



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.

4. REGIONALIZACIÓN HIDRO-CLIMÁTICA DE SUIZA

4. REGIONALIZACIÓN HIDRO-CLIMÁTICA DE SUIZA

4.1. Introducción

Dada la intrincada estructura topográfica de Suiza, se va a generar una división territorial que retenga las importantes diferencias fisiográficas y ambientales entre las distintas regiones. La alta variabilidad hidro-climática que caracteriza el territorio suizo viene definida por toda una serie de factores. Los principales se señalan a continuación:

- Topográficos debidos a las características de los relieves en buena parte de alta montaña.
- Hidrográficos en relación a una red hidrográfica y unos procesos hidrológicos adaptados a estos ambientes alpinos.
- Climáticos caracterizados por una alta variabilidad espacial dada la intrincada topografía del país.
- Antrópicos que impactan de forma diferente según la zona, siendo más expuestos y, por tanto, más vulnerables, los fondos de los valles y zonas adyacentes donde la presión del hombre es mayor. Es donde se concentra la mayor parte de la población, estando la vertiente norte de los Alpes más expuesta que la vertiente sur, al tener unas condiciones topográficas más dúctiles. (ver capítulo 2)

Para intentar explicar la mayor parte de esta variabilidad, se ha optado por un modelo basado en la estadística multivariante, de tal manera que:

- 1) permita la explicación de la información original de forma sintética mediante una reducción de la dimensión,
- 2) explique el mayor porcentaje de la variabilidad posible contenida en los datos originales,
- 3) y, finalmente que la solución obtenida sea manejable e interpretable.

4.2. Métodos: Análisis Componentes Principales en modo Espacial

Tomando la matriz de daños debidos a las inundaciones que se ha descrito en el apartado 3.1 [A(MxN)] como input del modelo, se ha elaborado una estructura metodológica multivariable desarrollada en dos fases: un análisis exploratorio, a partir de un Análisis de Componentes Principales (PCA) en modo espacial (S-mode) para resumir la información original, y un análisis confirmatorio donde se rotan los factores y definir las zonas hidro-climáticas de Suiza con una mayor precisión.

- 1) El análisis exploratorio tiene como objetivo resumir la mayor parte de la información original (varianza) en una cantidad mínima de factores. Para ello se ha aplicado un PCA en S-mode a partir de la matriz de correlaciones. La validación del modelo se realiza a partir del contraste de esfericidad de Barlett (Barlett, 1937) y la medida de adecuación muestral de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO: Kaiser, 1974).
- 2) Para el análisis confirmatorio, siempre que el análisis anterior sea satisfactorio, se ha utilizado el scree-test (Cattell, 1966) para extraer los componentes más relevantes y se han rotado los factores para una mayor interpretabilidad de los resultados (Richman, 1986). La rotación escogida ha sido la Equamax (Kaiser, 1974; Peña y Raso, 2008).

Los supuestos fundamentales subyacentes en el PCA, básicamente la normalidad de las variables y la ortogonalidad de los factores, son más de tipo conceptual que estadístico. Es cierto que las series de inundaciones utilizadas en la tesis no se distribuyen de forma normal, pero en nuestro caso el supuesto de normalidad es importante sólo si se desea generalizar los resultados del análisis más allá de la muestra recogida. Más complicado es justificar el supuesto de ortogonalidad de los factores. La interpretación física de este tipo de artefactos estadísticos puede resultar problemática porque la naturaleza se caracteriza por la no linealidad y la alta dimensionalidad de los procesos que en ella participan. En consecuencia, las relaciones estadísticas no son necesariamente indicativas para conseguir una plena comprensión de los mecanismos físicos involucrados (Switaneck y Troch, 2011). Debido a esta razón, la interpretabilidad física de los patrones obtenidos mediante la aplicación

del PCA es cuestión de controversia como consecuencia de las fuertes restricciones que tienen que satisfacer los factores, a saber, la ortogonalidad en el espacio y el tiempo (Simmons et al. 1983). Esta deficiencia ha llevado al desarrollo de técnicas basadas en la rotación de los factores, véase Richman (1986), para mejorar y facilitar la interpretación física de los factores.

Sin embargo, sí que es necesario que la matriz de datos garantice la existencia de correlaciones entre las series de datos para justificar la aplicación de PCA (Hair et al., 1998). Como se ha indicado, se han utilizado dos pruebas para evaluar el modelo: la medida de adecuación muestral de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) y la prueba de esfericidad de Bartlett.

