

UNIVERSITAT DE BARCELONA

Programa Doctorado en “Gestión Ambiental, Paisaje y Geografía”

Bienio 2004 - 2006

**Análisis espacio-temporal de la
insolación en la Península Ibérica
(1951-2004)**

Diploma de Estudios Avanzados, DEA

Doctorando: Arturo Sánchez Lorenzo

Profesor guía: Dr. Javier Martín Vide

BARCELONA

Septiembre de 2006

RESUMEN DEL TRABAJO

1. Introducción

En meteorología y climatología el término insolación se emplea habitualmente para hacer referencia al tiempo que luce el Sol o existe radiación solar directa en el transcurso de un periodo determinado (día, mes o año) independientemente de la intensidad con la que se reciben sus rayos (también denominada heliofanía). Para su medición se utilizan heliógrafos o heliofanógrafos y se expresa en unidades de tiempo, tales como horas o minutos. El más conocido y utilizado desde 1880 hasta la actualidad es el de Campbell-Stokes, inventado por John Francis Campbell en 1853 y modificado por Sir George Gabriel Stokes en 1879. Con el fin de homogeneizar las mediciones de insolación en la red mundial, en 1962 la World Meteorological Organization (WMO) propone como instrumento de referencia el heliógrafo de Campbell-Stokes en su versión IRSR (*Interim Reference Sunshine Recorder*), donde la insolación o “sol eficaz” de un período determinado está definida como la suma del subperíodo para el que la irradiancia solar directa supera 120 W m^{-2} y debe medirse con una incertidumbre de ± 0.1 horas, y con una resolución de 0.1 horas.

Los objetivos del trabajo de investigación son: 1. Seleccionar y realizar el control de calidad de las series de insolación peninsulares; 2. Caracterizar estadísticamente la insolación en la Península Ibérica; 3. Analizar las variaciones temporales (1951-2004) de la insolación en el conjunto de la Península Ibérica y en diferentes regiones de la misma; 4. Evaluar la influencia de diferentes patrones de teleconexión en la variabilidad interanual de la insolación en la Península Ibérica.

2. Base de datos

Inicialmente se ha dispuesto de 115 series con registros de insolación, pertenecientes mayoritariamente al *Instituto Nacional de Meteorología* (INM) de España (109). También se han obtenido 4 series del *Instituto de Meteorología* (IM) de Portugal, 1 del *European Climate Assessment & Dataset* (ECA&D) y otra del *MetOffice* (Gibraltar). La mayor parte de las series obtenidas empiezan en la segunda mitad del siglo XX. Debido a esta circunstancia se ha optado por limitar el presente trabajo al periodo comprendido entre 1951 y 2004.

Se han realizado diferentes procedimientos para la selección definitiva de las series analizadas: 1. Exhaustivo control de calidad; 2. Series compuestas en las localidades con más de un observatorio; 3. Relleno de los huecos a resolución mensual; 4. Aplicación de test de homogeneidad de carácter absoluto (*Thom y Von Neumann*). Finalmente, se ha trabajado con 37 series de insolación (absolutas y relativas) repartidas homogéneamente (aproximadamente) por la Península Ibérica.

3. Estadísticas generales de las series de insolación en la Península Ibérica

3.1. Insolación media

Las medias de insolación anual (Fig. 1.a) muestran una amplia variación, pues los valores prácticamente se duplican entre sectores del norte peninsular y el suroeste. El mínimo se alcanza en Bilbao (1.524 horas o 36.4% de insolación relativa), y el máximo en Faro (3023.3 horas o 72.0% de insolación relativa) y Cádiz (3009.4 horas o 71.6% de insolación relativa). En conjunto, el área menos asoleada es la cornisa cantábrica, donde no sobrepasan las 1.800 horas o el 45% de insolación relativa. En cambio, la zona que dispone de mayor insolación es la costa del Golfo de Cádiz, con máximos que superan las 3.000 horas (o el 71% de insolación relativa), así como sectores del sureste peninsular (Almería y Alicante) donde se sobrepasan las 2.900 horas de sol o el 70% de insolación relativa.

Las medias de insolación invernal presentan un comportamiento general similar al anual, es decir, valores más elevados (con un claro gradiente latitudinal) a medida que nos aproximamos al sur peninsular. El máximo se alcanza en el sureste peninsular (con más de 500 horas o el 60% de insolación relativa), a diferencia de lo obtenido con las medias anuales (suroeste). El área menos asoleada durante el invierno es la zona más oriental de la cornisa cantábrica, que no sobrepasa las 300 horas o el 40% de insolación relativa. La mayor actividad frontal durante el semestre frío puede ser el motivo que explique la mayor insolación en los sectores del sureste peninsular, espacio que se ha manifestado poco conectado con la circulación atlántica, en detrimento de las áreas del suroeste, mucho más expuestas a la influencia de las perturbaciones invernales de origen atlántico.

Las medias de insolación primaveral presentan un comportamiento general similar al anual, es decir, valores más elevados (con un claro gradiente latitudinal) a medida que nos aproximamos al sur peninsular. Es decir, a semejanza de lo ocurrido con las medias anuales, las zonas más asoleadas se corresponden a sectores del suroeste peninsular, y no del sureste como en invierno. Igualmente, el área menos asoleada durante la primavera es la cornisa cantábrica, donde los valores están próximos a las 500 horas o el 40% de insolación relativa. En cambio, las zonas con mayor insolación, con valores comprendidos entre las 700 y 800 horas (o entre el 60% y 70% de insolación relativa, aproximadamente) se sitúan en el sureste, nordeste (Lleida) y amplios sectores del centro-suroeste peninsular.

El verano es sin lugar a dudas la estación más asoleada del año y presenta unos claros máximos respecto a los resultados obtenidos en el resto de estaciones. Así, se superan las 1.000 horas (o el 79% de la insolación relativa) en diferentes sectores occidentales de la Meseta Norte, Extremadura, y suroeste peninsular, con un máximo en Valladolid (1040.9 horas o un 81.6% de insolación relativa), seguido de cerca por Faro (1037.1 horas o un 83.4% de insolación relativa) y Badajoz (1035.6 horas o un 82.5% de

insolación relativa). Las zonas menos asoleadas se localizan en la franja de la cornisa cantábrica, con unos valores inferiores a las 800 horas (o el 60% de insolación relativa), y con un mínimo absoluto en Bilbao (531.3 horas o un 41.3% de insolación relativa).

