

E.T.S. de Ingeniería Industrial, Informática y de
Telecomunicación

ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR A PARTIR DE IMÁGENES DE SATÉLITE



Máster Universitario en
Ingeniería Industrial

Trabajo Fin de Máster

Autor: Darío Jiménez Galán

Tutor: Francisco Fermín Mallor Giménez

Pamplona, 20/06/2016



RESUMEN

El presente proyecto tiene como principal finalidad la implementación de los algoritmos disponibles y pertenecientes a la última actualización del modelo Heliosat (Heliosat 3) para la estimación de la radiación solar a partir de imágenes de satélite. En particular, en este trabajo se utilizan las imágenes de los satélites geoestacionarios Meteosat.

Esta metodología, para la estimación de la radiación solar a través de imágenes de satélite, es una de las más aceptadas por la comunidad científica y por tanto una de las más desarrolladas y estudiadas. Es una herramienta clave para la estimación del recurso solar en áreas donde no existen medidas reales y también para la elaboración de mapas de recurso.

Otro de los puntos desarrollados, una vez analizado y validado el nuevo modelo Heliosat, es la implementación de un software para generación de mapas de radiación a partir de históricos de imágenes de satélite.

Para llevar a cabo este proyecto se ha realizado un estudio del estado del arte y de toda la literatura disponible relacionada con este tema. Además se he hecho necesario el aprendizaje del tratamiento de imágenes y de diferentes formatos de archivos así como aprender a programar en R.

PALABRAS CLAVE

Radiación solar

Heliosat

Meteosat

Mapas de recurso

Estimación de recurso

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a CENER sin cuyo aporte técnico, económico y colaboración no se podría haber llegado a realizar y hacer realidad este proyecto. Agradecer de igual manera a todos los empleados de CENER cuya ayuda e interés han sido vitales para llevar a buen puerto el presente proyecto.

Que no se queden sin un gran agradecimiento todos mis familiares y amigos que han estado en todo momento animándome a seguir adelante y lograr todo lo que me proponga.



Índice general

Estimación de la radiación solar a partir de imágenes de satélite:
Implementación del método Heliosat

Autor: Darío Jiménez Galán

Peticionario: CENER.

Titulación: Máster en Ingeniería Industrial

Director: Fermín Francisco Mallor Giménez

Departamento: Estadística e Investigación Operativa

Curso: 2015/2016

Lugar y fecha: Pamplona, 20 de Junio de 2016

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	5
MEMORIA.....	17
ANEXOS	163

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 7.1 – Ecuación del tiempo en minutos.....	29
Figura 7.2 – Ángulos solares.....	31
Figura 7.3 – Variación de la irradiancia solar terrestre a lo largo del año	32
Figura 7.4 – Bandas de absorción y ventanas del espectro electromagnético [www.proteccioncivil.org].....	33
Figura 8.1 – Comparación satélites MFG y MSG [http://danielmarin.naukas.com/]	41
Figura 8.2 – Canales MSG [http://danielmarin.naukas.com/]	42
Figura 8.3 – Sistema de coordenadas tridimensionales geográficas	44
Figura 8.4 – Posición de un punto sobre la superficie terrestre	45
Figura 9.1 – Logotipo R.....	46
Figura 10.1 – Imagen con zona de píxeles muy destacados	48
Figura 10.2 – Imagen con pixel de intensidad destacada	48
Figura 10.3 – Imagen con gran proporción de datos perdidos	49
Figura 10.4 – Subimagen a tratar con la máscara de suavizado	50
Figura 10.5 – Máscara de suavizado	50
Figura 10.6 – Imagen original.....	50
Figura 10.7 – Imagen suavizada con matriz 3x3.....	51
Figura 10.8 – Imagen suavizada con matriz 5x5.....	51
Figura 10.9 – Imagen suavizada con matriz 7x7.....	51
Figura 10.10 – Histograma anual datos originales.....	54
Figura 10.11 – Histograma anual con matriz 3x3.....	54
Figura 10.12 – Histograma anual con matriz 5x5.....	54
Figura 10.13 – Histograma anual con matriz 7x7.....	54
Figura 10.14 – Histograma junio datos originales.....	55
Figura 10.15 – Histograma junio con matriz 3x3.....	55
Figura 10.16 – Histograma junio con matriz 5x5.....	55
Figura 10.17 – Histograma junio con matriz 7x7.....	55
Figura 10.18 – Histograma julio datos originales.....	56
Figura 10.19 – Histograma julio con matriz 3x3.....	56
Figura 10.20 – Histograma julio con matriz 5x5.....	56
Figura 10.21 – Histograma julio con matriz 7x7.....	56
Figura 10.22 – Histograma agosto datos originales.....	57
Figura 10.23 – Histograma agosto con matriz 3x3.....	57
Figura 10.24 – Histograma agosto con matriz 5x5.....	57
Figura 10.25 – Histograma agosto con matriz 7x7.....	57
Figura 10.26 – Histograma septiembre datos originales	58
Figura 10.27 – Histograma septiembre con matriz 3x3	58
Figura 10.28 – Histograma septiembre con matriz 5x5	58
Figura 10.29 – Histograma septiembre con matriz 7x7	58
Figura 10.30 – Histograma octubre datos originales	59
Figura 10.31 – Histograma octubre con matriz 3x3	59
Figura 10.32 – Histograma octubre con matriz 5x5	59
Figura 10.33 – Histograma octubre con matriz 7x7	59