- El estadístico del KMO varía entre 0 y 1. Un valor cercano a 1 indica que los patrones de correlaciones son robustos y, por lo tanto, el PCA debe producir factores distintos y fiables. Según Kaiser (1974) el valor estadístico recomendado y aceptable debe ser mayor a 0,5. Si el valor de KMO es inferior a este valor se puede recurrir al análisis de la matriz anti-imagen de la matriz de correlaciones (que contiene las covarianzas y correlaciones parciales negativas). Las diagonales de esta matriz se utilizan como una medida de adecuación muestral para eliminar variables redundantes, es decir, aquellas variables que en la diagonal principal tienen valores inferiores a 0,5, con el objetivo de mejorar el resultado de PCA.
- La prueba de esfericidad de Bartlett comprueba la presencia de correlaciones entre las variables. Se trata de un test de significación estadística donde la hipótesis nula se define en base a la matriz de correlaciones se identifique a la matriz identidad, es decir, todos los elementos de la diagonal son 1 y todos los elementos fuera de la diagonal son 0, lo que implica que las variables no están correlacionadas. Si el valor de Significación (Sig. Valor) para esta prueba es menor que nuestro nivel alfa (α), rechazamos la hipótesis nula y, por tanto, es viable la aplicación del PCA.

Una vez testada la conformidad del uso del PCA, se ha utilizado el scree-test para extraer los componentes más relevantes y la rotación normalizada Equamax para una interpretación más sencilla de la salida del modelo. Se trata de una rotación ortogonal siendo una combinación de la rotación Varimax y la Quartimax (Kaiser, 1958). La primera hace

énfasis en la simplificación de las columnas o factores de la matriz con el fin de satisfacer la sencillez de la interpretación, maximizándose la suma de varianzas de los cuadrados de las cargas factoriales de cada factor, mientras que la segunda incide en la simplificación de las filas. De esta manera, la rotación Equamax minimiza tanto el número de variables que tienen una alta carga factorial con un factor como el número de componentes necesarios para explicar la variable.

El resultado final del proceso son los patrones espaciales que explican el mayor porcentaje de la variabilidad hidro-climática del territorio suizo.

4.3. Resultados

4.3.1. Solución del Análisis de los Componentes Principales

La medida de adecuación muestral KMO es de 0,82, ofreciendo un resultado altamente satisfactorio. Dado que esta medida cumple los criterios mínimos para evaluar los patrones de correlación del conjunto de datos, se evita el problema que obligaría a examinar la matriz anti-imagen de la matriz de correlaciones para eliminar del análisis las variables redundantes.