En el otoño, la insolación presenta valores similares, aunque ligeramente inferiores, a los obtenidos durante la estación primaveral, y claramente superiores al invierno. El mínimo de las medias se alcanza en Bilbao con 363.7 horas (38.5% de insolación relativa), mientras que el máximo se localiza en Faro con 684.7 horas (70.6% de insolación relativa) y Cádiz con 680.2 horas (70.0% de insolación relativa). Es decir, las zonas más asoleadas se corresponden a sectores del suroeste peninsular, y a continuación del sureste, con valores superiores a las 600 horas (o 62% de insolación relativa). Igualmente, el área menos asoleada durante el otoño es la cornisa cantábrica, donde los valores son inferiores a las 500 horas o el 55% de insolación relativa.

3.2. Coeficiente de variación

Para evaluar la variabilidad interanual de la insolación en la Península Ibérica se ha calculado el coeficiente de variación (CV), que elimina la dimensionalidad de las variables y tiene en cuenta la proporción existente entre medias y desviación típica.

A resolución anual el CV presenta unos valores bajos (Fig. 1.b). El mínimo se obtiene en Huesca y Alicante con un 3.9%, y el máximo en Bilbao con un 13.9%. La zona cercana al golfo de Vizcaya y los sectores del noroeste de la Península Ibérica son los que presentan los valores más elevados, con cifras que sobrepasan el 7%. En el resto de la Península, mayoritariamente con clima mediterráneo, posee unos valores inferiores a dicho umbral, a excepción de Tarifa (7.4%). Los resultados del CV con la insolación contrastan con los obtenidos con la precipitación anual, donde se obtienen valores muy superiores, que llegan incluso a superar el 40% en sectores del sureste peninsular. Posiblemente el comportamiento espacial del CV anual sea consecuencia de la persistencia de las condiciones de estabilidad atmosférica que caracteriza a los sectores de clima mediterráneo. Así, aunque durante una parte del año se aprecien comportamientos anómalos de la insolación (muy por encima o debajo de la media) es difícil que se mantengan durante todo el año para ocasionar desviaciones tipos anuales con valores destacados, condición necesaria para poder obtener valores elevados del CV.

En el invierno, los valores del CV son superiores a los obtenidos durante el conjunto anual. La franja mediterránea es la parte de la Península Ibérica con una menor variabilidad, siempre por debajo del 15%, especialmente el sureste (con cifras que rondan el 10%). Del resto destacan los máximos obtenidos en el suroeste de Galicia y noroeste de Portugal, con cifras que superan el 25%. El valor máximo corresponde a Vigo (28.1%) y el mínimo a Almería (10.3%). Se evidencia un claro gradiente este – oeste, aspecto que

no se reflejaba con las medias de insolación invernal, y que posiblemente ponga en evidencia la mayor influencia de dichos sectores a la circulación atlántica durante el periodo invernal.

En la primavera los valores del CV son inferiores a los del invierno, aunque superiores a los obtenidos a resolución anual. Parte del suroeste y del nordeste peninsular presentan los valores más bajos, siempre inferiores al 10%. Los máximos aparecen localizados en el País Vasco y sectores del noroeste peninsular, con cifras que sobrepasan el 14%. El valor máximo corresponde a Bilbao (20.5%) y el mínimo a Faro (5.8%).

Los valores del CV durante el verano son, por lo general, los más bajos obtenidos en las diferentes estaciones del año, aproximándose a los resultados obtenidos para el conjunto anual. Los máximos se localizan en la cornisa cantábrica, con cifras que sobrepasan el 10% y que rondan el 15% en los sectores costeros del País Vasco. Los valores máximos corresponden a Bilbao con 16.9% y San Sebastián con 15.5%. La mayor parte del resto peninsular presenta valores inferiores al 7%, con mínimos cercanos al 4% en diferentes puntos del sur y nordeste peninsular. Los valores mínimos corresponden a Lleida (3.5%) y Granada (3.7%). Se evidencia una clara división de los ámbitos con clima atlántico u oceánico y mediterráneo.

Los resultados del CV otoñales son ligeramente inferiores a los primaverales, aunque superiores al conjunto anual y verano. Parte del suroeste y la franja mediterránea presentan los valores más bajos, siempre inferiores al 9%. Los máximos aparecen localizados en el País Vasco y sectores del noroeste peninsular, con cifras que sobrepasan el 13%. El valor máximo corresponde a Bilbao (16.0%) y el mínimo a Alicante (5.4%). Existe una similitud espacial entre los resultados obtenidos en otoño y primavera. Así, difiere del gradiente este – oeste obtenido durante el invierno, o de la nítida separación entre los ámbitos de clima oceánico o atlántico y mediterráneo del verano.