Figura 10.34 – Histograma noviembre datos originales	60
Figura 10.35 – Histograma noviembre con matriz 3x3	60
Figura 10.36 – Histograma noviembre con matriz 5x5	60
Figura 10.37 – Histograma noviembre con matriz 7x7	60
Figura 10.38 – Histograma diciembre datos originales.....	61
Figura 10.39 – Histograma diciembre con matriz 3x3	61
Figura 10.40 – Histograma diciembre con matriz 5x5	61
Figura 10.41 – Histograma diciembre con matriz 7x7	61
Figura 11.1 – Relación entre el índice de cielo claro y el coeficiente de cobertura nubosa.....	68
Figura 11.2 – Esquema procedimiento implementado en CENER.....	69
Figura 13.1 – Ejemplo gráfica de radiación con anomalía	78
Figura 13.2 – Ejemplo gráfica de radiación con anomalía rectificada	78
Figura 15.1 – Posición de las estaciones	83
Figura 15.2 – Radiación global horaria medida frente a estimada en Cabauw	86
Figura 15.3 – Radiación directa horaria medida frente a estimada según Reindl en Cabauw ...	86
Figura 15.4 - Radiación directa horaria medida frente a estimada según Orgill Hollands en Cabauw.....	87
Figura 15.5 - Radiación directa horaria medida frente a estimada según Erbs en Cabauw	88
Figura 15.6 - Radiación directa horaria medida frente a estimada según Louche en Cabauw... 88	
Figura 15.7 - Radiación global horaria medida frente a estimada en Ilorin.....	89
Figura 15.8 - Radiación directa horaria medida frente a estimada según Reindl en Ilorin.....	90
Figura 15.9 - Radiación directa horaria medida frente a estimada según Orgill Hollands en	91
Figura 15.10 - Radiación directa horaria medida frente a estimada según Erbs en Ilorin.....	91
Figura 15.11 - Radiación directa horaria medida frente a estimada según Louche en Ilorin	92
Figura 15.12 - Radiación global horaria medida frente a estimada en Payerne.....	93
Figura 15.13 - Radiación directa horaria medida frente a estimada según Reindl en Payerne..	94
Figura 15.14 - Radiación directa horaria medida frente a estimada según Orgill Hollands en Payerne	94
Figura 15.15 - Radiación directa horaria medida frente a estimada según Erbs en Payerne	95
Figura 15.16 - Radiación directa horaria medida frente a estimada según Louche en Payerne	96
Figura 15.17 – Radiación global horaria medida frente a estimada en Tamanrasset.....	97
Figura 15.18 - Radiación directa horaria medida frente a estimada según Reindl en Tamanrasset.....	97
Figura 15.19 - Radiación directa horaria medida frente a estimada según Orgill Hollands en Tamanrasset.....	98
Figura 15.20 - Radiación directa horaria medida frente a estimada según Erbs en Tamanrasset	99
Figura 15.21 - Radiación directa horaria medida frente a estimada según Louche en Tamanrasset.....	99
Figura 15.22 - Radiación global horaria medida frente a estimada en Toravere.....	100
Figura 15.23 - Radiación directa horaria medida frente a estimada según Reindl en Toravere	101
Figura 15.24 - Radiación directa horaria medida frente a estimada según Orgill Hollands en Toravere	102

Figura 15.25 - Radiación directa horaria medida frente a estimada según Erbs en Toravere..	102
Figura 15.26 - Radiación directa horaria medida frente a estimada según Louche en Toravere	
.....	103
Figura 15.27 - Comparación de los errores en la estimación de la radiación global horaria ...	104
Figura 15.28 - Comparación de los errores en la estimación de la radiación directa horaria según Reindl.....	104
Figura 15.29 - Comparación de los errores en la estimación de la radiación directa horaria según Orgill Hollands.....	104
Figura 15.30 - Comparación de los errores en la estimación de la radiación directa horaria según Erbs	105
Figura 15.31 - Comparación de los errores en la estimación de la radiación directa horaria según Louche.....	105
Figura 15.32 - Comparación de los errores en la estimación de la radiación global diaria	106
Figura 15.33 - Comparación de los errores en la estimación de la radiación directa diaria según Reindl.....	106
Figura 15.34 - Comparación de los errores en la estimación de la radiación directa diaria según Orgill Hollands	106
Figura 15.35 - Comparación de los errores en la estimación de la radiación directa diaria según Erbs.....	107
Figura 15.36 - Comparación de los errores en la estimación de la radiación directa diaria según Louche	107
Figura 15.37 – Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación global en Cabauw.....	110
Figura 15.38 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación directa (Reindl) en Cabauw	111
Figura 15.39 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación directa (Orgill Hollands) en Cabauw.....	112
Figura 15.40 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación directa (Erbs) en Cabauw.....	112
Figura 15.41 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación directa (Louche) en Cabauw.....	113
Figura 15.42 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación global en Ilorin	114
Figura 15.43 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación directa (Reindl) en Ilorin.....	114
Figura 15.44 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación directa (Orgill Hollands) en Ilorin	115
Figura 15.45 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación directa (Erbs) en Ilorin	116
Figura 15.46 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación global en Payerne	117
Figura 15.47 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación directa (Reindl) en Payerne	118
Figura 15.48 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación directa (Orgill Hollands) en Toravere	118