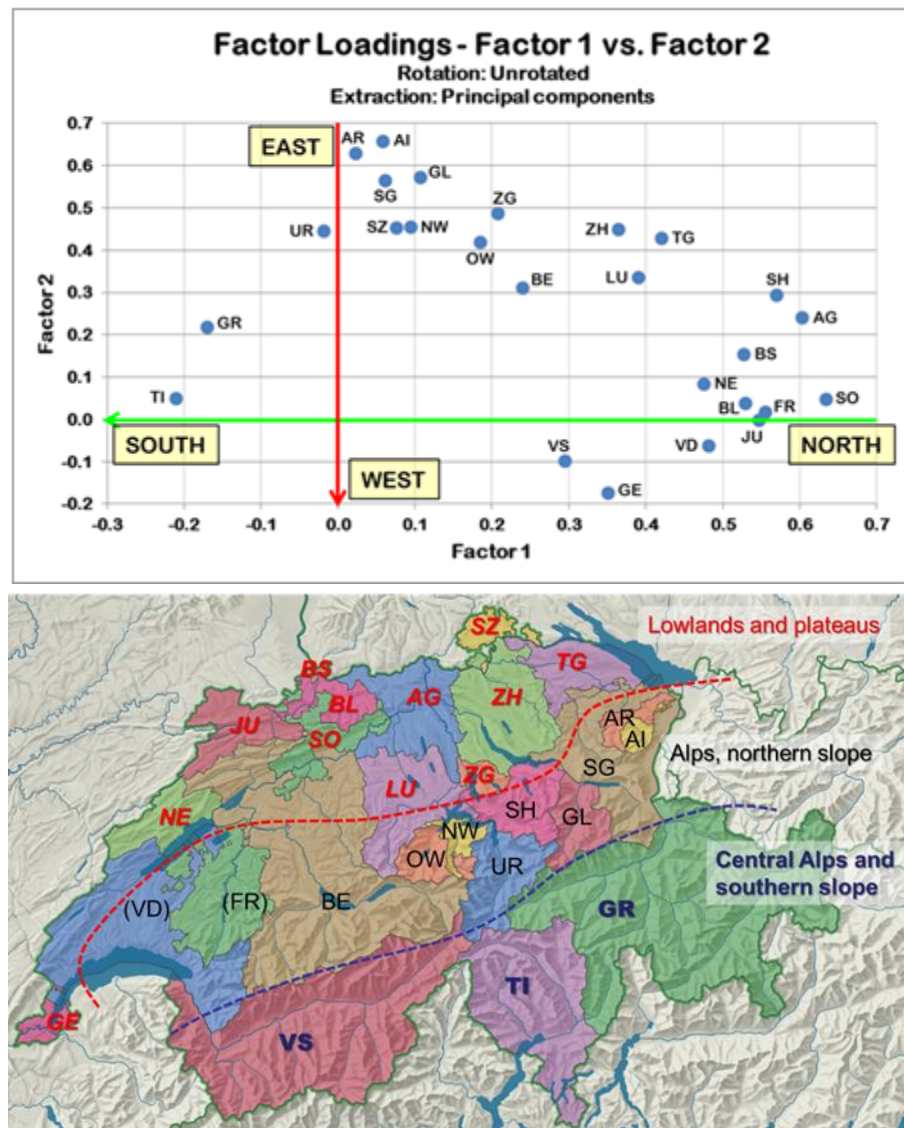
El resultado de la prueba de esfericidad de Bartlett muestra que el Sig. Valor = 0,000 < α = 0,05 (χ^2 cuadrado = 2128.42, grados de libertad = 325). El resultado del análisis nos lleva a rechazar la hipótesis nula y concluir que no hay evidencia de que la matriz de correlaciones sea una matriz de identidad y el conjunto de datos utilizado se adecua a una aplicación del PCA.

La gráfica 2D de los dos componentes principales (Factor 1 y Factor 2, ver figura 4.1), sin aplicar todavía ningún tipo de rotación, representan el 22% de la varianza total. La distribución de las cargas factoriales muestra aproximadamente la ubicación geográfica de los cantones suizos pero con una rotación en base a un ángulo de 90°. Esta disposición de los cantones respecto a los dos componentes principales plasma claramente la influencia climática en relación a la topografía, mientras que la red hidrográfica tiene una menor relevancia. Los factores de origen antrópico (demográficos o socio-económicos) pueden incidir de forma indirecta pero al igual que la hidrografía tienen poca notabilidad en el análisis.

Figura 4.1.

Parte superior: Cargas factoriales del Factor 1 frente al Factor 2 después de la aplicación de la PCA sin rotación a la matriz de inundaciones.

Parte inferior: Las tres zonas fisiográficas de Suiza junto con la distribución de los cantones.



Los dos componentes principales pueden ser interpretados como las dos principales fuentes de humedad que afectan Suiza.

- 1) El factor 1 está relacionado con una disposición Norte/Sur de los cantones, indicando una mayor influencia del mar Atlántico (cargas factoriales positivas en la figura 4.2) o del mar Mediterráneo (cargas factoriales negativas en la figura 4.2), teniendo en cuenta la presencia de la cordillera de los Alpes que ejerce de barrera entre ambas fuentes de humedad.