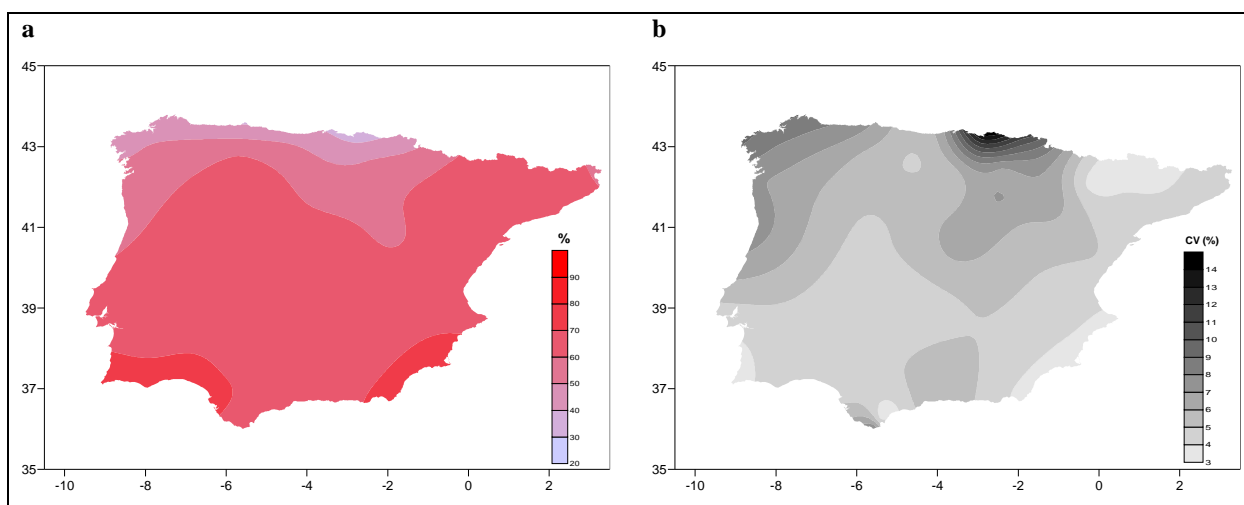


Figura 1. (a) Insolación relativa (%); (b) Coeficiente de variación (CV): anual en la Península Ibérica.

3.3. Coeficiente de asimetría y curtosis

Finalmente, los resultados obtenidos al calcular el coeficiente de asimetría y curtosis constatan (por norma general) la normalidad de las series de insolación anual, estacional y mensual de la Península Ibérica.

4. Patrones espacio-temporales de la insolación en la Península Ibérica

4.1. Análisis de las series conjuntas de la insolación en la Península Ibérica

A partir de las 37 series se han generado series medias conjuntas (promedio aritmético sin ponderación espacial), a resolución anual, estacional y mensual de las insolaciones relativas y anomalías estandarizadas. Para evaluar la significación de las tendencias detectadas se ha empleado el *t-test* y el test no paramétrico de correlación por rangos de Mann-Kendall ($\alpha = 0.05$ o 95%).

La evolución temporal anual (1951-2004), suavizada con una media móvil de 9 en 9 términos, presenta un llamativo aspecto cóncavo (Figura 2.a). Desde principios de los años 50 hasta los primeros años de los 80 se constata una clara tendencia negativa de la insolación en la Península Ibérica, que posteriormente se invierte, presentando un claro ascenso hasta comienzos del siglo XXI. Los resultados manifiestan un ligero descenso de la insolación relativa anual del -0.22%, un -0.37% respecto al valor medio del 60.2%, tendencia que no puede considerarse significativa a un nivel de confianza del 95%.

La evolución temporal invernal (1951-2004), suavizada con una media móvil de 9 en 9 términos, presenta un comportamiento similar y estable durante todo el periodo (a diferencia de lo ocurrido a resolución anual), aunque con una importante muesca entre 1977 y 1979 (Fig. 2.b). Los resultados manifiestan un ligero aumento de la insolación relativa invernal del +0.86%, un +1.74% respecto al valor medio del 49.4%, tendencia que no puede considerarse significativa a un nivel de confianza del 95%.

La evolución temporal primaveral (1951-2004), suavizada con una media móvil de 9 en 9 términos, presenta un aspecto cóncavo, similar al obtenido con las medias anuales (Fig. 2.c). Así, aunque el mínimo de la serie se obtenga en 1971, desde mediados de los años 60 hasta los primeros años de los 80 se constata una clara evolución o tendencia negativa de la insolación en la Península Ibérica, que posteriormente se invierte, presentando un rápido ascenso (que contrarresta con creces el descenso experimentado desde mediados del siglo XX) hasta mediados de la década de los 90. Durante los últimos años parece constatar una estabilización de los valores. Con todo, la tendencia resultante presenta un ligero aumento (a diferencia de la anual, que manifestaba un ligero descenso) de la insolación relativa primaveral del +1.35%, un

+2.34% respecto al valor medio del 57.6%, tendencia que no puede considerarse significativa a un nivel de confianza del 95%.