Figura 15.49 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación directa (Erbs) en Payerne	119
Figura 15.50 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación directa (Louche) en Toravere	120
Figura 15.51 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación global en Tamanrasset.....	120
Figura 15.52 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación directa (Reindl) en Tamanrasset	121
Figura 15.53 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación directa (Orgill Hollands) en Tamanrasset.....	122
Figura 15.54 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación directa (Erbs) en Tamanrasset.....	122
Figura 15.55 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación directa (Louche) en Tamanrasset.....	123
Figura 15.56 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación global en Toravere	124
Figura 15.57 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación directa (Reindl) en Toravere.....	124
Figura 15.58 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación directa (Orgill Hollands) en Toravere	125
Figura 15.59 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación directa (Erbs) en Toravere	126
Figura 15.60 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación directa (Louche) en Toravere	126
Figura 15.61 - Comparación errores con modelo CENER corregido (Erbs) en Cabauw	128
Figura 15.62 - Comparación errores con modelo CENER corregido (Louche) en Cabauw	128
Figura 15.63 - Comparación errores entre modelo CENER original y modificado (Erbs) en Cabauw.....	129
Figura 15.64 - Comparación errores entre modelo CENER original y modificado (Louche) en Cabauw.....	129
Figura 15.65 - Comparación errores con modelo CENER corregido (Erbs) en Ilorin.....	130
Figura 15.66 - Comparación errores con modelo CENER corregido (Louche) en Ilorin	130
Figura 15.67 - Comparación errores entre modelo CENER original y modificado (Erbs) en Ilorin	131
Figura 15.68 - Comparación errores entre modelo CENER original y modificado (Louche) en Ilorin	131
Figura 15.69 - Comparación errores con modelo CENER corregido (Erbs) en Payerne	132
Figura 15.70 - Comparación errores con modelo CENER corregido (Louche) en Payerne	132
Figura 15.71 - Comparación errores entre modelo CENER original y modificado (Erbs) en Payerne	133
Figura 15.72 - Comparación errores entre modelo CENER original y modificado (Louche) en Payerne	133
Figura 15.73 - Comparación errores con modelo CENER corregido (Erbs) en Tamanrasset	134
Figura 15.74 - Comparación errores con modelo CENER corregido (Louche) en Tamanrasset	134

Figura 15.75 - Comparación errores entre modelo CENER original y modificado (Erbs) en Tamanrasset.....	135
Figura 15.76 - Comparación errores entre modelo CENER original y modificado (Louche) en Tamanrasset.....	135
Figura 15.77 - Comparación errores con modelo CENER corregido (Erbs) en Toravere.....	136
Figura 15.78 - Comparación errores con modelo CENER corregido (Louche) en Toravere.....	136
Figura 15.79 - Comparación errores entre modelo CENER original y modificado (Erbs) en Toravere.....	137
Figura 15.80 - Comparación errores entre modelo CENER original y modificado (Louche) en Toravere.....	137
Figura 15.81 – Comparación errores estimación radiación directa por los diferentes modelos (Cabauw).....	138
Figura 15.82 - Comparación errores estimación radiación directa por los diferentes modelos (Ilorin).....	139
Figura 15.83 - Comparación errores estimación radiación directa por los diferentes modelos (Payerne).....	139
Figura 15.84 - Comparación errores estimación radiación directa por los diferentes modelos (Tamanrasset).....	139
Figura 15.85 - Comparación errores estimación radiación directa por los diferentes modelos (Toravere).....	140
Figura 16.1 – Sección <i>Directorio de trabajo</i>	141
Figura 16.2 – Sección <i>Librerías</i>	142
Figura 16.3 – Sección <i>Funciones</i>	142
Figura 16.4 – Sección <i>Archivos NetCDF</i>	142
Figura 16.5 – Sección <i>Datos generales constantes</i>	143
Figura 16.6 – Página MACC Reanalysis.....	144
Figura 16.7 – Selección del intervalo de tiempo (MACC Reanalysis).....	144
Figura 16.8 – Selección de las horas y del paso (MACC Reanalysis).....	144
Figura 16.9 – Selección del parámetro a obtener (MACC Reanalysis).....	145
Figura 16.10 – Resumen del pedido (MACC Reanalysis).....	145
Figura 16.11 – Selección de área de estudio (MACC Reanalysis).....	145
Figura 16.12 – Selección del paso entre puntos (MACC Reanalysis).....	146
Figura 16.13 – Página DIVA-GIS para la descarga de mapas de altitud.....	147
Figura 16.14 – Archivo descargado de la página DIVA-GIS.....	147
Figura 16.15 – Descompresión del archivo descargado de la página DIVA-GIS.....	147
Figura 16.16 – Datos presentes en el archivo con extensión *.grd.....	148
Figura 16.17 – Construcción vectores de longitudes y latitudes.....	148
Figura 16.18 – Mapa altitudes georreferenciado.....	149
Figura 16.19 – Mapa comparativo de cotas.....	149
Figura 16.20 – Página de SODA para obtener los datos de Turbidez de Linke.....	149
Figura 16.21 – Ejemplo de mapa de irradiancia directa generado.....	151
Figura 16.22 – Diagrama del proceso de ejecución del bucle principal del software.....	152

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 7.1 – Valores frecuentes del factor de turbidez de Linke.....	35
Tabla 7.2 – Instrumentos meteorológicos para medida de radiación solar	37
Tabla 7.3 – Clasificación de los piranómetros según norma ISO 9060	38
Tabla 8.1 – Satélites Meteosat.....	40
Tabla 8.2 – Elipsoides más frecuentemente utilizados	43
Tabla 10.1 - Tabla comparativa de las medias calculadas para Tbilisi	52
Tabla 10.2 – Tabla comparativa de las desviaciones calculadas para Tbilisi.....	52
Tabla 15.1 – Datos geográficos de las estaciones.....	83
Tabla 15.2 - Errores en la estimación de la radiación global horaria en Cabauw	85
Tabla 15.3 – Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Reindl en Cabauw	86
Tabla 15.4 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Orgill Hollands en Cabauw.....	87
Tabla 15.5 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Erbs en Cabauw ...	87
Tabla 15.6 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Louche en Cabauw	88
Tabla 15.7 - Errores en la estimación de la radiación global horaria en Ilorin.....	89
Tabla 15.8 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Reindl en Ilorin.....	90
Tabla 15.9- Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Orgill Hollands en Ilorin	90
Tabla 15.10 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Erbs en Ilorin.....	91
Tabla 15.11 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Louche en Ilorin .	92
Tabla 15.12 - Errores en la estimación de la radiación global horaria en Payerne.....	93
Tabla 15.13 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Reindl en Payerne	93
Tabla 15.14 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Orgill Hollands en Payerne	94
Tabla 15.15 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Erbs en Payerne .	95
Tabla 15.16 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Louche en Payerne	95
Tabla 15.17 - Errores en la estimación de la radiación global horaria en Tamanrasset	96
Tabla 15.18 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Reindl en Tamanrasset.....	97
Tabla 15.19 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Orgill Hollands en Tamanrasset.....	98
Tabla 15.20 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Erbs en Tamanrasset.....	98
Tabla 15.21 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Louche en Tamanrasset.....	99
Tabla 15.22 - Errores en la estimación de la radiación global horaria en Toravere.....	100
Tabla 15.23 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Reindl en Toravere	101
Tabla 15.24 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Orgill Hollands en Toravere	101