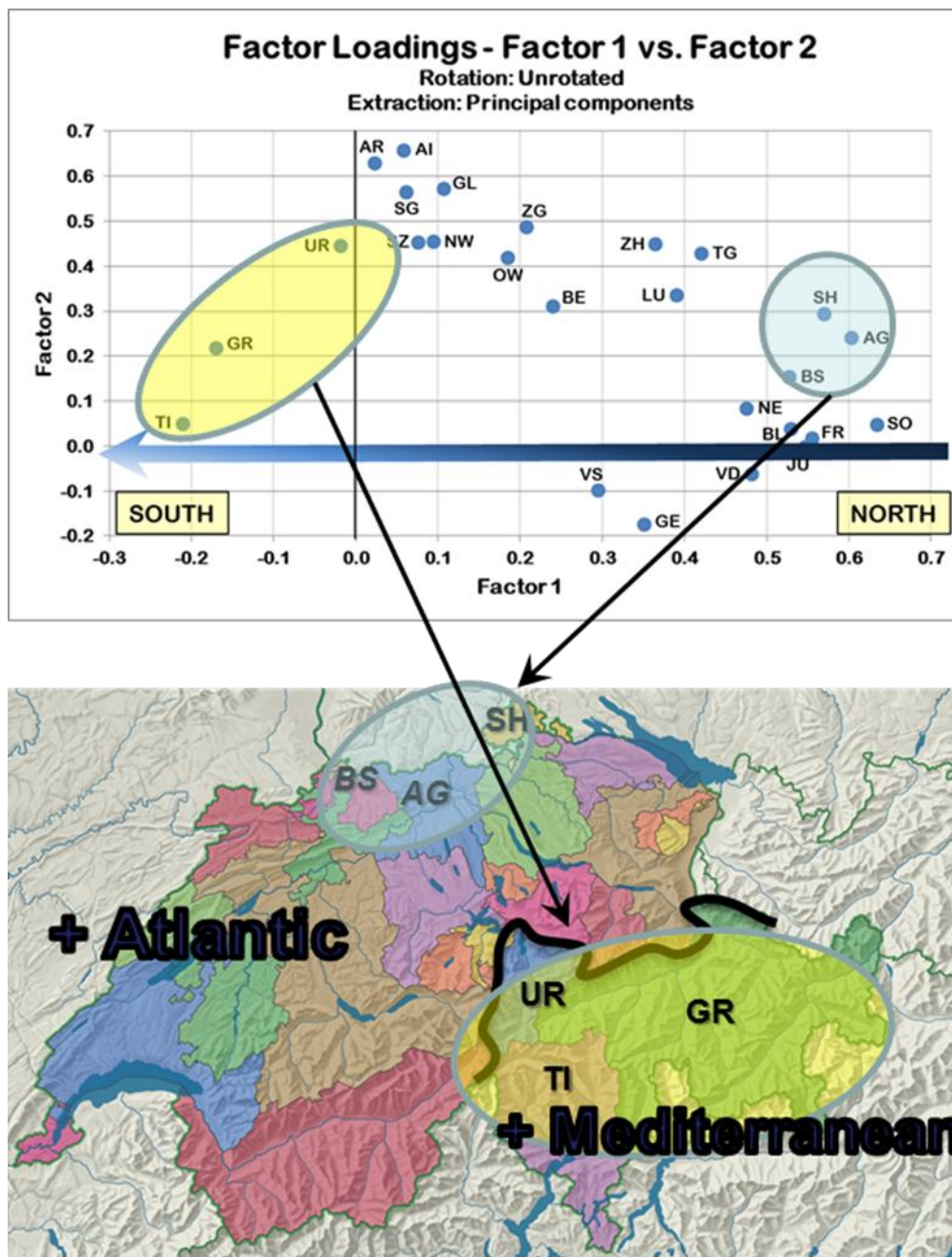


Figura 4.2. Interpretación del Factor 1. Definición de los dos ámbitos climáticos básicos de Suiza: el Mediterráneo, al sur de los Alpes y el Atlántico, en la vertiente norte de la cordillera.

- 2) El segundo factor se explica por una sección transversal Este/Oeste sugiriendo un mayor grado de continentalidad (cargas factoriales positivas en la figura 4.3) o un menor grado con más influencia atlántica (cargas negativas). Esta continentalidad viene definida en función de la lejanía/influencia de las principales fuentes de humedad, es decir, la atlántica/mediterránea. La atlántica sufre un debilitamiento a

causa de un largo recorrido continental más la cordillera del Jura, llegando a los cantones del Este muy desnaturalizada. La influencia del Mediterráneo en estos cantones es menor debido a la barrera que supone los Alpes.