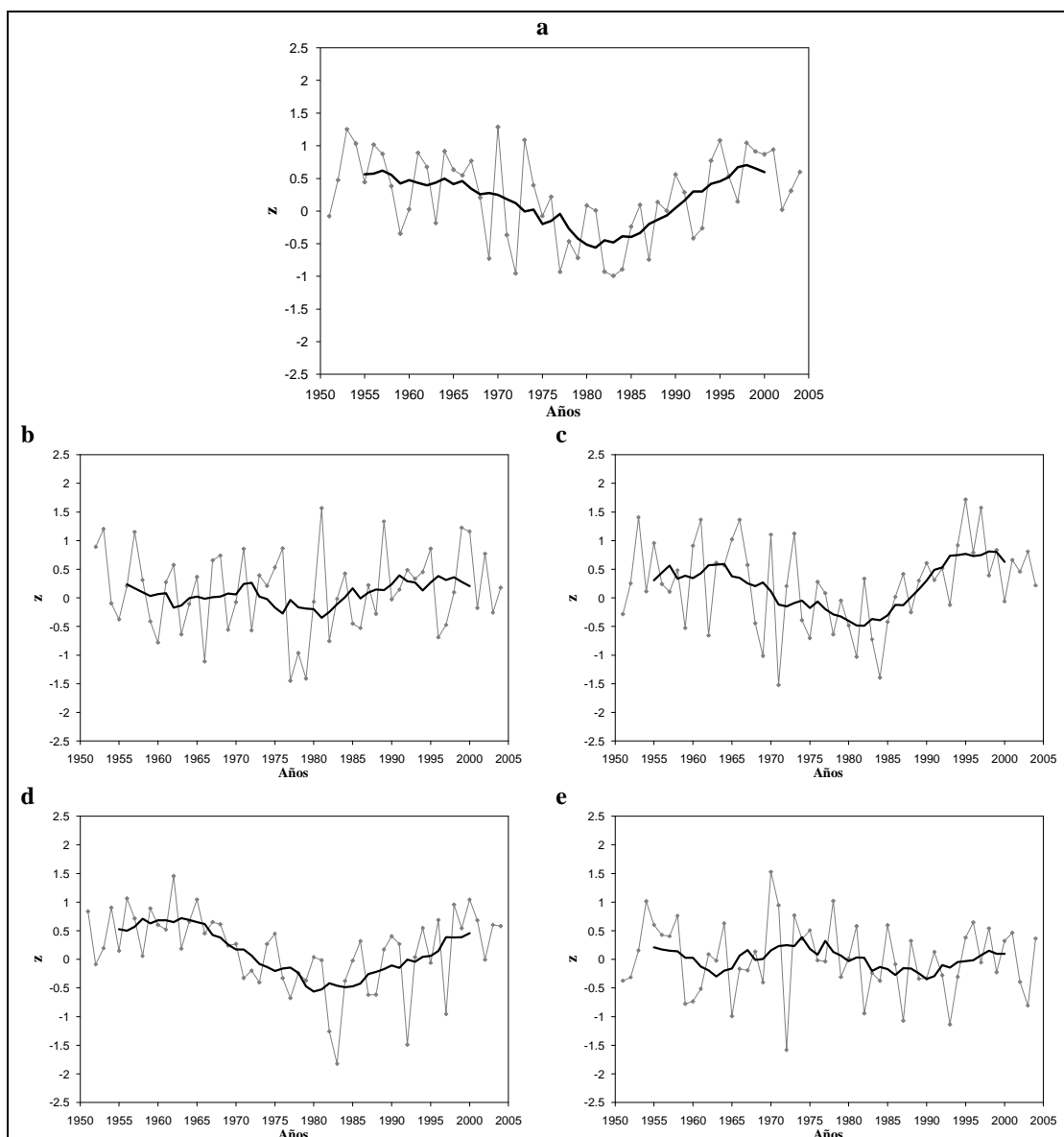


Figura 2. Evolución temporal de la insolación estacional (1951-2004) en el conjunto de la Península Ibérica (línea gris) suavizada con una media móvil de 9 en 9 términos (línea negra). (a) Anual; (b) Invierno; (c) Primavera; (d) Verano; (e) Otoño. Anomalías estandarizadas (z) respecto al periodo de referencia 1961-90.

La evolución temporal estival (1951-2004), suavizada con una media móvil de 9 en 9 términos, presenta un aspecto cóncavo, similar al obtenido con las medias anuales y primaverales (Fig. 2.d). Así, al igual que en la primavera, desde mediados de los años 60 hasta los primeros años de los 80 se constata una clara evolución o tendencia negativa de la insolación en la Península Ibérica, con una importante muesca durante los años 1982 y 1983 (mínimo absoluto), a semejanza de lo ocurrido con las valores anuales.

Después de ese periodo, la tendencia se invierte, presentando un claro ascenso hasta la actualidad, es decir, sin la estabilización producida en los registros anuales o primaverales. La tendencia resultante presenta un ligero descenso de la insolación relativa estival del -2.21%, un -3,10% respecto al valor medio del 71.2%, tendencia que no puede considerarse significativa a un nivel de confianza del 95%.

La evolución temporal otoñal, suavizada con una media móvil de 9 en 9 términos, presenta un comportamiento similar y estable durante todo el periodo, a semejanza del invierno (Fig. 2.e). Destacar la aparente mayor irregularidad o variabilidad de los registros durante los primeros años, con una importante muesca entre 1959 y 1961. A partir de mediados de la década de los 70 se produce una mayor regularidad en los registros, con una ligera tendencia descendente hasta nuestros días. En conjunto, los resultados manifiestan un ligero descenso de la insolación relativa otoñal del -0.81%, un -1.40% respecto al valor medio del 57.9%, tendencia que no puede considerarse significativa a un nivel de confianza del 95%.

A partir de las series mensuales analizadas se han podido constatar diferencias apreciables respecto a los resultados obtenidos a resolución anual o estacional. Así, existen claras discrepancias entre las tendencias totales encontradas en el conjunto de la estación y las obtenidas en los meses de forma individual. Las tendencias totales son variables a lo largo del año, aunque de enero a abril los valores son positivos, mientras que en el resto de meses los registros son negativos, a excepción de junio y septiembre. Con todo, lo más llamativo ha sido detectar a resolución mensual tendencias significativas al umbral del 95%. La única tendencia positiva significativa detectada corresponde al mes de marzo (Fig. 3.a), y está cifrada en un aumento de la insolación relativa del +16.94% durante el periodo analizado. En cambio, se han detectado tres meses con tendencias negativas significativas: mayo, julio y agosto (Fig. 3.b), con unos descensos totales relativos del -9.24%, -5.63% y -6.42%, respectivamente.

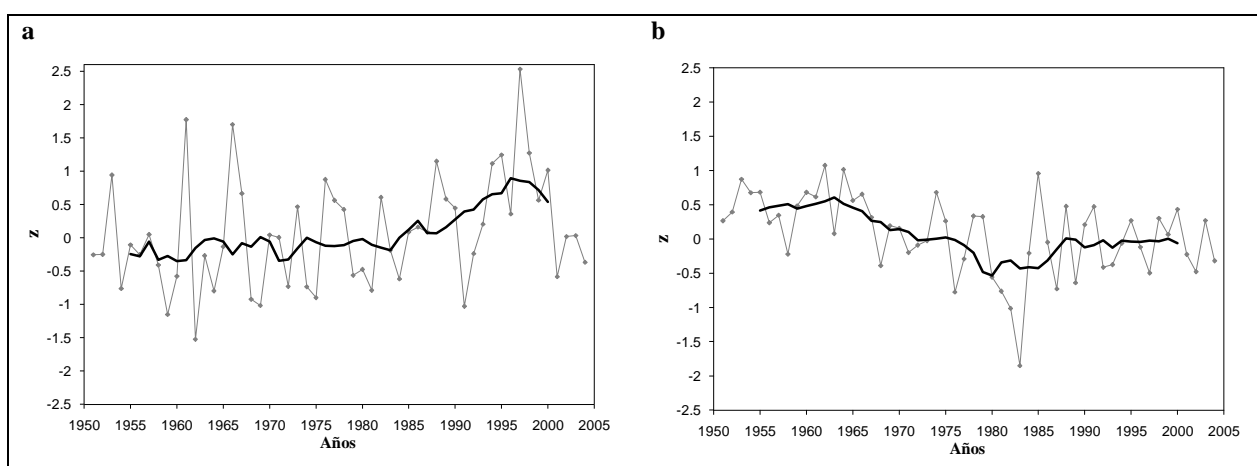


Figura 3. Evolución temporal de la insolación (1951-2004) en el conjunto de la Península Ibérica (línea gris) suavizado con una media móvil de 9 en 9 términos (línea negra). (a) Marzo; (b) Agosto. Anomalías estandarizadas (z) respecto al periodo de referencia 1961-90.

