

**INSTITUTO UNIVERSITARIO DE GEOLOGÍA "ISIDRO PARGA PONDAL"**

**TESIS DOCTORAL**

**DISTRIBUCIÓN DE LA IRRADIACIÓN SOLAR GLOBAL,  
DIRECTA Y DIFUSA, EN LA CIUDAD DE  
A CORUÑA**



**UNIVERSIDADE DA CORUÑA**



**M<sup>a</sup> Carmen Meizoso López**

**Directores:**

**Antonio Paz González Benigno A. Rodríguez Gómez Miguel A. González García**

**A Coruña 2012**

## **Agradecimientos**

Sirvan estas líneas para expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que han contribuido a la realización de esta tesis.

A mis directores Antonio Paz González, Benigno Rodríguez Gómez y Miguel Ángel González García por la oportunidad que me dieron de realizar este trabajo, y todas las facilidades puestas a mi disposición desde el primer momento. En especial agradezco a Antonio haberme acogido amablemente en el programa de doctorado del Instituto Universitario de Geología, primer paso de esta travesía. Y sin duda estoy en deuda con Benigno, impulsor de esta investigación, sus valiosas aportaciones y acertadas directrices me han guiado eficazmente hasta aquí, y su permanente disposición y apoyo han sido fuente constante de motivación.

A Francisco García García y el resto del personal de la Delegación Territorial de AEMET en A Coruña, por todas las aclaraciones e información facilitada sobre el mantenimiento de los equipos de medida de radiación, en especial por el interés y agilidad con que dieron respuesta a las cuestiones relacionadas con la calidad de los datos.

A José Ramón Cancelo de la Torre por sus expertas orientaciones en relación al análisis de series temporales.

A Victoria González Rodríguez, José Luis Calvo Rolle y Andrés Piñón Pazos, colegas de la Escuela Universitaria Politécnica, por sus consejos, aliento y desinteresada colaboración que me ha permitido dedicar más tiempo a este trabajo.

Finalmente a la Agencia Estatal de Meteorología por facilitar los datos que hicieron posible este estudio.

M<sup>a</sup> Carmen Meizoso López

A Coruña, 2012



## Resumen

Con el objetivo de estudiar las series temporales de irradiación solar global, directa y difusa más largas de las que se dispone en Galicia, recogidas por la AEMET en A Coruña, se realiza en primer lugar, una caracterización estadística de las tres series de radiación, así como del índice de claridad y la fracción difusa, que ofrece una imagen de la cantidad y variabilidad de la misma en A Coruña, se incluye una clasificación de los días en los últimos 25 años según el índice de claridad.

Se establece su relación con otras variables habitualmente registradas como las horas de sol, la temperatura y la precipitación. Se comprueba que las horas de sol son el predictor óptimo para estimar tanto la irradiación global como la componente directa, y se han obtenido modelos de regresión a escala diaria que permiten completar los datos de radiación.

Se presentan modelos, basados en correlaciones con el índice de claridad, que permiten estimar las componentes difusa y directa. Y finalmente se modelaron todas las series objeto de estudio con el método ARIMA, a escala diaria y mensual, obteniendo ecuaciones que permiten hacer predicciones utilizando únicamente como entrada la propia serie.

## Abstract

To study larger time series of global solar radiation, direct and diffuse available in Galicia, registered by the AEMET in A Coruña, first a statistical characterization of the three series of radiation, clearness index and diffuse fraction is performed, which offers a global vision of the amount and variability of the radiation in A Coruña, and includes a classification for the days in the last 25 years according to clearness index.

The relationship with other variables commonly registered as sunshine hours, temperature and precipitation is established. It is found that daylight hours are the best predictor to estimate both the global irradiation and the direct component, daily regression models have been achieved allows completing radiation data from sunshine hours.

Models based on the correlations with the clearness index, have been developed to estimate the direct and diffuse components. And finally ARIMA models obtained for all series of radiation, clearness index and diffuse fraction, on a daily and monthly scale, provided prediction equations using as input information only the past values of the serie.

## Resumo

Co obxectivo de estudar as series temporais de irradiación solar global, directa e difusa máis longas das que se dispón en Galicia, recollidas pola AEMET na Coruña, realízase en primeiro lugar, unha caracterización estatística das tres series de radiación, así como do índice de claridade e a fracción difusa, que ofrece unha imaxe da cantidade, e variabilidade desta na Coruña, inclúese unha clasificación dos días nos últimos 25 anos segundo o tipo o índice de claridade.

Establécese a súa relación con outras variables habitualmente rexistradas como as horas de sol, a temperatura e a precipitación. Compróbase que as horas de sol son o predictor óptimo para estimar tanto a irradiación global coma a compoñente directa, e obtivéronse modelos de regresión a escala diaria que permiten completar os datos de radiación.

Preséntanse modelos, baseados en correlacións co índice de claridade, que permiten estimar as compoñentes difusa e directa. E finalmente modeláronse todas as series baixo estudo co método ARIMA, a escala diaria e mensual, obtendo ecuacións que permiten facer predicións utilizando como entrada unicamente a propia serie.



Resultados obtenidos a partir de la información cedida por la Agencia Estatal de Meteorología. Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino.



## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
I.1. Antecedentes. ....	3
I.2. Objetivos. ....	5
I.3. Estructura del documento.....	7
 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA. ....	 9
II.1. Introducción.....	11
II.2. Obtención de la irradiación solar a partir de otras variables climáticas. ....	12
II.2.1. Horas de insolación .....	12
II.2.2. Temperatura y precipitación.....	14
II.3. Modelos para obtener las componentes de la irradiación global. ....	19
II.3.1. Estimación de la irradiación difusa .....	22
II.3.2. Estimación de la irradiación directa .....	26
III.4. Análisis de series temporales de irradiación. ....	30
 MATERIAL Y MÉTODOS. ....	 37
III.1. Introducción. ....	39
III.2. Equipos de medida. ....	39
III.3. Conjunto de datos disponible.....	41
III.4. Control de calidad de los datos. ....	43
III.5. Errores detectados en las medidas de irradiación directa y difusa. ....	46
III.6. Análisis descriptivo univariante de las series de irradiación global, directa y difusa.....	54
III.7. Análisis descriptivo univariante del índice de claridad y la fracción difusa.....	56
III.8. Predictores de irradiación solar. ....	60
III.9. Modelos para estimar irradiación difusa.....	61
III.10. Modelo para estimar irradiación directa en plano normal.....	63
III.11. Evaluación de modelos.....	63
III.12. Metodología de análisis ARIMA de series temporales.....	65
III.12.1. Recogida de datos de la serie.....	66
III.12.2. Análisis de la estacionariedad y posible transformación de la serie...	69
III.12.3. Identificación del modelo. ....	70
III.12.4. Estimación de los parámetros del modelo .....	70
III.12.5. Validación y selección del modelo .....	71
III.12.6. Predicción.....	73
III.12.7. Detección de valores atípicos.....	75

RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	77
IV.1. Caracterización de la irradiación.....	79
IV.1.1. Caracterización de la irradiación global en plano horizontal.....	79
IV.1.2. Caracterización de la irradiación difusa en plano horizontal.....	86
IV.1.3. Caracterización de la irradiación directa en plano normal.....	91
IV.1.4. Caracterización del índice de claridad y de la fracción difusa.....	96
IV.1.4.1. Datos diarios.....	97
IV.1.4.2. Datos horarios.....	105
IV.1.5. Comparación entre la irradiación global, difusa y directa.....	110
IV.1.5.1. Estabilidad a escala diaria.....	110
IV.1.5.2. Medias mensuales.....	110
IV.1.5.3. Distribución horaria.....	113
IV.2. Posibles predictores de irradiación solar.....	115
IV.2.1. Temperatura e irradiación global.....	116
IV.2.2. Precipitación e irradiación global.....	121
IV.2.3. Horas de sol e irradiación global.....	125
IV.2.4. Horas de sol e irradiación directa.....	127
IV.2.5. Tablas resumen de la estimación de irradiación a partir de otras variables.....	129
IV.3. Modelos para estimar irradiación difusa.....	130
IV.3.1. Modelo para la irradiación difusa diaria media mensual.....	130
IV.3.2. Modelo para la irradiación difusa diaria.....	132
IV.3.3. Modelos para la irradiación difusa horaria.....	135
IV.3.4. Comparación con otros modelos.....	142
IV.4. Modelo para estimar irradiación directa en plano normal.....	144
IV.5. Análisis ARIMA.....	145
IV.5.1. Análisis ARIMA para la serie diaria de irradiación global.....	145
IV.5.2. Análisis ARIMA para la serie diaria media mensual de irradiación global.....	153
IV.5.3. Análisis ARIMA para la serie de $k_t$ diario.....	158
IV.5.4. Análisis ARIMA para la serie de $k_t$ diario medio mensual.....	162
IV.5.5. Análisis ARIMA para la serie de irradiación difusa diaria.....	166
IV.5.6. Análisis ARIMA para la serie de irradiación difusa diaria media mensual.....	172
IV.5.7. Análisis ARIMA para la serie de $F_d$ diaria.....	176
IV.5.8. Análisis ARIMA para la serie de $F_d$ media diaria mensual.....	181
IV.5.9. Análisis ARIMA para la serie irradiación directa plano normal diaria.....	185
IV.5.10. Análisis ARIMA para la serie irradiación directa plano normal diaria media mensual.....	190

---

IV.5.11. Tablas resumen del análisis ARIMA.....	194
IV.6. Resumen de resultados. ....	195
CONCLUSIONES.....	203
V.1. Conclusiones.....	205
BIBLIOGRAFÍA.....	207
ANEXO A: DEFINICIONES Y NOTACIÓN DE MODELOS ARIMA. ....	217
A.1. Proceso estocástico. ....	A-1
A.2. Serie temporal ....	A-1
A.3. Estacionariedad de un proceso ....	A-1
A.3.1. Proceso estocástico estacionario en sentido fuerte.....	A-2
A.3.2. Proceso estocástico estacionario en sentido amplio ó débil .....	A-2
A.4. Proceso estocástico de ruido blanco.....	A-3
A.5. Modelos ARIMA.....	A-3
A.6. Función de autocorrelación simple y función de autocorrelación parcial.....	A-7
A.7. Valores atípicos en series temporales.....	A-10
ANEXO B: DATOS AUSENTES. IMPUTACIÓN.....	B-1
ANEXO C: RESUMEN DE ESTADÍSTICOS .....	C-1





## **CAPÍTULO I**

### **INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.**



### **I.1. Antecedentes.**

El apoyo tanto social como gubernamental al uso de fuentes de energía renovable es creciente, la Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril de 2009, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables, fija como objetivos generales conseguir una cuota del 20 % de energía procedente de fuentes renovables en el consumo final bruto de energía de la Unión Europea (UE), y una cuota del 10 % de energía procedente de fuentes renovables, en el consumo de energía en el sector del transporte en cada Estado miembro para el año 2020.

Cada Estado miembro ha elaborado un Plan de Acción Nacional en materia de Energías Renovables (PANER) para conseguir los objetivos nacionales fijados en la propia Directiva. Para España, estos objetivos se concretan en que las energías renovables representen un 20% del consumo final bruto de energía, con un porcentaje en el transporte del 10%, en el año 2020 (el mismo objetivo que para la media de la UE). En 2009 las energías renovables han superado el 12% en términos de energía final bruta, y su aporte en la producción de energía eléctrica era del 24,7%, de ese porcentaje la eólica supuso un 12,4%, la hidráulica un 9%, la solar un 2,03%, y el 1,3% restante se reparte entre biomasa, biogás y residuos sólidos urbanos.

En el PANER 2011-2020 de nuestro país, se estima que las aportaciones de las energías renovables al mix de generación eléctrica previstas para 2020 posibilitará una cobertura del 38%. Diferenciando según tecnologías de energías renovables, la energía eólica seguirá ocupando un lugar dominante, con el 52% de la producción eléctrica renovable en 2020 considerando conjuntamente la terrestre y marina, lo que se aproxima al 20% de toda la producción eléctrica, por encima de la producción nuclear actual. Y aunque a más distancia, le siguen la hidráulica, la solar termoeléctrica y la solar fotovoltaica, responsables respectivamente del 8,3%, 3,8% y 3,6% de la producción eléctrica bruta total.

Debido al complejo patrón climático de Galicia, caracterizado por abundantes precipitaciones y elevada nubosidad, el empleo de la energía solar en esta Comunidad ha tenido un desarrollo paulatino. Sin embargo, estudios recientes (Pettazzi and Salsón Casado 2011) indican que la insolación en la zona de Rías Baixas es solamente un 20% inferior a la recibida en las zonas más soleadas de la Península Ibérica. Por lo tanto, también en Galicia, el aprovechamiento de este recurso solar resulta viable.

Pero el aprovechamiento de la irradiación solar como fuente de energía requiere del conocimiento de la cantidad y distribución de la irradiación que incide en un lugar determinado y de su variación temporal a lo largo de los ciclos anual y diario. A su vez este aprovechamiento está condicionado principalmente por dos aspectos: la intensidad de la irradiación solar recibida por la Tierra, que depende de los ciclos diarios y anuales y de la latitud del lugar de aplicación sobre la superficie terrestre, y las condiciones climatológicas y meteorológicas imperantes. La variabilidad interanual del clima en general, y de la radiación solar en particular, resta sentido a la instalación de una estación de medidas in situ para evaluar el potencial ya que las tendencias y características más significativas del clima en un determinado lugar sólo se hacen evidentes a medio y largo plazo (Silva Pérez 2002). Sólo disponiendo de largas series temporales de medidas pueden realizarse caracterizaciones y estimaciones fiables. En climatología es costumbre elaborar estadísticos significativos en base a series de 30 años o más, algunos autores (Vernich and Zuanni 1997) indican que en el estudio de la radiación solar, las series temporales deberían abarcar al menos catorce años para poder considerarlas estadísticamente significativas.

Al mismo tiempo para evaluar la eficacia de los paneles térmicos y fotovoltaicos es necesario conocer la cantidad de radiación incidente en el panel, y esto requiere disponer de datos de irradiación global sobre una superficie inclinada con cualquier orientación. Pero a fin de calcular la irradiación global sobre un plano inclinado no es suficiente conocer la irradiación global sobre superficie horizontal, sino que es preciso conocer las componentes directa y difusa en el plano horizontal, para posteriormente, aplicando algún modelo analítico o empírico obtener el dato de interés en el panel. Sin embargo, en la mayoría de las estaciones meteorológicas únicamente se registra la radiación global sobre superficie horizontal.

En lo que se refiere al territorio gallego, la red de observación meteorológica es muy reciente, las series de medidas más largas de radiación solar corresponden a la Delegación Territorial en Galicia de la Agencia Estatal de Meteorología, situada en A Coruña, que proporciona valores de radiación global desde 1985, de radiación directa desde 1996 y de difusa desde 1999. Por su parte, la Xunta de Galicia dispone de una red de observación meteorológica y climatológica, (MeteoGalicia) que nace en el año 2000, y contaba, en el momento en que comenzó este trabajo, con 75 estaciones automáticas distribuidas por toda Galicia, sin embargo, solamente en 4 estaciones (una en cada provincia) se registra además de la radiación global la radiación directa, y únicamente en dos de estas estaciones se mide también radiación difusa. En la provincia de A Coruña la estación de Santiago EOAS, registra radiación directa y difusa desde finales de 2005, en la provincia de Lugo, la estación de Pedro Murias (Ribadeo)

registra la radiación directa desde abril de 2006, en Orense la estación del Alto do Rodicio (Maceda) registra radiación directa desde mayo de 2007, y por último en Pontevedra, la estación situada en el Campus de Vigo registra, radiación directa, difusa y reflejada desde mayo de 2006.

El estudio de la radiación solar en Galicia ha ido aumentando progresivamente merced al impulso de las energías renovables en los últimos tiempos, desde el primer mapa de irradiación solar elaborado en 1981 (Paz González and Díaz-Fierros Viqueira 1981), hasta el muy reciente Atlas de radiación solar de Galicia (Pettazzi and Salsón Casado 2011) elaborado a partir de una serie temporal de datos de satélite de 23 años, así como series de datos de radiación solar procedentes de 28 estaciones meteorológicas, que proporciona una serie de mapas, mensuales y anuales de irradiación y otros parámetros útiles para evaluar el aprovechamiento solar. Este atlas complementa una publicación previa de la Universidad de Vigo (Vázquez Vázquez 2005), que estimaba la irradiación global en Galicia a partir de imágenes de satélite de un período de 2 años.

En el Instituto Universitario de Geología Isidro Parga Pondal de la UDC, se han presentado varias aportaciones que contribuyen también al conocimiento del recurso solar en la Comunidad, además del citado mapa de irradiación solar de 1981, en (Orozco González 2001) se realizan medidas de irradiancia en A Coruña, para longitudes de onda comprendidas entre 300 e 1100 nm, se registra durante 4 años, la radiación solar incidente, la radiación fotosintéticamente activa (PAR) y la ultravioleta UV-B, y se comprueba que las variables más importantes para explicar la irradiancia son la masa óptica y el índice de claridad, y recientemente en (Rodríguez Gómez 2010) se obtienen mapas de irradiación global en Galicia utilizando medidas recogidas en estaciones meteorológicas distribuidas por toda Galicia. Esta tesis desarrolla una de las propuestas enunciadas en esta última referencia y tiene como objetivo estudiar las series temporales de radiación solar global, directa y difusa, más largas de las que se dispone en Galicia, que corresponden a las medidas recogidas por AEMET en A Coruña.

## **I.2. Objetivos.**

Vistos los antecedentes, y dado que:

- ✓ La evaluación del rendimiento de las diferentes tecnologías de aprovechamiento de la energía solar requieren el conocimiento de la radiación incidente en superficies inclinadas, fijas o móviles.

- ✓ El conocimiento de la irradiación global sobre superficie horizontal no es suficiente para determinar su valor sobre una superficie inclinada.
- ✓ Las estaciones meteorológicas que aportan medidas de directa y difusa son muy escasas en todo el territorio, y en particular en Galicia, y sus registros son muy recientes.

Se propone como objetivo general:

*Estudiar las series temporales de radiación solar global, directa y difusa, más largas de las que se dispone en Galicia, recogidas por la AEMET en la Delegación Territorial en A Coruña.*

Su cumplimiento se aborda en la tesis desde las siguientes perspectivas:

- ✓ En primer lugar el análisis y la descripción estadística de las tres series de radiación así como del índice de claridad y la fracción difusa. El primero de estos índices definido como el cociente entre la radiación global horizontal y la radiación extraterrestre, indica el grado de transmisión de radiación de la atmósfera y permite aislar la componente estocástica de la radiación causada principalmente por la presencia de nubes y aerosoles. Por su parte la fracción difusa es la proporción de irradiación difusa contenida en la irradiación global y ayuda a caracterizar el fenómeno de radiación en A Coruña.
- ✓ El estudio de posibles correlaciones entre otras variables climáticas (temperatura, precipitación y horas de sol) de medida habitual y las series de radiación, para determinar si permiten estimar la radiación global o alguna de sus componentes, lo que proporciona el mecanismo para ampliar temporal o espacialmente los datos de radiación.
- ✓ La obtención de un modelo que permita estimar las componentes directa y difusa, dado que la separación de esas componentes, en particular la difusa, sigue siendo a día de hoy la principal fuente de error en la predicción de la radiación en superficies inclinadas especialmente en localizaciones relativamente nubosas, en las que la selección del modelo más adecuado es una cuestión crítica (Gueymard 2009).
- ✓ Y por último la utilización de la metodología ARIMA para el análisis de las series de radiación con el objetivo de obtener modelos que, teniendo como única

---

entrada la propia serie, permitan realizar predicciones de la misma. Estos modelos se basan en la serie de observaciones de una variable de la que se supone que los datos siguen un patrón de comportamiento o una combinación de patrones que se repite a lo largo del tiempo. El objetivo de predecir valores futuros a partir de lo ocurrido en el pasado es realmente ambicioso, la investigación en este campo durante las cuatro últimas décadas ha dado como resultado multitud de modelos de estimación de radiación solar, tanto físicos que dependen de un conjunto más o menos grande de parámetros atmosféricos, como estadísticos en los que el algoritmo genera valores de radiación intentando respetar algunas de las propiedades estadísticas de las series de datos, tales como la media, varianza, distribución de frecuencias etc., este último es el enfoque seleccionado en este trabajo.

### **I.3. Estructura del documento.**

A continuación se describe la organización de los capítulos de este documento.

Tras concretar los objetivos en el presente capítulo, en el capítulo II se hace una revisión bibliográfica que describe el estado del conocimiento en relación a tres aspectos: la estimación de la radiación a partir de otras variables, la estimación de las componentes de la radiación global y la utilización de la metodología ARIMA para predecir valores de radiación solar.

El capítulo III comienza con una descripción de los equipos de medida de las series de radiación solar empleadas en este trabajo y su situación, a continuación se describen las series de datos de radiación mostrando los períodos temporales cubiertos y los porcentajes de datos perdidos en cada caso, se detallan los controles de calidad aplicados para filtrar los datos, en particular el procedimiento que llevó a descartar los registros de varios años de la serie de irradiación directa. En los apartados que se refieren al análisis estadístico descriptivo de las series de irradiación, índice de claridad y fracción difusa, se recoge el criterio empleado para clasificar los tipos de días, y se justifica la agrupación de datos horarios según la elevación solar. A continuación se describen las series de temperatura, precipitación y horas de insolación utilizadas como predictores de las diferentes componentes de la radiación solar, el procedimiento seguido para la obtención de los modelos de irradiación difusa y directa a partir del índice de claridad, y los indicadores estadísticos empleados en este estudio para la evaluación de cada modelo. Por último se detallan cada una de las etapas del método ARIMA de análisis de series temporales.

En el capítulo IV se encuentran los resultados agrupados en cinco apartados, el primero recoge la caracterización estadística de la radiación y pretende ofrecer una imagen de la cantidad y variabilidad de la misma en A Coruña, e incluye una clasificación de los meses de acuerdo a su adecuación para el aprovechamiento de la energía solar recibida. En el segundo apartado se establece su relación con las horas de sol, la temperatura y la precipitación. En el tercer y cuarto apartados, se exponen los modelos desarrollados para obtener las componentes difusa y directa, que están basados en correlaciones con el índice de claridad. El quinto apartado contiene los modelos obtenidos con el método ARIMA para todas las series de irradiación, el índice de claridad y la fracción difusa, a escala diaria y mensual. Para terminar el capítulo se incluye una recapitulación cualitativa de los resultados.

En el capítulo V se presentan las conclusiones más relevantes de este trabajo.

En el capítulo VI se recoge la bibliografía empleada en la elaboración de la tesis.

Por último, este documento incluye 3 anexos:

En el Anexo A se exponen los conceptos de series temporales, y el formalismo matemático asociado a los mismos, que ha sido utilizado en la realización del análisis ARIMA.

El Anexo B recoge tablas de datos en las que figuran: un resumen de los meses en los que se dispone del conjunto completo de datos horarios de cada una de las tres series de irradiación, los valores atípicos horarios y diarios detectados con los sucesivos controles de calidad, y los valores diarios resultantes del procedimiento de imputación previo al análisis ARIMA en las series de irradiación global, directa y fracción difusa.

El Anexo C es un resumen de estadísticos descriptivos de cada una de las series.

## **CAPÍTULO II**

### **REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.**



## **II.1. Introducción.**

A lo largo de los últimos 40 años se han desarrollado diferentes tipos de modelos para predecir la radiación solar cuando y/o donde ésta no se mide adecuadamente o ni siquiera se dispone de medios para medirla. A día de hoy es difícil categorizar los diferentes tipos de modelos con los que trabaja la comunidad científica. En (Badescu, 2008, p. 479-509) se propone una clasificación de los mismos atendiendo a 9 criterios: tipo de datos de salida, tipo de datos de entrada, resolución espacial, resolución temporal, resolución espectral, tipo de metodología, tipo de algoritmo, geometría de la superficie y tipo de cielo.

En general, atendiendo a una combinación entre la metodología y el tipo de algoritmo, se suelen distinguir dos clases de modelos: los modelos físicos y los estadísticos. Los primeros se basan exclusivamente en consideraciones físicas del intercambio de energía que tiene lugar en el sistema Tierra-atmósfera, por lo que tratan de estimar la irradiación solar que se recibe en la superficie en términos de un conjunto de parámetros físicos como el vapor de agua, polvo, aerosoles, nubes y tipos de nubes etc. Por otra parte, los modelos estadísticos, que surgieron como herramienta principal para alcanzar metas inmediatas de los sistemas de conversión de energía solar, se convirtieron rápidamente en un campo autónomo de la investigación de energía solar. Estos modelos comprenden el análisis estadístico descriptivo de las principales variables de interés (irradiación horaria o diaria global, difusa o directa), el modelado estadístico de sus funciones de distribución observadas empíricamente, la investigación de las relaciones estadísticas entre las principales componentes de la irradiación solar (difusa versus global, por ejemplo), la correlación espacial entre datos simultáneos en diferentes lugares, la investigación de las relaciones estadísticas entre las componentes de la irradiación y otras variables meteorológicas (horas de insolación, nubosidad, temperatura etc.), y la predicción de valores de radiación solar basándose en valores pasados. (Badescu, 2008, p. 55-91).

Habitualmente en función del resultado final deseado, puede ser preciso recurrir a sucesivos modelos cuyos resultados están relacionados. Si se pretende, por ejemplo, calcular la irradiancia media mensual en una superficie vertical, y solo se dispone de las horas de insolación, será preciso un primer modelo para obtener la irradiancia global en plano horizontal, un segundo modelo que permita separar las componentes directa y difusa y un tercer modelo para predecir la irradiancia global en plano inclinado a partir de las anteriores.

Este trabajo se centra en el modelado estadístico, recogiendo algunos de los análisis comentados para las series de A Coruña.

En los siguientes apartados se presenta, en primer lugar una revisión acerca de los modelos que permiten obtener la radiación a partir de otras variables, en un segundo apartado se revisan aquellos enfocados al cálculo de las diferentes componentes de la radiación global, y por último se revisa un tipo de modelos estocásticos, conocidos como ARIMA que incorporan al modelo no solo el comportamiento pasado, sino también sus componentes cíclicas. En cada apartado se organiza la revisión en orden cronológico, de lo más antiguo a lo más reciente, dejando al final de la sección los estudios realizados con datos de alguna localidad en España.

## **II.2. Obtención de la irradiación solar a partir de otras variables climáticas.**

Los esfuerzos por modelar el comportamiento de la irradiación solar tienen como principal hándicap la escasez de puntos de medida y la corta duración de las series cuando se dispone de éstas, por ello hay un considerable número de trabajos centrados en derivar la irradiación global o alguna de sus componentes a través de otras variables de medida habitual tales como: la temperatura, la precipitación, las horas de sol, nubosidad etc. En esta sección se revisan algunos de estos estudios. En todos los casos, se pone de manifiesto la posibilidad de "extender" espacial o temporalmente los datos de radiación global a zonas o intervalos temporales en los que no se dispone de medidas a través de un modelo que a partir de las medidas de temperatura, o precipitación estima su valor con gran precisión. En el caso de Galicia, la serie más larga de radiación registrada corresponde a la radiación global y alcanza a día de hoy 27 años, mientras que los registros de temperatura y precipitación superan los 80 años y los de horas de insolación acumulan más de 60 años. En consecuencia este estudio aborda la validación de un modelo que utilizando como entrada alguna de estas variables permita estimar la radiación global o sus componentes en la ciudad de A Coruña.

### **II.2.1. Horas de insolación**

Sin duda, una de las variables más utilizada para estimar la irradiación solar son las horas de insolación a través de la ecuación de Angström, que en ausencia de datos de radiación solar, es la expresión recomendada por la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (Rahimikhoob 2009).

La ecuación de Angström fue propuesta en 1924 y más tarde fue modificada por Prescott en 1940 (Tymvios et al. 2005), se trata de un modelo de regresión lineal en el que la variable dependiente es la razón entre la irradiación global recibida en la superficie ( $G$ ) con respecto a la disponible fuera de la atmósfera ( $G_0$ ), y la variable independiente es la fracción de horas de sol, razón entre las horas de insolación registradas en un día ( $S$ ) y la duración teórica de ese día ( $S_0$ ), que depende del día del año, la latitud y la declinación. El modelo se expresa en la ecuación (II.1):

$$\frac{G}{G_0} = a + b \left( \frac{S}{S_0} \right) \quad (\text{II.1})$$

En la ecuación anterior los valores de  $a$  y  $b$  recomendados por la FAO 56 son 0,25 y 0,50 respectivamente (Almorox, Hontoria, and Benito 2005). La expresión anterior se usaba originalmente para datos diarios medios mensuales, pero también se puede aplicar a valores diarios (Duran 2007).

En la literatura se pueden encontrar múltiples referencias que utilizan este modelo, entre las más recientes la de (Tymvios et al. 2005) en la que se obtienen regresiones a nivel diario, utilizando un total de 12 ecuaciones (una ecuación para cada mes del año), obteniendo coeficientes de determinación por encima de 0,8, además se señala que, en este caso, el éxito del modelo es similar al obtenido utilizando redes neuronales.

En (Bakirci 2009), se hace una extensa revisión que incluye las expresiones y coeficientes de un total de 60 modelos recogidos de publicaciones científicas, que abarcan desde la ecuación lineal original, modelos polinomiales en los que los investigadores añaden términos de segundo y tercer orden, modelos que hacen uso de la latitud, la declinación, o que incluyen la temperatura o precipitación en las expresiones de los coeficientes  $a$  y  $b$ , y hasta modelos exponenciales y logarítmicos.

Es indudable que la precisión de las estimaciones que permite este tipo de modelos, unido al hecho de que la red de medidas de horas de insolación es densa en relación a los lugares donde se mide radiación solar, hacen que los investigadores sigan recurriendo a ellos a día de hoy en zonas como la India (Katiyar and Pandey 2010), o en el Tibet (Li et al. 2011) donde se evalúan 8 modelos para estimar la irradiación global en superficie horizontal, todos ellos requieren las horas de sol como único parámetro de entrada. En los resultados se indica que dos modelos generales basados en la relación lineal establecida por Angström-Prescott que permiten estimar la

irradiación diaria y la media mensual son los que muestran la mejor relación precisión-complejidad en esa región.

### *Estudios en España*

En (Canada 1992) se obtiene una correlación empírica basada en la ecuación de Angström para estimar la radiación solar media diaria mensual en localidades del este de España. La coincidencia entre valores estimados y medidos recomienda el uso de esta correlación en toda la zona.

(Almorox and Hontoria 2004) tiene como objetivo obtener las constantes de varios modelos de regresión establecidos en la literatura para la estimación de la irradiación solar global a partir de las horas de sol, se utilizan los datos de 16 estaciones meteorológicas españolas, entre ellas la de A Coruña con datos de 1985 a 2000. Los modelos analizados incluyen el de Angström-Prescott, y otros 4 modelos con expresiones cuadrática, de tercer orden, logarítmica y exponencial. En todos los casos se utilizan valores medios mensuales, y se obtienen los coeficientes de las ecuaciones tanto a nivel anual como separando los datos en estaciones: primavera, verano, otoño e invierno. En las conclusiones se pone de manifiesto que aunque las ecuaciones de tercer orden ofrecen unos resultados ligeramente superiores en términos del coeficiente de determinación y error, la diferencia con respecto a la ecuación lineal son tan pequeñas que por simplicidad se descarta su uso. También se indica que la división de los datos por estaciones no está justificada. Los coeficientes propuestos por los autores para toda España son:  $a=0,2170$  y  $b=0,5453$  y el valor de  $R^2$  es de 0,864.

### **II.2.2. Temperatura y precipitación.**

Uno de los factores que condiciona la elección de un determinado algoritmo para estimar la cantidad de energía solar recibida, es la disponibilidad de los datos meteorológicos de entrada. La temperatura es un parámetro registrado en todas las estaciones meteorológicas del mundo, que además se caracteriza porque su medida es simple y robusta. Dado que la radiación solar controla la temperatura y la humedad del suelo y proporciona energía para la fotosíntesis, los modelos que simulan el crecimiento de cultivos, la germinación de las semillas, o la interacción entre los cultivos y la maleza utilizan como variable principal la radiación solar, y en este campo la mayoría de los modelos que se desarrollaron utilizan como entrada las temperaturas mínima y máxima (Paulescu, Fara, and Tulcan-Paulescu 2006). A continuación se exponen algunos de ellos, que pueden ser una alternativa a las ecuaciones clásicas

basadas en las horas de insolación, cuando no se dispone de esta medida, en muchos se incluyen además, otras variables como la precipitación o la presión atmosférica.

En (Hunt, Kuchar, and Swanton 1998) los autores tienen como objetivo completar las series de radiación, o estimarlas en las zonas donde no se dispone de datos, en una región de Canadá, para utilizarlas en la simulación del crecimiento y desarrollo de los principales cultivos. Se citan los modelos propuestos por otros autores como el de Hargreaves y Samani que establece una relación exponencial entre la irradiación global y la extraterrestre y la diferencia de temperaturas máxima y mínima, de la forma:

$$G = a_0 (T_{\max} - T_{\min})^{0.5} G_0 \quad (\text{II.2})$$

Siendo  $T_{\max}$  y  $T_{\min}$  las temperaturas diarias medias mensuales máxima y mínima en °C,  $G$  la irradiación global diaria media mensual y  $G_0$  la irradiación extraterrestre diaria media mensual. El valor de  $a_0$  recomendado para zonas de interior es 0,16 y para zonas de costa 0,17.

El de Bristow-Campbell, muy similar al anterior, permite el cálculo de la irradiación solar diaria:

$$G = a_0 G_0 (1 - \exp(-a_1 (T_{\max} - T_{\min})^{a_2})) \quad (\text{II.3})$$

Los coeficientes empíricos de este modelo tienen significado físico,  $a_0$  representa el valor máximo del coeficiente de transmisividad de la atmósfera o índice de claridad ( $k_t = G/G_0$ ) es característico de la zona de estudio, mientras que los coeficientes  $a_1$  y  $a_2$  representan el efecto de los incrementos del término diferencia de temperaturas sobre el valor máximo de  $k_t$ , serán diferentes para un clima húmedo o para otro seco. Este es uno de los modelos más utilizado en la estimación de radiación solar, por su simplicidad y la disponibilidad de datos de entrada, su limitación principal es la determinación de sus coeficientes, que podría hacerse si se dispone de medidas de radiación (Meza and Varas 2000).

El modelo de Reddy, que incluye la latitud ( $\lambda$ ) y la precipitación diaria (Pr en mm), se aplica también a datos diarios:

$$G = a_0 + a_1 \lambda + a_2 \text{Pr}^{0.33} \quad (\text{II.4})$$

A su vez en la referencia se propone una nueva ecuación que incluye la temperatura máxima, la diferencia entre máxima y mínima y la precipitación:

$$G = a_0 G_0 (T_{\max} - T_{\min})^{0,5} + a_1 T_{\max} + a_2 \text{Pr} + a_3 \text{Pr}^2 + a_4 \quad (\text{II.5})$$

Y se propone una combinación de dos métodos para la estimación de los valores de irradiación solar en aquellas localidades en las que no se mide: usar los datos de irradiación solar disponibles en una estación próxima si ésta se encuentra a una distancia inferior a 390 Km, y para distancias superiores utilizar los coeficientes de esta expresión calculados para otra localidad con los datos de temperatura y precipitación del lugar en cuestión.

En (Meza and Varas 2000) se comprueba el modelo de Bristow-Campbell y el de Allen para comparar sus resultados, se utilizan datos de 21 estaciones en Chile. El modelo de Allen, incluye además de la diferencia de temperaturas, la presión atmosférica, para estimar la radiación solar media mensual:

$$\frac{G}{G_0} = K_r (T_{\max} - T_{\min})^{0,5} \quad (\text{II.6})$$

$$K_r = K_{ra} \left( \frac{P}{P_0} \right)^{0,5} \quad (\text{II.7})$$

En la expresión anterior, P es la presión atmosférica en kPa, P<sub>0</sub> la presión a nivel del mar (101,3 kPa), y K<sub>ra</sub> es un coeficiente empírico de valor 0,17 para zonas de interior y 0,20 para la costa.

En (Liu and Scott 2001) se realiza un trabajo similar al de Hunt, pero en este caso en Australia. Además de comprobar el ajuste de los modelos de Bristow-Campbell, de Hargreaves y el de Hunt, incluyen el de (McCaskill 1990):

$$G = aG_0 + bR_{j-1} + cR_j + dR_{j+1} \quad (\text{II.8})$$

En el que R es una variable binaria que refleja la presencia o ausencia de precipitación en un día (si no ha llovido R=0, mientras que si hay precipitación R toma el valor 1), los subíndices j-1, j y j+1 se refieren al día previo, al actual y al siguiente respectivamente.

También se hace referencia al modelo de Jong y Stewart, que combina datos de temperatura y precipitación:

$$G = aG_0D^b(1 + cPr + dPr^2) \quad (\text{II.9})$$

Donde Pr es la precipitación en mm para ese día y D es el rango diario de temperaturas y se define según la expresión (II.10), en la que  $T_{\max}$  es la temperatura máxima de ese día ( $^{\circ}\text{C}$ ) y  $T_{\min}(j)$  y  $T_{\min}(j+1)$  es la temperatura mínima de ese día y del siguiente.

$$D = T_{\max} - \frac{T_{\min}(j) + T_{\min}(j+1)}{2} \quad (\text{II.10})$$

También en este caso los autores proponen además un modelo que incluye tanto el factor D como R. En las conclusiones establecen que en Australia, la estimación de la irradiación solar diaria se puede hacer utilizando su modelo, si se dispone de datos de temperatura y precipitación, o el de Bristow-Campbell si únicamente se dispone de datos de temperatura, con los coeficientes ajustados para zonas climáticas similares, sin tener en cuenta la distancia.

En (Benghanem and Joraid 2007) los autores tratan de establecer relaciones entre la irradiación solar global y la componente difusa con otros parámetros tales como: las horas de sol o la temperatura, los datos son de una única localidad en Arabia Saudí. Finalmente establecen como predictor óptimo para la irradiación global, la fracción de horas de sol a través de una relación lineal con el índice de claridad, con dos juegos de coeficientes en la expresión, uno para invierno y otro para verano, aunque encuentran también correlación significativa entre la temperatura ambiente y la global para la primera mitad del día. En cuanto a la estimación de irradiación difusa proponen una relación lineal entre la fracción difusa, la fracción de horas de sol y el índice de claridad.

(Bandyopadhyay et al. 2008), comprueban varios métodos establecidos en la literatura para la estimación de la irradiación global a partir de la temperatura ambiente con los datos de 29 estaciones distribuidas en la India. De la diversidad de resultados obtenidos en las distintas estaciones con cada método, concluyen que la ecuación de Hargreaves es la mejor opción para la India.

*Estudios en España*

En Galicia, (Paz González and Díaz-Fierros Viqueira 1981) elaboraron el primer mapa de radiación solar de la Comunidad con datos de 33 estaciones meteorológicas, de las que sólo 4 disponían de medidas de radiación, para el resto se hicieron estimaciones a partir de las horas de insolación, evaporación en tanque y nubosidad.

En (De Miguel and Bilbao 2005) se propone la generación de un "Año típico de Referencia" de radiación solar global a partir de variables climáticas obtenidas en estaciones meteorológicas automáticas de Valladolid y Madrid. Las variables utilizadas son: temperatura máxima, mínima y media diaria, humedad relativa mínima, máxima y media diaria y velocidad media del viento. El método propuesto consiste en obtener en primer lugar un "Año típico aproximado" a partir de las variables climáticas comentadas, estimar la irradiación solar global media mensual y obtener a partir de ésta los valores diarios y horarios que podrían, finalmente incorporarse al "Año típico de referencia".

Para estimar la irradiación solar global diaria media mensual se propone el modelo de Erbs, que la estima a partir de los valores horarios de temperatura. En él se relaciona la temperatura media mensual ( $T_m$ ) con la temperatura horaria media mensual ( $T_{hm}$ ) y el índice de claridad diario medio mensual ( $k_m$ ) mediante las siguientes expresiones:

$$T_{hm} - T_m = A_m [0,4632 \cos(t - 3,805) + 0,0984 \cos(2t - 0,360) + 0,0168 \cos(3t - 0,822) + 0,0138 \cos(4t - 3,1513)] \quad (\text{II.11})$$

$$t = \frac{\pi}{12} (h - 1) \quad (\text{II.12})$$

$$A_m = 25,8k_m - 5,21 \quad (\text{II.13})$$

Finalmente a partir de  $k_m$  se puede obtener la irradiación solar diaria media mensual conociendo el valor de la extraterrestre media mensual,  $G = k_m G_o$ .

El método recomendado para obtener los valores diarios de irradiación solar a partir de los medios mensuales es el de Festa y Ratto, y para obtener finalmente los valores horarios se recomienda la utilización del modelo TAG de Aguiar. Los autores recomiendan la utilización de series de al menos 25 años.

El objetivo del trabajo de (Gago et al. 2010) es derivar la irradiación global, tomando como único parámetro de entrada la temperatura ambiente, los autores remarcan la

sencillez de su modelo y la ventaja de utilizar una variable que cuenta con una amplia red de medida y los registros históricos más largos de entre las climáticas. Se toman los datos de un total de 60 localidades de todo el mundo, que se encuentran agrupadas en tres conjuntos según su latitud: 0-20° N, 20-40°N y 40-60°N, entre ellas se encuentran Madrid, Barcelona, Sevilla, Alicante y San Sebastián. Para cada grupo, se obtienen dos modelos que proporcionan la irradiación global media diaria en función de la temperatura ambiente media, uno de los modelos se aplica entre Enero y Julio, y el otro para el intervalo entre Agosto y Diciembre. En todos los casos son funciones polinómicas de segundo orden, con valores del coeficiente de determinación elevados ( $>0,78$ ) para latitudes por encima de 20°N, en particular, en las ciudades españolas se obtienen valores de  $R^2$  por encima de 0,96.

### **II.3. Modelos para obtener las componentes de la irradiación global.**

Las tecnologías desarrolladas para convertir la energía solar en energía utilizable por el hombre, dependen de la disponibilidad de radiación solar, que varía sustancialmente en diferentes climas y regiones. Para definir y diseñar la tecnología más adecuada para una zona en particular, es necesario caracterizar los diferentes aspectos de la radiación solar en la zona.

A día de hoy existen numerosas publicaciones enfocadas a la evaluación de diferentes modelos para estimar la radiación en plano inclinado, en la mayoría se evalúa el rendimiento de cada modelo en condiciones ideales, es decir, cuando se dispone de medidas de calidad en la localidad en cuestión, tanto de global como de difusa en plano horizontal, sin embargo es preciso tener en cuenta los inconvenientes que habitualmente se afrontan en las aplicaciones de ingeniería relacionadas con los sistemas de aprovechamiento solar tales como: la no disponibilidad de medidas de radiación y albedo en el emplazamiento, o la baja calidad de las mismas. La mayor parte de la incertidumbre en la predicción de la radiación en superficies inclinadas es debida a la separación de las dos componentes (difusa y directa) a través de modelos empíricos.

La radiación global incidente sobre una superficie inclinada un ángulo  $\beta$  sobre el plano horizontal y orientada un ángulo  $\alpha$  respecto al sur, se puede calcular según la siguiente expresión:

$$G(\alpha, \beta) = B(\alpha, \beta) + D(\alpha, \beta) + R(\alpha, \beta) \quad (\text{II.14})$$

Cada una de las componentes directa  $B(\alpha, \beta)$ , difusa  $D(\alpha, \beta)$  y reflejada  $R(\alpha, \beta)$ , se pueden a su vez estimar mediante las siguientes expresiones (Alonso Abella, 2005, p. 68):

$$B(\alpha, \beta) = B(0) \frac{\cos \theta_s}{\cos \theta_{zs}} \quad (\text{II.15})$$

$$D(\alpha, \beta) = D(0)F \quad (\text{II.16})$$

$$R(\alpha, \beta) = G(0)\rho \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (\text{II.17})$$

Siendo:

$$\cos \theta_{zs} = \text{sen } \delta \text{sen } \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad (\text{II.18})$$

$$\begin{aligned} \cos \theta_s = & \text{sen } \delta \text{sen } \phi \cos \beta - \text{sen } \delta \cos \phi \text{sen } \beta \cos \alpha + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \\ & \cos \delta \text{sen } \phi \text{sen } \beta \cos \alpha \cos \omega + \cos \delta \text{sen } \alpha \text{sen } \omega \text{sen } \beta \end{aligned} \quad (\text{II.19})$$

En las ecuaciones anteriores,  $B(0)$ ,  $D(0)$  y  $G(0)$  son, respectivamente, la irradiación directa, difusa y global recibidas en plano horizontal,  $\delta$  es la declinación,  $\phi$  es la latitud,  $\omega$  es el ángulo horario,  $\theta_s$  es el ángulo de incidencia solar y  $\theta_{zs}$  el ángulo cenital solar, y se supone que el proceso de reflexión en el suelo es isotrópico.

De las expresiones anteriores se deduce que la irradiancia directa en plano inclinado se calcula a través de consideraciones geométricas a partir de la irradiancia directa sobre superficie horizontal o a partir de la irradiancia directa recibida en un plano normal a los rayos del sol ( $B_{normal}$ ), si se dispone de esta medida, dado que:

$$B(\alpha, \beta) = B_{normal} \cos \theta_s \quad (\text{II.20})$$

O bien a partir de la diferencia entre global y difusa en plano horizontal mediante:

$$B(\alpha, \beta) = (G(0) - D(0)) \frac{\cos \theta_s}{\cos \theta_{zs}} \quad (\text{II.21})$$

La irradiancia reflejada es función de la irradiancia global recibida en plano horizontal, a través de un coeficiente de albedo,  $\rho$ , y del campo de visión de la superficie. El valor de  $\rho$  depende del tipo de superficie reflectora situada en el campo de visión, si se

desconoce su valor se puede tomar  $\rho=0,2$  con poco incremento del error (Alonso Abella, 2005, p. 69).

La irradiancia difusa es función de la difusa recibida en plano horizontal, para obtener el factor de proporcionalidad,  $F$ , se pueden utilizar numerosos modelos referenciados en la literatura, desde el isotrópico más simple, hasta los más elaborados, que ofrecen menos error, como el modelo de Hay y el de Pérez puntual, cuyas expresiones se detallan a continuación.

El modelo isotrópico supone que toda la bóveda celeste irradia por igual, de modo que la irradiación difusa está uniformemente distribuida y es:

$$D(\alpha, \beta) = D(0) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \quad (\text{II.22})$$

Los modelos de Hay y de Pérez son direccionales o anisotrópicos, consideran en el cielo diferentes zonas: una parte emitiendo isotrópicamente y otra parte circunsolar emitiendo direccionalmente.

En el modelo de Hay se considera que la radiación difusa tiene dos componentes la isotrópica,  $D_i(\alpha, \beta)$  y la circunsolar  $D_c(\alpha, \beta)$ :

$$D(\alpha, \beta) = \underbrace{D(0)A \frac{\cos \theta_s}{\cos \theta_{zs}}}_{D_c(\alpha, \beta)} + \underbrace{D(0) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) (1 - A)}_{D_i(\alpha, \beta)} \quad (\text{II.23})$$

El índice de anisotropía  $A$ , representa la transmitancia a través de la atmósfera de la radiación directa y se obtiene como cociente entre la irradiancia directa en plano horizontal y la irradiancia extraterrestre en plano horizontal.

El modelo de Pérez puntual considera además una tercera componente proveniente de una banda en el horizonte,  $D_{hr}(\alpha, \beta)$ , la expresión para la componente difusa en este caso es:

$$D(\alpha, \beta) = \underbrace{D(0)(1 - F_1) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right)}_{D_i(\alpha, \beta)} + \underbrace{D(0)F_1 \frac{\cos \theta_s}{\cos \theta_{zs}}}_{D_c(\alpha, \beta)} + \underbrace{D(0)F_2 \text{sen} \beta}_{D_{hr}(\alpha, \beta)} \quad (\text{II.24})$$

Los coeficientes  $F_1$ ,  $F_2$  y  $F_3$  se obtienen a partir de expresiones empíricas y dependen de la irradiancia difusa y directa en plano horizontal, del ángulo cenital solar y de la masa óptica relativa.

En resumen, la obtención de la irradiancia total en plano inclinado precisa conocer la irradiancia global y la difusa en plano horizontal, dado que la componente reflejada se obtiene directamente de la primera, y la directa en plano horizontal se puede obtener como diferencia entre global y difusa. Sin embargo, en la mayoría de las estaciones meteorológicas únicamente se registra la radiación global sobre superficie horizontal, en concreto, en Galicia en el momento de iniciar este trabajo, la medida de las componentes directa y difusa está muy limitada geográficamente, únicamente se cuenta con medidas de directa en cuatro localidades (una en cada provincia) y la medida de difusa se limita a dos estaciones. A continuación se exponen algunos trabajos de investigación, cuyo objetivo es estimar la radiación difusa y la directa, en plano horizontal, a partir de la radiación global horizontal.

### II.3.1. Estimación de la irradiación difusa

(Liu and Jordan 1960) fueron los pioneros en la búsqueda de relaciones entre la radiación difusa y radiación global. En concreto obtuvieron una correlación entre la fracción difusa  $F_d$ , cociente entre la radiación difusa sobre plano horizontal  $D(0)$  y la irradiación global sobre plano horizontal  $G(0)$ ,  $F_d = D(0)/G(0)$ , y el índice de claridad  $K_t$ , cociente entre la irradiación global sobre plano horizontal y la irradiación extraterrestre sobre plano horizontal,  $K_t = G(0) / G_0(0)$ .

La expresión, que se aplica a valores diarios medios mensuales, es:

$$F_d = a - bk_t \quad (\text{II.25})$$

Page estableció el valor de los coeficientes  $a$  y  $b$  para climas templados ( $a=1,00$ ,  $b=1,13$ ) y Hawas y Muneer para climas tropicales y desérticos ( $a=1,35$ ,  $b=1,61$ ).

Otros trabajos posteriores,(Orgill and Hollands 1977), (Collares-Pereira and Rabl 1979), (Erbs, Klein, and Duffie 1982), han estudiado el mismo tipo de correlaciones para valores diarios, horarios o para medias mensuales, una parte significativa de los mismos son modelos locales, es decir, contruidos a partir de los datos de una única localidad, otros se construyen con datos de zonas geográficas más amplias, en

general, se trata de ajustes polinómicos que permiten obtener la fracción difusa una vez conocido el valor del índice de claridad,  $k_t$ .

En (Jacovides et al. 2006) se desarrolla un modelo para estimar la fracción difusa horaria a partir del índice de claridad horario con los datos de una localidad de Chipre, el método aplicado consiste en representar la fracción difusa frente a  $k_t$  utilizando una media móvil de los valores de fracción difusa, desplazándose sobre  $k_t$  con una ventana de tamaño 25, finalmente se ajusta un polinomio de orden 3 a los promedios obtenidos. El artículo recoge además un estudio comparativo con otros 10 modelos polinómicos similares.

En (Munawwar and Muneer 2007) se propone la utilización de las horas de insolación y la nubosidad además del índice de claridad para mejorar la estimación de la irradiación difusa, los datos proceden de varias localidades en: Japón, India y Reino Unido, además de Madrid y Gerona. Los resultados indican que los modelos que incluyen además de  $k_t$  alguna de las otras dos variables, obtienen mejores resultados sobre el conjunto de datos de ajuste, sin embargo la mejora respecto al conjunto de datos de validación (datos de otro período temporal o de otra localidad del estudio) es en muchos casos inapreciable. En todo caso los autores señalan la fracción de horas de sol como el parámetro de más influencia para incorporar al modelo siempre que se disponga de ese dato para la localidad de estudio.

Recientemente, Boland y Ridley (Badescu, 2008, p. 193-218) obtienen un modelo exponencial, que correlaciona  $F_d$  y  $k_t$  a nivel horario, cuya expresión es:

$$F_d = \frac{1}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 k_t}} \quad (\text{II.26})$$

Los parámetros  $\beta_0$  y  $\beta_1$  fueron ajustados para varias localidades que disponían de datos horarios de difusa, situadas en Asia, África, Australia y Europa, en concreto en ésta última ofrecen sus valores para Lisboa, Bracknell (Inglaterra) y Uccle (Bélgica). Dada la amplitud geográfica en la que se ha ajustado el modelo, y la bondad de los resultados en comparación con otros modelos que utilizan hasta un total de 28 variables predictoras (Reindl, Beckman, and Duffie 1990), se ha comprobado la validez del mismo con los datos de A Coruña.

*Estudios en España*

En España se hicieron algunos trabajos en este campo, (Frutos 1987) hace un estudio que tiene como objetivo estimar la irradiación difusa horizontal, a partir de la global horizontal y de la altitud solar. Se obtienen las correlaciones horarias y diarias entre la fracción difusa y  $K_t$ , para tres localidades: Sevilla, Madrid y Valencia, y se hace una discusión acerca de algunos de los modelos previamente comentados y su adecuación a los datos de estas localidades.

En (Gopinathan and Soler 1996), se usan los datos de 17 ciudades europeas, entre ellas, Madrid, Oviedo y Palma de Mallorca, para estimar los valores diarios medios mensuales de la irradiación difusa, los modelos incluyen como parámetros una combinación de: índice de claridad, fracción de horas de sol y declinación solar. Una vez ajustados, los modelos se validan en otras localidades entre las que se encuentran: Málaga, Cáceres y Murcia, finalmente los autores proponen la expresión (II.27) para la obtención de difusa en toda la Comunidad europea.

$$\frac{D(0)}{G(0)} = 0.9843 - 0.7233 \frac{G(0)}{G_0(0)} - 0.3610 \frac{S}{S_0} + 0.000748\delta \quad (\text{II.27})$$

Donde  $D$ ,  $G$  y  $G_0$  son los valores diarios medios mensuales de irradiación difusa, global, y extraterrestre respectivamente,  $(S/S_0)$  la fracción de horas de sol y  $\delta$  la declinación media mensual.

En (De Miguel et al. 2001) se evalúan diferentes modelos de radiación solar difusa para un conjunto de datos recogidos en el marco del Proyecto JOULE III sobre "Climatic Synthetic Time Series for the Mediterranean Belt" (CLIMED), en concreto, utilizan datos de 2 estaciones españolas: cuatro años de datos de radiación directa y difusa de Madrid y tres años de Sevilla. Clasifican los modelos en tres grandes grupos:

1. Modelos basados en correlaciones entre la irradiación difusa diaria y la global diaria
2. Modelos basados en correlaciones entre la irradiación difusa horaria y la global horaria
3. Modelos que obtienen la irradiación difusa horaria a partir de la difusa diaria.

De los modelos evaluados dentro del primer grupo, el que mejor resultados ofrece para la zona climática Norte del Mediterráneo es el, ya nombrado, de Frutos. En el segundo grupo el modelo de Holland's y Crah's es el de menor error, considera la atmósfera dividida en dos capas y supone que la dispersión de la radiación se produce entre esas dos capas y el suelo, incluye como parámetros el albedo del suelo, el índice de claridad horario y dos coeficientes que representan la transmitancia de la capa superior de la atmósfera y el albedo de la inferior, cuyos valores fueron estimados empíricamente con datos de Canadá.

Del último grupo el de Liu-Jordan es el recomendado, que permite obtener la difusa horaria multiplicando la diaria por el cociente entre la extraterrestre horaria y la diaria. Además los autores desarrollaron dos nuevos modelos para calcular la irradiación difusa horaria y la diaria a partir de  $k_t$ , y ponen de manifiesto la influencia de la elevación solar en el comportamiento de los mismos.

(Ayuso Ramos 2004) tiene como objetivo disponer de un modelo específico de radiación solar difusa sobre superficies inclinadas y orientadas, evaluarlo y aplicarlo para determinar los factores de ganancia de calor solar en los mapas de radiación solar de Castilla y León. El trabajo se lleva a cabo a partir de tres años de registros medidos en una estación radiométrica de la Universidad de Valladolid.

En Vigo, (Santos Navarro and Al. 2004) usan dos años de datos de la estación del Campus de Vigo para estudiar las correlaciones minutarias, horarias y diarias de la radiación solar difusa y la radiación global en esa localidad.

En (Bilbao et al. 2003), los autores trazan mapas de isóneas para la comunidad de Castilla-León de irradiación global media anual recibida en superficies con distintas inclinaciones, el objetivo es conocer el ángulo de inclinación óptimo de las superficies orientadas al Sur, y estimar la irradiación recibida por las superficies verticales con distintas orientaciones para evaluar su contribución al comportamiento térmico de los edificios. Previamente evalúan 5 modelos para estimar la irradiación difusa horaria en plano inclinado: el modelo isotrópico simple, en el que la componente difusa en plano inclinado se obtiene a partir de la difusa en plano horizontal y el ángulo de inclinación de la superficie, el modelo de Temps-Coulson que añade al modelo isotrópico dos correcciones para contemplar la zona circunsolar y la zona próxima al horizonte, añadiendo a la expresión otros dos factores: el ángulo cenital solar y el ángulo de orientación de la superficie, el modelo de Klucher's que es una modificación del anterior, y el modelo de Pérez simplificado con la consideración de suponer que no hay

contribución de la banda del horizonte y considerar la zona circunsolar con dos posibles anchos:  $0^\circ$  y  $25^\circ$ , este modelo precisa como parámetros: el conocimiento de la difusa y la irradiación directa en plano horizontal, además de la masa óptica de aire.

Los autores recomiendan la utilización del modelo de Pérez con ancho  $25^\circ$  para la zona circunsolar, y concluyen que el ángulo de inclinación que permite captar el máximo de irradiación solar en superficies orientadas al sur es de  $30^\circ$ , y las superficies verticales con orientación sur son las que reciben mayor irradiación.

### **II.3.2. Estimación de la irradiación directa**

En la literatura hay gran cantidad de referencias que tratan diferentes modelos para la estimación de la componente difusa, sin embargo se encuentran pocas publicaciones respecto a la estimación de la irradiación directa, esto se debe sobre todo a que en la mayor parte de los casos, ésta se calcula, en plano horizontal, como diferencia entre la irradiación global y la difusa. Si bien, el desarrollo de sistemas de concentración de luz para los captadores fotovoltaicos y térmicos, cuyo objetivo es la reducción de costes por medio de la reducción de la superficie de los paneles, ha centrado el interés en el cálculo preciso de la irradiación directa en plano inclinado, pues es esta componente la única que aprovechan los concentradores (El-Sebaï et al. 2010).

En ausencia de datos de irradiación directa, esta componente se puede estimar utilizando modelos físicos o modelos de descomposición, los primeros requieren información detallada de las condiciones atmosféricas, suelen incluir predictores como la cantidad y distribución de las nubes, turbidez atmosférica, horas de sol, humedad relativa, contenido de agua precipitable etc. (López, 2005).

Los modelos de descomposición, que obtienen la componente directa a partir de las medidas de radiación global, están basados en regresiones entre dos índices adimensionales: el índice de claridad,  $k_t$ , y la transmitancia directa,  $k_b$ , cociente entre la irradiancia directa y la irradiancia extraterrestre. Sin embargo, la gran dispersión de valores de  $k_b$  frente a valores intermedios de  $k_t$ , debida principalmente a los efectos de las nubes, han llevado a la incorporación de parámetros atmosféricos adicionales que mejoren las correlaciones, persiguiendo este objetivo en (López, 2005) se estudian los parámetros más significativos para estimar la irradiación directa mediante redes neuronales artificiales, concluyendo que los principales son el índice de claridad y la masa óptica de aire.

En (Solanki and Sangani 2008) se propone un método (*método del ángulo de elevación constante*) para calcular la irradiación directa diaria media mensual en plano normal, aplicable a cualquier localidad del mundo, cuyos datos de entrada son la irradiación global y difusa en valor diario medio mensual. Aunque el cálculo de la componente directa en plano normal, se puede realizar a partir de la expresión (II.18), siempre que se disponga de los valores horarios o diarios de la irradiación global y difusa, en pocos lugares se dispone de esos datos, especialmente de difusa, este método es de aplicación para aquellos casos en los que se disponga únicamente del valor medio diario mensual de radiación global y difusa.

El procedimiento propuesto consiste en calcular un ángulo de elevación constante ( $\varepsilon$ ), que depende del ángulo de elevación del sol ( $Y_s$ ) y de las horas de sol ( $S$ ), para cada mes. Para ello se toma un día representativo en cada mes, en el que se calcula la duración del día ( $S$ ), a continuación se obtiene el ángulo de elevación constante para ese día, y el valor resultante se toma como el valor medio mensual para cada mes.

Finalmente se obtiene la irradiación directa media diaria mensual para cada mes como:

$$B_{normal} = \frac{G(0) - D(0)}{\varepsilon} \quad (II.28)$$

Donde  $G(0)$  y  $D(0)$  son la irradiancia global y difusa en plano horizontal, medias diarias mensuales. Este procedimiento desarrollado con datos de India, se validó en 12 localidades de todo el mundo, con resultados satisfactorios.

En (Gueymard 2009) se trata de evaluar los errores de la estimación de la irradiancia en plano inclinado. Se analizan los resultados de 10 modelos establecidos para la obtención de la irradiación difusa, y 4 adicionales que permiten separar las componentes difusa y directa. Los cálculos se aplican a superficies verticales orientadas al Sur, a superficies inclinadas un ángulo fijo y a superficies montadas sobre un seguidor en dos ejes. Todos los datos son de Golden (Oregón). Respecto a los modelos de separación de directa y difusa, se comprueban el de Erbs, Orgill, Maxwell y Reindl, todos excepto el de Maxwell, permiten estimar la radiación difusa a partir del índice de claridad (son modelos de correlaciones  $F_d-k_t$ , el modelo de Reindl incluye además el ángulo de elevación solar) y posteriormente se obtendría la componente directa, el de Maxwell es un modelo cuasi-físico que combina en sus ecuaciones la masa de aire y  $k_t$  para obtener la irradiación directa. Se pone de manifiesto que los cuatro se comportan de forma diferente con errores de desviación y aleatorios notables en la mayoría de los

casos, además los modelos multivariable (Maxwell y Reindl) no ofrecen mejores resultados que los más simples (Erbs y Orgill).

Se concluye que cuando solamente se dispone de medidas de irradiación global, la precisión de las predicciones en plano inclinado se degrada significativamente, y están condicionadas por el rendimiento local del método de separación directa/difusa. En las superficies verticales las imprecisiones en los cálculos de la reflexión del suelo se convierten en otro factor clave e incrementan significativamente el error. En los seguidores en dos ejes, los modelos que mejor resultan son el de Hay, Reindl y Skartveit.

En (Ahmad Jamil and Tiwari 2011) se realiza una revisión de los modelos publicados para estimar la irradiación global diaria y horaria, así como las componentes directa y difusa, en plano horizontal.

Se recogen un total de 9 modelos físicos que permiten obtener la irradiación global horaria o alguna de sus componentes a través de otros parámetros atmosféricos. Entre los modelos físicos citados se recoge el utilizado por el algoritmo propuesto por la ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), uno de los más simples, en el que la irradiación directa horaria en plano normal se estima según la ecuación (II.29):

$$B_{normal} = A \exp[-B / \cos \theta_{zs}] \quad (II.29)$$

Donde  $\theta_{zs}$  es el ángulo cenital solar, calculado según la ecuación (II.18), y A y B son constantes empíricas tabuladas para cada mes del año. En el mismo artículo se citan otros autores que, posteriormente revisaron los valores de esas constantes para diferentes zonas geográficas, o bien proponen nuevos modelos como el de Pérez et al. que además del ángulo cenital solar, introduce el factor de turbidez de Linke ( $T_R$ ), para el cálculo de la irradiación directa en plano normal en función de la extraterrestre en plano normal ( $G_{0normal}$ ), según la expresión siguiente:

$$B_{normal} = G_{0normal} \exp[-T_R / (0,9 + 9,4 \cos \theta_{zs})] \quad (II.30)$$

En lo que se refiere a los modelos de descomposición, se citan un total de 14, entre los que se encuentran, Erbs, Orgill, Reindl, Muneer o Boland, la práctica totalidad de los mismos estiman la componente difusa a partir de la radiación global, en estos modelos

la irradiación directa en plano normal se obtendría, una vez estimada la difusa, mediante la relación:

$$B_{normal} = G(0)(1 - F_d) / \cos \theta_{zs} \quad (II.31)$$

De todos ellos el modelo de Liu-Jordan permite obtener la componente directa utilizando las relaciones entre el índice de claridad, la transmisividad directa,  $k_b$  y la difusa,  $k_d$ , para días claros, expresadas como sigue:

$$k_d = 0,2710 - 0,2939k_b \quad (II.32)$$

$$k_t = k_b + k_d \quad (II.33)$$

$$k_d = 0,384 - 0,416k_t \quad (II.34)$$

Además se referencian 7 modelos que permiten estimar la irradiación global horaria media a partir de la diaria media. Y por último se recogen un total de 50 modelos que correlacionan la irradiación global diaria con otras variables: horas de sol, temperatura, precipitación etc.

### *Estudios en España*

En (Batlles et al. 2000) se seleccionan diversos modelos de la literatura para estimar la componente directa de la irradiación solar. Los datos son de 6 ciudades españolas (entre ellas Oviedo), y se utilizan a escala horaria. Se recoge el modelo de Skartveit and Olseth, que obtiene la irradiación directa en función de la global, el ángulo de elevación solar ( $\gamma_s$ ) y un parámetro ( $\Phi$ ) que depende del índice de claridad y la elevación solar a través de varias relaciones empíricas que habrían de ajustarse en cada zona geográfica:

$$B_{normal} = G(0)(1 - \Phi) / \text{sen} \gamma_s \quad (II.35)$$

El modelo de Maxwell, y el modelo de Louche que propone la relación polinómica de orden 5 entre el índice de transmisividad directa y  $k_t$  mostrada a continuación:

$$k_b = -10,627k_t^5 + 15,307k_t^4 - 5,205k_t^3 + 0,994k_t^2 - 0,059k_t + 0,002 \quad (II.36)$$

Se incluye también en el estudio, para contrastar, un modelo paramétrico propuesto por Iqbal que relaciona el cociente directa-extraterrestre con el producto de 5 factores de transmisividad: del ozono, gas, agua, Rayleigh, y dispersión de aerosoles, que es preciso obtener conociendo, entre otros, el factor de turbidez de Linke.

Se indica que los mejores resultados de estimación se obtienen para cielos despejados y ángulos de elevación solar grandes, y se recomienda el modelo de Louche para estimar la irradiación directa.

En (López, Rubio, and J Batlles 2000), trabajo complementario al anterior, se desarrollan 3 modelos propios para estimar la irradiación directa horaria, basados en correlaciones entre la transmitancia directa ( $k_b$ ) y el índice de claridad ( $k_t$ ). Se comparan los errores con los obtenidos por otros tres modelos de la literatura, Louche, Maxwell y Rerhrhaye, éste último es un modelo estacional. El mejor modelo es el que incluye el coseno del ángulo cenital en la correlación, cuya expresión es:

$$\begin{aligned} k_b &= k_t^2 (0.928 - 0.909 \cos \theta_{zs}) & k_t &\leq 0.325 \\ k_b &= 0.069 - 0.475k_t + 1.733k_t^2 - 0.096 \cos \theta_{zs} & k_t &\geq 0.325 \end{aligned} \quad (\text{II.37})$$

Además se pone de manifiesto que el modelado estacional no añade mejoras a la estimación de la irradiación directa.

#### **II.4. Análisis de series temporales de irradiación.**

La metodología ARIMA pretende extraer las regularidades que se observan en el comportamiento pasado de la variable, y bajo el supuesto de que, las condiciones estructurales que conforman la serie permanecen constantes, predecir su comportamiento en el futuro, se usa ampliamente para el análisis de series económicas, en hidrología, medicina y meteorología, aunque el campo en el que la metodología ARIMA alcanza su mayor protagonismo a efectos de predicción lo constituye la predicción a corto plazo y en series con componente estacional (Daza Sánchez 2008).

Una serie temporal es un conjunto de valores observados a lo largo del tiempo a intervalos regulares y ordenados cronológicamente. El análisis univariante de series temporales comprende un conjunto de métodos estadísticos, cuyo propósito es

analizar los datos observados en el pasado, para inferir propiedades estadísticas que permiten predecir el comportamiento futuro de la variable (Peña, 2010, p. 21-28).

La teoría de los procesos estocásticos, en particular de los procesos ARIMA, proporciona una metodología general para el análisis univariante de series que presentan una manifiesta dependencia entre sus valores presentes y pasados.

El nombre genérico ARIMA deriva de sus tres componentes: Autorregresivo (AR), Integrado (I) de Medias Móviles (MA). El modelo ARIMA presenta una ecuación explícita que permite describir una observación de la serie como una función lineal de datos anteriores y errores debidos al azar, puede incluir además un componente cíclico o estacional. En el Anexo A se describen cada una de las componentes que pueden formar parte del modelo así como la notación habitualmente empleada para describirlas, de la que se hará uso en este apartado.

De la aplicación de esta metodología al campo concreto de la radiación solar, encontramos referencias desde finales de los 70, en (Goh and Tan 1977) se utilizan modelos ARMA para predecir valores medios mensuales de irradiancia solar en Singapur, los autores indican que el modelo más apropiado es un autorregresivo de orden 1. (Brinkworth 1977) constata que los valores diarios de irradiación solar en el Reino Unido pueden ser adecuadamente representados por modelos autorregresivos de primer orden. (Brook and Finney 1987) ajustan un modelo periódico autorregresivo bivariable a la temperatura de bulbo seco y a la radiación solar que les permite generar valores mensuales. En (Graham, Hollands, and Unny 1988) se generan valores diarios de irradiación solar a partir de un modelo de series temporales que utiliza los valores mensuales del índice de claridad.

Ya en la década de los 90, (Callegari, Festa, and Ratto 1992) usan modelos estocásticos para modelar radiación directa diaria sobre superficie horizontal con 9 años de datos de Génova, utilizan un modelo de cadenas de Markov y un autorregresivo de primer orden, concluyendo que el último proporciona mejores ajustes. En (Loutfi and Khtira 1992) se obtiene un modelo autorregresivo de orden 1 o 2 que, a partir de los valores medios mensuales del índice de claridad, permite generar valores diarios de irradiación global diaria en Rabat.

(Aguiar and Collares-Pereira 1992) proponen un modelo (al que denominan TAG) que genera secuencias diarias sintéticas de radiación horaria en plano horizontal para cualquier localidad, la única entrada del modelo es el índice de claridad diario. El

modelo supone que para cada valor diario de  $k_t$  y cada hora solar, la densidad de probabilidad del índice de claridad horario es una función Gaussiana truncada. Se ajusta un modelo autorregresivo, sin diferencias regulares, ARMA(1,0) para la serie de  $k_t$  horaria que permite recuperar los valores horarios de radiación solar.

En (Festa, S Jain, and Ratto 1992) se realiza un análisis estadístico de la radiación solar global diaria en Génova con datos de 9 años. Se calcula para cada día la fluctuación respecto a la media y se normaliza por la desviación estándar. Finalmente se ajusta un modelo autorregresivo de orden 1 a la serie transformada.

En (Zeroual and Ankrim 1995) la serie corresponde a tres años de datos de radiación solar global diaria medida en Marraquech, y se pretende la predicción de valores diarios, se utilizan dos aproximaciones para eliminar la tendencia y la componente estacional. La primera aproximación usa el análisis de Fourier para eliminar la periodicidad anual y la segunda consiste en ajustar un modelo autorregresivo al índice de claridad diario, previa transformación para asegurar su estacionariedad. En el primer caso, se utilizan 7 armónicos para modelar la componente periódica, y se ajustan 3 modelos autorregresivos de diferente orden para ajustar la parte estocástica (para los períodos Enero-Abril, Mayo-Agosto y Septiembre-Diciembre). En la segunda aproximación se ajusta un modelo autorregresivo de orden 1 al índice de claridad diario. Según los autores, las dos aproximaciones permiten estimar adecuadamente, y con resultado similar, los datos diarios de irradiación solar.

(Kamal and Jafri 1999), ajustan un modelo autorregresivo de orden 1 a una serie de 10 años de valores horarios medios de radiación solar global en Pakistan.

En (Craggs 2000) el objetivo es modelar las variaciones a corto plazo de la irradiación, para predecir el comportamiento de los paneles fotovoltaicos en zonas con variaciones rápidas de las condiciones climatológicas, como el Reino Unido. Teniendo en cuenta que habitualmente se dispone de valores de irradiación horarios, diarios o mensuales, los autores proponen investigar la conveniencia de promediar los datos diezminutales a intervalos de 20, 30 ó 60 minutos para ser capaz de predecir los cambios que se producen en la salida del panel casi instantáneamente ante una caída de la irradiancia en un intervalo de nubes. Ajustan modelos ARIMA estacionales a valores diezminutales y horarios de irradiación global recogida sobre plano horizontal y vertical, los datos se recogen en dos períodos de 13 y 15 días de tres años, los modelos son autorregresivos con una componente estacional que refleja la ciclicidad diaria de las series.

En las conclusiones se pone de manifiesto que las medidas diezminutales son las que captan mejor las variaciones a corto plazo en la tendencia y en particular los grandes cambios a corto plazo en la producción de los paneles. Los altos valores de los coeficientes de correlación para el retardo 1, ponen de manifiesto la fuerte dependencia existente entre cada medida de irradiación y la medida diez minutos antes, se destaca el buen ajuste de los modelos ARIMA para representar estas series.

(P Jain 2003) ajustan modelos ARIMA estacionales a las series de irradiación solar media mensual en Sebele (Bostwana), en los que incluyen las horas de insolación y las series de temperaturas máximas y mínimas.

En (Santos, Pinazo, and Cañada 2003) el objetivo es generar una serie sintética de datos diarios de radiación solar a partir de los valores mensuales, utilizan la serie del índice de claridad que obtienen a partir de las medidas de radiación solar global tomadas durante 8 años en Valencia y 9 años en Madrid, siguiendo el procedimiento propuesto por Bendt, obtienen los valores diarios del índice de claridad para cada día del mes a partir los valores medios mensuales, pero desconocen la secuencia de días en que estos se suceden, finalmente el ajuste de un modelo ARIMA(1,1,1) para cada localidad permite obtener los índices de claridad diarios en función de su valor en los dos días anteriores y una componente aleatoria.

(Tiba and Fraidenraich 2004) utilizan las series diarias de radiación global y horas de sol, de varias estaciones situadas en Brasil, ajustan un modelo autorregresivo de orden uno a la series diarias medias mensuales del índice de claridad y a las horas de sol.

En (Yurekli et al. 2007) se aplica la metodología ARIMA para la predicción de la temperatura, humedad relativa y radiación solar diarias medias anuales en una localidad de Turquía. El modelo seleccionado para la temperatura es ARIMA(2,1,1), para la humedad relativa ARIMA(1,1,1) y para la radiación solar es ARIMA(0,1,2), los coeficientes de determinación obtenidos de la estimación de la temperatura y la radiación solar frente a las variables medidas supera el 0,9, lo que, según los autores, confirma la idoneidad del método ARIMA en estas aplicaciones.

En (Stanhill and Cohen 2008), los autores utilizan las horas de insolación, medidas en Japón entre 1890 y 2002, como estimación de la irradiación global y ajustan un modelo ARIMA de primer orden para describir la evolución de las mismas.

(Kärner 2009) en este caso el objetivo es modelar las variaciones a largo plazo en la radiación solar total medida en el exterior de la atmósfera (extraterrestre) y la temperatura media diaria, medida en superficie en 10 estaciones europeas y 4 de Asia, se ajustan sendos modelos ARIMA(0,1,1) a subseries tomadas en el intervalo temporal de 56 días, el autor interpreta este resultado indicando que la variabilidad de la temperatura ambiente es similar a la que presenta la radiación solar total, y viene determinada, al menos a largo plazo, por la variante actividad del sol.

En (Reikard 2009), se evalúan 5 modelos para predecir la irradiación global a corto plazo. Los datos proceden de varias localidades norteamericanas, la mayoría en escala horaria, pero algunos se registran en intervalos de 1 minuto, y para su tratamiento se promediaron en intervalos de 5 min, 15 min, 30 min y 60 min. Se dispone de medidas de irradiación global, y en algunas estaciones de humedad relativa, cobertura de nubes y coeficiente de turbulencia atmosférica. Los métodos de predicción utilizados son: un modelo autorregresivo en logaritmos, el método ARIMA, método de Función de Transferencia, modelo de Componentes No Observadas, redes neuronales y un modelo híbrido que combina ARIMA y redes neuronales. Se describen a continuación con detalle aquellos que están relacionados con el contenido de esta tesis.

El modelo autorregresivo se toma como punto de referencia, y se expresa como:

$$\text{Ln}G_t = \omega_{0t} + \omega_{1t}\text{Ln}G_{t-1} + \omega_{2t}\text{Ln}G_{t-24} + \varepsilon_t \quad (\text{II.38})$$

Donde  $G_t$  es la radiación solar global,  $\omega_{it}$  son coeficientes y  $\varepsilon_t$  son los residuos. Se toman logaritmos para reducir el error en los puntos de transición entre el amanecer y el ocaso, los valores cero se transforman en constantes positivas de pequeño valor para tomar logaritmos. La periodicidad diaria es capturada por el retardo 24.

El modelo ARIMA considerado es multiplicativo estacional, de período 24, y se expresa como:

$$(1 - B^s)^D (1 - B)^d \text{Ln}G_t = \left[ \frac{\theta_q(B)\Theta_Q(B^s)}{\Phi_P(B^s)\phi_p(B)} \right] \varepsilon_t \quad (\text{II.39})$$

Que se denota como: ARIMA(p,d,q)x(P,D,Q)<sub>s</sub>, en este caso, los autores seleccionaron un autorregresivo de orden 1, de la forma: ARIMA(1,0,0)x(1,1,0)<sub>24</sub>.

El método de la función de transferencia, es el método ARIMA al que se le añaden otras variables de entrada, que a priori, pueden ayudar a mejorar el modelo:

$$(1 - B^s)^D (1 - B)^d LnG_t = \left[ \frac{\theta_q(B)\Theta_Q(B^s)}{\Phi_p(B^s)\phi_p(B)} \right] \varepsilon_t + \left[ \frac{\delta_t(B)}{\gamma_t(B)} \right] \hat{W}_t \quad (II.40)$$

Donde las variables introducidas ( $\hat{W}_t$ ) dependen de los datos disponibles para cada localidad, en alguna fue la irradiación extraterrestre en plano horizontal, y en otras la humedad relativa, la cobertura nubosa ó el coeficiente de turbulencia.

Una vez ajustados los modelos, los resultados se ofrecen cuantificando los errores de predicción para distintos horizontes, con los datos horarios, se prueba la predicción a 1, 2, 3 y 4 horas. El error calculado es el error absoluto medio en porcentaje, que compara la predicción con los valores medidos. En todos los casos, el método que ofrece menor error es ARIMA, el error mínimo para la predicción a 1 h es de 19,6% y el máximo (para algún conjunto de datos) llega al 64,5%. Para los datos con mayor resolución temporal, 5, 15 y 30 minutos se hacen test de predicción con horizontes temporales que coinciden con esos intervalos.

En las conclusiones los autores ponen de manifiesto que atendiendo a la precisión de las predicciones y a la eficiencia, el método ARIMA sería el adecuado para predicciones con baja resolución temporal, donde la componente predominante es el ciclo diurno. Cuando se requiere trabajar con resoluciones temporales más altas (minutos), los modelos de función de transferencia y las redes neuronales son una buena alternativa.

Recientemente (Perdomo, Banguero, and Gordillo 2010) ajustan un modelo autorregresivo de orden 1 (ARIMA(1,0,0)) a la serie diaria promediada semanalmente de irradiación global medida en Bogotá durante 6 años , (Paoli et al. 2010) comparan varios métodos de predicción de series temporales, entre otros el método ARIMA y las redes neuronales, los autores ajustan un modelo ARIMA(8,0,0) para la predicción, con horizonte de 1 día, de la irradiación diaria global en una localidad de la isla de Córcega, en los resultados se pone de manifiesto la superioridad de los métodos mencionados respecto a todos los demás, con apenas pequeñas diferencias entre ambos.

### *Estudios en España*

De los trabajos realizados con datos de estaciones españolas, se puede citar a (L. Mora-López and Sidrach-de-Cardona 1997), en este artículo se tratan series mensuales

de datos horarios de irradiación solar recogidos en 10 estaciones meteorológicas españolas, las series encadenan las observaciones horarias entre días consecutivos, la última observación de cada día va seguida de la primera del día siguiente, y cada una corresponde a un mes concreto de un año determinado para cada localidad, pues los autores consideran que las características estadísticas principales (media y varianza) únicamente pueden ser consideradas estables dentro de ese marco temporal. Para lograr la estacionariedad de las mismas efectúan varias transformaciones sobre los datos originales, en primer lugar los dividen por un valor de irradiación horario máximo correspondiente a días claros, lo que elimina la tendencia estacional, además teniendo en cuenta que el valor registrado a primera y última hora del día siempre es muy bajo, deciden descartarlos y considerar para cada mes un número de horas de sol diarias ( $s$ ) diferente, pero constante en todas las localidades, y eliminan la tendencia diaria diferenciando la serie con un orden que coincide en cada mes con el número de horas de sol fijado para ese mes. Finalmente ajustan un modelo estacional multiplicativo, autorregresivo de orden uno en la parte regular, y media móvil también de primer orden en la estacional,  $AR(1,0) \times AR(0,1)_s$ , donde  $s$  es el número de horas de sol por día para cada mes, los autores concluyen que el modelo es universal, aunque los parámetros dependen del mes considerado y de la localidad.

En un artículo posterior (Li. Mora-López and Sidrach-de-Cardona 1998) los mismos autores proponen la obtención de los parámetros del modelo ARIMA multiplicativo anterior a partir del valor diario medio mensual de irradiación global.