Tabla 15.25 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Erbs en Toravere	102
Tabla 15.26 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Louche en Toravere	103
Tabla 15.27 - Errores en la estimación de la radiación global horaria en Cabauw (ESRA)	110
Tabla 15.28 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Reindl en Cabauw (ESRA)	111
Tabla 15.29 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Orgill Hollands en Cabauw (ESRA)	111
Tabla 15.30 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Erbs en Cabauw (ESRA)	112
Tabla 15.31 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Louche en Cabauw (ESRA)	113
Tabla 15.32 - Errores en la estimación de la radiación global horaria en Ilorin (ESRA)	113
Tabla 15.33 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Reindl en Ilorin (ESRA)	114
Tabla 15.34 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Orgill Hollands en Ilorin (ESRA)	115
Tabla 15.35 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Erbs en Ilorin (ESRA)	115
Tabla 15.36 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación directa (Erbs) en Ilorin	116
Tabla 15.37 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Louche en Ilorin (ESRA)	116
Tabla 15.38 - Errores en la estimación de la radiación global horaria en Payerne (ESRA)	117
Tabla 15.39 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Reindl en Payerne (ESRA)	117
Tabla 15.40 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Orgill Hollands en Payerne (ESRA)	118
Tabla 15.41 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Erbs en Payerne (ESRA)	119
Tabla 15.42 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Louche en Toravere (ESRA)	119
Tabla 15.43 - Errores en la estimación de la radiación global horaria en Tamanrasset (ESRA)	120
Tabla 15.44 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Reindl en Tamanrasset (ESRA)	121
Tabla 15.45 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Orgill Hollands en Tamanrasset (ESRA)	121
Tabla 15.46 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Erbs en Tamanrasset (ESRA)	122
Tabla 15.47 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Louche en Tamanrasset (ESRA)	123
Tabla 15.48 - Errores en la estimación de la radiación global horaria en Toravere (ESRA)	123
Tabla 15.49 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Reindl en Toravere (ESRA)	124

Tabla 15.50- Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Orgill Hollands en Toravere (ESRA).....	125
Tabla 15.51 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Erbs en Toravere (ESRA).....	125
Tabla 15.52 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Louche en Toravere (ESRA).....	126
Tabla 16.1 – Características del ordenador.....	155
Tabla 16.2 – Tiempos de ejecución según el modelo	155

upna
Universidad
Pública de Navarra
Nafarroako
Unibertsitate Publikoa

Memoria

Estimación de la radiación solar a partir de imágenes de satélite:
Implementación del método Heliosat

Autor: Darío Jiménez Galán

Peticionario: CENER.

Titulación: Máster en Ingeniería Industrial

Director: Fermín Francisco Mallor Giménez

Departamento: Estadística e Investigación Operativa

Curso: 2015/2016

Lugar y fecha: Pamplona, 20 de Junio de 2016

ÍNDICE MEMORIA

1.	INTRODUCCIÓN	21
2.	OBJETIVO	22
3.	ALCANCE.....	22
4.	ANTECEDENTES	23
5.	NORMAS.....	23
6.	DEFINICIONES Y ABREVIATURAS	24
7.	INTRODUCCIÓN A LOS CONCEPTOS DE RADIACIÓN SOLAR.....	27
7.1.	Sistema de referencia temporal.....	28
7.2.	Sistema de referencia espacial.....	30
7.3.	Interacción de la radiación solar con la atmósfera	32
7.4.	Radiación solar sobre la superficie terrestre	35
7.5.	El modelo de cielo claro ESRA	35
7.6.	Instrumentación y medida de la radiación solar.....	36
8.	INTRODUCCIÓN A LOS CONCEPTOS DE TELEDETECCIÓN	39
8.1.	Plataformas, sensores y canales	39
8.2.	Satélites Meteosat	40
8.3.	Georreferenciación imágenes de satélite	43
9.	INTRODUCCIÓN AL LENGUAJE R	46
10.	TRATAMIENTO DE IMÁGENES.....	48
10.1.	Planteamiento del problema	48
10.2.	Utilización de filtros.....	49
10.3.	Resultados obtenidos.....	52
10.4.	Conclusiones.....	53
11.	ESTUDIO DE LOS MÉTODOS HELIOSAT-1 Y HELIOSAT-2	62
11.1.	Método Heliosat-1	62
11.2.	Método Heliosat-2	65
11.3.	Método implementado en CENER	68
12.	GENERACIÓN PROGRAMA PARA RELLENO DE HUECOS.....	75
12.1	Resultados obtenidos.....	75
12.2.	Conclusiones.....	77
13.	ANÁLISIS DE LOS PICOS DE RADIACIÓN.....	78

13.1.	Búsqueda del origen.....	78
13.2.	Solución adoptada.....	78
14.	IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO SOLIS.....	80
14.1.	Desarrollo	80
14.2.	Conclusiones.....	82
15.	VALIDACIÓN DEL MODELO SOLIS.....	83
15.1.	Modo de cálculo de los errores.....	84
15.2.	Resultados obtenidos.....	85
15.2.1.	Análisis de los resultados de la validación	108
15.3.	Comparación de los resultados con modelo de CENER	110
15.3.1.	Conclusiones de la comparación con modelo de CENER	127
15.4.	Comparación de los resultados con modelo de CENER modificado	127
15.4.1.	Conclusiones de la comparación con el modelo de CENER modificado	138
15.5.	Comparación de los modelos de directa.....	138
16.	CREACIÓN SOFTWARE PARA GENERAR MAPAS DE RADIACIÓN	141
16.1.	Análisis resultados de la generación de mapas.....	153
16.2.	Optimización del software	154
17.	CONCLUSIONES	157
18.	BIBLIOGRAFÍA.....	159

1. INTRODUCCIÓN

El proyecto de estudio surge de la necesidad de la empresa CENER de actualizar su método Heliosat ya implantado y listo para la estimación de la radiación solar que llega a la tierra.