4.2. Creación y análisis de las series regionales

Debido a la complejidad climática de la Península Ibérica se ha considerado oportuno establecer una regionalización del área de estudio, y posteriormente generar series representativas de dichas regiones con el fin de detectar posibles diferencias espaciales en las evoluciones temporales de la insolación respecto al comportamiento medio del conjunto peninsular.

Se ha generado una regionalización objetiva a partir del Análisis por Componentes Principales (*Principal Component Analysis*, PCA). Se ha trabajado en modo *S*, a partir de las matrices de correlación, siendo las 37 series de insolación relativa las variables a resumir, y los registros anuales, estacionales o mensuales los casos. Para seleccionar el número de componentes totales se ha seguido el criterio del autovalor > 1 . Tal y como se recomienda en la bibliografía, se ha procedido a rotar los componentes obtenidos (que redistribuye la varianza explicada entre los componentes no rotados), con el objetivo de mejorar la interpretación de los resultados y eliminar ambigüedades. Se ha elegido la rotación Varimax, por ser la más utilizada en la actualidad, y que está justificada por disminuir la dependencia entre los componentes, y por proporcionar los patrones más estables y físicamente explicables. El análisis se ha repetido para cada una de las escalas temporales estudiadas.

A resolución anual, ninguna de las series correspondientes a las regiones obtenidas presenta tendencias significativas al 95%. En el invierno, primavera y otoño ocurre lo mismo. En cambio durante el verano se detecta una tendencia significativa (95%) en la serie temporal del tercer componente, que explica el 11.65% de la varianza total y representa a los sectores más meridionales de la Península Ibérica. Así, el componente 3 presenta una tendencia total relativa negativa del -6.81%, fruto de un descenso continuado de los registros de insolación desde finales de los años 60, aunque con una ligera recuperación durante los últimos años.

Se han analizado las series temporales de los diferentes componentes obtenidos durante los meses de marzo y agosto, con tendencias significativas, positivas y negativas respectivamente, en el conjunto de la Península Ibérica.

Para el mes de marzo se han obtenido cinco componentes, que explican el 87.84% de la varianza. Todas las tendencias detectadas son positivas, aunque sólo las correspondientes a los tres primeros componentes (+21.02%, +27.28% y +14.13%, respectivamente) son significativas al 95%. Con todo, del

conjunto peninsular sólo la cornisa cantábrica y el nordeste peninsular (componentes 4 y 5) no presentan tendencias negativas significativas durante el mes de marzo.

En el mes de agosto también se han obtenido cinco componentes, que explican más del 75% de la varianza. Todas las tendencias detectadas son negativas, aunque sólo las correspondientes a los dos primeros componentes (-8.11% y -9.33%, respectivamente) son significativas al 95%. Con todo, las áreas de la Península Ibérica con clima oceánico templado y buena parte de la mitad norte de la fachada mediterránea no presentan tendencias descendentes significativas.

5. Influencia del ENSO, NAO y WeMO en la insolación de la Península Ibérica

Se ha estudiado la relación entre la insolación de la Península Ibérica (1951-2004) y tres de los principales patrones de variabilidad de baja frecuencia o teleconexiones influyentes en la variabilidad climática peninsular: El Niño/Oscilación del Sur (*El Niño/Southern Oscillation*, ENSO), la Oscilación del Atlántico Norte (*North Atlantic Oscillation*, NAO) y la Oscilación del Mediterráneo Occidental (*Western Mediterranean Oscillation*, WeMO). Para cuantificar las diferentes fases de los diferentes patrones atmosféricos se ha optado por emplear índices, obtenidos a partir de las diferencias de presiones estandarizadas de dos puntos representativos de los dipolos que conforman el patrón). Para evaluar la influencia se han ensayado correlaciones, mediante la r de Pearson, entre los promedios (anuales, estaciones y mensuales) de la insolación y los correspondientes índices que caracterizan al patrón de variabilidad en cuestión. También se han calculado las anomalías, respecto al valor medio del periodo de referencia 1961-90, de la insolación durante las fases extremas positivas y negativas de los tres patrones de variabilidad analizados.

5.1. El Niño/Southern Oscillation (ENSO)

Se ha trabajado con el SOi (*Southern Oscillation index*), facilitado por la *Australian Bureau of Meteorology*, que se elabora a partir de la diferencia entre las presiones medias estandarizadas de Tahití (Pacífico Central) y Darwin (Norte de Australia). Valores positivos del índice están asociados a episodios de La Niña (calentamientos anómalos de las temperaturas del mar en el Pacífico Central y Occidental), y negativos a El Niño (calentamientos anómalos en el Pacífico Oriental).

Los mejores resultados se han obtenido en la estación otoñal. Al correlacionar el SOi del verano anterior con la insolación del otoño (Fig. 4.a) se obtienen correlaciones positivas y significativas (95%) en buena parte de la Península Ibérica (excepto la cornisa cantábrica y una zona del este peninsular, centrada en el golfo de Valencia). En el mes de octubre (Fig. 4.b) las correlaciones (con el SOi del verano previo) muestran unos valores similares a los obtenidos con las insolaciones del conjunto otoñal, ampliándose el área con correlaciones significativas (95%) al sector más oriental de la península.