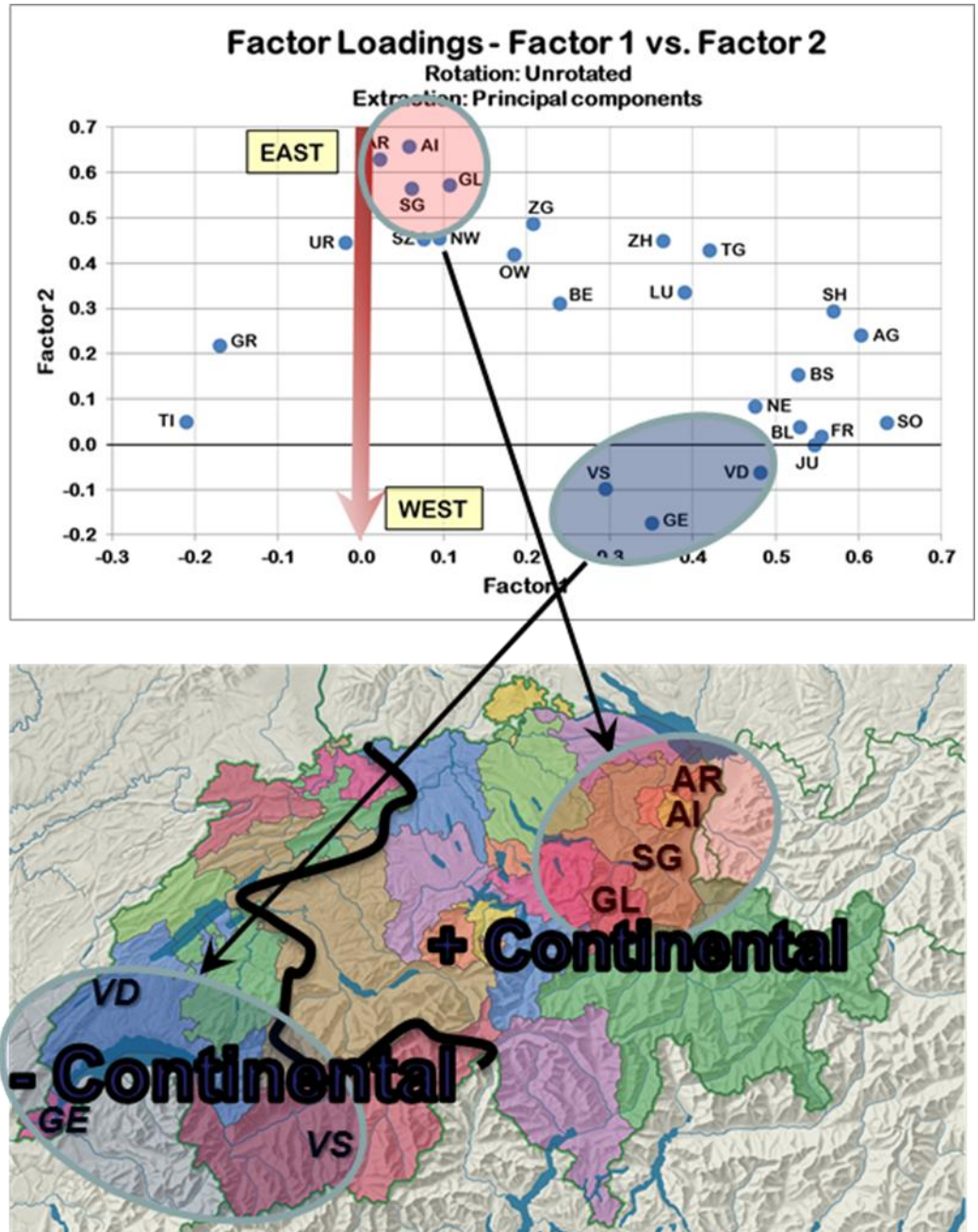


Figura 4.3. Interpretación del Factor 2. Influencia menor/mayor de las dos fuentes de humedad que afectan Suiza y por tanto indicando el grado de continentalidad.

4.3.2. Regionalización hidro-climática de Suiza

Se ha utilizado el scree-test (número de componentes en el eje de las abscisas frente a los valores propios, eigenvalues, en el eje de las coordenadas) para extraer los componentes más relevantes (ver figura 4.4). Se escogen como factores representativos aquellos que están por encima del punto de inflexión, apareciendo éstos en el círculo azul. El gráfico revela cinco componentes principales que representan el 45% de la variabilidad total.