El método ARIMA se utiliza también para modelar otras variables climáticas como el ozono, en (Gomez, Sahelices, and Garcia 1997) utilizan ARIMA para modelar las series de muestras de ozono y varios óxidos de nitrógeno recogidas en Burgos, los datos son promedios horarios, sin embargo la fuerte dependencia de estos contaminantes de las condiciones ambientales hace difícil que mantengan una estructura estocástica estable, por lo que manifiestan sería preciso utilizar análisis multivariante introduciendo muchos otros contaminantes y variables meteorológicas o realizar un análisis univariante a corto plazo de tal forma que el comportamiento de la serie fuese casi estacionario.

En (Bravo, Nava, and Gay 2001) se aplica ARIMA para predecir con 2 ó 3 horas de anticipación, el valor máximo de la concentración diaria de ozono. Los valores máximos de ozono superficial provienen de 10 estaciones de monitorización atmosférica en la ciudad de México y corresponden a un año de muestreo. El pronóstico para un día se ajusta con la información meteorológica y de radiación solar correspondiente a un período de al menos tres horas antes de la ocurrencia esperada del valor máximo.

## **CAPÍTULO III**

### **MATERIAL Y MÉTODOS.**



### **III.1. Introducción.**

En este capítulo se describen los equipos de medida de las series de irradiación muy brevemente, las series de datos climatológicos estudiadas, los controles de calidad aplicados a las mismas, los problemas detectados en las medidas de irradiación directa, y los métodos empleados en el análisis y modelado de dichas series, organizándolos de acuerdo a los apartados que se presentan en el capítulo de resultados.

### **III.2. Equipos de medida.**

Las series de datos de irradiación solar con las que se realizó este estudio fueron las de irradiación global, directa y difusa, para el período 1985 y 2009, proporcionadas por la Agencia Estatal de Meteorología, en adelante AEMET, organismo encargado del desarrollo, implantación y prestación de servicios meteorológicos de competencia del Estado español, para la localidad de A Coruña, catalogada como zona climática C1 en el CTE.

Los sensores de radiación solar instalados en la estación de A Coruña, son el modelo CMP 21 para global y difusa y el modelo CH1 para la medida de directa, todos ellos de la marca Kipp & Zonen, cada sensor ha sido calibrado bi-anualmente, tomando como referencia un piranómetro patrón, referenciado al WRR de Davos (Referencia Radiométrica mundial), en las instalaciones del Centro Radiométrico Nacional, sede central de la Agencia Estatal de Meteorología de Madrid. Las calibraciones tienen lugar en exterior y tomando como fuente el sol, mediante un procedimiento específico establecido al efecto.

Los piranómetros CMP 21 están basados en una termopila, reúnen las características de patrón secundario de la WMO y están especialmente indicados para su uso en redes de estaciones meteorológicas, su rango espectral abarca de 285 a 2800 nm, su rango de medida alcanza el máximo de 4000 W/m<sup>2</sup> y el error medio diario es menor del 2%. El pirheliómetro CH1 cumple las especificaciones ISO de pirheliómetro de primera clase, está diseñado para medir la irradiancia que resulta del flujo radiante que recibe a través de un ángulo sólido de 5°, si está enfocado hacia el disco solar mide la irradiancia directa perpendicular a la superficie del detector, su rango espectral abarca de 200 a 4000 nm, el máximo valor de irradiancia que admite es de 4000 W/m<sup>2</sup>, el porcentaje de desviación con la temperatura es menor del 1% y su sensibilidad no está afectada por la orientación.

Los sensores de global, difusa y directa, así como otro adicional de radiación infrarroja se hallan solidarios en un soporte común, sobre una plataforma giratoria que realiza el movimiento correspondiente al recorrido azimutal del Sol. A la misma estructura se encuentra fijado el pirheliómetro para la medida de radiación directa. Una estructura metálica con movimiento vertical sigue la declinación solar, e interpone dos esferas opacas entre el Sol y los piranómetros de difusa e infrarrojos (Figura III.1).

El conjunto se encuentra emplazado en la parte superior de la terraza del edificio de la Delegación Territorial en Galicia de AEMET cuyas coordenadas geográficas son  $43^{\circ} 22' 02''$  N y  $8^{\circ} 25' 10''$  O. Se sitúa en una zona elevada de la ciudad, con horizontes despejados, a una altitud de 58 metros.

Todo el equipo es atendido por personal especializado que se encarga de limpiar diariamente las cúpulas de los sensores y vigilar el correcto alineamiento del sistema de sombreado, en el que esporádicamente se producen desajustes al iniciar el día debido a algún fallo en el conjunto motor-correa que eleva las esferas de sombra.



Figura III.1. Fotografía de los sensores en la estación radiométrica de A Coruña

### **III.3. Conjunto de datos disponible.**

Todos los datos de radiación se registran con frecuencia horaria, se dispone de 25 años (1985-2009) de medidas de radiación global sobre plano horizontal, aproximadamente 11 años (1999 a 2009) de radiación difusa sobre plano horizontal y casi 14 años (1996-2009) de radiación directa medida en un plano orientado al sol, la unidad de medida son las decenas de  $\text{kJ/m}^2$ , están referidas a la hora solar verdadera y se registran entre las 4 y las 20 h (16 registros diarios).

A partir de Noviembre de 2010, la AEMET a través de un servidor FTP, puso a disposición del público series históricas de datos de todas sus estaciones, de modo que pudimos incorporar al estudio nuevas variables como la temperatura ambiente, la precipitación diaria, medidas a partir de finales de 1930, y las horas de sol medidas a partir de enero de 1951.

Revisados los ficheros de datos, se detecta la presencia de múltiples registros vacíos que corresponden a valores ausentes o rechazados por AEMET tras su filtrado, estos registros se señalan con la cadena "-5555".

En la Tabla III.1 se recoge el resumen de datos horarios perdidos por años de cada variable de radiación, en el Anexo B se incluye un resumen más detallado por meses.

Para la irradiación global el número de días completos equivale a algo más de 24 años, esta es la serie de irradiación más completa; se dispone de 6 años naturales con todos los registros, sin embargo destaca el elevado porcentaje de valores perdidos en 2003 y 2004.

Los registros de irradiación difusa se extienden desde el 7-06-1999 hasta 31-12-2009 (10 años y medio), el número de días completos equivale a algo más de 9 años. No hay ningún año natural completo.

El período registrado de irradiación directa abarca desde el 1-04-1996 hasta 31-12-2009 (13 años y medio), el número de días completos equivale a algo más de 9 años. No hay ningún año natural completo.

Tabla III.1. Porcentaje de registros horarios perdidos de irradiación global, difusa y directa.

Año	Global	Difusa	Directa	Año	Global	Difusa	Directa
1985	3,6%			1998	0%		34%
1986	2,8%			1999	1%	22,6%	40,1%
1987	0%			2000	0%	17,2%	47,4%
1988	0%			2001	0,85%	6%	51,2%
1989	0,55%			2002	2,2%	2,8%	45,5%
1990	0,55%			2003	15,3%	15,3%	61,9%
1991	1%			2004	10,4%	11,5%	22,4%
1992	1,1%			2005	3,8%	13,2%	19,5%
1993	0,12%			2006	0,3%	21,1%	19,8%
1994	3,6%			2007	0%	1,8%	3,7%
1995	5,3%			2008	0,4%	2,8%	2,9%
1996	3,3%		22,5%	2009	0%	1,1%	1,1%
1997	0,2%		27,6%				

Hay que destacar que aunque se dispone de las dos componentes que proporcionan la radiación global, la relación entre ellas no es una mera adición puesto que la componente directa no se mide en plano horizontal.

Resumiendo los meses completos en los que se dispone de las tres radiaciones medidas resulta la Tabla III.2, en la que se han rellenado con el carácter C los meses en los que se dispone de todos los datos. No se llega a completar ningún año natural, en el 2009 la radiación global está completa, pero de las otras dos variables (radiación difusa y directa) faltan 4 días del mes de marzo.

Tabla III.2. Meses con todos los datos horarios de las tres variables (global, difusa y directa)

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2001												C
2002				C								
2003							C	C				
2004		C	C	C				C				
2005			C			C		C	C	C	C	C
2006			C	C				C				
2007	C	C		C	C		C	C			C	C
2008	C	C			C			C		C		C
2009	C	C		C	C	C	C	C	C	C	C	C
Total	3	4	3	5	3	2	3	7	2	3	3	5

Aunque ninguna de las series alcanza los 30 años, la longitud de las mismas puede ser suficiente para validar los modelos de radiación, en (Gueymard 2000) se recomienda un mínimo de tres años de datos para este fin, y en el caso de la global se superan los catorce recomendados por (Vernich and Zuanni 1997).

### III.4. Control de calidad de los datos.

Los datos proporcionados por AEMET han pasado unos filtros específicos antes de su inclusión en la base General de la Agencia y son enviados posteriormente al Centro Mundial de datos de Radiación de San Petersburgo, donde pasan sus propios criterios de validación.

Aun asumiendo la bondad de los mismos, se realizaron ciertos controles de calidad que permiten detectar fallos debidos a la propia respuesta del sensor o a problemas relacionados con su modo de operación o mantenimiento. Tal como se manifiesta en (Muneer and Fairouz 2002) se ha comprobado, por ejemplo, que la presión mecánica sobre los cables del sensor puede distorsionar la medida debido al efecto piezoeléctrico, provocando picos inusuales de radiación, los autores demuestran la aparición de picos de difusa que superan la irradiación global durante algunos intervalos. Por otra parte, en la siguiente figura, que representa la fracción difusa frente al índice de claridad, se muestran los efectos del desalineamiento del anillo de sombra o la acumulación de polvo, nieve o gotas de agua sobre un sensor de irradiancia global o difusa.

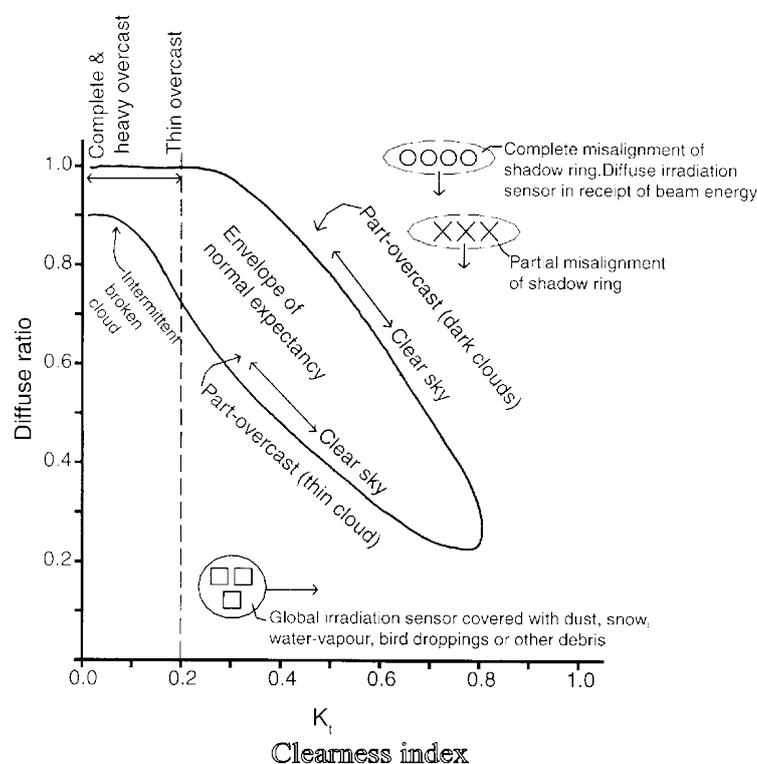


Figura III.2. Demostración del efecto de las posibles fuentes de error en las medidas. Figura extraída de (Muneer and Fairouz 2002).

El primer control que se establece se refiere a la respuesta del sensor en función del ángulo de incidencia de la radiación sobre la superficie sensible, lo que se denomina "respuesta coseno" del sensor. Cuanto más agudo sea el ángulo de incidencia (a la salida y puesta del sol) mayor será el error en la medida. El método habitualmente empleado para evitarlo es eliminar todos los registros que corresponden a ángulos de elevación del sol bajos, aunque los investigadores no se ponen de acuerdo en un valor concreto por debajo del cual las medidas no estén afectadas por la respuesta coseno, en (Muneer, Younes, and Munawwar 2007) se utiliza un ángulo límite de 7° y se indica que cualquier valor entre 6° y 10° es aceptable. En otros casos, (R. Posadillo and López Luque 2010) y (Bilbao et al. 2003) se establece el límite de 5° haciendo referencia al control de calidad sugerido por la European Commission on Daylight Investigation o a estudios previos de otros autores, en este estudio el límite se ha fijado también en 5° buscando un compromiso entre la calidad y el número de datos que superen el filtrado, con este ángulo de elevación se eliminan un 30,7% de los registros horarios de global y difusa, filtrar por debajo de 7° eliminaría un 2,7% más.

Dado que es preciso calcular el ángulo de elevación solar para cada hora, y que éste puede variar hasta 11° en ese intervalo en algunos días del año, se ha calculado la elevación media solar en cada hora en lugar de la elevación en el punto medio de cada hora, tal como recomiendan algunos autores (R Posadillo and Lopez Luque 2009), aunque la diferencia apreciada entre los dos cálculos es tan solo del 0,5% en torno al mediodía solar para ciertos días del año.

El segundo control establecido es el propuesto por la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) citado en (R. Posadillo and López Luque 2010),(Muneer and Fairouz 2002),(Younes, Claywell, and Muneer 2005),(De Miguel et al. 2001), que fija unos límites absolutos para los valores horarios de radiación global, difusa y directa:

$$\begin{aligned}
 0 &\leq G \leq 1,2G_0 \\
 0 &\leq D \leq 1,1G \\
 0 &\leq D \leq 0,8G_0 \\
 0 &\leq B \leq G_0
 \end{aligned}
 \tag{III.1}$$

Siendo G la radiación global horaria, D la radiación difusa horaria, B la radiación directa horaria y  $G_0$  la radiación extraterrestre horaria.

El número de datos atípicos detectados con estos controles en global y difusa no es significativo, lo que corrobora la calidad de los datos proporcionados por AEMET; en esta etapa el registro horario detectado como atípico se elimina, excepto en el caso de

la serie de irradiación directa, en la que se producen un elevado número de outliers (39) en las horas posteriores a la puesta de sol o anteriores a su salida, por lo que en todos los casos el valor de radiación extraterrestre con la que se está contrastando la irradiación directa es nula, mientras que el sensor indica valores de 1 decena de kJ, estos registros se sustituyen directamente por el valor 0.

Además se calculan: el índice de claridad ( $k_t$ ), definido como el cociente entre la radiación global y la extraterrestre horarias ( $k_t=G/G_o$ ), y la fracción difusa ( $F_d$ ), cociente entre la radiación difusa y la global horarias ( $F_d=D/ G$ ), a los que se les aplican los siguientes controles (Younes, Claywell, and Muneer 2005):

Un test lógico:

$$\begin{aligned} 0 \leq k_t &\leq 1 \\ 0 \leq F_d &\leq 1 \end{aligned} \quad (\text{III.2})$$

Y un control estadístico basado en los límites inferior y superior que proporcionan los cuartiles:

$$\begin{aligned} \text{Límite inferior} &= C1 - 1,5x(C3 - C1) \\ \text{Límite superior} &= C3 + 1,5x(C3 - C1) \end{aligned} \quad (\text{III.3})$$

Donde C1 es el primer cuartil y C3 es el tercer cuartil.

La aplicación de estos controles sobre  $k_t$  y  $F_d$ , detectó un total de 23 valores horarios atípicos en el índice de claridad y ninguno en la serie de fracción difusa, esto obligó a revisar de nuevo los valores horarios de la serie de irradiación global.

En todos los casos los datos horarios detectados como valores atípicos se eliminan; los días con un único valor horario perdido, situado a primera o última hora, se dan por válidos, calculando el valor diario como suma de los restantes registros. Se ha comprobado mediante simulación que en estos casos el error cometido respecto al valor diario no supera el 3%, pero si el valor horario perdido corresponde a una hora intermedia se descarta el día, pues el objetivo inicial es un análisis lo más fiel posible de los datos disponibles, aunque posteriormente para la aplicación del método ARIMA fue preciso rellenar estos huecos horarios.

En el Anexo B se encuentra la lista completa de valores atípicos detectados en este proceso (ver tablas B.4, B.5 y B.6).

### III.5. Errores detectados en las medidas de irradiación directa y difusa.

Como ya se indicó anteriormente, a diferencia de las otras dos variables de irradiación, la directa se mide en un plano perpendicular a los rayos del sol, el pirheliómetro dispone de un sistema de seguimiento que lo mantiene permanentemente orientado al disco solar.

Se puede obtener la irradiación directa en plano horizontal a través de dos procedimientos:

- a) Se obtuvo como diferencia entre la irradiación global y la difusa, ambas medidas en plano horizontal. Este es el método empleado en la mayoría de estudios, puesto que es difícil disponer de registros de esta variable, que se mide en pocas en estaciones.

$$B(0) = G(0) - D(0) \quad (\text{III.4})$$

- b) Se calculó también a partir de las medidas de irradiación en un plano normal a los rayos del sol. La relación entre ambas cantidades viene dada por las expresiones siguientes:

$$B(0) = B(\alpha, \beta) \frac{\cos(\theta_{zs})}{\cos(\theta_s)} \quad (\text{III.5})$$

$$\cos(\theta_{zs}) = (\text{sen } \delta \text{sen } \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega) \quad (\text{III.6})$$

$$\cos(\theta_s) = \cos \theta_{zs} \cos \beta + \text{sen } \theta_{zs} \text{sen } \beta \cos(\Psi_s - \alpha) \quad (\text{III.7})$$

Dónde:

$B(\alpha, \beta)$  = Irradiación directa sobre plano orientado un ángulo  $\alpha$  respecto al Sur, e inclinado un ángulo  $\beta$  respecto a la horizontal.

$B(0)$  = Irradiación directa sobre superficie horizontal

$G(0)$  = Irradiación global sobre superficie horizontal

$D(0)$  = Irradiación difusa sobre superficie horizontal

$\theta_s$ : ángulo de incidencia solar

$\theta_{zs}$ : ángulo cenital solar

$\Psi_s$ : ángulo acimutal solar

$\phi$ : Latitud

$\omega$ : ángulo solar horario

$\delta$ : Declinación solar (depende del día del año)

El ángulo de incidencia solar, es el formado entre la línea que une el sol y el sensor, y la perpendicular a la superficie en la que se asienta éste. El ángulo cenital del sol es el ángulo entre el cenit y la línea que une el sensor y el sol, y es el complementario al ángulo de elevación:  $\gamma_s$ .

Si la superficie está orientada al sol, el ángulo  $\alpha$  coincide con el ángulo acimutal solar, el ángulo  $\beta$  coincide con el ángulo cenital solar y el ángulo de incidencia solar es  $0^\circ$ .

Resultando entonces, que la irradiación directa en plano horizontal es la medida en el pirheliómetro, modificada por el coseno de un ángulo que depende de la latitud, la declinación y el ángulo solar:

$$B(0) = B_{normal} \cos(\theta_{zs}) = B_{normal} (\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega) \quad (\text{III.8})$$

El ángulo solar horario utilizado es el ángulo solar medio para cada hora, y teniendo en cuenta el filtrado de irradiación global y difusa para ángulos de elevación inferiores a  $5^\circ$ , se aplicó el mismo filtro a la irradiación directa calculada.

Se hizo un análisis comparativo entre los resultados de los dos cálculos tanto a nivel diario como horario, detectándose un problema en las medidas de irradiación del pirheliómetro, finalmente atribuible al equipo de medida.

En la Figura III.3 se muestra la correlación a nivel diario entre la irradiación directa obtenida como diferencia entre global y difusa (eje de abscisas) y la irradiación directa calculada a partir de las medidas del pirheliómetro (eje de ordenadas), el valor diario corresponde, en este caso, a la suma de los valores horarios obtenidos según (III.8). Aunque la mayoría de los puntos se sitúan en torno a la diagonal, hay un número considerable de días en los que el valor que proporciona la diferencia global-difusa es superior al obtenido del pirheliómetro.

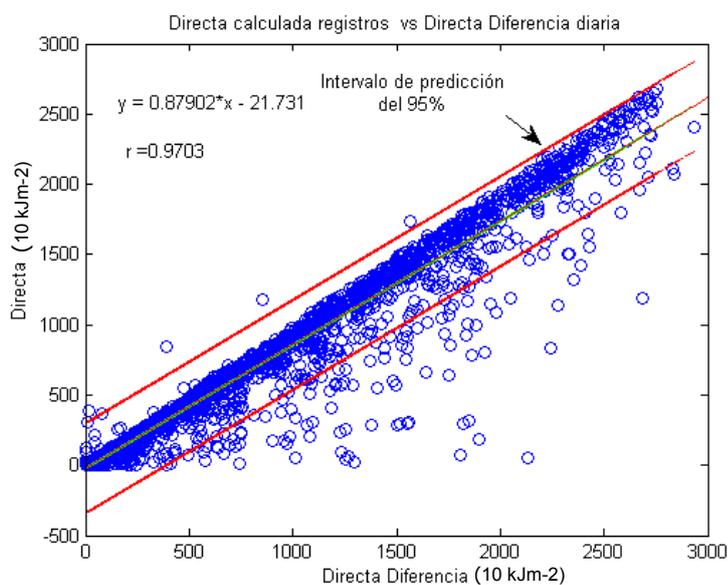


Figura III.3. Correlación entre los valores de irradiación Directa en plano horizontal diaria obtenidos según los procedimientos (a) y (b).

El mismo fenómeno se pone de manifiesto en las correlaciones horarias mostradas en las Figuras III.4.a, b y c, en ellas se aprecia además la acumulación de puntos alienados sobre el eje de abscisas, estos pares de valores corresponden a días en los que el pirheliómetro, a esa hora, no mide radiación directa, mientras la diferencia global-difusa supera en muchos casos los 75 10kJ/m<sup>2</sup>. Ambos comportamientos anómalos se aprecian sobre todo a partir de las 12 h.

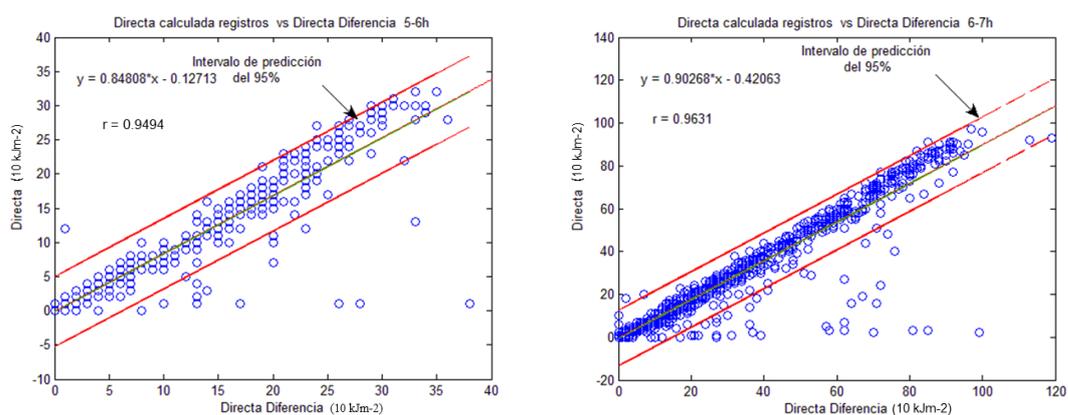


Figura III.4.a. Correlaciones horarias entre ambos cálculos de Directa entre las 5 y las 7 h.

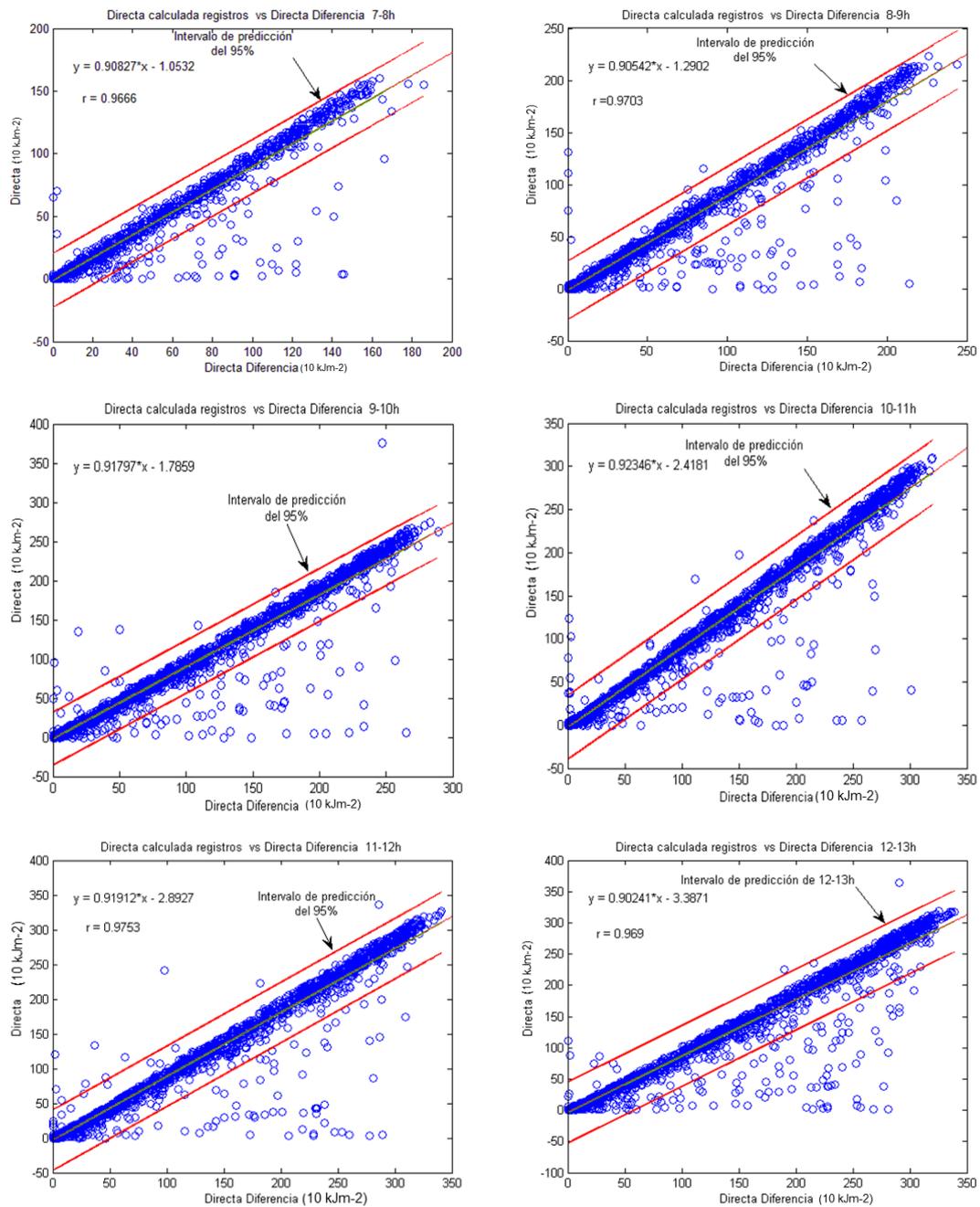


Figura III.4.b. Correlaciones horarias entre ambos cálculos de Directa entre las 7 y las 13 h.

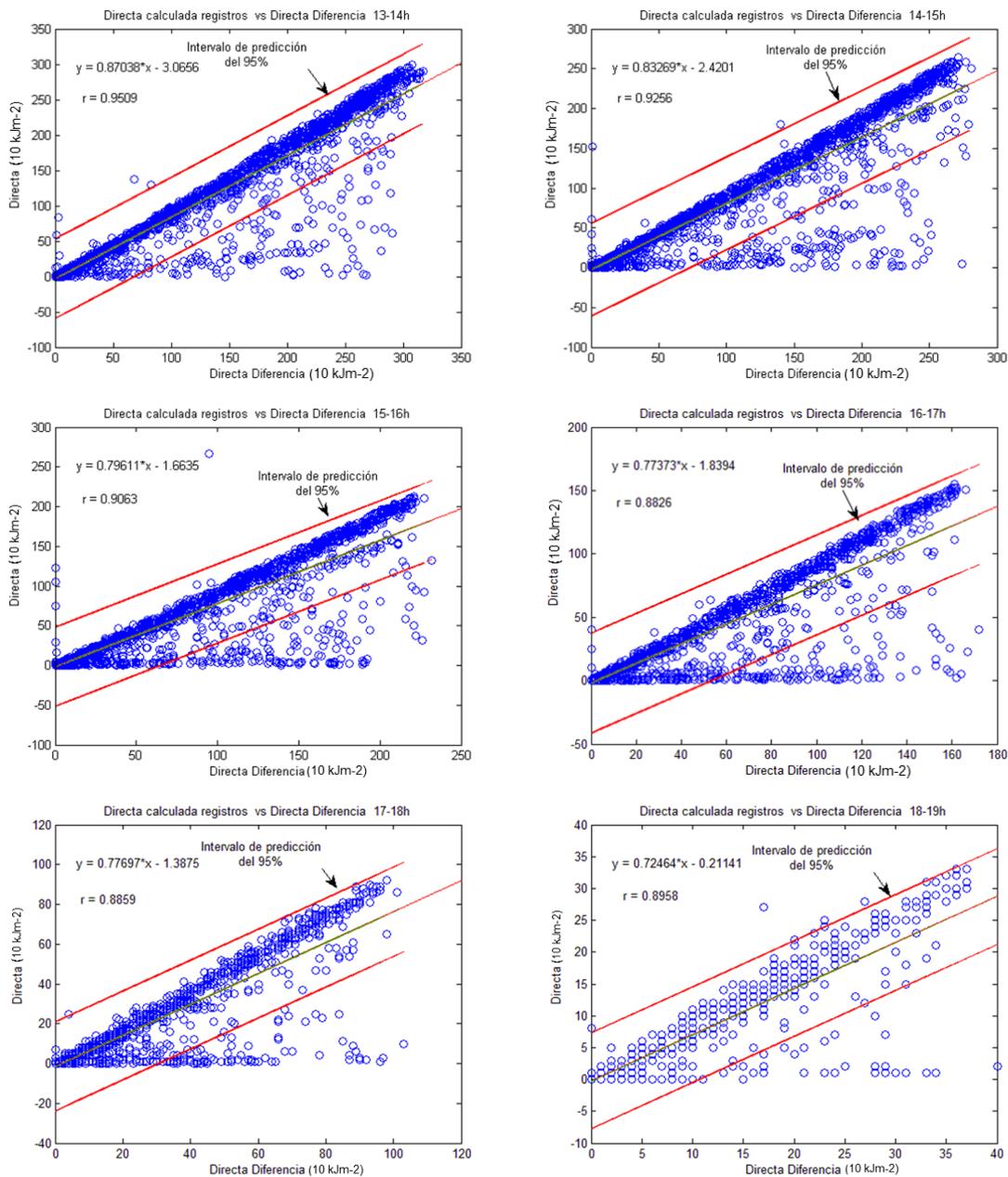


Figura III.4.c. Correlaciones horarias entre ambos cálculos de Directa entre las 13 y las 19 h

El porcentaje de fallos en cada banda horaria, representada en tanto por uno, se muestra en la Figura III.5, donde vemos que llega a triplicarse a partir de las 14 h.

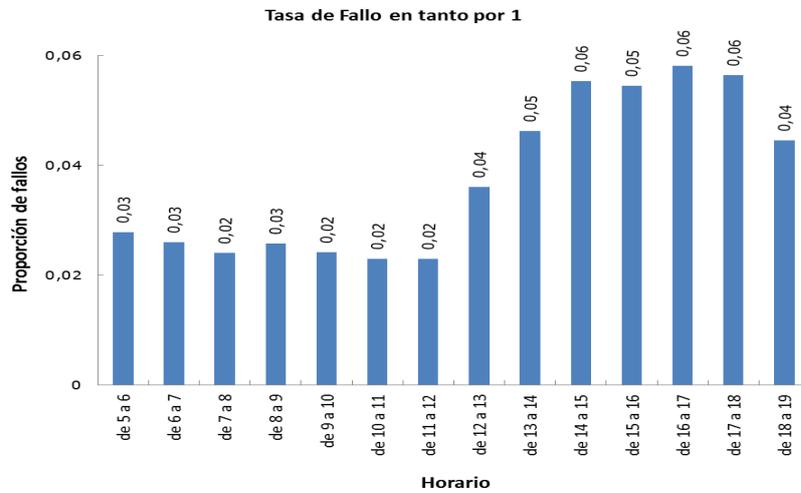


Figura III.5. Porcentaje de fallos en cada banda horaria

Se realizó la comparativa a nivel horario, con promedios anuales, lo que mostró que las discrepancias entre ambas variables se producen en el período 2000-2004, y prácticamente desaparecen a partir del 2005.

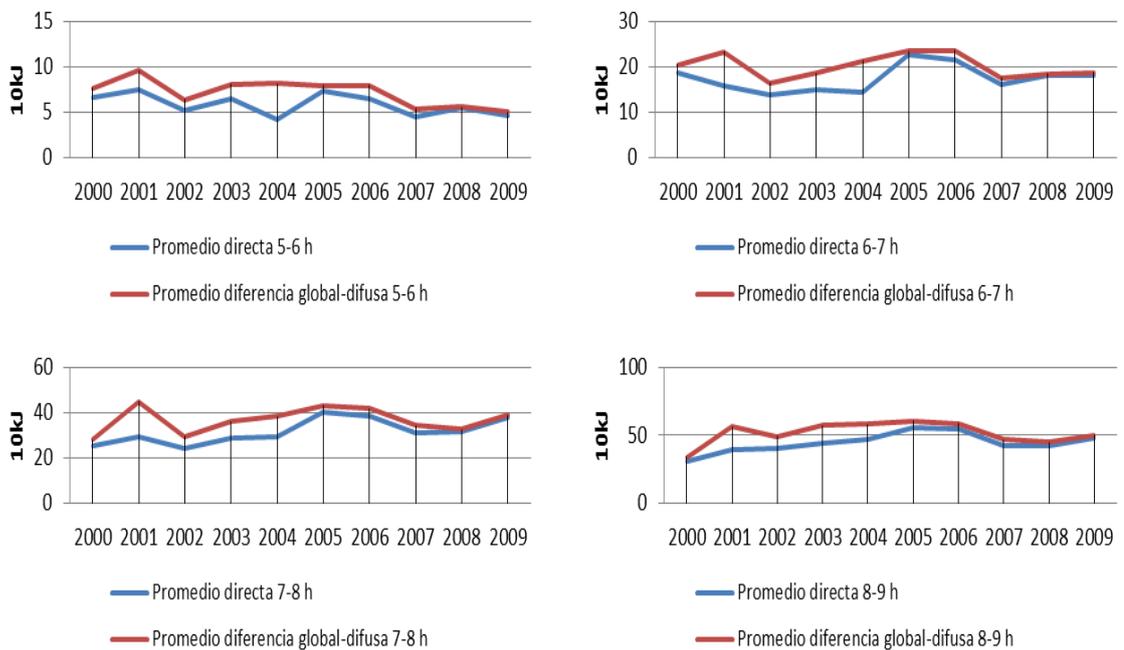


Figura III.6.a. Diferencias entre ambos cálculos en promedio anual de 5 a 9 h

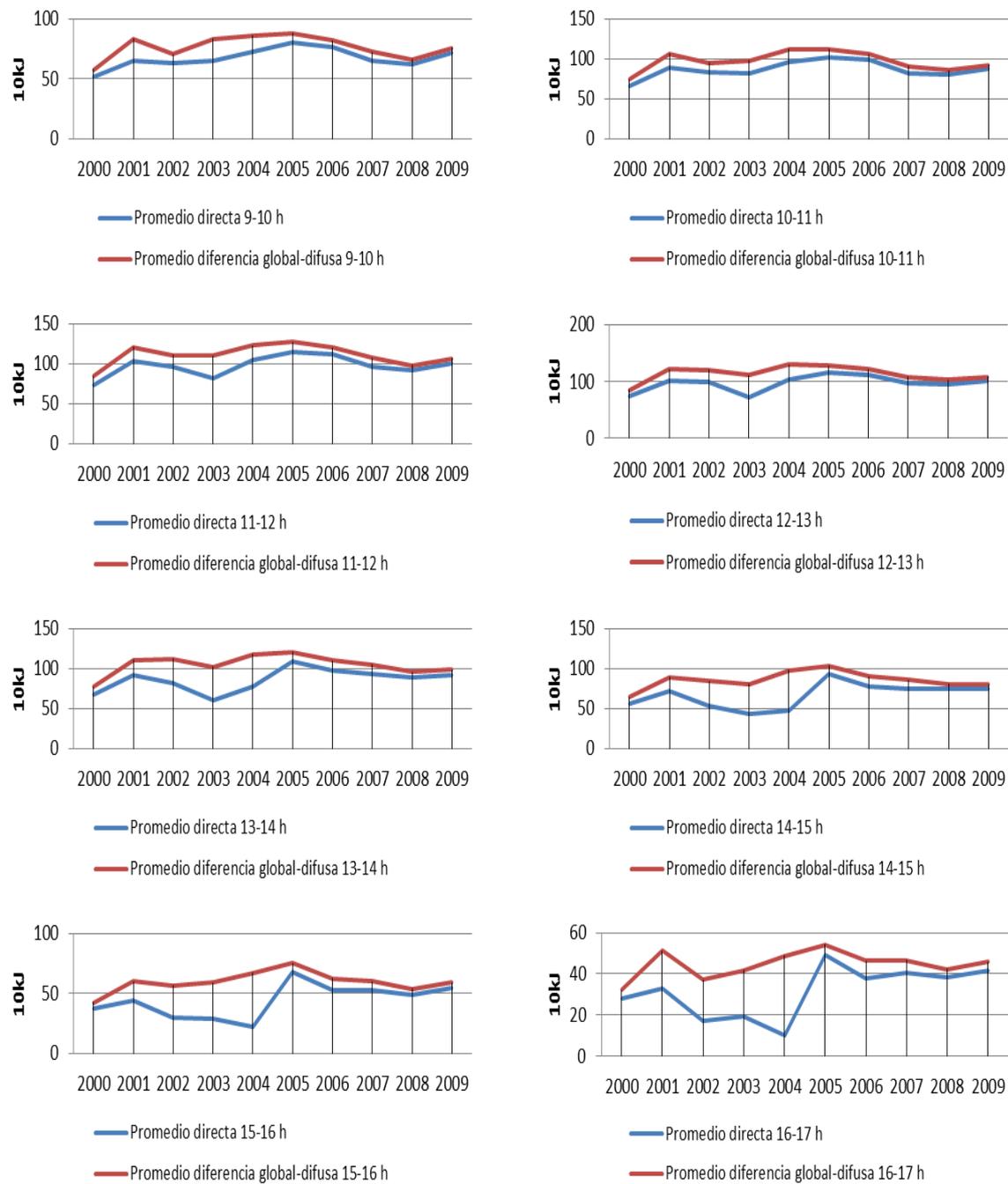


Figura III.6.b. Diferencias entre ambos cálculos en promedio anual de 9 a 17 h

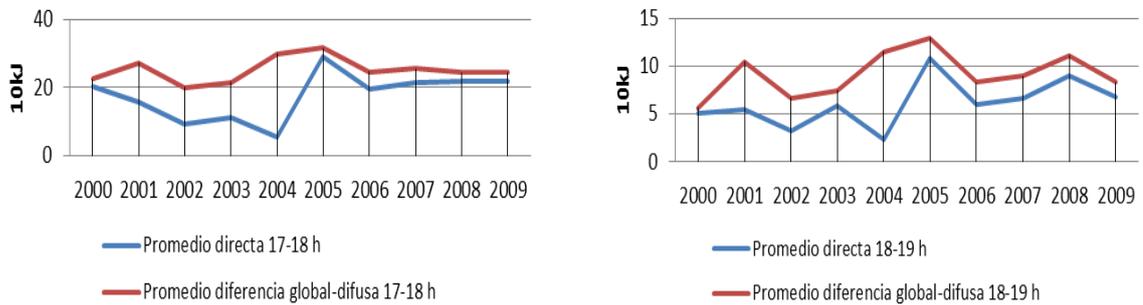


Figura III.6.c. Diferencias entre ambos cálculos en promedio anual de 17 a 19 h

Dado el carácter del problema detectado, se consulta con el personal de la estación meteorológica en A Coruña las posibles causas del mismo, que indica que el equipo de medida de la radiación solar hasta diciembre de 2004 no era el actual, se trataba de un equipo suministrado por Eppley, y disponía de un sistema mecánico, que requería 4 ajustes diarios para orientar el pirheliómetro al sol, y ajustar diariamente la banda de sombra del piranómetro de difusa. Durante el horario en que el observatorio estaba atendido se hacían esos ajustes, mientras que para el período en que no había atención, el equipo no se reajustaba, y tanto las medidas de directa como las de difusa dejaban de ser correctas, este fenómeno se detectaba en ocasiones en el posterior control de calidad de los datos, eliminándose los registros correspondientes a estas dos variables, aunque en otros muchos casos los valores registrados superaron el control de calidad, y únicamente una inspección gráfica de los mismos día a día permite comprobar su comportamiento anómalo.

Esto confirma que la disonancia detectada se debe al desajuste en el seguimiento del sol del equipo de medida que existía hasta diciembre de 2004, y obliga a reconsiderar las series de datos de irradiación directa, dividiéndolas en dos conjuntos: los datos previos a 2005, con baja fiabilidad, y los posteriores a 2005, considerados como fiables, este último conjunto es el que se ha utilizado en el estudio.

En la Figura (III.7), se muestra la correlación diaria entre las dos series calculadas de irradiación directa en plano horizontal pero tomando solamente los datos de 2005 en adelante, se obtiene una diagonal prácticamente perfecta, aunque todavía queda un pequeño conjunto de valores erróneos en la serie calculada a partir de las medidas del pirheliómetro, la mayoría corresponden a valores diarios de marzo de 2005. Estos datos se descartan por ser considerados erróneos.

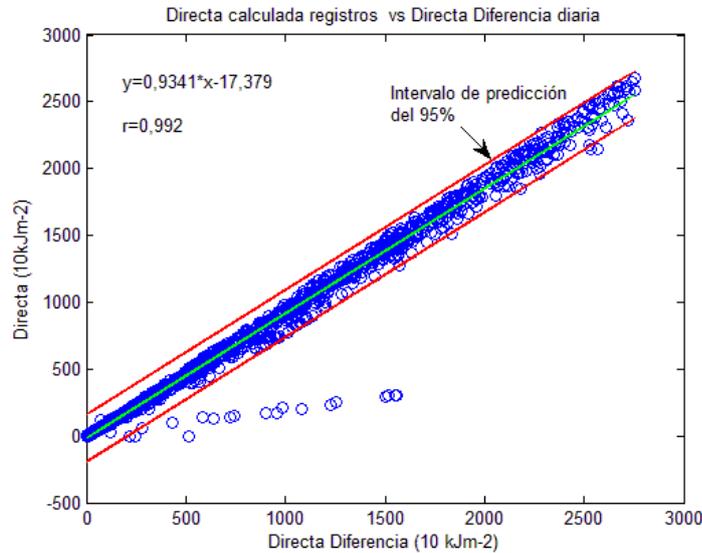


Figura III.7. Correlación diaria entre ambos cálculos de Directa de 2005 a 2009.

La tabla B.7 del Anexo B recoge las fechas en las que se descartaron los valores diarios de irradiación directa.

En lo que se refiere a la irradiación difusa, el agrupamiento de los datos diarios de esta variable por mes, permitió detectar valores atípicos en relación al conjunto de registros para cada mes, todos los datos atípicos eran valores situados fuera del rango intercuartílico por encima del límite superior, además el 99% correspondían a fechas previas al 2005, en algunos casos se comprueba que las medidas de global y difusa coinciden, siendo también altos los valores de directa, y teniendo en cuenta la posibilidad de un error en la medida del piranómetro de difusa, se decide descartar esos datos, que suponen un total de 17 días. (Ver tabla B.8 del Anexo B).

### III.6. Análisis descriptivo univariante de las series de irradiación global, directa y difusa.

Para obtener una visión global de los datos una vez se han filtrado, se procedió a realizar un primer análisis estadístico descriptivo de cada una de las series. Aunque los datos se suministraron en formato horario, para los diferentes análisis se agregaron en valores diarios, y se calcularon promedios mensuales y por día juliano, en todos los casos las unidades son  $10\text{kJm}^{-2}$ . La manipulación y el análisis de datos en este apartado se llevó a cabo utilizando los programas SPSS<sup>®</sup>, Excel<sup>®</sup> y Matlab<sup>®</sup>.

En este primer tratamiento para la agregación de datos a nivel diario, quedan descartados los días en que se ha perdido un valor horario en alguna hora distinta de la primera o última del día.

Para todas las series se representan en diagrama de cajas los datos diarios agrupados por meses, esto permite detectar valores diarios anómalos en el conjunto del mes, que según los casos se conservan o suprimen para etapas posteriores.

Con el objetivo de conocer la distribución estadística se obtuvieron los histogramas para cada mes, y se aplicaron test de normalidad, se calcularon también los principales estadísticos de caracterización: media, mediana, varianza, desviación típica, amplitud intercuartílica, máximo, mínimo, asimetría y curtosis, estos dos últimos permiten una clasificación de acuerdo a (Ianetz et al. 2000) (Tabla III.3), que según se cita en la referencia, está basada en las reglas del análisis estadístico generalmente aceptadas, y permite establecer el grado de adecuación de cada distribución para su aprovechamiento para sistemas de conversión de energía solar, siendo los preferidos en orden descendente los que siguen: V>IV>I>VI>II y III.

Tabla III.3 Definición de los tipos de distribución de frecuencias en función de los rangos de valores de la asimetría y la curtosis. (Adaptada de Ianetz et al. 2000)

Tipo de Distribución	Función de distribución	Asimetría (As)	Curtosis (C)
I	Normal	$-0,4 < As < 0,4$	$-0,8 < C < 0,8$
II	Casi normal con cola positiva	$As \geq 0,4$	$-0,8 < C < 0,8$
III	Leptocúrtica con cola positiva	$As \geq 0,4$	$C \leq -0,8$ o $C \geq 0,8$
IV	Casi normal con cola negativa	$As \leq -0,4$	$-0,8 < C < 0,8$
V	Leptocúrtica con cola negativa	$As \leq -0,4$	$C \geq 0,8$
VI	Bimodal, simétrica platicúrtica	$-0,4 < As < 0,4$	$C \leq -0,8$

También se proporciona el valor del coeficiente de variación de Pearson para cada mes, este parámetro proporciona una medida de estabilidad en el intervalo de tiempo considerado, lo deseable es que tenga el menor valor posible para facilitar el dimensionamiento de sistemas de conversión solar, un coeficiente bajo asegura que el número de días en los que el sistema está infrutilizado, o sobredimensionado se reduce al mínimo (Ianetz et al. 2000).

Se ha calculado el valor promedio diario de irradiación global, difusa y directa para cada día del año, y se representan junto a los valores máximos y mínimos absolutos registrados para cada día del año, y un límite superior de irradiación global fijado por la

curva de radiación extraterrestre atenuada suponiendo que la transmisividad de la atmósfera es de 0,8.

A nivel mensual se han promediado los datos diarios para todos los meses, y se representan junto a los máximos y mínimos absolutos registrados de cada mes, la media de valores mínimos y de valores máximos, y la media de radiación en los días claros, para la clasificación de días figura se utiliza el criterio de Iqbal que se expone en el apartado siguiente.

Por último, con el objetivo de evaluar posibles tendencias se calculó el total de irradiación global recibida anualmente para los 25 años, representándola en diagrama de barras, y se obtuvo la media diaria mediante media móvil, con una ventana de tamaño 365 días y con desplazamiento de 1 día, que refleja el promediado de períodos anuales sin tener en cuenta el año natural.

### **III.7. Análisis descriptivo univariante del índice de claridad y la fracción difusa.**

Para realizar los cálculos con radiación solar se acostumbra a normalizar los datos de radiación en la superficie terrestre respecto a la radiación extraterrestre. El índice de claridad ( $k_t$ ) indica el grado de transmisión de radiación de la atmósfera. La presencia en la misma, tanto de las nubes como de aerosoles, produce un doble efecto de absorción y de reflexión. Mientras la absorción decrementa la cantidad de radiación que alcanza el suelo, la reflexión en parte la disminuye (cuando la porción reflejada se emite hacia el espacio) y en parte la aumenta (cuando el reflejo se dirige hacia tierra).  $k_t$  da cuenta de estos efectos de forma conjunta, pero sin distinguir las causas.

Por otra parte, en el caso de la radiación difusa, la fracción difusa ( $F_d$ ) representa la porción de radiación difusa contenida en la global. Ambos índices son los habitualmente utilizados para el cálculo de modelos que permiten la obtención de la irradiación difusa a partir de la global.

Para los dos índices se presentan los histogramas diarios, que permiten, establecer el porcentaje de días con cielo claro, parcialmente cubierto o nublado en A Coruña. El interés de este tipo de clasificaciones está relacionado con la implantación de sistemas de aprovechamiento de energía solar, el dimensionamiento adecuado de estos sistemas ha de tener en cuenta necesariamente la variabilidad de la radiación global a lo largo de un año o a lo largo de un día. Entre los parámetros utilizados para clasificar las condiciones de cielo se encuentran: el índice de claridad, la nubosidad, la

temperatura, la humedad, e incluso la velocidad y dirección del viento (Muselli 2000). En este estudio se utiliza el criterio de Iqbal (Badescu 2008) que está basado en el índice de claridad (Tabla III.4).

Tabla III.4. Clasificación del tipo de cielo de acuerdo al criterio de Iqbal.

Tipo de día	$k_t$
Claro	$0,7 < k_t < 0,9$
Parcialmente cubierto	$0,3 < k_t < 0,7$
Nuboso	$0,0 < k_t < 0,3$

Además, al igual que con las series de irradiación, se obtuvieron los histogramas diarios para cada mes.

A nivel horario, en lugar de presentar los cálculos para cada hora del día, el criterio que se aplicó es clasificarlos según la elevación solar, puesto que a lo largo de una hora la posición del sol puede variar hasta  $11^\circ$  en función de la época del año. Se tomaron intervalos de  $5^\circ$ , para elevaciones entre  $5^\circ$  y  $70^\circ$ , agrupando todos los índices horarios que corresponden a cada intervalo. Los datos pertenecen al período común (1999-2009) en que se dispone de irradiación global y difusa.

En las Figuras III.8.a y b se puede apreciar la variación de la altura del sol en función de la hora solar verdadera, para cada día del año.

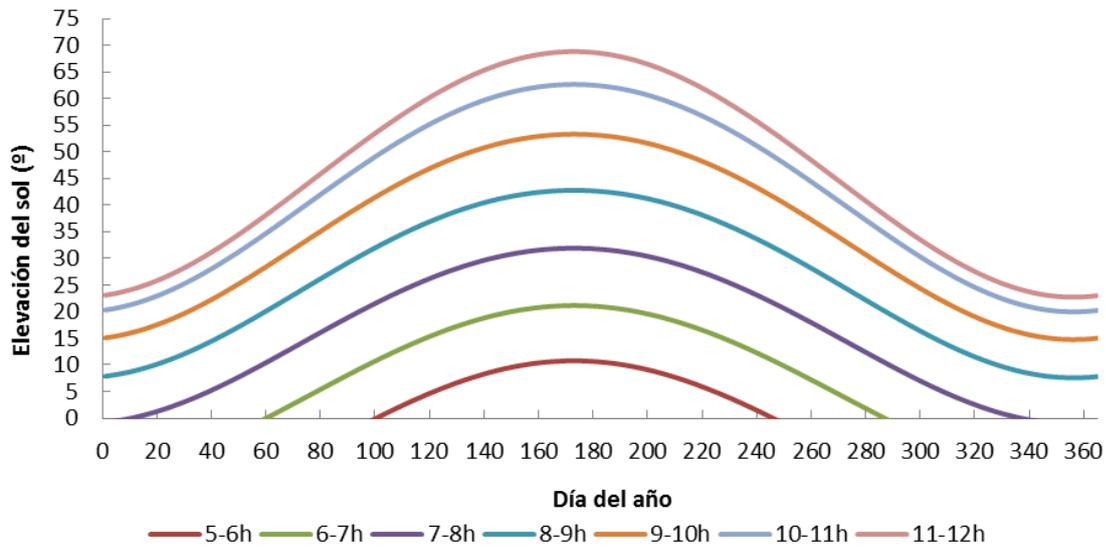


Figura III.8.a. Elevación solar para cada día del año entre las 5 y las 12 hora solar.

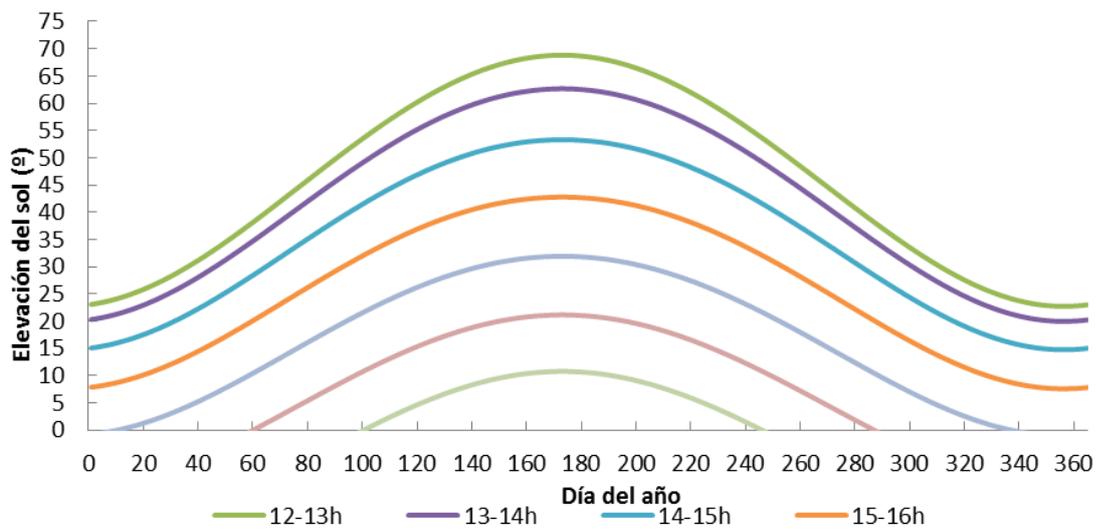


Figura III.8.b. Elevación solar para cada día del año entre las 12 y las 19 hora solar.

Y en la Figura III.9 se aprecia la variación de la altura del sol en los solsticios, cuando se alcanza la mínima y máxima elevación del sol en el cielo.

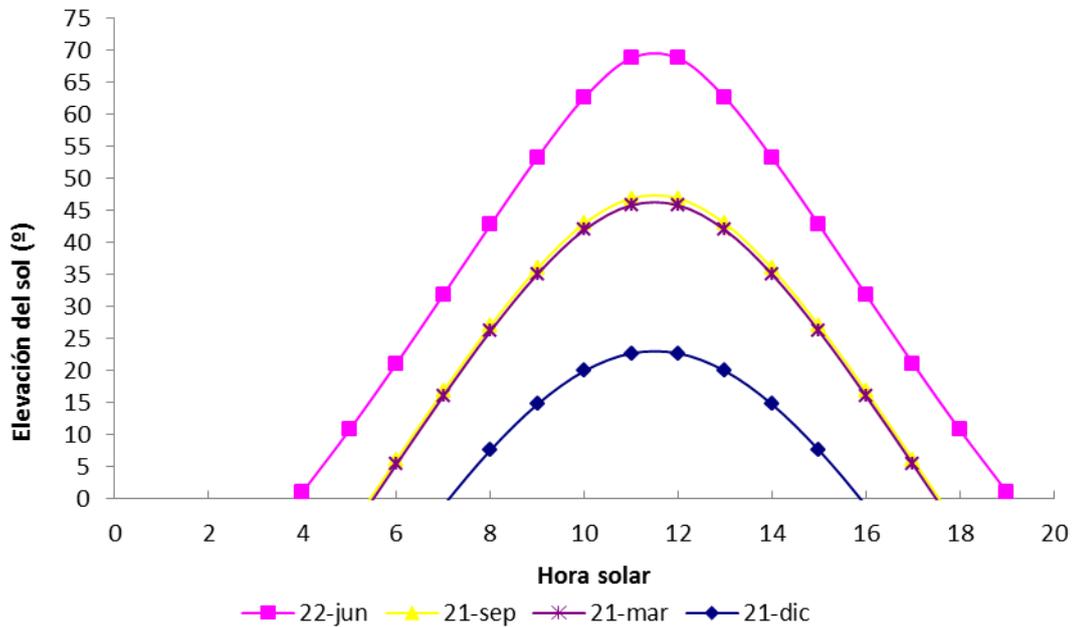


Figura III.9. Elevación solar en solsticios y equinoccios

El número de datos horarios de  $k_t$  y  $F_d$  para cada intervalo de  $10^\circ$  de elevación se muestra en la Figura III.10, el volumen de pares más importante se encuentra en la franja entre  $20$  y  $25^\circ$ , y corresponde a un total de 4451 valores, mientras que el mínimo corresponde a las elevaciones más altas, las bandas entre  $55-60^\circ$  o  $65-70^\circ$ , en las que el número de pares  $k_t-F_d$  está en torno a los 1200, ya que el sol alcanza estas elevaciones únicamente algunas horas al día solamente en el período estival.

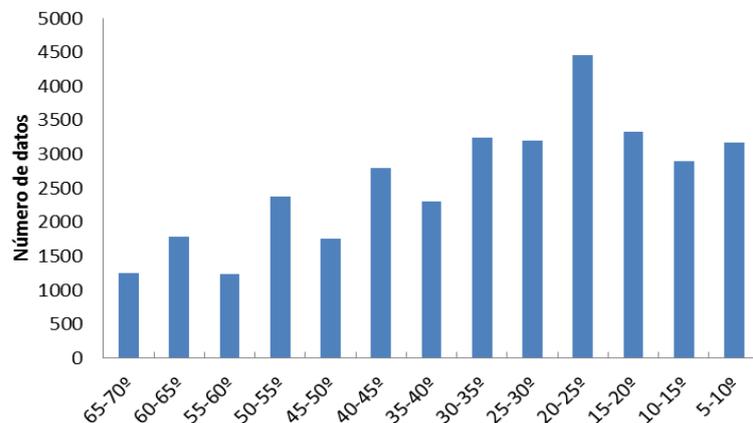


Figura III.10. Número de pares horarios  $k_t-F_d$  para cada intervalo de elevación solar

Se han obtenido los histogramas horarios del índice de claridad y la fracción difusa, calculados en intervalos de 0,07, lo que, teniendo en cuenta el rango de estos índices

[0,1], puede dar lugar a un máximo de 16 intervalos. Para ajustar este tamaño de intervalo se aplicó el criterio de Sturges<sup>1</sup> a cada uno de los conjuntos de datos en cada rango de elevaciones, y finalmente, con el fin de mantenerlo constante para todos los datos, se aplicó el promedio de los tamaños obtenidos.

### **III.8. Predictores de irradiación solar.**

En este apartado se describen las series climáticas que se utilizan como predictores de radiación: la temperatura ambiente, la precipitación y las horas de sol.

Los registros de estas tres variables en la estación de A Coruña a nivel diario, forman parte del conjunto de datos que a partir de noviembre de 2010 la AEMET facilitó al público a través de un servidor FTP.

La temperatura ambiente media diaria está reflejada en grados centígrados, registrada desde octubre de 1930, aunque para este estudio se utilizan únicamente los datos a partir de enero de 1985, dado que es a partir de esta fecha cuando comienzan los registros de irradiación global. Es una variable de la que apenas hay datos perdidos, en el período considerado únicamente falta el dato del 11-12-1996, que se sustituyó por la media de todos los valores de ese día en los restantes años.

La precipitación diaria se refleja en milímetros, con la indicación  $I_p$  (inapreciable) en aquellos días en que el valor registrado fue inferior a 0,1 mm, para poder tratar estos registros se sustituyó el indicador  $I_p$  por el valor numérico 0,05 mm, que refleja de alguna manera que la precipitación sin ser nula tampoco alcanza un valor apreciable. La variable se registra desde octubre de 1930, aunque, como en el caso anterior solamente se utilizan los datos entre enero de 1985 y diciembre de 2009. En este período hay un total de 512 días con el indicador  $I_p$ , y no hay datos perdidos.

En cuanto a la variable horas de insolación, figura reflejada en horas, se registra desde enero de 1951, igual que en los dos casos anteriores únicamente se utilizarán los datos entre 1985 y 2009, y en ese período hay 76 días perdidos que no se han recuperado, en particular en 2009 no se ha podido hacer estimación de la irradiación en 8 días por ausencia del dato de horas de insolación.

---

<sup>1</sup> Número de clases= $1+3,322\log(n)$ , siendo n el nº de datos.

Para cada variable se procede a realizar un ajuste a través de funciones lineales, polinómicas y exponenciales, entre sus registros y los de irradiación, se utiliza Excel® como herramienta principal.

### **III.9. Modelos para estimar irradiación difusa.**

Los modelos desarrollados para la obtención de la irradiación difusa se basan en la correlación entre esta variable y el índice de claridad,  $k_t$ , siguiendo el trabajo de Liu-Jordan se obtiene, en primer lugar, la correlación a nivel mensual, y posteriormente se calcula también a escala diaria y horaria.

Tanto para los datos diarios como para los horarios, se divide el conjunto total de datos en dos grupos, uno de los cuales se utilizará para el ajuste del modelo (el tamaño de este grupo es de aproximadamente dos tercios del total) y el otro servirá para su validación, la selección de cada conjunto se realiza de forma aleatoria.

El procedimiento seguido comienza con la representación de la fracción difusa ( $F_d$ ) frente al índice de claridad ( $k_t$ ), los valores atípicos que figuran en la gráfica como puntos dispersos se filtran aplicando el procedimiento descrito en (Younes, Claywell, and Muneer 2005), que se resume a continuación.

Se calcula el histograma de  $k_t$ , tomando intervalos de clases de amplitud 0,02, se calcula para cada clase, la media, mediana, la desviación estándar, el primer (C1) y tercer cuartil (C3) de los valores de fracción difusa que corresponden a los índices  $k_t$  en cada clase. Con esa información se calculan dos envolventes, una superior y otra inferior, que corresponden a  $\bar{k}_i \pm 2\sigma_k$ . Finalmente se ajustan funciones polinómicas adecuadas a dichas envolventes y a los límites lógicos que permiten filtrar los principales atípicos (Figura III.11).

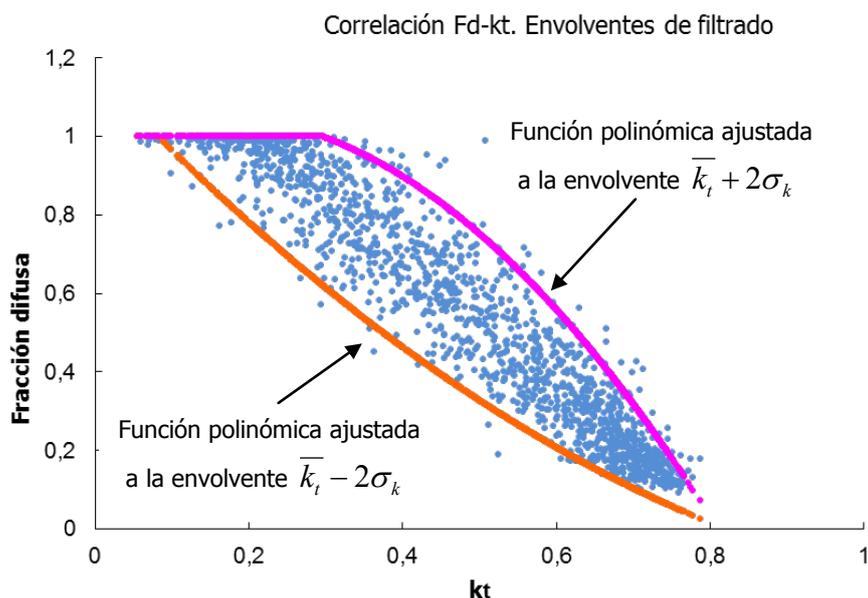


Figura III.11. Esquema del filtrado de las correlaciones  $F_d-k_t$

Una vez filtrados los valores atípicos se obtuvo la correlación entre ambos índices, procediendo según (De Miguel et al. 2001), se representaron de nuevo los datos filtrados mediante el histograma y para cada intervalo de clase de  $k_t$ , se toma el valor central  $k_t$  de ese intervalo y se traza la media de la fracción difusa en esa banda frente a ese valor. La curva resultante permite obtener una expresión para la fracción difusa a tramos en función del índice de claridad.

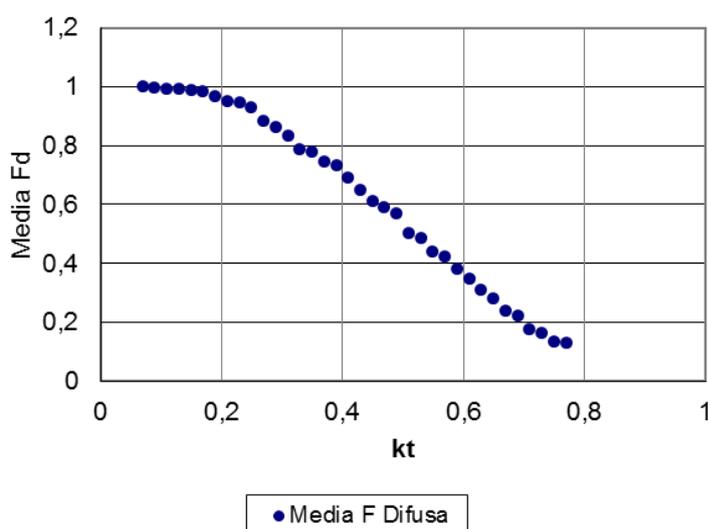


Figura III.12. Representación de los valores medios de  $F_d$  frente al valor central de  $k_t$  en cada intervalo.

A nivel horario, en el estudio de las correlaciones entre la fracción difusa y el índice de claridad, varios autores (R Posadillo and López 2009, De Miguel et al. 2001, Iqbal 1980, Frutos 1987) han puesto de manifiesto la necesidad de incluir la elevación solar como parámetro adicional, sin embargo, en algunos casos (De Miguel et al. 2001, Jacovides et al. 2006), se desarrollan modelos para las correlaciones  $F_d-k_t$ , tratando los datos horarios como un conjunto único, de modo que se ajusta un único modelo polinómico, con varios tramos para distintos intervalos de  $k_t$ , a la media de los datos de fracción difusa, aunque se pone de manifiesto la dependencia de los errores del modelo con la elevación solar. Es por ello que en este estudio se ha optado por desarrollar ambas aproximaciones, obteniendo un modelo para el conjunto de los datos horarios (en el capítulo IV se referencia como *Modelo horario único*) y otros cinco adicionales aplicables a las bandas horarias de acuerdo a la elevación del sol.

El procedimiento seguido en cualquier caso es similar al descrito para datos diarios, con la particularidad de que en el caso de los modelos horarios obtenidos en función de la elevación, se calcula el histograma de  $k_t$ , tomando intervalos de clases de amplitud 0,07, con la finalidad de homogeneizar los intervalos con población para todos y cada uno de los subconjuntos de datos.

### **III.10. Modelo para estimar irradiación directa en plano normal.**

El modelo ajustado para estimar la irradiación directa está basado en el trabajo de (López, Rubio, and Batlles 2000). Se utilizan pares horarios de  $k_b-k_t$ , siendo  $k_b$  el cociente entre la irradiación directa y la extraterrestre, y se ajusta por regresión, un modelo en dos tramos que incluye el coseno del ángulo cenital, complementario del ángulo de elevación solar. Al igual que para los modelos anteriores, el conjunto total de datos se divide en dos partes, una para ajustar el modelo y la otra para validarlo. Se utilizó el paquete SPSS, en particular el módulo de regresión para la obtención del mejor modelo.

### **III.11. Evaluación de modelos.**

La validación de los modelos desarrollados en esta tesis se hizo a través de los indicadores estadísticos más utilizados en la literatura para evaluar el comportamiento de los modelos de estimación de radiación, estos estadísticos son: la Raíz del Error Cuadrático Medio (RECM), el Error Medio (EM) y el Error Absoluto Medio Porcentual (EAMP).

Para evaluar el grado de correspondencia entre pares individuales de valores estimados y valores observados se utiliza la raíz del error cuadrático medio (RECM), que nos da la medida de las diferencias en promedio entre los valores pronosticados y los observados, sin tener en cuenta los signos de esas diferencias.

$$RECM = \sqrt{\frac{\sum (v_i - v_{i\text{estimada}})^2}{N}} \quad (\text{III.9})$$

Donde  $v_i$  es el valor observado de la variable,  $v_{i\text{estimada}}$  es el valor estimado por el modelo y  $N$  el número de valores analizados.

El error medio (EM), denominado también sesgo, nos proporciona información sobre la tendencia del modelo a sobreestimar o subestimar una variable, nos cuantifica el error sistemático del modelo.

$$EM = \frac{\sum (v_i - v_{i\text{estimada}})}{N} \quad (\text{III.10})$$

Para tener en cuenta el peso del error respecto al valor de la variable medida, se normaliza el error absoluto, y habitualmente se presenta en porcentaje, obteniendo el error absoluto medio porcentual (EAMP).

$$EAMP = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{|v_i - v_{i\text{estimada}}|}{v_i}}{N} 100 \quad (\text{III.11})$$

En muchas publicaciones para la validación de los modelos calculados se utilizan exclusivamente la raíz del error cuadrático medio normalizada (RECMN) y el error medio normalizado (EMN), ambos en porcentaje.

$$RECMN = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (v_i - v_{i\text{estimada}})^2}{N}}}{\frac{\sum_{i=1}^N v_i}{N}} 100 \quad (\text{III.12})$$

$$EMN = \frac{\sum (v_i - v_{iestimada})}{\frac{\sum_{i=1}^N v_i}{N}} 100 \quad (\text{III.13})$$

Por último, como medida de la bondad del ajuste se ofrece también el coeficiente de determinación ( $R^2$ ).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (v_i - \bar{v})(v_{iestimada} - \bar{v}_{estimada})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (v_i - \bar{v})^2 \sum_{i=1}^N (v_{iestimada} - \bar{v}_{estimada})^2}} \quad (\text{III.14})$$

De acuerdo a lo anterior, se han calculado estos parámetros respecto al conjunto de datos de validación para evaluar cada uno de los modelos obtenidos.

### III.12. Metodología de análisis ARIMA de series temporales.

El objetivo de este apartado es lograr un modelo que represente la evolución de cada una de las series temporales de que se dispone (radiación global, difusa, directa, índice de claridad, fracción difusa) que permita generar predicciones de su comportamiento futuro. Los modelos que se han utilizado se denominan univariantes porque se basan únicamente en la historia de la propia serie.

La metodología que se emplea es la de análisis de procesos estocásticos, y en concreto la de los modelos ARIMA, estos modelos son fruto de los trabajos de investigación en los años 60, de P. Box y G. Jenkins, que estudiaban el problema de la predicción y control de series temporales industriales, y lograron presentar una metodología unificada para estudiar series estacionarias y no estacionarias, estacionales o no (Peña 2010). Estos modelos estadísticos consideran la dependencia existente entre los datos, las observaciones correspondientes a instantes de tiempo concretos se modelan como una función lineal de los datos anteriores.

La metodología ARIMA comprende las siguientes etapas:

1. Recogida de datos de la serie
2. Análisis de la estacionariedad y posible transformación de la serie
3. Identificación del modelo

4. Estimación de los coeficientes del modelo
5. Validación y selección del modelo
6. Predicción

### **III.12.1. Recogida de datos de la serie.**

El análisis ARIMA precisa disponer de un número considerable de observaciones consecutivas de la serie, como mínimo se recomienda contar con al menos 50 observaciones, aunque tratándose de datos climatológicos diarios, que presentan patrones estacionales con periodicidad anual, es preciso contar, como mínimo, con datos consecutivos de más de un año, en el caso de series mensuales se recomienda trabajar con entre seis y diez años completos de información (Pérez 2006).

Si bien los datos originales son horarios, su estudio plantea varios problemas, detallados a continuación, respecto a la utilización de esta metodología, aunque se han encontrado referencias en ese sentido (Ji et al. 2009),(Ll. Mora-López and Sidrach-de-Cardona 1998)(L. Mora-López and Sidrach-de-Cardona 1997). Las consideraciones que han supuesto que se descarte su utilización en este apartado, son por un lado, que la serie horaria no es continua ya que queda interrumpida por las horas en las que el sol está muy bajo u oculto en el horizonte, en ese período nuestros valores de radiación o bien no se miden o son nulos (durante la noche). El procesado ARIMA se aplica a series estacionarias, y una serie en la que se incluyan esos valores nulos no cumpliría esa condición. Por otra parte, si intentamos soslayar el inconveniente anterior construyendo una serie horaria de radiación solar diurna, estaríamos introduciendo un factor de distorsión, dado que el modelo tendría que considerar, que la primera hora del día con luz solar es la siguiente a la última hora del día anterior antes del ocaso, lo que equivale a suponer que las condiciones atmosféricas durante toda la noche sufren variaciones equivalentes a las que pueden sufrir en el intervalo de 1 hora. Por tanto, se considerará el estudio de series de datos diarios y mensuales.

Las series a las que se aplicará esta metodología son: irradiación global, irradiación difusa, irradiación directa, índice de claridad ( $k_t$ ) y fracción difusa ( $F_d$ ), dado que el análisis ARIMA precisa contar con datos recogidos a una frecuencia regular es preciso rellenar los huecos correspondientes a valores perdidos, a continuación se expone el procedimiento seguido para completar las series diarias de irradiación global, directa y de fracción difusa ( $F_d$ ), pues las demás series se completan a partir de éstas.

---

*Imputación de datos en la serie de irradiación global*

La serie diaria de irradiación global presenta datos perdidos con diferentes distribuciones a lo largo del tiempo, hay casos de días con algunos valores horarios perdidos, o días en los que se pierden todos los valores horarios, al mismo tiempo el dato diario perdido puede encontrarse aislado o bien formar parte de un grupo de días perdidos consecutivos.

El procedimiento de imputación de datos que se ha seguido contempla los diferentes casos y el tratamiento es distinto en cada uno, a continuación se describe este procedimiento.

#### Valor horario perdido aislado

Si el valor perdido es un valor horario aislado en cualquier hora intermedia de un día, la imputación del dato consiste en promediar el valor horario anterior y el siguiente, si se trata de un valor a primera o a última hora del día, la imputación difiere en función de los gráficos de radiación de los días adyacentes:

- Si los días anterior y posterior presentan un gráfico de radiación similar, el valor imputado es el promedio de los valores horarios de los días anterior y posterior a la misma hora.
- Si la comparativa gráfica indica poca similitud entre los días considerados, se opta por calcular la razón entre la hora posterior o anterior al valor perdido y la hora que corresponde al valor perdido para esa misma fecha en todos los días disponibles de los 25 años, a continuación se obtiene el promedio de esa razón, y se imputa el valor perdido dividiendo el valor horario anterior entre la razón promedio para el día en cuestión.

Se ha comprobado, mediante simulación, el error cometido con estos métodos de imputación, la simulación consiste en tomar los datos horarios de los días previos y posteriores al valor perdido y eliminar aleatoriamente un dato de cada día, sustituyendo este dato por la media entre el anterior y el siguiente o por el método de la razón. Se compara la irradiación diaria así obtenida con los valores originales. Los errores medios relativos suponen tan solo el 0,20% de la irradiación diaria; y la raíz cuadrada del error cuadrático medio en porcentaje está por debajo del 4% de la irradiación diaria. Dado que el error cometido es bajo se considera válido el procedimiento de imputación para estos casos.

#### Valores horarios perdidos consecutivos

Los métodos utilizados para el caso de un solo valor horario perdido se aplicaron también en el caso de varios horarios consecutivos perdidos, hasta un máximo de seis registros.

#### Valor diario perdido aislado

En aquellos casos en los que se pierden todos los valores horarios del día, se recupera el valor diario bien por promedio de las sumas diarias de los días adyacentes, bien por la media diaria resultante de considerar todos los valores diarios no perdidos de esa fecha de los 25 años.

#### Valores diarios perdidos consecutivos

En este caso no se sigue el mismo criterio que para un día aislado, ya que se comprueba que la sustitución del valor diario, con este método, para varios días consecutivos da lugar a un valor de la raíz cuadrada del error cuadrático medio de hasta un 30%, además la desviación típica que presentan los datos calculados es mucho menor que la de los valores originales. Se decide hacer uso de las horas de sol, una vez comprobada la bondad del modelo basado en esta variable para estimar el valor diario de  $k_t$ , y a partir de él, el dato de global.

Finalmente, después de este proceso de imputación se dispone de la serie completa diaria de irradiación global, sobre la que se ajusta un modelo ARIMA, dejando como período de validación de este modelo el año 2009. La tabla de los datos imputados en esta fase es la B.9 del Anexo B.

#### *Imputación de datos en la serie de irradiación directa*

La serie de datos de irradiación directa a partir de 2005, presenta un total de 205 días perdidos, para completar estos valores se ha utilizado su elevada correlación con las horas de sol, de modo que el valor imputado para esos días se ha calculado utilizando la expresión (IV.6) del capítulo IV, que relaciona el valor diario con las horas de sol. Ver Tabla B.10 en el Anexo B.

Para el análisis ARIMA de la serie diaria se toman los datos hasta el 31 de diciembre de 2008, dejando 2009 para validar el modelo ajustado, en el análisis mensual, para

alcanzar el mínimo de 50 observaciones se han considerado también los dos primeros meses de 2009 para elaborar el modelo.

#### *Imputación de datos en la serie de fracción difusa*

La serie de datos de fracción difusa que abarca 10 años, presenta un total de 425 días perdidos, de ellos en el 95% de los casos se perdieron todos los registros horarios, para completar estos valores se ha utilizado el modelo de correlaciones obtenido en esta tesis para la irradiación difusa diaria, de modo que el valor imputado a cada uno de los 425 días se ha calculado utilizando la expresión IV.8 del capítulo IV, que relaciona el valor de la fracción difusa con el índice de claridad de cada día. Ver Tabla B.11 en el Anexo B.

Después de este proceso se dispone de la serie completa de datos diarios de fracción difusa desde el 7-06-1999 hasta el 31-12-2009, del cual se utilizarán los datos hasta el 31 de diciembre de 2008 (8 años y medio) para el ajuste de un modelo ARIMA, y el año 2009 para validación.

#### **III.12.2. Análisis de la estacionariedad y posible transformación de la serie.**

La aproximación a los procesos estocásticos con modelos AR o MA está restringida, en términos generales, a aquellos procesos estocásticos que cumplan, al menos en sentido débil, la condición de estacionariedad (ver Anexo A). De este modo la segunda fase comprende el análisis de la estacionariedad en media y varianza de las series antes de proceder a la identificación de la estructura del proceso estocástico.

El análisis de la estacionariedad en varianza es difícil de comprobar gráficamente, sin embargo en algunas series se puede apreciar un aumento de la variabilidad con el nivel de la serie, para confirmar esa relación se hace un gráfico entre una medida de la variabilidad, como la desviación típica, y una medida del nivel, como la media local, si existe una relación lineal entre ambas, tomando logaritmos se consigue una serie con variabilidad constante. Esta transformación fue necesaria en varias de las series de esta tesis, es un caso particular de una familia de transformaciones más generales que se conocen como transformaciones de Box-Cox (Peña, 2010), con las que se consigue estabilizar la varianza de la serie y aproximar su distribución a una normal.

Si una serie no es estacionaria en media, presenta tendencia creciente o decreciente, la transformación habitual es tomar diferencias, al diferenciar una vez una serie  $x_t$  con T observaciones se obtiene una nueva serie  $y_t$  de T-1 observaciones definida como

$y_t = x_t - x_{t-1}$  para  $t=2,3,\dots,T$ , si la nueva serie presenta media constante y es estacionaria, se dice que  $x_t$  es una serie integrada de orden uno, siendo el orden de integración el número de diferencias necesarias para obtener un proceso estacionario.

Habitualmente la media se estabiliza para  $d \leq 2$ , las series que precisan una transformación en diferencias (integración) para convertirse en series estacionarias en varianza se denominan series Integradas de orden  $d$  y se representan como  $I(d)$ .

Las series con estacionalidad, es decir, aquellas en las que el valor esperado no es constante pero varía con una pauta cíclica no son estacionarias en media, este es el caso de los datos de irradiación solar, debido a la rotación de la Tierra alrededor del Sol, presentan ciclo anual de valores mensuales (los valores diarios medios mensuales presentan medias similares para el mismo mes de diferentes años), y también de valores diarios (los datos diarios correspondientes a un día determinado del año son similares a los del mismo día de diferentes años). En este caso se puede convertir la serie estacional en estacionaria, aplicando una *diferencia estacional*, la nueva serie de  $T$ -s observaciones es  $y_t = x_t - x_{t-s}$ , en nuestro caso  $s=365$  para series diarias o  $s=12$  para series mensuales.

### III.12.3. Identificación del modelo.

En esta fase se trata de analizar los datos y cualquier información de cómo se genera la serie temporal objeto de estudio, para sugerir un conjunto reducido de posibles modelos que puedan ajustarse a los datos, se trata de determinar los órdenes  $p$ ,  $d$  y  $q$  de la parte regular y los órdenes  $P$ ,  $D$  y  $Q$  de la estacional. Se observan siempre los correlogramas de la función de autocorrelación (ACF) y de la función de autocorrelación parcial (ACFP), pues sus características ofrecen una orientación para la formulación de los posibles modelos, las definiciones de estas dos funciones y las pautas a seguir para la identificación del modelo se recogen en el Anexo A.