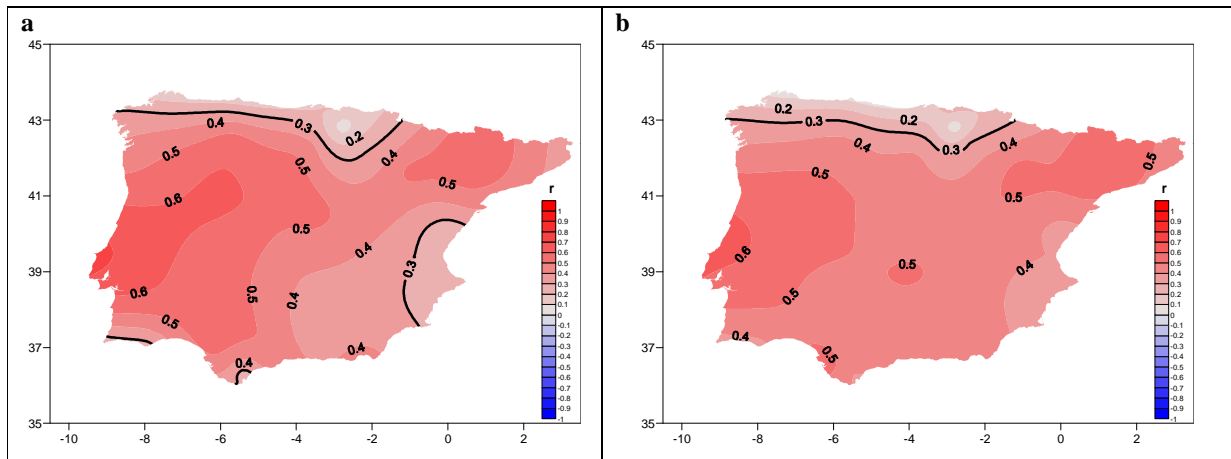


Figura 4. (a) Isopletas de las r de Pearson entre la insolación relativa del: (a) otoño; (b) octubre), en la Península Ibérica y el SOI de verano previo.

Los resultados obtenidos durante la estación otoñal nos muestran como durante las fases de El Niño se registran de forma generalizada anomalías negativas en la insolación de la Península Ibérica, comprendidas entre el -5% y el -10%. Durante los eventos de La Niña se producen anomalías positivas de la insolación (a excepción de un islote centrado en el interior del País Vasco y sectores septentrionales de La Rioja), con valores comprendidos entre el +5% y el +10%. La diferencia entre las anomalías de los eventos El Niño y La Niña (Fig. 5.a) muestra valores comprendidos entre -10% y -20% en buena parte del territorio peninsular, alcanzando un máximo en el centro de la Península Ibérica con porcentajes comprendidos entre el -20% y el -25%.

Durante el mes de octubre las anomalías generadas durante las fases El Niño y La Niña son mayores (en términos absolutos) a las obtenidas en el conjunto otoñal. La diferencia entre las dos fases (Fig. 5.b) proporciona porcentajes comprendidos entre -25% y -30% en buena parte del centro y oeste peninsular, con máximos entre -30% y -35%.

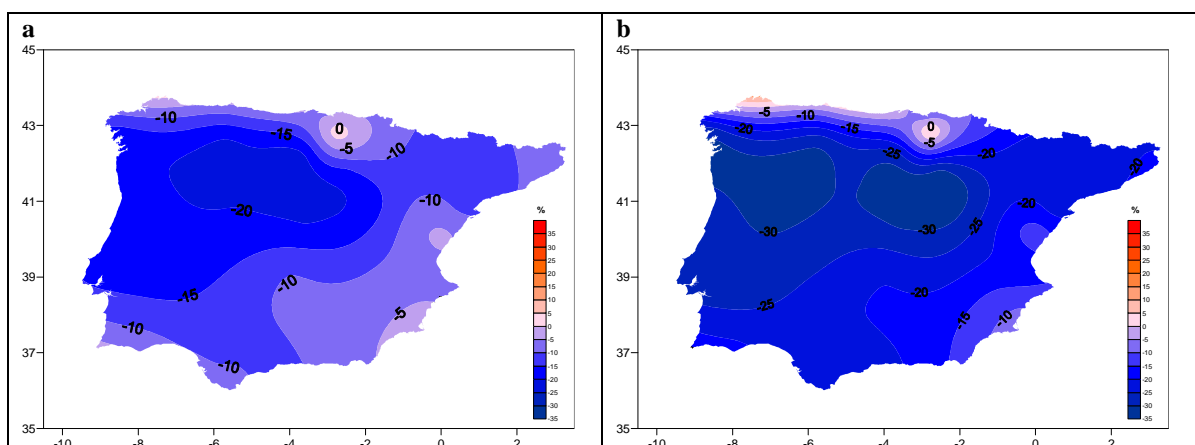


Figura 5. Diferencias entre las anomalías de los eventos El Niño-La Niña. (a) Otoño, (b) Octubre.

5.2. North Atlantic Oscillation (NAO)

Se han empleado dos índices para cuantificar la NAO, obtenidos a partir de las series de Gibraltar y Ponta Delgada como estaciones representativas del dipolo sur del patrón de teleconexión. Valores positivos del índice están asociados a periodos con intensificación de la circulación zonal, que conlleva unas anomalías pluviométricas positivas en el norte de Europa, y negativas en el sur. Lo contrario ocurre durante las fases negativas del patrón.

Se obtienen mejores resultados empleando el NAO_i calculado con la serie de Gibraltar que el obtenido con Ponta Delgada.

Durante la estación invernal casi todos los valores de las r de Pearson obtenidas son positivos, e igualmente significativos (95%). Con el NAO_i de Gibraltar las únicas zonas con correlaciones no significativas quedan limitadas a un pequeño sector del noroeste peninsular, y una zona central del valle del Ebro. En la estación primaveral con el NAO_i de Gibraltar las correlaciones son semejantes (áreas con correlaciones positivas significativas) a los obtenidos durante la estación invernal (aunque con unos valores en la r de Pearson ligeramente inferiores). Durante el verano desaparece la significación de las correlaciones. Finalmente, durante la estación otoñal con el NAO_i de Gibraltar el área con correlaciones significativas (y positivas) se extiende por buena parte del centro y sur peninsular.

A resolución mensual destaca la existencia de correlaciones positivas y significativas (95%) entre la insolación de junio y el NAO_i de Gibraltar en buena parte de la Península Ibérica, a excepción de los sectores más meridionales y de la franja cantábrica. Igualmente, durante el mes de octubre destaca la ausencia de correlaciones significativas obtenidas si se toma el NAO_i de Ponta Delgada, mientras que ocurre todo lo contrario con el de Gibraltar, donde toda la península (a excepción de un sector próximo al Golfo de Valencia) aparece con correlaciones positivas y significativas (95%).