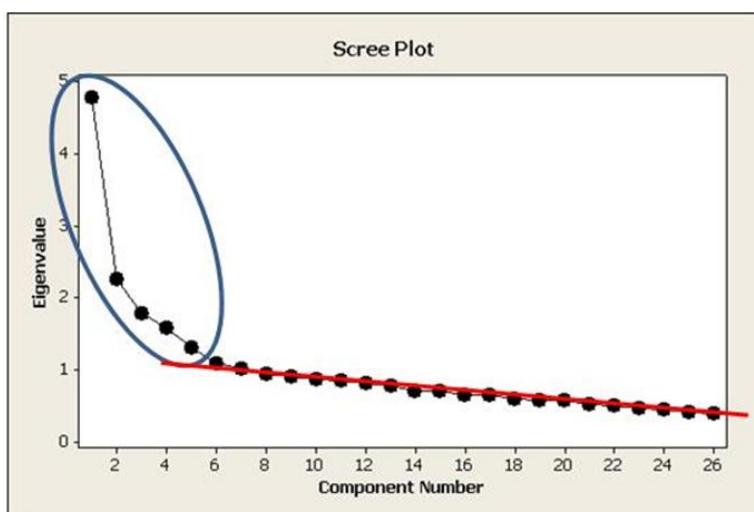


Figura 4.4. Scree-test y el número de componentes seleccionados (círculo azul). Se representa el número de componentes (eje de las abscisas) y los valores propios del análisis (eje de las coordenadas)

De esta manera, el análisis final se ajustó a estos cinco componentes aplicándoles una rotación Equamax con el fin de alcanzar una regionalización hidro-climática para Suiza. Cada región es definida por un componente (ver figura 4.5):

- La Región 1 está constituida por el Valais y los cantones del oeste del país.
- La Región 2 está definida por la parte occidental de la vertiente norte de los Alpes y el área meridional de la meseta central de Suiza (Swiss Plateau).
- La Región 3 conformada por los cantones de Grisons, Ticino y Uri, define el flanco sur de los Alpes.

- La Región 4 se compone por las montañas en territorio suizo del Jura y la parte septentrional de la meseta central.
- Finalmente, la Region 5 integra los cantones de la parte oriental de la vertiente norte de los Alpes.

