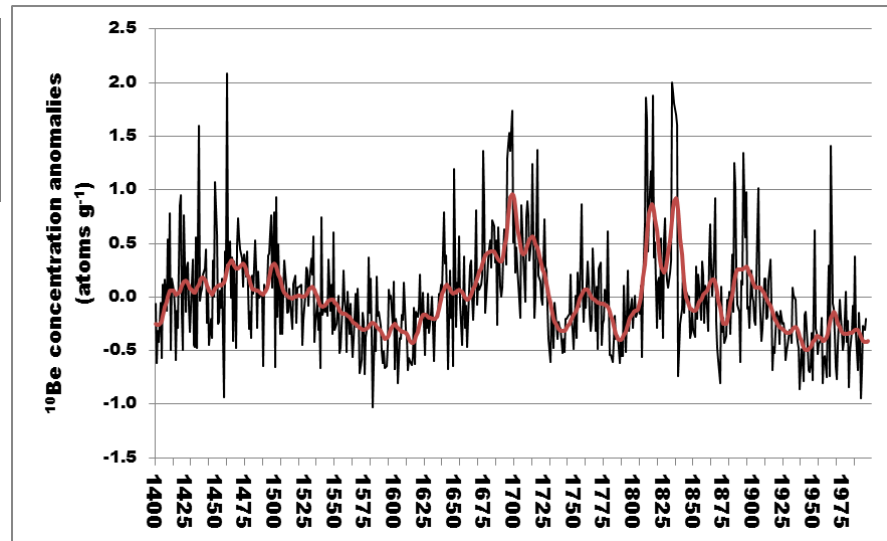
Los datos anuales de ^{10}Be utilizados en la tesis están medidos en el marco del Proyecto North Greenland Ice Sheet (NGRIP) a partir del testigo de hielo “NG 97-S2” ubicado en 75,1°N y 42,32°W a 2.917 m sobre el nivel del mar (Berggren et al., 2009)⁸. Se trata de un registro a resolución anual de ^{10}Be que abarca el periodo 1389-1994. La evolución temporal del registro (ver figura 3.10) muestra variaciones interanuales elevadas que se superponen con amplias fluctuaciones de carácter irregular. Los periodos de valores de alta concentración de ^{10}Be corresponden a los mínimos solares (comparar con figura 3.9), siendo los más importantes durante los

⁸ Para más información acerca del proyecto NGRIP y descarga de datos, consultar:

<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/icecore/greenland/summit/ngrip/ngrip-10be.txt>

mínimos Maunder (1645-1715) y Dalton (1790-1830), mientras que el mínimo Spörer (1415-1535) queda menos marcado.

Figura 3.10. Datos anuales de ^{10}Be del testigo de hielo "NG 97-S2" (periodo 1400-1994). Se ha aplicado un filtro gaussiano de paso bajo de 22 años (línea continua roja)



3.4.3. Datos anuales de $\delta^{18}\text{O}$: 1800-1987. El GISP2 oxygen isotope record

La concentración de isotopos estables de oxígeno en el agua procedente de la precipitación en forma de lluvia o nieve, ha estado considerada como un potente indicador del paleoclima (Stuiver y Grootes, 2000).

Se ha observado una estrecha relación con algunos parámetros de relevancia climática como la temperatura del aire en superficie, con unos coeficientes de correlación del orden de 0.5 en escalas temporales de uno a cinco años (Jones et al., 2003). De hecho, para temperaturas anuales (T) por debajo de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, la relación puede estar descrita por la ecuación (figura 3.9):

$$\delta^{18}\text{O} = 0.64 T - 12.8 \quad (2)$$

Esta ecuación alude a la relación $\delta^{18}\text{O}/T$ referida al clima actual porque está calculada a partir de mediciones de diferentes puntos de muestreo durante las últimas décadas. Los datos de temperatura utilizados son los obtenidos de red de datos mundial GNIP (Global Network for Isotopes in Precipitation) y de estaciones polares suplementarias, mientras que los datos isotópicos son los extraídos de cuatro testigos de hielo ubicados en la Antártida (Jouzel et al., 1994). En este estudio se demuestra que la pendiente del modelo presentado para el clima presente es muy similar a la pendiente del modelo estimado para el último máximo glacial. El

resultado tiene importancia dadas las condiciones atmosféricas diferentes entre los dos periodos, especialmente, las diferencias en la circulación general atmosférica, las regiones fuente de la precipitación y la altitud de formación de la precipitación.