### III.12.4. Estimación de los parámetros del modelo

Se pueden utilizar dos métodos para la estimación de los parámetros del modelo: método de maximización de la función de verosimilitud y método de minimización de la suma de los residuos al cuadrado, en ambos se utilizan algoritmos iterativos de estimación no lineal, los programas informáticos de estadística como el SPSS<sup>®</sup> y el Eviews<sup>®</sup>, que son los utilizados en la realización de este trabajo, una vez seleccionado un modelo, proporcionan directamente los valores estimados de los parámetros del mismo.

### III.12.5. Validación y selección del modelo

En esta fase se aplican criterios de validación para asegurar la validez e idoneidad del modelo y la efectividad de las predicciones. Los criterios de validez, se refieren, por una parte a la validez de los coeficientes obtenidos y, por otra al término de error.

Para cada modelo ha de considerarse la significatividad de los parámetros individuales de los coeficientes estimados, aquellos que no sean significativamente distintos de cero, a un nivel de significación del 5%, no son necesarios, por lo que deben eliminarse.

En cuanto a los residuos ha de comprobarse que verifican las siguientes hipótesis (Peña 2010).

1. Media marginal igual a cero, ó significativamente no distinta de cero
2. Varianza marginal constante
3. Falta de correlación para cualquier retardo
4. Distribución normal

De estas cuatro condiciones, la (3) es central por lo que existen numerosos contrastes sobre las correlaciones para comprobarla, la condición (1) es poco restrictiva, es posible que el modelo sea incorrecto y sin embargo se verifique, la condición (2) es más fuerte, y la condición (4) es conveniente, porque nos garantiza que la incorrelación implica la independencia, y que no falta información por modelar. En resumen, a los residuos se les exige que se comporten como *ruido blanco* (ver Anexo A).

El procedimiento habitual para verificar la incorrelación de los residuos es dibujar dos líneas paralelas a distancia  $\pm 2/\sqrt{T}$  (T es la longitud de la serie) del origen, en sus funciones de autocorrelación simple o parcial, y comprobar si todos los coeficientes están dentro de estos límites de confianza. Un valor próximo a los límites de confianza en los retardos pequeños es un indicio de que el modelo es inadecuado.

Además de este procedimiento, el contraste de Ljung-Box sobre las autocorrelaciones nos permite obtener un estadístico de contraste global de que los primeros h coeficientes son cero.

Este estadístico está definido por la expresión (III.15), en la que  $r_k$  es el coeficiente de autocorrelación para el retardo k (Peña, 2010):

$$Q(h) = T(T + 2) \sum_{k=1}^h \frac{r_k^2}{T - k} \quad (\text{III.15})$$

$Q(h)$  se distribuye asintóticamente como una  $\chi^2$  con grados de libertad igual al número de coeficientes en la suma,  $h$ , menos el número de parámetros estimados en el modelo,  $n$ . Se concluye que el modelo es inadecuado si el valor de  $Q(h)$  es mayor que el percentil 0,95 de la distribución  $\chi^2$  con  $h-n$  grados de libertad.

Los programas SPSS® y Eviews® ofrecen en los correlogramas el valor del estadístico  $Q(h)$  para cada retardo  $k$  con la hipótesis nula de ausencia de correlación hasta el orden  $k$  y su  $p$ -valor asociado, de tal forma que si al calcular los correlogramas residuales para un número suficiente de retardos, la mayor parte de los  $p$  valores están por encima de 0,05 se puede afirmar que los residuos están incorrelados.

En el caso de que los residuos no se comporten como ruido blanco, es preciso volver a estimar otro modelo, el análisis de los valores significativos en las funciones de autocorrelación de los residuos sirven de guía para corregir el modelo de la serie.

Se comprueba también el valor de  $R$  cuadrado, calculado según la expresión (III.14), que proporciona la medida en que el modelo se ajusta a los datos.

Si varios modelos describen satisfactoriamente la serie, una ayuda para seleccionar el modelo apropiado es tener en cuenta el principio de parsimonia, hay varios criterios como el Criterio de Información de Akaike (AIC) ó el Criterio de Información de Bayes (BIC) que permiten cuantificar este principio, penalizando los modelos con más parámetros.

La selección entre diferentes modelos se basa en elegir los que presenten menores valores de AIC ó BIC, es importante que el número de datos de la serie sea el mismo para todos los modelos que se comparan. Las expresiones para estos parámetros utilizadas por Eviews® se muestran a continuación:

$$\begin{aligned} AIC &= -2 \frac{l}{T} + 2 \frac{k}{T} \\ BIC &= -2 \frac{l}{T} + \frac{k \ln(T)}{T} \end{aligned} \quad (\text{III.16})$$

Siendo:

$$l = -\frac{T}{2}(1 + \ln(2\pi) + \ln(\sigma^2))$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T (x_i - \hat{x}_i)^2 \quad (\text{III.17})$$

Donde T es la longitud de la serie utilizada para estimar el modelo y k es el número de parámetros del modelo y  $\sigma^2$  es la varianza de los errores.

### III.12.6. Predicción

Una vez obtenido el modelo y comprobada su validez se puede proceder a predecir. Los modelos ARIMA proporcionan no solo predicciones puntuales sino la distribución de probabilidad completa para los valores futuros de la serie. Las predicciones se obtienen de forma recursiva a partir del modelo ARIMA calculado.

Si se dispone de datos hasta el tiempo T y se quieren obtener 12 predicciones, una para cada uno de los 12 meses siguientes,  $x_{T+k}$ ,  $k=1, \dots, 12$ .

La predicción óptima de  $x_{T+k}$ ,  $\hat{x}_T(k)$ , es el valor esperado de  $x_{T+k}$  condicionado a que se conoce  $x_1, \dots, x_T$ , es decir:

$$\hat{x}_T(k) = E[x_{T+k} / x_T] \quad k = 1, \dots, 12 \quad (\text{III.18})$$

Donde T representa el origen de la predicción y k el horizonte de la misma. Las fórmulas correspondientes a las predicciones que se quieren obtener, tomando por simplicidad un modelo ARIMA(p,d,q), con d=1 son:

$$x_{T+k} = \hat{\mu} + x_{T+k-1} + \hat{\phi}_1(x_{T+k-1} - x_{T+k-2}) + \dots + \hat{\phi}_p(x_{T+k-p} - x_{T+k-1-p})$$

$$+ \hat{a}_{T+k} - \hat{\theta}_1 \hat{a}_{T+k-1} - \dots - \hat{\theta}_q \hat{a}_{T+k-q} \quad (\text{III.19})$$

Donde  $(\hat{\mu}, \hat{\phi}_1, \dots, \hat{\phi}_p, \hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_q)$  es el conjunto de parámetros estimados para el modelo, y tomando esperanzas condicionadas en la expresión anterior, resulta la ecuación de predicción siguiente:

$$\hat{x}_T(k) = \hat{\mu} + \hat{x}_T(k-1) + \hat{\phi}_1(\hat{x}_T(k-1) - \hat{x}_T(k-2)) + \dots + \hat{\phi}_p(\hat{x}_T(k-p) - \hat{x}_T(k-1-p))$$

$$+ \hat{a}_T(k) - \hat{\theta}_1 \hat{a}_T(k-1) - \dots - \hat{\theta}_q \hat{a}_T(k-q) \quad (\text{III.20})$$

Donde

$\hat{x}_T(j) = x_{T+j}$  si  $j \leq 0$  es el valor de la serie  $x_t$  en el instante  $T+j$

$\hat{x}_T(j) = \hat{x}_{T+j}$  si  $j > 0$  es la predicción obtenida para la serie  $x_t$  en el instante  $T+j$

$\hat{a}_T(j) = \hat{a}_{T+j}$  si  $j \leq 0$  es el valor de la serie  $\hat{a}_t$  en el instante  $T+j$

$\hat{a}_T(j) = 0$  si  $j > 0$

Hay que hacer notar que para un horizonte de predicción mayor que 1, los valores de la serie que intervienen en la parte derecha de la ecuación (III.20) pasan a ser las predicciones obtenidas para la serie, ello implica que al aumentar el horizonte de predicción se incrementan los errores del modelo, para evitar este inconveniente las predicciones generadas para cada serie se han realizado con horizonte 1 (predicción a un paso).

Alguna de las ventajas de los modelos ARIMA es que el mecanismo de búsqueda de los modelos es más o menos rápido gracias al uso del ordenador, así a partir del momento en que se encuentra el modelo, tanto SPSS<sup>®</sup> como Eviews<sup>®</sup> permiten obtener directamente los resultados de esta etapa y comprobar gráficamente la bondad del modelo seleccionado.

La cuantificación de los errores cometidos en las predicciones, se suelen hacer mediante la Raíz Cuadrada del Error Cuadrático Medio (RECM), el Error Medio (EM) y el Error Absoluto Medio Porcentual (EAMP). Estos indicadores, definidos anteriormente según las expresiones (III.9), (III.10) y (III.11), se calculan tanto para el período de estimación o ajuste como para el período de predicción.

Se han aplicado sobre las series de predicciones para el año 2009, dos pruebas no paramétricas de contraste: la prueba U de Mann-Whitney y la prueba de las medianas, para muestras independientes, la primera permite comprobar si dos muestras presentan distribuciones homogéneas, y la segunda verifica que ambas muestras proceden de poblaciones con la misma mediana. En nuestro caso se trata de confirmar que las predicciones pueden considerarse pertenecientes a la misma población que las series medidas.

Se utilizaron estos contrastes no paramétricos porque no establecen supuestos sobre las distribuciones de los datos. Ambos test se calcularon con SPSS<sup>®</sup>, aunque en el caso de las series mensuales, su limitado número de muestras impide ofrecer resultados de la prueba U.

### III.12.7. Detección de valores atípicos.

La detección de posibles valores atípicos en las series analizadas junto a la modelización de estos valores constituye una mejora a tener en cuenta, dado que en algunos casos es posible que un error de medida distorsione la estructura de la serie, si su efecto es grande provocará un sesgo en la estimación de los parámetros, y si esta observación se utiliza para realizar predicciones, aunque los parámetros sean correctos también sesgará las predicciones.

En este trabajo la detección de atípicos se llevó a cabo de forma automática en el caso de las series mensuales, pues el programa Eviews<sup>®</sup> implementa esta opción, sin embargo esto no es posible con series de período 365, para las cuales es preciso inspeccionar los residuos en busca de valores especialmente altos (positivos o negativos) e introducir en el modelo los instantes temporales en que tienen lugar como atípicos aditivos, incorporándose al mismo si la estimación de sus coeficientes resulta significativa, o descartándose si no lo es.

Si se detectan valores atípicos se pueden incorporar sus efectos al modelo de la serie como se indica a continuación. Sea una serie  $x_t$  que, por simplificar, siga un proceso ARMA(p,q):

$$x_t = \frac{\theta_q(B)}{\phi_p(B)} a_t \quad (\text{III.21})$$

Un modelo de la serie que incluye los efectos de varios tipos de outliers podría expresarse como sigue (Pérez 2006):

$$y_t = \sum_{j=1}^k \omega_j v_j(B) I_{jt} + x_t = \sum_{j=1}^k \omega_j v_j(B) I_{jt} + \frac{\theta_q(B)}{\phi_p(B)} a_t \quad (\text{III.22})$$

Siendo:

$$v_j(B) = \begin{cases} 1 & \text{para AO} \\ \frac{\theta_q(B)}{\phi_p(B)} & \text{para IO} \\ \frac{1}{1-B} & \text{para LS} \\ \frac{1}{1-\delta B} & \text{para TC} \end{cases} \quad (\text{III.23})$$

Donde AO es atípico aditivo, IO atípico innovativo, LS atípico de cambio de nivel y TC atípico de cambio transitorio, definidos en el Anexo A.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN.**



## IV.1. Caracterización de la irradiación.

### IV.1.1. Caracterización de la irradiación global en plano horizontal.

La Figura IV.1 presenta los datos de irradiación global diaria agrupados por meses, el diagrama de caja nos muestra los valores mínimo, máximo, mediana y, el primer y tercer cuartil, para cada mes del año, también aparecen señalados los valores situados fuera del rango intercuartílico, considerados como outliers.

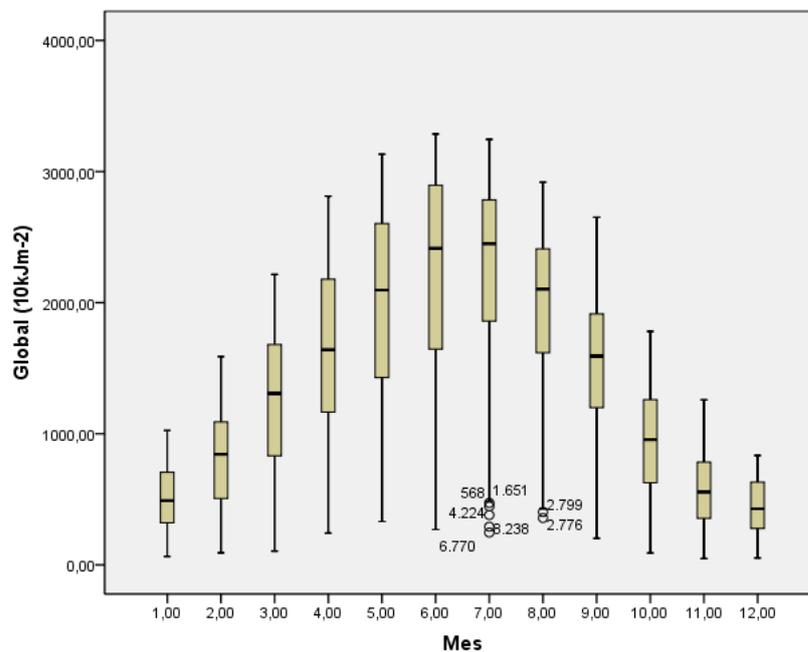


Figura IV.1. Diagrama de caja de la serie irradiación global diaria

Se aprecia la evolución de la global propia de un período anual, los valores máximos se alcanzan en junio y los mínimos en diciembre, la amplitud intercuartílica es menor para los 6 últimos meses del año respecto a los simétricos 6 primeros del año.

Respecto a los outliers detectados en los meses de julio y agosto, dado que en todos los casos se trata de valores situados bajo el límite inferior, se decide analizarlos en detalle pues no necesariamente han de corresponder a valores erróneos. Para los dos días situados en 2003 y 2007, se analizan en conjunto la información de los otros dos sensores de irradiación (difusa y directa) y los registros diarios de precipitación, y se

detecta que los registros de difusa coinciden con los de global, la irradiación directa es nula; y además el valor de precipitación diaria, 49 y 32 mm respectivamente, indica que se trata de días nublados y lluviosos, que no son raros en esta zona aun en los meses de verano, de modo que se decide conservar estos valores, ya que no hay evidencias de que sean erróneos, y puesto que las demás fechas presentan valores similares o incluso superiores también se mantienen.

Se han obtenido los histogramas diarios mensuales. El número de datos con los que se calcula cada histograma oscila entre 687 y 762.

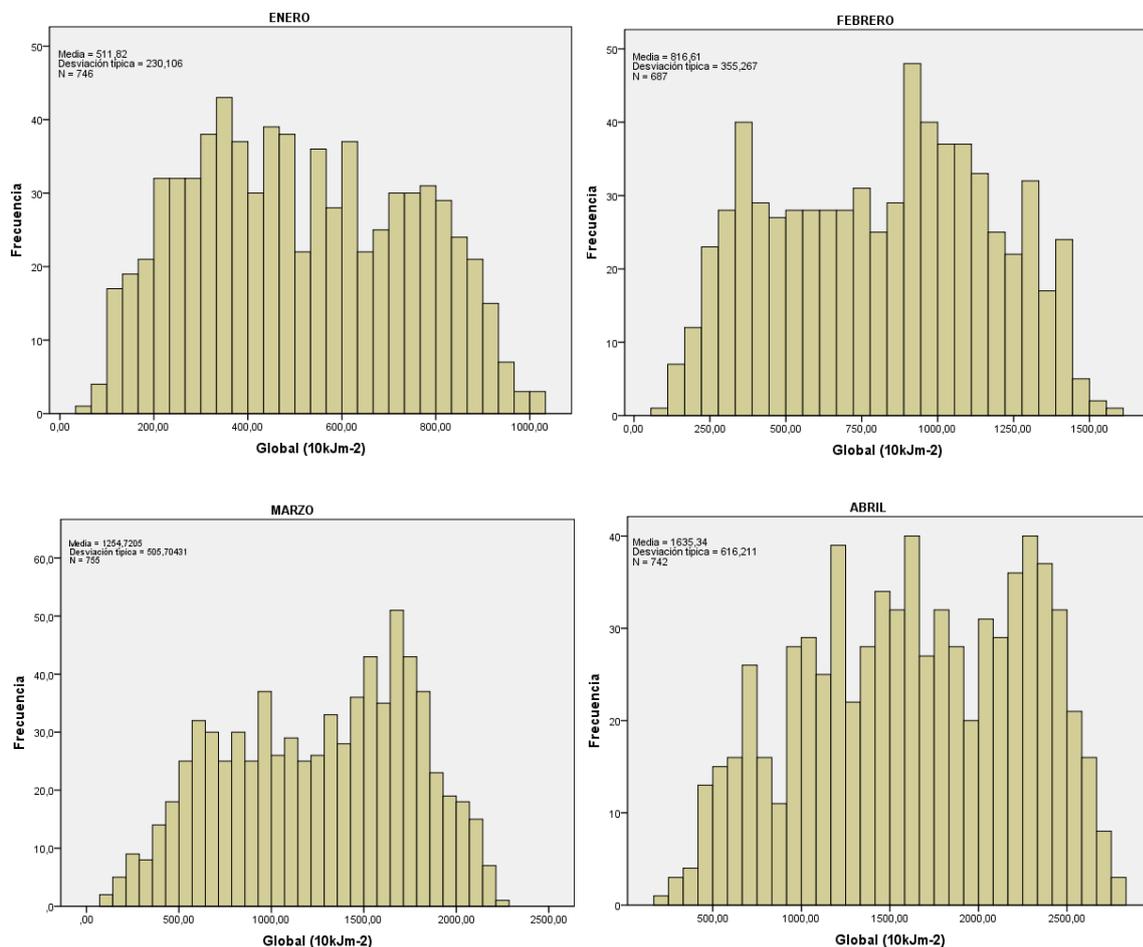


Figura IV.2.a. Histogramas de irradiación global diaria. Meses de enero a abril.

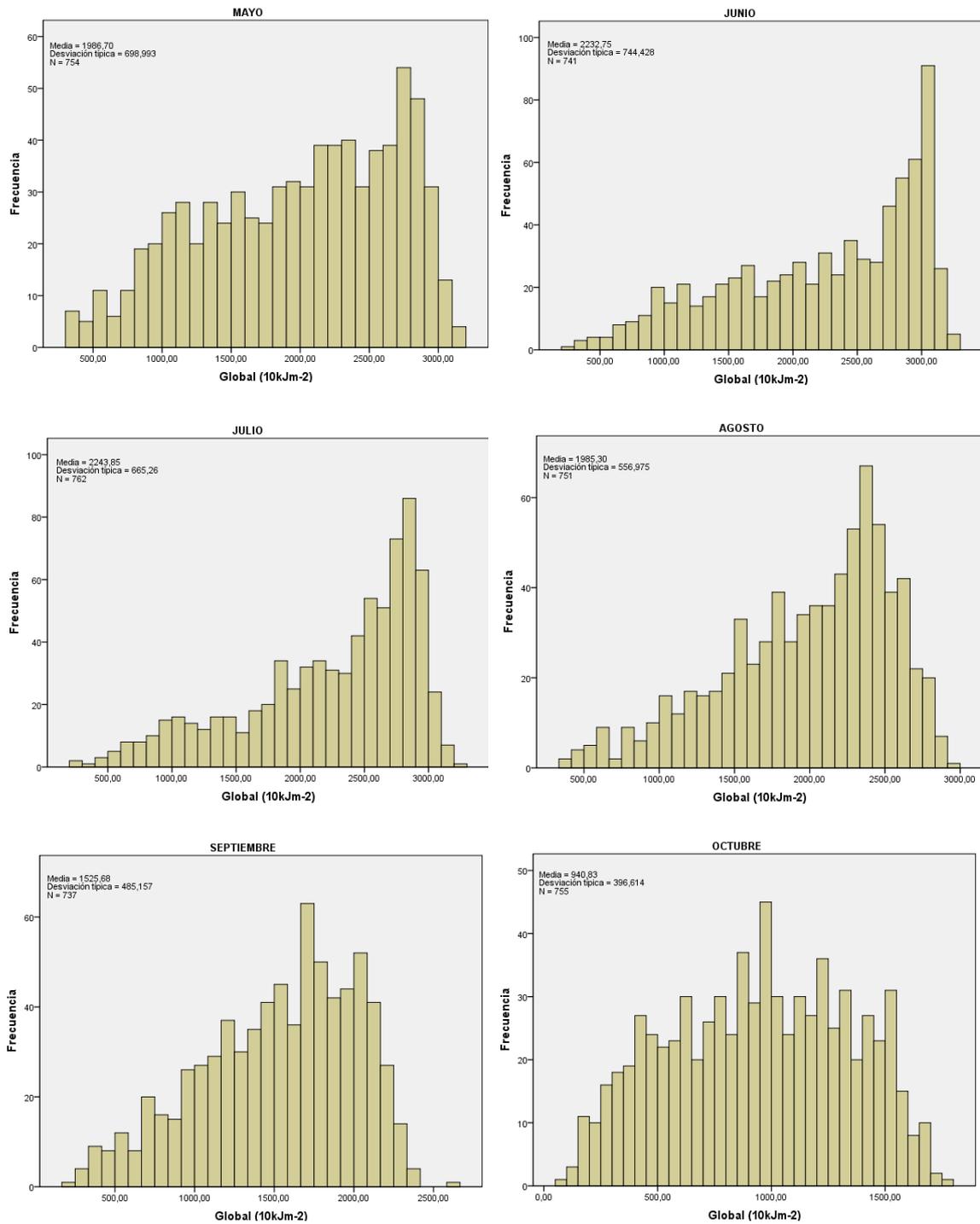


Figura IV.2.b. Histogramas de irradiación global diaria. Meses de mayo a octubre.

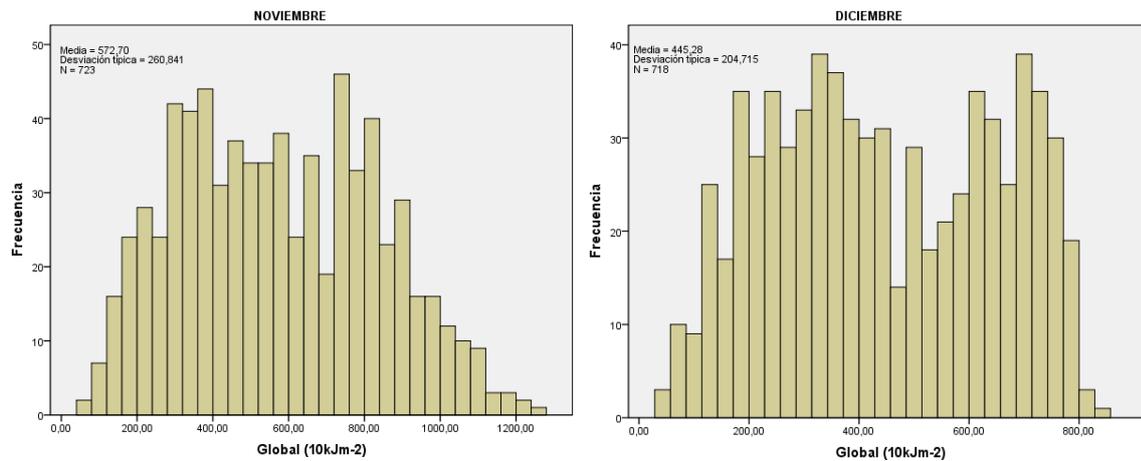


Figura IV.2.c. Histogramas de irradiación global diaria. Meses de noviembre y diciembre.

Las pruebas de normalidad no indican que la distribución de ningún mes se pueda considerar normal (Tabla C.2 en Anexo C). Atendiendo a los valores de asimetría y curtosis (Tabla C.1 en Anexo C) y según el criterio establecido en la Tabla III.3 del capítulo III, tenemos los meses agrupados en dos conjuntos: el final de la primavera y los meses de verano corresponden a una distribución casi normal con cola negativa (tipo IV), muy adecuada para el aprovechamiento de la energía solar, y el resto del año se correspondería con la distribución bimodal simétrica platicúrtica (tipo VI).

El valor medio diario en verano oscila entre los  $1.500 \text{ 10kJm}^{-2}$  de septiembre y los  $2.244 \text{ 10kJm}^{-2}$  de julio, en invierno los valores más bajos,  $400 \text{ 10kJm}^{-2}$ , corresponden a los meses de Diciembre y Enero.

Se ha calculado también el valor promedio diario de radiación global para cada día del año, considerando en todo el período (1985-2009) los valores diarios disponibles, el mínimo número de datos utilizado es 22 para algunos días del año, en la Figura IV.3 se muestra junto a la radiación extraterrestre, los valores máximos y mínimos absolutos para cada día del año a lo largo de los 25 años, y un límite superior fijado por la curva de radiación extraterrestre atenuada suponiendo que la transmisividad de la atmósfera es de 0,8. Esta curva proporciona una estimación de la irradiación global a nivel del mar suponiendo cielo despejado y atmósfera clara, puede utilizarse para chequear la evolución de la irradiación solar global para días claros durante todo el año. El valor de transmisividad seleccionado coincide con el utilizado por otros autores para la península ibérica (Vera Mella 2005).

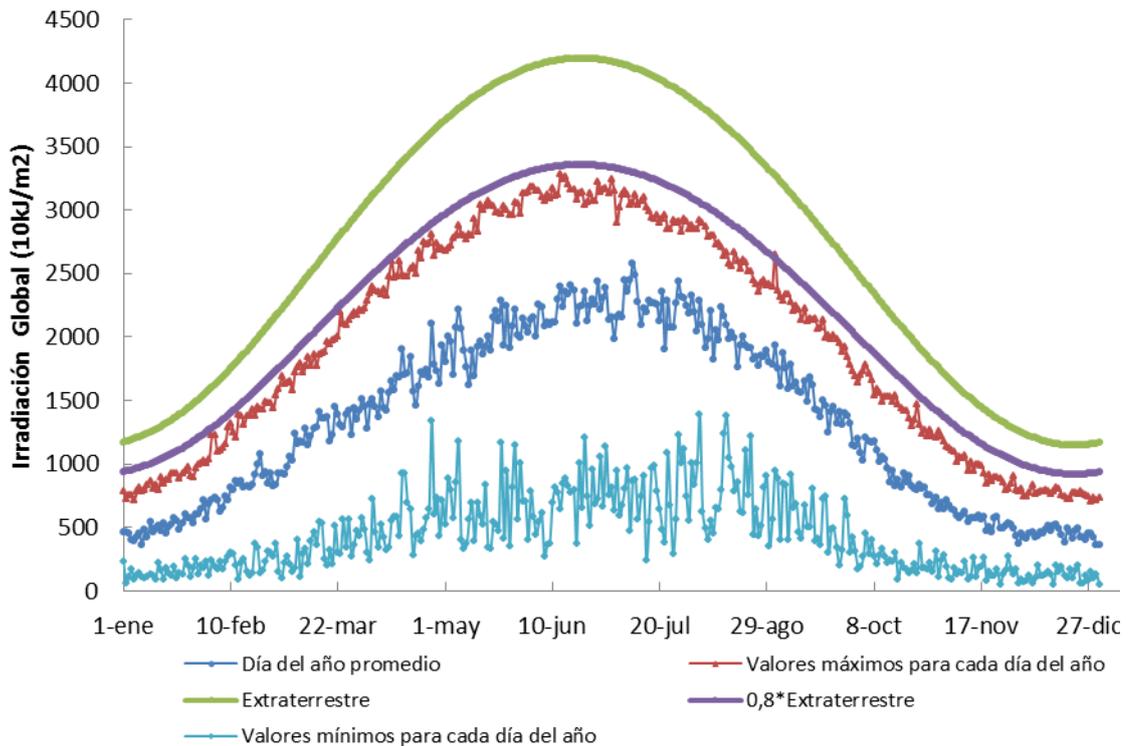


Figura IV.3. Análisis de irradiación global diaria (1985-2009)

Se aprecia que el valor máximo registrado el día 244 (1 de septiembre) sobrepasa el umbral establecido del 80% de la irradiación extraterrestre, en concreto ese máximo se registró el 1 de septiembre de 1985, día en el que resulta una transmisividad de 0,81, además es el único día a lo largo de los 25 años que alcanza ese valor.

Este caso se analizó en detalle haciendo una comparativa del resto de variables como la precipitación, temperatura máxima y las horas de sol para varios primeros de septiembre en los que el valor de global era también alta, y se comprobó que hay varios años en los que el 1 de septiembre se registra prácticamente el doble de horas de sol que en 1985, en el que se midieron 6,3 horas, y las temperaturas máximas fueron más altas, sin que los valores de transmisividad diaria superen el umbral de 0,8.

Por otra parte, en la etapa de filtrado en ese día se había descartado el valor horario correspondiente a las 6 h, por superar el valor de extraterrestre para esa hora. De todo ello se deduce que la irradiación del 1 de septiembre de 1985 es un caso atípico.

También se aprecia una ligera elevación de la irradiación global hacia el final del año, en la segunda quincena de diciembre, y los primeros días de enero, este incremento

está directamente relacionado con el que sufren las horas de sol en las mismas fechas (Figura IV.4).

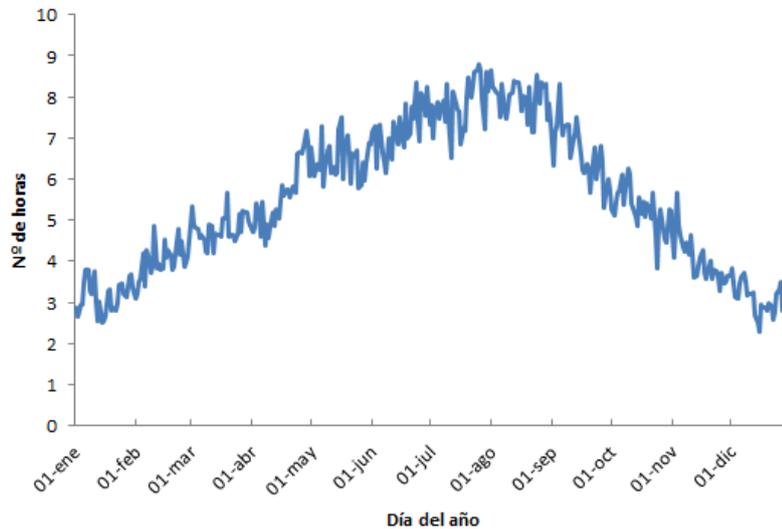


Figura IV.4. Horas de sol. Valor medio diario (1951-2010)

La evolución del valor diario medio mensual se muestra en la Figura IV.5, este valor oscila entre los 440  $10\text{kJm}^{-2}$  de Diciembre y los 2240  $10\text{kJm}^{-2}$  de Julio, el valor medio de la irradiación global en días claros es muy próximo a la media de los máximos (media de 25 valores para cada mes). Se ha tomado como criterio de selección de días claros el de Iqbal, reflejado en la Tabla III.4 del capítulo III. El amplio margen entre la media de los mínimos y la de los máximos, incluso en los meses de verano, ofrece la evidencia del carácter inestable de la radiación solar en A Coruña.

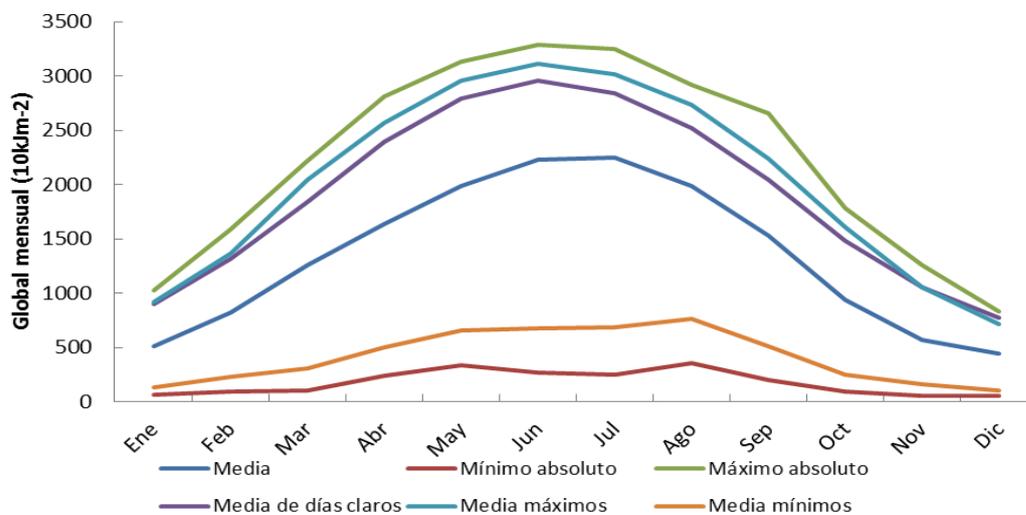


Figura IV.5. Análisis de irradiación global diaria media mensual (1985-2009)

Se ha obtenido, para cada año, el total de irradiación global recibida, resultando un valor total anual medio aproximado de  $4809 \text{ MJ/m}^2$ , la representación de estos totales en el gráfico de barras de la Figura IV.6 no parece indicar ninguna tendencia, aunque los últimos 3 años la irradiación recibida está por debajo de la media, especialmente el año 2008 que se encuentra un 5% por debajo de ese valor, y destaca el 2004 con el valor máximo de los 25 años. Figuran en rojo los años para los que el número de datos perdidos es mayor de 20 días.

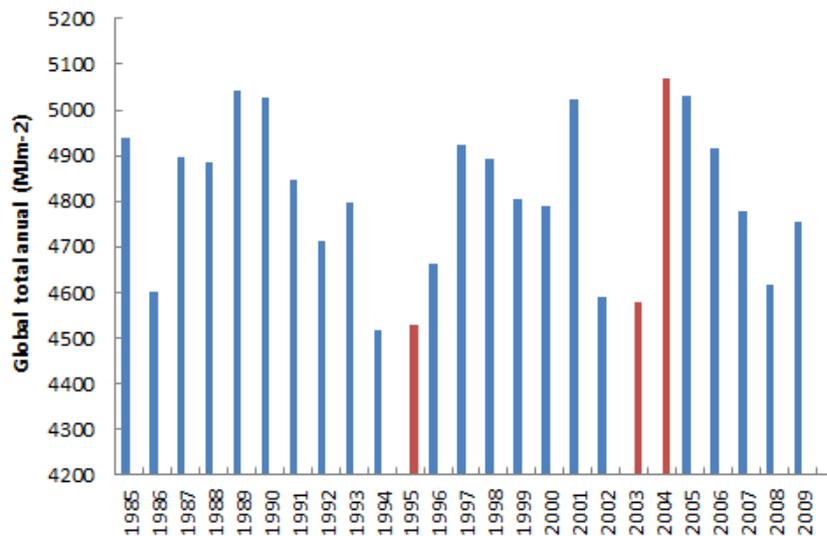


Figura IV.6. Irradiación global total anual (1985-2009)

En la Figura IV.7 se muestra el valor medio de cada intervalo de 365 días naturales, utilizando la media móvil con desplazamiento de 1 día, con el mismo objetivo anterior de evaluar posibles tendencias, la irradiación media diaria es aproximadamente constante de valor  $1350 \text{ 10kJm}^{-2}\text{día}^{-1}$ , y el único incremento apreciable corresponde al año 2004.

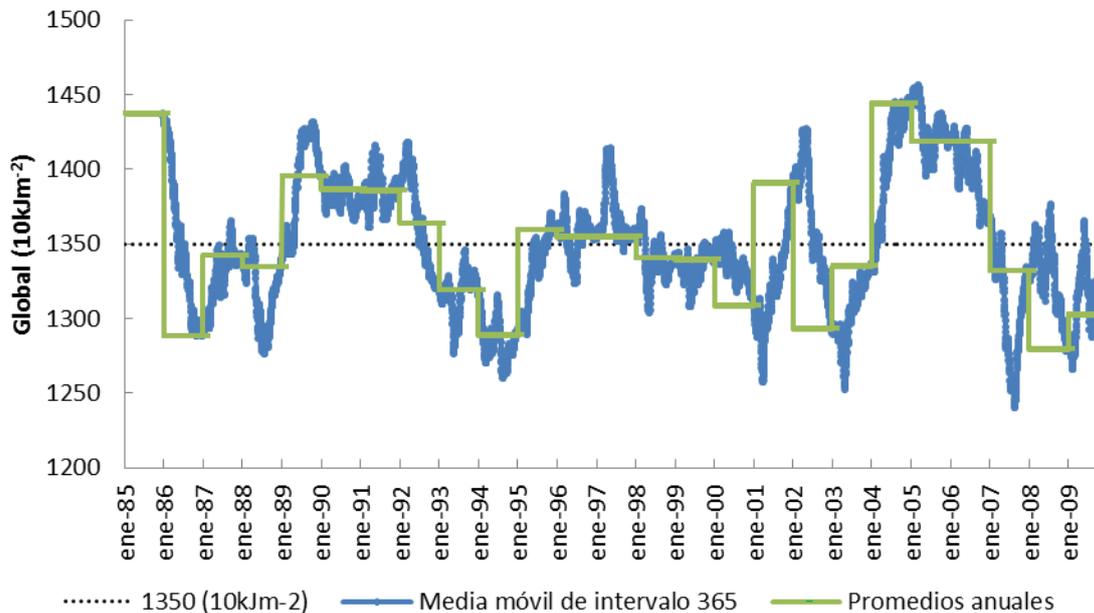


Figura IV.7. Evolución de la irradiación global diaria (1985-2009)

#### IV.1.2. Caracterización de la irradiación difusa en plano horizontal.

El análisis de los datos de irradiación difusa agrupados por meses se muestra en el diagrama de caja, la distribución mensual es similar a la de irradiación global, los valores más elevados de irradiación difusa se alcanzan en junio.

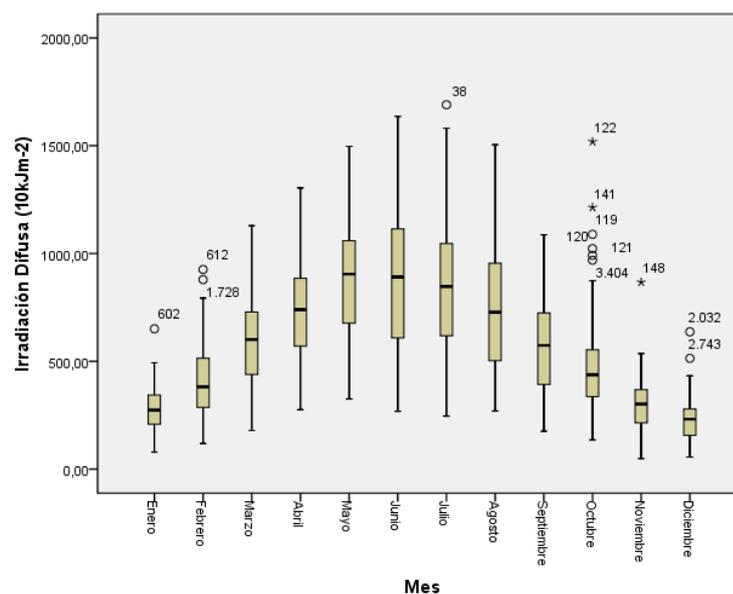


Figura IV.8. Diagrama de caja de la irradiación difusa diaria

En este caso todos los datos atípicos son valores situados por encima del límite superior, tal como se indica en el capítulo III se analizaron estos casos para determinar la posibilidad de un error en la medida del piranómetro de difusa, y teniendo en cuenta que todos los valores son excesivos para el mes considerado y la probable existencia de errores en la medida, se decide descartar las medidas de difusa de estos días. El listado completo de las fechas y valores se encuentra en el Anexo B.

Una vez eliminados estos atípicos, se muestra a continuación el diagrama de caja, la tabla con los principales estadísticos para cada mes se puede consultar en el Anexo C (Tabla C.3).

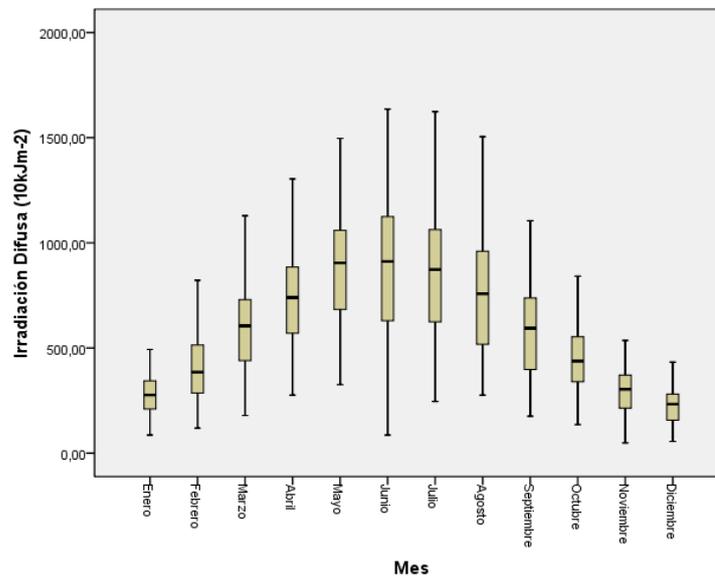


Figura IV.9. Diagrama de caja de la irradiación difusa diaria sin valores atípicos

Las pruebas de contraste de normalidad (Tabla C.4 en Anexo C) indican que podríamos considerar normales enero, marzo, abril, octubre y noviembre, atendiendo a los valores de asimetría y curtosis, y siguiendo la clasificación de la Tabla III.3, la distribución de la irradiación difusa es normal (tipo I) en todos los meses, excepto Junio y Septiembre cuya distribución correspondería a una bimodal simétrica platicúrtica (tipo VI). En las Figuras IV.10.a y IV.10.b se representan los histogramas mensuales con la curva normal ajustada.

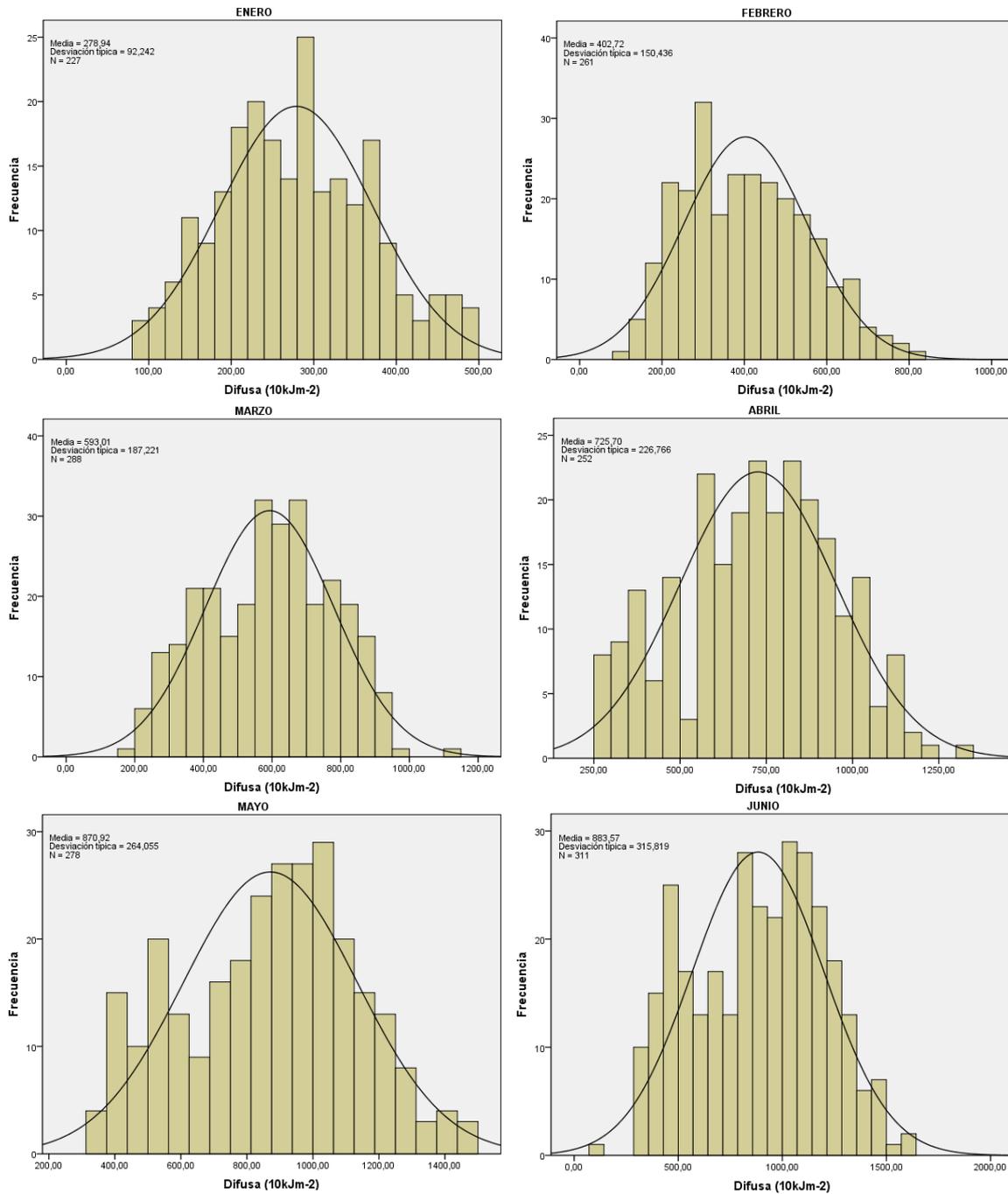


Figura IV.10.a. Histogramas de irradiación difusa diaria. Meses de enero a junio.

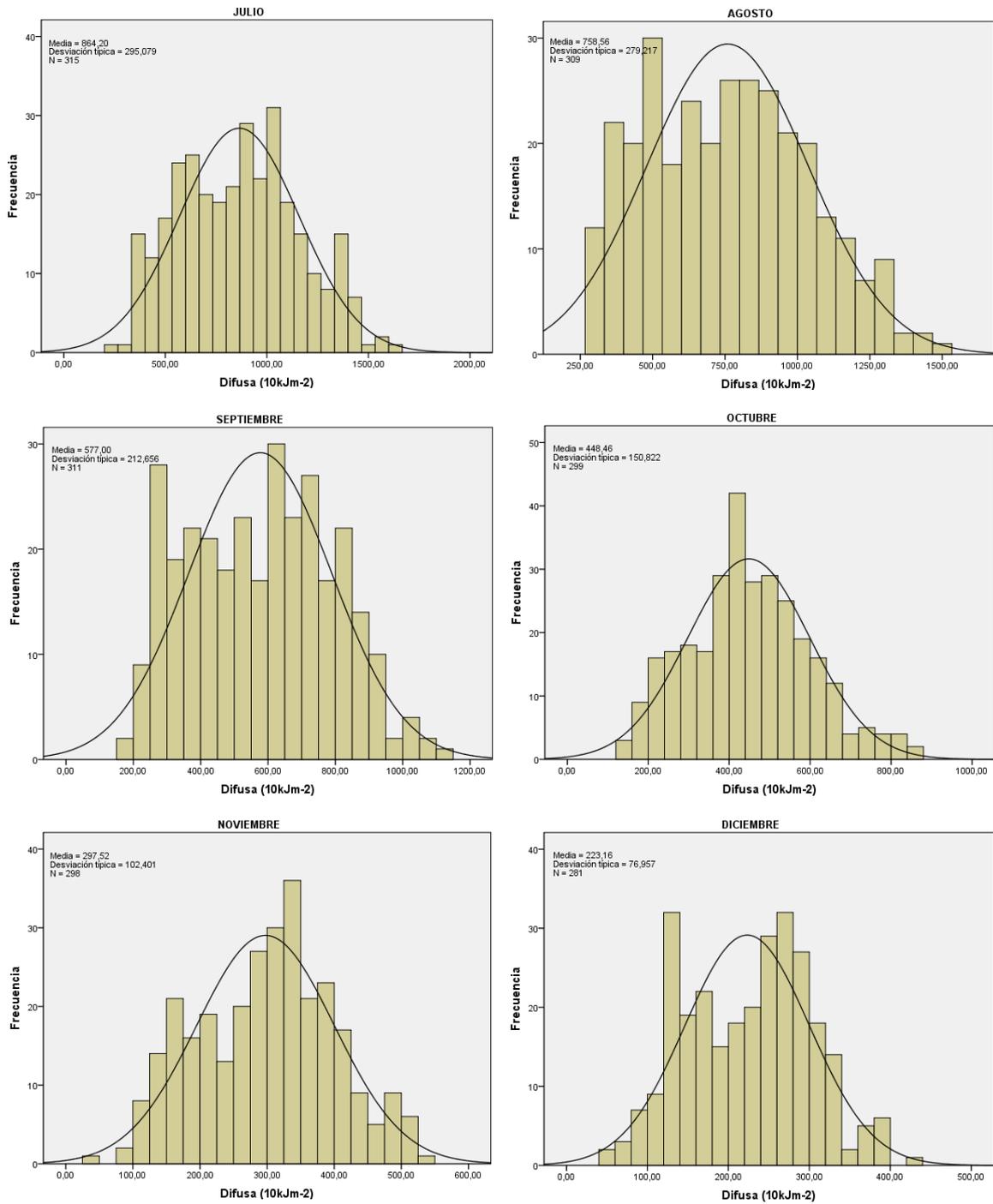


Figura IV.10.b. Histogramas de irradiación difusa diaria. Meses de julio a diciembre.

En la Figura IV.11 se representan los valores medios diarios para cada día del año de la irradiación difusa junto a los de global, así como los valores máximo y mínimo absolutos para cada día; el corto período de datos disponibles de difusa (1999-2009), junto al número de registros perdidos, limita en algunos casos a tan solo 7 días el número de valores diarios que se utilizaron para calcular el valor promedio.

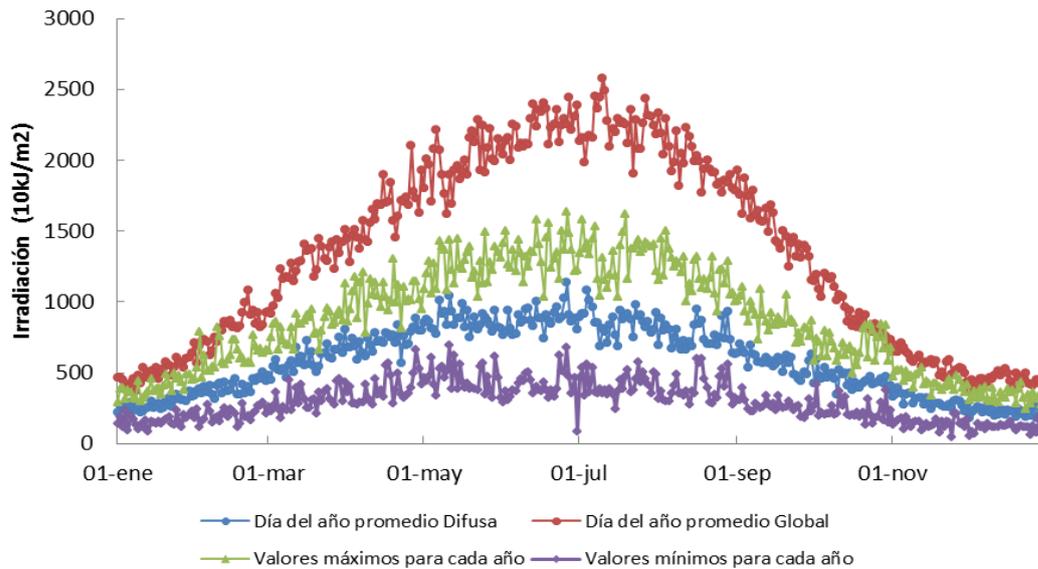


Figura IV.11. Análisis de irradiación difusa diaria (1999-2009).

Los valores medios mensuales, los máximos y mínimos absolutos en el período, y el valor medio en días claros, se muestran en la Figura IV.12. El valor medio oscila entre los  $200\ 10\text{kJm}^{-2}$  en diciembre y los  $900\ 10\text{kJm}^{-2}$  de junio. Los días de cielo claro en invierno presentan valores de difusa que prácticamente coinciden con la media de los mínimos, mientras que entre marzo y agosto esos días no son los de menor irradiación difusa, indicador claro del peso de la contribución de la componente difusa en el total recibido en A Coruña.

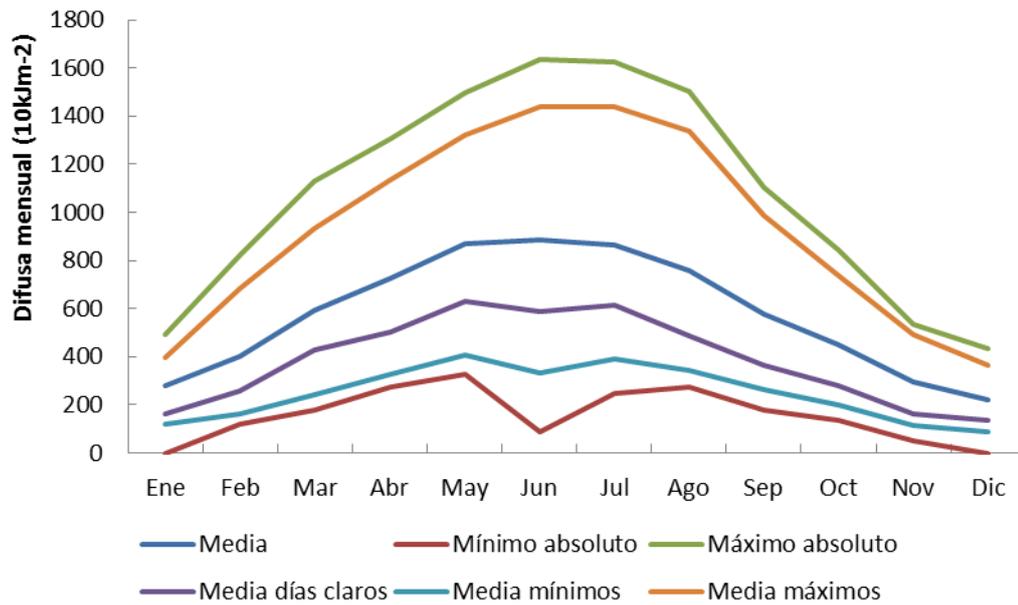


Figura IV.12. Análisis de irradiación difusa diaria media mensual (1999-2009)

#### IV.1.3. Caracterización de la irradiación directa en plano normal.

Atendiendo al problema del desajuste en el seguimiento del sol del equipo de medida que existía hasta diciembre de 2004, comentado en el capítulo III, la serie de datos de irradiación directa, se divide en dos conjuntos: los datos previos a 2005, con baja fiabilidad, y los posteriores a 2005, considerados como fiables. Así pues a continuación se muestra el análisis estadístico descriptivo de la irradiación en plano normal para el período 2005-2009. El diagrama de cajas para la irradiación directa arroja únicamente datos atípicos en el mes de Enero, aunque se filtren estos primeros outliers, si se repite de nuevo el diagrama, resultan otra vez valores fuera del rango en el mismo mes, de modo que el proceso se repetiría una y otra vez. Esto se debe a que la radiación directa es especialmente baja en Enero, la amplitud intercuartílica es muy pequeña y se eleva la probabilidad de que algunos datos queden fuera del intervalo típico. En el histograma de este mes, Figura IV.14.a, se observa que el 17% de los días analizados tienen radiación directa nula, y casi la mitad de los días están por debajo de 100 10kJ/m<sup>2</sup>. De modo que en este caso se decide no eliminar ninguno de estos valores atípicos, por considerarlos correctos.

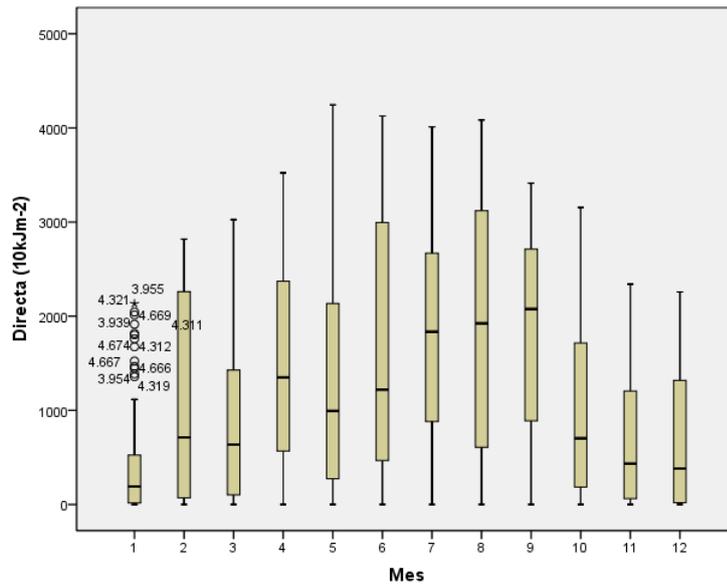


Figura IV.13. Diagrama de caja de la irradiación directa diaria

A continuación se muestran los histogramas de los valores diarios agrupados por meses. Las pruebas de normalidad rechazan la normalidad en todos los meses excepto en el de julio. La distribución preponderante es la leptocúrtica con cola positiva (tipo III), y los meses de verano muestran una distribución bimodal simétrica platicúrtica.

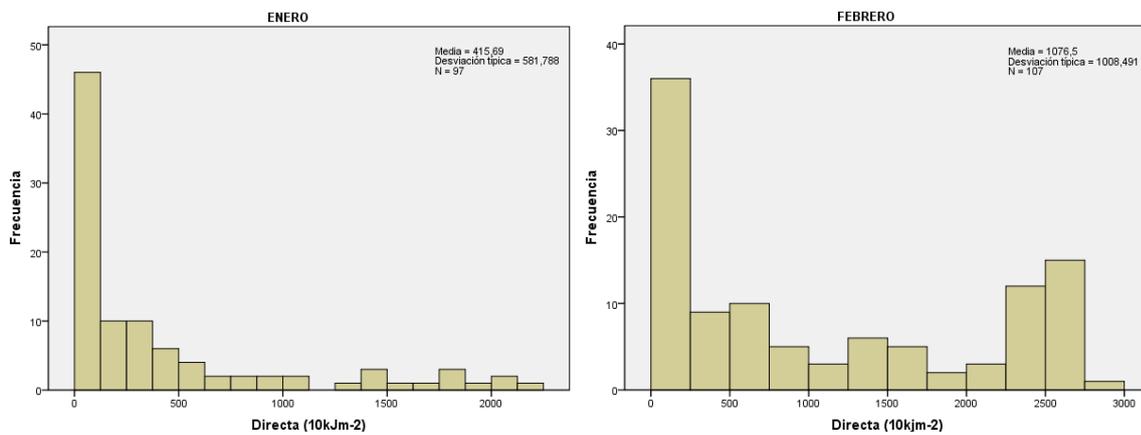


Figura IV.14.a. Histogramas de irradiación directa diaria. Meses de enero y febrero.

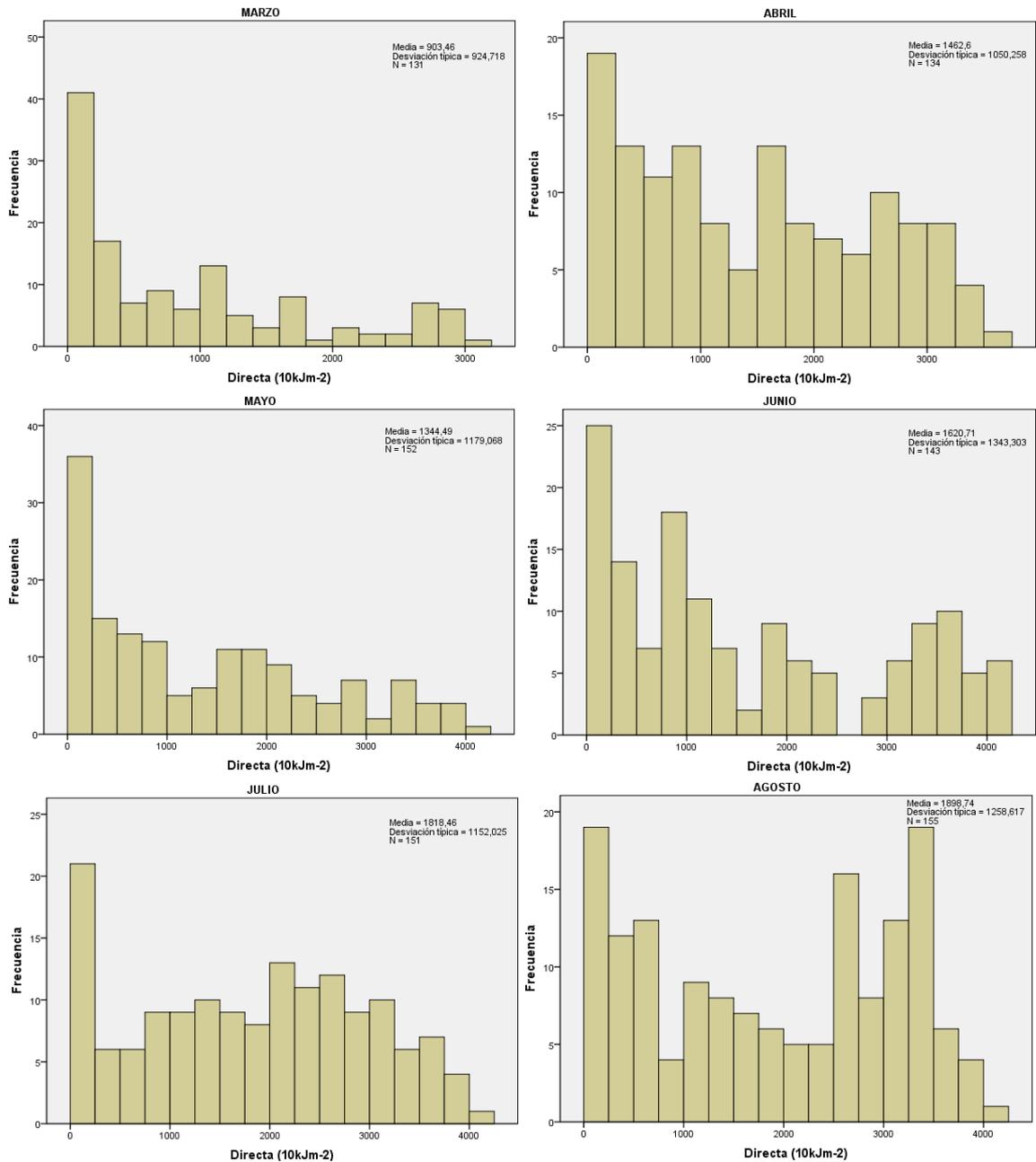


Figura IV.14.b. Histogramas de irradiación directa diaria. Meses de marzo a agosto.

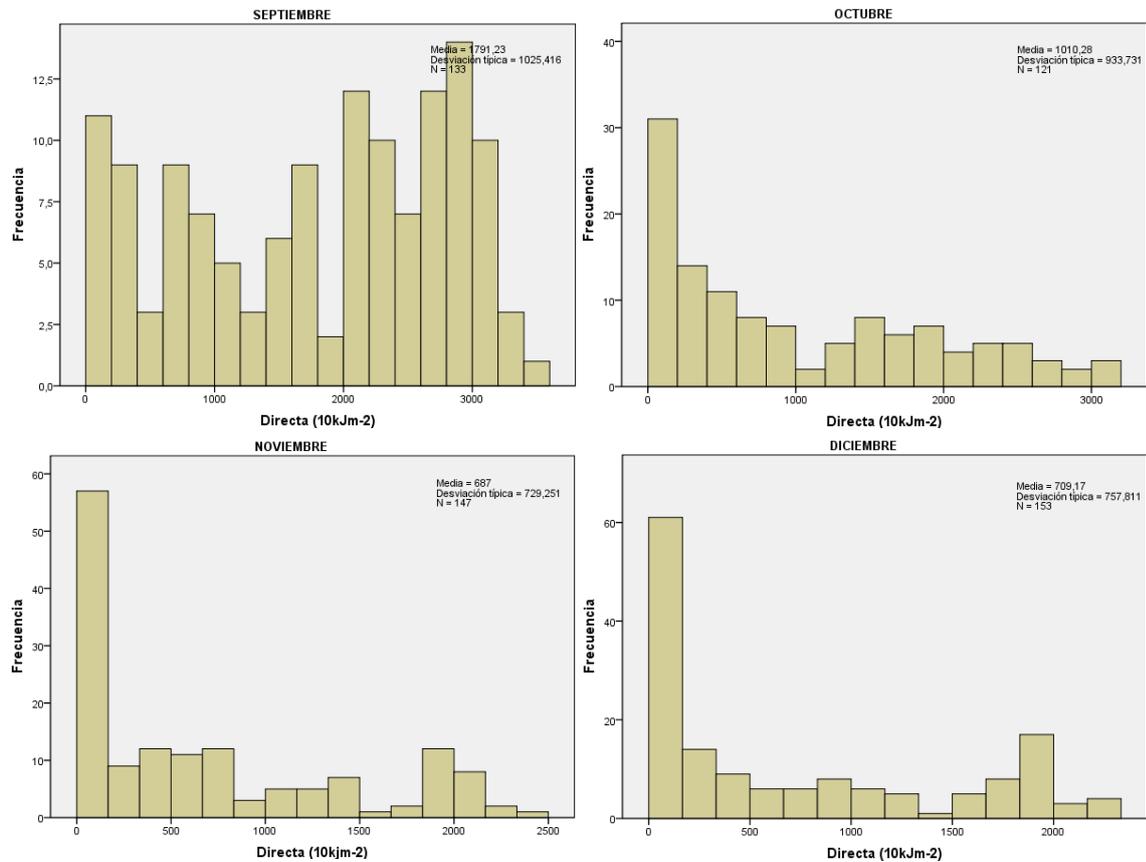


Figura IV.14.b. Histogramas de irradiación directa diaria. Meses de septiembre a diciembre.

En la Figura IV.15 se representa el día del año medio de irradiación directa, junto al máximo y mínimo absolutos para cada día del año. El valor medio diario está comprendido entre los  $424 \text{ 10kJm}^{-2}$  de enero y los  $1899 \text{ 10kJm}^{-2}$  de agosto.

También en este caso se aprecia una elevación clara de la irradiación directa en torno a mediados de diciembre, fenómeno que ya se observó en la irradiación global.

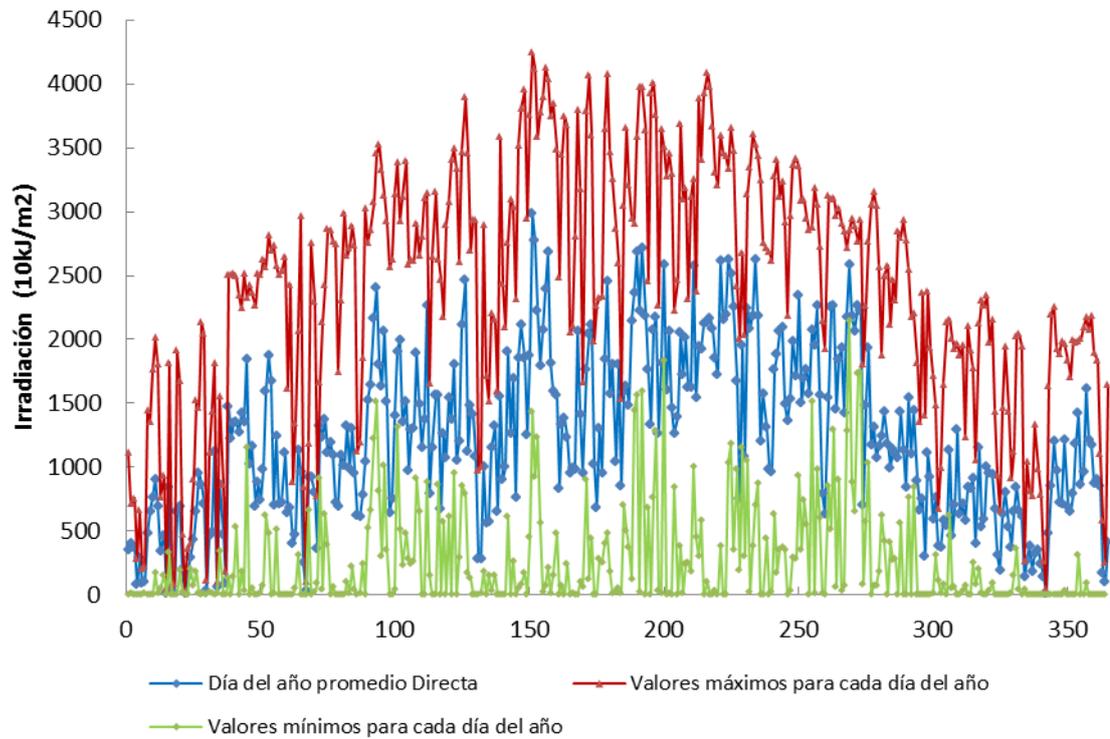


Figura IV.15. Análisis de irradiación directa diaria en plano normal (2005-2009)

En la Figura IV.16 se representan los valores medios mensuales, los máximos absolutos, y los valores medios para días de cielo claro que son muy próximos a la media de los valores máximos.

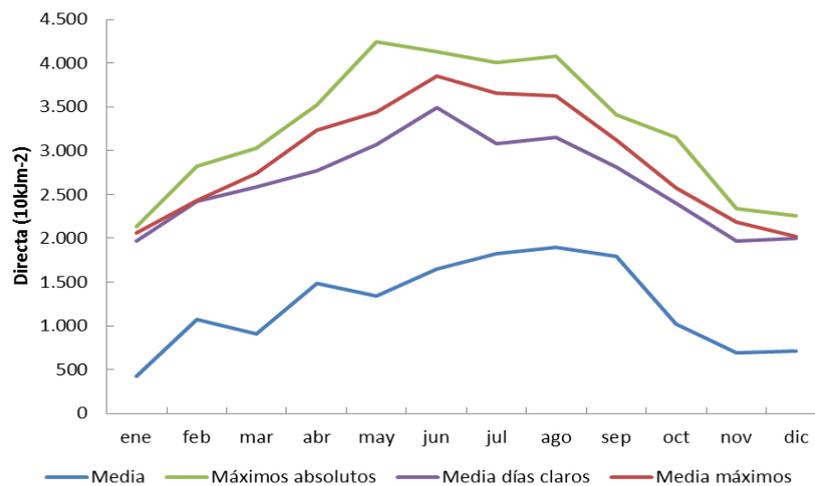


Figura IV.16. Análisis de irradiación directa diaria media mensual en plano normal (2005-2009)

En la gráfica anterior destaca la irregular evolución anual del valor medio, que no sigue la típica forma de campana, el mínimo se produce en enero y los meses de marzo y mayo presentan niveles inferiores a los respectivos anteriores. La media más alta se alcanza en agosto, mientras que septiembre presenta un valor superior incluso al de junio.

La explicación de este comportamiento la encontramos en la Figura IV.17, en la que se han representado los valores medios mensuales de irradiación directa junto a los de las horas de sol en el mismo período 2005-2009, y los promedios de las mismas para un total de 60 años. Como se puede observar la irradiación directa es proporcional a la insolación y sigue su patrón, que en esos 5 años es muy diferente al del promedio a largo plazo, que sí presenta una evolución conforme a lo esperable, con valores crecientes de enero a julio y decrecientes desde ese mes hasta diciembre.

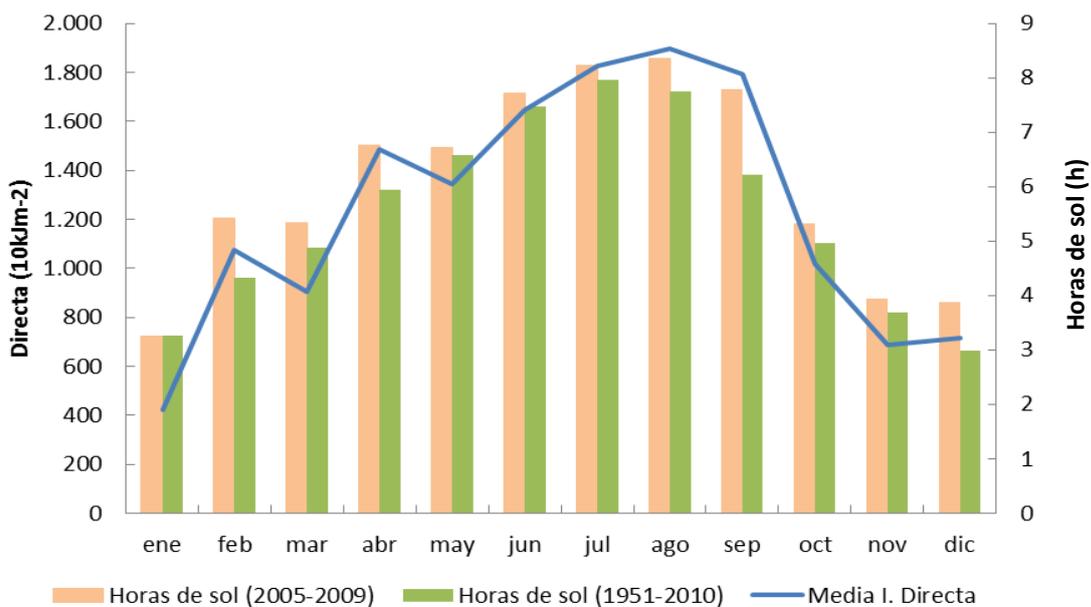


Figura IV.17. Medias mensuales de irradiación directa y horas de sol (2005-2009)

#### IV.1.4. Caracterización del índice de claridad y de la fracción difusa.

Las variaciones de la radiación solar vienen determinadas por dos factores, por un lado las variaciones estacionales y diurnas que se describen mediante relaciones astronómicas bien conocidas y por otro lado, a corto plazo, el comportamiento de la radiación solar está principalmente marcado por parámetros estocásticos: la frecuencia

y el tipo de nubes, la turbidez de la atmósfera, el vapor de agua, los aerosoles atmosféricos y el albedo del suelo. De modo que se puede considerar que la radiación solar es la suma de dos componentes: una determinista y una estocástica (Varo et al. 2006).

Una forma de abordar el estudio de la componente estocástica, es a través del índice de claridad,  $k_t$ , que mide la proporción de la energía disponible en el suelo respecto a la disponible en la parte exterior de la atmósfera, es por tanto una medida de la transparencia de la atmósfera, y refleja las influencias meteorológicas (de naturaleza estocástica).

Por su parte, la fracción difusa ( $F_d$ ) es la proporción de irradiación difusa respecto a la irradiación global. Ambos son utilizados frecuentemente, en lugar de las magnitudes absolutas, para modelar las propiedades estadísticas de la radiación solar, y la correlación entre ambas variables ha servido para estimar adecuadamente la componente difusa, en función del lugar y de las condiciones de cielo donde se ha aplicado.

#### **IV.1.4.1. Datos diarios.**

Los valores de  $k_t$  en este estudio se obtienen a partir de los datos de global filtrados. El primer análisis se refiere a los valores diarios de este índice, disponemos de un total de 8836 valores diarios distribuidos según se muestra en el histograma de la Figura IV.16.

El valor medio es de 0,47, el valor máximo es 0,81, valor que únicamente se registró un día (1-09-1985), y como ya se indicó en el estudio de global se trata de un valor atípico, todos los demás valores están por debajo de 0,787, lo que confirma la utilización del valor 0,8 como umbral máximo de transmisividad para La Coruña. El intervalo que agrupa el mayor número de días corresponde a  $0,65 < k_t < 0,7$  con el 11,5% de los días, pero no constituye un máximo muy marcado, los intervalos adyacentes concentran prácticamente el mismo número de días.

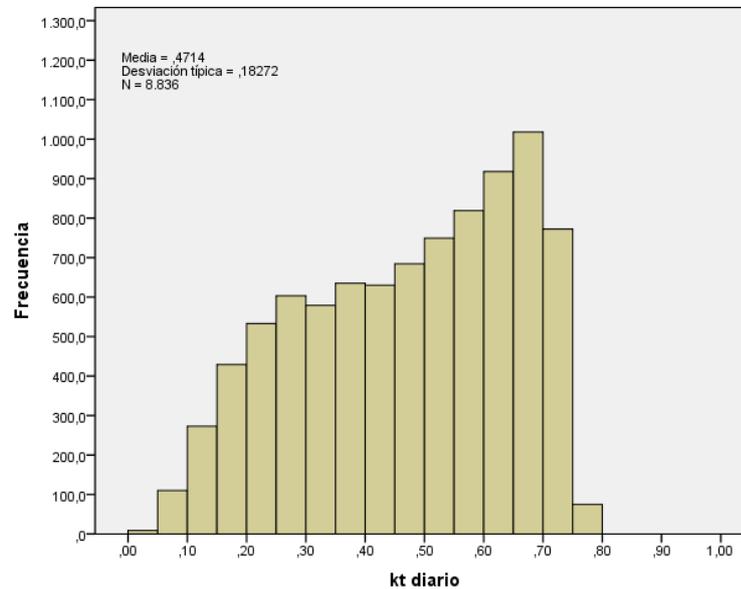


Figura IV.16. Distribución de frecuencias de  $k_t$  diario (1985-2009)

De acuerdo con el criterio de clasificación de Iqbal, de las condiciones de cielo expuesto en la Tabla III.4 del capítulo III, se ha obtenido el porcentaje de días despejados, cubiertos y de cielos parcialmente cubiertos en A Coruña para el período comprendido entre 1985 y 2009, en el que se dispone de un total de 8852 días con datos (Tabla IV.1).

Tabla IV.1. Clasificación del tipo de día en A Coruña (1985-2009).

Tipo de Día	$k_t$	% días
Cielo claro	$0,7 \leq k_t < 0,78$	21,14%
Parcialmente nublado	$0,3 < k_t < 0,7$	50,20%
Cubierto	$k_t \leq 0,3$	28,66%

La presencia de los días de cielo claro en los meses de noviembre, diciembre y enero es testimonial (Fig. IV.17).

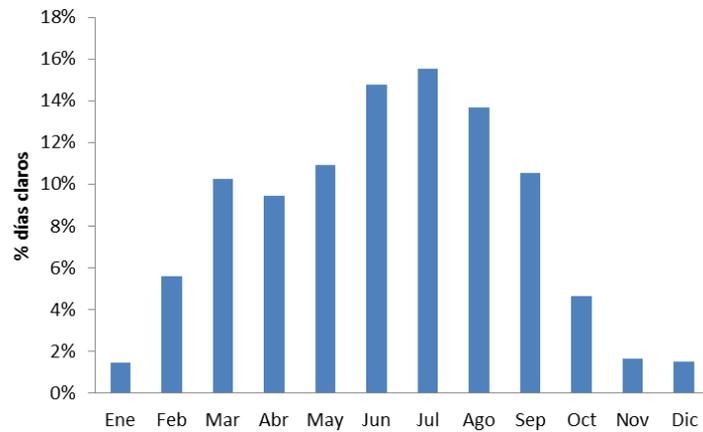


Figura IV.17. Porcentaje de días claros en cada mes del año

En lo que se refiere a la fracción difusa, el histograma presenta forma de U, con los valores agrupados en dos extremos, en el derecho se concentran el 19,6% de los días con valores en los que la componente difusa supera el 90% de la irradiación global, y en el izquierdo donde la componente difusa se encuentra por debajo del 20% de la global, en este caso suponen el 15,6% de los días en el período comprendido entre 1999 y 2009.

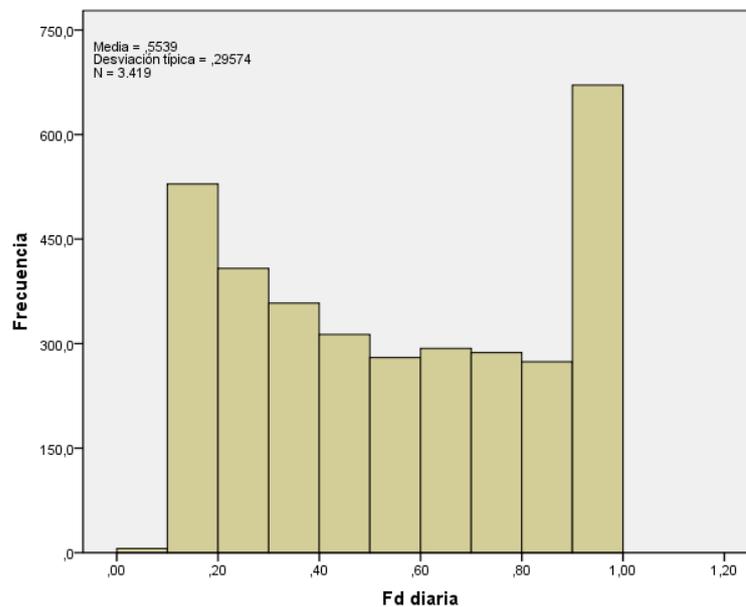


Figura IV.18. Distribución de frecuencias de  $F_d$  diaria (1999-2009)

Se ha comprobado que los días de cielo cubierto, con valores de  $k_t < 0,3$ , se corresponden con valores de fracción difusa superiores a 0,6, mientras que los días de cielo claro ( $k_t > 0,7$ ) se corresponden con valores de fracción difusa menores que 0,3 en el 96% de los casos, en días parcialmente nublados la componente difusa toma prácticamente cualquier valor. En los gráficos de sectores de la Figura IV.19 se exponen los porcentajes de cada caso para los últimos 10 años (período en el que se mide difusa).