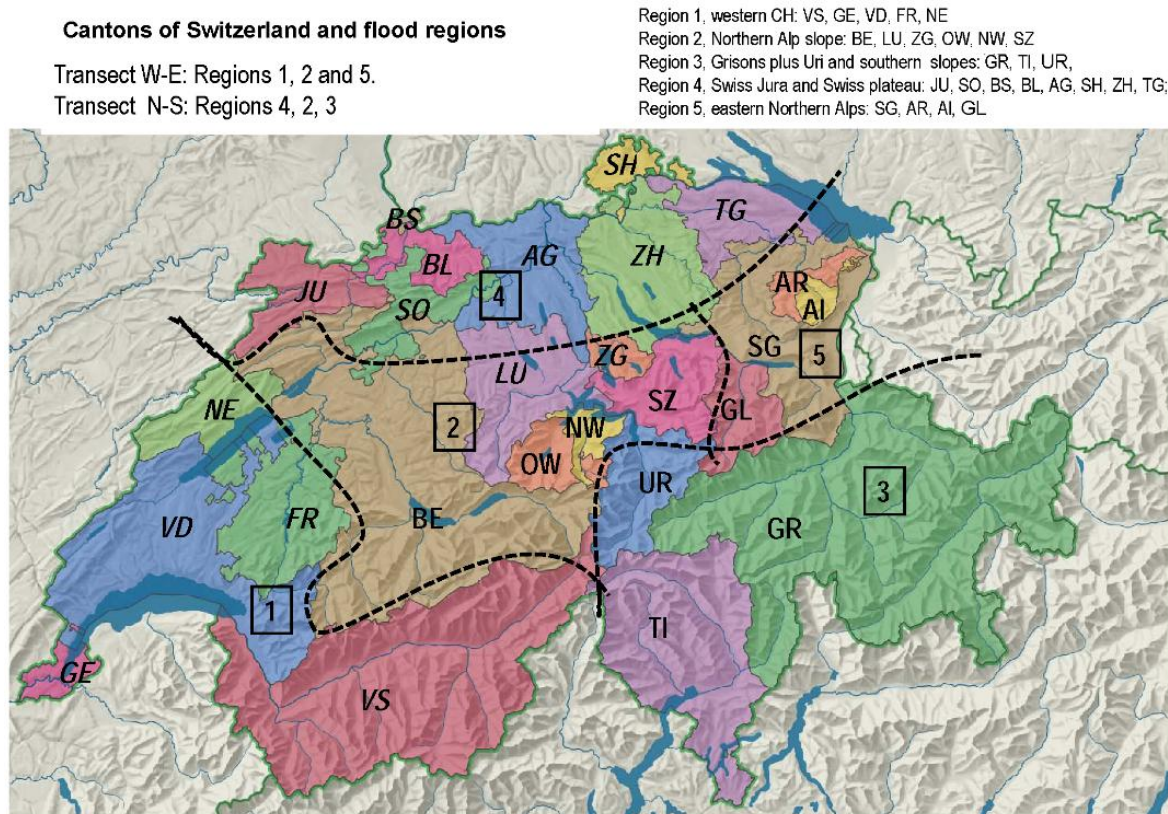


Figura 4.5. Regionalización de Suiza de acuerdo con el PCA aplicando la rotación Equamax. Las líneas de puntos son los límites de las regiones hidro-climáticas (Modelo de Elevación Digital, DEM, procedente del *Atlas de Suiza, 2004*; mapa modificado)

4.4. Discusión

4.4.1. Grado de precisión y aceptación del modelo aplicado. Comparación con otras regionalizaciones

A pesar de las restricciones subyacentes cuando se aplica un Análisis de Componentes Principales (supuesto de normalidad y de ortogonalidad), los análisis realizados indican que el resultado final es satisfactorio y cumple con la finalidad previamente definida: generar una división territorial que retenga las importantes diferencias hidro-climáticas existentes entre las distintas regiones.

El análisis en un primer paso es capaz de distinguir los ámbitos climáticos en base a la afectación de las principales fuentes de humedad y

la topografía, mientras que la rotación reubica aquellos cantones en los que las cargas factoriales son similares en regiones distintas y suponen una frontera entre ellas. Por ejemplo, Uri (UR) marca la transición entre las regiones 3 y 5 (figura 4.1) y, finalmente, es asignado a la Región 3 por la rotación (figura 4.5). Por otra parte, los cantones ubicados en el norte y el noroeste de Suiza, que parecen formar una sola región (parte superior de la figura 4.1), se dividen en dos regiones (Región 1 y Región 4, ver figura 4.5) tras aplicar la rotación a los componentes. Esta separación distingue probablemente entre los flujos de humedad que provienen del oeste-noroeste (que afectan fundamentalmente a la Región 1) de los que proceden del norte (afectando a la Región 4).

La distribución regional es coherente con otras clasificaciones de Suiza (por ejemplo [Kirchhofer, 2000](#); ver figura 4.6) que han sido ampliamente utilizadas, por ejemplo, para el pronóstico del tiempo y los sistemas de aviso de lluvias intensas ([Schmocker-Fackel y Naef, 2010a](#)). La figura 4.6 adapta manualmente (y, por tanto, de forma subjetiva) a partir de los dos primeros componentes principales extraídos del PCA la clasificación de seis regiones propuesta por [Schmocker-Fackel y Naef, 2010a](#). En definitiva, la clasificación aquí presentada es una solución de compromiso entre las tres divisiones fisiográficas clásicas de Suiza y las propuestas por los estudios analizados.

Un inconveniente importante de nuestra clasificación es que las regiones se han construido a partir de unidades administrativas (cantones) que en algunos casos puede incluir diferentes unidades fisiográficas. Por ejemplo la región 2 incluye el cantón de Berna, que se extiende desde la vertiente norte de los Alpes, pasando por la meseta suiza y la vertiente sur del macizo del Jura. Sin embargo, la clasificación evita la probable sobreestimación que podría haber habido teniendo en cuenta los cantones suizos más pequeños por separado, al estar estos fundamentalmente ubicados en la vertiente norte de los Alpes, densamente poblados, con una mayor exposición de los bienes y, por tanto, un aumento de la vulnerabilidad. Recordar que el índice estival INU se basa en los daños producidos por las inundaciones. De esta manera, si se analiza la variabilidad de las inundaciones en Suiza en base a los daños, estos cantones quedarían sobreestimados, al ocupar una porción pequeña del territorio, en detrimento de otros de mayor superficie (Grisons, Ticino y Valais) que no están tan poblados y, por tanto, con menor exposición de bienes, pero que ocupan una tercera parte del país.