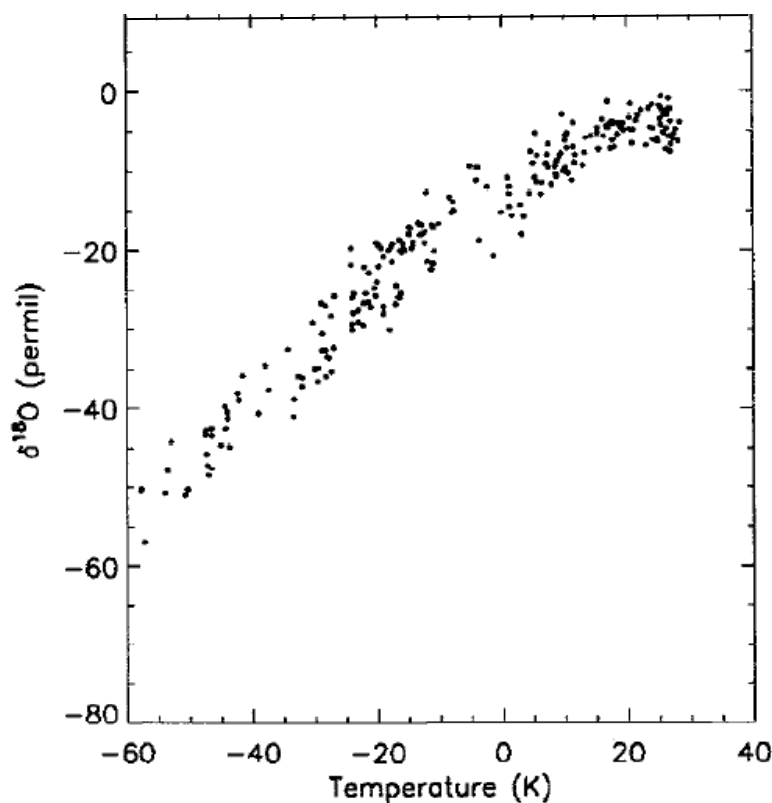


Figura 3.11. Registro anual de $\delta^{18}\text{O}$ contenido en la precipitación (en tanto por mil) versus temperatura anual (por debajo de 15 °C). Mediciones realizadas en la Antártida y para el clima actual.

Fuente: Jouzel et al., 1994.

Existen perfiles isotópicos de alta resolución abarcando lapsos temporales de hasta 200.000 años disponibles tanto para Groenlandia (Daasgaard et al., 1993 o Greenland Ice Core Project GRIP, 1993) como para la Antártida (Jouzel et al., 1993). En las latitudes medias y bajas, la señal isotópica esta medida directamente de los acuíferos, espeleotemas o en los casquetes glaciares tropicales e indirectamente de la calcita precipitada, los anillos de los árboles y otros materiales orgánicos, particularmente, los sedimentos lacustres.

Se han utilizado en la tesis los datos para el periodo 1800-1987 procedentes del proyecto Greenland Ice Sheet 2 (GISP 2, Stuiver y Grootes, 2000)⁹. Entre los años 1989 y 1993, el proyecto recogió varias

⁹ Para más información acerca del proyecto GISP 2 y descarga de datos, consultar el WEB: http://depts.washington.edu/qil/datasets/gisp2_1yr.txt

muestras de hielo ubicadas en 72° 36' N, 38° 30' W. Este archivo contiene los datos de $\delta^{18}\text{O}$ promediados sobre intervalos de un año, desde el año 1133 BP, basado en mediciones realizadas el 1 de febrero de 1997 en el Quaternary Isotope Laboratory de la Universidad de Washington. Se utilizaron muestras procedentes de dos testigos de hielo diferentes: por encima de los 180 m de profundidad se usaron las muestras provenientes del testigo de hielo “1989 B” mientras que por debajo de 180 m empleó el testigo “1990-1993 D”. La serie de datos proporciona información sobre el clima en base a una conversión de los valores de isótopos de oxígeno a la temperatura media anual en Groenlandia. La figura 3.11 muestra la evolución temporal de la serie mostrando la alternancia entre los periodos fríos y cálidos.