Actualmente CENER tiene implementada una combinación de versiones que utiliza tanto partes de Heliosat-1 como de Heliosat-2. Sin embargo, existen nuevas versiones del método mejor adaptado a los satélites de segunda generación como el método Heliosat-3. Estas dos últimas versiones ya están preparadas para trabajar con los satélites Meteosat de segunda generación (MSG), los cuales proporcionan unos datos de partida más fiables que sus predecesores.

Otro punto de interés para CENER es la disposición de un software para generar mapas de radiación empleando el nuevo modelo de Heliosat implementado. En la actualidad la generación de mapas de recurso es una herramienta muy útil durante los estudios previos sobre un país o zona geográfica y, en el caso del recurso solar, uno de los métodos más utilizados es el desarrollo de mapas a partir de históricos de imágenes de satélites.

De acuerdo a lo expuesto, CENER decidió sacar a concurso este proyecto dentro del marco de la Cátedra de Energías Renovables (acuerdo de colaboración científico tecnológico que mantiene la Universidad Pública de Navarra y las empresas GAMESA, INGETEAM, CENER, ACCIONA ENERGÍA y ACCIONA WINDPOWER) siendo yo el destinatario del mismo y por tanto el encargado de su correcto desarrollo y finalización.

2. OBJETIVO

El primer objetivo de este proyecto es analizar e implementar los algoritmos de la última versión disponible del método Heliosat para estimar la radiación solar a partir de las imágenes de satélite. En la actualidad, CENER tiene implementada una combinación que emplea parte de los métodos Heliosat-1 y Heliosat-2 a tal efecto. EL objetivo final es sustituir el método que se tiene implementado y que se emplea en la actualidad por una versión más actualizada del mismo.

El segundo objetivo consiste en el desarrollo e implementación del software necesario para generar mapas de radiación a partir de históricos de imágenes de satélites disponibles, empleando para ello el nuevo modelo de Heliosat, implementado también en el presente proyecto. Además el software a desarrollar debe ser modular para poder integrar futuras versiones y avances de los modelos así como ejecutarlo en el cluster de cálculo de CENER. De esta manera, no solo se pretende el desarrollo e implementación del software, sino también que sea lo más eficiente y versátil posible.

3. ALCANCE

El alcance o tareas que se llevarán a cabo durante su desarrollo serán las siguientes:

- Elaborar el estado del arte acerca de los métodos publicados sobre la estimación de la radiación solar a partir de imágenes de satélite.
- Selección del método más apropiado en función de sus características.
- Implementación de las ecuaciones del método seleccionado en el lenguaje de programación R.
- Implementación del software para la generación de mapas.

Como consecuencia de las tareas a realizar, se obtendrán los resultados que se detallan a continuación:

- Actualización de la herramienta de CENER para estimar la radiación solar a partir de imágenes de satélite.
- Estimación de la radiación solar con mejor precisión y mayor resolución espacial.
- Obtención de variables adicionales específicas para la energía solar térmica de concentración, como la Irradiancia Normal Directa (DNI) y la distribución angular de la Irradiancia Difusa.
- Herramientas de generación de mapas de radiación en base a imágenes de satélite.
- Creación de fuentes de información para generar mapas más robustos y fiables.

4. ANTECEDENTES

Como ya se ha mencionado antes, CENER dispone de herramientas para la estimación de la radiación solar a partir de imágenes de satélite, pero no tiene integradas las últimas versiones disponibles de algunas de ellas.

Así la idea de elaborar este proyecto surge de esta necesidad de actualizar estas herramientas y como consecuencia obtener unos datos más precisos y de mayor calidad que los obtenidos hasta ahora.

5. NORMAS

- *UNE 157001*: Criterios generales para la elaboración de proyectos
- *UNE 157001:2002*: Sobre criterios generales para la elaboración de proyectos, que establece las consideraciones generales que permitan precisar las características que deben satisfacer los proyectos de productos, obras y edificios, instalaciones, servicios o software, para que sean conformes al fin que están destinados.
- *ANSI C*: Estándar publicado por el instituto Nacional de Estándares para la programación en lenguaje C para garantizar la portabilidad del código desarrollado.

6. DEFINICIONES Y ABREVIATURAS

A continuación se presenta una descripción detallada de los símbolos utilizados a lo largo de este proyecto así como de sus unidades y rango. Se presentan listados en orden alfabético, omitiendo aquellos que sólo se usan como apoyo para la definición de otra variable y/o parámetro dentro de una ecuación.

Para la asignación de los símbolos se han seguido las recomendaciones aceptadas internacionalmente en el campo de la energía solar [1], en caso de duplicidad en la simbología recomendada, se han adoptado símbolos alternativos.

En cuanto a subíndices y superíndices utilizados, el criterio que se ha procurado seguir es:

- Subíndices: Representan una variación cualitativa sobre la magnitud que el símbolo subindexado representa, por ejemplo, el subíndice c como modificador de la irradiancia representa el valor correspondiente al modelo de cielo claro.
- Superíndices: Representan una variación cuantitativa sobre la magnitud que el símbolo superindexado representa, por ejemplo, el superíndice t indica que la variable modificada corresponde a una serie temporal.