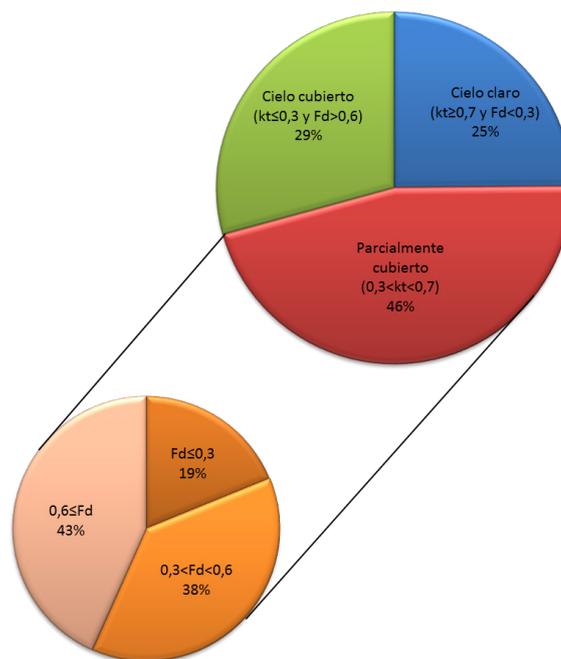


Figura IV.19. Clasificación de días en A Coruña (1999-2009)

A continuación se muestran los histogramas del índice de claridad, tomando los datos diarios agrupados por meses. La distribución de valores se muestra diferenciada en dos grandes grupos, uno de ellos se corresponde aproximadamente con los meses de verano (mayo-septiembre) y el otro estaría constituido por el resto del año, para el primer grupo predominan los días con  $k_t$  elevados, con una distribución casi normal con cola negativa, mientras que el segundo grupo presenta distribuciones bimodales. Las pruebas de normalidad no la confirman en ningún mes. (Tabla C.8. Anexo C).

La bimodalidad en las funciones de densidad de  $k_t$  diaria ya ha sido establecida como la forma más usual de estas distribuciones por otros autores (Ibanez 2003), que evaluaron el índice de claridad en 50 localidades americanas situadas en un amplio rango de latitudes entre las cuales se encontraría A Coruña, y comprobaron que ese

comportamiento está directamente relacionado con la latitud, el mes del año y el valor medio del índice de claridad.

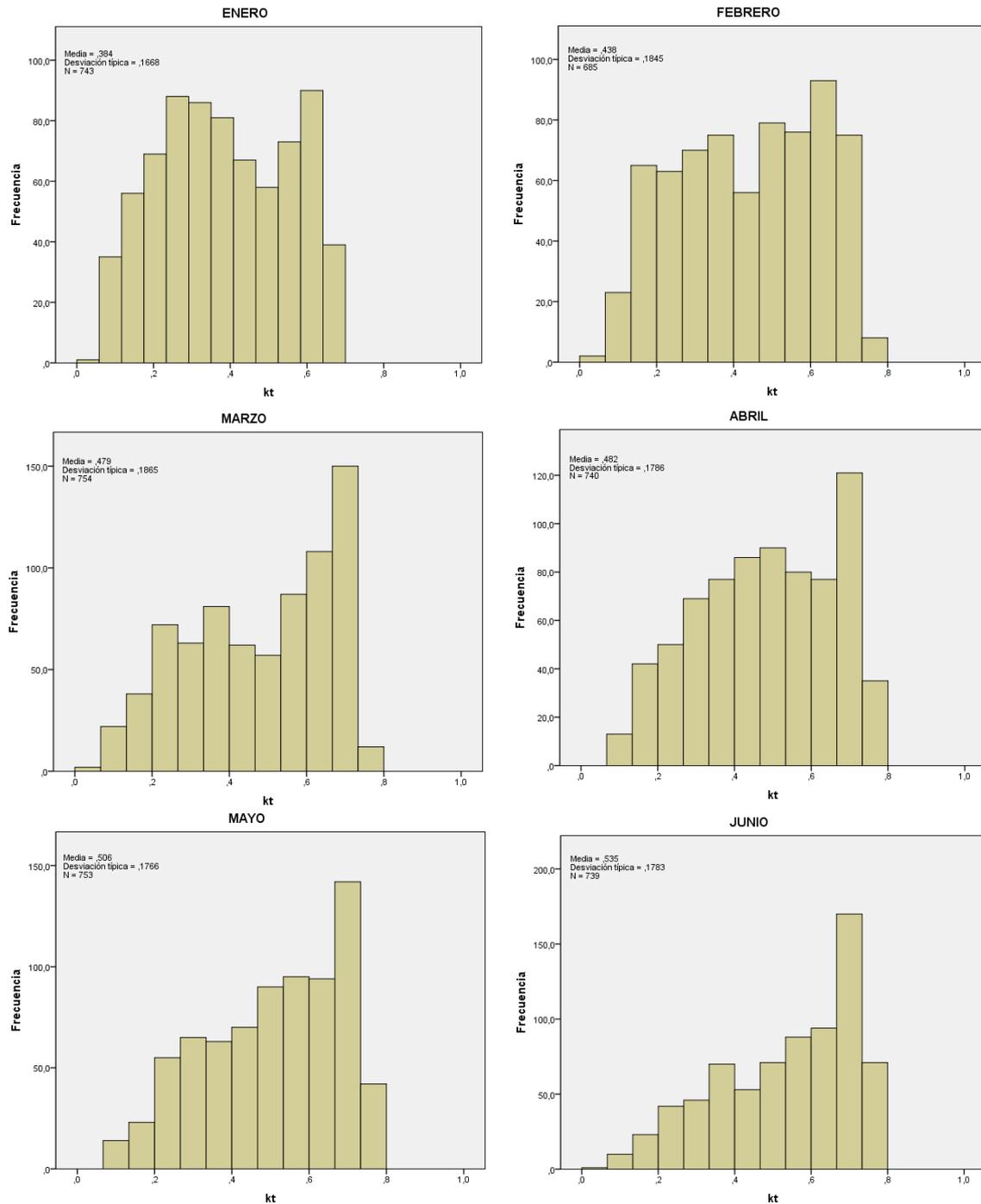


Figura IV.20.a. Histogramas de  $k_t$  diario agrupado por meses (enero-junio).

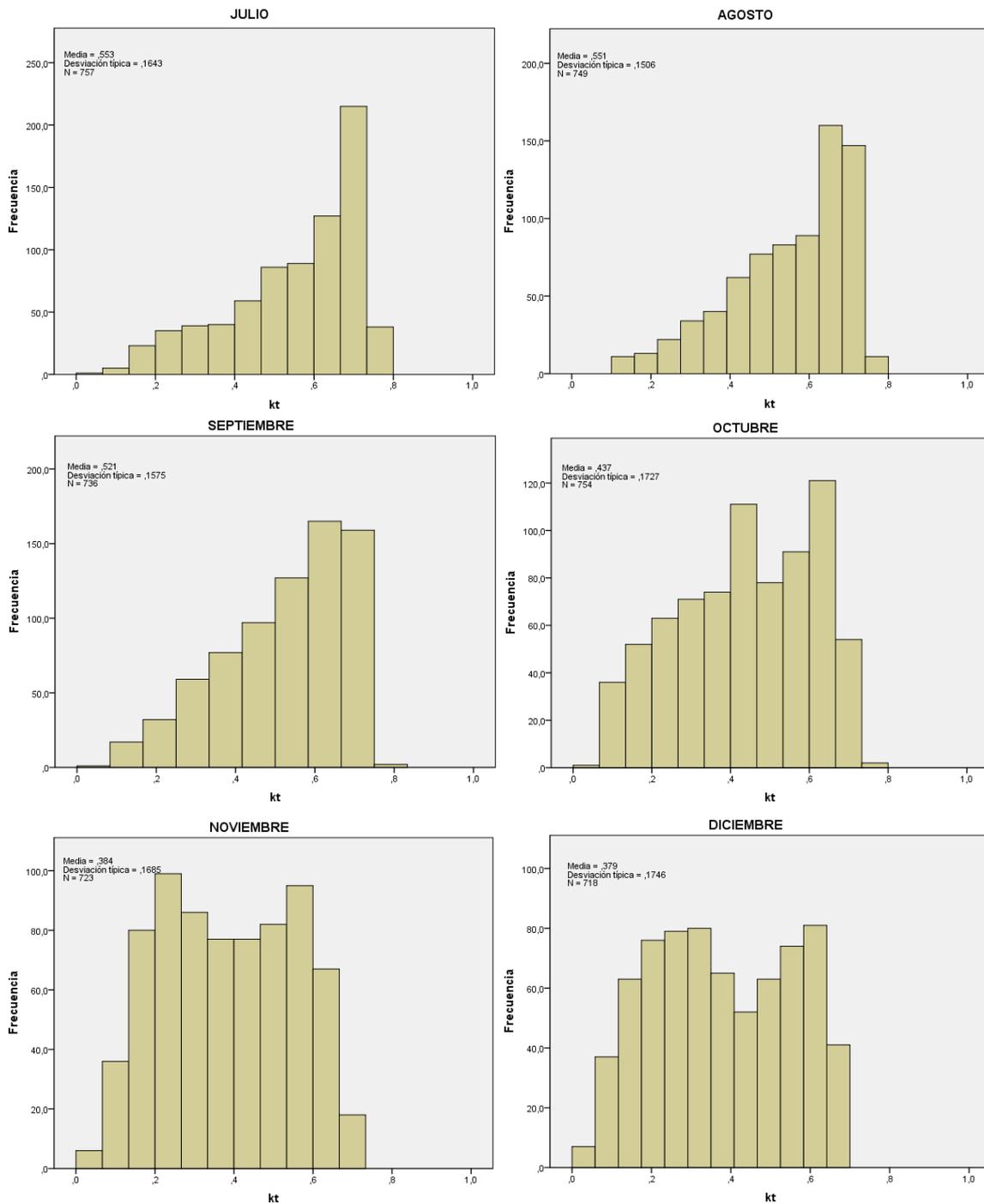


Figura IV.20.b. Histogramas de  $k_t$  diario agrupado por meses (julio-diciembre).

Por otra parte, los histogramas de la fracción difusa ( $F_d$ ) diaria para cada mes del año, mostrados en la Figura IV.21, presentan dos distribuciones a lo largo del año, en los meses de verano, leptocúrtica con cola positiva, y el resto del año bimodal simétrica platicúrtica. Tampoco en este caso, se presenta distribución normal en ningún mes.

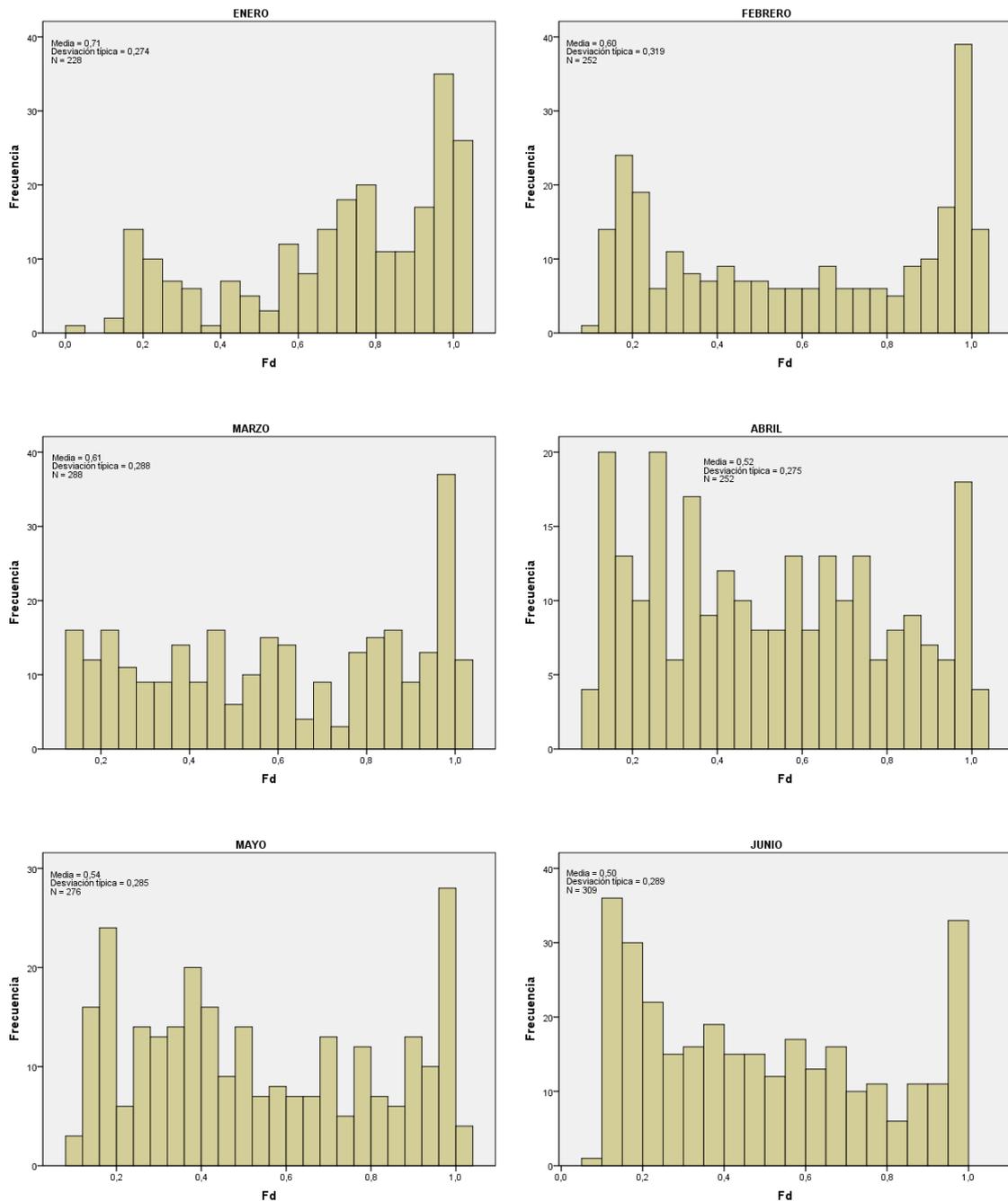


Figura IV.21.a. Histogramas de  $F_d$  diaria agrupada por meses (enero-junio).

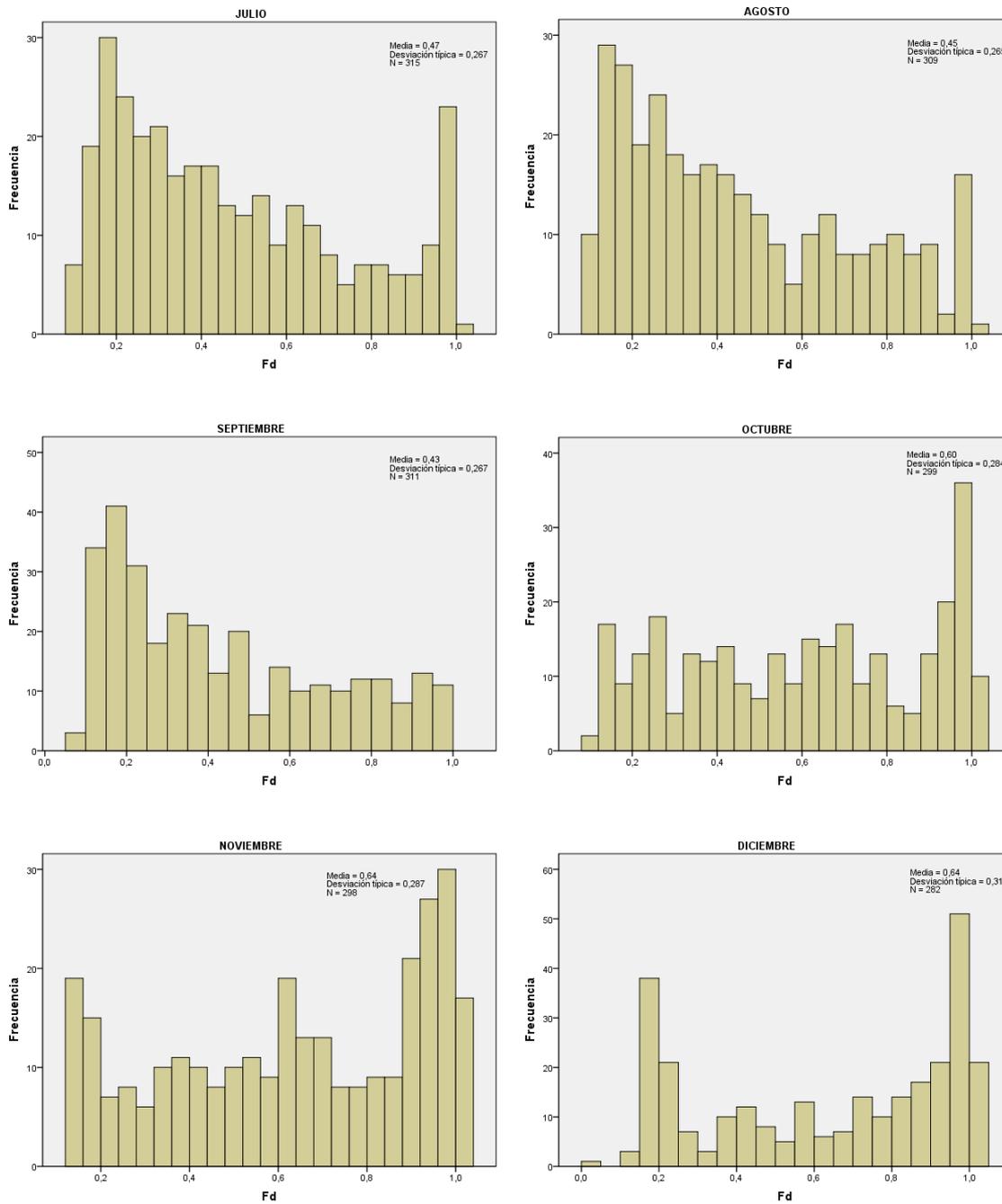


Figura IV.21.b. Histogramas de  $F_d$  diaria agrupada por meses (julio-diciembre).

Se calcularon los valores medios diarios mensuales de las dos variables (Figura IV.22), para ello se descartan aquellos meses en los que se han perdido más de cinco días, finalmente el número de datos mensuales considerados para  $k_t$  está entre 21 y 25, y para la fracción difusa se dispone de entre 6 y 10 valores. La componente predominante de radiación es la difusa excepto en los meses de final de primavera y verano (de junio a finales de septiembre), su porcentaje sobre la global en plano horizontal oscila entre el 43%, del mes de septiembre, y el 71% del mes de Enero, esta fracción, que resulta habitual en latitudes entre 40° y 60° Norte (Badescu 2008, p. 427) sobre todo en localidades costeras con un elevado contenido de vapor de agua en la atmósfera, supone un porcentaje lo suficientemente elevado como para requerir un modelo que la estime con la mayor precisión posible.

El valor medio diario anual del índice de claridad es de 0,47 mientras que el mismo valor de la fracción difusa es ligeramente superior 0,56.

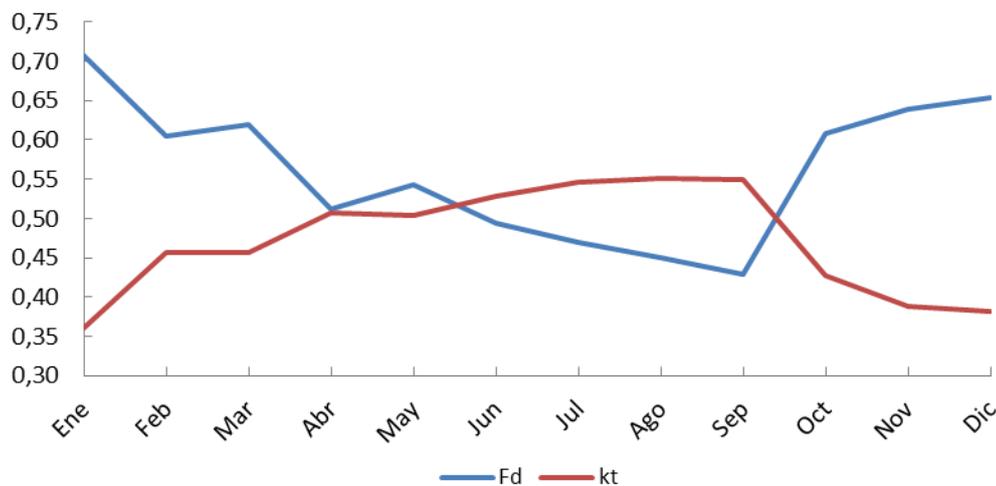


Figura IV.22. Valores diarios medios mensuales de  $k_t$  y  $F_d$ .

#### IV.1.4.2. Datos horarios.

Se han obtenido también las distribuciones de frecuencias de  $k_t$  y  $F_d$  a nivel horario, en este caso se han clasificado los índices horarios según la elevación solar, puesto que a lo largo de una hora la posición del sol puede variar hasta 11° en función de la época del año. Se tomaron intervalos de 5°, para elevaciones entre 5° y 70°, agrupando todos los índices horarios que corresponden a cada intervalo. La máxima elevación solar para las coordenadas del observatorio meteorológico de A Coruña es de 68,83°, se alcanza únicamente el 22 de junio entre las 11 y las 13 horas solares.

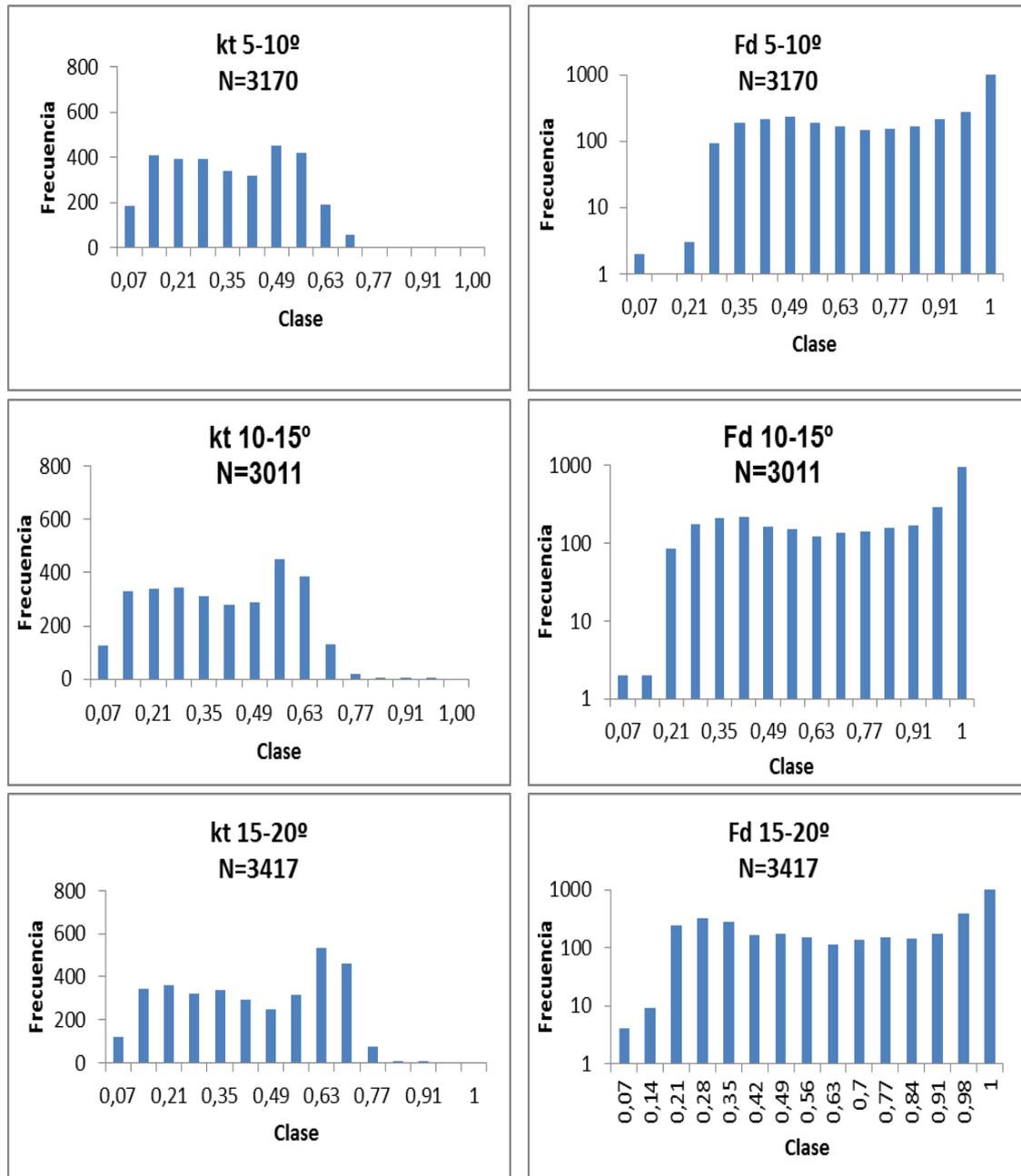


Figura IV.23.a. Histogramas  $k_t$  y  $F_d$  horarios para ángulos de elevación solar entre 5° y 20°.

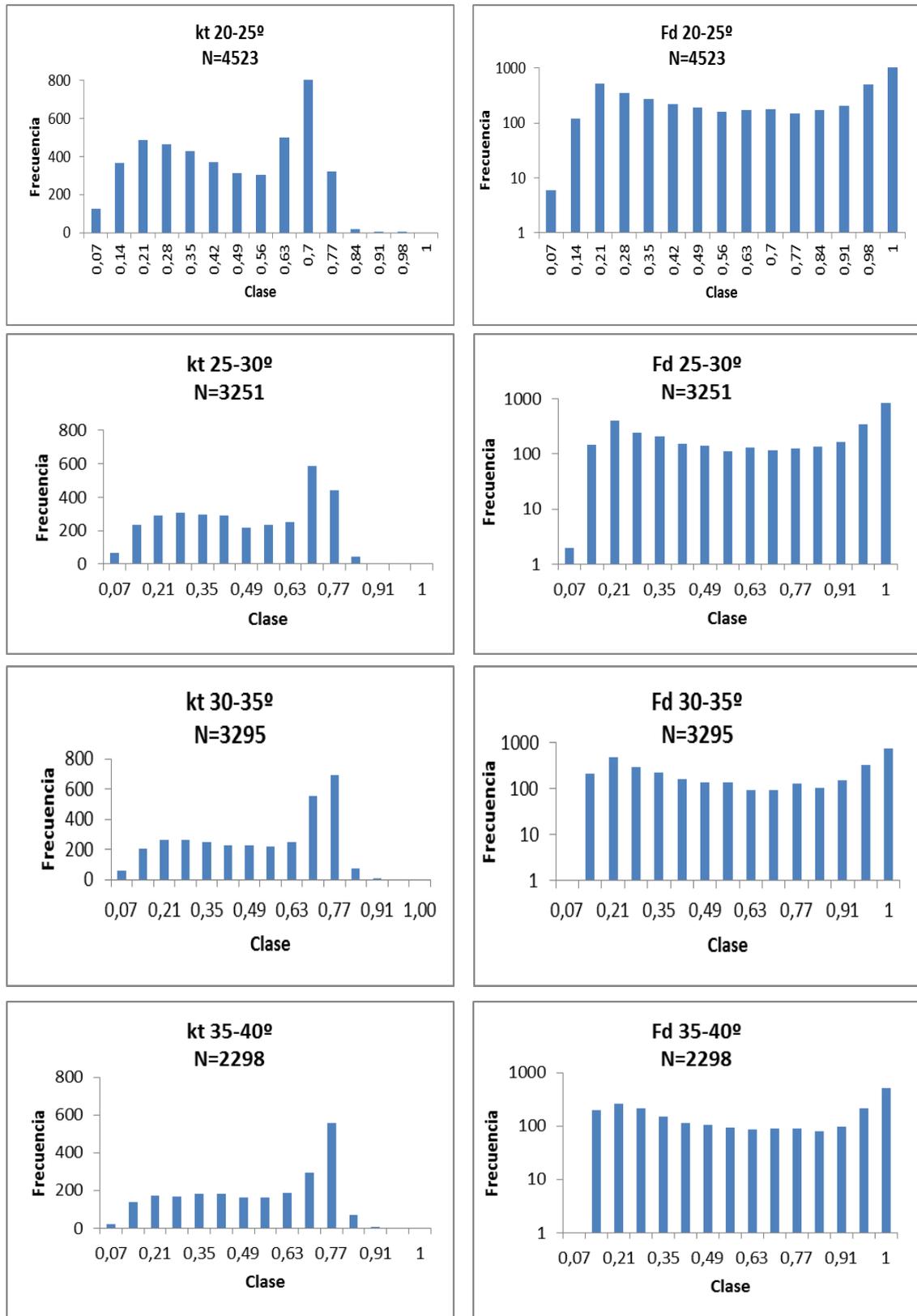


Figura IV.23.b. Histogramas  $k_t$  y  $F_d$  horarios para ángulos de elevación solar entre 20° y 40°.

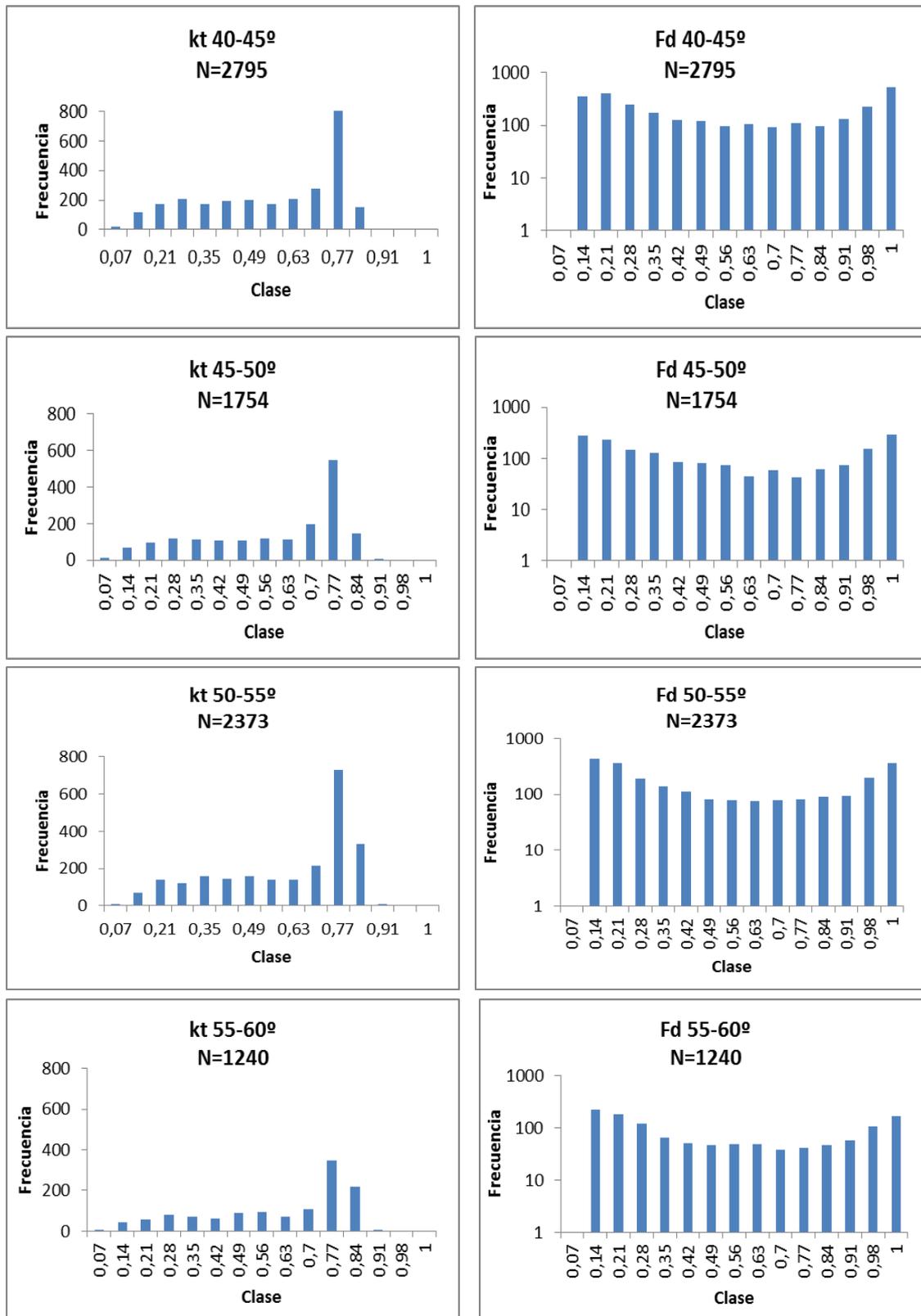


Figura IV.23.c. Histogramas  $k_t$  y  $F_d$  horarios para ángulos de elevación solar entre 40° y 60°.

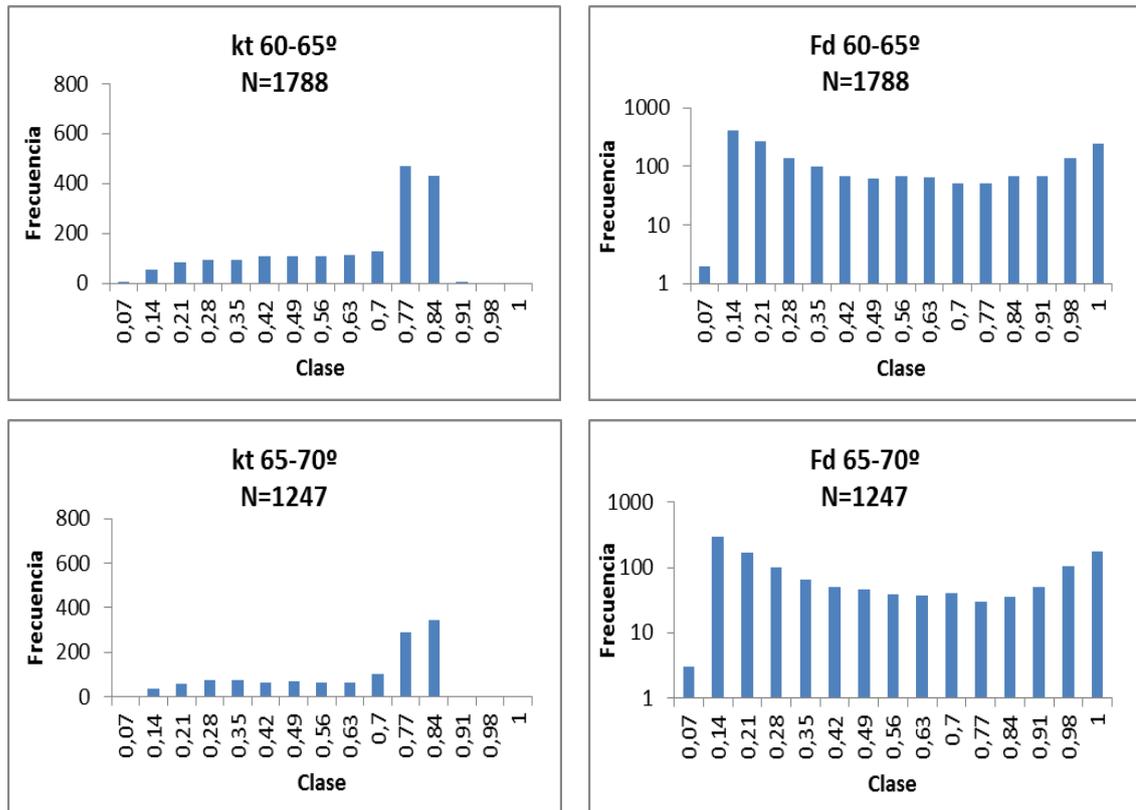


Figura IV.23.d. Histogramas  $k_t$  y  $F_d$  horarios para ángulos de elevación solar entre  $60^\circ$  y  $70^\circ$

La fracción difusa, presenta una distribución en forma de U muy similar en todo el rango de elevaciones, siendo el valor 1 el más frecuente en elevaciones por debajo de  $50^\circ$ , y 0,11 el predominante para elevaciones superiores, aunque en este caso, los dos extremos alcanzan valores muy próximos, lo que está en consonancia con la distribución de  $k_t$ , para elevaciones bajas predomina la componente difusa de la irradiación, mientras que para elevaciones altas predomina la componente directa. También se aprecia que los valores de fracción difusa son más altos cuanto menor es la elevación.

En los histogramas de  $k_t$  se observa que su distribución es claramente distinta en función de la elevación, para elevaciones entre  $5^\circ$  y  $40^\circ$  se aprecia con claridad una distribución bimodal, con dos máximos situados casi en los extremos, el principal se sitúa en torno a  $k_t = 0,53$  para las elevaciones más bajas, entre 5 y  $15^\circ$ , y se desplaza hasta alcanzar  $k_t = 0,735$  a partir de  $30^\circ$ , y el secundario toma el valor 0,175 para elevaciones entre 5 y  $25^\circ$ , sube hasta 0,245 para elevaciones entre 25 y  $35^\circ$  y prácticamente desaparece para elevaciones superiores. No se alcanza en ningún caso el valor 1, el máximo se alcanza en el intervalo  $[0,77-0,84]$  con representación significativa a partir de elevaciones de  $45-50^\circ$ , aunque en algunos histogramas se

pueden apreciar valores en intervalos superiores a este máximo el número de puntos en esos intervalos no es relevante, pues en la mayoría de los casos se corresponde con 1 ó 2 puntos, y no superan en ninguna elevación los 8 puntos.

Para las elevaciones en las que se aprecia la distribución bimodal, que indica la presencia de dos poblaciones diferentes, se ha intentado, sin éxito, identificar las dos poblaciones, para ello se hicieron diversas pruebas para separar los datos en función de algún criterio objetivo disponible, como la estación del año (primavera-verano y otoño-invierno), el mes del año, e incluso la hora del día, en todos los casos, cada grupo de datos que se separaba presentaba de nuevo la misma característica de bimodalidad, haciendo imposible la diferenciación de las dos poblaciones, una agrupada en torno a un valor alto de  $k_t$  (0,7) y la otra en torno a un valor bajo (0,2).

#### **IV.1.5. Comparación entre la irradiación global, difusa y directa.**

##### **IV.1.5.1. Estabilidad a escala diaria.**

Se constata el carácter muy variable de la radiación solar global en A Coruña, aunque los meses de mayor estabilidad coinciden con los de mayor aprovechamiento del recurso (mayo a septiembre). La irradiación directa es la componente más inestable con coeficientes de variación de Pearson por encima del 60% todo el año, mientras la difusa es la más estable con un coeficiente entre el 30 y 34% en casi todos los meses.

Tabla IV.2. Coeficiente de variación de Pearson de las tres series de irradiación diarias en %

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Global	45	44	40	38	35	33	30	28	32	42	46	46
Difusa	33	37	32	31	30	36	34	37	37	34	34	34
Directa	140	94	102	72	88	83	63	66	57	92	106	107

##### **IV.1.5.2. Medias mensuales.**

La comparativa mensual de las tres series de irradiación es posible únicamente en los 5 años en los que se validaron las medidas de la componente directa. En la Figura IV.24 se han representado las medias mensuales de las tres series de medidas, dos de ellas sobre plano horizontal y la irradiación directa medida en plano normal. Entre marzo y agosto la radiación global en recibida en el plano horizontal supera a la irradiación directa, mientras que el resto del año ocurre justo lo contrario, excepto en el mes de enero en que ambos valores están muy próximos.

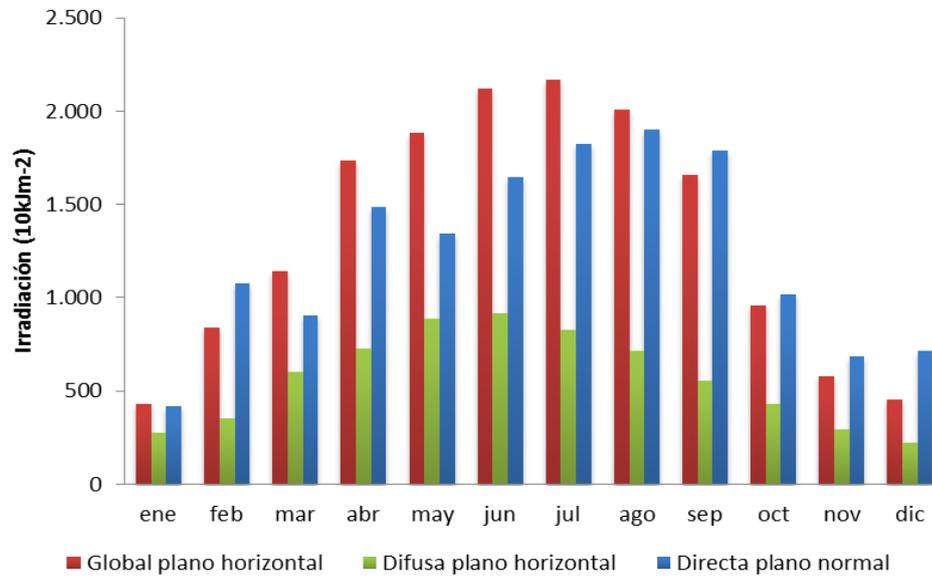


Figura IV.24. Medias mensuales de irradiación (2005-2009).

La comparativa de la gráfica anterior resulta difícil de interpretar al no estar referidas las medidas al mismo plano, por ello se han calculado, a partir de las medidas entre 2005 y 2009, todas las componentes de la irradiación global en un plano fijo orientado al sur e inclinado un ángulo de  $33,6^\circ$  que es la inclinación óptima para la latitud del observatorio meteorológico de A Coruña.

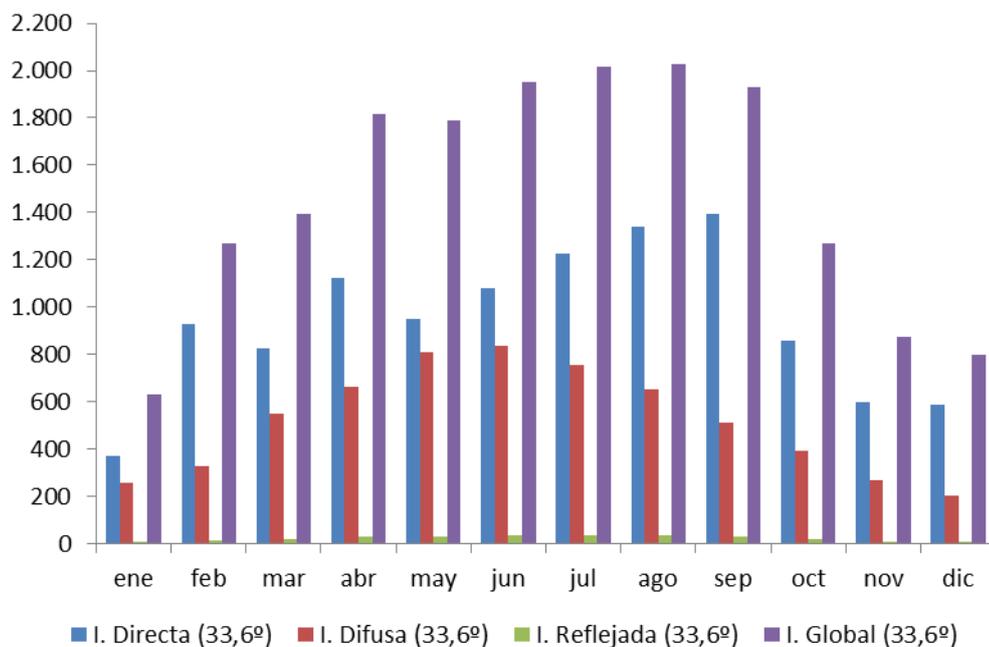


Figura IV.25. Irradiación mensual recibida en plano orientado al sur e inclinado  $33,6^\circ$

La componente directa se ha obtenido mediante la ecuación (II.21), y para calcular la componente difusa se ha considerado un modelo isotrópico (ecuación II.22), lo mismo que para el cálculo de la componente reflejada (ecuación II.17), en este caso además, se ha tomado un coeficiente de reflectividad de 0,2, que es el supuesto habitual, de ahí la pequeña magnitud de esta componente, que alcanza el valor máximo ( $36 \text{ 10kJm}^{-2}$ ) en julio, y es difícil de apreciar en la Figura IV.25.

La irradiación global, suma de las tres componentes, supera ligeramente los  $2000 \text{ 10kJm}^{-2}$  en julio y agosto, y sus valles vienen fijados por los de la componente directa, pero la aportación de la componente difusa es, en varios meses, similar a la de directa, como se puede apreciar en la Figura IV.26, en la que se recogen los porcentajes de cada una de las componentes en cada mes. La irradiación directa supone en todos los meses más de un 50%, pero la difusa contribuye con un 45% en mayo, y un 40% en enero, marzo y junio, los porcentajes más bajos de difusa corresponden a diciembre, febrero y septiembre. En resumen, en plano orientado se recibe algo menos de difusa que en horizontal pero más irradiación directa.

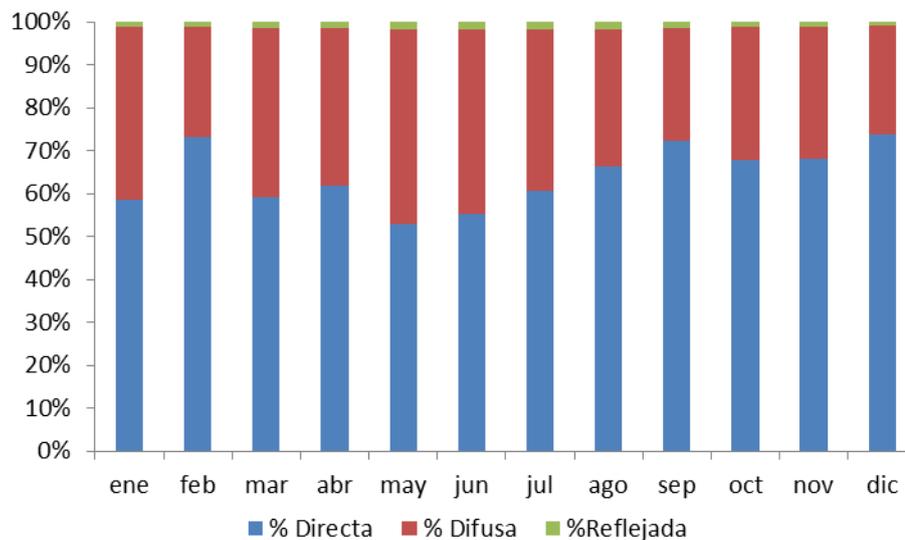


Figura IV.26. Porcentajes de cada componente en la irradiación global en plano orientado al sur e inclinado  $33,6^\circ$ .

Para el período de 5 años evaluado, la irradiación global anual recibida en un plano orientado al sur e inclinado  $33,6^\circ$  resulta un 11% superior a la recibida en plano horizontal, la inclinación de la superficie captadora supone un incremento de la irradiación recibida en los meses de otoño-invierno, y un ligero decremento entre mayo y julio, como se observa en la Figura IV.27.

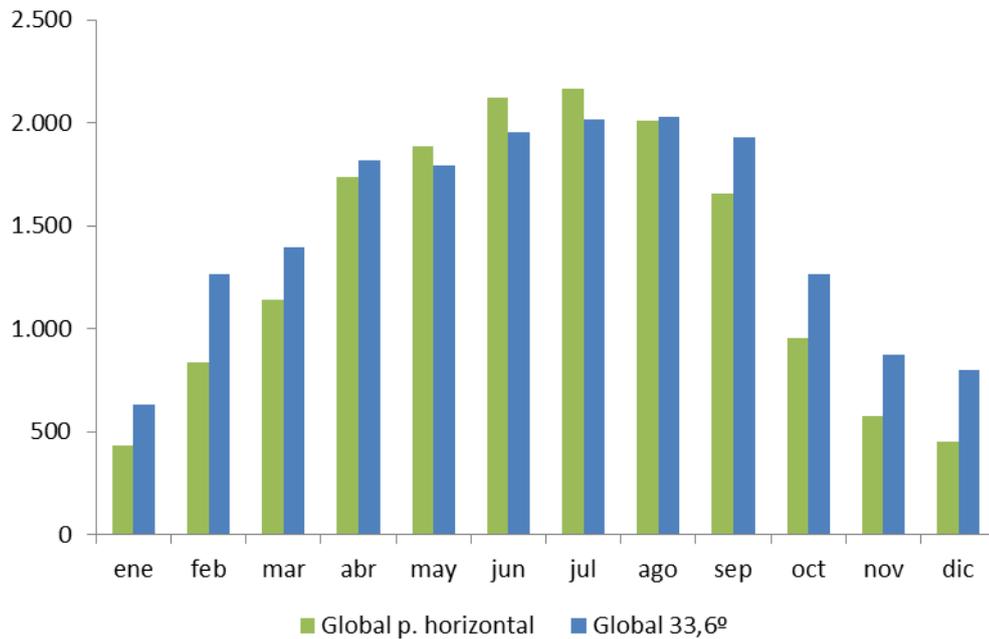


Figura IV.27. Irradiación global mensual en plano horizontal y en plano inclinado 33,6°.

#### IV.1.5.3. Distribución horaria.

Se ha calculado, para cada tipo de irradiación, su distribución a lo largo del día, comprobando qué porcentaje de la irradiación diaria total, en promedio, se recibe en cada banda horaria diurna, para ello se trasladaron los datos registrados en hora solar a horario oficial aproximado<sup>1</sup>.

La distribución de la irradiación global a lo largo del día es simétrica, ver Figura IV.28, respecto a la hora central (13:34-14:34 h), que es la de mayor aportación, el 42% de la irradiación alcanza la superficie en la primera mitad del día, mientras que otro 44% se recibe por la tarde, en todo caso, las bandas horarias centrales (entre las 11:34 h y las 16:34 h) reciben más del 63% de la irradiación recogida sobre superficie horizontal.

<sup>1</sup> Esta aproximación consiste en no incluir en el cálculo de la hora oficial la ecuación del tiempo, puesto que se promedian los datos de cada banda horaria para el conjunto total de años, este factor en cualquier caso alcanza un valor máximo de 15 minutos para los meses de febrero, marzo, octubre y noviembre.

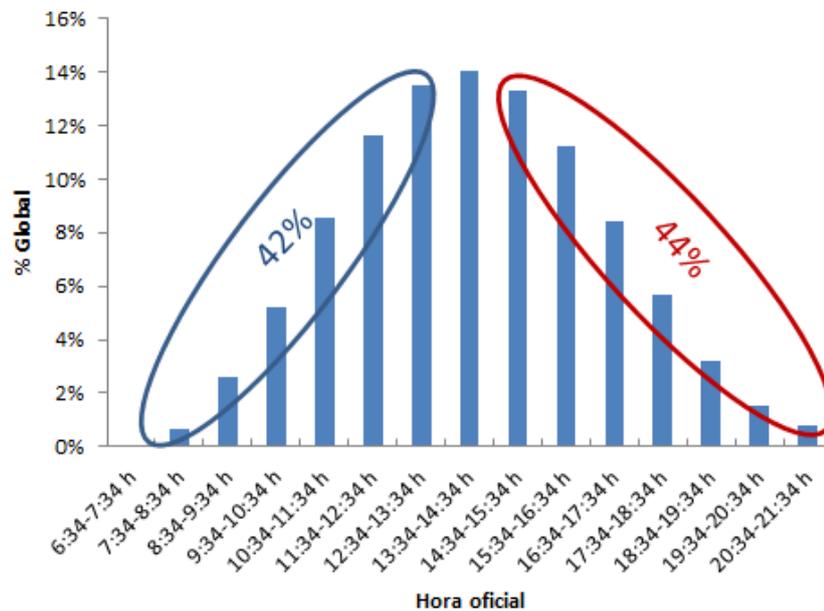


Figura IV.28. Distribución de irradiación global en cada banda horaria

Lo mismo ocurre con la irradiación difusa, su distribución es simétrica a lo largo del día, por la mañana se recibe el 44% y a partir de las 14:34 h, se recibe el 43,5%.

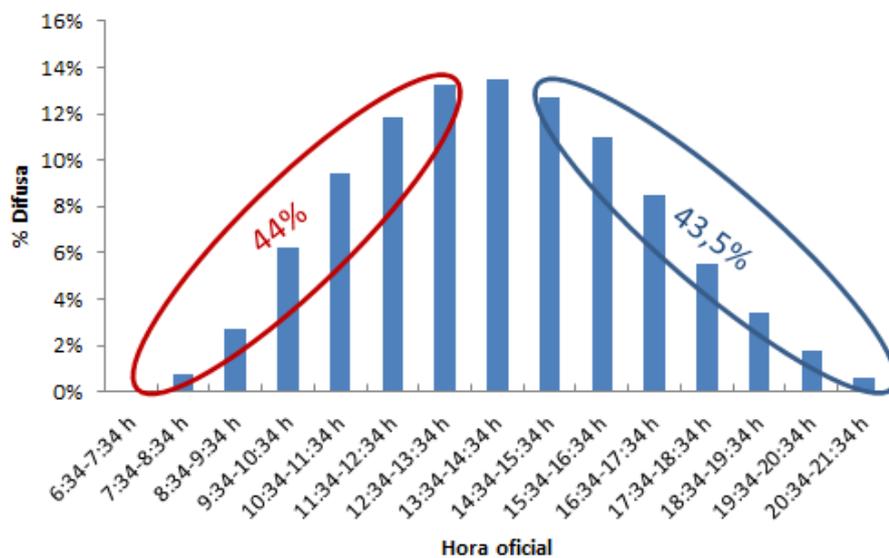


Figura IV.29. Distribución de irradiación difusa en cada banda horaria

La distribución de irradiación directa medida en un plano orientado al sol presenta una ligera asimetría, por la tarde se recibe un 45,6% del total, mientras por la mañana el porcentaje es de un 43%.

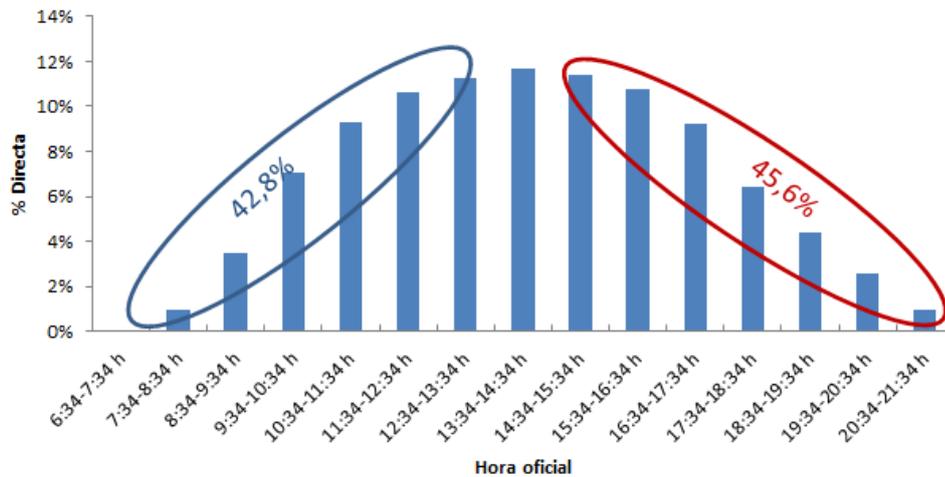


Figura IV.30. Distribución de irradiación directa en cada banda horaria

La distribución de la Fracción difusa es la misma que se aprecia en los histogramas, su principal contribución ocurre a primeras y últimas horas, entre las 7:34 y las 8:34 tenemos un promedio de un 80% de componente difusa, que se reduce a un 56% en las horas centrales del día.

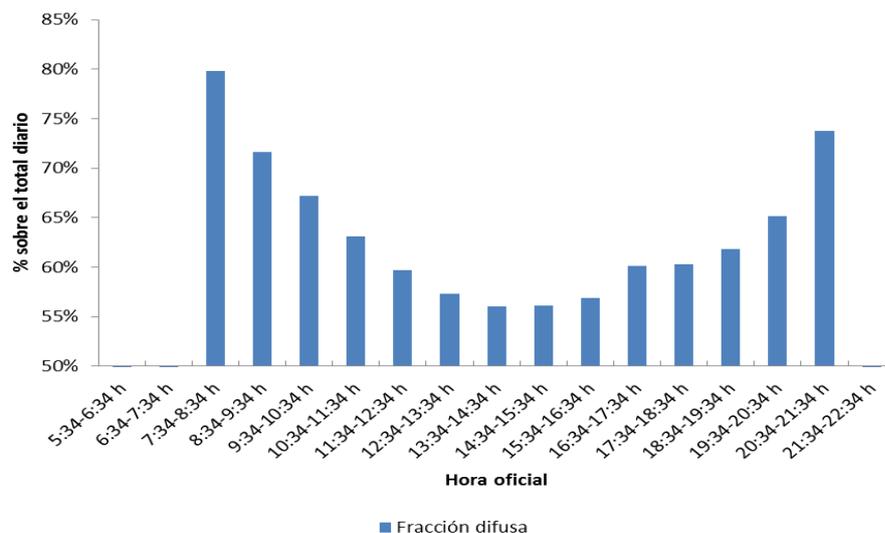


Figura IV.31. Distribución de la fracción difusa en cada banda horaria

## IV.2. Posibles predictores de irradiación solar.

Dado que la disponibilidad de medidas de irradiación solar es aún limitada, tanto a nivel espacial como a nivel temporal, pues su incorporación a la red de estaciones meteorológicas es muy reciente, es conveniente establecer su relación con otras variables habitualmente registradas como son las horas de sol, la temperatura y la

precipitación, es por ello que se han seleccionado estas variables como posibles predictores de la irradiación solar.

Se ha comprobado la posible relación entre cada una de estas tres variables y las tres medidas de irradiación disponibles: global, difusa y directa, resultando únicamente con cierta relación las que se presentan a continuación.

En este apartado la unidad de medida tomada de la irradiación son los  $\text{MJm}^{-2}$  para facilitar la representación conjunta con las demás variables.

#### IV.2.1. Temperatura e irradiación global.

En primer lugar se correlacionan los valores diarios promediados mensualmente de ambas variables, y posteriormente se repite el tratamiento a nivel diario.

Si representamos en primer lugar la temperatura ambiente media, máxima y mínima en valores medios diarios mensuales frente a la irradiación global, se observa el paralelismo de ambas variables en su recorrido anual, aunque mientras los máximos de irradiación se alcanzan en los meses de junio y julio (con más horas de sol), los máximos de temperaturas se encuentran en agosto.

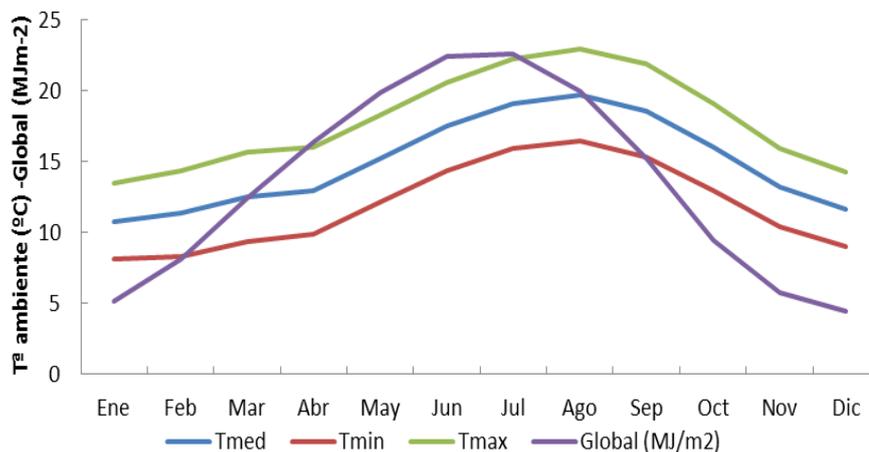


Figura IV.32. Temperatura ambiente, media, mínima y máxima e irradiación global. Valores medios diarios mensuales (1985-2008).

A priori esto sugiere la posibilidad de un alto grado de correlación entre ellas, sin embargo, la consideración del período anual completo no ofrece el resultado esperado, por lo que se ha optado por una división temporal (Gago et al. 2010), de forma que

obtenemos dos funciones de ajuste: una para los Enero a Julio, y la otra de Agosto a Diciembre.

Para la obtención de estas funciones se han tomado los datos de temperatura e irradiación correspondientes al período 1985-2008, dejando el año 2009 para comprobar las posibilidades de predicción de este modelo.

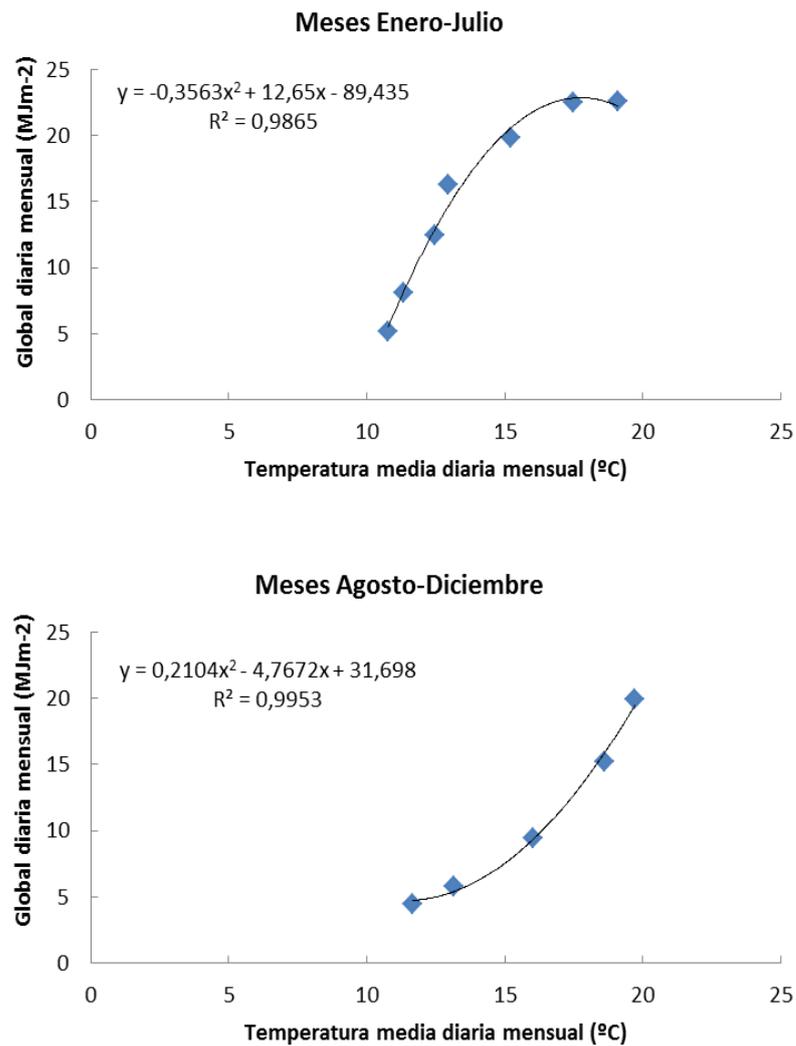


Figura IV.33. Correlaciones mensuales entre temperatura ambiente media e irradiación global

La expresión del modelo corresponde a la ecuación (IV.1), en la que G es la irradiación global diaria media mensual en  $\text{MJm}^{-2}$  y T es la temperatura ambiente media mensual en  $^{\circ}\text{C}$ .

$$G = -0,3563T^2 + 12,65T - 89,435 \quad \text{meses de Enero a Julio} \quad (IV.1)$$

$$G = 0,2104T^2 - 4,7672T + 31,698 \quad \text{meses de Agosto a Diciembre}$$

En la Fig. IV.34 y Tabla IV.3 se muestra el resultado de la estimación de la irradiación diaria media mensual para 2009, a partir de la temperatura ambiente media diaria mensual de ese año.

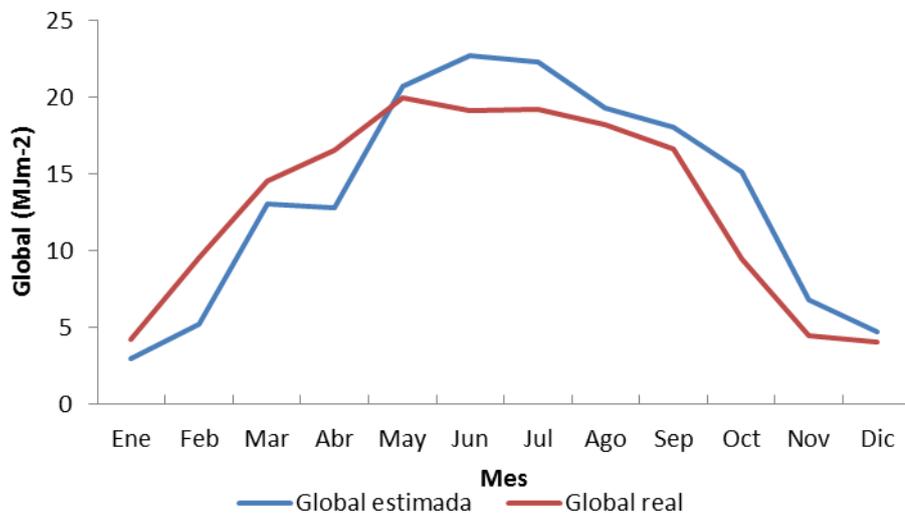


Figura IV.34. Irradiación global mensual estimada con la temperatura y medida en 2009

Tabla IV.3. Parámetros de validación del modelo para estimar irradiación global mensual con datos de temperatura ambiente en 2009.

R <sup>2</sup>	RECM(MJm <sup>-2</sup> )	EM(MJm <sup>-2</sup> )	EAMP(%)	RECMN(%)	EMN(%)
0,83	2,9	-0,64	24,3	22,37	-4,92

La utilización de promedios mensuales limita, en mayor medida que la escala diaria, el rango de validez de los modelos obtenidos, de tal forma que para su aplicación es preciso comprobar si los valores medios de temperatura o irradiación se encuentran dentro de los márgenes para los que se han obtenido estos modelos. Se indican a continuación los valores mínimos y máximos de cada variable para la escala diaria media mensual.

Tabla IV.4. Rango válido de aplicación de las correlaciones temperatura ambiente-global

	Tª ambiente media (°C)	Global (MJm <sup>-2</sup> )
Mínimo	10,78	4,47
Máximo	19,71	22,56

Si consideramos los datos a nivel diario, tomando, también en este caso, los valores diarios desde 1985 hasta 2008, resultan un total de 8487 días descartando aquellos en los que falta el dato de irradiación o el de temperatura, se obtiene la curva de regresión de la Figura IV.35, en la que se observa que la temperatura diaria explica, en este caso, tan sólo un 28,3% de la varianza de la irradiación global.

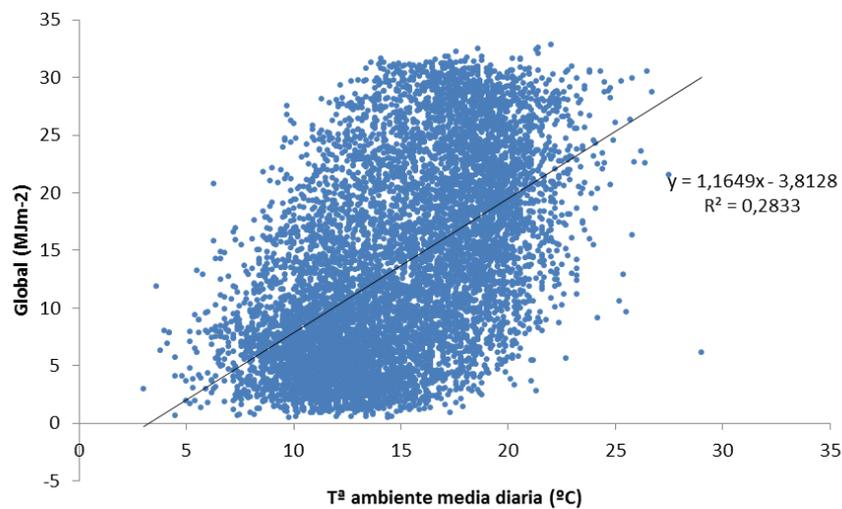


Figura IV.35. Correlación diaria entre temperatura ambiente e irradiación global

Sin embargo, si dividimos los datos diarios por meses, con el mismo criterio empleado con las medias mensuales, se incrementa el coeficiente de determinación, resultando para los meses de Enero a Julio de 0,356, y para los de Agosto a Diciembre de 0,47.

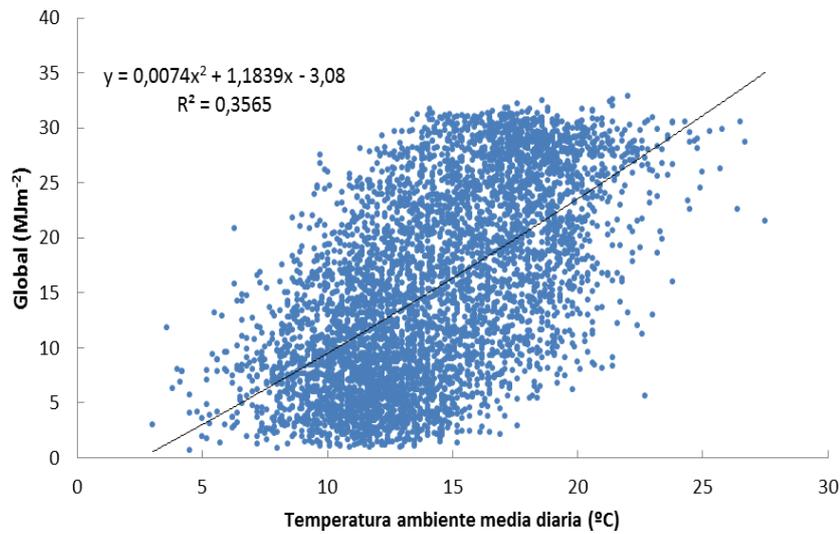


Figura IV.36. Correlación diaria entre temperatura ambiente e irradiación global. Datos diarios de enero a julio (1985-2008).

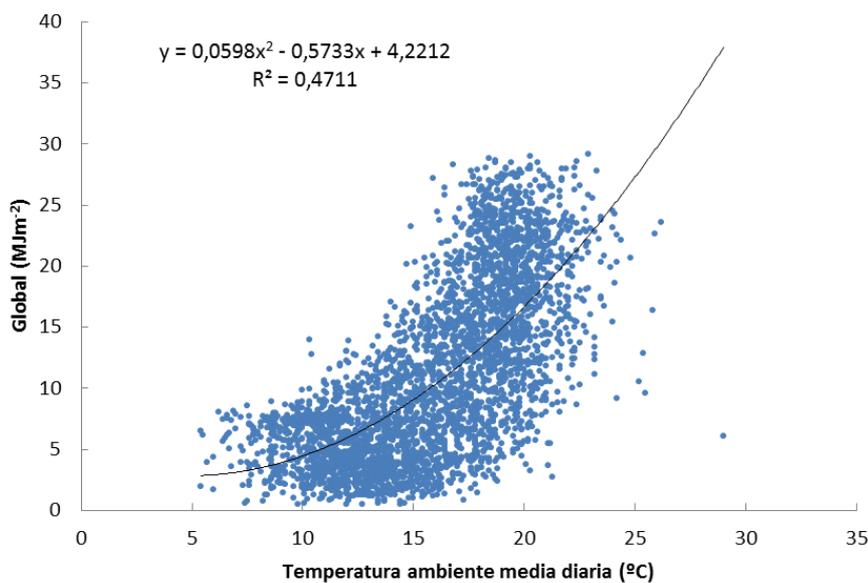


Figura IV.37. Correlación diaria entre temperatura ambiente e irradiación global. Datos diarios de agosto a diciembre (1985-2008).

En este caso el modelo viene especificado por la expresión (IV.2), en la que  $G$  es la irradiación global diaria en  $\text{MJm}^{-2}$  y  $T$  la temperatura ambiente diaria en  $^{\circ}\text{C}$ .

$$\begin{aligned}
 G &= 0,0074T^2 + 1,1839T - 3,08 && \text{meses de Enero a Julio} \\
 G &= 0,0598T^2 - 0,5733T + 4,2212 && \text{meses de Agosto a Diciembre}
 \end{aligned}
 \tag{IV.2}$$

Con los datos de temperatura ambiente media diaria del año 2009, estimamos la irradiación global diaria, resultando los parámetros de la tabla siguiente:

Tabla IV.5 Parámetros de validación del modelo para estimar irradiación global diaria con datos de temperatura ambiente en 2009.

$R^2$	RECM( $\text{MJm}^{-2}$ )	EM( $\text{MJm}^{-2}$ )	EAMP(%)	RECMN(%)	EMN(%)
0,37	6,57	-0,87	88,5	50,5	-6,73

El valor de la irradiación estimada sigue de forma aproximada a la medida entre abril y agosto, sin embargo se sobreestima en los meses de otoño-invierno (octubre-febrero), esto responde a la evolución de la curva de temperaturas que no sufre un descenso tan acusado en estos meses como la de la irradiación, característica propia del clima atlántico con temperaturas suaves a lo largo de todo el año.

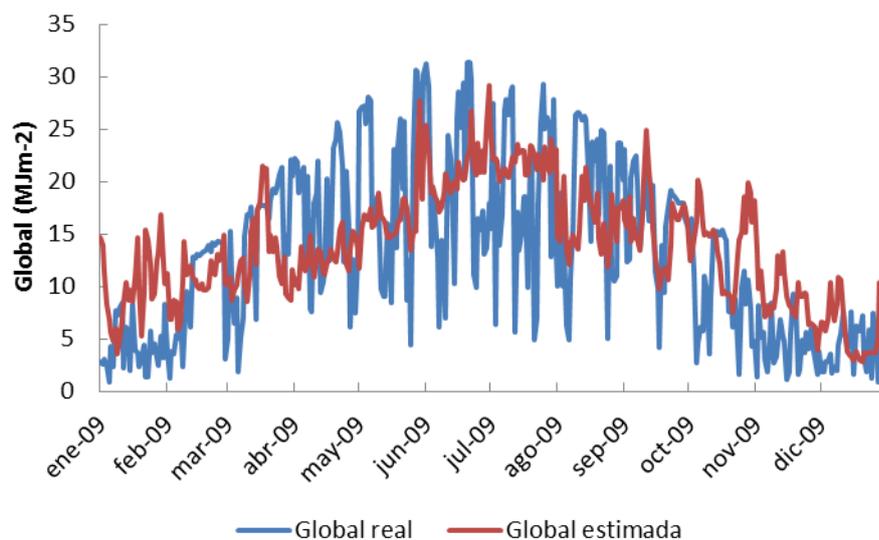


Figura IV.38. Global diaria estimada a partir de la  $T^a$  ambiente y global medida en 2009.

#### IV.2.2. Precipitación e irradiación global.

La aplicación del mismo procedimiento a la serie de precipitaciones ofrece peores resultados que la de temperaturas. Igualmente se presenta en primer lugar la correlación de valores diarios medios mensuales, ahora la división temporal mensual agrupa los meses de otoño-invierno en un grupo, y los de primavera-verano en otro conjunto, haciendo coincidir de este modo en cada período segmentos de evolución simétrica, respecto al eje de abscisas, de cada variable. Para mayor claridad en la

gráfica siguiente se ha representado el valor de las precipitaciones multiplicado por el factor 4, y la irradiación global en  $\text{MJm}^{-2}$ .

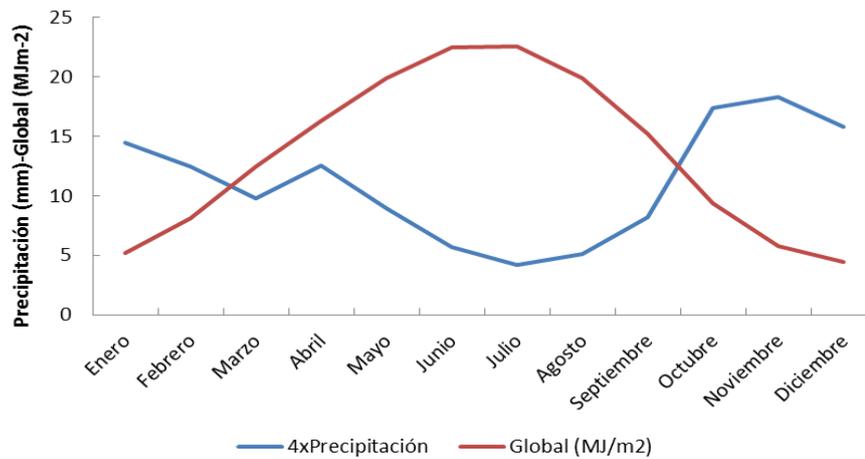


Figura IV.39. Precipitación e irradiación global. Valores medios mensuales (1985-2008)

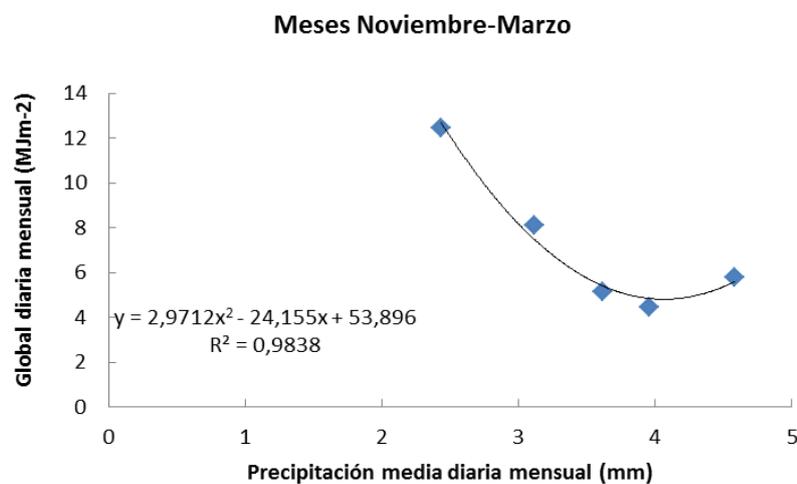


Figura IV.40.a. Correlaciones mensuales entre precipitación e irradiación global

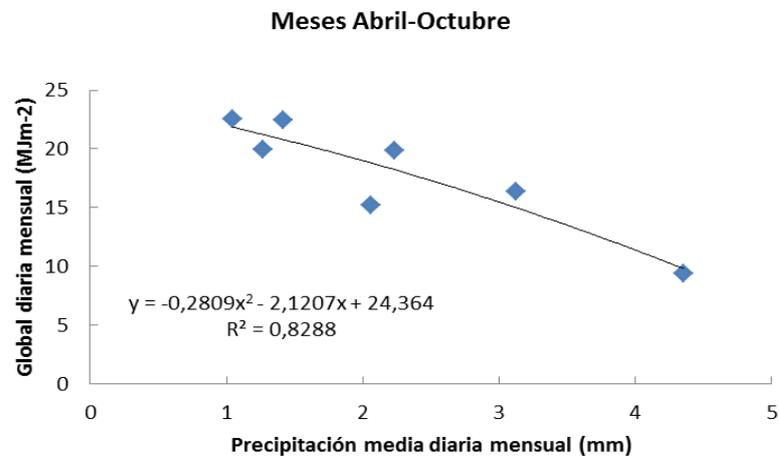


Figura IV.40.b. Correlaciones mensuales entre precipitación e irradiación global

La expresión de la irradiación global en función de la precipitación es:

$$\begin{aligned} G &= 2,9712 Pr^2 - 24,155 Pr + 53,896 && \text{meses de Noviembre a Marzo} \\ G &= -0,2809 Pr^2 - 2,1207 Pr + 24,364 && \text{meses de Abril a Octubre} \end{aligned} \quad (\text{IV.3})$$

Donde G es la irradiación global diaria media mensual en  $\text{MJm}^{-2}$  y Pr la precipitación diaria media mensual en mm.

Las estimaciones para el año 2009 no se han podido completar para todos los meses, pues los valores de precipitación en los meses de Noviembre y Diciembre, 6,5 mm y 5,8 mm respectivamente, se encuentran alejados del rango de precipitaciones para el que se obtuvo la función de ajuste, los valores mínimo y máximo de precipitación para los que tiene validez este modelo figuran en la tabla siguiente:

Tabla IV.6. Rango válido de aplicación de las correlaciones precipitación-global

	Precipitación (mm)	Global ( $\text{MJm}^{-2}$ )
Mínimo	1,04	4,47
Máximo	4,58	22,56

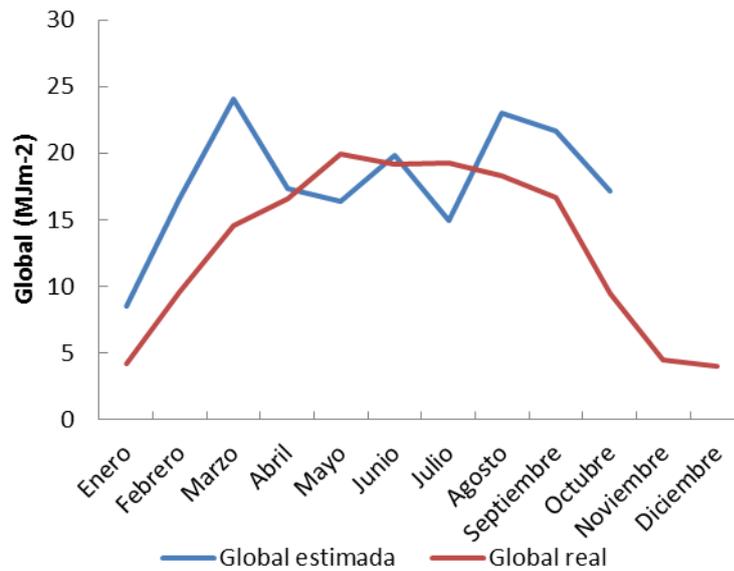


Figura IV.41. Irradiación global mensual estimada con la precipitación y medida en 2009

Tabla IV.7. Parámetros de validación del modelo para estimar Global mensual con datos de Precipitación en 2009.