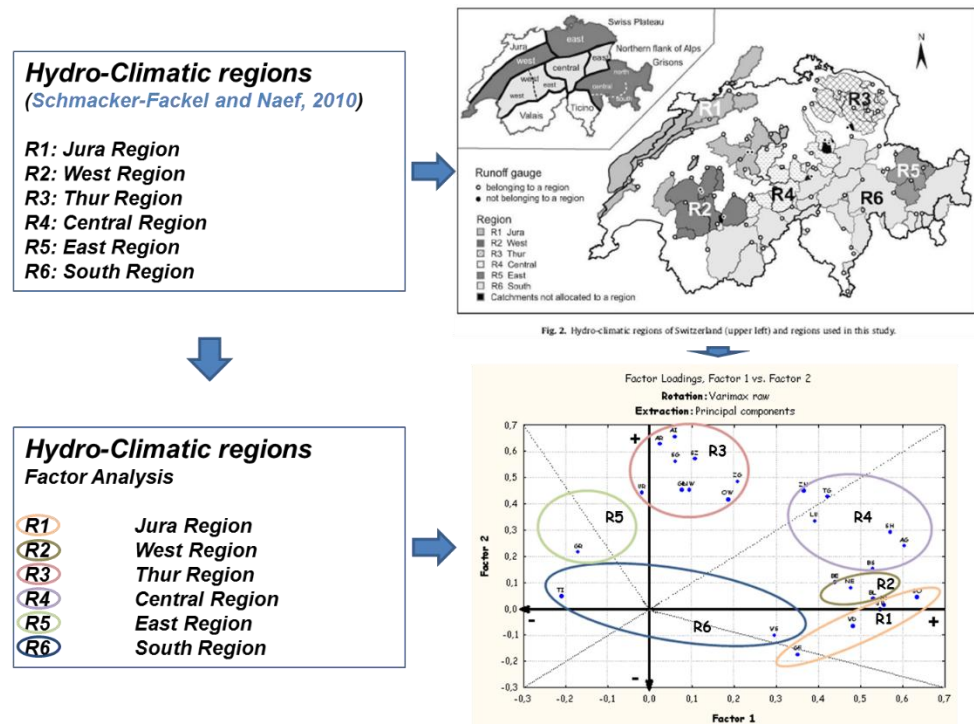


Figura 4.6. Comparación de los resultados obtenidos con otras clasificaciones de las regiones de Suiza.

- Parte superior de la imagen: las regiones hidro-climáticas definidas por Schmocker y Naef (2010) junto con las principales regiones fisiográficas que constituyen Suiza.
- Parte inferior: clasificación propuesta por Peña et al., 2015c a partir de un Análisis de Componentes principales. Remarcar que es un ensayo con seis regiones para comparar el resultado con el de Schmocker y Naef (2010). Se puede observar como la regionalización es muy parecida.

4.4.2. Consideraciones finales

La regionalización hidro-climática realizada por el PCA muestra dos patrones de variabilidad espacial relacionada con las dos principales fuentes de humedad que afectan Suiza: fuentes de humedad del Mediterráneo y del Atlántico. El primer patrón en relación con un transecto norte-sur (ver Figura 4.2), mientras que el segundo se define por un transecto Oeste-Este (ver Figura 4.3). Teniendo en cuenta estos resultados, la clasificación final presenta cinco regiones diferentes (ver Figura 4.5).

Los dos transectos acentúan la regionalización basada en el índice INU. Las tres regiones fisiográficas (vertiente norte y sur de los Alpes y el altiplano central) de Suiza, quedan diferenciadas en base a las diferentes fuentes de humedad.

- La Región 3, al sur de la cordillera de los Alpes, queda claramente definida por su carácter mediterráneo.
- La Región 4, al norte de las montañas del Jura está expuesta a los flujos atlánticos, especialmente los procedentes de altas latitudes.
- La vertiente norte de los Alpes se separa en tres regiones (1, 2 y 5) vinculadas a la proximidad a los flujos del Atlántico, haciendo hincapié en la Región 2 que marca la intersección de los dos transectos (Atlántico y Mediterráneo, [Peña et al., 2015b,c](#)). La Región 1 menos continental afectada por frentes procedentes del oeste, mientras que la Región 5 se caracteriza por una mayor continentalidad vinculada a las perturbaciones que siguen la trayectoria Vb ([van Bebbber, 1891](#); [Blöschl et al. 2013](#)) procedentes del Mediterráneo.

De esta manera, la Región 2 (parte occidental de la vertiente norte de los Alpes y área meridional de la meseta central suiza) se presenta en base a esta regionalización como el auténtico “hotspot” de la zona alpina al recibir influencias tanto de las perturbaciones más frías procedentes del Oeste (del Atlántico), como de las más cálidas procedentes del Sur (del Mediterráneo).