Además de los pertinentes símbolos también se incluye una lista con los acrónimos y abreviaturas que aparecen en este proyecto. Como en el caso de los símbolos, son descritos la primera vez que aparecen en el texto.

Símbolo	Magnitud	Rango, signo y unidades
B	Irradiancia solar directa	$W m^{-2}$
B_c	Irradiancia solar directa para cielo claro	$W m^{-2}$
c	Velocidad de la luz en el vacío	$m s^{-1}$
CC	Coefficiente de calibración del sensor del satélite	$W m^{-2} sr^{-1}$
CC_0	Coefficiente de calibración del sensor en el momento del lanzamiento del satélite	$W m^{-2} sr^{-1}$
D	Irradiancia solar difusa	$W m^{-2}$
D_c	Irradiancia solar difusa para cielo claro	$W m^{-2}$
D_s	Deriva diaria del sensor del satélite	$W m^{-2} sr^{-1} día^{-1}$
E	Irradiancia	$W m^{-2}$
fow	Campo de visión del satélite Meteosat	$18^{\circ} \times 18^{\circ}$
G	Irradiancia solar global	$W m^{-2}$
G_c	Irradiancia solar global para cielo claro	$W m^{-2}$
h	Constante de Planck	$6,6262 \cdot 10^{-34} J s$
I_{CS}	Constante solar	$1367 W m^{-2}$
I_0	Irradiancia solar extraterrestre	$W m^{-2}$
J_d	Día juliano	$1 \sim 366$
k	Constante de Boltzmann	$1,3806 \cdot 10^{-23} J K^{-1}$
k_d	Fracción de irradiancia difusa	
k_b	Transmitancia directa	
K_C	Índice de cielo claro	

Símbolo	Magnitud	Rango, signo y unidades
K_T	Índice de transparencia atmosférica	$W m^{-2}$
l	Altitud sobre el nivel del mar	$W m^{-2}$
L	Radiancia	$m s^{-1}$
L_0^{met}	Radiación máxima detectable por el satélite	$W m^{-2} sr^{-1}$
m	Masa óptica relativa del aire	$W m^{-2} sr^{-1}$
n	Coefficiente de cobertura nubosa	$W m^{-2}$
ND	Nivel digital	$W m^{-2}$
ND^*	Nivel digital suavizado	$W m^{-2} sr^{-1} día^{-1}$
ND_0	Offset del sensor	$W m^{-2}$
ND_C	Nivel digital corregido	$180^\circ \times 180^\circ$
Q	Energía electromagnética	$W m^{-2}$
R_E	Radio ecuatorial terrestre	$W m^{-2}$
R_P	Radio polar terrestre	$6,6262 \cdot 10^{-34} J s$
R_S	Radio orbital del satélite Meteosat	$1367 W m^{-2}$
T_L	Factor de turbidez de Linke	$W m^{-2}$
T	Temperatura	
α	Altura solar	$1,3806 \cdot 10^{-23} J K^{-1}$
α_b	Absortancia	
β	Inclinación de una superficie	radianes
Γ	Angulo diario	$0 \sim 2\pi$ radianes
γ	Azimut de una superficie	radianes
δ	Declinación	$-0,41 \sim 0,41$ radianes
δ_r	Profundidad óptica de Rayleigh	
ε	Excentricidad de la órbita terrestre	m
ε_m	Emitancia	
θ	Ángulo de incidencia	$0 \sim \pi/2$ radianes
θ_z	Ángulo cenital	$0 \sim \pi/2$ radianes
Λ	Longitud geográfica	$-180^\circ \sim 180^\circ /$ Oeste \sim Este
ϕ	Latitud geográfica	$-180^\circ \sim 180^\circ /$ Sur \sim Norte
λ	Longitud de onda	m
ρ	Reflectancia o albedo	
σ	Constante solar de Stefan-Boltzmann	$5,6704 \cdot 10^{-8} J s^{-1} m^{-2} K^{-4}$
τ	Transmitancia	
U	Frecuencia	s^{-1}
ψ	Ángulo acimutal	$-\pi \sim \pi$ radianes ($\omega > 0$ AM)
ω	Angulo horario	$-\pi \sim \pi$ radianes ($\omega > 0$ AM)
ω_{oc}	Ángulo de ocaso	radianes, $\omega_{oc} < 0$
ω_{or}	Ángulo de orto	radianes, $\omega_{or} > 0$

Lista de acrónimos, siglas y abreviaturas

ASTM	American Society for Testing and Materials
BGS	Back-up Ground Station (located in Cheia, Romania)
BSRN	Baseline Surface Radiation Network
CIEMAT	Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
CMT	Centro Meteorológico Territorial
DCP	Data Collection Platform
DER	Departamento de Energías Renovables
ESA	European Space Agency
ESOC	European Space Operations Centre (located in Darmstadt, Germany)
EUMETSAT	European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites

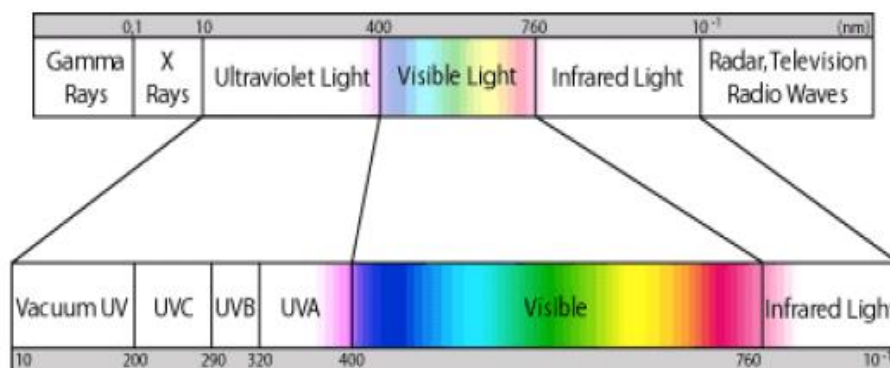
7. INTRODUCCIÓN A LOS CONCEPTOS DE RADIACIÓN SOLAR

La radiación solar es el resultado del proceso de fusión nuclear que se lleva a cabo en el Sol. Esta energía llega en forma de luz y calor y es el motor que mueve el medio ambiente, es decir, establece ciclos naturales como los del agua y el carbono y da lugar al resto de energías naturales. La energía solar que recibe la Tierra es 5000 veces más grandes que el resto de energías juntas (geotérmica, eólica, hidráulica, nuclear...) y 10000 veces mayor que la energía que actualmente consume la humanidad.