R <sup>2</sup>	RECM(MJm <sup>-2</sup> )	EM(MJm <sup>-2</sup> )	EAMP(%)	RECMN(%)	EMN(%)
0,31	5,4	-3,18	42,61	36,93	-21,53

A nivel diario la correlación entre ambas variables ofrece resultados muy pobres, con coeficientes de determinación que en el mejor de los casos no llega a 0,24. La mejor curva de ajuste es la exponencial, y se ajustan en ambos períodos temporales para valores de precipitación por debajo de los 40 mm, que representan más del 99,8% de los días.

Sin embargo, las dos gráficas de la Figura IV.42 ponen de manifiesto la imposibilidad de ajustar todo el rango de valores de irradiación global en días con precipitaciones por debajo de 10 mm.

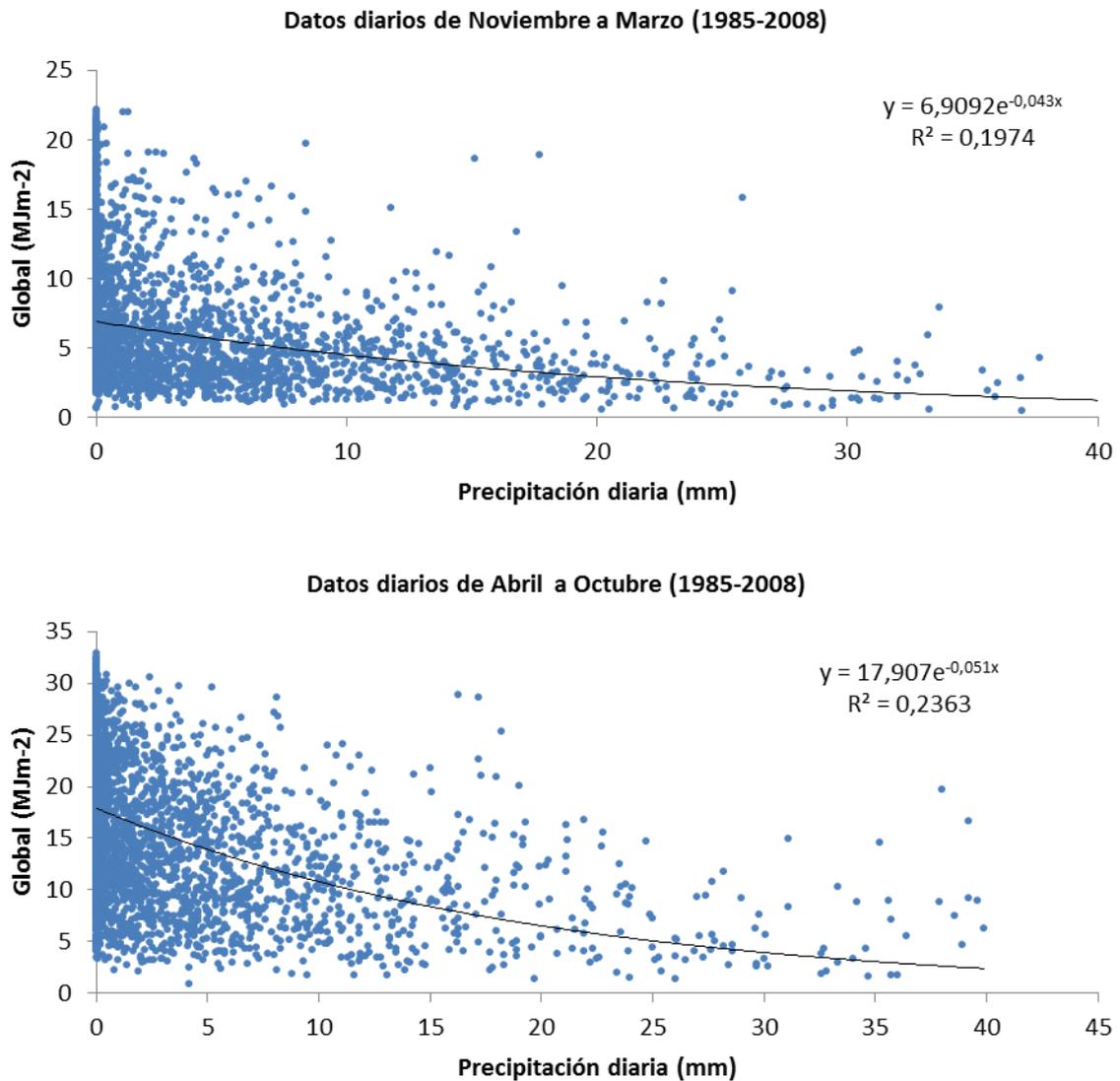


Figura IV.42. Correlaciones diarias precipitación-irradiación global.

### IV.2.3. Horas de sol e irradiación global.

En este caso, a partir de la expresión de Angström-PreScott, que relaciona el índice de claridad con la razón entre el número de horas de sol y la duración teórica del día, se han obtenido los valores de los coeficientes empíricos  $a$  y  $b$ , utilizando los valores diarios disponibles de  $K_t$  y las horas de sol entre 1985 y 2008, un total de 8426 días, los valores resultantes son  $a=0,23$  y  $b=0,53$  muy similares a los obtenidos por (Almorox and Hontoria 2004), utilizando datos de 16 localidades españolas, entre ellas A Coruña.

La expresión del modelo resultante es:

$$k_t = \frac{G}{G_0} = 0,23 + 0,53 \left( \frac{S}{S_0} \right) \quad (\text{IV.4})$$

Donde  $k_t$  es el índice de claridad diario,  $G$  es la irradiación global diaria en plano horizontal,  $G_0$  es la irradiación extraterrestre en plano horizontal diaria,  $S$  es el número de horas de insolación de cada día en horas y  $S_0$  es la duración teórica del día, calculada según:

$$S_0 = \frac{2}{15} \arccos(-\tan \phi \tan \delta) \quad (\text{IV.5})$$

Siendo  $\phi$  la latitud y  $\delta$  la declinación diaria.

De modo que se utiliza esa ecuación, para comprobar la bondad del modelo en la estimación de los valores de  $K_t$  diario del año 2009, resultando un RECM de 0,059, el EAMP=17,78% y  $R^2=0,93$ . En total se estiman 357 días, pues hay 8 días en los que no se dispone de registros de horas de sol.

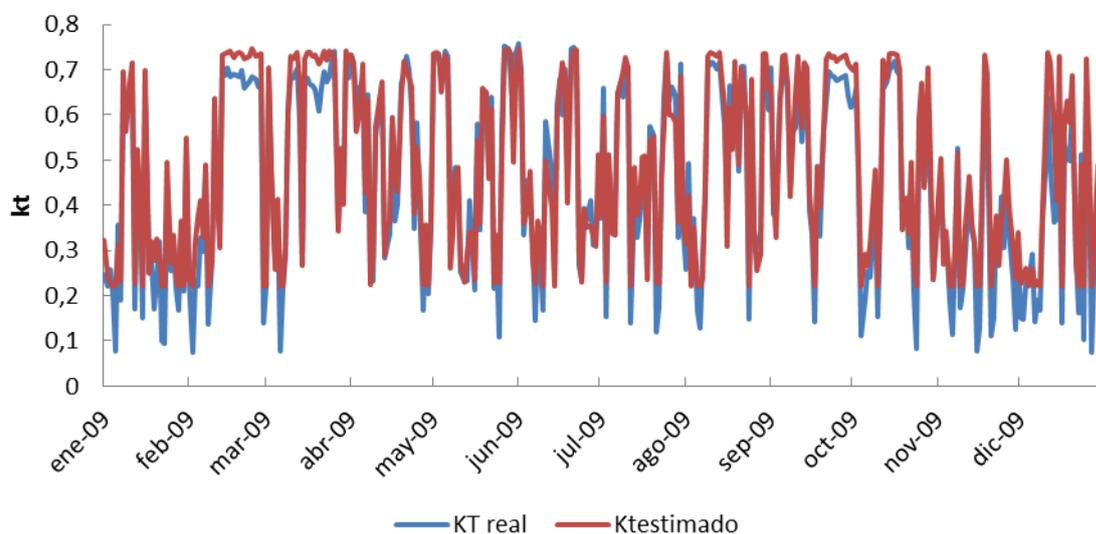


Figura IV.43.  $k_t$  diario del año 2009 estimado con ecuación Angström-Prescott frente a  $k_t$  real.

La Figura IV.44 y Tabla IV.8 muestran el ajuste sobre la irradiación global al obtener el índice de claridad con el modelo de Angström-Prescott.

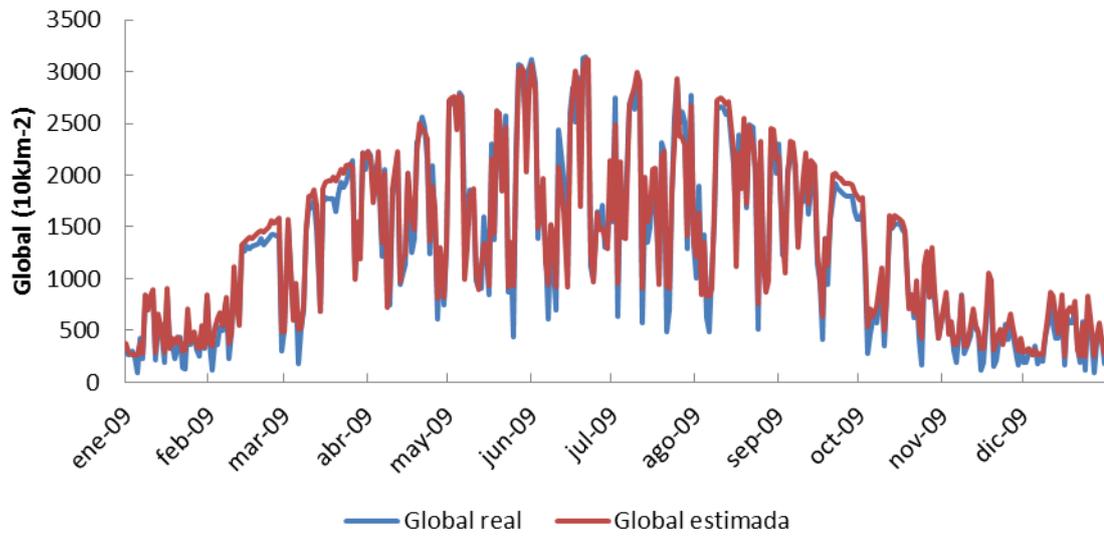


Figura IV.44. Irradiación Global diaria medida y estimada de 2009.

Tabla IV.8. Parámetros de validación del modelo para estimar irradiación global diaria con datos de horas de sol en 2009.

$R^2$	RECM( $10\text{kJm}^{-2}$ )	EM( $10\text{kJm}^{-2}$ )	EAMP(%)	RECMN(%)	EMN(%)
0,97	151,35	-55,2	17,78	11,64	-4,25

#### IV.2.4. Horas de sol e irradiación directa.

Se ha comprobado la alta correlación entre los valores de irradiación directa y las horas de sol, para la obtención de la curva de ajuste se han usado los datos de irradiación directa considerados fiables a partir de 2005 y hasta 2008, obteniéndose un valor de  $R^2$  de 0,92.

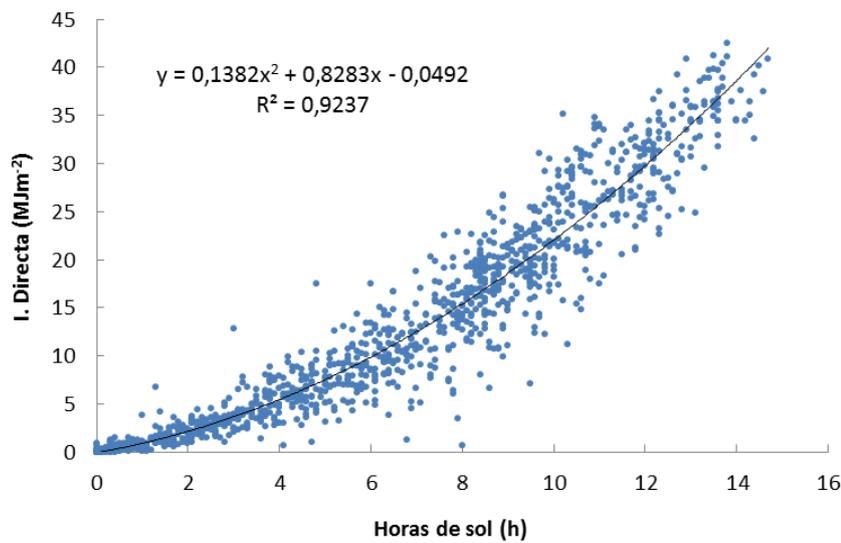


Figura IV.45. Correlación irradiación directa en plano normal diaria y las horas de sol.

En la expresión siguiente,  $B$  es la irradiación directa diaria en plano normal en  $\text{MJm}^{-2}$  y  $S$  las horas de insolación para cada día en horas.

$$\begin{aligned}
 B_{normal} &= 0,1382S^2 + 0,8283S - 0,0492 & S \geq 0,049 \\
 B_{normal} &= 0 & \text{resto}
 \end{aligned}
 \tag{IV.6}$$

Este modelo permite la estimación de la irradiación directa en 2009 con un coeficiente de determinación de 0,95 siguiendo las variaciones de la señal de forma adecuada. Ver Tabla IV.9 y Figura IV.46.

Tabla IV.9. Parámetros de validación del modelo para estimar irradiación directa diaria con datos de horas de sol en 2009

$R^2$	RECM( $10\text{kJm}^{-2}$ )	EM( $10\text{kJm}^{-2}$ )	EAMP(%)	RECMN(%)	EMN(%)
0,95	2,69	-0,31	40,02	19,87	-2,31

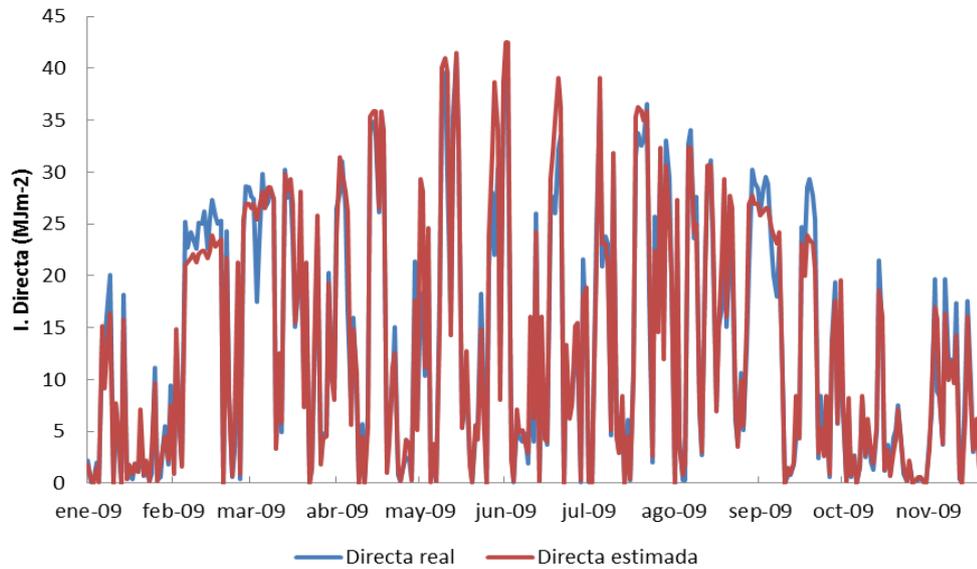


Figura IV.46. Directa diaria medida en 2009 y directa estimada con las horas de sol.

No se obtuvo correlación significativa de ninguna de las otras dos variables (Temperatura y Precipitación) con la irradiación directa, así pues el mejor predictor posible de esta componente son las horas de sol.

#### IV.2.5. Tablas resumen de la estimación de irradiación a partir de otras variables.

En las tablas siguientes se resumen los estadísticos de estimación de irradiación a partir de otras variables para el año 2009.

Tabla IV.10. Resumen de resultados para estimar la irradiación *global mensual* en 2009.

Variable	R <sup>2</sup>	RECM (MJm <sup>-2</sup> )	EM (MJm <sup>-2</sup> )	EAMP (%)	RECMN (%)	EMN (%)
T <sup>a</sup> ambiente	0,83	2,9	-0,64	24,3	22,37	-4,92
Precipitación*	0,31	5,4	-3,18	42,61	36,93	-21,53
Horas de sol	-	-	-	-	-	-

\*No se han podido estimar los valores de Noviembre y Diciembre

Tabla IV.11. Resumen de resultados para estimar la irradiación *global diaria* en 2009.

Variable	R <sup>2</sup>	RECM (MJm <sup>-2</sup> )	EM (MJm <sup>-2</sup> )	EAMP (%)	RECMN (%)	EMN (%)
Tª ambiente	0,37	6,57	-0,87	88,5	50,5	-6,73
Precipitación	-	-	-	-	-	-
Horas de sol	0,97	151,35	-55,2	17,78	11,64	-4,25

Tabla IV.12. Parámetros de validación del modelo para estimar *directa diaria* con datos de horas de sol en 2009.

Variable	R <sup>2</sup>	RECM (MJm <sup>-2</sup> )	EM (MJm <sup>-2</sup> )	EAMP (%)	RECMN (%)	EMN (%)
Horas de sol	0,95	2,69	-0,31	40,02	19,87	-2,31

### IV.3. Modelos para estimar irradiación difusa.

La mayoría de las aplicaciones solares prácticas están basadas en procesos térmicos o fotovoltaicos, en cualquier caso para el diseño de esos sistemas es preciso obtener la irradiación total en plano inclinado, y esto supone disponer de la irradiación global y la difusa en plano horizontal, puesto que las demás componentes (directa y reflejada) se pueden obtener a partir de las anteriores, sin embargo dado que hasta fechas recientes era difícil tener registros de radiación difusa, son abundantes en la literatura los estudios centrados en predecir el valor de esta componente. La mayoría de los modelos se centra en la obtención de la correlación entre el índice de claridad y la fracción difusa, para diferentes intervalos temporales.

Los apartados siguientes se dedican a plasmar los modelos elaborados para la estimación de irradiación difusa en A Coruña.

#### IV.3.1. Modelo para la irradiación difusa diaria media mensual.

Para la estimación de la componente difusa se han desarrollado múltiples modelos, algunos de los cuales ya se referencian en el capítulo de revisión bibliográfica de este estudio, los más utilizados son los que relacionan la fracción difusa con el índice de claridad a nivel horario, diario o mensual, suelen denominarse modelos de correlaciones tipo Liu-Jordan, por ser estos autores los primeros en proponerlos.

Con el objetivo de obtener las componentes de la irradiación global, Liu y Jordan desarrollaron un modelo en el que relacionan la razón entre la irradiación difusa y la global, ambas diarias promediadas a nivel mensual, y el índice de claridad medio diario mensual ( $k_t$ ), la expresión responde a la ecuación (II.22), reproducida aquí para mayor claridad.

$$F_d = a - bk_t \quad (\text{IV.7})$$

Se ha comprobado este modelo para los datos de A Coruña utilizando los coeficientes de Page. Inicialmente se hizo un testeo para determinar la validez de dichos coeficientes, tomando los promedios de global y del índice de claridad durante los 25 años, y comparando los valores de difusa estimada con los promedios diarios mensuales de difusa a lo largo de los 11 años disponibles de datos, (Figura IV.47), el RECMN es de  $23,9 \text{ 10kJm}^{-2}$ , el EMN de  $-1,51\%$ , y el EAMP de  $4,7\%$ , lo que permite asegurar que los valores de  $a=1$  y  $b=1,13$  se adecuan bien a los datos de A Coruña.

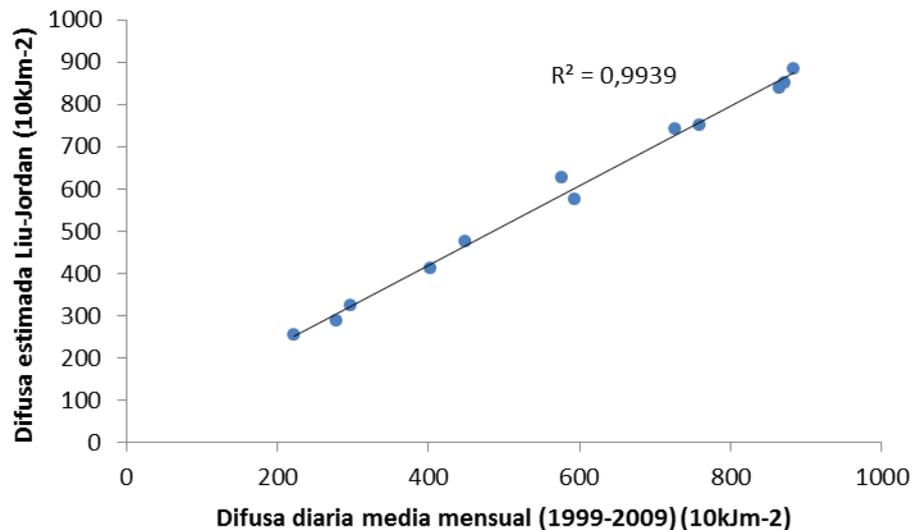


Figura IV.47. Difusa mensual estimada con el modelo de Liu-Jordan frente a difusa medida.

A continuación se comprobó la bondad del modelo para estimar los valores de un año concreto, en este caso tomamos el 2009, promediamos para cada mes, los valores diarios de irradiación global y del índice de claridad, y obtenemos los valores diarios medios mensuales de irradiación difusa. Los resultados del ajuste se muestran en la Tabla IV.13 y Figura IV.48. El modelo se ajusta a los valores medidos aunque sobreestima ligeramente la radiación.

Tabla IV. 13. Parámetros de validación del modelo para estimar irradiación difusa mensual con datos de  $k_t$  en 2009.

$R^2$	RECM (10kJm <sup>-2</sup> )	EM (10kJm <sup>-2</sup> )	EAMP (%)	RECMN (%)	EMN (%)
0,976	57,42	-43,72	10,26	11	-8

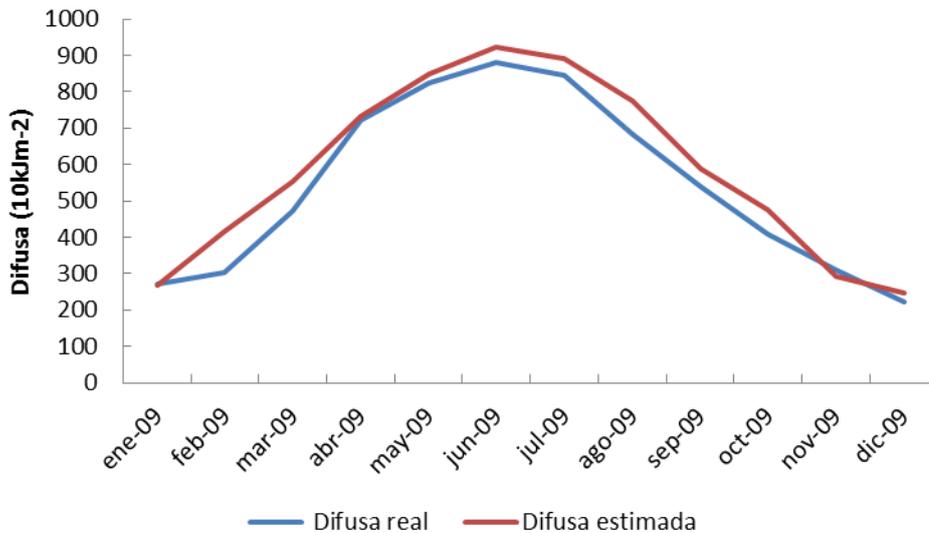


Figura IV.48. Estimación de irradiación difusa mensual en 2009.

### IV.3.2. Modelo para la irradiación difusa diaria.

Para obtener la correlación entre la fracción difusa y el índice de claridad se dispone de un total de 3417 días con valores de ambos índices, este conjunto se divide en dos grupos, uno de los cuales se utiliza para el ajuste del modelo y el otro para su validación, la selección de cada conjunto se realiza de forma aleatoria.

En la Figura IV.46 se representa la gráfica de dispersión de la fracción difusa frente al índice de claridad ( $k_t$ ) de los datos diarios seleccionados para el ajuste del modelo, si bien la mayoría de los puntos siguen una diagonal descendente (a días más claros corresponden valores de fracción difusa menores) y están relativamente próximos entre sí, hay algunos puntos dispersos, que se filtran siguiendo el procedimiento descrito en el apartado III.8 del capítulo III.

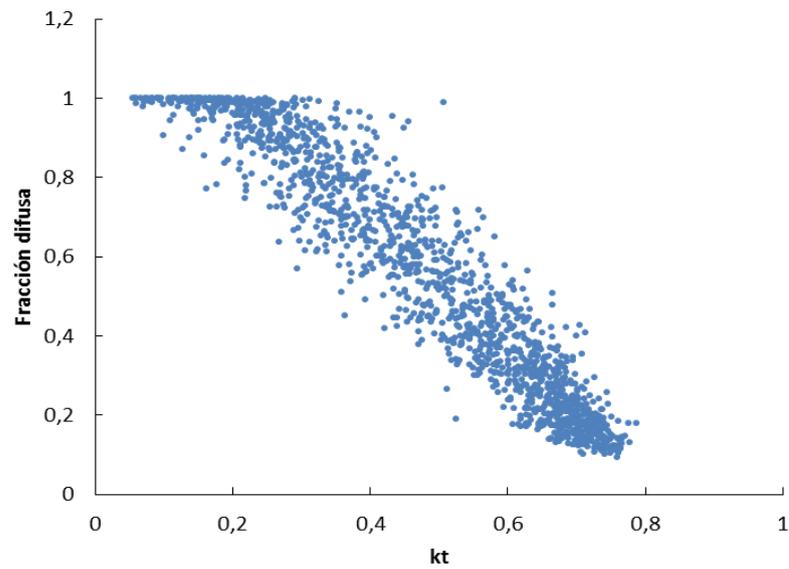


Figura IV.49. Correlación  $F_d-K_t$  de los datos diarios del conjunto utilizado para ajustar el modelo

Una vez filtrados los valores atípicos se obtiene un modelo ajustado a tramos siguiendo también el procedimiento descrito en el apartado III.8 del capítulo III.

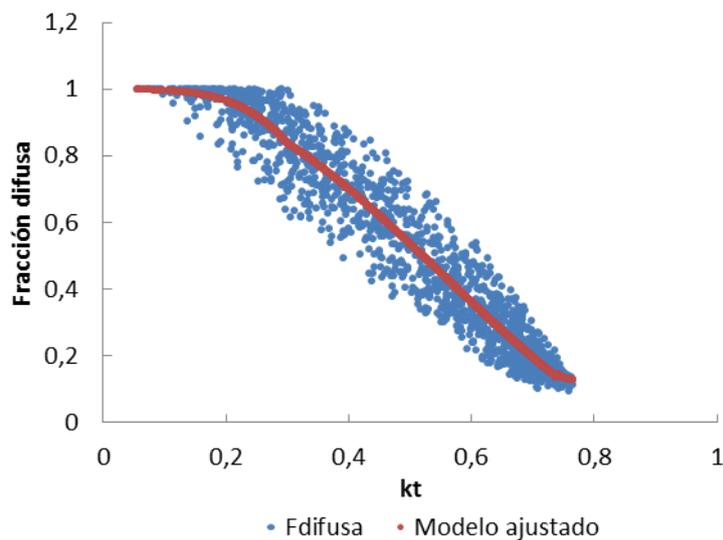


Figura IV.50. Correlación  $F_d-K_t$  una vez filtrados los atípicos.

La expresión de la Fracción difusa en función de  $k_t$  queda como sigue:

$$\begin{aligned}
 F_d &= -14,246k_t^3 + 3,7741k_t^2 - 0,4364k_t + 1,0151 & 0 \leq k_t < 0,3 \\
 F_d &= 2,9933k_t^3 - 4,9869k_t^2 + 1,0181k_t + 0,9 & 0,3 \leq k_t < 0,74 \\
 F_d &= 32,9k_t^2 - 50,151k_t + 19,241 & 0,74 \leq k_t < 0,79
 \end{aligned}
 \tag{IV.8}$$

En la Figura IV.51 se muestra el ajuste del modelo diario al conjunto de datos de validación. La proporción de varianza de la fracción difusa que explica el modelo es del 91%.

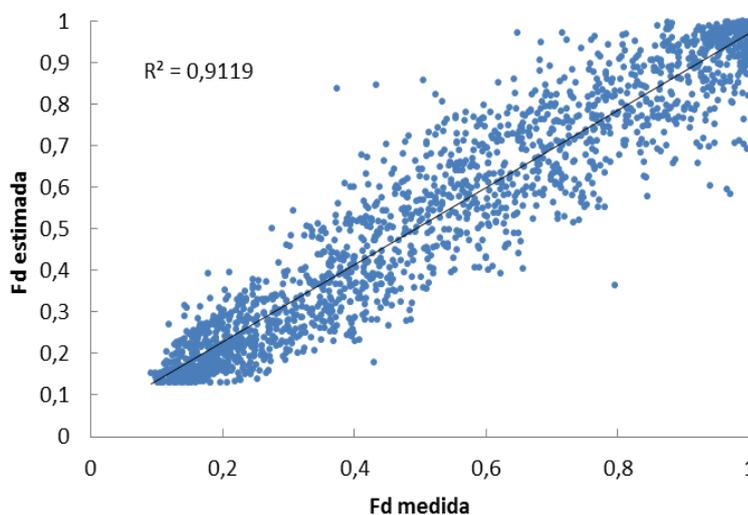


Figura IV.51. Estimación de Fracción difusa diaria

Se han calculado los principales indicadores de error en la estimación de la irradiación difusa diaria con el conjunto de datos de validación.

Tabla IV.14. Parámetros de validación del modelo para estimar irradiación difusa diaria con datos de  $k_t$  del conjunto de validación.

$R^2$	RECM (10kJm <sup>-2</sup> )	EM (10kJm <sup>-2</sup> )	EAMP (%)	RECMN (%)	EMN (%)
0,85	123,68	11,27	16,22	21,38	1,95

Del total de días del conjunto de validación el 29% presenta niveles de error absoluto porcentual por debajo del 5%, y más del 60% se encuentra por debajo de un 15% de error. El ajuste es mejor para valores de  $k_t \leq 0,3$ , en ese caso el error medio porcentual

es del 6,4%, sin embargo la dispersión de valores de fracción difusa para valores intermedios de  $k_t$  representa un reto para el buen ajuste del modelo.

### IV.3.3. Modelos para la irradiación difusa horaria.

A nivel horario, teniendo en cuenta la posibilidad señalada anteriormente de la dependencia de los errores del modelo con la elevación solar se ha obtenido un primer modelo para el conjunto total de los datos horarios (*Modelo horario único*) y otros cinco adicionales aplicables a las bandas horarias de acuerdo a la elevación del sol.

#### *Modelo horario único*

Tomando todos los datos horarios como un único conjunto disponemos de 38.370 pares  $F_d-k_t$  horarios, que separamos de forma aleatoria en dos conjuntos: el de ajuste con aproximadamente dos tercios de los datos, y el de validación con el tercio restante.

En la Figura IV.52 se muestra la correlación de los valores horarios sin filtrar y en la Figura IV.53 ya filtrados y con el modelo ajustado.

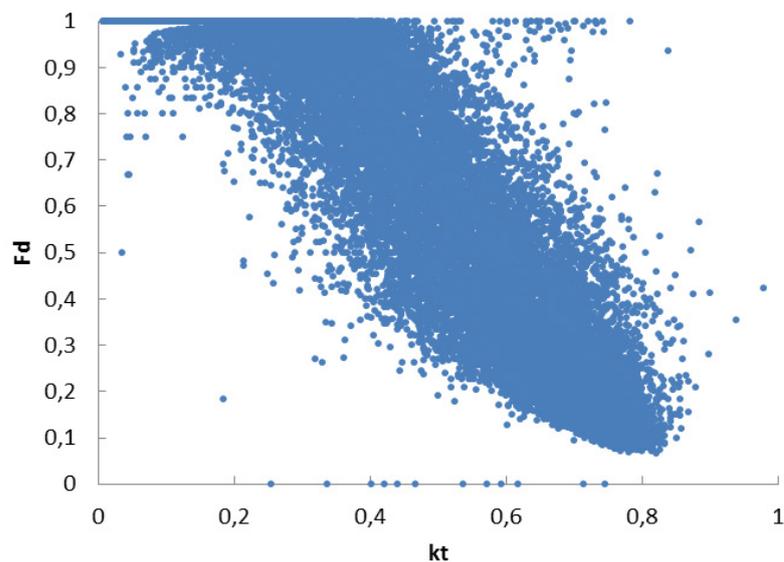


Figura IV.52. Correlación  $F_d-k_t$  de los datos horarios del conjunto de ajuste

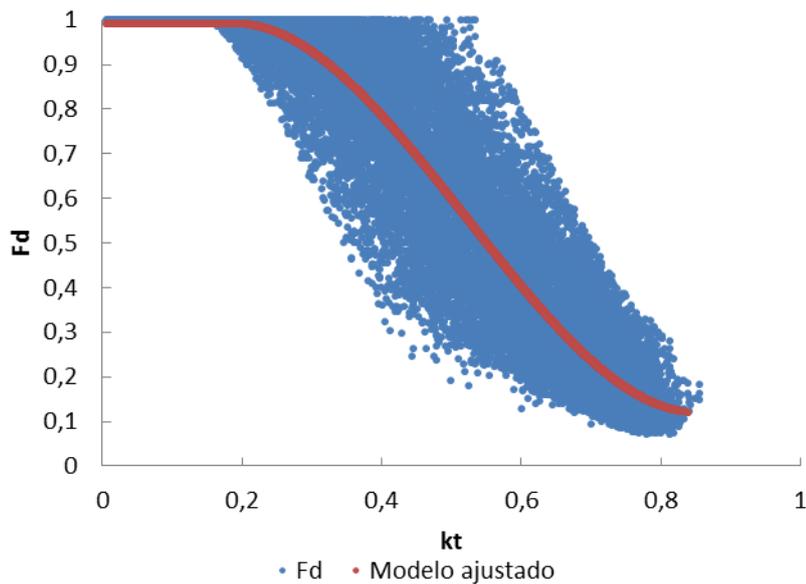


Figura IV.53. Correlación  $F_d$ - $K_t$  de los datos horarios filtrados con el modelo ajustado

La expresión del modelo ajustado corresponde a la expresión siguiente:

$$\begin{aligned}
 F_d &= 0,99 & k_t < 0,21 \\
 F_d &= 6,0623k_t^3 - 9,5195k_t^2 + 3,0017k_t + 0,7219 & 0,21 \leq k_t < 0,85
 \end{aligned} \quad (IV.9)$$

El ajuste del modelo se comprobó sobre el conjunto de datos de validación midiendo los errores de estimación de la fracción difusa. Ver Tabla IV.15.

Tabla IV. 15. Estimación de  $F_d$  horaria en el conjunto de validación.

$R^2$	EMN (%)	RECMN (%)
0,88	0,25	19,2

A continuación se muestra la capacidad para estimar la irradiación difusa horaria.

Tabla IV.16. Parámetros de validación del modelo para estimar irradiación difusa horaria con datos de  $k_t$  del conjunto de validación.

$R^2$	RECM ( $10\text{kJm}^{-2}$ )	EM ( $10\text{kJm}^{-2}$ )	EAMP (%)	RECMN (%)	EMN (%)
0,78	17,97	2,31	20,58	34,21	4,40

*Modelos horarios en función de la elevación solar*

A continuación se muestran las correlaciones obtenidas, para distintas elevaciones, de la fracción difusa frente al índice de claridad. Al igual que en los casos anteriores se ha introducido una etapa de filtrado de datos para ajustar el modelo, sin embargo en estas representaciones, se ha optado por mostrar directamente los datos originales junto al modelo que mejor representa cada intervalo de datos.

A medida que tenemos el sol en posiciones más elevadas se reduce la dispersión de valores, así para elevaciones por encima de los  $45^\circ$  todos los puntos se agrupan muy cerca de la diagonal, concentrándose además en torno a valores de fracción difusa muy bajos e índices de claridad altos.

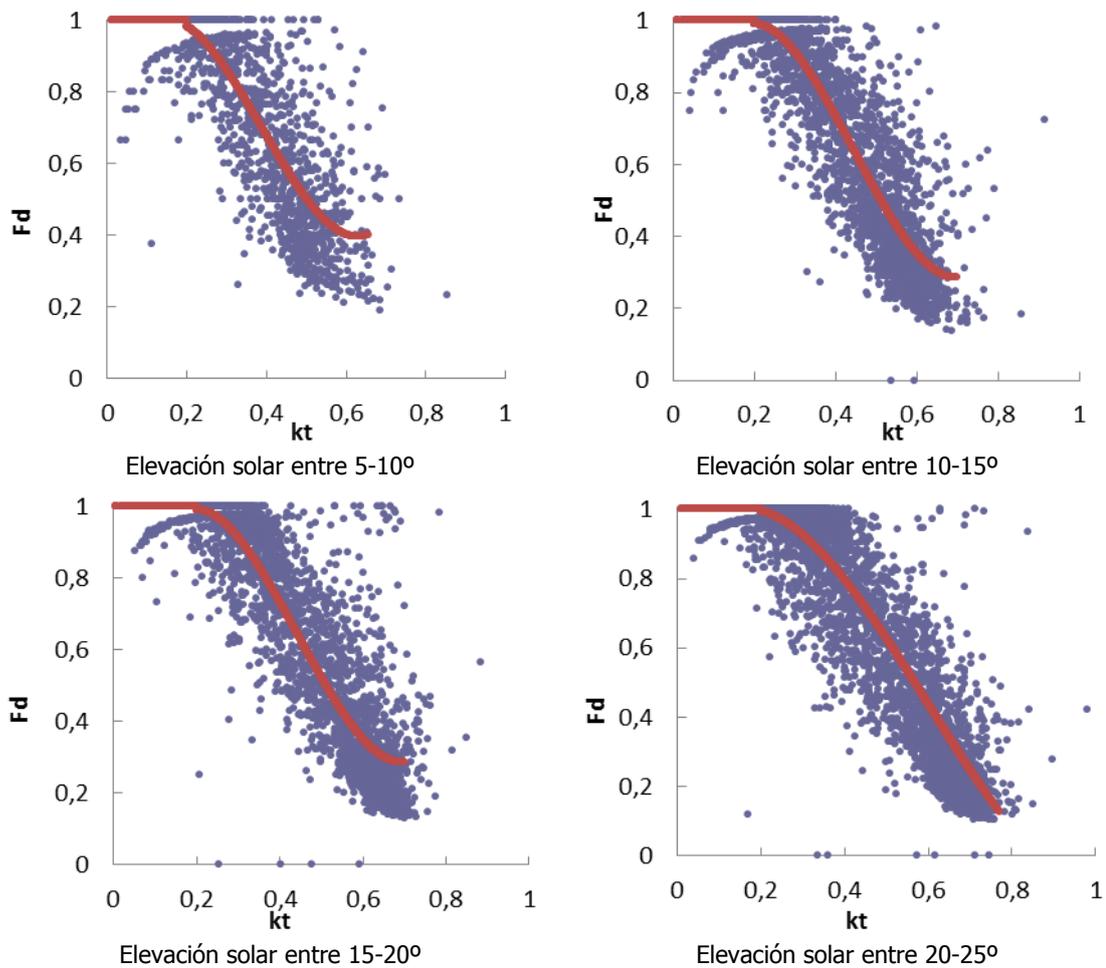


Figura IV.54.a. Correlación horaria  $F_d-k_t$  para elevaciones solares entre  $5^\circ-25^\circ$

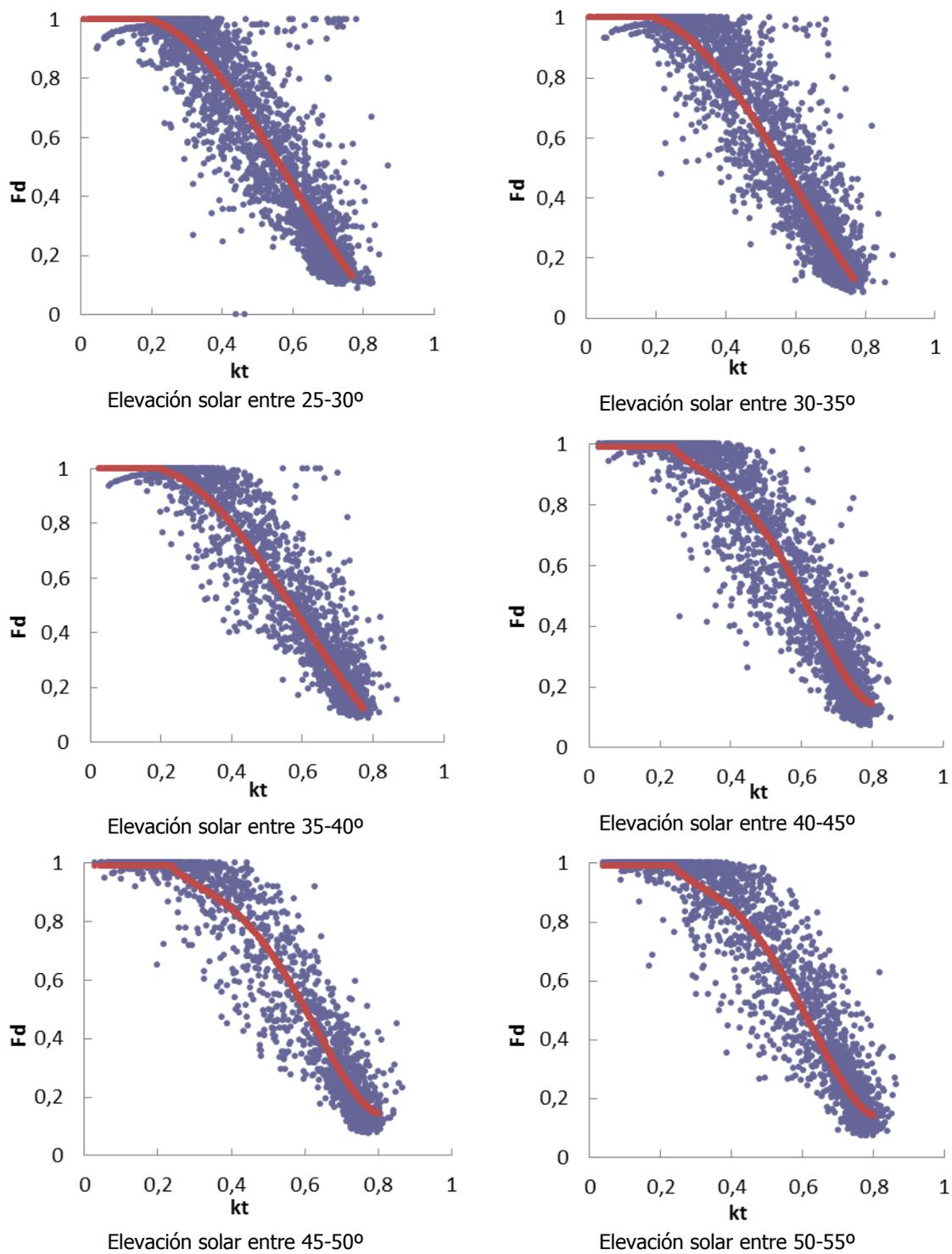


Figura IV.54.b. Correlación horaria  $F_d-k_t$  para elevaciones solares entre 25°-55°

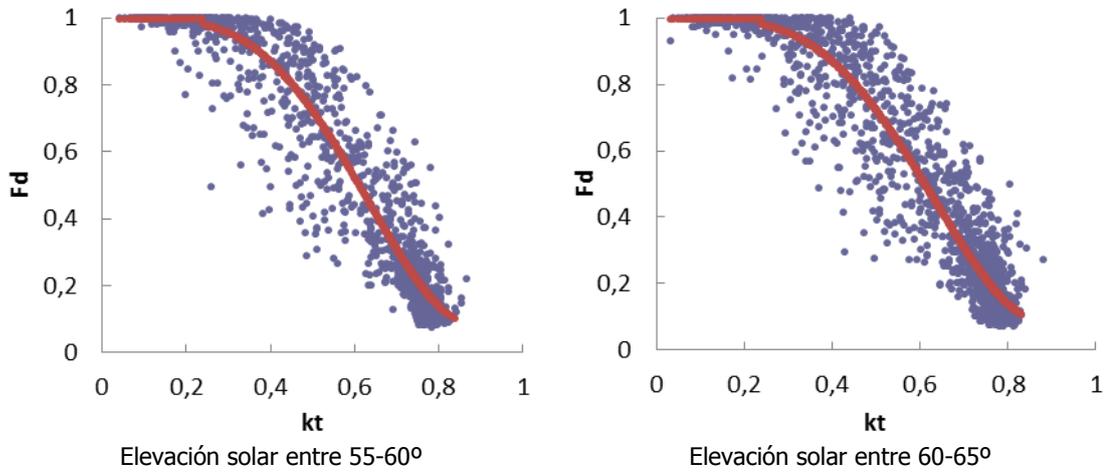


Figura IV.54.c. Correlación horaria  $F_d$ - $k_t$  para elevaciones solares entre 55°-65°

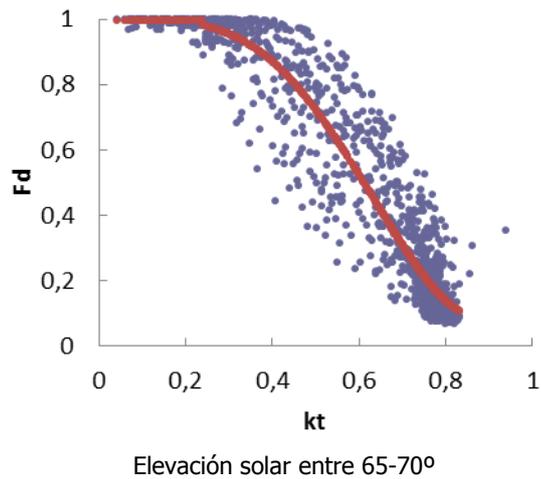


Figura IV.54.d. Correlación horaria  $F_d$ - $k_t$  para elevaciones solares entre 65°-70°

Dada la homogeneidad de resultados que se observa para varios grupos de elevaciones, finalmente se decide el ajuste de 5 modelos: uno para elevaciones solares entre 5-10°, y el resto tomando los promedios de 10-20°, 20-40°, 40-55° y 55-70°. En la Figura IV.55 se muestra el comportamiento medio de la Fracción difusa frente a  $k_t$  en cada uno de estos grupos.

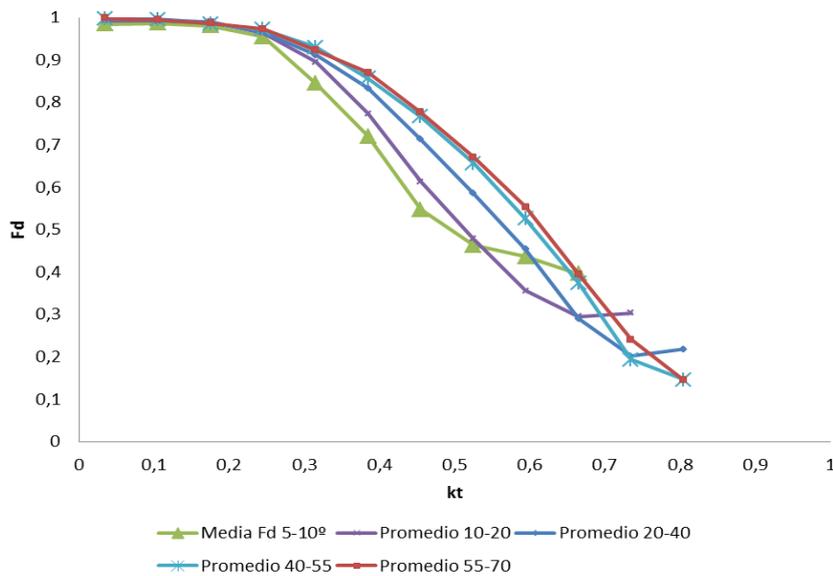


Figura IV.55. Valor medio de la Fracción difusa frente a  $k_t$  en función de la elevación solar

La fracción difusa es 1 para valores de  $k_t$  por debajo de 0,20, disminuyendo hasta alcanzar un mínimo que depende de la elevación, para elevaciones por debajo de 20° el mínimo se alcanza para valores de  $k_t$  en torno 0,7 y es siempre mayor que 0,3, mientras que para elevaciones superiores se desplaza hacia valores más altos de  $k_t$  y desciende hasta valores en torno a 0,2. También se observa que para valores medios de  $k_t$ , la fracción difusa presenta la mayor variabilidad con la elevación, pasando de valores próximos a 0,5 para elevaciones por debajo de 20° a valores en torno a 0,7 para las elevaciones más altas.

Esa variabilidad se puede asociar a fenómenos de nieblas formadas sobre el mar a cierta altura que permiten recibir radiación directa mientras el sol está bajo y, al irse elevando éste, van incrementando la proporción de difusa por la dispersión de la irradiación solar al atravesarla.

Además es de resaltar que para valores de  $k_t$  por encima de 0,7, la fracción difusa es prácticamente independiente de la elevación.

Algunos autores (De Miguel et al. 2001),(R Posadillo y López Luque 2009), muestran en este tipo de gráficas un incremento de la fracción difusa que se produce una vez alcanzado el mínimo, este fenómeno asociado con períodos de sol descubierto en cielos parcialmente nublados, lo relacionan con la elevación de la luminosidad debida a las múltiples reflexiones en las nubes o también a superficies con albedo elevado, en este estudio este fenómeno también tiene lugar aunque en un número de puntos que

se ha considerado muy poco significativo, pues como ya se expuso al presentar los histogramas, en los últimos intervalos [0,84-0,91] y [0,91-0,98] apenas tenemos datos, en la mayoría de las elevaciones hay 1 ó dos representantes, y en cualquier caso, siempre por debajo de 8 pares de puntos.

El ajuste mediante polinomios de las curvas de la gráfica anterior proporciona la expresión de la Fracción difusa en función de  $k_t$  para cada grupo de elevaciones, como sigue:

Elevaciones entre 5-10°

$$\begin{aligned} F_d &= 1 & 0 \leq k_t < 0,2 \\ F_d &= 11,298k_t^3 - 13,227k_t^2 + 3,2509k_t + 0,773 & 0,2 \leq k_t < 0,7 \end{aligned} \quad (\text{IV.10})$$

Elevaciones entre 10-20°

$$\begin{aligned} F_d &= 1 & 0 \leq k_t < 0,2 \\ F_d &= 11,516k_t^3 - 15,4k_t^2 + 4,739k_t + 0,568 & 0,2 \leq k_t < 0,7 \end{aligned} \quad (\text{IV.11})$$

Elevaciones entre 20-40°

$$\begin{aligned} F_d &= 1 & 0 \leq k_t < 0,2 \\ F_d &= 3,3415k_t^3 - 6,0295k_t^2 + 1,6976k_t + 0,8704 & 0,2 \leq k_t < 0,77 \end{aligned} \quad (\text{IV.12})$$

Elevaciones entre 40-55°

$$\begin{aligned} F_d &= 0,99 & 0 \leq k_t < 0,24 \\ F_d &= 23,704k_t^4 - 44,77k_t^3 + 28,134k_t^2 - 8,1313k_t + 1,8534 & 0,24 \leq k_t < 0,8 \end{aligned} \quad (\text{IV.13})$$

Elevaciones entre 55-70°

$$\begin{aligned} F_d &= 0,994 & 0 \leq k_t < 0,24 \\ F_d &= 10,153k_t^4 - 16,515k_t^3 + 6,86k_t^2 - 1,3095k_t + 1,0933 & 0,24 \leq k_t < 0,83 \end{aligned} \quad (\text{IV.14})$$

En la Tabla IV.17 se presentan los errores relativos a la estimación de la fracción difusa en el conjunto de validación. Los errores resultantes para todo el rango de elevaciones y los coeficientes de determinación indican un buen ajuste de estos modelos, sobre todo para elevaciones inferiores a 45°, para las elevaciones más altas, la dispersión de valores de fracción difusa en torno a la media incrementa el error.

Tabla IV.17. Estimación de  $F_d$  horaria en cada conjunto de validación según elevación solar

Elevación	R <sup>2</sup>	EMN (%)	RECMN (%)	Elevación	R <sup>2</sup>	EMN (%)	RECMN (%)
5-10°	0,77	0,44	15,97	40-45°	0,91	1,32	18,51
10-15°	0,84	1,75	15,64	45-50°	0,92	0,84	19,52
15-20°	0,86	-0,01	15,97	50-55°	0,9	-0,37	21,59
20-25°	0,9	4,16	16,88	55-60°	0,89	2,86	22,1
25-30°	0,86	1,67	19,9	60-65°	0,91	1,03	21,79
30-35°	0,9	-0,96	17,92	65-70°	0,89	0,29	24,72
35-40°	0,91	-2,56	17,56				

#### IV.3.4. Comparación con otros modelos.

La principal característica de los modelos de correlaciones es que suelen ajustarse a los datos disponibles de una zona geográfica concreta, y normalmente no son generalizables excepto a localizaciones con las mismas características climáticas. Por ello, en este estudio se ha seleccionado, de la revisión bibliográfica, el modelo de Boland y Ridley (Badescu 2008), que correlaciona  $F_d$  y  $k_t$  a nivel horario, y cuya expresión es:

$$F_d = \frac{1}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 k_t}} \quad (\text{IV.15})$$

Los parámetros del modelo se han ajustado a diferentes localidades de Australia, África, Asia y Europa, en la Tabla IV.18 se muestran los valores obtenidos por los autores para las tres ciudades europeas, siendo una de ellas Lisboa que dista 600 km de A Coruña, y además goza de clima atlántico, aunque está situada en una latitud cinco grados inferior.

Tabla IV.18. Parámetros estimados para varias localidades.

Parámetros	Lisboa	Bracknell (U.K)	Uccle (Bélgica)
$\beta_0$	-4,8	-4,38	-4,94
$\beta_1$	7,98	6,62	8,66

Si reorganizamos la ecuación del modelo tal como se indica a continuación:

$$\ln\left(\frac{1}{F_d} - 1\right) = \beta_0 + \beta_1 k_t \quad (\text{IV. 16})$$

Y ajustamos la expresión anterior al conjunto de datos horarios de A Coruña, obtenemos los valores de los parámetros  $\beta_0$  y  $\beta_1$  para esta ciudad, que resultan próximos a los de Lisboa,  $\beta_0 = -5,02$  y  $\beta_1 = 8,79$ .

Comparamos en primer lugar el *Modelo horario único* propuesto en esta tesis con el de Boland, para contrastar los valores de fracción difusa estimados por cada uno. Se muestran en la Tabla IV.19 diferentes medidas de error, sobre el conjunto de datos de validación, sin tener en cuenta la elevación solar.

Tabla IV.19. Comparativa entre el Modelo horario único y el de Boland. Estimación de  $F_d$ .

Modelo	R <sup>2</sup>	EMN (%)	RECMN (%)
Modelo horario único	0,88	0,25	19,2
Modelo de Boland*	0,87	0,8	19,6

\*parámetros calculados para A Coruña

A la vista de la tabla ambos modelos se comportan de forma similar, aunque el error medio normalizado es 3 veces mayor en el modelo de Boland.

Si la validación se hace por elevaciones, el modelo de Boland únicamente ofrece resultados ligeramente superiores para el rango de elevaciones entre 20-30° (Tablas IV.20.a y b)

Tabla IV.20.a. Comparativa entre los Modelos horarios por elevación y el de Boland. Estimación de  $F_d$ . Elevaciones inferiores a 20°.

Elevación	Modelos horarios propuestos			Modelo de Boland		
	R <sup>2</sup>	EMN (%)	RECMN (%)	R <sup>2</sup>	EMN (%)	RECMN (%)
5-10°	0,77	0,44	15,97	0,71	7,56	20,22
10-15°	0,84	1,75	15,64	0,82	7,33	19,18
15-20°	0,86	-0,01	15,97	0,85	5,59	17,93

Tabla IV. 20.b. Comparativa entre los Modelos horarios por elevación y el de Boland. Estimación de  $F_d$ . Elevaciones superiores a  $20^\circ$ .

Elevación	Modelos horarios propuestos			Modelo de Boland		
	R <sup>2</sup>	EMN (%)	RECMN(%)	R <sup>2</sup>	EMN (%)	RECMN(%)
20-25°	0,9	4,16	16,88	0,89	3,08	16,88
25-30°	0,86	1,67	19,9	0,86	0,80	19,91
30-35°	0,9	-0,96	17,92	0,90	-1,72	17,72
35-40°	0,91	-2,56	17,56	0,91	-3	17,35
40-45°	0,91	1,32	18,51	0,91	-4,61	19,16
45-50°	0,92	0,84	19,52	0,91	-5,41	20,36
50-55°	0,9	-0,37	21,59	0,9	-6,68	22,69
55-60°	0,89	2,86	22,1	0,89	-6,80	23,45
60-65°	0,91	1,03	21,79	0,91	-8,99	24,54
65-70°	0,89	0,29	24,72	0,88	-9,79	27,55

#### IV.4. Modelo para estimar irradiación directa en plano normal.

Siguiendo el trabajo de (López, Rubio, and Batlles 2000) para estimar la irradiación directa horaria, se ha ajustado un modelo que permite obtener el valor de  $k_b$ , cociente entre la irradiación directa y la extraterrestre ambas en plano normal, en función del índice de claridad,  $k_t$  y del coseno del ángulo cenital (complementario del de elevación). El valor de este ángulo (ecuación II.15) depende del día del año, la latitud y la hora del día.

$$\begin{aligned}
 k_b &= 0,008624 - 0,13k_t + 0,62k_t^2 - 0,14k_t^2 \cos \theta_z & k_t < 0,37 \\
 k_b &= -0,632 + 2,176k_t - 0,753k_t^2 + 0,991 \cos \theta_z - & & \\
 & 4,264k_t \cos \theta_z + 3,897 k_t^2 \cos \theta_z & 0,37 \leq k_t & 
 \end{aligned}
 \tag{IV. 17}$$

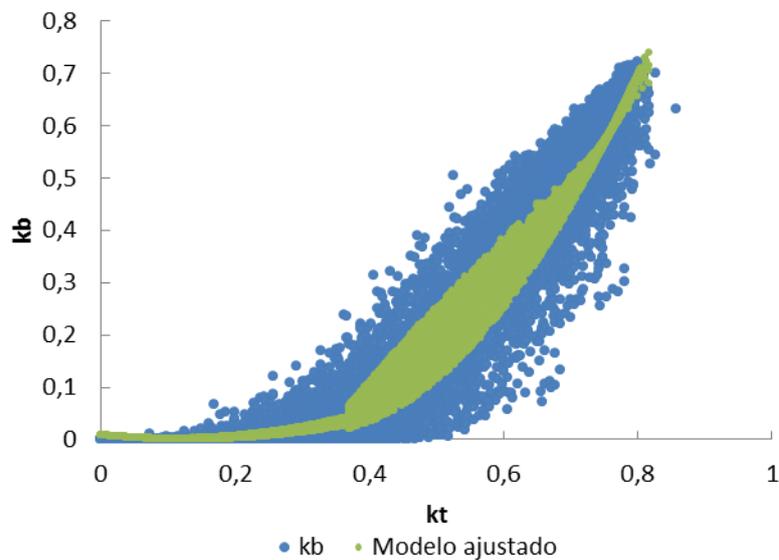


Figura IV.56. Correlación  $k_b$ - $k_t$ . Modelo ajustado sobre los datos del conjunto de ajuste.

La precisión del modelo para la estimación de la irradiación directa horaria sobre el conjunto de datos de validación (5.265 valores horarios) se ofrece en la tabla siguiente, en la que figuran también los estadísticos del modelo original de (López, Rubio, and Batlles 2000) aplicado a los datos de A Coruña.

Tabla IV.21. Comparativa entre modelos para estimar irradiación directa horaria con datos de  $k_t$  del conjunto de validación.

	$R^2$	RECM ( $10\text{kJm}^{-2}$ )	EM ( $10\text{kJm}^{-2}$ )	EAMP (%)	RECMN (%)	EMN (%)
Modelo propuesto	0,9399	28,26	0,493	85	24,7	0,43
Modelo de López <i>et al.</i>	0,9371	33,17	-15,66	165	29	-13,69

## IV.5. Análisis ARIMA.

### IV.5.1. Análisis ARIMA para la serie diaria de irradiación global.

Dado que el método ARIMA precisa contar con datos recogidos a una frecuencia regular, los valores diarios aislados perdidos se rellenaron en esta serie tal como se expuso en el capítulo III, quedando finalmente completa con valores diarios de un total

de 25 años, de los que se utilizaron 24 para ajustar el modelo sirviendo el último año de datos (2009) para realizar predicciones y comprobar la bondad del mismo.

La primera etapa consiste en identificar el tipo de proceso estocástico con el que se corresponde nuestra serie, (estacionario o no, autorregresivo, media móvil, con o sin estacionalidad, etc.).

Para ello es preciso estudiar las características esenciales de la serie, en la Figura IV.57 se representaron únicamente los 4 últimos años del período de ajuste, por motivos de visibilidad. En ella se aprecia la oscilación correspondiente al ciclo anual, no se observa ninguna tendencia, la media es estable, pero sin embargo sí se manifiesta diferente variabilidad a lo largo del año, en verano se observa una mayor variabilidad que en invierno, la varianza es mayor cuando la serie toma valores altos y se reduce para valores bajos, lo que sugiere aplicar a la serie de irradiación global una transformación logarítmica para estabilizar la varianza.

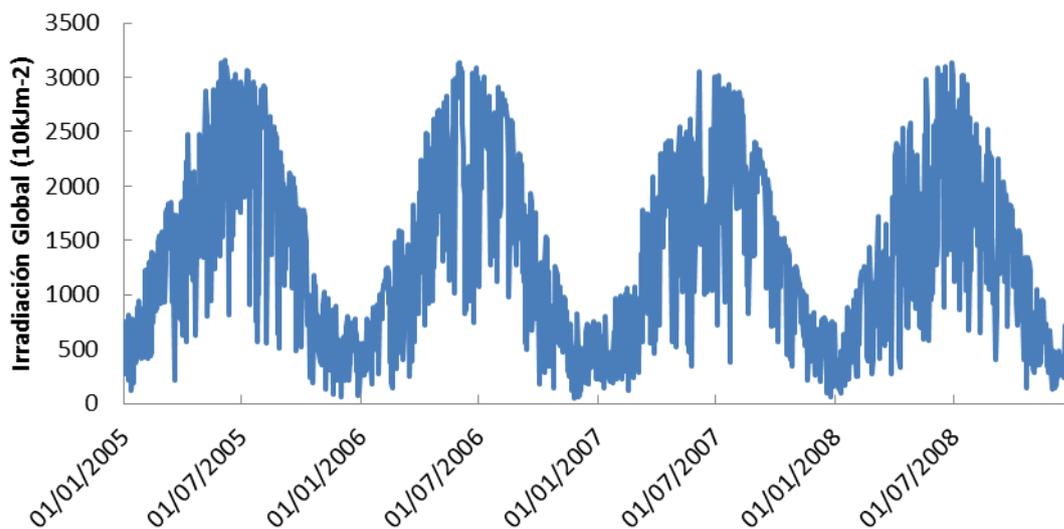


Figura IV. 57. Evolución de la serie de irradiación global diaria del 1-01-2005 a 31-12-2008.

Las funciones de autocorrelación simple (ACF) y parcial (ACF parcial) de la serie transformada, calculadas para 1100 retardos en la Figura IV.58, muestran de nuevo la ciclicidad, y la no estacionariedad de la serie  $LN_{Global} = \ln(Global)$ . Para lograr una serie estacionaria se aplicará una diferencia estacional.

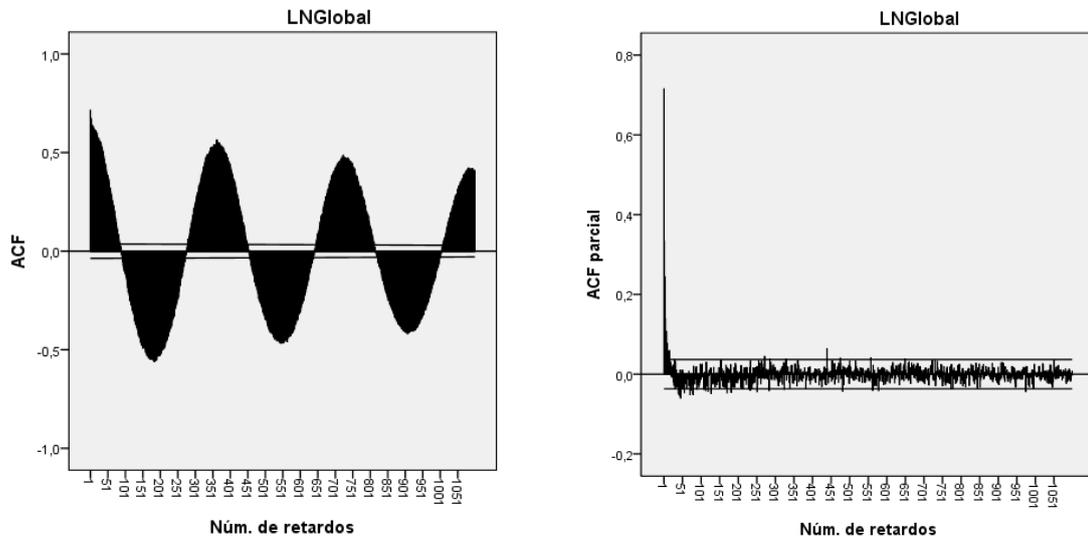


Figura IV.58. Función de autocorrelación (ACF) y de autocorrelación parcial de LNGlobal.

A continuación se presentan las funciones ACF y ACF parcial de la serie en logaritmos y con una diferencia estacional. Ahora los coeficientes de autocorrelación decrecen rápidamente indicando que se trata de un proceso estacionario.

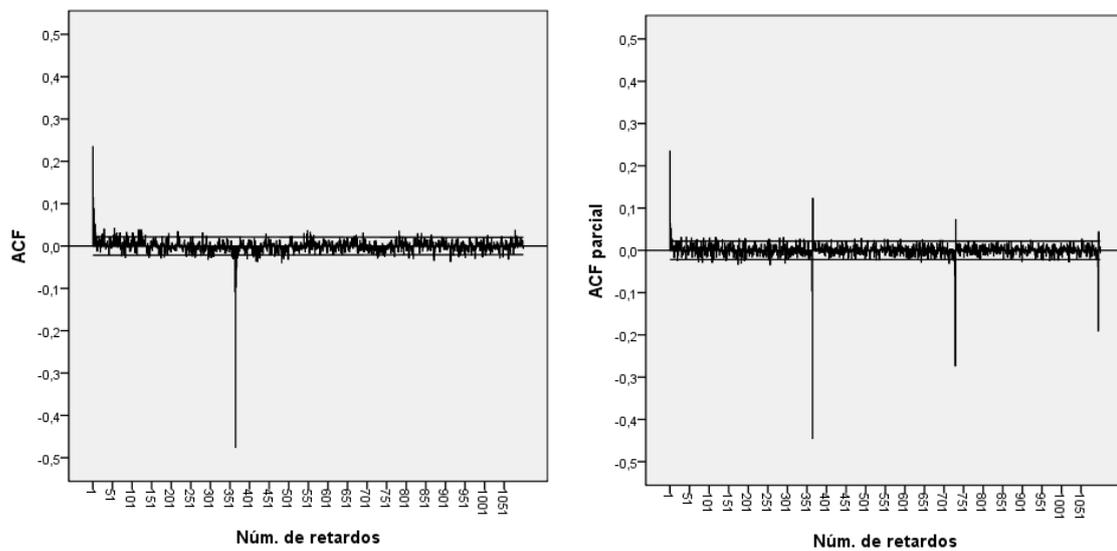


Figura IV. 59. ACF y ACF parcial de LNGlobal con 1 diferencia estacional.

### *Selección del modelo y estimación de parámetros*

Para elegir un modelo que se ajuste a los datos, es preciso analizar en detalle la zona del origen y las correspondientes a los retardos estacionales, en la Figura IV.60 se

muestra la composición de ACF y ACF parcial con zoom en cuatro zonas: origen, primer retardo de ciclo (365), segundo retardo de ciclo (730) y tercer retardo de ciclo (1095).

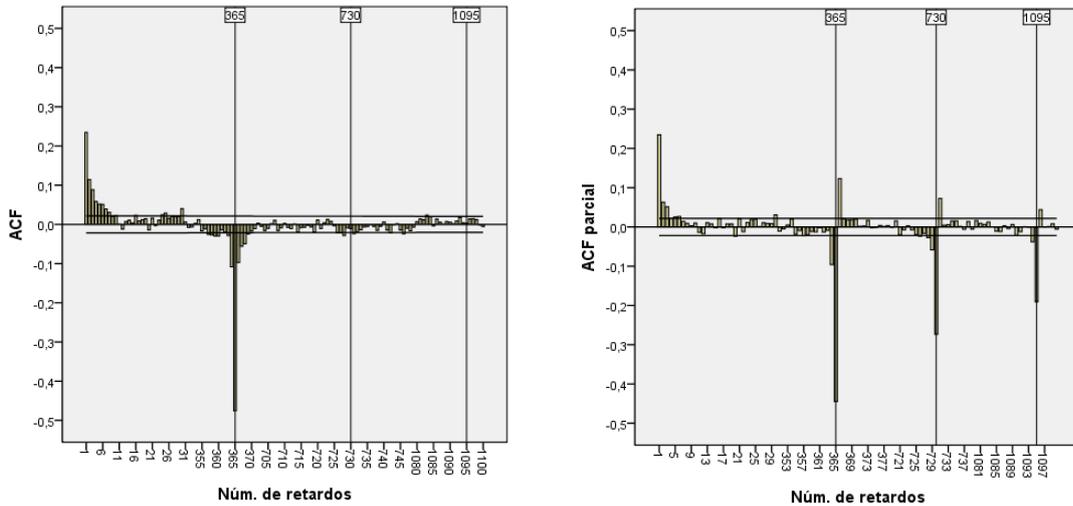


Figura IV.60. Detalle de ACF y ACF parcial de LNGlobal con 1 diferencia estacional.

En la parte regular se aprecia que los 3 primeros coeficientes son significativos en la ACF parcial, mientras que en la ACF los primeros coeficientes se atenúan muy rápidamente, esto se puede interpretar como una parte AR posiblemente de orden 3 o menor, aunque también podría ser un ARMA(3,1), por otra parte, en la ACF parcial a ambos lados de los retardos estacionales solamente hay dos coeficientes significativos, esta estructura, repetición de la parte regular, apunta a un orden 2 en la misma.

En cuanto a la estacional, en la ACF únicamente el coeficiente correspondiente al retardo 365 es significativo, mientras que en la ACF parcial se puede apreciar un decrecimiento lento de los coeficientes estacionales, esto indica un comportamiento MA de orden 1.

A partir de esas observaciones el modelo final ajustado es  $ARIMA(2,0,1) \times (0,1,1)_{365}$ , que podemos escribir como:

$$\phi_2(B)\nabla_{365}z_t = \Theta_1(B^{365})\theta_1(B)a_t \tag{IV.18}$$

En la expresión anterior:

$z_t = \ln(\text{Global})$  es la serie de irradiación global en logaritmos

$a_t$  representa los residuos del modelo

$\phi_2(B) = (1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2)$  es el operador AR regular de orden 2.

$\nabla_{365} = (1 - B^{365})$  representa la primera diferencia estacional.

$\theta_1(B) = (1 - \theta_1 B)$  es el operador media móvil de orden 1.

$\Theta_1(B^{365}) = (1 - \Theta_1 B^{365})$  es el operador media móvil estacional de orden 1.

La ecuación IV.18 se puede reescribir como:

$$z_t = z_{t-365} + \phi_1(z_{t-1} - z_{t-366}) + \phi_2(z_{t-2} - z_{t-367}) + a_t - \theta_1 a_{t-1} - \Theta_1(a_{t-365} - \theta_1 a_{t-366}) \quad (\text{IV.19})$$

En el modelo anterior la irradiación global en un día depende de su valor a esa misma fecha de hace un año, de los dos días anteriores y de los dos días anteriores a esa misma fecha de hace un año, a su vez también depende de los residuos del día anterior, y del mismo día y el anterior, del año anterior.

La estimación de los valores de los coeficientes se presenta en la Tabla IV.22:

Tabla IV.22. Coeficientes modelo ARIMA de la serie global diaria.

Coeficiente	Valor	Error	Sig.
$\phi_1=AR(1)$	0,8763	0,064142	0,0000
$\phi_2=AR(2)$	-0,0840	0,02336	0,0003
$\Theta_1=MA(1)$	0,6547	0,062506	0,0000
$\Theta_1=MA(1)_{\text{estacional}}$	0,9352	0,002563	0,0000

La detección de atípicos aditivos da lugar a un total de 30 días cuyos coeficientes resultan significativos. Ver Tabla IV.23.

Tabla IV.23.a. Coeficientes de atípicos aditivos de la serie global diaria

Fecha	Coeficiente	Sig.	Fecha	Coeficiente	Sig.
08/06/1988	-1,767	0,0000	19/11/2005	-1,799	0,0000
13/02/1996	-1,951	0,0000	14/12/1999	-1,843	0,0000
25/07/1996	-2,139	0,0000	08/03/1999	-1,970	0,0000
24/11/2006	-2,246	0,0000	15/07/2003	-2,140	0,0000
13/01/2000	-1,735	0,0001	03/12/2006	-2,004	0,0000
05/03/1995	-1,728	0,0001	24/12/1994	-1,610	0,0002

Tabla IV.23.b. Coeficientes de atípicos aditivos de la serie global diaria.

Fecha	Coeficiente	Sig.	Fecha	Coeficiente	Sig.
17/10/1993	-1,454	0,0008	07/06/1992	-1,489	0,0005
19/11/1993	-1,912	0,0000	08/05/1996	-1,930	0,0000
22/07/2007	-1,656	0,0001	21/02/1999	-1,556	0,0003
01/11/1991	-1,821	0,0000	31/12/1994	-1,830	0,0000
25/12/2007	-1,747	0,0001	12/11/2000	-1,828	0,0000
03/10/1990	-2,146	0,0000	17/03/2006	-1,753	0,0000
19/06/1987	-1,943	0,0000	27/12/2005	-1,729	0,0001
21/10/2008	-1,808	0,0000	20/03/2005	-1,484	0,0006
02/10/2006	-1,981	0,0000	01/12/2001	-1,277	0,0030

Teniendo en cuenta estos valores, la expresión del modelo completo corresponde a la ecuación IV.20, en la que  $w_j$  son los valores de los coeficientes estimados para cada atípico, e  $I_{jt}$  una variable impulso que toma el valor 1 únicamente en la fecha en la que se produce el mismo.

$$z_t = \sum_{j=1}^{30} w_j I_{jt} + \frac{\Theta_1(B^{365})\theta_1(B)}{\phi_2(B)\nabla_{365}} a_t \quad (\text{IV.20})$$

#### *Validación del modelo*

Los estadísticos de ajuste que se obtienen con este modelo confirman la validez del mismo, todos los parámetros del modelo son significativamente distintos de cero. Para confirmar la incorrelación de los residuos, hasta un número de retardos que tenga en cuenta la estacionalidad de la serie, se calcularon las funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial de los residuos para 1100 retardos, que se muestran en la Figura IV.61.

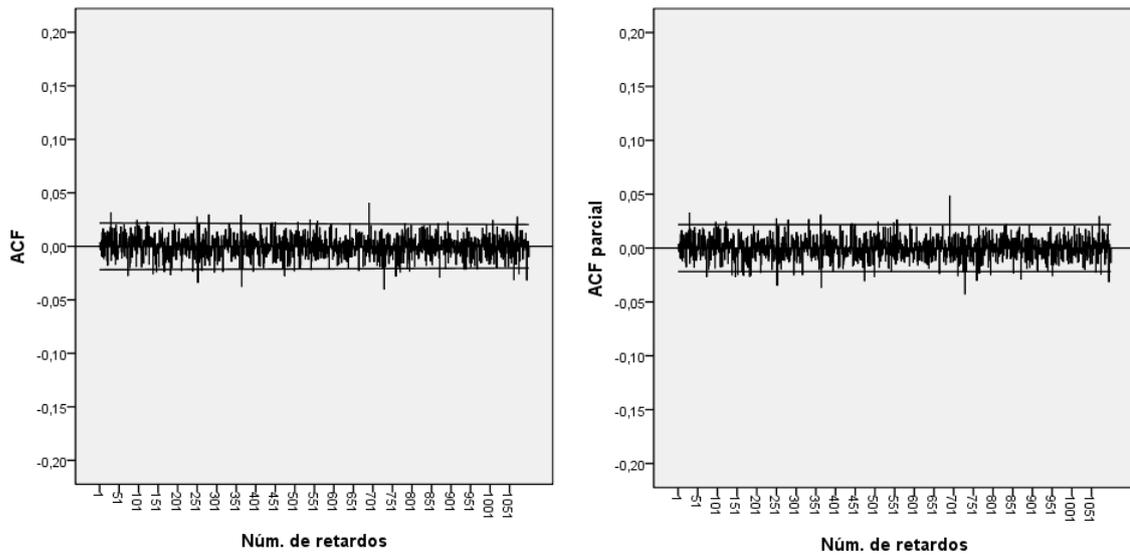


Figura IV.61. ACF y ACF Parcial de los residuos.

Se observa que en ambas funciones la mayoría de las correlaciones se encuentran dentro de la banda de confianza establecida para el 95%, y aunque se producen algunos picos fuera de esa banda su número no supera el 5% esperable, además el estadístico de Ljung-Box indica que ninguno de 1100 valores son significativos lo que confirma la incorrelación de los residuos.

En la Figura IV.62 se observa que las estimaciones del modelo durante el período de ajuste se corresponden con el valor medido, permitiendo recoger un 65% de la varianza de la señal.

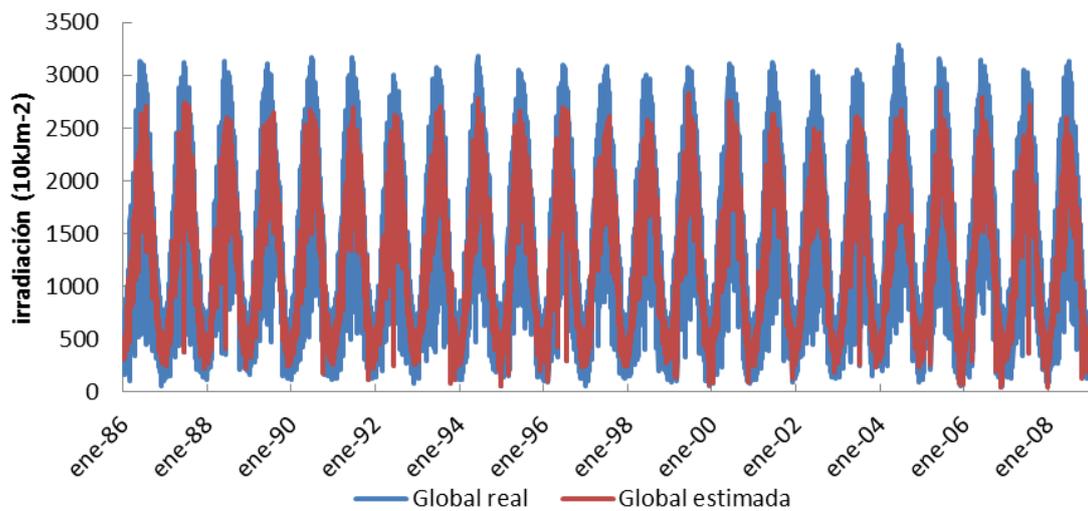


Figura IV.62. Ajuste del modelo ARIMA entre 1986 y 2008.

Las predicciones del modelo de irradiación global diaria para todo el 2009 se muestran en la Figura IV.63 comparándolas con las medidas de esta variable.

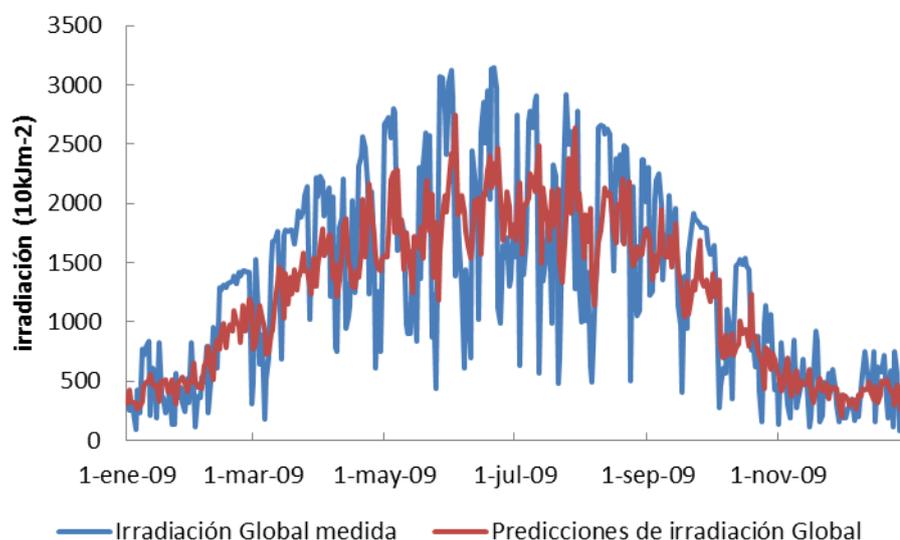


Figura IV.63. Irradiación global diaria y serie de predicciones del modelo ARIMA para el año 2009.

Los resultados que obtenemos reflejan que las predicciones se ajustan razonablemente a la serie, en la Tabla IV.24 se muestran los errores cometidos tanto en el período de ajuste como en el año 2009.