Se ha limitado el estudio de las anomalías de insolación relativa durante las fases extremas positivas (NAO_i>+1) y negativas (NAO_i<-1) de la NAO al otoño e invierno. Para el conjunto otoñal durante las fases extremas positivas de la NAO hay un aumento generalizado de la insolación relativa comprendida entre el 0 y el +10%, aunque en sectores del centro peninsular se alcanzan entre +10% y +20%. El mismo patrón espacial se repite durante las fases extremas negativas, aunque con el signo contrario en las anomalías detectadas. La diferencia entre ambos resultados establece unas diferencias comprendidas entre +10% y +20% en la mayor parte de la Península Ibérica, a excepción de sectores del noroeste, nordeste y sudeste peninsular. En el invierno (Fig. 6) se constatan unos valores de las anomalías superiores al otoño, y así, durante las fases extremas positivas se constatan anomalías positivas comprendidas entre el +10% y el +20% en buena parte del territorio peninsular (a excepción de algunos sectores septentrionales). Aproximadamente en esas mismas áreas, y durante las fases extremas negativas, las anomalías adquieren valores entre -10% y -20%. Las diferencias de las anomalías establecen para dichos

sectores unas diferencias comprendidas entre el +20% y el +40%, con unos máximos situados en los sectores más suroccidentales de Portugal y en una franja de dirección meridiana que atraviesa la Península Ibérica por el centro (a excepción de la parte más septentrional).

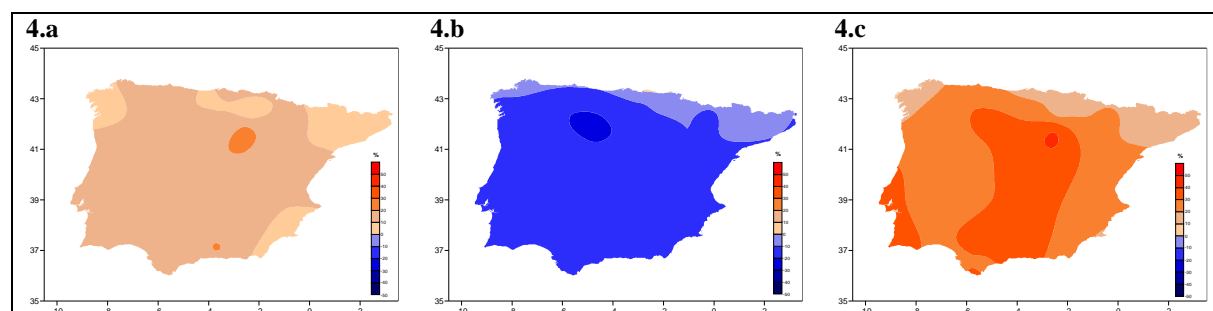


Figura 6. Anomalías de la insolación (%) durante el invierno. (a) $NAO_i > 1$, (b) $NAO_i < -1$, (c) diferencia (a)-(b).

5.3. Western Mediterranean Oscillation (WeMO)

Para evaluar la variabilidad de la WeMO se ha utilizado el índice definido como la diferencia entre las presiones en superficie estandarizadas de Cádiz-San Fernando y Padua. La fase positiva de dicho patrón se configura a partir de un anticiclón hacia el oeste de la Península Ibérica, junto con una depresión en el de norte de la Península Itálica. En cambio, la fase negativa estaría ligada a una baja en el golfo de Cádiz o en su área próxima, y altas presiones en la zona Centroeuropea y el norte de Italia. Las fases positivas del patrón comportan advecciones de componente norte sobre la Península Ibérica, mientras que las fases negativas conllevan unos flujos de componente este sobre la cuenca del Mediterráneo occidental. Así, durante las fase positivas del patrón se derivan anomalías positivas de la precipitación sobre el noroeste peninsular, y negativas en el resto del territorio, especialmente en los sectores próximos al mar Mediterráneo. Lo contrario ocurre durante las fases negativas del patrón.

Durante el invierno (Fig. 7.a) los valores de la r de Pearson son positivos y significativos en prácticamente toda la franja encarada al Mar Mediterráneo, mientras que ocurre todo lo contrario (correlaciones negativas y significativas) en toda la cornisa cantábrica y sectores del noroeste gallego. Pero donde la WeMO obtiene mejores resultados es durante la estación otoñal (Fig. 7.b), donde los valores de la r de Pearson son claramente significativos en buena parte de la Península Ibérica. Aunque se mantiene, o incluso disminuyen, las correlaciones negativas y significativas en la zona del cantábrico, las correlaciones positivas y significativas se amplían a buena parte del centro, sur y este peninsular (a diferencia del invierno, donde quedaba limitada a la franja mediterránea).

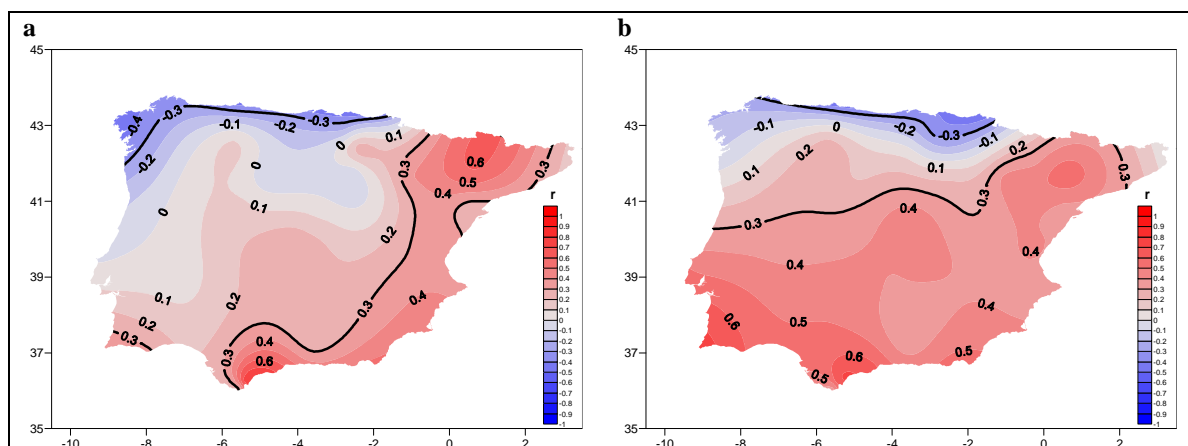


Figura 7. Isopletas de las r de Pearson entre la insolación relativa en la Península Ibérica y el WeMOi. (a) Invierno, (b) Otoño. La línea negra continua delimita, aproximadamente, el nivel de significación al 95%.