La radiación es transferencia de energía por ondas electromagnéticas y se produce directamente desde la fuente hacia afuera en todas las direcciones. Estas ondas se propagan por el vacío, no necesitan un medio de propagación.

La longitud de onda y frecuencia de las ondas electromagnéticas sirven para determinar tanto su energía como su viabilidad y poder de penetración. La velocidad a la que se desplazan todas las ondas electromagnéticas en el vacío es de 299792 km/s.

Se denomina como espectro electromagnético al conjunto de todas las longitudes de onda, llamándose así *espectro solar* al conjunto de ondas emitidas por el Sol:



La proporción en la que aparecen las diferentes ondas en la radiación solar es:

- Ultravioleta: 7%
- Luz visible: 43%
- Infrarrojo: 49%
- El resto: 1%

De toda esta energía emitida por el Sol solo una parte de la misma llega a la superficie de la Tierra. Esto se debe a la existencia de una atmósfera, sobre la superficie terrestre, la cual interacciona con la radiación solar modificando la cantidad de energía que llega. La atmósfera puede contener tanto aerosoles, vapor de agua, partículas en suspensión como nubes y otros elementos que son los causantes de estas interacciones. Así resulta atractivo definir primeramente el Sol y su relación con el planeta Tierra.

El Sol es una estrella de tipo G y de clase de luminosidad clase V, tiene un diámetro de $1,39 \cdot 10^6$ km y un peso de $1,99 \cdot 10^{30}$ kg. Se encuentra a una distancia media de la Tierra de 150

millones de kilómetros, por lo que la luz tarda en recorrer esta distancia 8 minutos y 19 segundos. Como ya se ha mencionado antes, en el interior del Sol se producen procesos de fusión nuclear lo cual hace que su temperatura sea elevada y varíe entre 4700 – 7500 K.

Si se definen como constantes tanto la temperatura del Sol como su espectro de radiación, se puede estimar la cantidad de energía que incide sobre la superficie de la atmósfera en función de las posiciones relativas del Sol y la Tierra. Como la Tierra gira sobre sí misma y alrededor del Sol se precisa definir un sistema de referencia espacio-temporal.

7.1. Sistema de referencia temporal

En primer lugar hay que definir el concepto de *día solar*. Éste es el intervalo de tiempo que transcurre entre el instante en que el Sol cruza un meridiano local y el instante en que vuelve a cruzarlo. En realidad un *día terrestre* es 4 minutos inferior que un día solar debido a los movimientos de rotación y traslación. Además la duración de un día solar varía a lo largo del año ya que varían los siguientes parámetros:

- La inclinación del eje de rotación de la Tierra respecto al plano de traslación alrededor del Sol.
- La distancia entre el Sol y la Tierra.

Cualquier persona puede ver como a lo largo del día el Sol se desplaza sobre el cielo. De este modo se define *mediodía solar* como el instante de tiempo en que el Sol intercepta el plano meridiano del lugar, instante en que el Sol alcanza su máxima elevación sobre el horizonte. El amanecer y el ocaso son simétricos respecto de este punto.

Se denomina *tiempo solar verdadero o tiempo local aparente (TSV)* al tiempo contado a partir del mediodía solar. Sin embargo, los relojes se guían según la *hora oficial o tiempo local medio (TLM)*. En este sistema las horas de amanecer y ocaso se determinan a partir de la longitud geográfica (Λ), perdiendo simetría y desfasándose 4 minutos por grado de longitud. En ambos sistemas la longitud del día es función del día Juliano ($J_d = 1- 366$ días) y de la latitud geográfica (Φ).

Para pasar de la hora oficial a la hora solar local hacen falta dos correcciones [2]:

- La diferencia entre la longitud geográfica del meridiano del observador y la del meridiano de referencia donde se establece la hora local (4 minutos por grado)
- Los efectos producidos por la excentricidad de la órbita terrestre, la constancia de la velocidad areolar (2ª Ley de Kepler) y los movimientos de precesión y nutación del eje de rotación terrestre. Esto se recoge en la ecuación del tiempo (ET)

A veces también hay que incluir una corrección horaria (C_h) que contemple los cambios horarios debidos a un ahorro energético (en España $C_h = 1$ en invierno y $C_h = 2$ en verano). Así se puede escribir, en hora decimal, la siguiente expresión [3]

$$TSV = TLM + \frac{(\Lambda_{of} - \Lambda_{loc})}{15} + \frac{ET}{60} + C_h \quad (7.1)$$

Siendo:

- Λ_{of} la longitud del meridiano de referencia oficial
- Λ_{loc} la longitud local

Un modo de calcular la ecuación del tiempo es la que propone Spencer [4]:

$$ET = 229,18(0,000075 + 0,001868 \cdot \cos \Gamma - 0,032077 \cdot \sin \Gamma - 0,014615 \cdot \cos 2\Gamma - 0,040849 \cdot \sin 2\Gamma) \quad (7.2)$$

Donde Γ representa el *ángulo diario* que es función del día juliano (J_d) y se puede calcular, en radianes:

$$\Gamma = 2\pi \cdot J_d / 365,24 \quad (7.3)$$

En la Figura 7.1 se puede observar los valores que toma la ecuación del tiempo en función del día del año.