Tabla IV.24. Estadísticos de validación del modelo ARIMA de la serie global diaria

Período	$R^2$	RECM ( $10\text{kJm}^{-2}$ )	EM ( $10\text{kJm}^{-2}$ )	EAMP (%)	RECMN (%)	EMN (%)
Ajuste	0,654	492,74	89,2	40,81	36,63	6,6
2009	0,562	545,32	70,9	52,49	41,87	5,4

En la Figura IV.64 se ha representado el cociente entre los residuos y su desviación típica, para el año 2009, la mayoría se encuentran en la banda  $[-2,2]$  de valores esperados, excepto en un total de 16 días de los meses de mayo, junio, julio y agosto en los que el modelo sobreestima los datos.

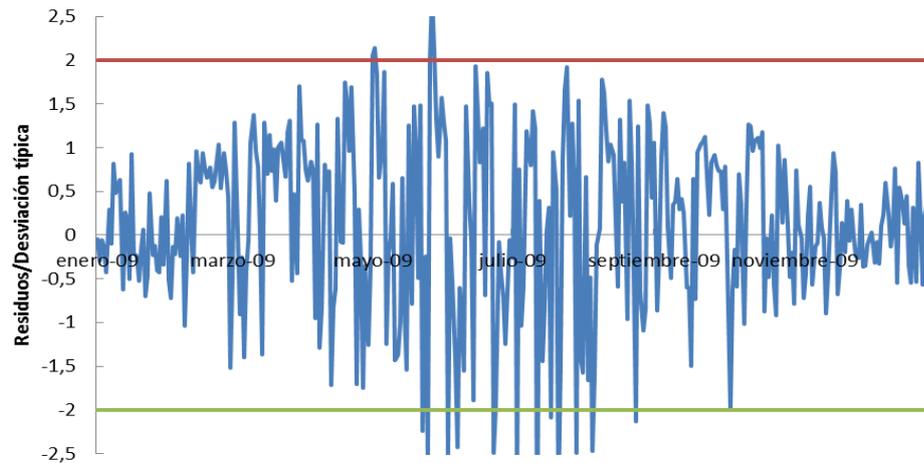


Figura IV.64. Análisis de los residuos del modelo ARIMA ajustado a la global diaria en 2009.

El valor de irradiación de esos días puede considerarse atípico, como se constata en los gráficos siguientes, en los que se muestran, a modo de ejemplo, los registros diarios recogidos a lo largo de 24 años para los dos días que presentan mayor error, en ellos se observa que, el valor del año 2009 es considerablemente inferior a la media de ese período (se aleja más de dos desviaciones típicas del valor esperado).

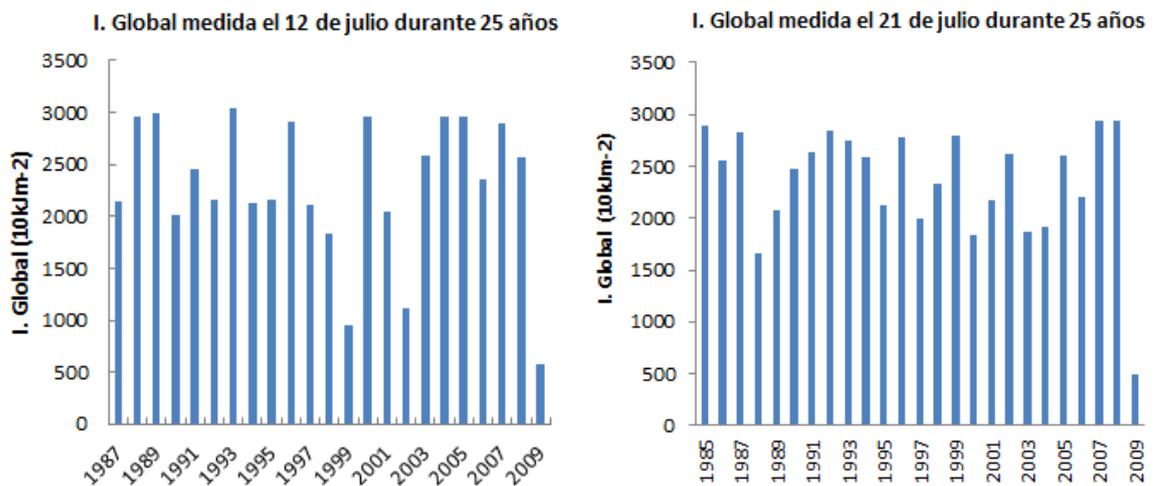


Figura IV.65. Evolución del valor de irradiación global en dos días a lo largo de 25 años.

#### IV.5.2. Análisis ARIMA para la serie diaria media mensual de irradiación global.

Con la serie completa de irradiación global, se procede al cálculo de los valores diarios medios mensuales, resultan un total de 300 valores, de ellos en la Figura IV.66 se han

representado los correspondientes al período de ajuste del modelo (hasta diciembre de 2008) que muestran una curva senoidal suave de claro comportamiento estacional, en la que no se aprecia ninguna tendencia a lo largo de estos 24 años.

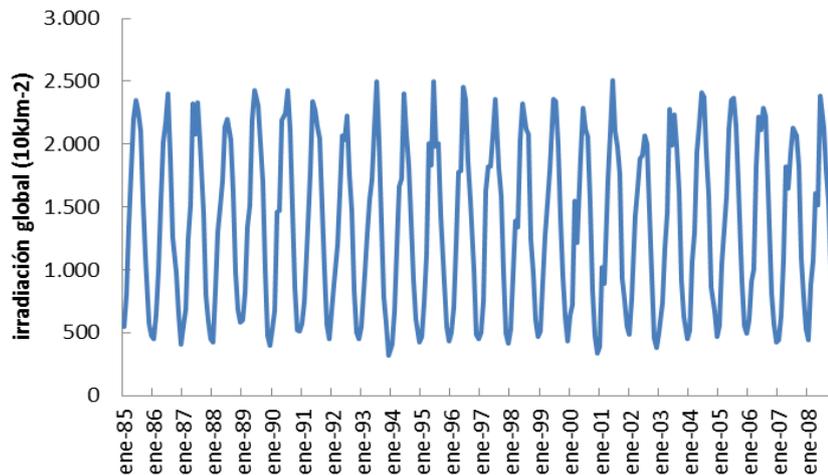


Figura IV.66. Irradiación global mensual en el período enero de 1985 a diciembre de 2008.

Al representar los valores de irradiación de todo el período agrupados por meses se observa que la serie oscila en torno a un valor constante distinto para cada mes del año, lo que pone de manifiesto la no estacionariedad en media, además se aprecia que la variabilidad depende del nivel de la serie, con desviaciones más amplias en primavera y verano que en el resto del año.

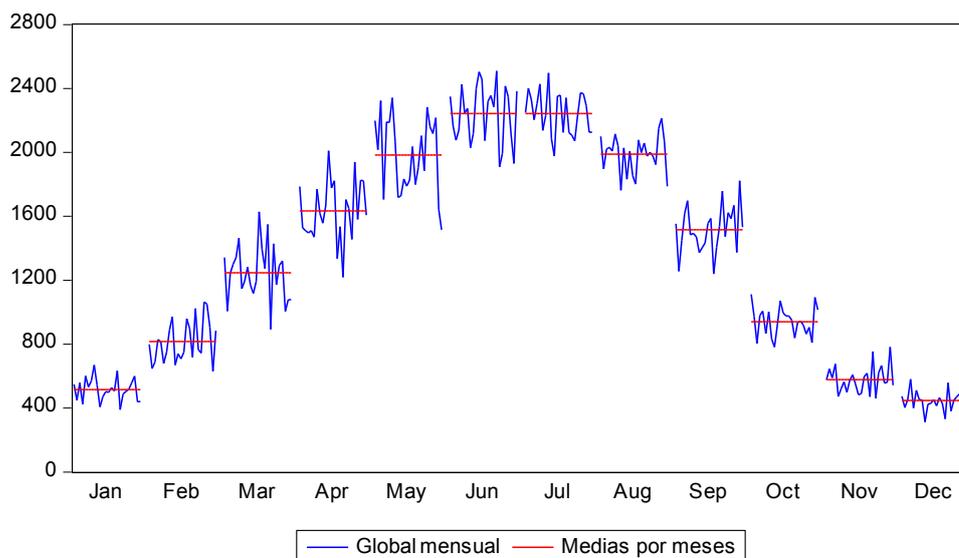


Figura IV.67. Representación de la irradiación global mensual agrupada por meses.

Por tanto para lograr la estacionariedad de la serie, se toman logaritmos y se aplica una diferencia estacional y una regular, ya que únicamente con la primera no se obtenía un proceso estacionario.

Se calculan las funciones ACF y ACF parcial de la serie transformada (Figura IV.68). La ACF presenta un retardo significativo en el origen, y un primer retardo significativo estacional situado en el período de la señal (12), el del retardo 24 está muy atenuado, los del 36 y 48 ligeramente por encima del umbral, y los demás estacionales no son significativos.

La ACF parcial presenta una atenuación rápida en el origen, y los coeficientes de los retardos múltiplos de ciclo se van atenuando progresivamente.

A tenor de esas observaciones se ajusta el modelo  $ARIMA(0,1,1) \times (0,1,1)_{12}$ , cuyos coeficientes se presentan en la Tabla IV.25.

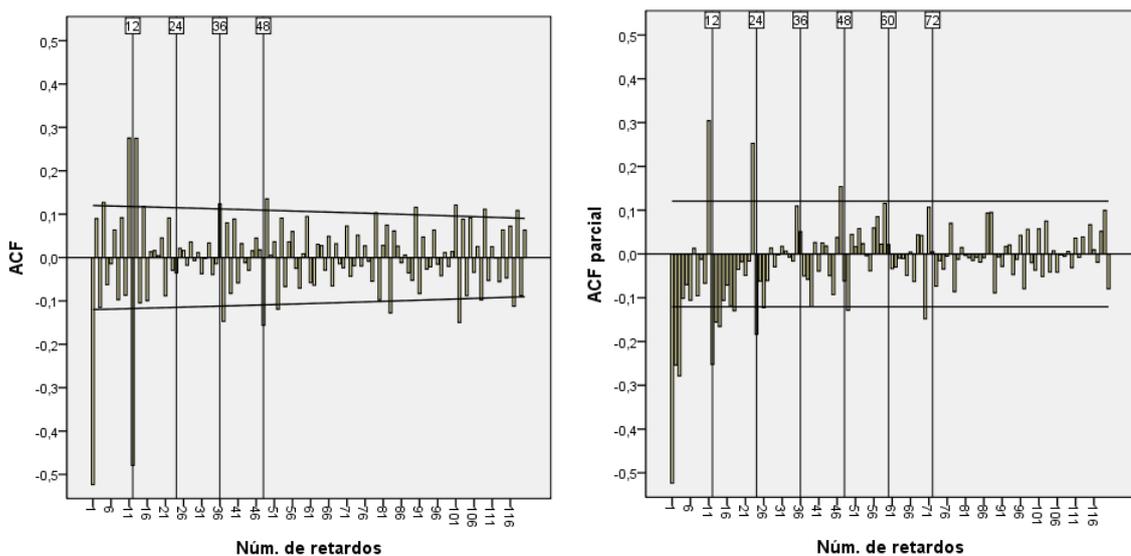


Figura IV.68. ACF y ACF parcial de la serie global mensual en logaritmos, con 1 diferencia estacional y 1 regular.

Tabla IV.25. Coeficientes modelo ARIMA serie global mensual.

Coeficiente	Valor	Error	Sig.
$\theta_1 = MA(1)$	0,8994	0,027111	0,000
$\Theta_1 = MA(1)_{estacional}$	0,9100	0,018594	0,000

Las ecuaciones que representan el modelo son:

$$\nabla\nabla_{12}z_t = \theta_1(B)\Theta_1(B^{12})a_t \quad (\text{IV.21})$$

$$z_t = z_{t-12} + (z_{t-1} - z_{t-13}) + a_t - \theta_1 a_{t-1} - \Theta_1(a_{t-12} - \theta_1 a_{t-13}) \quad (\text{IV.22})$$

Donde  $z_t$  es el logaritmo natural de la serie de irradiación global media diaria mensual.

La irradiación media de un mes depende de la del mes pasado, del mismo mes y el anterior del año anterior, y del error cometido para esos meses.

En esta serie no se detectaron outliers.

La ACF y ACF parcial de los residuos del modelo (Figura IV.69) muestran que están incorrelados, además se comprobó que presentan distribución normal, lo que refuerza la validación del modelo seleccionado.

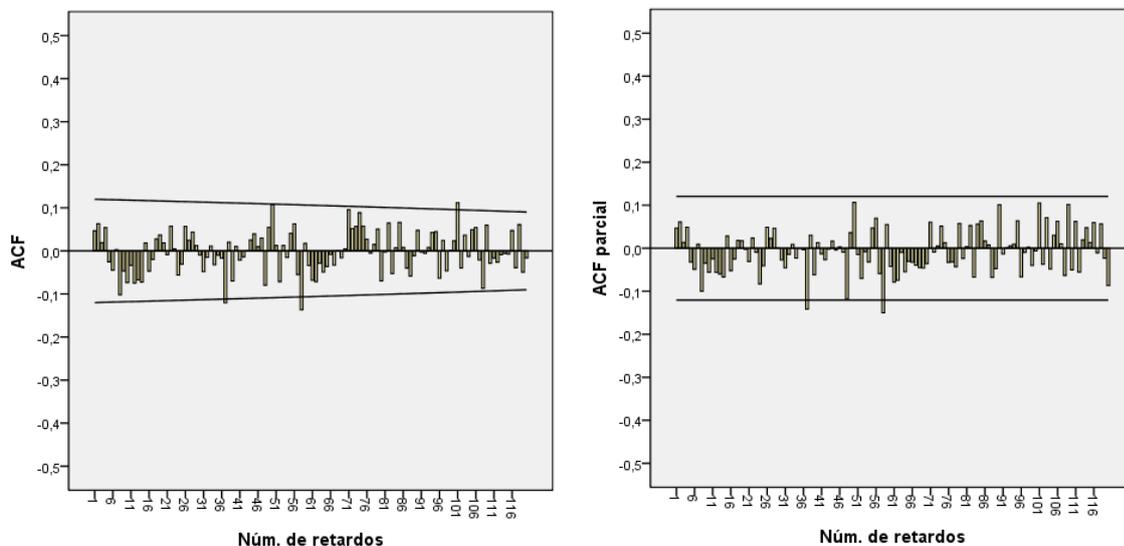


Figura IV.69. ACF y ACF parcial de los residuos del modelo ARIMA para la serie global mensual.

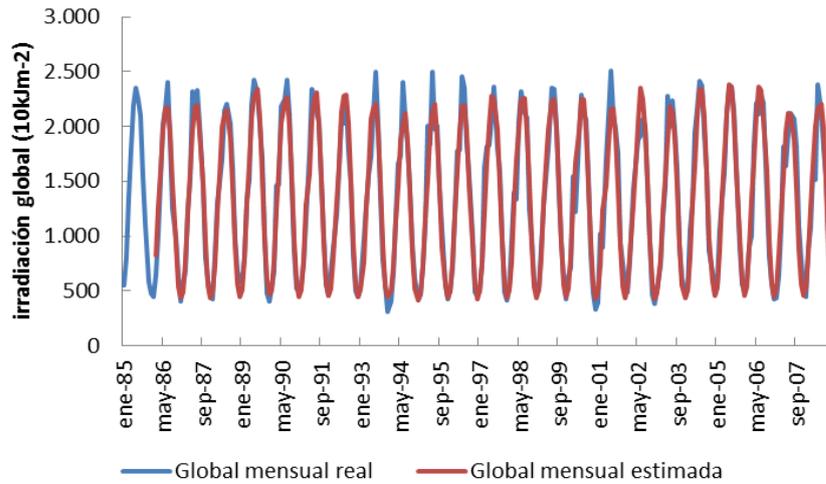


Figura IV.70. Irradiación global mensual y serie modelada con ARIMA.

En la Figura IV.71 se muestran las predicciones para los valores diarios de 2009, y en la Tabla IV.26 se reflejan los estadísticos de validación que muestran que el modelo reproduce la serie de medidas.

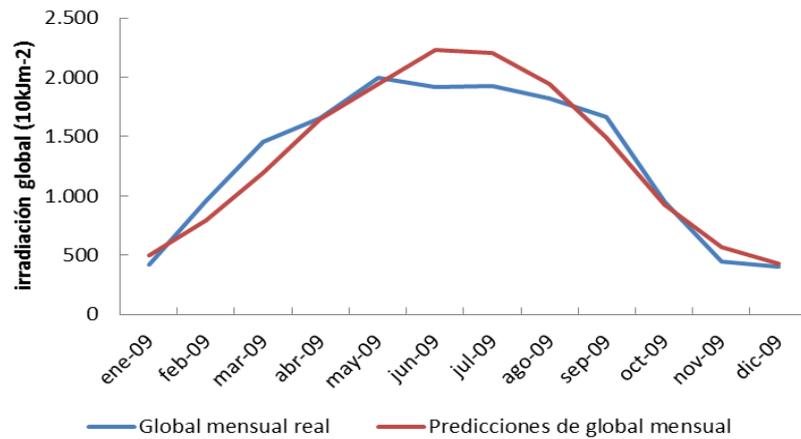


Figura IV.71. Irradiación global mensual y predicciones para el año 2009.

Tabla IV.26. Estadísticos de validación del modelo ARIMA de la serie global mensual.

Período	R <sup>2</sup>	RECM (10kJm <sup>-2</sup> )	EM (10kJm <sup>-2</sup> )	EAMP (%)	RECMN (%)	EMN (%)
Ajuste	0,95	153	8,2	9,38	11,37	0,61
2009	0,93	169	-21,4	11,7	13	-1,64

### IV.5.3. Análisis ARIMA para la serie de $k_t$ diario.

Los valores de  $k_t$  diario se obtienen como relación entre la serie global y la irradiación extraterrestre. En la Figura IV.72 se ha representado, por motivos de visibilidad, su evolución durante los tres primeros años del período de ajuste.

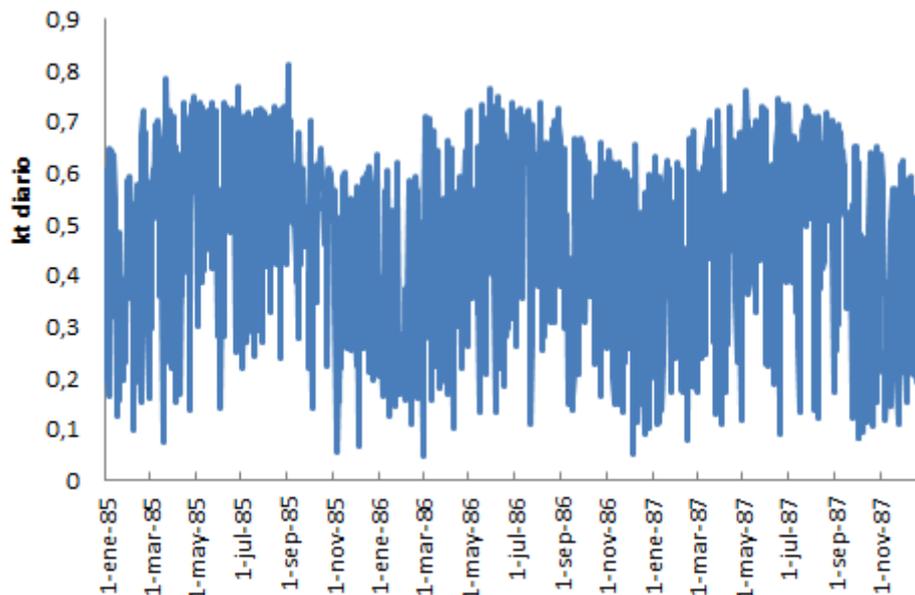


Figura IV.72. Serie diaria de  $K_t$  en el período 1986 a 1989.

Una vez calculadas las funciones ACF y ACF parcial, se observó que la primera de ellas presenta una evolución cíclica de período 365, esto implica transformar la serie tomando una diferencia estacional, después de esta primera transformación se aprecia en ACF en la zona del origen una caída exponencial de los coeficientes, un coeficiente significativo en el retardo 365 con varios a los lados (resultado de la interacción de la parte regular) y ningún otro significativo en los retardos múltiplos de ciclo (730, 1095). (Figura IV.73).

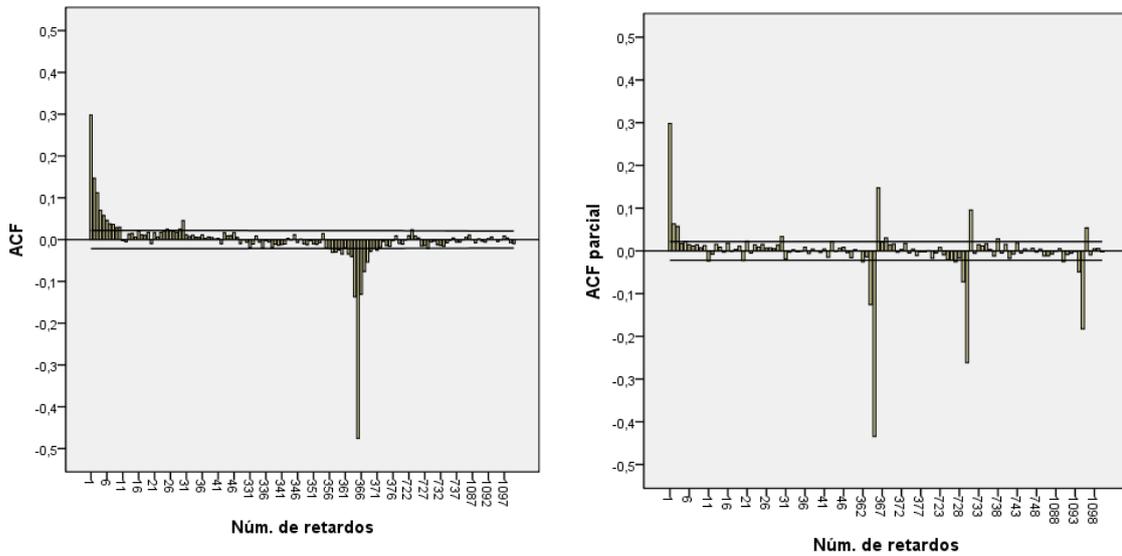


Figura IV.73. Detalle de la ACF y ACF parcial de la serie  $k_t$  diario con 1 diferencia estacional.

En la ACF parcial en cambio, se aprecian 3 coeficientes significativos en el origen, y también en los retardos 365, 730 y 1095, aunque estos últimos son decrecientes, a ambos lados de los estacionales hay dos coeficientes significativos que indican un orden 2 en la parte AR. Teniendo en cuenta estas consideraciones, se ajustó el modelo estacional  $ARIMA(2,0,1) \times (0,1,1)_{365}$ , similar al de la serie de irradiación global, con los coeficientes mostrados en la tabla siguiente.

Tabla IV.27. Coeficientes modelo ARIMA de la serie  $k_t$  diario.

Coeficiente	Valor	Error	Sig.
$\phi_1=AR(1)$	0,9351	0,067572	0,000
$\phi_2=AR(2)$	-0,129	0,028195	0,000
$\theta_1=MA(1)$	0,647	0,065613	0,000
$\Theta_1=MA(1)_{estacional}$	0,9352	0,002561	0,000

Se detectaron un total de 26 atípicos aditivos con los coeficientes que figuran en la Tabla IV.28.

Tabla IV.28. Coeficientes de atípicos aditivos de la serie  $k_t$  diaria.

Fecha	Coeficiente	Sig.	Fecha	Coeficiente	Sig.
22/07/1986	-0,427	0,0063	21/09/2001	-0,403	0,0092
19/06/1987	-0,542	0,0005	05/07/2002	-0,404	0,0091
08/06/1988	-0,419	0,0071	22/07/2007	-0,506	0,0012
13/06/1989	-0,451	0,0037	08/08/2005	-0,405	0,0092
09/07/1989	-0,489	0,0017	24/07/1993	-0,468	0,0025
15/07/1992	-0,441	0,0044	09/03/1996	-0,485	0,0017
18/06/1990	-0,466	0,0027	16/09/1996	-0,408	0,0083
25/07/1996	-0,556	0,0003	24/06/1998	-0,389	0,0118
07/08/1992	-0,425	0,0061	29/11/2004	0,416	0,0074
08/06/2001	-0,406	0,0086	16/06/1999	-0,482	0,0019
29/06/2003	-0,446	0,0040	15/07/2003	-0,399	0,0101
03/10/1990	-0,482	0,0019	3/03/2004	-0,398	0,0104
03/07/2007	-0,433	0,0055	21/10/2008	-0,460	0,0011

La ecuación de este modelo es:

$$z_t = \sum_{j=1}^{26} w_j I_{jt} + \frac{\Theta_1(B^{365})\theta_1(B)}{\phi_2(B)\nabla_{365}} a_t \quad (\text{IV.23})$$

Las gráficas de la ACF y ACF parcial de los residuos del modelo para 1100 retardos muestran ausencia de correlación en los mismos.

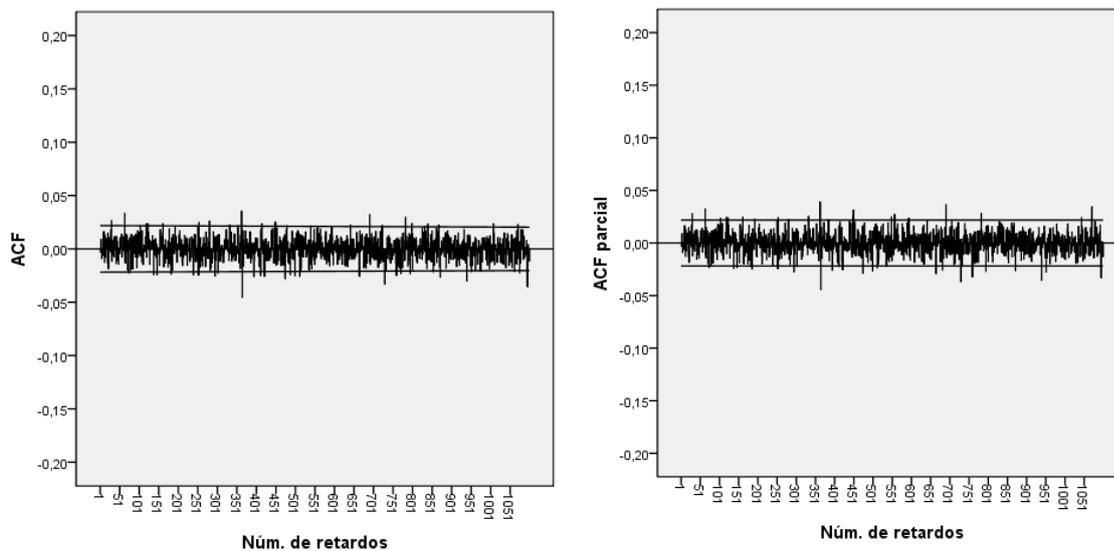


Figura IV.74. ACF y ACF parcial de los residuos del modelo ARIMA para la serie  $k_t$  diario.

La Figura IV.75 muestra los valores estimados por el modelo para dos años del período de ajuste, se aprecia que el modelo evoluciona conforme a la serie aunque con menor varianza.

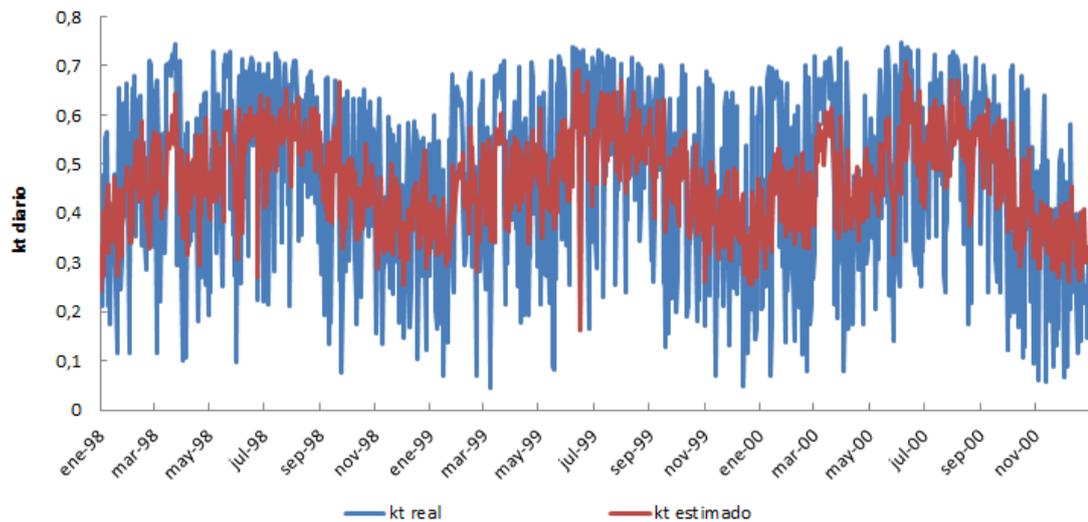


Figura IV.75. Ajuste del modelo ARIMA para  $k_t$  diario entre 1998 y 2000.

Las predicciones para los valores diarios de 2009, muestran que el modelo ajusta a la evolución diaria, captando un 23% de la varianza (ver Tabla IV.29 y Figura IV.76).

Tabla IV.29. Estadísticos de validación del modelo ARIMA de la serie  $k_t$  diario.

Período	$R^2$	RECM	EM	EAMP (%)	RECMN (%)	EMN (%)
Ajuste	0,21	0,162	0,0007	44	34,5	0,15
2009	0,23	0,177	-0,009	55,1	38,9	-2,01

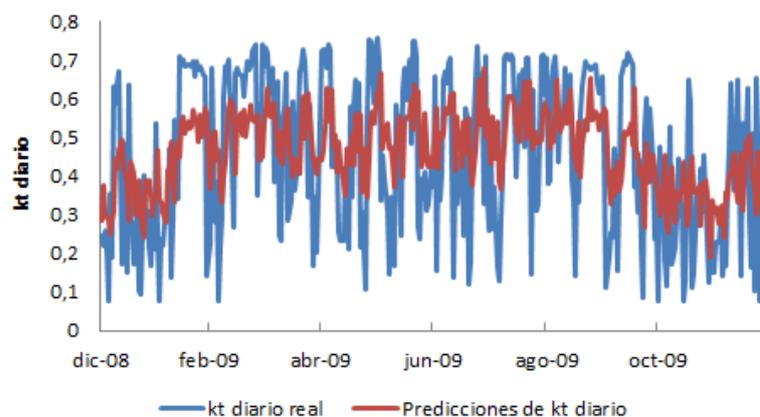


Figura IV.76. Serie de medidas de  $k_t$  diario y predicciones del modelo ARIMA para el año 2009

Si analizamos los residuos de las predicciones (Figura IV.77), comprobamos que el error se encuentra dentro de lo esperado a excepción de 9 días, en varios de ellos, situados en los meses de verano, el valor real de  $k_t$  puede ser considerado atípico pues es especialmente bajo para las fechas en cuestión.

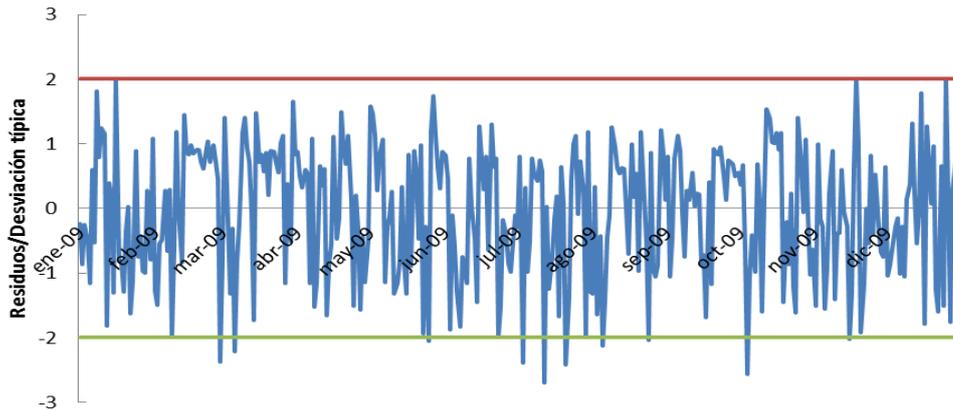


Figura IV.77. Análisis de residuos del modelo ARIMA ajustado a  $k_t$  diario en 2009.

#### IV.5.4. Análisis ARIMA para la serie de $k_t$ diario medio mensual.

En el gráfico de la serie de valores diarios medios mensuales del índice de claridad hasta diciembre de 2008, Figura IV.78, no se aprecia ninguna tendencia determinista, resulta clara la estacionalidad con ciclo de 12 meses.

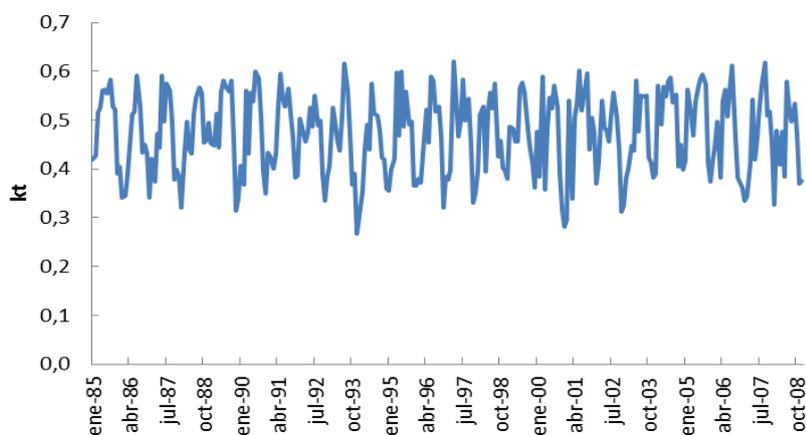


Figura IV.78.  $K_t$  medio mensual.

La serie no es estacionaria en media, pero no se aprecia que la variabilidad dependa del nivel (Figura IV.79). Para eliminar la no estacionariedad en media se toma una diferencia estacional además de una regular, pues con la primera las funciones de autocorrelación mostraban indicios de no estacionariedad.

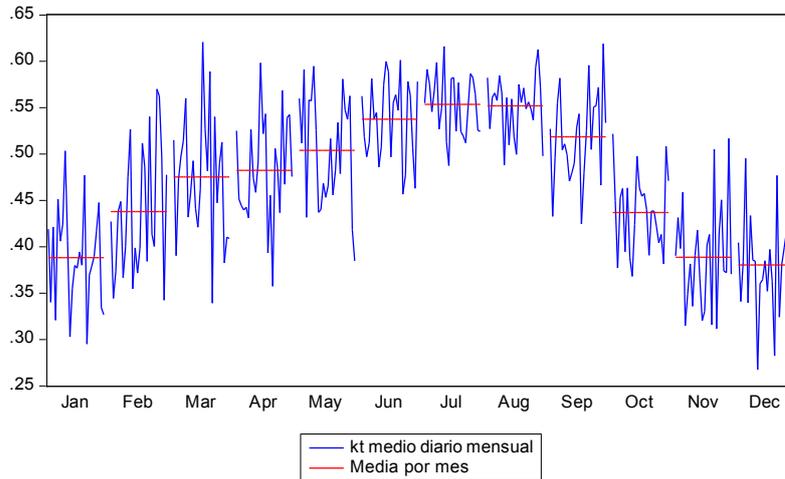


Figura IV.79. Representación de  $K_t$  mensual agrupado por meses.

En las funciones de autocorrelación simple y parcial de la serie diferenciada se observa una parte estacional MA(1) y otra MA(1) en la parte regular, por lo que se ajusta un modelo  $ARIMA(0,1,1) \times (0,1,1)_{12}$ .

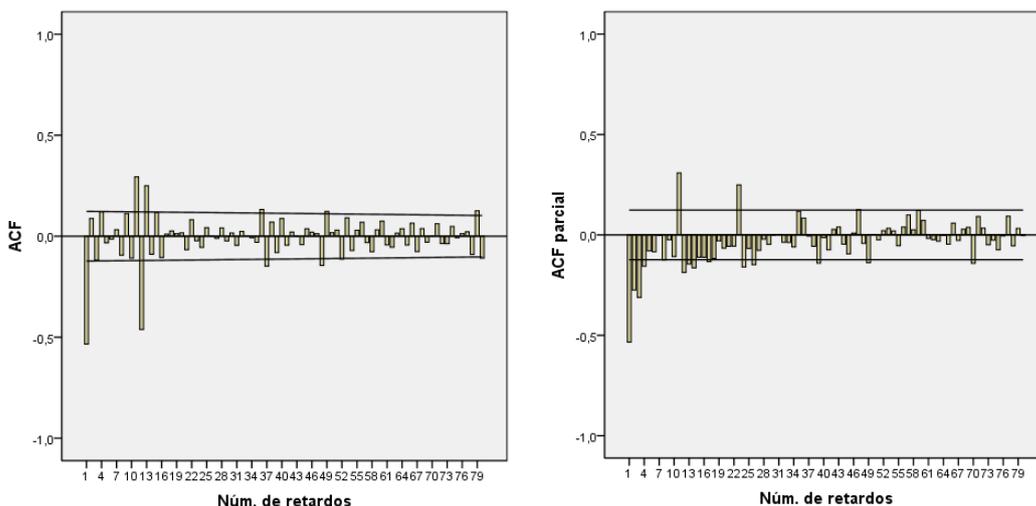


Figura IV.80. ACF y ACF parcial de  $k_t$  medio mensual con una diferencia regular y otra estacional.

Los coeficientes estimados así como los atípicos aditivos detectados se muestran en las tablas IV.30 y IV.31.

Tabla IV.30. Parámetro del modelo estimado para  $k_t$  mensual.

Coficiente	Valor	Error	Sig.
$\theta_1 = \text{MA}(1)$	0,90429	0,027	0,000
$\Theta_1 = \text{MA}(1)_{\text{estacional}}$	0,90991	0,0183	0,000

Tabla IV.31. Coeficientes de atípicos aditivos de la serie  $k_t$  mensual.

Fecha	Coficiente	Sig.	Fecha	Coficiente	Sig.
03-1997	0,15515	0,00190	02-2001	0,12071	0,01640
04-1995	0,13703	0,00610	11-2001	0,13027	0,00920
02-2004	0,12091	0,01600	11-2007	0,14263	0,00490

La ecuación del modelo resulta:

$$k_t = \frac{\Theta_1(B^{12})\theta_1(B)}{\nabla\nabla_{12}} a_t + \sum_{j=1}^6 w_j I_{jt} \quad (\text{IV.25})$$

La ACF y ACFP de los residuos indican que los residuos están incorrelados, además se comprobó que su distribución es normal y de media cero.

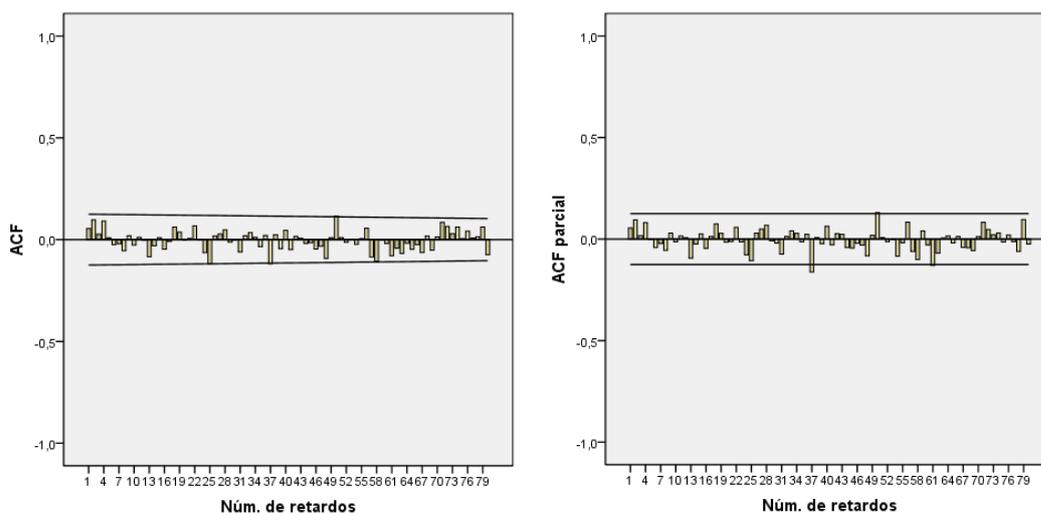


Figura IV.81. ACF y ACF parcial de los residuos del modelo de  $k_t$  mensual.

En las Figuras IV.82 y IV.83 se muestra el ajuste del modelo a los datos, hasta diciembre de 2008, y en detalle el ajuste de las predicciones sobre el año 2009.

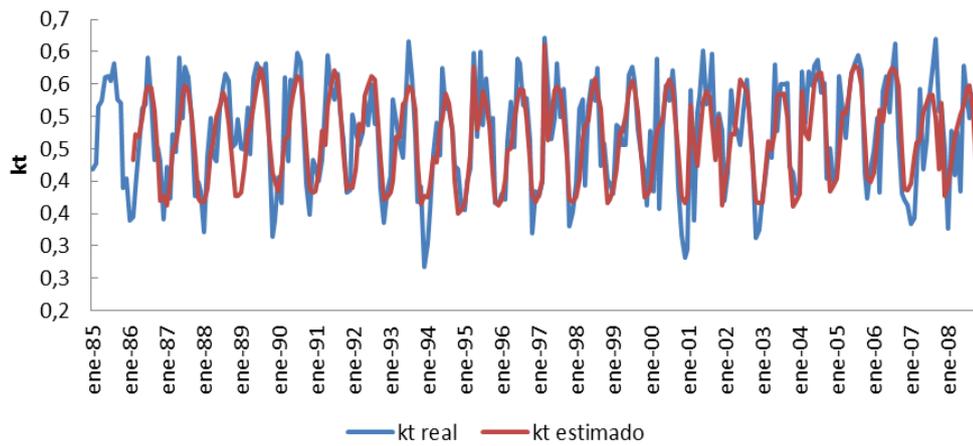


Figura IV.82.  $k_t$  mensual y serie estimada con las predicciones al final.

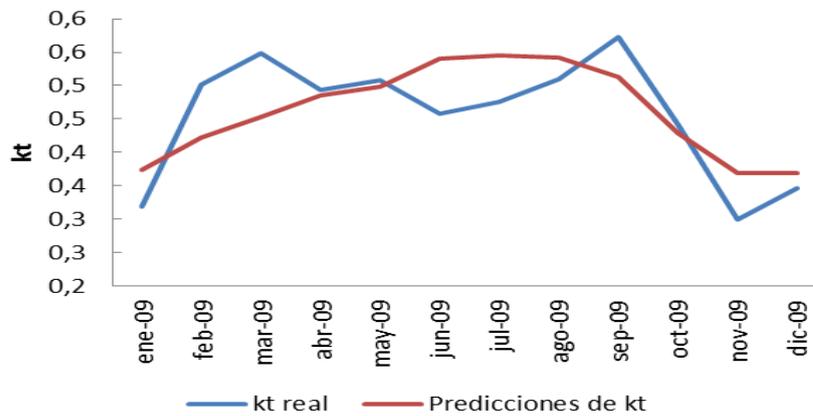


Figura IV.83. Predicciones de  $k_t$  mensual para 2009 junto a los valores reales.

Para las predicciones del año 2009, los residuos no superan en ningún caso el doble de su desviación típica.

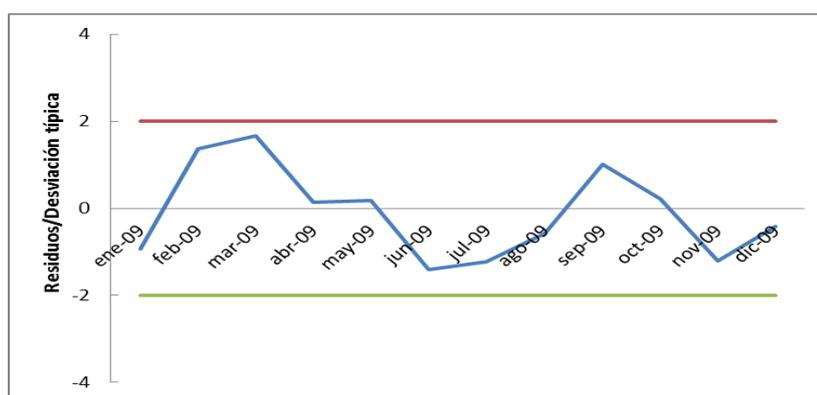


Figura IV.84. Análisis de los residuos del 2009 del modelo ARIMA ajustado a  $k_t$  mensual.

Al igual que con las series mensuales anteriores, el error cuadrático medio porcentual se reduce más de un tercio respecto a los modelos diarios.

Tabla IV.32. Estadísticos de validación del modelo ARIMA de la serie  $k_t$  mensual.

Período	$R^2$	RECM	EM	EAMP (%)	RECMN (%)	EMN (%)
Ajuste	0,60	0,0509	0,0035	8,9	10,82	0,75
2009	0,54	0,0578	-0,0057	11,31	12,68	-1,24

#### IV.5.5. Análisis ARIMA para la serie de irradiación difusa diaria.

La serie de datos de irradiación difusa que abarca 10 años, presenta un total de 427 días perdidos, de ellos en el 95% de los casos se perdieron todos los registros horarios, para completar estos valores se ha utilizado el modelo de correlaciones obtenido en esta tesis para la irradiación difusa diaria, de modo que el valor imputado a cada uno de los 427 días se ha calculado utilizando la expresión (IV.8) que depende del valor del índice de claridad de cada día.

Para el análisis ARIMA se toman los datos hasta el 31 de diciembre de 2008, dejando 2009 para validar el modelo ajustado. El gráfico de la Figura IV.85 muestra la periodicidad anual de la serie, así como la dependencia de la variabilidad en función de la estación del año. Se aplicó una transformación logarítmica y una diferencia estacional.

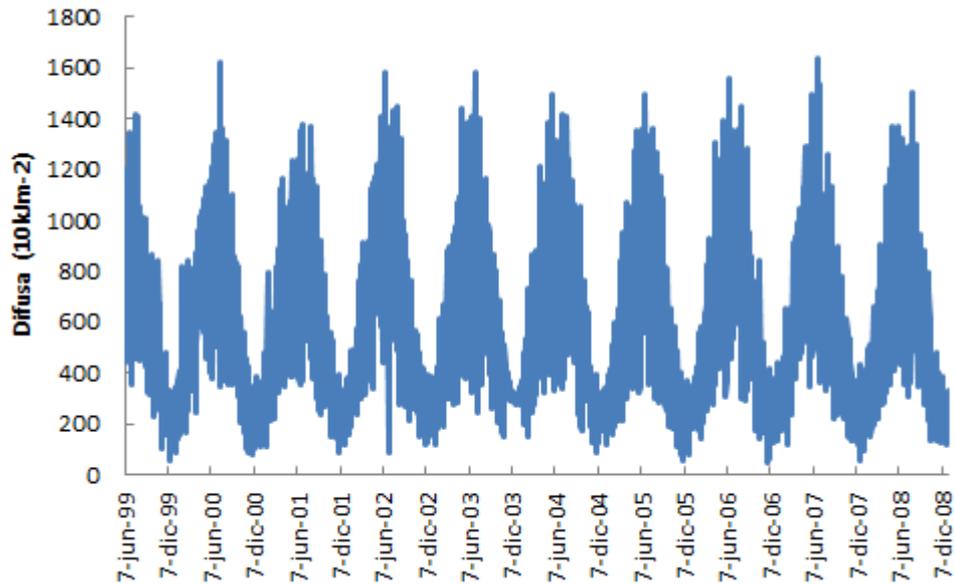


Figura IV.85. Irradiación difusa diaria (7-06-1999 al 31-12-2008).

En las Figuras IV.86.a y b, se pueden ver las funciones de autocorrelación simple y parcial de la serie transformada, con la zona del origen y de los múltiplos de los retardos estacionales detallada.

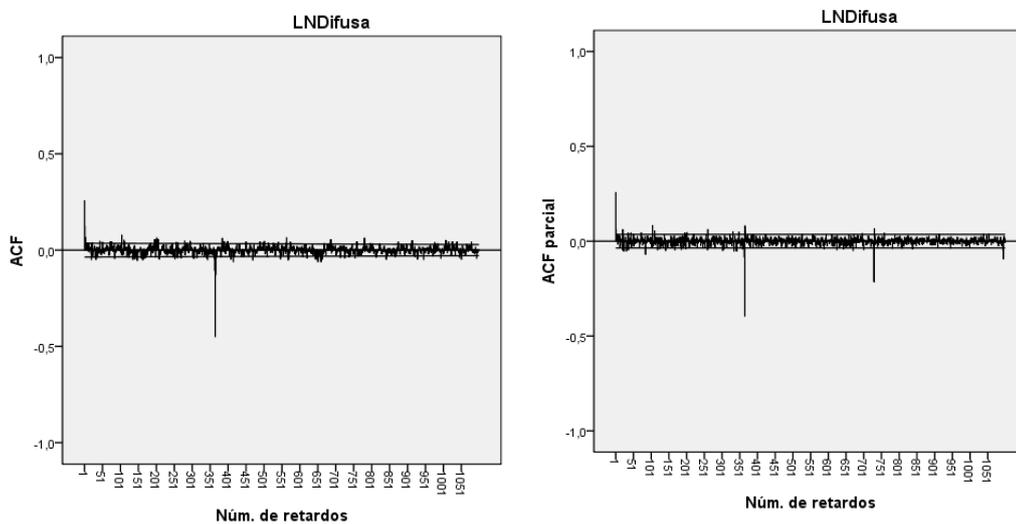


Figura IV.86.a. ACF y ACF parcial de la serie difusa diaria en logaritmos y con 1 diferencia estacional.

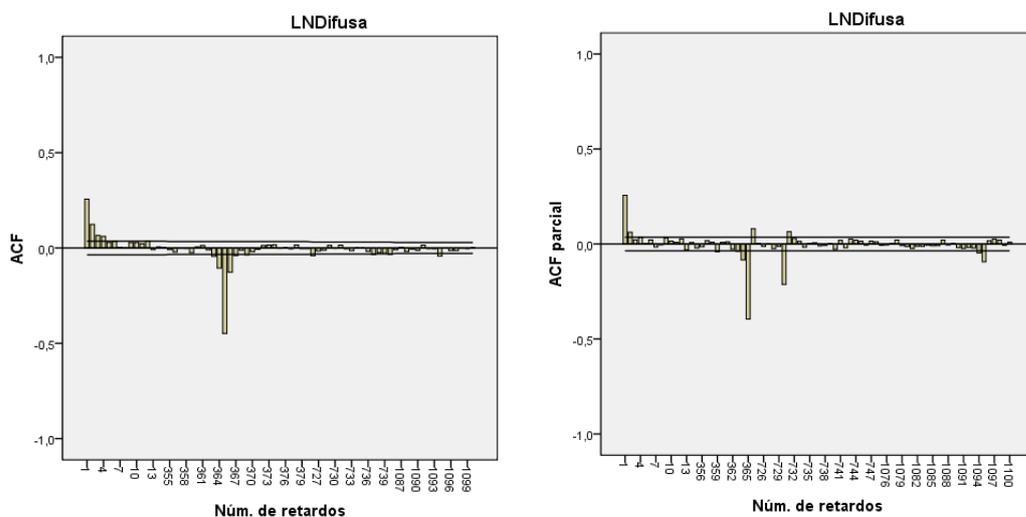


Figura IV.86.b. Detalle los retardos significativos en ACF y ACF parcial de la serie difusa diaria.

La parte regular se corresponde con un modelo AR(1), AR(2), o incluso ARMA de orden bajo, y en la parte estacional el modelo más probable es el MA(1). El modelo seleccionado fue  $ARIMA(2,0,1) \times (0,1,1)_{365}$ .

Tabla IV.33 Coeficientes del modelo estimado para la serie de difusa diaria.

Coeficiente	Valor	Error	Sig.
$\phi_1=AR(1)$	0,978	0,11044	0,000
$\phi_2=AR(2)$	-0,152	0,046412	0,001
$\theta_1=MA(1)$	0,684	0,106948	0,000
$\Theta_1=MA(1)_{estacional}$	0,886	0,005303	0,000

En la Tabla IV.34 se presentan los días detectados como atípicos aditivos, un total de 34 días cuyos coeficientes resultan significativos.

Tabla IV.34.a. Coeficientes de atípicos aditivos de la serie difusa diaria.

Fecha	Coeficiente	Sig.	Fecha	Coeficiente	Sig.
15/08/2000	-1,014	0,0024	02/11/2001	-0,989	0,0029
12/11/2000	-1,224	0,0003	13/08/2002	-0,924	0,0052
03/12/2000	-1,297	0,0001	15/04/2003	-0,861	0,0095
07/12/2000	-1,142	0,0006	19/04/2003	-0,995	0,0027
30/06/2002	-2,287	0,0000	17/07/2003	-0,957	0,0038
15/07/2003	-1,335	0,0001	26/10/2003	-1,076	0,0011

Tabla IV.34.b. Coeficientes de atípicos aditivos de la serie difusa diaria.

Fecha	Coeficiente	Sig.	Fecha	Coeficiente	Sig.
10/04/2005	-1,149	0,0005	28/10/2003	-0,996	0,0026
08/11/2005	-1,369	0,0000	02/12/2004	-0,994	0,0027
19/11/2005	-1,305	0,0001	12/01/2005	-0,890	0,0073
01/12/2005	-1,429	0,0000	20/03/2005	-0,974	0,0033
27/12/2005	-1,180	0,0004	30/09/2005	-0,888	0,0072
02/10/2006	-1,468	0,0000	29/12/2005	-0,971	0,0033
24/10/2006	-1,445	0,0000	17/02/2007	-1,203	0,0003
24/11/2006	-1,566	0,0000	10/03/2007	-0,904	0,0067
01/12/2006	-1,366	0,0000	21/10/2008	-0,955	0,0020
03/12/2006	-1,306	0,0001	02/11/2001	-0,989	0,0029
25/05/2007	-1,018	0,0023	13/08/2002	-0,924	0,0052

Teniendo en cuenta estos valores, la expresión del modelo completo corresponde a la ecuación IV.26, en la que  $z_t$  corresponde al logaritmo natural de la serie de irradiación difusa diaria.

$$z_t = \sum_{j=1}^{34} w_j I_{jt} + \frac{\Theta_1(B^{365})\theta_1(B)}{\phi_2(B)\nabla_{365}} a_t \quad (\text{IV.26})$$

En la Figura IV.87 se aprecia que la mayoría de los coeficientes la ACF y ACF parcial de los residuos se encuentran dentro del intervalo de confianza del 95%, de lo que se desprende la incorrelación de los mismos.

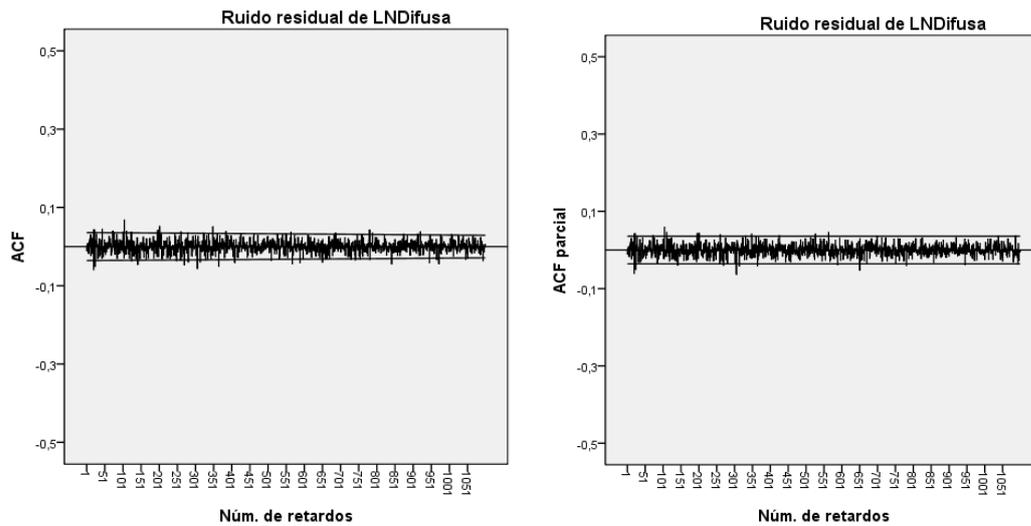


Figura IV.87. ACF y ACF parcial de los residuos del modelo ARIMA para difusa diaria.

Se representan en la Figura IV.88 tres años del período de ajuste, el modelo se ajusta a la serie, si bien en verano no alcanza en general los valores máximos, y en invierno subestima en varios días el valor real.

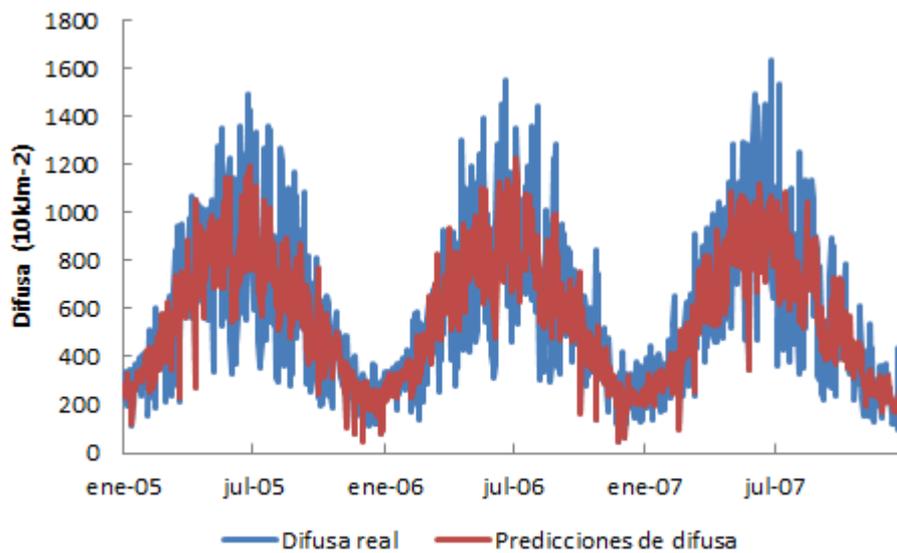


Figura IV.88. Ajuste del modelo de difusa diaria entre 2005 y 2007.

La Tabla IV.35 refleja los estadísticos de validación del modelo en la etapa de ajuste y las predicciones para 2009 se muestran en la Figura IV.89.

Tabla IV.35. Estadísticos de validación del modelo ARIMA de la serie difusa diaria.

Período	R <sup>2</sup>	RECM (10kJm <sup>-2</sup> )	EM (10kJm <sup>-2</sup> )	EAMP (%)	RECMN (%)	EMN (%)
Ajuste	0,59	204,25	24,43	29,43	34,78	4,16
2009	0,55	206,45	0,45	35,83	38,18	0,08

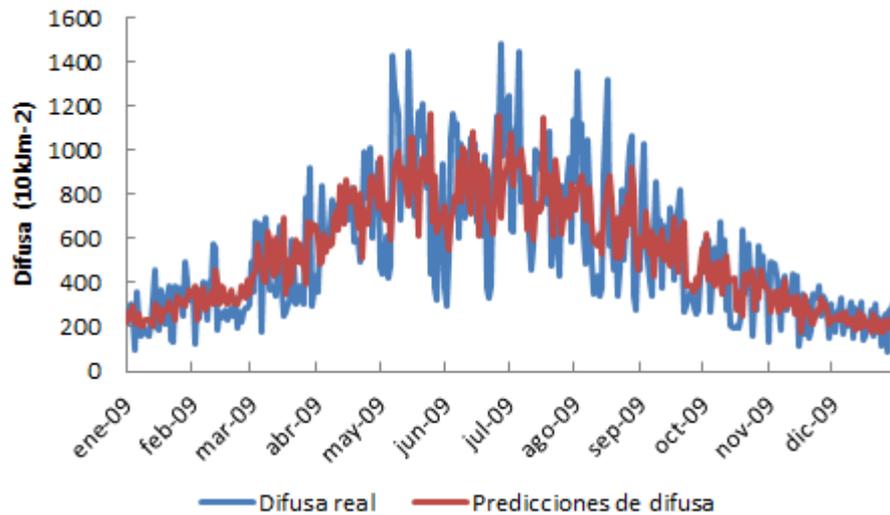


Figura IV.89. Predicciones de difusa diaria en 2009 junto a los valores medidos.

La representación de la razón entre los residuos para el año 2009 y su desviación típica muestra que la mayor parte están en el intervalo esperado  $[-2,2]$ , aunque hay un total de 16 días, situados mayoritariamente en los meses de mayo, junio y julio que sobrepasan estos límites.

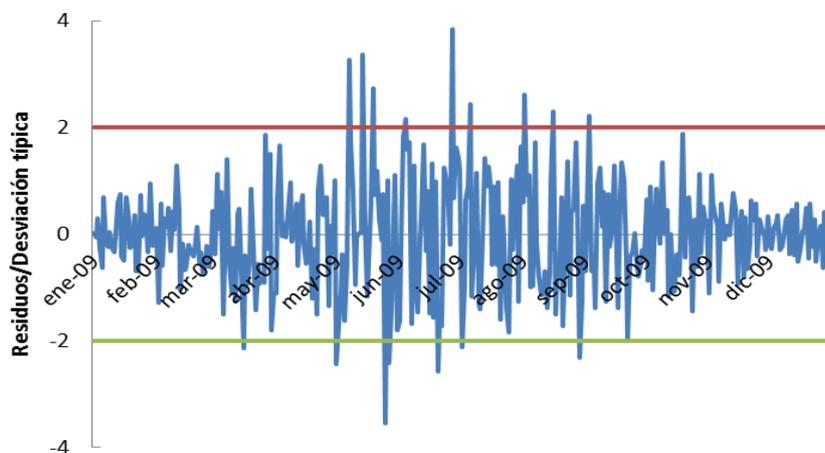


Figura IV.90. Análisis de los residuos del año 2009 del modelo de difusa diaria.

Se estudiaron los casos en los que se produce esta desviación de los residuos y se concluye que los valores medidos de irradiación difusa en 2009 en esos días son, en su mayoría atípicos, corresponden a valores situados a más de dos desviaciones típicas del valor medio en los 9 años en los que se dispone de medidas. En la Figura IV.91 se muestran los correspondientes a los dos días de mayor error.

El 25 de mayo presenta un valor muy bajo de irradiación, en concreto a 1,5 desviaciones de la media de ese día para los 10 años, en este caso el mismo día en el año 2007 presentó una medida todavía más baja y forma parte de los atípicos aditivos incluidos en el modelo.

El 27 de junio presenta sin embargo, el nivel más alto de los 10 años situado a 1,96 desviaciones de la media.

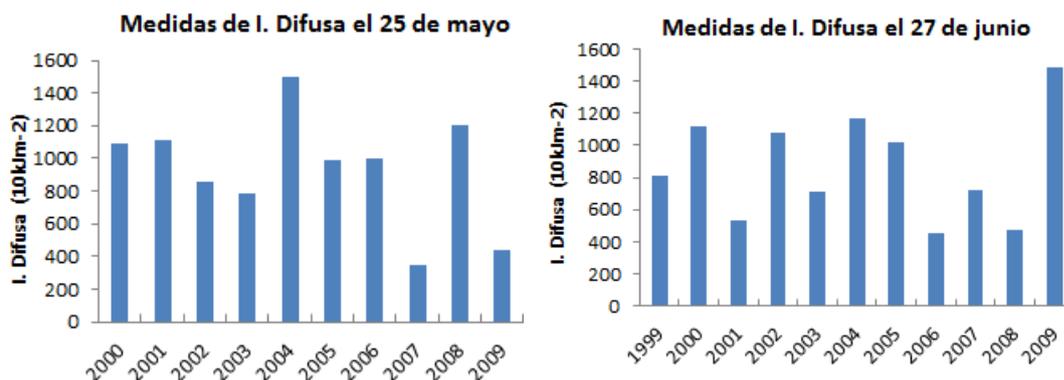


Figura IV.91. Dos días con valores atípicos de irradiación difusa en 2009.

#### IV.5.6. Análisis ARIMA para la serie de irradiación difusa diaria media mensual.

En la Figura IV.92 se muestra el valor diario medio mensual de la irradiación difusa entre julio del 1999 y diciembre de 2008, que fue el período empleado para el ajuste del modelo.

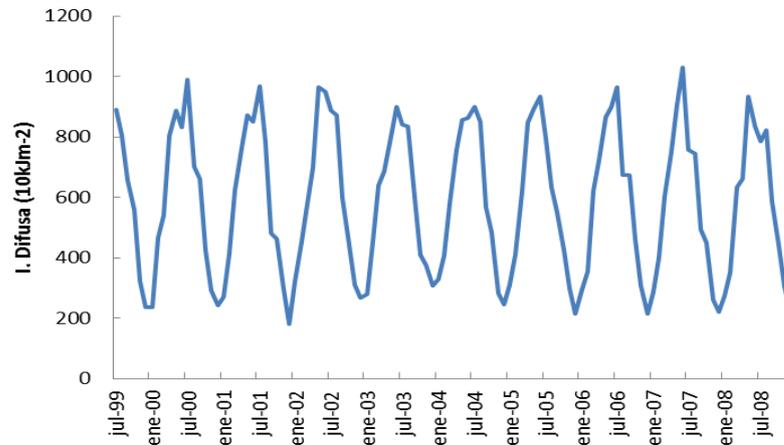


Figura IV.92. Difusa mensual (Julio-1999 a Diciembre-2008).

La estacionalidad presenta ciclo de 12 meses, y oscilaciones de la serie en torno a un valor constante distinto en función del mes, con las mayores oscilaciones en los meses de verano, lo que sugiere tomar logaritmos para lograr la estacionariedad en varianza. Además se tomará una diferencia estacional para lograr la estacionariedad en media.

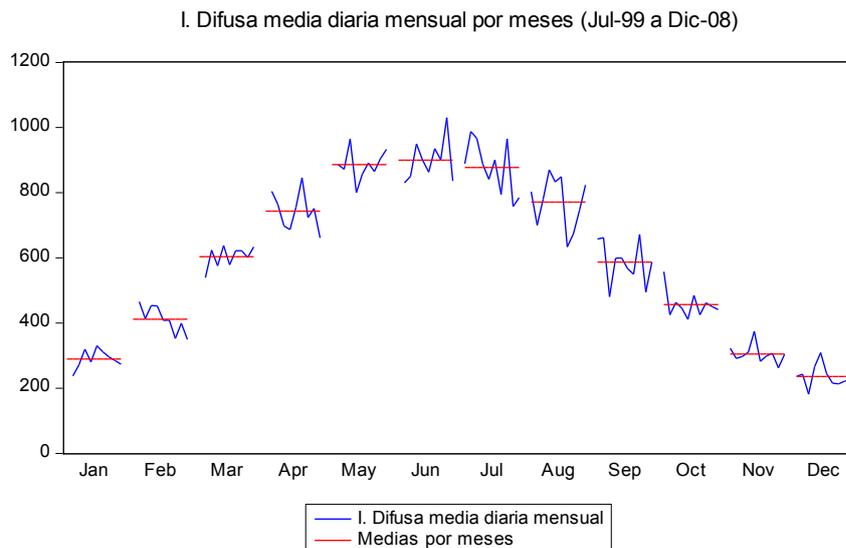


Figura IV.93. Difusa mensual agrupada por meses.

La ACF presenta un único retardo significativo situado en el período de la señal (12), ninguno en el origen, y la ACF parcial tampoco presenta retardos significativos en el origen, pero sí decrecientes en los retardos múltiplos de ciclo (12, 24, 36, 48..), sin embargo solamente el primero de estos retardos presenta un coeficiente significativo, en la parte regular no se aprecia ninguna estructura y en la parte estacional el modelo es MA(1), de modo que el modelo ajustado es un ARIMA(0,0,0) $\times$ (0,1,1)<sub>365</sub>.

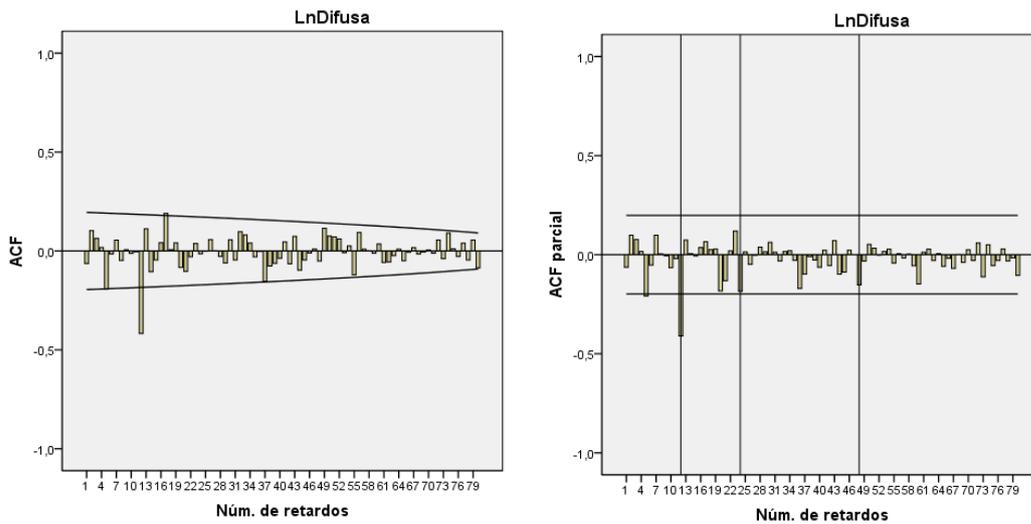


Figura IV.94. ACF y ACF parcial de la serie difusa mensual en logaritmos y con 1 diferencia estacional.

El valor del coeficiente MA estacional es próximo a 1, y las ecuaciones del modelo son similares a los ajustados para las demás series mensuales.

Tabla IV.36. Coeficiente del modelo ARIMA de la serie difusa mensual.

Coefficiente	Valor	Error	Sig.
$\Theta_1 = \text{MA}(1)_{\text{estacional}}$	0,9555	0,029209	0,000

$$\nabla_{12} z_t = \Theta_1 (B^{12}) a_t \quad (\text{IV.27})$$

$$z_t = z_{t-12} + a_t - \Theta_1 a_{t-12} \quad (\text{IV.28})$$

En las ecuaciones anteriores  $z_t$  corresponde al logaritmo natural de la serie media diaria mensual de irradiación difusa.

El análisis de outliers de esta serie da como resultado la detección de un cambio temporal transitorio en noviembre de 2003, incluido en el modelo según la ecuación siguiente:

$$z_t = \frac{\Theta_1 (B^{12})}{\nabla_{12}} a_t + \frac{0,26178}{(1 - 0,7B)} I_t^{11-2003} \quad (\text{IV.29})$$

Las autocorrelaciones de los residuos calculadas para 80 retardos en la Figura IV.95 muestran ausencia de picos significativos por lo que confirman la incorrelación, y su distribución es normal de media cero.

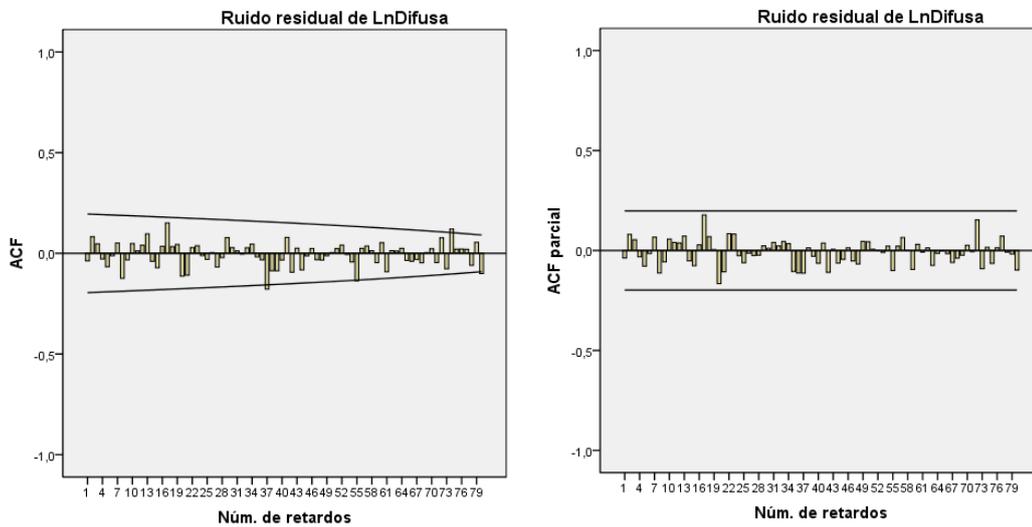


Figura IV.95. ACF y ACF parcial de los residuos del modelo de difusa mensual.

El modelo recoge un 95% de la varianza de la serie y las predicciones de 2009 muestran unos estadísticos excelentes.

Tabla IV.37. Estadísticos de validación del modelo ARIMA de la serie difusa mensual.

Período	R <sup>2</sup>	RECM (10kJm <sup>-2</sup> )	EM (10kJm <sup>-2</sup> )	EAMP (%)	RECMN (%)	EMN (%)
Ajuste	0,95	52,97	-1,83	7,10	9,15	-0,32
2009	0,968	50,14	-28,15	7,79	9,29	-5,22

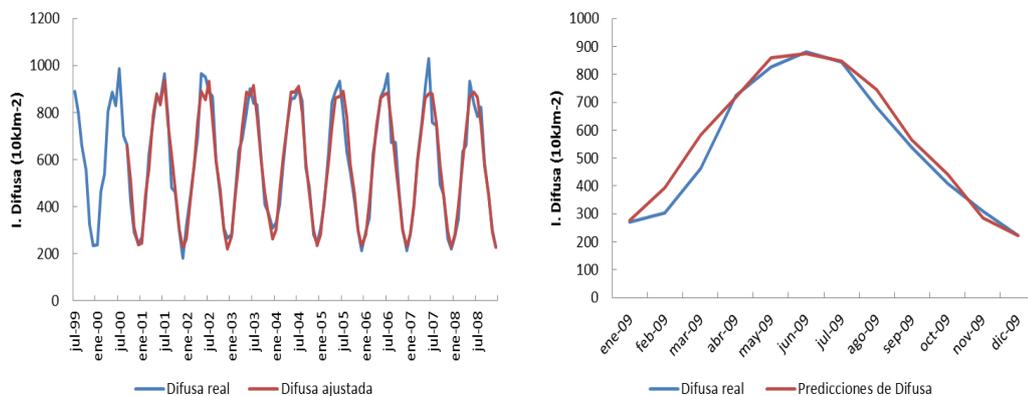


Figura IV.96. Ajuste del modelo ARIMA de difusa mensual y predicciones de 2009.

La representación de la razón entre los residuos para el año 2009 y su desviación típica, muestra que todos están en el intervalo esperado  $[-2,2]$ , a excepción de marzo, se puede justificar esta desviación en la predicción pues el valor real en ese mes, es el más bajo de los 9 meses de marzo disponibles.

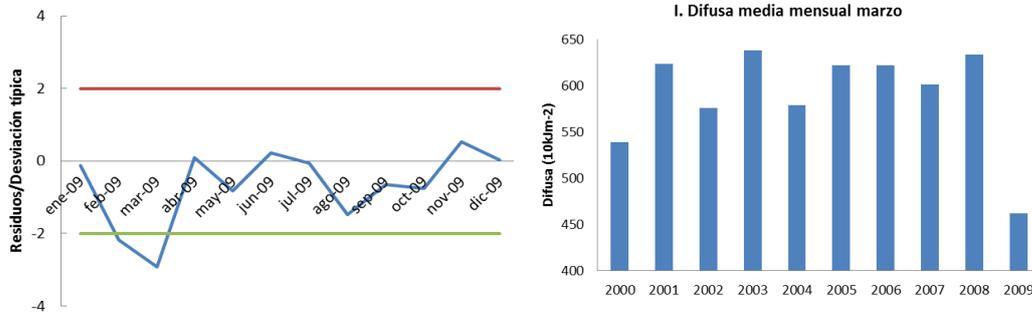


Figura IV.97. Análisis de los residuos del modelo de difusa mensual en 2009.

#### IV.5.7. Análisis ARIMA para la serie de $F_d$ diaria.

La serie analizada comprende desde junio de 1999 hasta diciembre de 2009, en la Figura IV.98 se han representado únicamente, por motivos de visibilidad, los años 2007 y 2008.

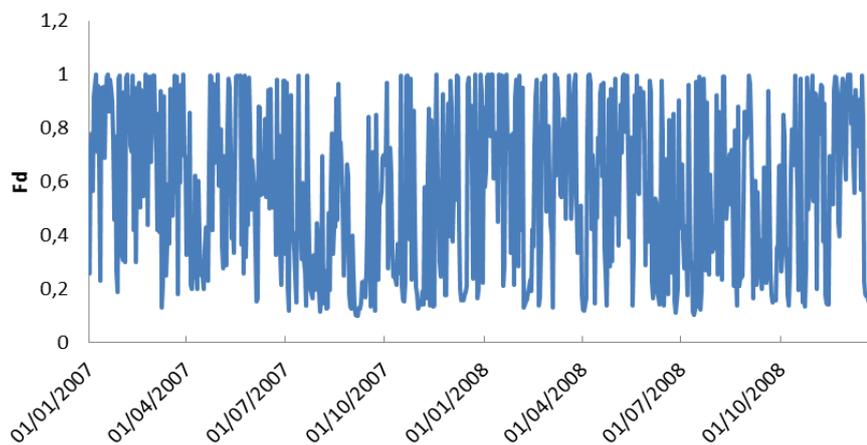


Figura IV. 98.  $F_d$  diaria (2007-2008).

La observación de la gráfica de la serie no indica ningún rasgo estacional, sin embargo las funciones ACF y ACF parcial indican presencia de estacionalidad, con un ciclo de 365 días, por lo que se transforma la serie aplicando una diferencia estacional.

Una vez transformada, la ACF presenta estructura decreciente geométrica en los primeros retardos y coeficiente significativo en el primer retardo estacional (365) con interacción de la parte regular a ambos lados, los demás retardos estacionales no presentan coeficientes significativos, la ACF parcial tres retardos significativos en el origen, podría corresponder a un MA de orden bajo, además presenta coeficientes significativos decrecientes en los retardos estacionales (365, 730, 1095). (Ver Figura IV.99).

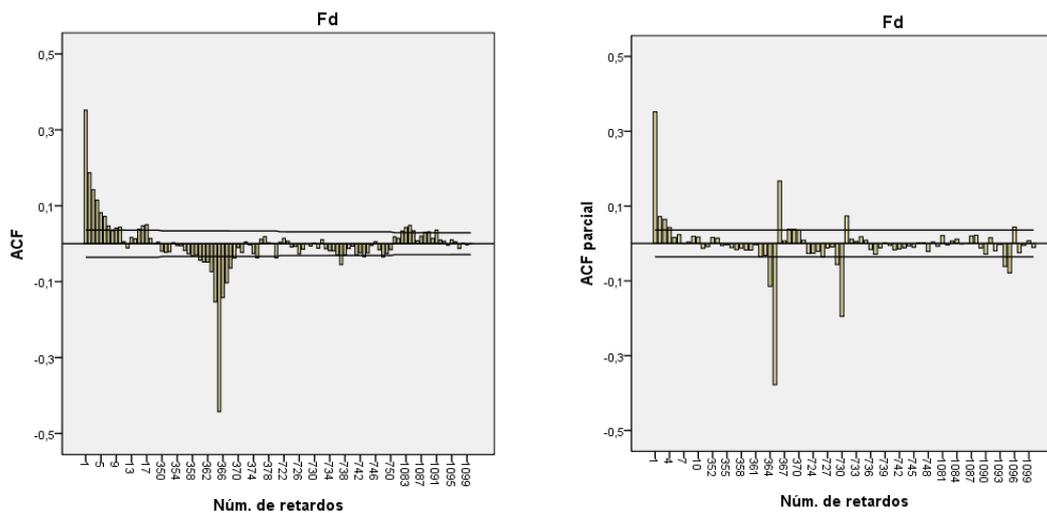


Figura IV.99. Detalle de ACF y ACF parcial de la serie  $F_d$  diaria con 1 diferencia estacional.

Los modelos posibles podrían ser un AR de orden bajo (menor de 3) en la parte regular, o un ARMA(2,1), y un MA(1) en la parte estacional. Finalmente el modelo ajustado es un ARIMA(2,0,1) $\times$ (0,1,1)<sub>365</sub>

Tabla IV.38. Coeficientes del modelo ARIMA de  $F_d$  diaria.

Coefficiente	Valor	Error	Sig.
$\phi_1=AR(1)$	0,956	0,10575	0,000
$\phi_2=AR(2)$	-0,149	0,04733	0,002
$\theta_1=MA(1)$	0,635	0,10254	0,000
$\Theta_1=MA(1)_{estacional}$	0,884	0,00531	0,000

Se detectaron 5 atípicos aditivos, con los coeficientes que figuran en la Tabla IV.39.

Tabla IV.39. Coeficientes de atípicos aditivos de la serie fracción difusa diaria.

Fecha	Coeficiente	Sig.	Fecha	Coeficiente	Sig.
22/07/2007	0,697395	0,0050	25/08/2005	0,678577	0,0060
09/07/2002	0,702467	0,0045	29/11/2004	-0,687227	0,0054
27/06/2003	0,677187	0,0061			

A continuación se expone la ecuación del modelo, similar al de las series diarias de irradiación global y difusa.

$$F_{dt} = \sum_{j=1}^5 w_j I_{jt} + \frac{\Theta_1(B^{365})\theta_1(B)}{\phi_2(B)\nabla_{365}} a_t \quad (\text{IV.30})$$

Las funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial de los residuos calculadas para 1100 retardos de la Figura IV.100 muestran la incorrelación de los mismos.