Se han obtenido las anomalías otoñales e invernales de la insolación durante las fases extremas de la WeMO, entendidas con aquellas con $WeMO_i > +1$ para las fases extremas positivas, y $WeMO < -1$ para las negativas. En el otoño queda patente un comportamiento contrapuesto de la fachada cantábrica o área de clima oceánico y el resto del territorio peninsular (clima mediterráneo). Durante las fases extremas positivas se detectan anomalías negativas comprendidas entre el 0% y el -20% en la parte de la Península Ibérica con clima oceánico, siendo máximas en las inmediaciones del golfo de Vizcaya y el oeste de Galicia. En cambio, la parte con clima mediterráneo presenta anomalías positivas, con valores comprendidos entre el 0% y el +10%, a excepción de un pequeño sector situado en las inmediaciones de Gibraltar y Málaga, donde se localizan máximos comprendidos entre +10% y +20%. Durante las fases extremas negativas de la WeMO los resultados son semejantes, pero con signo opuesto en las anomalías detectadas. Así, en la fachada del cantábrico las anomalías son positivas, con valores entre 0% y +10%, y máximos entre +10% y +20% en la zona cercana al golfo de Vizcaya. En el resto del territorio las anomalías son negativas, y presentan unos valores (en términos absolutos) mayores a los generados durante las fases extremas positivas. Las diferencias entre las anomalías detectadas durante las fases extremas delimitan las áreas más sensibles a la WeMO: las inmediaciones del golfo de Vizcaya (entre -20% y -30%) y del estrecho de Gibraltar (entre +20% y +30%). Durante el mes de octubre la incidencia de las fases extremas de la WeMO en la insolación peninsular se hace más evidente. En las fases extremas positivas se llegan a alcanzar anomalías comprendidas entre -20% y -30% en el área del Golfo de Vizcaya, mientras que en la zona de clima mediterráneo los máximos están comprendidos entre +10% y +20% en sectores cercanos al estrecho de Gibraltar y en otros puntos del centro y suroeste peninsular. Durante las fases extremas negativas la franja del cantábrico no presenta anomalías positivas, a excepción de pequeños sectores costeros, donde los valores no alcanzan el +10%. Así, casi la totalidad de la Península Ibérica posee anomalías negativas de la insolación (no se marca el patrón contrapuesto entre la fachada cantábrica

y el resto del territorio peninsular). Las máximas anomalías están comprendidas entre el -20% y el -30% en amplias áreas del centro y suroeste peninsular, que a su vez son las zonas más sensibles a las fases extremas de la WeMO (entre +30% y +40%).

Los resultados obtenidos en el invierno (Fig. 8) no difieren considerablemente de los obtenidos durante el otoño, aunque las anomalías son sensiblemente superiores. Al realizar las diferencias de las anomalías los valores más elevados se sitúan en el nordeste peninsular (Lleida) y Gibraltar, con cifras comprendidas entre +40% y +50%.

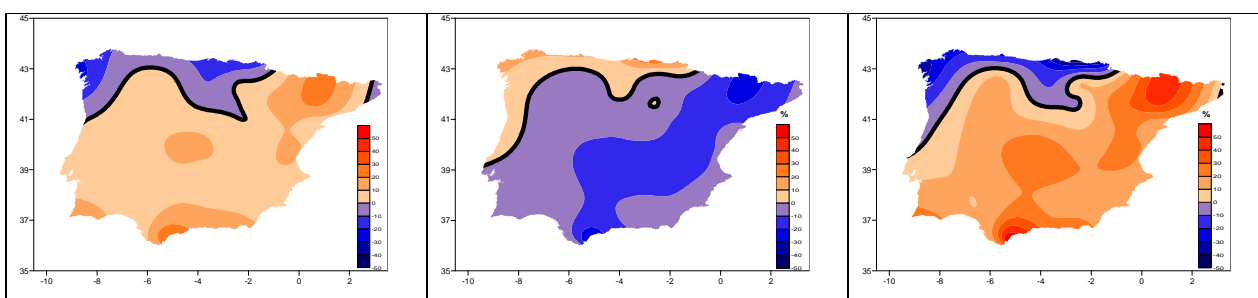


Figura 8. Anomalías de la insolación (%) durante el invierno. (a) $WeMO_i > 1$, (b) $WeMO_i < -1$, (c) diferencia (a)-(b).

6. Conclusiones

Los resultados constatan un comportamiento temporal de la insolación anual en la Península Ibérica similar a los obtenidos en otros puntos del planeta, próximos como Portugal, Francia o Irlanda, o lejanos como China o EE.UU. A grandes rasgos pueden considerarse en la línea del fenómeno llamado *global dimming*, expresión que hace referencia a una reducción global de la radiación solar recibida en la superficie terrestre desde la década de los 50 o 60 del siglo XX. Dicha tendencia se rompe bruscamente durante los últimos años del pasado siglo, mostrando desde entonces un ascenso paulatino hasta la actualidad. Aunque son numerosos los trabajos que han tratado la cuestión, aún quedan dudas sobre su origen, atribuyéndose por lo general a un aumento global de la carga de aerosoles en los niveles medios-bajos de la troposfera durante los primeros años de la segunda mitad del siglo XX, y a una reducción paulatina posterior que llegaría hasta nuestros días. Las variaciones en las cargas de aerosoles globales estarían vinculadas a aumentos en la contaminación de carácter antrópico, que desde mediados de los años 80 o principios de los 90 del siglo XX se habría reducido debido a la concienciación ambiental de los países industrializados.

Finalmente, se ha constatado una clara influencia de los patrones de teleconexión en la variabilidad interanual de la insolación en la Península Ibérica. De especial interés resultan los desfases encontrados entre los estados del ENSO durante los meses estivales y su impacto en la insolación otoñal de la Península Ibérica.