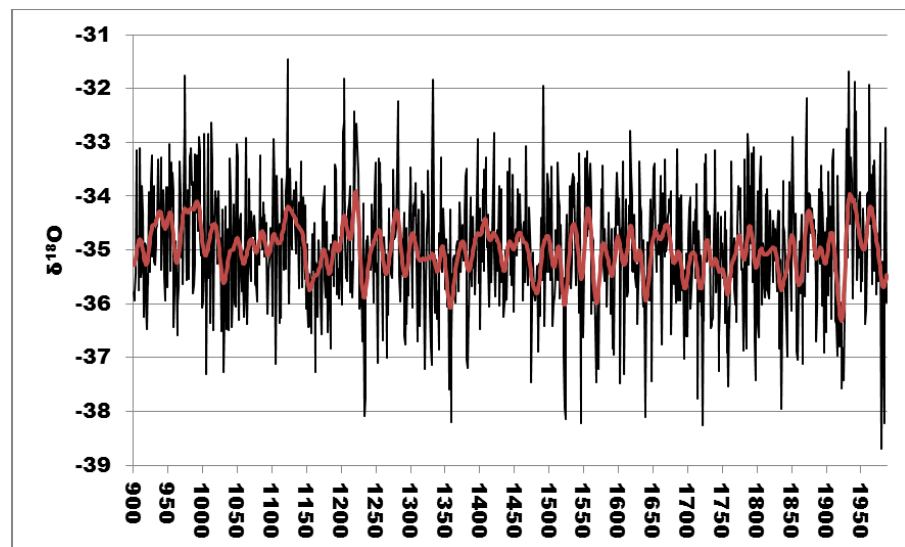


Figura 3.12. Datos anuales del isótopo $\delta^{18}\text{O}$ obtenidos del proyecto Greenland Ice Sheet 2 (periodo 900- 1986). Se ha aplicado a la serie un filtro gaussiano de paso bajo de 22 años (línea continua roja)

3.4.4 Erupciones volcánicas durante los últimos 1.500 años: Ice-core Volcanic Index 2 (IVI2)

La comprensión de las causas naturales del cambio climático es vital para evaluar los impactos relativos de la modificación humana sobre el clima. [Gao et al., 2008](#) han investigado una de las causas naturales más importantes de la variabilidad climática: las erupciones volcánicas a partir del sulfato volcánico. En base a los análisis de 54 registros de testigos de hielo, procedentes tanto del Ártico como de la Antártida, más del doble del número de muestras utilizadas con anterioridad, se ha podido reducir los errores inherentes en las reconstrucciones basadas en un pequeño número de registros. De esta manera, se ha obtenido una precisión

mucho mayor tanto en la detección de eventos, como en la cuantificación de los efectos radiativos.

Se extrajeron las señales de la deposición volcánica de cada registro de los testigos de hielo mediante la aplicación de un filtro LOESS de paso alto a la serie temporal y el examen de los picos que superan el doble de la desviación absoluta respecto a la media móvil de 31 años. Seguidamente, se estudió el patrón espacial de la deposición del sulfato volcánico en Groenlandia y la Antártida, combinándolo con un nuevo modelo de transporte de los aerosoles volcánicos en la estratosfera para crear la serie de erupciones volcánicas en función del mes, la latitud y la altitud durante los últimos 1.500 años¹⁰ (Gao et al., 2008).

Las erupciones volcánicas en nuestro estudio han sido investigadas a partir del índice IVI2: deposición de sulfato volcánico en base a la inyección producida a la estratosfera (en unidades de Tg) para el hemisferio norte durante los últimos doscientos años (1800-2000). Estas medidas han sido extraídas de los registros procedentes de treinta y dos muestras de hielo abarcando gran parte de la extensión de Groenlandia (Gao et al., 2008).

¹⁰ Para más información acerca del IVI2 y descarga de datos, consultar el WEB: <http://climate.envsci.rutgers.edu/IVI2/>

Figura 3.13. Inyección anual en la estratosfera de aerosoles volcánicos (sulfatos) en los últimos 1.500 años para el Hemisferio norte (arriba), el Hemisferio Sur (centro) y global (abajo).

Fuente: Gao et al., 2008.