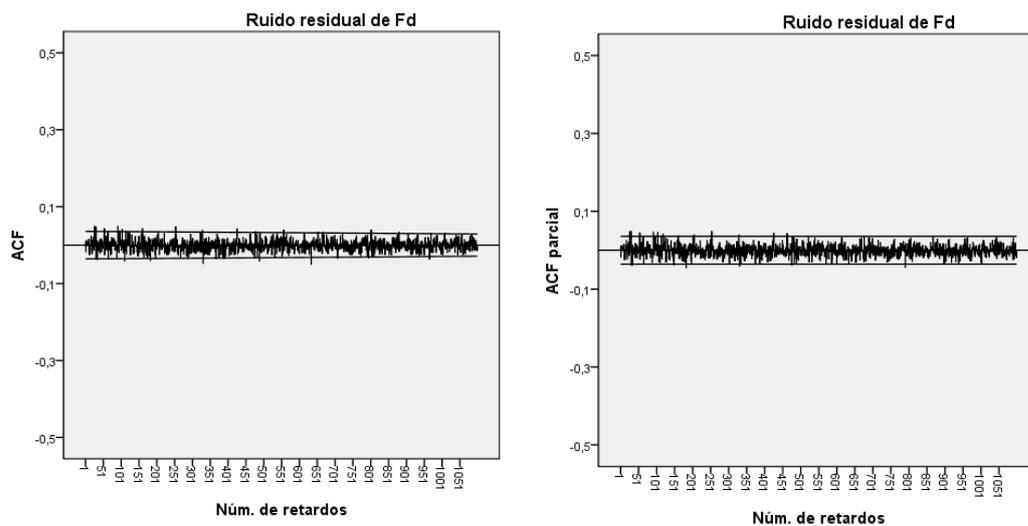


Figura IV.100. ACF y ACF parcial de los residuos del modelo de  $F_d$  diaria.

Las estimaciones del modelo durante 3 años del período de ajuste en la Figura IV.101 exhiben una evolución similar a la serie real pero con mucha menor varianza.

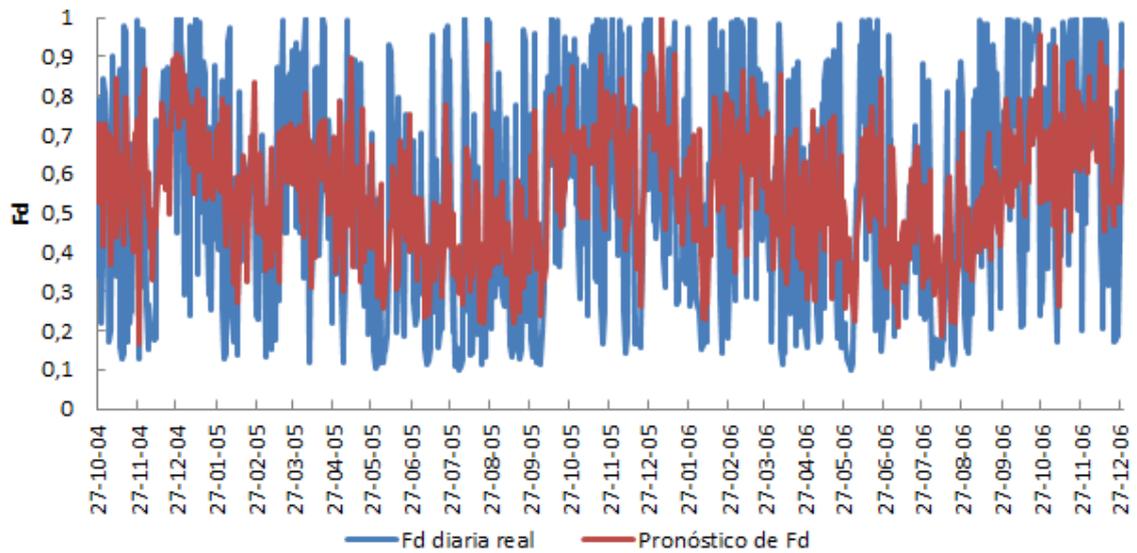


Figura IV.101. Ajuste del modelo de  $F_d$  diaria entre 2004 y 2006.

La Figura IV.102 y la Tabla IV.40 ponen de manifiesto que las predicciones día a día presentan errores importantes, aunque el conjunto anual reproduce la evolución de la fracción difusa (valores más altos en los meses de invierno y más bajos en verano).

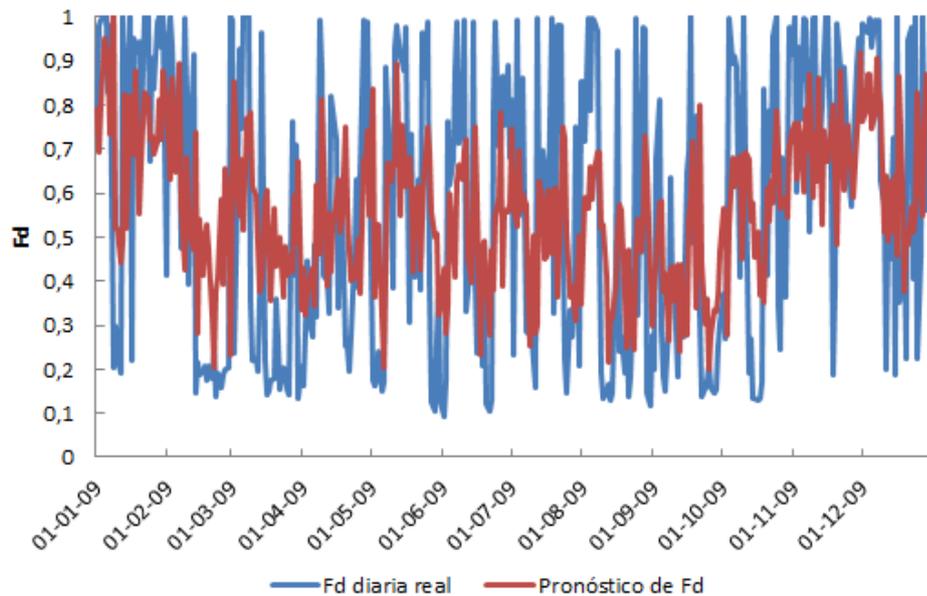
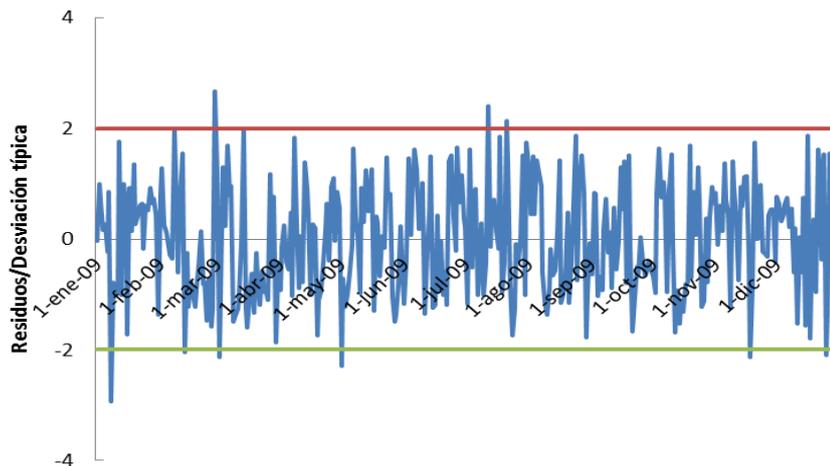


Figura IV.102. Predicciones de  $F_d$  diaria y valores reales en 2009.

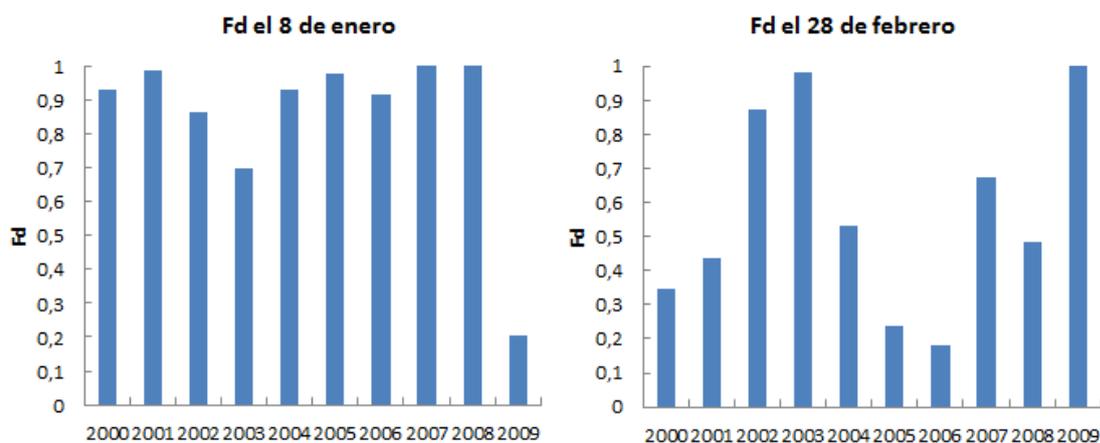
Tabla IV.40. Estadísticos de validación del modelo ARIMA de la serie  $F_d$  diaria.

Período	$R^2$	RECM	EM	EAMP(%)	RECMN(%)	EMN(%)
Ajuste	0,192	0,26	-0,0042	61,15	46,45	-0,75
2009	0,18	0,29	0,0017	72,56	50,96	0,31

Los errores de predicción en 2009 se ajustan a lo esperado excepto en 9 días.

Figura IV.103. Análisis de los residuos de las predicciones de  $F_d$  para 2009.

Los dos días de mayor error son el 8 de enero y el 28 de febrero, en la Figura IV.104 se presentan los valores de estos dos días en los 10 años, el valor de la fracción difusa del 8 enero de 2009 se sitúa a 2,8 desviaciones por debajo de la media, el 28 de febrero presenta el valor máximo del período, aunque en este caso se aleja tan sólo 1,5 desviaciones de la media y en 2003 se alcanzó un valor similar.

Figura IV.104. Días de 2009 en los que el modelo de  $F_d$  presenta mayor error.

#### IV.5.8. Análisis ARIMA para la serie de $F_d$ media diaria mensual.

La evolución del valor medio diario mensual de la fracción difusa se muestra en la Figura IV.105, el promedio es de 0,56.

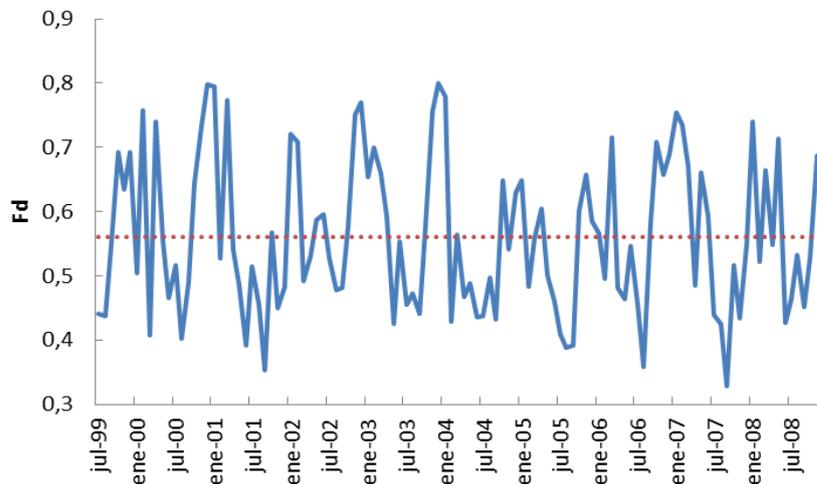


Figura IV.105.  $F_d$  media diaria mensual (Julio-99 a Dic-08).

No se aprecia tendencia determinista pero la serie presenta estacionalidad, con período 12 meses y variabilidad diferente de unos meses a otros.

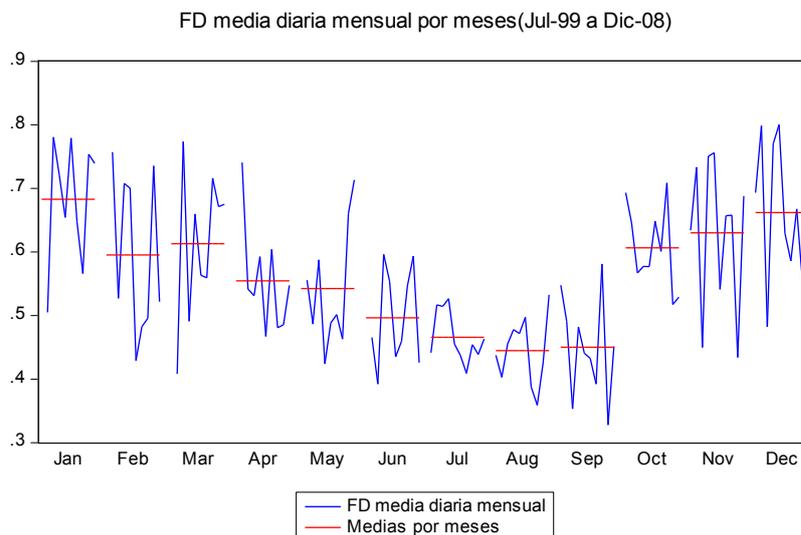


Figura IV.106.  $F_d$  media diaria mensual agrupada por meses.

Siguiendo el procedimiento detallado en apartados anteriores, en la Figura IV.107 se presentan las ACF y ACFP de la serie en logaritmos y con una diferencia estacional.

La ACF en la parte regular muestra únicamente el cuarto retardo muy cerca del límite de la significatividad, en cuanto a la parte estacional hay un retardo significativo en 12 y en el retardo 80, siendo los intermedios estacionales no significativos.

La ACF parcial no muestra retardos significativos en la parte regular, y de la estacional únicamente hay dos retardos significativos (12 y 24) con estructura decreciente.

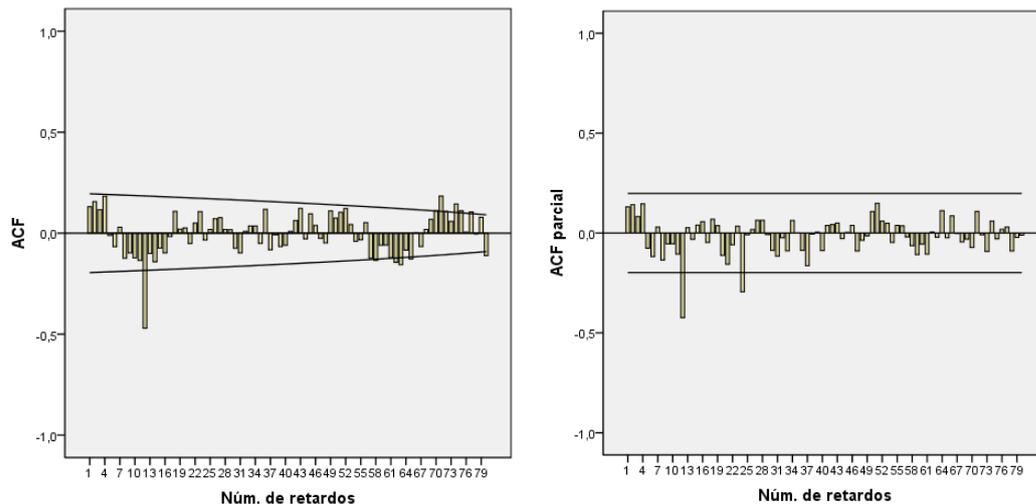


Figura IV.107. ACF y ACF parcial de  $F_d$  mensual con 1 diferencia estacional.

El modelo seleccionado es para la parte estacional es un MA(1), pero en la parte regular no se deduce ninguna estructura, por lo que se ajusta un  $ARIMA(0,0,0) \times (0,1,1)_{12}$ .

Los coeficientes estimados se presentan en la Tabla IV.41, se detectaron dos valores atípicos aditivos en noviembre de 2001 y 2007.

Tabla IV.41. Coeficientes del modelo ARIMA para  $F_d$  mensual.

Coeficiente	Valor	Error	Sig.
$\theta_1 = MA(1)$	0,9105	0,02385	0,000
$w_1$	-0,413377	0,15179	0,0076
$w_2$	-0,44385	0,15163	0,0042

En las ecuaciones  $z_t$  corresponde al logaritmo natural de la fracción difusa media diaria mensual:

$$\nabla_{12} z_t = \Theta_1 (B^{12}) a_t + w_1 I_{1(11-2001)} + w_2 I_{2(11-2007)} \quad (IV.31)$$

Se aprecia la incorrelación de los residuos, más del 95% están dentro de la banda de confianza, el estadístico de Ljung Box indica que ninguno es significativo. Su distribución es normal, de media cero.

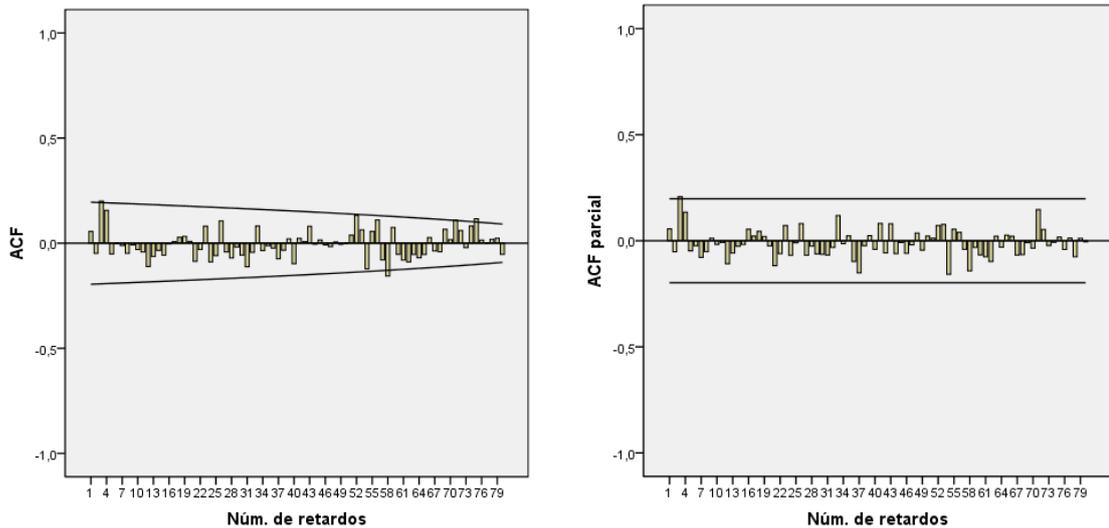


Figura IV.108. ACF y ACF parcial de los residuos del modelo de  $F_d$  mensual.

La serie estimada reproduce la evolución anual en valles y picos pero sigue con dificultad las oscilaciones.

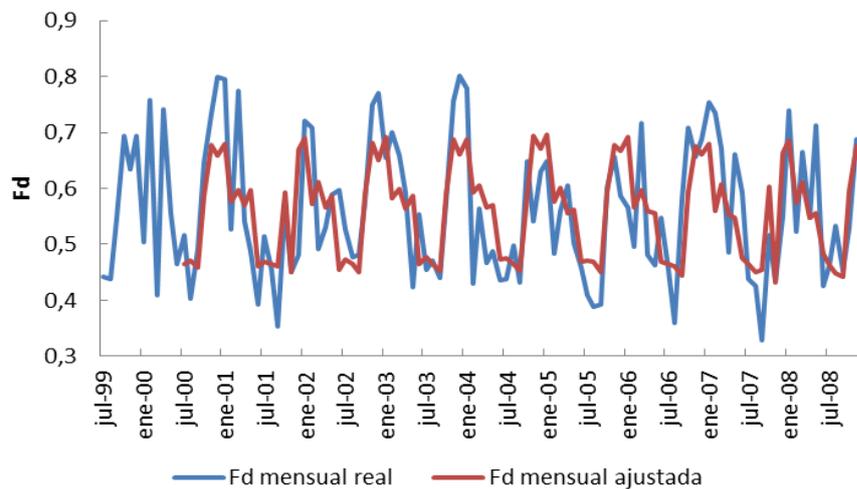


Figura IV.109.  $F_d$  mensual y modelo ajustado.

Las predicciones para 2009, junto a los errores en la etapa de ajuste y de predicción se muestran en la Tabla IV.42 y Figura IV.110.

Tabla IV.42. Estadísticos de validación del modelo ARIMA de la serie  $F_d$  mensual.

Período	$R^2$	RECM	EM	EAMP(%)	RECMN(%)	EMN(%)
Ajuste	0,513	0,0822	-0,0001	12,26	14,69	-0,01
2009	0,50	0,0871	0,0037	14,09	15,40	0,65

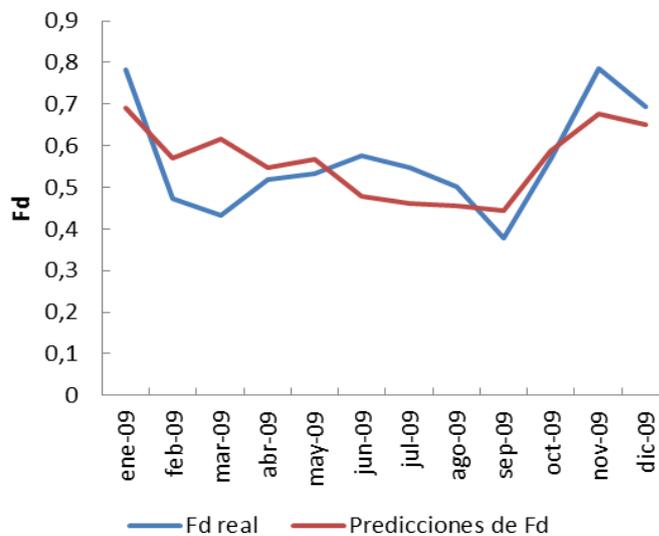


Figura IV.110. Predicciones de  $F_d$  mensual en 2009.

Los errores de las predicciones para 2009 se mantienen en los valores esperados, con el correspondiente al mes de marzo en el límite.

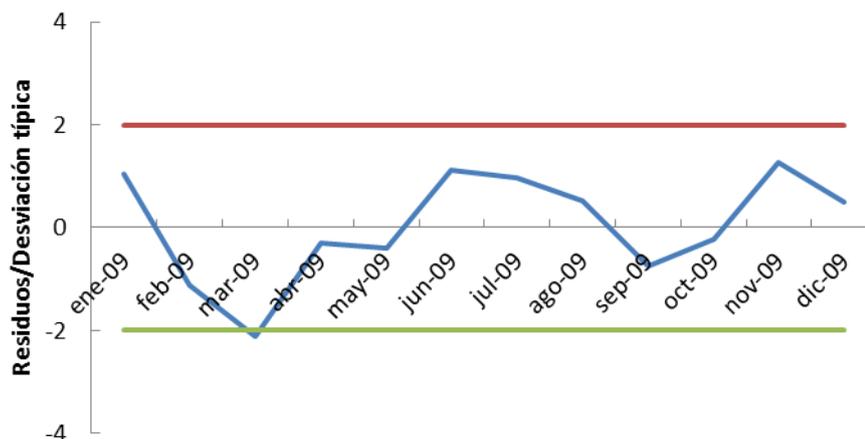


Figura IV.111. Análisis de residuos en 2009 del modelo para  $F_d$  mensual.

#### IV.5.9. Análisis ARIMA para la serie irradiación directa plano normal diaria.

De la serie de datos de irradiación directa disponemos de 5 años (2005 a 2009) para el análisis ARIMA, se toman los datos hasta el 31 de diciembre de 2008, dejando 2009 para validar el modelo ajustado. En la Figura IV.112 se aprecia la periodicidad anual, así como la dependencia de la variabilidad en función de la estación del año. En este caso se transforma la serie aplicando la raíz cuadrada a cada valor diario, y una diferencia estacional.

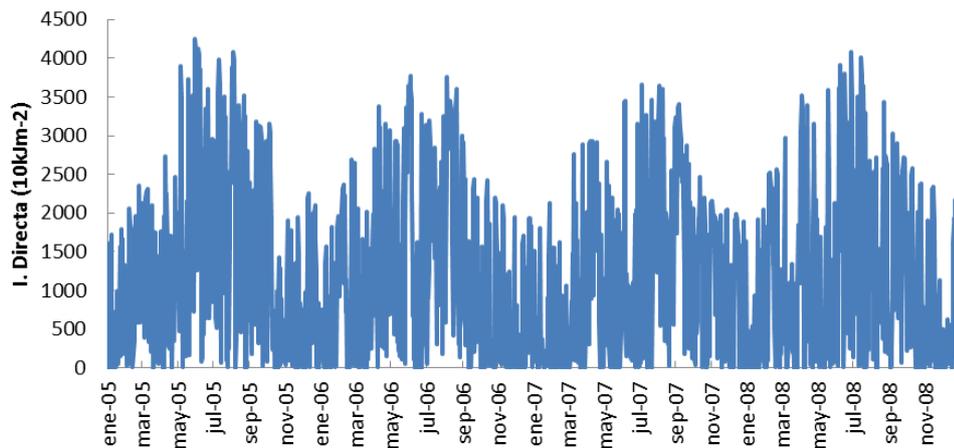


Figura IV.112. Irradiación directa en plano normal (2005-2008).

Sin embargo la función de autocorrelación de la serie transformada no presentaba un patrón de atenuación rápido propio de las series estacionarias (Figura IV.113).

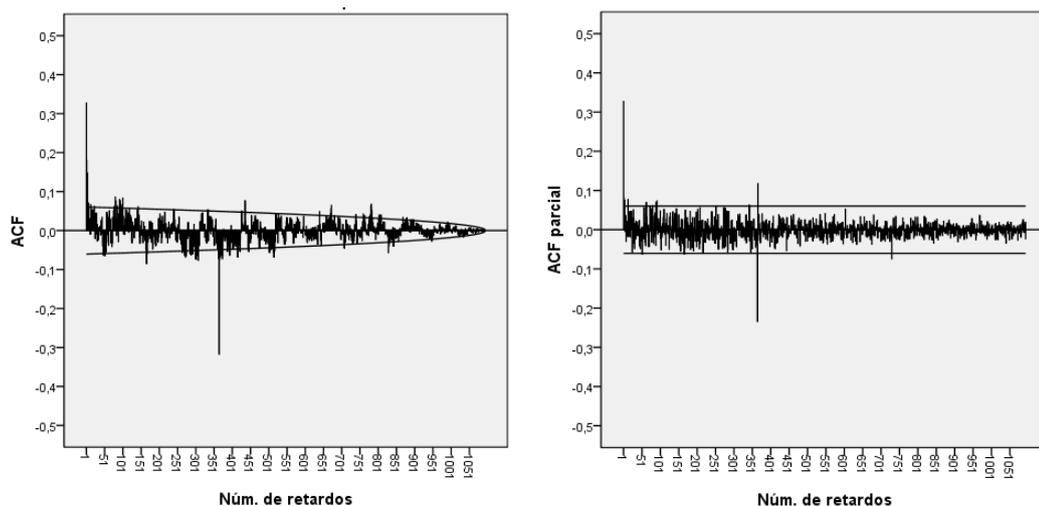


Figura IV.113. ACF y ACF parcial de la raíz cuadrada de la irradiación directa con una diferencia estacional.

Finalmente se opta por aplicar únicamente una diferencia regular, además de la raíz cuadrada, resultando la ACF y ACF parcial de la Figura IV.114, que ahora sí corresponden a un proceso estacionario.

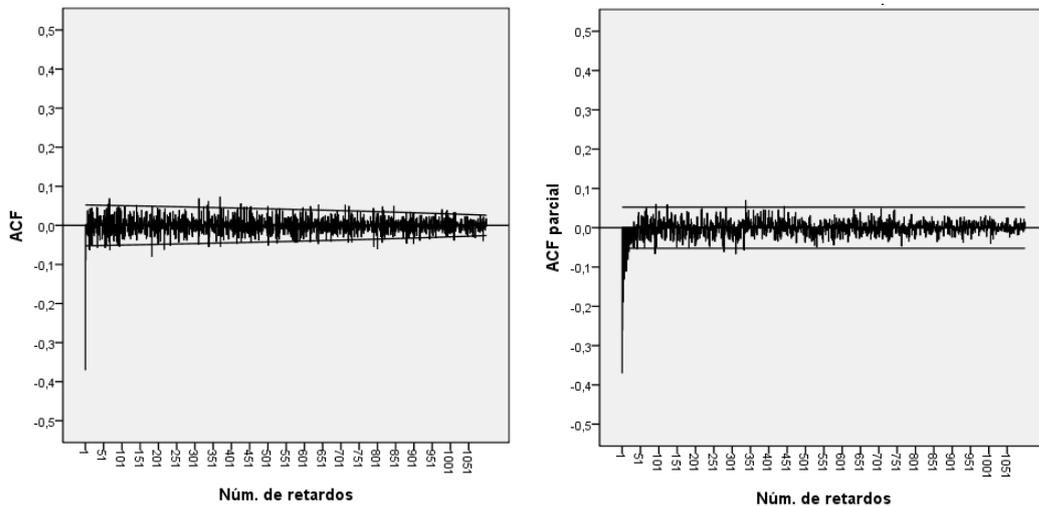


Figura IV.114. ACF y ACF parcial de la serie raíz cuadrada de irradiación directa con una diferencia regular.

En la Figura IV.115 se han detallado la zona del origen y de los dos primeros retardos estacionales (365 y 730).

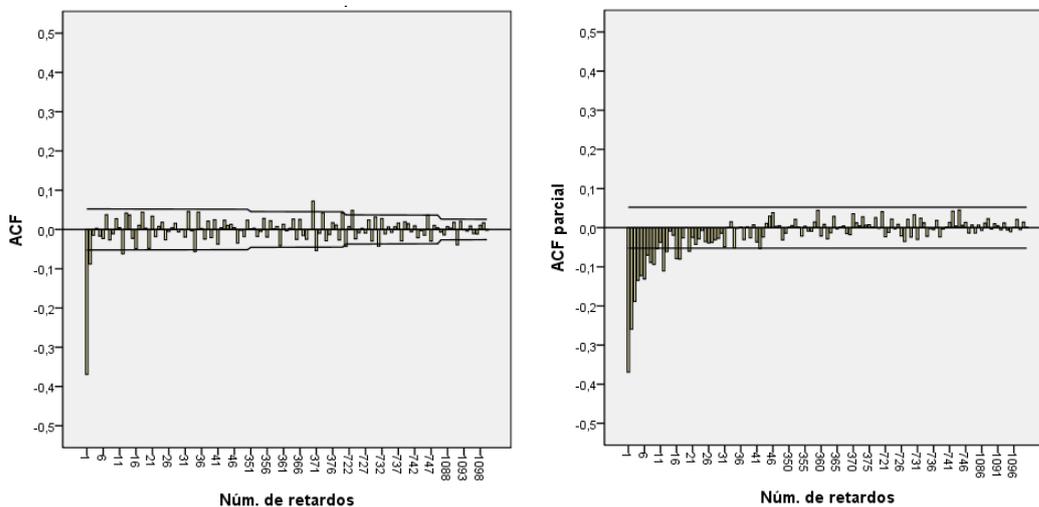


Figura IV.115. Detalle de ACF y ACF parcial de la serie raíz cuadrada de irradiación directa con una diferencia regular.

La estructura de la parte regular se corresponde con un modelo MA(1), MA(2) o ARMA de orden bajo, ninguno de los coeficientes de los retardos estacionales es significativo.

Se probaron distintas alternativas hasta seleccionar el modelo ARIMA(1,1,1)x(0,0,0)<sub>365</sub>, para el que se estimaron los coeficientes de la Tabla IV.42. Esta es la única de las series estudiadas en la que el modelo no incluye la parte estacional, la introducción de un término estacional tanto AR como MA dio como resultado coeficientes nulos. El reducido conjunto de períodos anuales disponibles para el modelado, unido al carácter tan variable de la irradiación directa pueden justificar este hecho.

Tabla IV.43. Coeficientes estimados del modelo ARIMA para la serie Directa diaria.

Coeficiente	Valor	Error	Sig.
$\phi_1=AR(1)$	0,315	0,027673	0,000
$\theta_1=MA(1)$	0,945	0,009468	0,000

Se detectaron 4 atípicos aditivos, con los coeficientes que figuran en la Tabla IV.44.

Tabla IV.44.a. Coeficientes de atípicos aditivos de la serie directa diaria.

Fecha	Coeficiente	Sig.	Fecha	Coeficiente	Sig.
08/08/2005	-37,877	0,0088	22/07/2007	-42,819	0,0031
25/08/2005	-44,121	0,0023	20/07/2008	-47,630	0,0010

La expresión del modelo se muestra a continuación, en la que  $z_t$  es la raíz cuadrada de valores diarios de irradiación directa.

$$z_t = \frac{\theta_1(B)}{\phi_1(B)\nabla} a_t + \sum_{j=1}^4 w_j I_{jt} \quad (\text{IV.32})$$

Si llamamos  $y_t$  a la serie corregida de valores atípicos, que se puede expresar como:

$$y_t = z_t - \sum_{j=1}^4 w_j I_{jt} \quad (\text{IV.33})$$

Podemos reescribir el modelo de la ecuación IV.34 como sigue:

$$y_t = y_{t-1} + \phi_1(y_{t-2} - y_{t-1}) - \theta_1 a_{t-1} + a_t \quad (\text{IV.34})$$

El valor de irradiación directa en un día determinado depende, en este modelo, de su valor los dos días anteriores y del error cometido en la estimación del día anterior.

En la Figura IV.116 se representan la ACF y ACF parcial de los residuos para 1100 retardos, la mayoría de los coeficientes se encuentran dentro del intervalo de confianza del 95%, y el estadístico de Ljung-Box confirma para todos los retardos la incorrelación de los mismos.

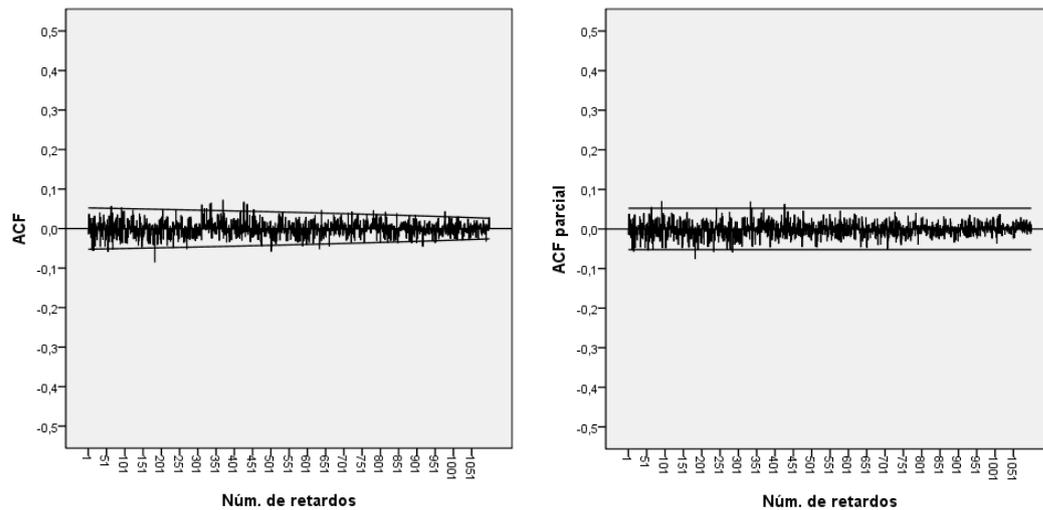


Figura IV.116. ACF y ACF parcial de los residuos del modelo de directa diaria.

En la Figura IV.117 se presenta las estimaciones del modelo en el período de ajuste.

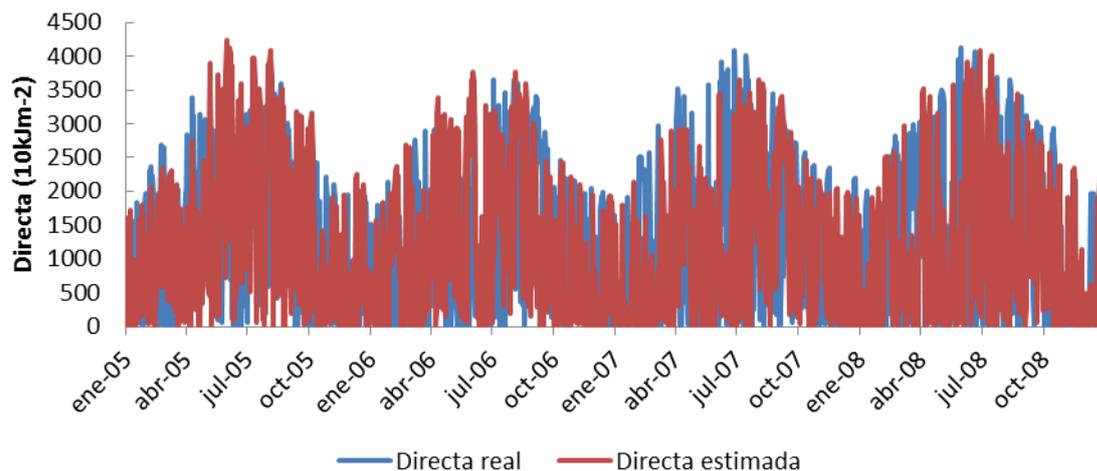


Figura IV.117. Directa estimada en el período de ajuste.

En la Figura IV.118, que representa las predicciones para el año 2009, se aprecian las dificultades del modelo para reproducir la elevada variabilidad de la serie y subestima

la irradiación, de todos los modelos ajustados este es el que presenta porcentajes de error más elevados.

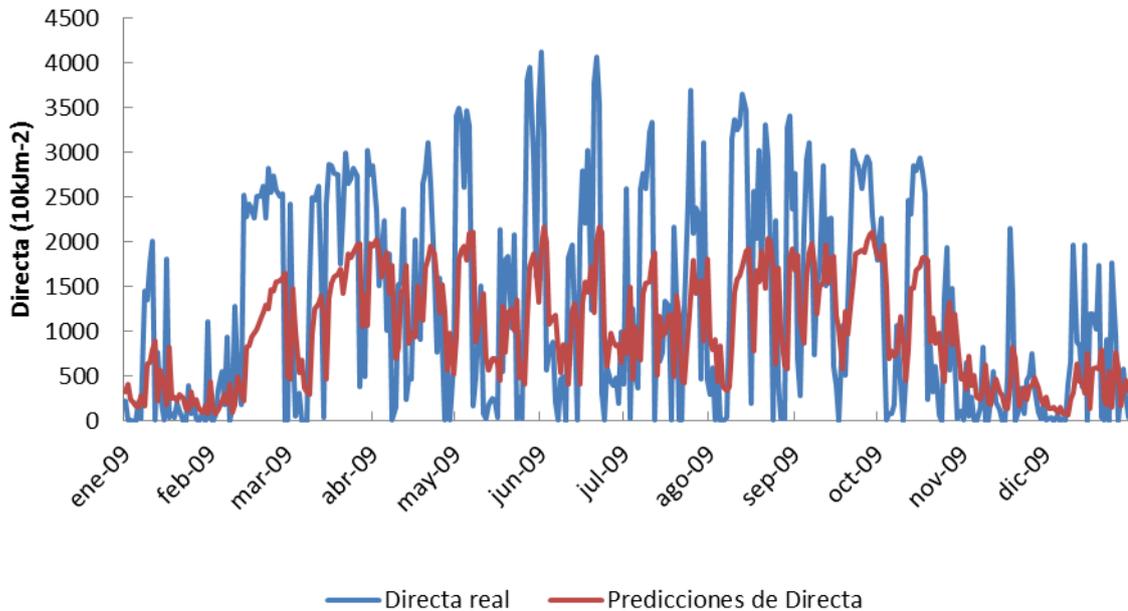


Figura IV.118. Predicciones de irradiación directa para 2009.

Los residuos superan los umbrales de 2 desviaciones típicas en un total de 20 días, en su mayoría corresponden a subestimaciones del valor real.

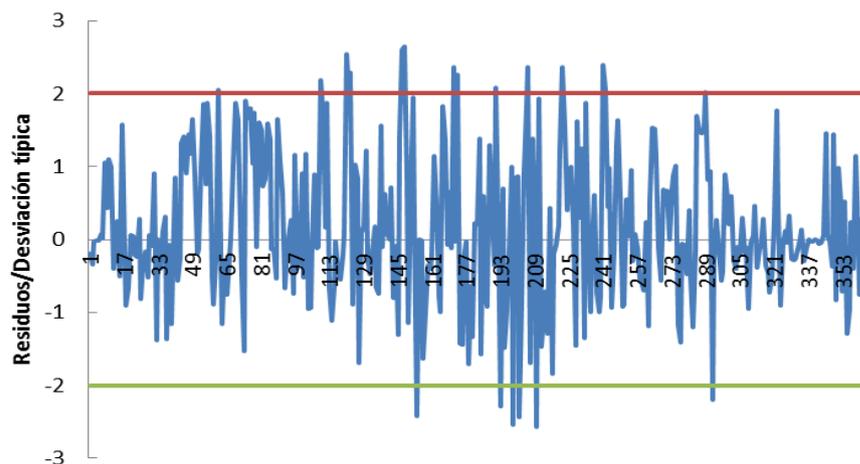


Figura IV.119. Análisis de residuos de las predicciones de irradiación directa diaria para 2009.

En este caso no se han calculado los errores absolutos medios porcentuales por la distorsión que introducen los valores nulos de la serie.

Tabla IV.45. Estadísticos de validación del modelo ARIMA de la serie Directa diaria.

Período	R <sup>2</sup>	RECM (10kJm <sup>-2</sup> )	EM (10kJm <sup>-2</sup> )	EAMP (%)	RECMN (%)	EMN (%)
Ajuste	0,27	939,8	225,2	---	78,42	18,79
2009	0,33	999,04	266,2	---	78,89	21,02

#### IV.5.10. Análisis ARIMA para la serie irradiación directa plano normal diaria media mensual.

En este apartado se presenta el análisis para la media mensual de la irradiación directa aunque el número de meses disponible es muy reducido, tomaremos 50 para estimar el modelo que es el mínimo aconsejable, por lo que los resultados obtenidos en este apartado están sujetos a esta consideración.

En la Figura IV.120 se muestra la irradiación directa media mensual en el período enero de 2005 a febrero de 2009, presenta un patrón anual aunque su evolución es menos regular que la de la global o difusa.

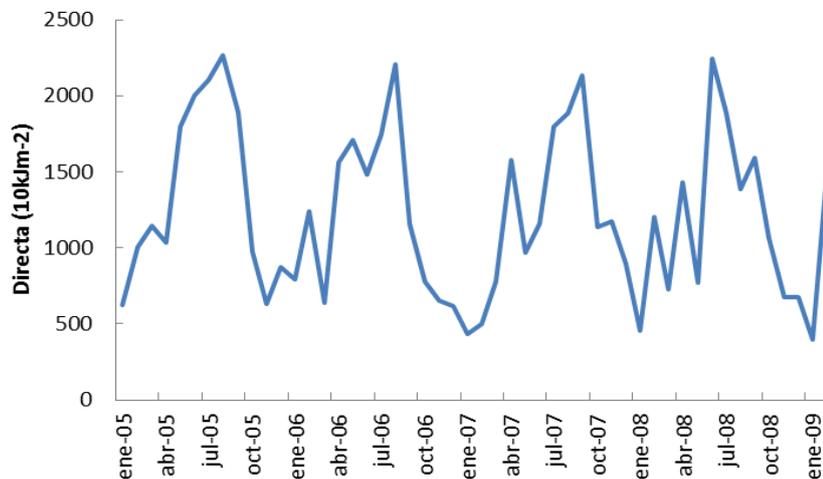


Figura IV. 120. Irradiación directa media diaria mensual (enero 05 a febrero 09).

La representación por meses de la Figura IV.121 parece mostrar mayores excursiones en los meses de verano que de octubre a marzo, de modo que se aplica una transformación en logaritmos y una diferencia estacional.

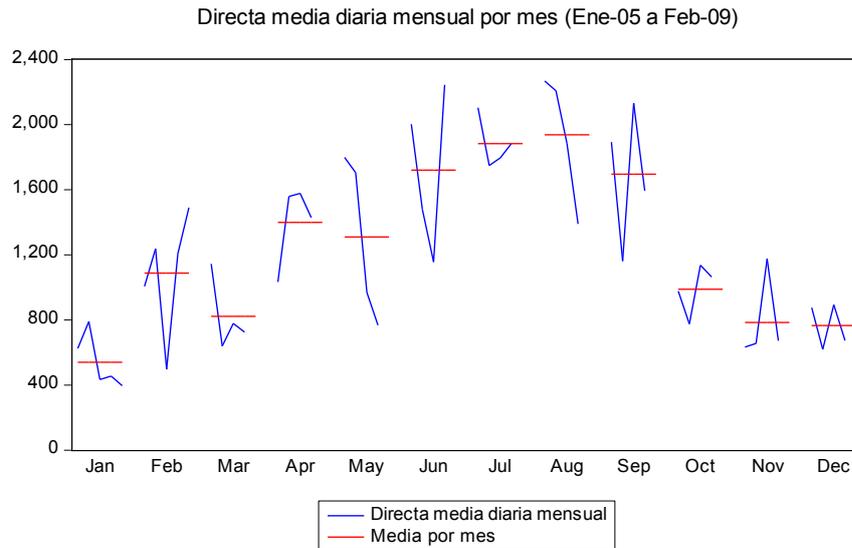


Figura IV.121. Representación de la irradiación directa mensual por meses.

En las funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial (Figura IV.122) de la serie transformada no se aprecia ninguna estructura en la parte regular, en la parte estacional el modelo más probable es un MA(1).

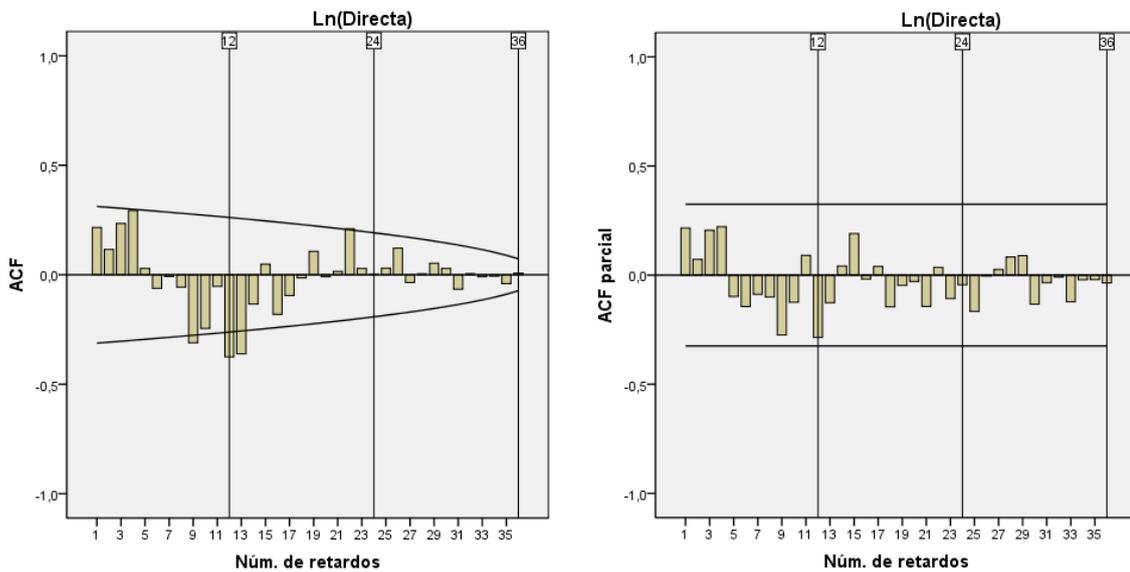


Figura IV.122. ACF y ACF parcial de irradiación directa en logaritmos y con 1 diferencia estacional.

Se ajusta un modelo ARIMA (0,0,0)x(0,1,1)<sub>12</sub> y en el proceso de análisis se detectan dos valores atípicos aditivos, incorporados al modelo según la ecuación siguiente:

$$\nabla_{12}z_t = \Theta_1(B^{12})a_t + w_1I_{1(6-2007)} + w_2I_{2(11-2007)} \tag{IV.35}$$

Donde  $z_t$  es el logaritmo natural de la serie de irradiación directa media diaria mensual.

Tabla IV.46. Coeficientes modelo ARIMA serie directa mensual.

Coefficiente	Valor	Sig.
$\Theta_1 = MA(1)_{\text{estacional}}$	0,8724	0,000
$w_1$	-0,5356	0,000
$w_2$	0,5746	0,000

En este caso el número de observaciones limita a un máximo de 36 retardos el cálculo de las autocorrelaciones de los residuos expuestas en la Figura IV.123, en las que no hay ningún retardo con coeficiente significativo, además se comprobó que presentan distribución normal, lo que valida el modelo seleccionado.

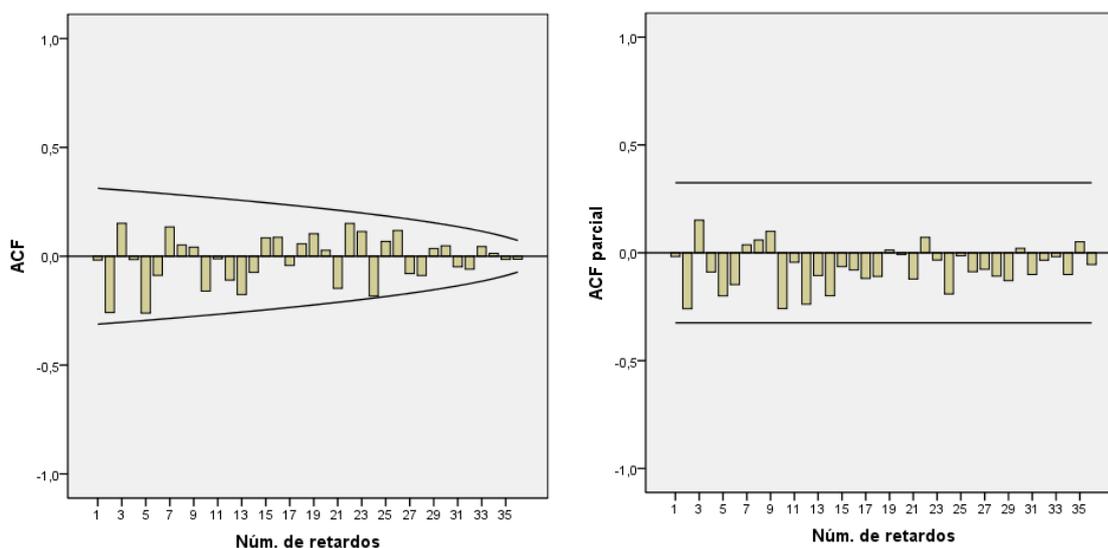


Figura IV.123. ACF y ACF parcial de los residuos del modelo de Directa mensual.

Las Figuras IV.124, IV.125 y la Tabla IV.46 ponen de manifiesto que la serie estimada en el período de ajuste se sigue la evolución de la real, sin embargo en el año 2009, las predicciones para el mes de marzo presentan un error importante.

Tabla IV.47. Estadísticos de validación del modelo ARIMA de la serie Directa mensual

Período	$R^2$	RECM (10kJm <sup>-2</sup> )	EM (10kJm <sup>-2</sup> )	EAMP (%)	RECMN (%)	EMN (%)
Ajuste	0,77	253,53	11,2	14,82	21,4	0,95
2009	0,32	457	50,69	31,66	34,28	3,8

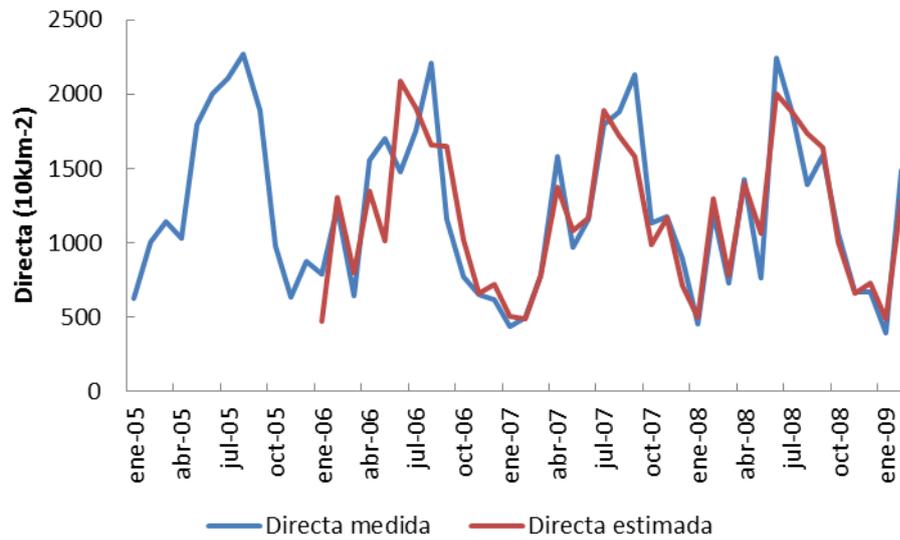


Figura IV.124. Directa estimada en el período de ajuste.

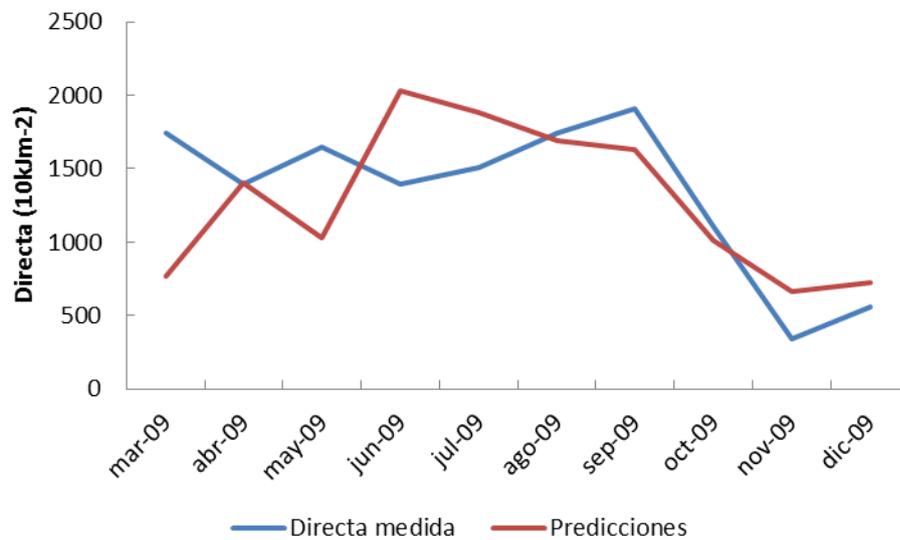


Figura IV.125. Predicciones de Directa en los 10 últimos meses de 2009.

El análisis de los residuos de las predicciones de 2009, señala el residuo del mes de marzo fuera del intervalo esperado, el valor mensual de los tres años anteriores para ese mes no supera en ningún caso los  $800 \text{ 10kJm}^{-2}$ , y el modelo predice para 2009 un valor similar, sin embargo en 2009 el mes de marzo supera los  $1.700 \text{ 10kJm}^{-2}$ .

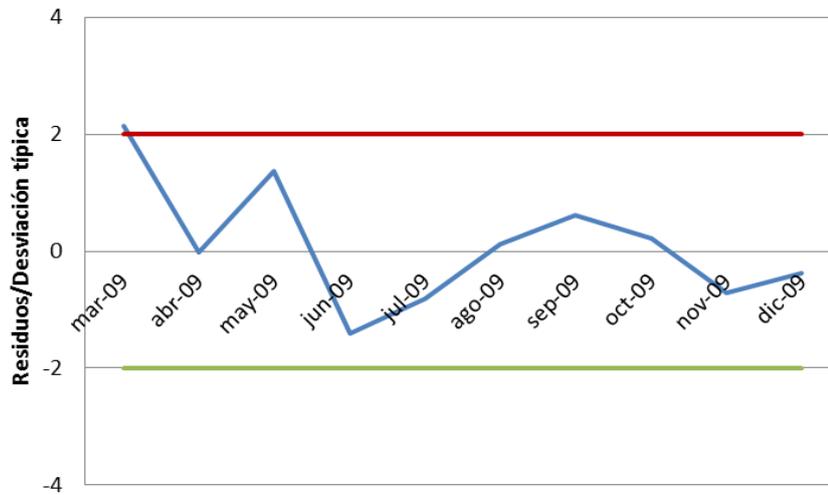


Figura IV.126. Análisis de residuos de las predicciones de Directa mensual para 2009.

#### IV.5.11. Tablas resumen del análisis ARIMA.

Las tablas siguientes muestran un resumen de los modelos estimados para cada serie, junto a varios estadísticos que permiten comparar la precisión de cada uno, así como los coeficientes de cada modelo.

Tabla IV.48. Resumen de modelos ARIMA y principales parámetros de predicción para 2009

Serie	Modelo	R <sup>2</sup>	RECMN	EMN
Global diaria*	ARIMA(2,0,1)x(0,1,1) <sub>365</sub>	0,56	41,87%	5,40%
Global media diaria mensual	ARIMA(0,1,1)x(0,1,1) <sub>365</sub>	0,93	13,0%	-1,64%
K <sub>t</sub> diario*	ARIMA(2,0,1)x(0,1,1) <sub>365</sub>	0,23	38,9%	-2,01%
K <sub>t</sub> media diaria mensual*	ARIMA(0,1,1)x(0,1,1) <sub>365</sub>	0,54	12,68%	-1,24%
Difusa diaria*	ARIMA(2,0,1)x(0,1,1) <sub>365</sub>	0,55	38,18%	0,08%
Difusa media diaria mensual*	ARIMA(0,0,0)x(0,1,1) <sub>365</sub>	0,97	9,29%	-5,22%
F <sub>d</sub> diaria*	ARIMA(2,0,1)x(0,1,1) <sub>365</sub>	0,18	50,96%	0,31%
F <sub>d</sub> media diaria mensual*	ARIMA(0,0,0)x(0,1,1) <sub>365</sub>	0,50	15,40%	0,65%
Directa diaria*	ARIMA(1,1,1)x(0,0,0) <sub>365</sub>	0,27	78,89%	21,02%
Directa media diaria mensual*	ARIMA(0,0,0)x(0,1,1) <sub>365</sub>	0,32	34,28%	3,80%

\*Se detectaron atípicos y se introdujeron en el modelo

Tabla IV.49.a. Coeficientes de los modelos ARIMA (I).

Coefficiente	Global diaria	Global media mensual	Difusa diaria	Difusa media mensual	Directa diaria	Directa media mensual
$\phi_1=AR(1)$	0,8763	-----	0,978	-----	0,315	-----
$\phi_2=AR(2)$	-0,0840	-----	-0,152	-----	-----	-----
$\Phi_3=AR(3)$	0,0847	-----	-----	-----	-----	-----
$\theta_1=MA(1)$	0,6547	0,8994	0,684	-----	0,945	-----
$\Theta_1=MA(1)_{estacional}$	0,9352	0,9100	0,886	0,9555	-----	0,8724

Tabla IV.49.b. Coeficientes de los modelos ARIMA (II).

Coefficiente	$K_t$ diario	$K_t$ medio mensual	$F_d$ diaria	$F_d$ media mensual
$\phi_1=AR(1)$	0,935	-----	0,956	-----
$\phi_2=AR(2)$	-0,129	-----	-0,149	-----
$\Phi_3=AR(3)$	-----	-----	-----	-----
$\theta_1=MA(1)$	0,647	0,904	0,635	-----
$\Theta_1=MA(1)_{estacional}$	0,935	0,909	0,884	0,9105

Para finalizar este apartado, indicar que mediante la prueba U de Mann-Whitney y la de las medianas, aplicadas a las predicciones generadas con cada modelo para el año 2009, se verificó que todas las series de predicciones diarias, presentan la misma distribución que las series medidas. La prueba de las medianas confirma que todas pertenecen a poblaciones con la misma mediana que las series observadas, si bien en el caso de la irradiación difusa la significación asintótica bilateral está en el límite ( $p=0,05$ ), si se aplica la corrección de continuidad de Yates se aceptaría la hipótesis de medianas iguales.

Para las mensuales, debido al limitado número de muestras, únicamente se pudo aplicar la prueba de medianas, y en este caso se puede considerar que todas las series generadas pertenecen a poblaciones con la misma mediana que los valores medios mensuales observados.

El resumen de los contrastes se encuentra en la Tabla C.9 del Anexo C.

#### IV.6. Resumen de resultados.

Se presenta en este apartado una recapitulación cualitativa de los resultados, con el ánimo de extraer lo esencial de las tablas y gráficas expuestas con profusión en los anteriores, a requerimiento de la metodología utilizada.

En primer lugar se abordan los resultados que se refieren al análisis descriptivo de las series de radiación medidas y dos índices,  $k_t$  y  $F_d$ , obtenidos de las mismas que aportan información sobre la componente estocástica de la radiación y sobre la contribución de la componente difusa predominante en A Coruña.

-Respecto a la irradiación global diaria:

- ✓ Aunque los contrastes de normalidad la rechazan para todos los meses, en verano presenta una distribución casi normal con cola negativa muy adecuada para el aprovechamiento solar.
- ✓ El valor medio diario en verano oscila entre los  $1.500 \text{ } 10\text{kJm}^{-2}\text{día}^{-1}$  de septiembre y los  $2.240 \text{ } 10\text{kJm}^{-2}\text{día}^{-1}$  de julio, en invierno los valores más bajos, en torno a  $400 \text{ } 10\text{kJm}^{-2}\text{día}^{-1}$  corresponden a los meses de Diciembre y Enero.
- ✓ Se aprecia un incremento de la irradiación global diaria recibida hacia mediados de Diciembre, relacionado con el incremento de las horas de sol en las mismas fechas.
- ✓ El amplio margen que separa la media de los valores mínimos de la de los valores máximos, incluso en los meses de verano (más de  $2.000 \text{ } 10\text{kJm}^{-2}$ ) ofrecen una evidencia del carácter inestable de la radiación solar en A Coruña.
- ✓ No se aprecia ninguna tendencia clara a lo largo de los 25 años, el valor diario promediando períodos de 365 días es de  $1.325 \text{ } 10\text{kJm}^{-2}\text{día}^{-1}$ , destaca el año 2004 con un incremento sobre ese valor de 5,5%.

-Respecto a la irradiación difusa diaria:

- ✓ Presenta distribución normal en los meses de enero, marzo, abril, octubre y noviembre, y casi normal en el resto, excepto junio y septiembre en los que la distribución es bimodal platicúrtica.
- ✓ El valor medio diario oscila entre los  $200 \text{ } 10\text{kJm}^{-2} \text{ día}^{-1}$  del mes de Diciembre y los  $900 \text{ } 10\text{kJm}^{-2}\text{día}^{-1}$  del mes de Junio.
- ✓ Los días de cielo claro en invierno presentan valores de difusa que coinciden prácticamente con la media de los valores mínimos, mientras que en verano los

días claros no son los de menor irradiación difusa, lo que indica el peso de la contribución de esta componente en el total recibido.

-Respecto a la irradiación directa en plano normal diaria:

- ✓ Presenta distribución normal en julio, en el resto de los meses la distribución preponderante es la leptocúrtica con cola positiva.
- ✓ El valor medio diario está comprendido entre los  $424 \text{ 10kJm}^{-2}\text{día}^{-1}$  de enero y los  $1.899 \text{ 10kJm}^{-2}\text{día}^{-1}$  de agosto.
- ✓ La evolución anual del valor medio mensual es bastante irregular en el período analizado (2005-2009), el mínimo se produce en enero pero los meses de marzo y mayo presentan niveles inferiores a los respectivos anteriores, el máximo se alcanza en agosto y la media en septiembre es superior a la de junio. Se ha comprobado que esta serie reproduce el patrón de las horas de sol, las cuales, para esos 5 años, presentan un comportamiento muy diferente al promedio a largo plazo.

-Respecto al índice de claridad ( $k_t$ ) y la fracción difusa ( $F_d$ ):

- ✓ La transmisividad diaria máxima de la atmósfera es del 80%.
- ✓ Se ha obtenido una clasificación, según el valor de  $k_t$ , que permite conocer la distribución de los días en función del estado del cielo, resumida a continuación para el período 1985-2009: 21% días de cielo claro, 50% con cielo parcialmente nublado y 29% de cielo cubierto.
- ✓  $F_d$  presenta un histograma en forma de U, con valores agrupados en torno a dos extremos. Los días de cielo claro presentan, en el 96% de los casos, valores de  $F_d$  inferiores a 0,3, y los de cielo cubierto se corresponden con valores de fracción difusa superiores a 0,6. Se ha constatado la gran dispersión de valores de fracción difusa para los días parcialmente cubiertos.
- ✓ A nivel horario  $k_t$ , para elevaciones solares entre  $5^\circ$  y  $40^\circ$  presenta distribución bimodal con dos máximos situados casi en los extremos, para las elevaciones más altas el máximo secundario (situado siempre por debajo de 0,3) desaparece. Se ha intentado sin éxito identificar las dos poblaciones (una

agrupada en torno a 0,7 y la otra en torno a 0,2), separándolas con algún criterio objetivo, estación del año, mes del año o incluso hora del día, en todos los casos se presentaba de nuevo en cada grupo la bimodalidad.

- ✓ El valor máximo de  $k_t$  horario se encuentra en el intervalo 0,77-0,84.

-Respecto a la comparativa entre la irradiación global, difusa y directa:

- ✓ Se constata el carácter muy variable de la radiación solar global en A Coruña, coincidiendo los meses de mayor estabilidad con los de mayor aprovechamiento del recurso (mayo a septiembre). La irradiación directa es la componente más inestable con coeficientes de variación de Pearson por encima del 60% todo el año, mientras la difusa es la más estable con un coeficiente entre el 30 y 34% en casi todos los meses.
- ✓ Para el período 2005-2009, la irradiación global anual recibida en un plano orientado al sur e inclinado  $33,6^\circ$  resulta un 11% superior a la recibida en plano horizontal. La inclinación de la superficie captadora supone un incremento de la irradiación recibida en los meses de otoño-invierno, y un ligero decremento de mayo a junio. Se favorece la captación de la componente directa que, con esta inclinación, supone en todos los meses más del 50% de la global, pero la contribución de la difusa está en torno al 40% un tercio del año.
- ✓ La radiación global y difusa son prácticamente simétricas, es decir se recibe el mismo porcentaje de irradiación por la mañana que por la tarde, la banda horaria central corresponde en hora oficial aproximada a las 13:30-14:30 h. Siendo las horas comprendidas entre las 11:30 y las 16:30 h las de mayor aportación, en esta franja horaria se recibe el 63% de la radiación global diaria.
- ✓ La radiación directa presenta una ligera asimetría, recibéndose casi un 3% más a partir de las 14:30 h.
- ✓ La fracción de difusa tiene su principal contribución a primeras y últimas horas del día, entre las 7:30 y las 8:30 h tenemos un promedio de un 80% de componente difusa, que se reduce a un 56% en las horas centrales del día.

-Respecto a la utilización de la temperatura, precipitación y horas de sol como predictores de irradiación:

- ✓ Se ha obtenido un modelo que relaciona la temperatura ambiente con la irradiación global, ambas en valores diarios medios mensuales. El modelo se construye en dos tramos (uno para los meses de enero a julio, y otro para el resto del año), el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) es de 0,83. También se obtiene un modelo similar a escala diaria aunque en este caso se produce una marcada sobreestimación de la radiación durante los meses de otoño-invierno.
- ✓ Se ha obtenido un modelo que relaciona la precipitación con la irradiación global a nivel diario medio mensual, igual que en el caso anterior el modelo se construye en dos tramos (noviembre a marzo y abril a octubre) con un valor de  $R^2$  de 0,31.
- ✓ Se ha obtenido un modelo que relaciona las horas de insolación con el índice de claridad a nivel diario. La estimación de la irradiación global para el 2009, utilizando este modelo, presenta indicadores de ajuste excelentes:  $R^2=0,97$  y error cuadrático medio porcentual (RECMN) de 11,64%.
- ✓ Las horas de insolación también resultan el mejor predictor para la irradiación directa, en este caso  $R^2=0,95$  y RECMN=19,87%.

-Respecto a los modelos obtenidos para la componente difusa:

- ✓ Se ha obtenido un modelo basado en las correlaciones de Liu-Jordan, para la irradiación difusa media diaria mensual, que se estima en función del índice de claridad. El modelo se ajusta adecuadamente a los valores mensuales aunque con ligera sobreestimación en todos los meses ( $R^2=0,97$ ).
- ✓ Se ha obtenido un modelo diario también basado en el índice de claridad, con correlaciones  $F_d-k_t$  definidas para tres intervalos de  $k_t$ . El 30% de los días presentan un error absoluto porcentual en la estimación de irradiación difusa por debajo del 5% y más del 60% inferior al 15%. El modelo ajusta mejor para valores de  $k_t \leq 0,3$ , en ese caso el error medio porcentual es del 6,4%, sin embargo la dispersión de valores de fracción difusa para valores intermedios de  $k_t$  representa un reto para el buen ajuste del mismo.

- ✓ A nivel horario se obtuvieron un total de 6 modelos: uno para el conjunto completo de los datos horarios (*modelo horario único*) y otros cinco aplicables a las bandas horarias de acuerdo a la elevación solar (se agrupan datos horarios correspondientes a intervalos de elevaciones solares de 5°). Estos últimos presentan mayor precisión en la estimación de la fracción difusa que el modelo único. Aunque para elevaciones solares mayores de 45° tienen dificultades para reflejar la dispersión de valores de  $F_d$  frente a  $k_t$ .
- ✓ Se obtienen los parámetros para A Coruña del modelo de Boland y Ridley, que presenta una expresión exponencial para relacionar  $F_d$  y  $k_t$ . Se ha comprobado que los modelos desarrollados en esta tesis ofrecen en general mayor precisión que éste.

-Respecto al modelo obtenido para la componente directa:

- ✓ Se ha obtenido un modelo basado en la correlación  $k_b$ - $k_t$ , para la irradiación directa horaria en plano normal. El modelo incluye el coseno del ángulo cenital y está dividido en dos tramos en función del valor de  $k_t$ , uno de ellos, se corresponde aproximadamente con días de cielo cubierto. La comparación con un modelo similar de la bibliografía obtenido con datos de seis ciudades españolas pone de manifiesto la superioridad del modelo local.

-Respecto a la modelización ARIMA de la irradiación y sus índices asociados:

- ✓ Los modelos estimados para todas las series excepto la de irradiación directa diaria, son estacionales multiplicativos, con una parte estacional idéntica que incluye una diferencia y un polinomio de media móvil de orden uno, con coeficiente de valor próximo a la unidad. El modelo ajustado para la serie diaria de irradiación directa no tiene componentes estacionales.
- ✓ Las series diarias coinciden en la parte regular, con un polinomio autorregresivo de orden 2 y un término de media móvil, excepto la directa en cuyo caso el polinomio autorregresivo es de orden 1 e incluye una diferencia regular.
- ✓ Las series medias mensuales quedan definidas por la parte estacional, excepto la global y el índice de claridad que incorporan además una diferencia regular y un término de media móvil de orden uno.

- 
- ✓ Los modelos ARIMA para las series mensuales de irradiación global y difusa explican más del 90% de la varianza de las mismas, en el caso de las series diarias este porcentaje supera del 55%.
  - ✓ Los dos modelos (diario y mensual) estimados para la serie de irradiación directa son los que ofrecen peores resultados respecto a los de las demás series, explicando tan solo un 19% de la varianza el diario y un 32% el mensual. El limitado número de observaciones para su ajuste así como la fuerte componente aleatoria que determina su comportamiento (presencia y tipo de nubes en cada instante) pueden dar explicación a este hecho.
  - ✓ Los modelos estimados para las series mensuales del índice de claridad y la fracción difusa explican más del 50% de la varianza, sin embargo la variabilidad que presentan estas series a nivel diario no ha sido captada por los modelos ARIMA.
  - ✓ Las series de predicciones generadas para el año 2009, presentan características estadísticas que permiten considerarlas como pertenecientes a la misma población que las series de medidas.



## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES.**



### V.1. Conclusiones.

- ✓ La distribución de la irradiación global no presenta distribución normal en ningún mes del año, sin embargo su distribución entre mayo y septiembre (casi normal con cola negativa) es muy adecuada para el aprovechamiento solar, con mayor frecuencia de valores por encima de la media que una distribución normal.
- ✓ No se aprecia ninguna tendencia en la radiación global recibida en A Coruña en los últimos 25 años.
- ✓ La componente difusa en A Coruña supone un porcentaje importante de la global, oscila entre un 43% en septiembre y el 71% en Enero, de las tres series de radiación es la más estable en términos del coeficiente de variación de Pearson. La principal fuente de variabilidad de la global se debe a la componente directa.
- ✓ En el período de 25 años, comprendido entre 1985 y 2009, el 70% de los días son de cielo despejado o parcialmente cubierto, si comparamos el valor diario medio anual de irradiación recibido en A Coruña respecto al de otras zonas de Galicia, éste es un 12,4% inferior al de Rías Baixas y casi un 23% superior al recibido en la costa de Lugo, la de menor insolación de Galicia.
- ✓ De las tres variables analizadas como posibles predictores de la radiación solar: temperatura ambiente, horas de sol y precipitación diaria, se ha comprobado que las horas de insolación son el predictor óptimo para la irradiación global diaria y para la irradiación directa, además la temperatura ambiente media se puede utilizar también para predecir la global a escala mensual con buenos resultados. No se encontró correlación significativa entre la componente difusa y las tres variables predictoras.

De los modelos propuestos en esta tesis se indican a continuación los que ofrecen mejores resultados para estimar cada una de las componentes de la irradiación en A Coruña según la escala temporal.

Para la irradiación global:

- ✓ A nivel mensual el modelo ARIMA  $(0,1,1) \times (0,1,1)_{365}$ .
- ✓ A escala diaria la ecuación de Angström-Prescott que permite obtener el índice de claridad y a partir de éste la irradiación global.

Para la irradiación difusa:

- ✓ A nivel mensual el modelo ARIMA  $(0,0,0) \times (0,1,1)_{365}$ .

- ✓ A escala diaria el modelo diario de correlación  $F_d-k_t$ , que permite estimar la fracción difusa diaria, y con el dato de irradiación global se obtiene la difusa.
- ✓ En la escala horaria los modelos de correlaciones  $F_d-k_t$  por elevación solar, igual que en el caso anterior permiten estimar la fracción difusa.

Para la irradiación directa:

- ✓ A nivel mensual el modelo  $ARIMA(0,0,0) \times (0,1,1)_{365}$ .
- ✓ A escala diaria el modelo de correlación con las horas de sol.

Los modelos ARIMA permiten modelar adecuadamente las series de irradiación global y difusa, especialmente la componente estacional, y a diferencia de los otros modelos estudiados permiten realizar predicciones.

## **CAPÍTULO VI**

### **BIBLIOGRAFÍA.**



---

**BIBLIOGRAFÍA**

- Aguiar, R, and M Collares-Pereira. (1992). "TAG - A Time-Dependent, Autorregressive, Gaussian Model for generating synthetic hourly radiation." *Solar Energy* 49:167-174.
- Ahmad Jamil, M, and G N Tiwari. (2011). "Solar radiation models — A review." *International Journal of Energy Research* 271-290.
- Almorox, J, and C Hontoria. (2004). "Global solar radiation estimation using sunshine duration in Spain." *Energy Conversion and Management* 45:1529-1535.
- Almorox, J, C Hontoria, and M Benito. (2005). "Statistical validation of daylength definitions for estimation of global solar radiation in Toledo, Spain." *Energy Conversion and Management* 46:1465-1471.
- Alonso Abella, Miguel. (2005). "Sistemas fotovoltaicos. Introducción al diseño y dimensionado de instalaciones de energía solar fotovoltaica." S.A.P.T. Publicaciones Técnicas S.L.
- Ayuso Ramos, Arturo. (2004). "Evaluación de la radiación solar sobre superficies verticales: factores de ganancia y elaboración del atlas solar de Castilla y León." [Tesis doctoral]. Universidad de Valladolid.
- Badescu, Viorel. (2008). "Modeling Solar Radiation at Earth's Surface." Viorel Badescu. Springer.
- Bakirci, Kadir. (2009). "Models of solar radiation with hours of bright sunshine: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13:2580-2588.
- Bandyopadhyay, A., A. Bhadra, N.S. Raghuwanshi, and R. Singh. (2008). "Estimation of monthly solar radiation from measured air temperature extremes." *Agricultural and Forest Meteorology* 148:1707-1718.
- Batiles, F J, M A Rubio, J Tovar, F J Olmo, and L. Alados-Arboledas. (2000). "Empirical modeling of hourly direct irradiance by means of hourly global irradiance." *Energy* 25:675-688.
- Benghanem, M, and a Joraid. (2007). "A multiple correlation between different solar parameters in Medina, Saudi Arabia." *Renewable Energy* 32:2424-2435.
- Bilbao, J, A De Miguel, A Ayuso, and J A Franco. (2003). "Iso-radiation maps for tilted surfaces in the Castile and Leon region, Spain." *Energy Conversion and Management* 44:1575-1588.

- Bravo, J L, M M Nava, and C Gay. (2001). "Linear and regressive stochastic models for prediction of daily maximum ozone values at Mexico City atmosphere." *Atmosfera* 14:113-123.
- Brinkworth, B J. (1977). "Autocorrelation and stochastic modelling of insolation sequences." *Solar Energy* 19:343-347.
- Brook, Martha Jo, and Brad A Finney. (1987). "Generation of bivariate solar radiation and temperature time series." *Solar Energy* 39:533-540.
- Callegari, M, R Festa, and C F Ratto. (1992). "Stochastic modelling of daily beam irradiation." *Renewable Energy* 2:611-624.
- Canada, Javier. (1992). "Solar radiation prediction from sunshine in eastern Spain." *Renewable energy* 2:305-310.
- Collares-Pereira, M, and A Rabl. (1979). "The average distribution of solar radiation – Correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values." *Solar Energy* 22:155-164.
- Craggs, C. (2000). "Statistical investigation of the optimal averaging time for solar irradiance on horizontal and vertical surfaces in the UK." *Solar Energy* 68:179-187.
- Daza Sánchez, Francisca. (2008). "Demanda de agua en zonas urbanas en Andalucía." [Tesis doctoral]. Universidad de Córdoba.
- De Miguel, A, and J Bilbao. (2005). "Test reference year generation from meteorological and simulated solar radiation data." *Solar Energy* 78:695-703.
- De Miguel, A, J Bilbao, R Aguiar, H Kambezidis, and E Negro. (2001). "Diffuse solar irradiation model evaluation in the North Mediterranean Belt area." *Solar Energy* 70:143-153.
- Duran, Sahin Ahmet. (2007). "A new formulation for solar irradiation and sunshine duration estimation." *International Journal of Energy Research* 109-118.
- El-Sebaai, A.A., F.S. Al-Hazmi, A.A. Al-Ghamdi, and S.J. Yaghmour. (2010). "Global, direct and diffuse solar radiation on horizontal and tilted surfaces in Jeddah, Saudi Arabia." *Applied Energy* 87:568-576.
- Erbs, D. G., S. A. Klein, and J A Duffie. (1982). ". Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly average global radiation." *Solar Energy* 28:293-902.

- Festa, R, S Jain, and C F Ratto. (1992). "Stochastic modelling of daily global irradiation." *Renewable Energy* 2:23-34.
- Frutos, Ravego F. (1987). "Distribuciones de irradiancia solar difusa." [Tesis doctoral]. Universidad de Sevilla.
- Gago, E. J., S. Etxebarria, Y. Tham, Y. Aldali, and T. Muneer. (2010). "Inter-relationship between mean-daily irradiation and temperature, and decomposition models for hourly irradiation and temperature." *International Journal of Low-Carbon Technologies* 6:22-37.
- Goh, T, and K Tan. (1977). "Stochastic modeling and forecasting of solar radiation data." *Solar Energy* 19:755-757.
- Gómez, M. , Sahelices C., and García J. (1997). "ARIMA modelling of NO, NO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> time series." Pp. 251-260 in *Measurements And Modelling In Environmental Pollution*.
- Gopinathan, K.K., and Alfonso Soler. (1996). "Effect of sunshine and solar declination on the computation of monthly mean daily diffuse solar radiation." *Renewable Energy* 7:89-93.
- Graham, V A, K G T Hollands, and T E Unny. (1988). "A time series model for  $K_t$  with application to global synthetic weather generation." *Solar Energy* 40:83-92.
- Gueymard, C. (2000). "Prediction and Performance Assessment of Mean Hourly Global Radiation." *Solar Energy* 68:285-303.
- Gueymard, C. (2009). "Direct and indirect uncertainties in the prediction of tilted irradiance for solar engineering applications." *Solar Energy* 83:432-444.
- Hunt, L A, L Kuchar, and C J Swanton. (1998). "Estimation of solar radiation for use in crop modelling." *Agricultural and Forest Meteorology* 91.
- Ianetz, Amiran, Vera Lyubansky, Ilan Setter, Efim G Evseev, and Avraham I Kudish. (2000). "A method for characterization and inter-comparison of sites with regard to solar energy utilization by statistical analysis of their solar radiation data as performed for three sites in the Israel Negev region." *Solar Energy* 69:283-293.
- Iqbal, M. (1980). "Prediction of hourly diffuse solar radiation from measured hourly global solar radiation on a horizontal surface." *Solar Energy* 24:491-503.
- Jacovides, C, F Tymvios, V Assimakopoulos, and N Kaltsounides. (2006). "Comparative study of various correlations in estimating hourly diffuse fraction of global solar radiation." *Renewable Energy* 31:2492-2504.

- Jain, P. (2003). "Bivariate models: relationships between solar irradiation and either sunshine duration or extremum temperatures." *Renewable Energy* 28:1211-1223.
- Ji, Wu, Ck Chan, Jw Loh, Fh Choo, and Lh Chen. (2009). "Solar radiation prediction using statistical approaches." (2009) 7th International Conference on Information, Communications and Signal Processing (ICICS) 1-5.
- Kamal, Lalarukh, and Yasmin Zahra Jafri. (1999). "Stochastic modeling and generation of synthetic sequences of hourly global solar irradiation at Quetta, Pakistan." *Renewable Energy* 18:565-572.
- Kärner, Olavi. (2009). "ARIMA representation for daily solar irradiance and surface air temperature time series." *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 71:841-847.
- Katiyar, A.K., and Chanchal Kumar Pandey. (2010). "Simple correlation for estimating the global solar radiation on horizontal surfaces in India." *Energy* 35:5043-5048.
- Li, Huashan, Weibin Ma, Yongwang Lian, Xianlong Wang, and Liang Zhao. (2011). "Global solar radiation estimation with sunshine duration in Tibet, China." *Renewable Energy* 36:3141-3145.
- Liu, B H Y, and R C Jordan. (1960). "The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation." *Solar Energy* 4:1-19.
- Liu, D L, and B J Scott. (2001). "Estimation of solar radiation in Australia from rainfall and temperature observations." *Agricultural and Forest Meteorology* 106:41-59.
- López, G, F.J. Batlles, and J. Tovar-Pescador. (2005). "Selection of input parameters to model direct solar irradiance by using artificial neural networks." *Energy* 30:1675-1684.
- López, G, M A Rubio, and J. Batlles. (2000). "Estimation of hourly direct normal from measured global solar irradiance in Spain." *Renewable Energy* 21:175-186.
- Loutfi, H, and A Khtira. (1992). "Stochastic analysis and generation of synthetic sequences of daily global solar irradiation: Rabat site (Morocco)." *Renewable Energy* 2:129-138.
- McCaskill, Mr. (1990). "Prediction of solar radiation from rainy day information using stable coefficients.pdf." *Agricultural and Forest Meteorology* 51:247-255.
- Meza, Francisco, and Eduardo Varas. (2000). "Estimation of mean monthly solar global radiation as a function of temperature." *Agricultural and Forest Meteorology* 100:231-241.

- Mora-López, L., and M. Sidrach-de-Cardona. (1997). "Characterization and simulation of hourly exposure series of global radiation." *Solar Energy* 60:257-270.
- Mora-López, Ll., and M. Sidrach-de-Cardona. (1998). "Multiplicative ARMA models to generate hourly series of global irradiation." *Solar Energy* 63:283-291.
- Munawwar, S, and T Muneer. (2007). "Statistical approach to the proposition and validation of daily diffuse irradiation models." *Applied Energy* 84:455-475.
- Muneer, T, and F Fairouz. (2002). "Quality control of solar radiation and sunshine measurements – lessons learnt from processing worldwide databases." *Building Services Engineering Research and Technology* 23:151-166.
- Muneer, T, S Younes, and S Munawwar. (2007). "Discourses on solar radiation modeling." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11:551-602.
- Muselli, M. (2000). "Classification of typical meteorological days from global irradiation records and comparison between two Mediterranean coastal sites in Corsica Island." *Energy Conversion and Management* 41:1043-1063.
- Orgill, J. F., and K G T Hollands. (1977). "Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface." *Solar Energy* 19:357-359.
- Orozco González, Antonio. (2001). "Distribución espectral y cantidades de radiación total, PAR y UV-A en A Coruña." [Tesis doctoral]. Universidad de A Coruña.
- Paoli, Christophe, Cyril Voyant, Marc Muselli, and Marie-Laure Nivet. (2010). "Forecasting of preprocessed daily solar radiation time series using neural networks." *Solar Energy* 84:2146-2160.
- Paulescu, M, L Fara, and E Tulcan-Paulescu. (2006). "Models for obtaining daily global solar irradiation from air temperature data." *Atmospheric Research* 79:227-240.
- Paz González, A., and F. Díaz-Fierros Viqueira. (1981). "Estudio de las medidas de radiación solar en Galicia." Pp. 477-488 in *Avances sobre la investigación en Bioclimatología*, editado por CSIC.
- Peña, Daniel. 2010. "Análisis de series temporales". Alianza Editorial S.A.
- Perdomo, R, E Banguero, and G Gordillo. (2010). "Statistical Modeling For Global Solar Radiation Forecasting In Bogotá." Pp. 2374-2379 in *35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference* .
- Pérez, César. (2006). "Econometría de las series temporales." Pearson Education S.A.

Pettazzi, Alberto, and Santiago Salsón Casado. (2011). "Atlas de Radiación Solar de Galicia." Editado por Xunta de Galicia.

Posadillo, R, and R Lopez Luque. (2009). "Hourly distributions of the diffuse fraction of global solar irradiation in Córdoba (Spain)." *Energy Conversion and Management* 50:223-231.

Posadillo, R., and R. López Luque. (2010). "The generation of hourly diffuse irradiation: A model from the analysis of the fluctuation of global irradiance series." *Energy Conversion and Management* 51:627-635.

Rahimikhoob, Akhob. (2009). "Comparison estimates of solar radiation from neural network models and Angstrom formula for application in ET0 - A case study in Abureyhan Station, Iran." *Applied Engineering in Agriculture* 25:671-675.

Reikard, Gordon. (2009). "Predicting solar radiation at high resolutions: A comparison of time series forecasts." *Solar Energy* 83:342-349.

Reindl, D. T., W. A. Beckman, and J. A Duffie. (1990). "A. Diffuse fraction correlations." *Solar Energy* 45:1-7.

Rodríguez Gómez, Benigno. (2010). "Estudio de la irradiación global en Galicia basado en medidas recogidas en estaciones meteorológicas." [Tesis doctoral]. Universidad de A Coruña.

Santos Navarro, J.M., and Et Al. (2004). "Correlaciones minutarias, horarias y diarias de la radiación solar difusa a la radiación solar global en Vigo." en *Siguiendo el Camino de las Estrellas. Libro de Actas del XII Congreso Ibérico y VII Congreso Iberoamericano de Energía Solar.*

Santos, J, Jm Pinazo, and J Cañada. (2003). "Methodology for generating daily clearness index index values  $K_t$  starting from the monthly average daily value ?. Determining the daily sequence using stochastic models." *Renewable Energy* 28:1523-1544.

Silva Pérez, Manuel A. (2002). "Estimación del recurso solar para sistemas termosolares de concentración." [Tesis doctoral]. Universidad de Sevilla.

Solanki, C.S., and C.S. Sangani. (2008). "Estimation of monthly averaged direct normal solar radiation using elevation angle for any location." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 92:38-44.

- 
- Stanhill, G, and S Cohen. (2008). "Solar radiation changes in Japan during the 20th century: Evidence from sunshine duration measurements." *Journal of the Meteorological Society of Japan* 86:57-67.
- Tiba, C., and N. Fraidenraich. (2004). "Analysis of monthly time series of solar radiation and sunshine hours in tropical climates." *Renewable Energy* 29:1147-1160.
- Tymvios, F, C Jacovides, S Michaelides, and C Scouteli. (2005). "Comparative study of Angström's and artificial neural networks' methodologies in estimating global solar radiation." *Solar Energy* 78:752-762.
- Vázquez Vázquez, Manuel. (2005). "Atlas de radiación solar de Galicia." Editado por Manuel Vázquez Vázquez y Universidad de Vigo.
- Vernich, Lucio, and Ferruccio Zuanni. (1997). "About the minimum number of years required to stabilize the solar irradiation statistical estimates." *Solar Energy* 57:445-447.
- Younes, S, R Claywell, and T Muneer. (2005). "Quality control of solar radiation data: Present status and proposed new approaches." *Energy* 30:1533-1549.
- Yurekli, K, H Simsek, B Cemek, and S Karaman. (2007). "Simulating climatic variables by using stochastic approach." *Building and Environment* 42:3493-3499.
- Zeroual, A., and M. Ankrim. (1995). "Stochastic modelling of daily global solar radiation measured in Marrakesh, Morocco." *Renewable Energy* 6:787-793.



**ANEXO A**

**DEFINICIONES Y NOTACIÓN DE MODELOS  
ARIMA.**



### **A.1.-Proceso estocástico.**

Se define un *proceso estocástico*  $\{x_t\}$  como un conjunto de variables aleatorias  $x_{t,r}$ , donde el índice  $t$  toma valores ordenados que corresponden a instantes temporales (días, meses, años etc.).

### **A.2. Serie temporal**

Una serie temporal es la secuencia de valores de una variable observados a lo largo del tiempo en intervalos regulares, ordenados cronológicamente, se puede decir que una serie temporal es, una muestra, una realización concreta con unos valores concretos de un proceso estocástico teórico, real. La serie de  $T$  datos  $(x_1, x_2, \dots, x_{t..}, x_T)$  es una muestra de tamaño uno del vector de  $T$  variables aleatorias ordenadas en el tiempo correspondientes a los instantes  $t=1, \dots, T$ , y la serie observada se considera una realización o trayectoria del proceso estocástico (Peña, 2010).

Las leyes probabilísticas que definen cualquier proceso estocástico se describen mediante las funciones de distribución de probabilidad conjunta de todos y cada uno de los vectores de variables aleatorias que se puedan formar con las variables que constituyen el proceso.

El análisis de series temporales trata, a partir de los datos de la serie, de inferir las características de la estructura probabilística del proceso estocástico. Una vez conocidas las características de este proceso (media y varianza de sus variables y las relaciones entre variables separadas en el tiempo) si observamos además que estas características se mantienen en el tiempo, podremos utilizar la metodología ARIMA para proyectar su valor futuro inmediato.

### **A.3. Estacionariedad de un proceso**

La utilización de modelos ARIMA como estrategia de predicción de series temporales sólo tiene sentido si las características observadas en la serie permanecen en el tiempo.

### A.3.1. Proceso estocástico estacionario en sentido fuerte.

Cada una de las variables  $x_t$  que configuran un proceso estocástico tendrá su propia función de distribución con sus correspondientes momentos. Así mismo, cada conjunto de variables tendrán su correspondiente función de distribución conjunta y sus funciones de distribución marginales. Habitualmente, conocer esas funciones de distribución resulta complejo de forma que, para caracterizar un proceso estocástico, basta con especificar la media y la varianza para cada  $x_t$  y la covarianza para variables referidas a distintos valores de  $t$ :

$$E[x_t] = \mu_t$$

$$\sigma_t^2 = Var(x_t) = E[x_t - \mu_t]^2 \quad (A.1)$$

$$\gamma_{t,k} = Cov(x_t, x_k) = E[(x_t - \mu_t)(x_k - \mu_k)]$$

Decimos que un proceso estocástico es estacionario en sentido estricto o fuerte si las funciones de distribución conjuntas (no sólo la esperanza, las varianzas o las covarianzas, sino las funciones de distribución "completas") son constantes, o dicho con más propiedad, son "invariantes con respecto a un desplazamiento en el tiempo".

Es decir, considerando que  $t, t+1, t+2, \dots, t+k$  reflejan períodos sucesivos:

$$F(x_t, x_{t+1}, \dots, x_{t+k}) = F(x_{t+m}, x_{t+1+m}, \dots, x_{t+k+m}) \quad (A.2)$$

### A.3.2. Proceso estocástico estacionario en sentido amplio ó débil

La estacionariedad estricta es una condición muy fuerte, ya que para contrastarla es necesario disponer de las distribuciones conjuntas para cualquier selección de variables del proceso. En la práctica la condición que se suele exigir, es la *estacionariedad en sentido amplio*, que implica que la media y la varianza son constantes en el tiempo, y las autocovarianzas y autocorrelaciones solo dependen del retardo entre las observaciones.

En resumen, en un proceso estacionario en sentido amplio:

- ✓ Las esperanzas matemáticas de las variables aleatorias no dependen del tiempo, son constantes:

$$E[x_t] = E[x_{t+m}] = \mu \quad \forall m \quad (\text{A.3})$$

- ✓ Las varianzas tampoco dependen del tiempo (y son finitas):

$$\begin{aligned} \text{Var}[x_t] &= \text{Var}[x_{t+m}] = \sigma \quad \forall m \\ \text{Var}[x_t] &= \text{Var}[x_{t+m}] \neq \infty \quad \forall m \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

- ✓ Las covarianzas entre dos variables aleatorias del proceso correspondientes a períodos distintos de tiempo sólo dependen del lapso de tiempo transcurrido entre ellas:

$$\text{Cov}(x_t, x_s) = \text{Cov}(x_{t+m}, x_{s+m}) \quad \forall m \quad (\text{A.5})$$

De esta última condición se desprende que, si un fenómeno es estacionario, sus variables pueden estar relacionadas linealmente entre sí, pero de forma que la relación entre dos variables sólo depende de la distancia temporal  $k$  transcurrida entre ellas.

#### **A.4. Proceso estocástico de ruido blanco**

El *ruido blanco* se caracteriza por tener media siempre constante e igual a cero, varianza constante y cuyas variables están incorreladas para todos los retardos.

Este tipo de proceso, que sólo presenta varianza, que no presenta relación entre variables de distintos períodos, no podrá ser reproducido con un modelo ARIMA, es un proceso "vacío" de información.

#### **A.5. Modelos ARIMA**

Los modelos ARIMA tratarán de expresar la evolución de una variable  $x_t$  de un proceso estocástico en función del pasado de esa variable o de impactos aleatorios que esa variable sufrió en el pasado. Para ello, se utilizan dos tipos de formas funcionales lineales sencillas: los modelos AR (Modelos Autorregresivos), y los modelos MA (de Medias Móviles).

Los modelos autorregresivos generalizan la idea de regresión para representar la dependencia lineal entre observaciones contiguas de una serie temporal  $x_t$ , así en un proceso AR de orden 1, AR(1), la observación del instante t ( $x_t$ ) se puede obtener a partir de la del instante anterior ( $x_{t-1}$ ), de la forma:

$$x_t = \phi x_{t-1} + a_t \quad (\text{A.6})$$

Donde  $\phi$  es una constante a determinar y  $a_t$  es un proceso aleatorio de ruido blanco (media cero y varianza constante  $\sigma_a^2$ ), que representa la componente aleatoria de innovación o término de error, diferencia entre el valor de la predicción y el valor de la observación real. A  $\phi$  se le impone la condición  $|\phi| < 1$  para que el proceso sea estacionario.

Para un proceso AR de orden superior p, la observación en el instante t depende de las p observaciones anteriores:

$$x_t = \phi_1 x_{t-1} + \phi_2 x_{t-2} + \dots + \phi_p x_{t-p} + a_t \quad (\text{A.7})$$

Siendo  $\phi_i$  son los coeficientes del modelo.

El proceso AR(p) suele escribirse utilizando la notación del operador retardo B, definido como:

$$B^d x_t = x_{t-d} \quad (\text{A.8})$$

Se llama  $\phi_p(B)$  al polinomio de retardos que actúa sobre las observaciones definido como:

$$\phi_p(B) = 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p \quad (\text{A.9})$$

Las características del polinomio de retardos o, más concretamente, el valor de sus raíces (las soluciones del polinomio) permiten analizar la estacionariedad del proceso estocástico que subyace al modelo ARIMA.

Si lo aplicamos a la serie de observaciones resulta:

$$\phi_p(B)x_t = x_t - \phi_1 x_{t-1} - \phi_2 x_{t-2} - \dots - \phi_p x_{t-p} \quad (\text{A.10})$$

Y la expresión (II.41) se puede reescribir como:

$$\phi_p(B)x_t = a_t \quad (\text{A.11})$$

Un modelo de media móvil (Moving Average) es aquel que explica el valor de una determinada variable en un período  $t$  en función de un término independiente y una sucesión de términos de error, de innovaciones correspondientes a períodos precedentes, convenientemente ponderados. En un proceso MA de orden 1, MA(1), el valor actual puede predecirse a partir de la componente aleatoria de ese instante y, en menor medida del valor del término de error del instante anterior, su expresión es:

$$x_t = a_t - \theta a_{t-1} \quad (\text{A.12})$$

Generalizando, un proceso MA de orden  $q$ , será aquel en el que el valor actual depende de las  $q$  últimas innovaciones:

$$x_t = a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \dots - \theta_q a_{t-q} \quad (\text{A.13})$$

Un proceso MA ( $q$ ) siempre es estacionario, por ser la suma de procesos estacionarios, para cualquier valor de sus coeficientes  $\theta_i$ .

Si llamamos  $\theta_q(B)$  al polinomio de retardos que actúa sobre los residuos, definido como:

$$\theta_q(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q \quad (\text{A.14})$$

De modo que:

$$\theta_q(B)a_t = a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \dots - \theta_q a_{t-q} \quad (\text{A.15})$$

Así el proceso MA( $q$ ) se reescribe como:

$$x_t = \theta_q(B)a_t \quad (\text{A.16})$$

Tanto los procesos autorregresivos como los de media móvil puros son casos particulares de procesos ARMA, que resultan de añadir estructura MA a un proceso AR o viceversa, el proceso más simple ARMA(1,1) se escribe:

$$x_t = \phi_1 x_{t-1} + a_t - \theta_1 a_{t-1} \quad (\text{A.17})$$

Y, en general un ARMA(p,q) es:

$$x_t = \phi_1 x_{t-1} + \phi_2 x_{t-2} + \dots + \phi_p x_{t-p} + a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \dots - \theta_q a_{t-q} \quad (\text{A.18})$$

O también:

$$\phi_p(B)x_t = \theta_q(B)a_t \quad (\text{A.19})$$

En todos los casos anteriores estamos suponiendo que el proceso  $x_t$  es estacionario, sin embargo la mayoría de las series reales no son estacionarias, bien porque su nivel medio varía con el tiempo o porque lo hace la variabilidad, en ese caso, es preciso transformar la serie para convertirla en un proceso estacionario.

La estacionariedad en media se analiza normalmente por observación gráfica de la serie para intentar detectar tendencias deterministas, que en su caso habría que filtrar antes de continuar el proceso. Para estabilizar la media se transforma la serie tomando diferencias del tipo:

$$\nabla^d x_t = (1-B)^d x_t = x_t - x_{t-d} \quad (\text{A.20})$$

Donde el término  $(1-B)^d$  es el operador diferencia. En algunos casos, es necesario diferenciar más de una vez una serie para transformarla en estacionaria, generalizando se dice que un proceso es Integrado de orden  $d$ ,  $I(d)$ , cuando al diferenciarlo  $d$  veces se obtiene un proceso estacionario, habitualmente  $d$  es menor o igual a 3.

La formulación general de un modelo ARIMA de órdenes  $p$ ,  $d$ ,  $q$ , que se denota ARIMA(p,d,q), es la siguiente:

$$\phi_p(B)(1-B)^d x_t = \theta_q(B)a_t \quad (\text{A.21})$$

Donde  $x_t$ , en este caso, puede ser el valor de una serie de irradiación solar en una hora, en un día o el valor medio diario mensual y  $a_t$  es el término de error o residuo, que sigue una distribución normal de media cero y varianza constante  $\sigma_a^2$ .

Cuando existe dependencia estacional se puede generalizar el modelo ARIMA para series estacionarias incorporando además de la dependencia *regular*, que es la asociada a los intervalos de medida de la serie, la dependencia *estacional*, que es la asociada a observaciones separadas por  $s$  periodos, se obtiene de este modo el modelo ARIMA *estacional multiplicativo* (Peña, 2010, p. 201-220) que tiene la forma:

$$\Phi_p(B^s)\phi_p(B)(1-B^s)^D(1-B)^d x_t = \theta_q(B)\Theta_Q(B^s)a_t \quad (\text{A.22})$$

Donde  $\Phi_p(B^s)$  es el operador AR estacional de orden  $P$ , y se define como:

$$\Phi_p(B^s) = 1 - \Phi_1 B^s - \Phi_2 B^{s^2} - \dots - \Phi_p B^{s^p} \quad (\text{A.23})$$

$\Theta_Q(B^s)$  es el operador de media móvil estacional de orden  $Q$ , definido como:

$$\Theta_Q(B^s) = 1 - \Theta_1 B^s - \Theta_2 B^{s^2} - \dots - \Theta_Q B^{s^q} \quad (\text{A.24})$$

Y el término  $(1-B^s)^D$  representa las diferencias estacionales que convierten la serie estacional en estacionaria, lo habitual es que  $D$  sea menor o igual que 2.

Este modelo ARIMA estacional multiplicativo se denota como ARIMA( $p,d,q$ ) x ARIMA( $P,D,Q$ )<sub>s</sub> y será el utilizado para las series de este estudio.

## A.6. Función de autocorrelación simple y función de autocorrelación parcial

Se llama función de autocorrelación simple (ACF) a la representación de los coeficientes de autocorrelación ( $\rho_k$ ) en función del retardo. El coeficiente  $\rho_k$  se define como:

$$\rho_k = \frac{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^{T-k} (x_t - \bar{x}_t)(x_{t+k} - \bar{x}_t)}{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (x_t - \bar{x}_t)^2} \quad (\text{A.25})$$

Donde  $\bar{x}_t$  es la media de la serie  $x_t$ .

Se define el coeficiente de autocorrelación parcial de orden  $k$ ,  $\rho_k^p$ , como el coeficiente de correlación entre observaciones separadas  $k$  periodos, cuando eliminamos de la relación entre las dos variables la dependencia lineal debida a los valores intermedios.

Este coeficiente podría calcularse como sigue:

Se elimina de  $x_t$  el efecto de  $x_{t-1}, \dots, x_{t-k+1}$  mediante la regresión:

$$x_t = \beta_1 x_{t-1} + \dots + \beta_{k-1} x_{t-k+1} + u_t \quad (\text{A.26})$$

Donde la variable  $u_t$  recoge la parte de  $x_t$  no común con  $x_{t-1}, \dots, x_{t-k+1}$

Se elimina de  $x_{t-k}$  el efecto de  $x_{t-1}, \dots, x_{t-k+1}$  mediante la regresión:

$$x_{t-k} = \gamma_1 x_{t-1} + \dots + \gamma_{k-1} x_{t-k+1} + v_t \quad (\text{A.27})$$

Donde, de nuevo, la variable  $v_t$  contiene la parte de  $x_{t-k}$  no común con las observaciones intermedias.

El coeficiente de autocorrelación parcial de orden  $k$  es el coeficiente de correlación entre  $u_t$  y  $v_t$ , y se define como:

$$\rho_k^p = \frac{\frac{1}{T-k} \sum_{t=k+1}^T (u_t - \bar{u}_t)(v_t - \bar{v}_t)}{\sqrt{\frac{1}{T-k} \sum_{t=k+1}^T (u_t - \bar{u}_t)^2} \sqrt{\frac{1}{T-k} \sum_{t=k+1}^T (v_t - \bar{v}_t)^2}} \quad (\text{A.28})$$

Donde  $\bar{u}_t$  y  $\bar{v}_t$  son las medias de las series  $u_t$  y  $v_t$ , respectivamente, y  $T$  es el número de muestras de las series  $x_t$ ,  $u_t$  y  $v_t$ .

La observación de estas funciones es imprescindible para estimar los órdenes del modelo ARIMA, algunas de las pautas a seguir son las expuestas en la Tabla A.1 (Peña 2010), (Pérez 2006).

Tabla A.1. Resumen de indicaciones para identificar el modelo ARIMA

Modelo ARIMA	Coefficientes de la ACF	Coefficientes de la ACFP
MA(q)	Sólo los q primeros coeficientes son significativos. El resto se anulan bruscamente.	Decrecimiento rápido exponencial atenuado u ondas sinusoidales. Muchos coeficientes no nulos
AR(p)	Decrecimiento rápido exponencial atenuado u ondas sinusoidales. Muchos coeficientes no nulos.	Sólo los p primeros coeficientes son significativos. El resto se anulan bruscamente.
ARMA(p,q)	Muchos coeficientes no nulos.	Muchos coeficientes no nulos.
ARIMA(p,d,q)	Comportamiento irregular en los retardos: 1..q, con q picos. Decrecimiento para los retardos posteriores a q. Retardos bajos se observa estructura AR.	Decrece (aproximadamente con exponenciales atenuados u ondas sinusoidales). No se anula rápidamente.
ARIMA(p,0,0)x(P,0,0) <sub>s</sub>	Patrón estacional en s. A ambos lados de los retardos estacionales se observa el decrecimiento impuesto por la estructura regular AR. En retardos bajos se observa la parte regular. A ambos lados de los retardos estacionales no nulos habrá q coeficientes distintos de cero.	Pierden significación en el retardo p+1
ARIMA(0,0,q)x(0,0,Q) <sub>s</sub>	Patrón estacional para la zona de retardo s. Amortiguamiento lento.	Patrón estacional en s-1. Amortiguamiento lento.

### A.7. Valores atípicos en series temporales

Se considera un valor como atípico si tiene pocas probabilidades de ocurrir dada la estructura habitual de evolución de la serie. En ese caso, la serie puede considerarse como la suma de dos series distintas: la primera es la generada por las circunstancias habituales, y la segunda formada por datos que corresponden a situaciones peculiares específicas.

Los valores atípicos pueden ser: aditivos, innovativos, cambios de nivel y cambios transitorios.

Un *atípico aditivo* (AO) es un suceso que afecta a una serie en un solo instante temporal  $t=t_0$ , y se puede expresar como (Pérez 2006):

$$y_t = x_t + \omega I_t^{t_0} \quad \text{donde } I_t^{t_0} = \begin{cases} 0 & \text{si } t \neq t_0 \\ 1 & \text{si } t = t_0 \end{cases} \quad (\text{A.29})$$

Donde  $I_t^{t_0}$  es la variable que representa la presencia del outlier en  $t=t_0$  y  $\omega$  es el efecto del citado outlier. Los errores de medida o transcripción de datos se encuentran entre los más habituales de esta categoría.

Un *atípico innovativo* (IO) es un suceso cuyo efecto se propaga en conformidad con el modelo ARIMA del proceso, afectando a todos los valores observados después de la ocurrencia y se puede expresar como sigue (Pérez 2006):

$$y_t = x_t + \frac{\theta_q(B)}{\phi_p(B)} \omega I_t^{t_0} \quad \text{donde } I_t^{t_0} = \begin{cases} 0 & \text{si } t \neq t_0 \\ 1 & \text{si } t = t_0 \end{cases} \quad (\text{A.30})$$

Un *atípico de cambio de nivel* (LS) es un suceso que afecta a la serie en un período dado y cuyo efecto es permanente. Se puede representar como sigue (Pérez 2006):

$$y_t = x_t + \frac{1}{1-B} \omega I_t^{t_0} \quad \text{donde } I_t^{t_0} = \begin{cases} 0 & \text{si } t \neq t_0 \\ 1 & \text{si } t = t_0 \end{cases} \quad (\text{A.31})$$

Un *atípico de cambio transitorio* (TC) es un suceso que tiene un impacto inicial y cuyo efecto decae exponencialmente en conformidad con un factor de amortiguación  $\delta$  ( $0 < \delta < 1$ ). Se puede representar como sigue (Pérez 2006):

$$y_t = x_t + \frac{1}{1 - \delta B} \omega I_t^{t_0} \quad \text{donde } I_t^{t_0} = \begin{cases} 0 & \text{si } t \neq t_0 \\ 1 & \text{si } t = t_0 \end{cases} \quad (\text{A.32})$$



## **ANEXO B**

### **DATOS AUSENTES. IMPUTACIÓN.**



### Resumen de meses con datos horarios completos

En las tablas B.1, B.2 y B.3 se recoge un resumen de los datos de irradiación global, difusa y directa disponibles por meses, se indican con C los meses completos (no falta ningún valor horario), con C\* aquellos en los que faltan valores horarios de 1 ó 2 días, y en blanco aquellos en los que faltan valores de más de 2 días. Además se han pintado de verde los años con datos completos.

Tabla B.1. Meses con todos los datos horarios de irradiación global

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1985	C	C	C*	C	C	C	C		C*	C*	C	C
1986	C*	C	C	C*	C	C	C	C	C		C	C
1987	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
1988	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
1989	C	C	C		C	C	C	C	C	C	C	C
1990		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
1991	C	C		C	C	C	C		C*	C*	C	
1992	C	C	C	C*	C	C	C	C			C*	C
1993	C	C	C	C	C	C	C	C*	C	C	C	C
1994	C	C	C*	C	C	C			C	C	C	
1995	C*	C*				C		C			C	C
1996	C*	C*	C*	C*			C	C	C	C	C	C
1997	C	C	C	C	C	C	C	C	C*	C	C	C
1998	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
1999	C	C	C	C		C	C	C	C	C	C	C
2000	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
2001	C	C	C		C	C	C	C*	C	C	C	C
2002	C		C*	C	C*		C*	C	C	C	C	C
2003	C	C	C	C	C	C*	C	C	C	C		
2004		C	C	C	C	C		C	C	C	C	
2005	C		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
2006	C	C	C	C	C*	C	C*	C	C	C	C	C
2007	C	C	C	C	C	C	C	C			C	C
2008	C	C	C*	C	C	C*	C	C	C	C	C*	C
2009	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C

Tabla B.2. Meses con todos los datos horarios de irradiación difusa

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1999							C		C*	C		
2000	C					C*	C	C	C	C	C	C
2001	C	C*	C	C*		C		C*	C	C	C	C
2002	C		C*	C	C*	C		C	C	C	C	C*
2003	C	C	C	C	C	C*	C	C	C	C		
2004		C	C	C	C	C*		C	C	C	C	
2005			C		C	C		C	C	C	C	C
2006			C	C	C*		C*	C			C*	C*
2007	C	C		C	C	C*	C	C			C	C
2008	C	C	C*		C	C*	C*	C		C	C*	C
2009	C	C		C	C	C	C	C	C	C	C	C

Tabla B.3. Meses con todos los datos horarios de irradiación directa

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1996				C*						C	C	
1997	C									C		C
1998	C								C*		C	C
1999								C				
2000												
2001												C
2002				C								
2003							C	C				
2004		C	C	C		C		C				
2005			C		C*	C	C	C	C	C	C	C
2006			C	C	C*		C*	C		C*	C*	C*
2007	C	C		C	C	C*	C	C			C	C
2008	C	C	C*		C	C*	C*	C	C*	C	C*	C
2009	C	C		C	C	C	C	C	C	C	C	C

### Valores atípicos horarios detectados

En las tablas B.4, B.5 y B.6 figuran los valores atípicos horarios de irradiación global, difusa, directa,  $k_t$  y  $F_d$  detectados con los controles de calidad aplicados.

Tabla B.4. Valores atípicos horarios detectados en irradiación global, difusa y directa

Control	Nº outliers	Fecha	Hora	Valor límite	Valor outlier
$0 \leq G_h \leq 1.2G_{oh}$	1	2-08-1985	16-17	272,6	998 (eliminado)
	2	19-03-1986	16-17	159,2	309 (eliminado)
	3	8-05-1987	5-6	62,96	69 (eliminado)
	4	21-01-1989	11-12	268	788 (eliminado)
	5	19-06-1989	5-6	106,4	132 (eliminado)
	6	13-07-1990	17-18	196,7	569 (eliminado)
	7	26-01-1992	8-9	118,6	127 (eliminado)
	8	20-06-1993	12-13	532,8	622 (eliminado)
	9	3-05-1995	18-19	53,2	81 (eliminado)
	10	1-08-1995	5-6	71,5	84 (eliminado)
$0 \leq D_h \leq 1.1G_h$	1	2-01-2006	7-17	Descartado todo el día	
	2	5-01-2006	10-17	Descartado todo el día	
$0 \leq D_h \leq 0.8G_{oh}$	No se encontraron outliers				

Tabla B.4. Continuación. Valores atípicos horarios detectados en irradiación global, difusa y directa

Control	Nº outliers	Fecha	Hora	Valor límite	Valor outlier
$0 \leq B_h \leq G_{oh}$	1	24/09/1997	19-20h	0	5 (sustit. por 0)
	2	04/11/1997	5-6h	0	1 (sustit. por 0)
	3	07/11/1997	17-18h	0	10 (sustit. por 0)
	4	08/11/1997	5-7 h	0	1 (sustit. por 0)
	5	09/11/1997	4-7h	0	1 (sustit. por 0)
	6	11/11/1997	5-7h	0	1 (sustit. por 0)
	7	22/11/1997	4-5h	0	1 (sustit. por 0)
	8	23/11/1997	17-18h	0	2 (sustit. por 0)
	9	29/11/1997	4-6h	0	1(sustit. por 0)
	10	25/09/1998	19-20h	0	1 (sustit. por 0)
	11	30/09/1998	5-6h	0	1 (sustit. por 0)
	12	01/10/1998	5-6h	0	1 (sustit. por 0)
	13	02/10/1998	4-5h	0	1 (sustit. por 0)
	14	13/11/1998	6-7h	0	1 (sustit. por 0)
	15	08/02/1999	4-5h	0	1 (sustit. por 0)
	16	09/02/1999	4-5h	0	1 (sustit. por 0)
	17	22/04/1999	4-5 y 19-20h	0	1 (sustit. por 0)
	18	30/09/1999	4-5h	0	1 (sustit. por 0)
	19	14/12/2000	6-7h	0	1 (sustit. por 0)
	20	18/12/2000	6-7h	0	1 (sustit. por 0)
	21	01/06/2001	13-15 h	Descartado todo el día	
	22	18/10/2001	18-19h	0	1 (sustit. por 0)
	23	08/11/2001	17-18h	0	3 (sustit. por 0)
	24	09/11/2001	6-7h	0	1 (sustit. por 0)
	25	16/06/2002	10-14 h	Descartado todo el día	
	26	24/06/2002	19-20 h	291	332 (eliminado)
	27	21/01/2003	4-5 y 6-7h	0	1 (sustit. por 0)
	28	28/01/2003	18-19h	0	1 (sustit. por 0)
	29	29/01/2003	4-5 y 6-7h	0	1 (sustit. por 0)
	30	18/02/2003	5-6 y 19-20h	0	2 (sustit. por 0)
	31	02/03/2003	4-5h	0	1 (sustit. por 0)
	32	03/03/2003	4-5h	0	1 (sustit. por 0)

Tabla B.4. Continuación. Valores atípicos horarios detectados en irradiación global, difusa y directa

Control	Nº outliers	Fecha	Hora	Valor límite	Valor outlier
$0 \leq B_h \leq G_{oh}$	33	10/03/2003	18-19h	0	1 (sustit. por 0)
	34	23/03/2003	19-20h	0	1 (sustit. por 0)
	35	29/08/2003	4-5h	0	1 (sustit. por 0)
	36	27/02/2004	4-5h	0	1 (sustit. por 0)
	37	20/04/2004	4-5h	0	1 (sustit. por 0)
	38	21/04/2004	4-5h	0	1 (sustit. por 0)
	39	22/04/2004	4-5h	0	1 (sustit. por 0)
	40	19/08/2004	4-5h	0	1 (sustit. por 0)
	41	09/12/2004	18-19h	0	1 (sustit. por 0)

Tabla B.5. Valores atípicos horarios detectados en  $k_t$  y  $F_d$ 

Control	Nº outliers	Fecha	Hora	Global (10kJm <sup>-2</sup> )	Extraterrestre (10kJm <sup>-2</sup> )
$0 \leq k_{th} \leq 1$	1	6-04-1985	10-11	372 (eliminado)	363,4
	2	30-05-1985	17-18	176 (eliminado)	163,3
	3	1-09-1985	6-7	94,62 (eliminado)	98
	4	2-09-1985	6-7	92,63 (eliminado)	93
	5	18-07-1986	9-10	379 (eliminado)	373,4
	6	14-06-1987	15-16	323 (eliminado)	322,4
	7	15-09-1988	6-7	69 (eliminado)	64,8
	8	19-06-1989	6-7	196 (eliminado)	171,3
	9	20-06-1989	5-6	93 (eliminado)	88,74
	10	4-02-1990	15-16	118 (eliminado)	115,8
	11	27-07-1990	16-17	266 (eliminado)	233,5
	12	27-07-1991	18-19	69 (eliminado)	66,2
	13	10-08-1991	5-6	48 (eliminado)	45,9
	14	11-03-1992	14-15	306 (eliminado)	264,1
	15	28-07-1992	16-17	242 (eliminado)	232,1
	16	22-06-1994	17-18	182 (eliminado)	171,4

Tabla B.5. Continuación. Valores atípicos horarios detectados en  $k_t$  y  $F_d$ 

Control	Nº outliers	Fecha	Hora	Global (10kJm <sup>-2</sup> )	Extraterrestre (10kJm <sup>-2</sup> )
$0 \leq k_{th} \leq 1$	17	9-07-1994	9-10	390 (eliminado)	377,6
	18	25-10-1994	12-13	288 (eliminado)	280
	19	25-04-1995	8-9	287 (eliminado)	283,7
	20	19-08-1995	16-17	227 (eliminado)	204
	21	14-02-2002	10-11	271 (eliminado)	249,4
$0 \leq F_{d_h} \leq 1$	No se encontraron outliers				

Tabla B.6. Valores atípicos horarios detectados en  $k_t$  y  $F_d$  con control de cuartiles

Control	Nº outliers	Fecha	Hora	Valor límite	Valor outlier
$k_{th} \geq \text{Límite sup} = C3 + 1.5 \times (C3 - C1)$	1	20-07-1985	18-19	0,88972	0,99827
	2	28-07-1990	18-19	0,88972	0,90812
$k_{th} \leq \text{Límite inf} = C1 - 1.5 \times (C3 - C1)$	No se encontraron outliers				
$F_{d_h} \geq \text{Límite sup} = C3 + 1.5 \times (C3 - C1)$	No se encontraron outliers				
$F_{d_h} \leq \text{Límite inf} = C1 - 1.5 \times (C3 - C1)$	No se encontraron outliers				

### Valores atípicos diarios de irradiación directa y difusa

En la tabla B.7 se recogen las fechas, a partir de 2005, en las que se descartaron los valores diarios de irradiación directa, se muestran los pares de valores que corresponden a la diferencia Global-Difusa y la irradiación directa calculada a partir de las medidas del pirheliómetro.

Tabla B.7. Días en los que se descartaron los valores diarios de irradiación directa

Fecha	Diferencia Global-Difusa (10kJm <sup>-2</sup> )	Directa calculada de medidas pirheliómetro (10kJm <sup>-2</sup> )
1-03-2005	1224	235,85
2-03-2005	435	95,648
3-03-2005	638	125,366
4-03-2005	956	174,42
5-03-2005	282	54,42
6-03-2005	723	138,967
7-03-2005	1501	288,627
8-03-2005	1549	299,43
9-03-2005	1084	201,897
10-03-2005	988	207,057
11-03-2005	1562	308,18
13-03-2005	581	136,66
14-03-2005	904	174,95
15-03-2005	1518	298,4
16-03-2005	119	28,69
17-03-2005	1255	254,906
1-01-2006	242	0
4-01-2006	220	0,52
10-12-2006	514	0

En la tabla B.8 se recogen los datos diarios de irradiación difusa detectados como atípicos en la representación de diagrama de caja para datos diarios agrupados por meses.

Tabla B.8. Valores atípicos diarios de irradiación difusa descartados

Nº outliers	Fecha	Valor del outlier Difusa (10kJm <sup>-2</sup> )
1	15/07/1999	1690
2	04/10/1999	1089
3	05/10/1999	1023
4	06/10/1999	992
5	07/10/1999	1519
6	26/10/1999	1214
7	02/11/1999	867
8	17/03/2000	1187
9	23/03/2000	1191
10	29/01/2001	651
11	08/02/2001	926
12	03/10/2002	873
13	29/02/2004	879
14	01/10/2004	874
15	29/12/2004	637
16	10/12/2006	514
17	01/10/2008	969

### Valores diarios imputados en la serie de irradiación global

La tabla B.9 recoge los valores diarios de irradiación global resultantes del proceso de imputación de datos (horarios y diarios) previo al análisis ARIMA. Aunque en la tabla se refleja, para resumir, la suma diaria, hay que hacer notar que en muchos casos el valor imputado es uno o varios registros horarios de ese día.

Tabla B.9.a. Valores diarios de irradiación global resultantes del proceso de imputación previo a ARIMA

Año	Mes	Día	Valor diario (10kJm <sup>-2</sup> )	Año	Mes	Día	Valor diario (10kJm <sup>-2</sup> )
1985	3	21	629,7	1986	10	17	476,9
1985	4	6	1384,9	1986	10	18	1237,1
1985	5	30	1153,0	1986	10	19	1118,5
1985	7	3	916,1	1986	10	20	731,0
1985	7	19	977,7	1986	10	29	673,0
1985	8	2	2069,8	1986	10	30	676,1
1985	8	18	1503,8	1987	5	8	2707,1
1985	8	19	1572,7	1987	6	14	2715,5
1985	8	20	2549,8	1988	9	15	1599,8
1985	8	21	2065,9	1989	1	21	644,7
1985	8	22	827,5	1989	4	20	2488,4
1985	8	23	2376,7	1989	4	23	1810,5
1985	8	24	1910,6	1989	6	19	2945,6
1985	8	25	1829,5	1990	1	12	900,8
1985	8	26	2468,6	1990	1	13	808,5
1985	8	27	2474,1	1990	2	4	1103,9
1985	8	28	2347,8	1990	7	13	930,9
1985	8	29	1784,5	1990	7	27	2311,8
1985	9	30	561,0	1991	3	21	1459,4
1985	10	1	1769,2	1991	3	22	1071,5
1986	1	28	327,2	1991	8	11	2570,0
1986	7	18	2782,1	1991	8	12	2491,4
1986	10	13	810,5	1991	8	13	1958,2
1986	10	14	851,9	1991	8	20	1896,1

Tabla B.9.b. Valores diarios de irradiación global resultantes del proceso de imputación previo a ARIMA.

Año	Mes	Día	Valor diario (10kJm <sup>-2</sup> )	Año	Mes	Día	Valor diario (10kJm <sup>-2</sup> )
1986	10	15	1027,3	1994	7	28	1447,3
1986	10	16	543,3	1994	8	17	2325,9
1991	8	21	1553,9	1994	8	18	1840,1
1991	8	22	2090,0	1994	10	25	1183,2
1991	8	27	1375,7	1994	12	15	723,8
1991	9	1	1111,4	1994	12	16	821,5
1991	10	17	517,4	1994	12	17	253,7
1991	12	4	750,2	1994	12	18	408,7
1991	12	5	665,2	1994	12	19	507,0
1991	12	9	261,7	1994	12	20	323,1
1992	1	26	583,9	1994	12	21	315,8
1992	3	11	1406,5	1994	12	22	287,5
1992	4	4	688,7	1994	12	23	844,9
1992	7	28	2494,5	1995	1	26	435,4
1992	9	7	1913,7	1995	2	20	1299,6
1992	9	8	1128,6	1995	3	12	552,0
1992	9	16	1145,9	1995	3	13	1302,0
1992	9	23	1003,4	1995	3	21	1868,1
1992	9	28	1332,8	1995	3	22	1855,9
1992	10	2	548,1	1995	3	23	1830,9
1992	10	3	681,0	1995	3	24	773,5
1992	11	26	289,2	1995	3	25	1855,3
1993	6	20	1562,2	1995	3	26	1905,4
1993	8	23	791,3	1995	3	27	665,3
1994	3	13	676,0	1995	3	28	850,9
1994	6	22	2751,8	1995	3	29	935,0
1994	7	9	2891,0	1995	3	30	1978,9
1994	7	14	1799,5	1995	3	31	2120,9
1994	7	16	1396,3	1995	4	2	2000,5
1994	7	27	867,3	1995	4	3	1840,2

Tabla B.9.c. Valores diarios de irradiación global resultantes del proceso de imputación previo a ARIMA.

Año	Mes	Día	Valor diario (10kJm <sup>-2</sup> )	Año	Mes	Día	Valor diario (10kJm <sup>-2</sup> )
1995	4	25	2519,2	1999	5	28	2423,7
1995	5	18	1285,6	1999	5	29	2841,4
1995	5	19	1436,0	1999	5	30	2651,5
1995	5	20	879,4	1999	5	31	2298,1
1995	5	30	902,1	2001	4	1	1819,1
1995	5	31	904,0	2001	4	2	1593,3
1995	7	3	1613,3	2001	8	1	2403,2
1995	7	16	1941,6	2002	2	1	655,9
1995	8	6	834,2	2002	2	2	706,6
1995	8	19	1454,7	2002	2	3	863,9
1995	9	17	1418,3	2002	2	4	552,3
1995	9	25	1802,3	2002	2	5	585,4
1995	10	5	1434,7	2002	2	14	1081,7
1995	10	24	676,3	2002	3	1	900,9
1996	1	18	690,5	2002	5	1	1403,8
1996	2	21	1167,2	2002	6	1	1380,5
1996	3	31	862,6	2002	6	30	2477,9
1996	4	29	809,6	2002	7	15	2784,9
1996	5	24	1511,7	2003	6	22	1101,0
1996	5	25	893,1	2003	11	7	982,5
1996	5	26	1664,9	2003	11	8	752,3
1996	5	27	941,8	2003	11	9	736,0
1996	5	28	2247,6	2003	11	10	676,5
1996	5	29	2828,3	2003	11	11	376,4
1996	5	30	1852,3	2003	11	12	851,3
1996	5	31	2670,4	2003	11	13	648,0
1996	6	1	2064,3	2003	11	14	692,1
1996	6	2	1101,3	2003	11	15	326,0
1996	6	3	2766,1	2003	11	16	712,1
1997	9	1	2339,7	2003	11	17	1059,5

Tabla B.9.d. Valores diarios de irradiación global resultantes del proceso de imputación previo a ARIMA.

Año	Mes	Día	Valor diario (10kJm <sup>-2</sup> )	Año	Mes	Día	Valor diario (10kJm <sup>-2</sup> )
2003	11	18	1058,6	2003	12	18	323,9
2003	11	19	960,4	2003	12	19	252,8
2003	11	20	525,4	2003	12	20	252,5
2003	11	21	304,7	2003	12	21	252,3
2003	11	22	301,5	2003	12	22	548,5
2003	11	23	298,3	2003	12	23	682,7
2003	11	24	671,1	2003	12	24	817,2
2003	11	25	510,1	2003	12	25	803,8
2003	11	26	312,7	2003	12	26	465,3
2003	11	27	624,6	2003	12	27	253,7
2003	11	28	329,9	2003	12	28	637,3
2003	11	29	304,3	2003	12	29	255,0
2003	11	30	279,1	2003	12	30	255,9
2003	12	1	351,7	2003	12	31	264,0
2003	12	2	461,0	2004	1	1	257,9
2003	12	3	272,3	2004	1	2	532,1
2003	12	4	270,3	2004	1	3	274,8
2003	12	5	819,5	2004	1	4	290,7
2003	12	6	705,4	2004	1	5	822,5
2003	12	7	723,7	2004	1	6	804,6
2003	12	8	720,2	2004	1	7	332,5
2003	12	9	261,7	2004	1	8	268,5
2003	12	10	577,2	2004	1	9	270,4
2003	12	11	287,8	2004	1	10	272,5
2003	12	12	415,3	2004	1	11	640,8
2003	12	13	492,3	2004	1	12	276,9
2003	12	14	255,9	2004	1	13	279,2
2003	12	15	446,8	2004	1	14	547,8
2003	12	16	516,6	2004	1	15	728,0
2003	12	17	253,7	2004	1	16	294,7

Tabla B.9.e. Valores diarios de irradiación global resultantes del proceso de imputación previo a ARIMA.

Año	Mes	Día	Valor diario (10kJm <sup>-2</sup> )	Año	Mes	Día	Valor diario (10kJm <sup>-2</sup> )
2004	1	17	297,5	2005	2	22	973,8
2004	1	18	791,9	2005	2	23	1482,4
2004	1	19	971,1	2005	2	24	1548,4
2004	1	20	1002,6	2005	2	25	1309,1
2004	1	21	963,0	2005	2	26	917,1
2004	1	22	497,8	2005	2	27	1462,1
2004	7	8	2329,9	2005	2	28	1464,4
2004	7	9	937,1	2005	5	1	2064,4
2004	12	14	255,8	2005	5	19	2893,1
2004	12	15	255,0	2006	1	2	259,1
2004	12	16	254,3	2006	1	5	263,3
2004	12	17	253,7	2006	5	28	2808,8
2004	12	18	253,2	2006	7	18	1273,5
2004	12	19	288,1	2006	7	19	1741,3
2004	12	20	485,4	2007	9	28	1705,0
2004	12	21	520,4	2007	9	29	720,8
2004	12	22	682,5	2007	9	30	1550,7
2004	12	23	252,3	2007	10	1	1023,7
2004	12	24	259,6	2007	10	2	1666,9
2004	12	25	429,4	2007	10	3	671,1
2004	12	26	529,0	2007	10	11	1485,7
2004	12	27	537,0	2008	3	13	1096,8
2005	2	11	436,9	2008	6	9	3013,9
2005	2	12	470,8	2008	6	10	2093,0
2005	2	18	1355,0	2008	11	17	1066,6
2005	2	19	854,3	2008	11	18	314,5
2005	2	21	872,0				

### Valores diarios imputados en la serie de irradiación directa

La tabla B.10 recoge los valores diarios de irradiación directa resultantes del proceso de imputación de datos previo al análisis ARIMA.

Tabla B.10. a. Valores diarios de irradiación directa imputados previamente al análisis ARIMA.

Año	Mes	Día	V. imputado (MJm <sup>-2</sup> )	Año	Mes	Día	V. imputado (MJm <sup>-2</sup> )	Año	Mes	Día	V. imputado (MJm <sup>-2</sup> )
2005	1	1	0,00	2005	2	5	0,81	2005	3	13	13,08
2005	1	2	0,40	2005	2	6	16,04	2005	3	14	15,42
2005	1	3	16,04	2005	2	7	20,64	2005	3	15	20,64
2005	1	4	5,09	2005	2	8	18,60	2005	3	16	2,02
2005	1	5	2,02	2005	2	9	18,60	2005	3	17	20,99
2005	1	6	2,73	2005	2	10	17,94	2005	4	1	1,63
2005	1	7	17,30	2005	2	11	0,40	2005	4	2	17,62
2005	1	8	0,00	2005	2	12	0,70	2005	4	3	5,48
2005	1	9	5,09	2005	2	13	0,04	2005	4	4	1,38
2005	1	10	4,91	2005	2	14	1,89	2005	4	5	16,35
2005	1	11	0,04	2005	2	15	3,68	2005	4	6	0,00
2005	1	12	0,00	2005	2	16	7,77	2005	4	7	0,00
2005	1	13	0,12	2005	2	17	11,70	2005	4	8	19,61
2005	1	14	7,33	2005	2	18	19,61	2005	4	9	8,22
2005	1	15	0,04	2005	2	19	5,87	2005	4	10	27,35
2005	1	16	9,90	2005	2	20	6,69	2005	5	19	37,24
2005	1	17	7,77	2005	2	21	5,87	2005	5	27	19,27
2005	1	18	1,50	2005	2	22	7,77	2006	1	1	3,04
2005	1	19	0,50	2005	2	23	21,70	2006	1	4	4,54
2005	1	20	9,40	2005	2	24	23,51	2006	1	6	6,69
2005	1	21	6,69	2005	2	25	15,42	2006	1	7	0,04
2005	1	22	15,73	2005	2	26	5,87	2006	1	8	0,00
2005	1	23	1,50	2005	2	27	19,27	2006	1	9	13,65
2005	1	24	17,94	2005	2	28	18,93	2006	1	10	15,73
2005	1	25	5,28	2005	3	1	21,34	2006	1	11	5,87
2005	1	26	16,66	2005	3	2	10,65	2006	1	12	2,73
2005	1	27	1,76	2005	3	3	13,94	2006	1	13	0,04
2005	1	28	6,69	2005	3	4	16,98	2006	1	14	9,16
2005	1	29	10,40	2005	3	5	3,85	2006	1	15	1,26
2005	1	30	13,36	2005	3	6	13,65	2006	1	16	1,03

Tabla B.10.b. Valores diarios de irradiación directa imputados previamente al análisis ARIMA.

Año	Mes	Día	V. imputado (MJm <sup>-2</sup> )	Año	Mes	Día	V. imputado (MJm <sup>-2</sup> )	Año	Mes	Día	V. imputado (MJm <sup>-2</sup> )
2005	1	31	7,77	2005	3	7	22,05	2006	1	17	0,00
2005	2	1	1,76	2005	3	8	22,78	2006	1	18	2,59
2005	2	2	8,69	2005	3	9	15,42	2006	1	19	18,27
2005	2	3	0,30	2005	3	10	19,27	2006	1	20	13,36
2005	2	4	1,89	2005	3	11	23,14	2006	1	21	12,52
2006	1	22	13,36	2006	10	1	8,45	2007	3	9	1,03
2006	1	23	12,80	2006	10	2	0,00	2007	3	21	7,11
2006	1	24	13,65	2006	10	3	2,44	2007	6	29	9,40
2006	1	25	0,12	2006	10	4	15,73	2007	9	27	16,98
2006	1	26	12,80	2006	10	5	2,73	2007	9	28	20,29
2006	1	27	11,44	2006	10	6	0,00	2007	9	29	1,26
2006	1	28	0,21	2006	10	7	0,81	2007	9	30	16,66
2006	1	29	12,25	2006	10	8	5,48	2007	10	1	5,48
2006	1	30	18,27	2006	10	9	1,89	2007	10	2	20,64
2006	1	31	19,61	2006	10	10	0,12	2007	10	3	1,03
2006	2	1	13,36	2006	10	11	18,27	2007	10	11	18,60
2006	2	2	9,16	2006	10	12	21,70	2007	10	12	22,41
2006	2	3	19,27	2006	10	13	24,26	2007	10	13	24,64
2006	2	4	18,93	2006	10	14	24,26	2007	10	14	13,65
2006	2	5	19,61	2006	10	15	8,92	2008	3	13	6,48
2006	2	6	20,29	2006	10	16	0,40	2008	4	18	10,40
2006	5	28	33,63	2006	10	17	18,60	2008	4	19	0,40
2006	6	20	8,92	2006	10	18	1,03	2008	4	20	1,38
2006	6	22	32,76	2006	10	19	0,21	2008	4	21	9,65
2006	6	27	28,56	2006	10	20	3,68	2008	4	22	0,00
2006	6	30	31,47	2006	10	21	1,03	2008	4	23	18,60
2006	7	18	3,04	2006	10	22	1,63	2008	6	9	39,11
2006	7	19	9,40	2006	10	27	22,05	2008	6	10	15,12
2006	9	21	2,02	2006	10	28	21,34	2008	7	7	16,66
2006	9	22	5,48	2006	10	29	18,93	2008	7	8	26,96
2006	9	23	9,65	2006	10	30	14,52	2008	9	13	18,93
2006	9	24	3,35	2006	10	31	1,03	2008	9	14	28,97
2006	9	25	8,45	2006	11	1	13,36	2008	9	15	28,16
2006	9	26	22,05	2006	12	10	3,04	2008	11	17	18,93

Tabla B.10.c. Valores diarios de irradiación directa imputados previamente al análisis ARIMA.

Mes	Mes	Día	V. imputado (MJm <sup>-2</sup> )	Año	Mes	Día	V. imputado (MJm <sup>-2</sup> )	Año	Mes	Día	V. imputado (MJm <sup>-2</sup> )
2006	9	27	9,40	2006	12	13	16,04	2008	11	18	0,00
2006	9	28	11,97	2006	12	14	16,98	2009	3	9	15,73
2006	9	29	10,15	2007	1	2	15,12	2009	3	10	25,02
2006	9	30	10,91	2007	3	8	14,82	2009	3	11	24,64

### Valores diarios imputados en la serie de fracción difusa

La tabla B.11 recoge los valores diarios de fracción difusa resultantes del proceso de imputación de datos previo al análisis ARIMA.

Tabla B.11.a. Valores diarios de Fracción imputados previamente al análisis ARIMA

Año	Mes	Día	F <sub>d</sub> imputado	Año	Mes	Día	F <sub>d</sub> imputado	Año	Mes	Día	F <sub>d</sub> imputado
1999	6	7	0,35	1999	8	28	0,33	2000	2	21	0,42
1999	7	15	0,46	1999	8	29	0,40	2000	3	17	0,19
1999	8	1	0,37	1999	8	30	0,44	2000	3	18	0,30
1999	8	2	0,38	1999	8	31	0,23	2000	3	19	0,17
1999	8	3	0,51	1999	9	1	0,33	2000	3	20	0,23
1999	8	4	0,48	1999	9	2	0,64	2000	3	21	0,41
1999	8	5	0,93	1999	10	4	0,30	2000	3	22	0,45
1999	8	6	0,38	1999	10	5	0,54	2000	3	23	0,66
1999	8	7	0,72	1999	10	6	0,51	2000	3	25	0,25
1999	8	8	0,36	1999	10	7	0,19	2000	3	26	0,74
1999	8	9	0,24	1999	10	26	0,27	2000	3	28	0,40
1999	8	10	0,26	1999	11	2	0,48	2000	3	29	0,16
1999	8	11	0,39	1999	11	3	0,21	2000	3	30	0,15
1999	8	12	0,49	1999	11	4	0,59	2000	3	31	0,36
1999	8	13	0,17	1999	11	7	0,24	2000	4	1	0,83
1999	8	14	0,58	1999	11	8	0,31	2000	4	2	0,86
1999	8	15	0,45	1999	12	11	0,68	2000	4	3	1,00
1999	8	16	0,66	1999	12	12	0,68	2000	4	4	0,94
1999	8	17	0,37	1999	12	13	0,71	2000	4	5	0,73
1999	8	18	0,37	1999	12	14	1,00	2000	4	6	0,18
1999	8	19	0,19	1999	12	15	0,98	2000	4	7	0,38
1999	8	20	0,20	1999	12	16	0,47	2000	4	8	0,98
1999	8	21	0,78	1999	12	17	0,96	2000	4	9	0,97

Tabla B.11.b. Valores diarios de Fracción imputados previamente al análisis ARIMA.

Año	Mes	Día	F <sub>d</sub> imputado	Año	Mes	Día	F <sub>d</sub> imputado	Año	Mes	Día	F <sub>d</sub> imputado
1999	8	22	0,67	1999	12	18	0,94	2000	4	10	0,94
1999	8	23	0,21	1999	12	19	0,99	2000	4	11	0,95
1999	8	24	0,52	1999	12	20	0,86	2000	4	12	0,70
1999	8	25	0,62	2000	2	12	0,33	2000	4	13	0,98
1999	8	26	0,53	2000	2	19	0,69	2000	4	14	0,62
1999	8	27	0,33	2000	2	20	0,19	2000	4	15	0,58
2000	4	16	0,62	2000	5	20	0,16	2002	2	2	0,75
2000	4	17	0,63	2000	5	21	0,67	2002	2	3	0,66
2000	4	18	0,72	2000	5	25	0,54	2002	2	4	0,70
2000	4	19	0,87	2000	5	26	0,88	2002	2	5	0,72
2000	4	20	0,55	2000	5	27	0,84	2002	3	1	0,58
2000	4	21	0,84	2000	5	29	0,82	2002	7	4	0,39
2000	4	22	0,80	2000	6	1	0,65	2002	7	6	0,56
2000	4	23	0,68	2000	6	23	0,69	2002	7	15	0,20
2000	4	24	0,98	2001	1	29	0,46	2002	10	3	0,72
2000	4	25	0,66	2001	2	8	0,47	2002	12	31	0,99
2000	4	26	0,61	2001	2	11	0,18	2003	6	22	0,75
2000	4	27	0,29	2001	4	1	0,62	2003	11	7	0,80
2000	4	28	0,84	2001	4	2	0,58	2003	11	8	0,80
2000	4	29	0,80	2001	5	3	0,72	2003	11	9	0,82
2000	4	30	0,69	2001	5	4	0,67	2003	11	10	0,83
2000	5	1	0,75	2001	5	22	0,58	2003	11	11	0,78
2000	5	2	0,52	2001	5	23	0,39	2003	11	12	0,85
2000	5	3	0,37	2001	5	24	0,57	2003	11	13	0,83
2000	5	4	0,75	2001	5	25	0,58	2003	11	14	0,77
2000	5	5	0,77	2001	7	10	0,47	2003	11	15	0,79
2000	5	6	0,48	2001	7	12	0,54	2003	11	16	0,80
2000	5	7	0,44	2001	7	16	0,92	2003	11	17	0,83
2000	5	9	0,63	2001	7	17	0,71	2003	11	18	0,72
2000	5	10	0,68	2001	7	18	0,56	2003	11	19	0,85
2000	5	11	0,83	2001	7	22	0,80	2003	11	20	0,79
2000	5	12	0,37	2001	7	23	0,60	2003	11	21	0,84
2000	5	13	0,21	2001	7	24	0,73	2003	11	22	0,74
2000	5	14	0,35	2001	7	25	0,47	2003	11	23	0,73
2000	5	15	0,72	2001	7	26	0,61	2003	11	24	0,83
2000	5	16	0,43	2001	7	27	0,48	2003	11	25	0,79
2000	5	17	0,42	2001	7	28	0,49	2003	11	26	0,78
2000	5	18	0,51	2001	8	1	0,58	2003	11	27	0,72

Tabla B.11.c. Valores diarios de Fracción imputados previamente al análisis ARIMA.

Año	Mes	Día	F <sub>d</sub> imputado	Año	Mes	Día	F <sub>d</sub> imputado	Año	Mes	Día	F <sub>d</sub> imputado
2000	5	19	0,22	2002	2	1	0,83	2003	11	28	0,71
2003	11	29	0,79	2004	1	1	0,72	2004	12	17	0,76
2003	11	30	0,79	2004	1	2	0,77	2004	12	18	0,86
2003	12	1	0,91	2004	1	3	0,80	2004	12	19	0,72
2003	12	2	0,78	2004	1	4	0,81	2004	12	20	0,80
2003	12	3	0,84	2004	1	5	0,84	2004	12	21	0,87
2003	12	4	0,81	2004	1	6	0,80	2004	12	22	0,72
2003	12	5	0,77	2004	1	7	0,76	2004	12	23	0,74
2003	12	6	0,74	2004	1	8	0,93	2004	12	24	0,86
2003	12	7	0,81	2004	1	9	0,82	2004	12	25	0,86
2003	12	8	0,75	2004	1	10	0,88	2004	12	26	0,88
2003	12	9	0,81	2004	1	11	0,73	2004	12	27	0,75
2003	12	10	0,83	2004	1	12	0,81	2004	12	29	0,45
2003	12	11	0,82	2004	1	13	0,81	2005	1	1	0,94
2003	12	12	0,74	2004	1	14	0,76	2005	1	2	0,87
2003	12	13	0,75	2004	1	15	0,72	2005	1	3	0,29
2003	12	14	0,75	2004	1	16	0,75	2005	1	4	0,66
2003	12	15	0,69	2004	1	17	0,79	2005	1	5	0,78
2003	12	16	0,70	2004	1	18	0,76	2005	1	6	0,71
2003	12	17	0,79	2004	1	19	0,76	2005	1	7	0,24
2003	12	18	0,88	2004	1	20	0,77	2005	1	8	0,98
2003	12	19	0,74	2004	1	21	0,77	2005	1	9	0,61
2003	12	20	0,82	2004	1	22	0,79	2005	1	10	0,69
2003	12	21	0,89	2004	1	31	0,37	2005	1	11	0,82
2003	12	22	0,73	2004	2	29	0,48	2005	1	12	1,00
2003	12	23	0,75	2004	6	19	0,65	2005	1	13	0,97
2003	12	24	0,87	2004	6	24	0,55	2005	1	14	0,35
2003	12	25	0,86	2004	7	8	0,51	2005	1	15	0,99
2003	12	26	0,88	2004	7	9	0,46	2005	1	16	0,50
2003	12	27	0,75	2004	7	16	0,55	2005	1	17	0,68
2003	12	28	0,78	2004	10	1	0,53	2005	1	18	0,89
2003	12	29	0,79	2004	12	14	0,70	2005	1	19	0,85
2003	12	30	0,89	2004	12	15	0,63	2005	1	20	0,42
2003	12	31	0,89	2004	12	16	0,66	2005	1	21	0,48

Tabla B.11.d. Valores diarios de Fracción imputados previamente al análisis ARIMA.

Año	Mes	Día	F <sub>d</sub> imputado	Año	Mes	Día	F <sub>d</sub> imputado	Año	Mes	Día	F <sub>d</sub> imputado
2005	1	22	0,29	2006	1	9	0,38	2006	6	24	0,56
2005	1	23	0,72	2006	1	10	0,31	2006	6	27	0,15
2005	1	24	0,25	2006	1	11	0,58	2006	7	18	0,57
2005	1	25	0,68	2006	1	12	0,72	2006	9	21	0,93
2005	1	26	0,43	2006	1	13	0,92	2006	9	22	0,81
2005	1	27	0,88	2006	1	14	0,40	2006	9	23	0,63
2005	1	28	0,59	2006	1	15	0,79	2006	9	24	0,86
2005	1	29	0,57	2006	1	16	0,86	2006	9	25	0,66
2005	1	30	0,41	2006	1	17	0,99	2006	9	26	0,26
2005	1	31	0,56	2006	1	18	0,75	2006	9	27	0,72
2005	2	11	0,59	2006	1	19	0,27	2006	9	28	0,73
2005	2	12	0,54	2006	1	20	0,28	2006	9	29	0,71
2005	2	18	0,63	2006	1	21	0,33	2006	9	30	0,76
2005	2	19	0,56	2006	1	22	0,33	2006	10	1	0,68
2005	4	21	0,97	2006	1	23	0,39	2006	10	2	1,00
2005	4	22	0,68	2006	1	24	0,40	2006	10	3	0,84
2005	4	23	0,71	2006	1	25	0,79	2006	10	4	0,49
2005	4	24	0,44	2006	1	26	0,32	2006	10	5	0,84
2005	4	25	0,74	2006	1	27	0,53	2006	10	6	0,99
2005	4	26	0,64	2006	1	28	0,98	2006	10	7	0,82
2005	4	27	0,22	2006	1	29	0,37	2006	10	8	0,72
2005	4	28	0,51	2006	1	30	0,26	2006	10	9	0,82
2005	4	29	0,39	2006	1	31	0,30	2006	10	10	0,99
2005	4	30	0,34	2006	2	1	0,34	2006	10	11	0,40
2005	7	6	0,58	2006	2	2	0,55	2006	10	12	0,22
2005	7	16	0,31	2006	2	3	0,30	2006	10	13	0,21
2005	7	30	0,19	2006	2	4	0,26	2006	10	14	0,22
2006	1	2	0,65	2006	2	5	0,25	2006	10	15	0,61
2006	1	5	0,71	2006	2	6	0,24	2006	10	16	0,98
2006	1	6	0,69	2006	5	28	0,18	2006	10	17	0,40
2006	1	7	0,93	2006	6	8	0,56	2006	10	18	0,96
2006	1	8	0,91	2006	6	21	0,51	2006	10	19	0,98

Tabla B.11.e. Valores diarios de Fracción imputados previamente al análisis ARIMA.

Año	Mes	Día	F <sub>d</sub> imputado	Año	Mes	Día	F <sub>d</sub> imputado	Año	Mes	Día	F <sub>d</sub> imputado
2006	10	20	0,89	2007	6	29	0,43	2008	4	20	0,96
2006	10	21	0,95	2007	9	27	0,51	2008	4	21	0,62
2006	10	22	0,95	2007	9	28	0,53	2008	4	22	0,97
2006	10	27	0,24	2007	9	29	0,56	2008	7	8	0,32
2006	10	28	0,26	2007	9	30	0,69	2008	9	13	0,39
2006	10	29	0,28	2007	10	1	0,70	2008	9	14	0,25
2006	10	30	0,47	2007	10	2	0,66	2008	9	15	0,20
2006	10	31	0,82	2007	10	3	0,72	2008	10	1	0,66
2006	11	1	0,61	2007	10	11	0,25	2008	11	17	0,69
2006	12	10	0,64	2007	10	12	0,23	2008	11	18	0,68
2006	12	13	0,42	2007	10	13	0,22	2009	3	9	0,35
2006	12	14	0,31	2007	10	14	0,37	2009	3	10	0,22
2007	3	8	0,41	2008	3	13	0,55	2009	3	11	0,23
2007	3	9	0,94	2008	4	18	0,67	2009	3	12	0,19
2007	3	21	0,71	2008	4	19	0,93				

**ANEXO C**

**RESUMEN DE ESTADÍSTICOS.**



Tabla C.1. Principales estadísticos de la serie de irradiación global diaria (1985-2009)

Mes	Media (10kJ/m <sup>2</sup> )	Mediana (10kJ/m <sup>2</sup> )	Varianza	Desv. típ. (10kJ/m <sup>2</sup> )	Mínimo (10kJ/m <sup>2</sup> )	Máximo (10kJ/m <sup>2</sup> )
Enero	511,8	490	52948,9	230,1	64	1025
Febrero	816,6	843	126214,8	355,3	92	1589
Marzo	1254,7	1308	255736,8	505,7	105	2215
Abril	1635,3	1641	379715,6	616,2	242	2812
Mayo	1986,7	2096	488591,3	699,0	331	3133
Junio	2232,8	2414	554173,1	744,4	270	3286
Julio	2243,9	2450	442570,2	665,3	246	3245
Agosto	1985,3	2104	310221,5	557,0	357	2919
Septiembre	1525,7	1593	235377,2	485,2	203	2652
Octubre	940,8	955	157302,8	396,6	91	1780
Noviembre	572,7	556	68038,0	260,8	49	1259
Diciembre	445,3	427	41908,1	204,7	53	834

Tabla C.1. (Continuación) Principales estadísticos de la serie de irradiación global diaria (1985-2009)

Mes	Asimetría	Curtosis	Rango (10kJ/m <sup>2</sup> )	Amplitud intercuartil (10kJ/m <sup>2</sup> )
Enero	0,138	-1,028	961	385,5
Febrero	-0,038	-1,042	1497	586
Marzo	-0,187	-1,009	2110	849
Abril	-0,176	-0,988	2570	1015,25
Mayo	-0,392	-0,886	2802	1176
Junio	-0,612	-0,766	3016	1250,5
Julio	-0,885	-0,158	2999	925,25
Agosto	-0,705	-0,189	2562	797
Septiembre	-0,487	-0,516	2449	718
Octubre	-0,08	-0,958	1689	639
Noviembre	0,2	-0,857	1210	430
Diciembre	0,034	-1,208	781	355

Tabla C.2. Pruebas de normalidad de la serie de irradiación global diaria (1985-2009)

Mes	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Enero	0,064	744	0	0,97	744	0
Febrero	0,064	685	0	0,971	685	0
Marzo	0,077	753	0	0,969	753	0
Abril	0,069	740	0	0,97	740	0
Mayo	0,075	751	0	0,956	751	0
Junio	0,117	737	0	0,92	737	0
Julio	0,124	752	0	0,908	752	0
Agosto	0,096	744	0	0,951	744	0
Septiembre	0,076	734	0	0,965	734	0
Octubre	0,049	754	0	0,976	754	0
Noviembre	0,065	723	0	0,977	723	0
Diciembre	0,083	718	0	0,955	718	0

Tabla C.3. Principales estadísticos de la serie de irradiación difusa diaria (1999-2009)

Mes	Media (10kJ/m <sup>2</sup> )	Mediana (10kJ/m <sup>2</sup> )	Varianza	Desv. típ. (10kJ/m <sup>2</sup> )	Mínimo (10kJ/m <sup>2</sup> )	Máximo (10kJ/m <sup>2</sup> )
Enero	278,9427	277	8508,665	92,24242	86	493
Febrero	402,7241	385	22630,88	150,4356	119	822
Marzo	593,0069	605,5	35051,78	187,2212	179	1129
Abril	725,7024	740	51422,72	226,7658	276	1304
Mayo	870,9173	905	69724,85	264,0546	326	1497
Junio	883,5723	912	99741,78	315,8192	86	1636
Julio	864,1968	873	87071,74	295,0792	246	1624
Agosto	758,5566	758	77961,96	279,2167	276	1505
Septiembre	576,9968	594	45222,55	212,656	176	1105
Octubre	448,4615	438	22747,26	150,822	136	842
Noviembre	297,5235	304	10485,93	102,4008	49	536
Diciembre	223,1637	233	5922,38	76,957	56	433

Tabla C.3. (Continuación). Principales estadísticos de la serie de irradiación difusa diaria (1999-2009)

Mes	Asimetría	Curtosis	Rango (10kJ/m <sup>2</sup> )	Amplitud intercuartil (10kJ/m <sup>2</sup> )
Enero	0,239	-0,51	407	135
Febrero	0,371	-0,567	703	229,5
Marzo	-0,091	-0,697	950	291
Abril	-0,112	-0,648	1028	315,75
Mayo	-0,12	-0,646	1171	377,5
Junio	-0,1	-0,852	1550	499
Julio	0,164	-0,708	1378	441
Agosto	0,261	-0,694	1229	444,5
Septiembre	0,11	-0,895	929	341
Octubre	0,252	-0,224	706	216
Noviembre	-0,012	-0,631	487	157,25
Diciembre	0,04	-0,703	377	125

Tabla C.4. Pruebas de normalidad de la serie de irradiación difusa diaria (1999-2009)

Mes	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Enero	,045	227	,200	,986	227	,026
Febrero	,075	261	,001	,977	261	,000
Marzo	,045	288	,200	,984	288	,002
Abril	,051	252	,200	,983	252	,004
Mayo	,060	278	,018	,983	278	,002
Junio	,067	311	,002	,976	311	,000
Julio	,052	315	,037	,984	315	,001
Agosto	,064	309	,004	,977	309	,000
Septiembre	,072	311	,001	,974	311	,000
Octubre	,039	299	,200	,988	299	,018
Noviembre	,045	298	,200	,987	298	,008
Diciembre	,066	281	,005	,981	281	,001

Tabla C.5. Principales estadísticos de la serie de irradiación directa diaria en plano normal (2005-2009)

Mes	Media (10kJ/m <sup>2</sup> )	Mediana (10kJ/m <sup>2</sup> )	Varianza	Desv. típ. (10kJ/m <sup>2</sup> )	Mínimo (10kJ/m <sup>2</sup> )	Máximo (10kJ/m <sup>2</sup> )
Enero	424,41	191	341951,798	584,766	0	2132
Febrero	1076,5	712	1017054,82	1008,491	0	2818
Marzo	903,46	636	855102,696	924,718	0	3025
Abril	1462,6	1349,5	1103041,75	1050,258	0	3523
Mayo	1344,49	994,5	1390202,04	1179,068	0	4245
Junio	1620,71	1219	1804464,05	1343,303	0	4127
Julio	1818,46	1834	1327162,69	1152,025	0	4011
Agosto	1898,74	1924	1584115,7	1258,617	0	4084
Septiembre	1791,23	2076	1051477,98	1025,416	0	3413
Octubre	1010,28	703	871854,22	933,731	0	3155
Noviembre	687	435	531806,753	729,251	0	2341
Diciembre	709,2	377	574277,221	757,811	0	2257

Tabla C.5. (Continuación). Principales estadísticos de la serie de irradiación directa diaria en plano normal (2005-2009)

Mes	Asimetría	Curtosis	Rango (10kJ/m <sup>2</sup> )	Amplitud intercuartil (10kJ/m <sup>2</sup> )
Enero	1,604	1,44	2132	521
Febrero	0,403	-1,478	2818	2199
Marzo	0,917	-0,334	3025	1362
Abril	0,26	-1,184	3523	1820
Mayo	0,617	-0,764	4245	1864
Junio	0,505	-1,173	4127	2566
Julio	-0,029	-1,072	4011	1807
Agosto	-0,084	-1,439	4084	2520
Septiembre	-0,302	-1,243	3413	1845
Octubre	0,646	-0,833	3155	1575
Noviembre	0,872	-0,627	2341	1156
Diciembre	0,689	-1,085	2257	1303

Tabla C.6. Pruebas de normalidad de la serie de irradiación directa diaria en plano normal (2005-2009)

Mes	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Enero	,234	95	,000	,732	95	,000
Febrero	,164	107	,000	,845	107	,000
Marzo	,164	131	,000	,855	131	,000
Abril	,099	134	,003	,938	134	,000
Mayo	,127	152	,000	,908	152	,000
Junio	,148	143	,000	,892	143	,000
Julio	,064	151	,200	,958	151	,000
Agosto	,126	155	,000	,919	155	,000
Septiembre	,122	133	,000	,929	133	,000
Octubre	,141	121	,000	,891	121	,000
Noviembre	,173	147	,000	,836	147	,000
Diciembre	,185	152	,000	,827	152	,000

Tabla C.7. Principales estadísticos del índice de claridad diario ( $k_t$ ) (1985-2009)

Mes	Media	Mediana	Varianza	Desv. Típ.	Mínimo	Máximo
Enero	0,384	0,372	0,028	0,167	0,054	0,698
Febrero	0,438	0,457	0,034	0,184	0,051	0,765
Marzo	0,479	0,505	0,035	0,186	0,045	0,785
Abril	0,482	0,488	0,032	0,179	0,078	0,787
Mayo	0,506	0,532	0,031	0,177	0,083	0,775
Junio	0,535	0,579	0,032	0,178	0,065	0,785
Julio	0,553	0,601	0,027	0,164	0,060	0,779
Agosto	0,551	0,594	0,023	0,151	0,107	0,763
Septiembre	0,521	0,548	0,025	0,158	0,076	0,810
Octubre	0,437	0,450	0,030	0,173	0,043	0,757
Noviembre	0,384	0,376	0,028	0,169	0,037	0,716
Diciembre	0,379	0,365	0,030	0,175	0,045	0,700

Tabla C.7 (Continuación). Principales estadísticos del índice de claridad diario ( $k_t$ ) (1985-2009)

Mes	Asimetría	Curtosis	Rango	Amplitud intercuartil
Enero	0,036	-1,145	0,643	0,292
Febrero	-,157	-1,181	0,715	0,324
Marzo	-,343	-1,129	0,739	0,329
Abril	-,229	-1,022	0,709	0,300
Mayo	-,429	-,889	0,692	0,299
Junio	-,612	-,765	0,721	0,299
Julio	-,891	-,172	0,719	0,232
Agosto	-,847	-,076	0,656	0,225
Septiembre	-,696	-,421	0,735	0,241
Octubre	-,305	-,992	0,714	0,291
Noviembre	,010	-1,166	0,679	0,296
Diciembre	,034	-1,209	0,655	0,312

Tabla C.8. Pruebas de normalidad del índice de claridad diario ( $k_t$ ) (1985-2009)

Mes	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Enero	,075	743	,000	,961	743	,000
Febrero	,093	685	,000	,955	685	,000
Marzo	,105	754	,000	,936	754	,000
Abril	,075	740	,000	,960	740	,000
Mayo	,082	753	,000	,948	753	,000
Junio	,119	739	,000	,921	739	,000
Julio	,128	757	,000	,900	757	,000
Agosto	,116	749	,000	,919	749	,000
Septiembre	,104	736	,000	,934	736	,000
Octubre	,073	754	,000	,957	754	,000
Noviembre	,070	723	,000	,963	723	,000
Diciembre	,083	718	,000	,955	718	,000

Tabla C.9. Principales estadísticos de la fracción difusa diaria ( $F_d$ ) (1999-2009)

Mes	Media	Mediana	Varianza	Desv. típ.	Mínimo	Máximo
Enero	0,706	0,768	0,075	0,274	0,000	1
Febrero	0,596	0,601	0,102	0,319	0,116	1
Marzo	0,607	0,602	0,083	0,288	0,130	1
Abril	0,524	0,512	0,076	0,275	0,112	1
Mayo	0,541	0,490	0,081	0,285	0,104	1
Junio	0,495	0,452	0,084	0,289	0,093	1
Julio	0,469	0,407	0,071	0,267	0,102	1
Agosto	0,451	0,390	0,070	0,265	0,101	1
Septiembre	0,435	0,363	0,071	0,267	0,091	1
Octubre	0,604	0,622	0,081	0,284	0,116	1
Noviembre	0,637	0,663	0,082	0,287	0,124	1
Diciembre	0,641	0,726	0,100	0,316	0	1

Tabla C.9. (Continuación) Principales estadísticos de la fracción difusa diaria ( $F_d$ ) (1999-2009)

Mes	Asimetría	Curtosis	Rango	Amplitud intercuartil
Enero	-,733	-,671	1	,403
Febrero	-,058	-1,584	,884	,678
Marzo	-,108	-1,382	,870	,519
Abril	,195	-1,216	,888	,481
Mayo	,220	-1,298	,896	,495
Junio	,332	-1,188	,907	,503
Julio	,580	-,855	,898	,414
Agosto	,564	-,900	,899	,432
Septiembre	,609	-,892	,909	,450
Octubre	-,108	-1,305	,884	,541
Noviembre	-,320	-1,223	,876	,526
Diciembre	-,344	-1,462	1	,647

Tabla C.8. Pruebas de normalidad de la fracción difusa diaria ( $F_d$ ) (1999-2009)

Mes	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Enero	,141	228	,000	,883	228	,000
Febrero	,143	252	,000	,875	252	,000
Marzo	,104	288	,000	,919	288	,000
Abril	,086	252	,000	,939	252	,000
Mayo	,100	276	,000	,926	276	,000
Junio	,092	309	,000	,921	309	,000
Julio	,104	315	,000	,917	315	,000
Agosto	,109	309	,000	,918	309	,000
Septiembre	,119	311	,000	,907	311	,000
Octubre	,099	299	,000	,928	299	,000
Noviembre	,128	298	,000	,914	298	,000
Diciembre	,150	282	,000	,864	282	,000

Tabla C.9. Resumen de contrastes de hipótesis

Predicciones de la serie	Prueba U de Mann-Whitney <sup>(1)</sup>	Prueba de las medianas <sup>(2)</sup>
	Sig.	Sig.
I. Global diaria	,620	,604
I. Global mensual	----	1,000
I. Difusa diaria	,288	,046 (0,054)*
I. Difusa mensual	----	,684
I. Directa diaria	,953	,941
I. Directa mensual	----	1,000
$K_t$ diario	,905	,505
$K_t$ mensual	----	1,000
$F_d$ diaria	,843	,941
$F_d$ mensual	----	,684

<sup>(1)</sup> Hipótesis nula: La distribución es la misma entre la serie de predicciones y la observada

<sup>(2)</sup> Hipótesis nula: La mediana de la serie de predicciones y la observada son iguales

\*Corrección por continuidad de Yates.