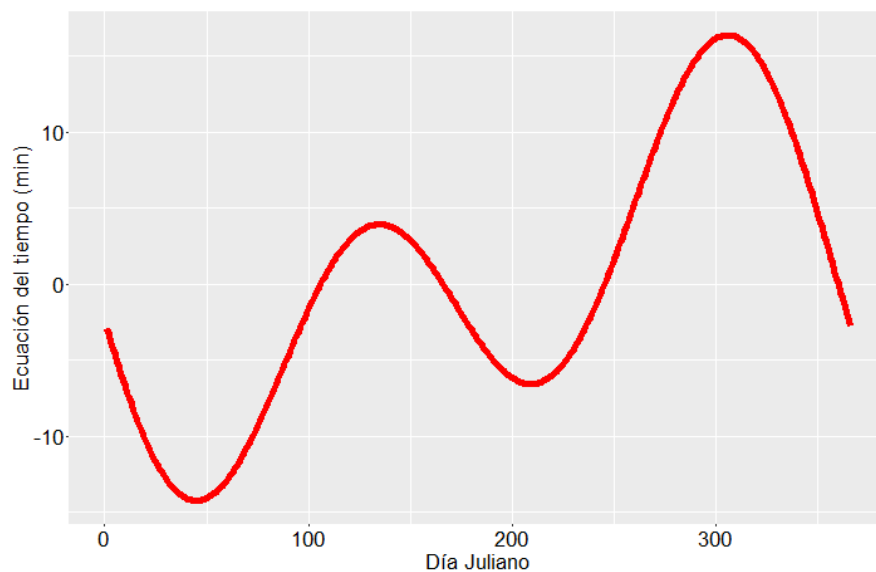


Figura 7.1 – Ecuación del tiempo en minutos

El sistema de referencia temporal que normalmente se usa es el tiempo solar verdadero, por lo que este será el empleado en adelante.

Se denomina *ángulo horario* (ω) al ángulo que forma el meridiano de paso del Sol en un instante de tiempo dado con el meridiano del observador. En la mayoría de los casos se asigna $\omega = 0$ al mediodía solar. Algunos autores toman valores positivos los anteriores al mediodía y negativos los posteriores mientras que otros definen los signos al revés. Este parámetro se calcula, en radianes, de la siguiente manera:

$$\omega = \frac{\pi(TSV - 12)}{12} \quad (7.4)$$

7.2. Sistema de referencia espacial

Es necesario conocer los parámetros geométricos que describen la posición del Sol respecto a una localización concreta cuando se quieren efectuar los cálculos solares para ese punto.

El planeta Tierra realiza una órbita eclíptica alrededor del Sol. Debido a esto la distancia entre ambos varía un 1,7% aproximadamente entre la distancia mínima o perihelio ($1,46 \cdot 10^8$ km) y la máxima o afelio ($1,52 \cdot 10^8$ km). La distancia media, denominada *unidad astronómica* (UA), es de $1,496 \cdot 10^8$ km.

Además de la traslación, nuestro planeta gira alrededor de un eje que forma un ángulo de $23^\circ 27'$ con el plano de la eclíptica. Como la Tierra no es una esfera perfecta, debido a los campos gravitacionales del Sol y la Luna, se produce un efecto de precesión, esto es, un desplazamiento en sentido inverso al eje de rotación describiendo un cono de 47° de apertura con un periodo de 25765 años. Al mismo tiempo se produce un efecto de nutación, variación periódica, de 18,6 años, de la inclinación del eje de la Tierra, entre $6''$ y $9''$.

Para referenciar las posiciones relativas del Sol y la Tierra se emplea el modelo de Ptolomeo, es decir, se supone que el Sol realiza un movimiento de rotación en torno a la Tierra (sistema de coordenadas eclípticas geocéntrico)

Se usan tres parámetros para determinar la posición del Sol respecto a un observador: latitud geográfica (Φ), día juliano (J_d) y ángulo diario (Γ).

Se define *declinación* (δ) al ángulo que forma el plano ecuatorial terrestre con el plano que contiene la eclíptica. Este se puede evaluar mediante diferentes aproximaciones, en radianes [5] [4]:

$$\delta = \frac{\pi}{180} 23,45 [360(284 + J_d)/365] \quad (7.5)$$

$$\delta = 0,006918 - 0,399912 \cos \Gamma + 0,070257 \sin \Gamma - 0,006758 \cos 2\Gamma + 0,000907 \sin 2\Gamma - 0,002697 \cos 3\Gamma + 0,001480 \sin 3\Gamma \quad (7.6)$$

O expresiones más complejas que tienen en cuenta la longitud geográfica del punto de observación [6] [7]:

$$\delta = 0,0064979 + 0,4059059 \cdot \sin \Gamma_c + 0,0020054 \sin 2\Gamma_c - 0,002988 \cdot \sin 3\Gamma_c - 0,0132296 \cdot \cos \Gamma_c + 0,0063809 \cdot \cos 2\Gamma_c + 0,0003508 \cdot \cos 3\Gamma_c \quad (7.7)$$

Donde Γ_c representa el *ángulo diario corregido* según longitud geográfica y año:

$$J_0 = -0,5 - \frac{\Lambda}{2\pi} - [78,8946 + 0,2422(\text{año} - 1957) - 0,25(\text{año} - 1957)] \quad (7.8)$$

$$\Gamma_c = (J_d + J_0) \frac{2\pi}{365,2422}$$

Se define un sistema de referencia espacial con un sistema de referencia inercial con origen en un punto P , donde se encuentra el observador, y los siguientes vectores:

- \vec{u}_r Vector unitario según la normal a la superficie de la Tierra en P
- \vec{u}_ϕ Vector unitario tangente en P , contenido en el plano meridiano del lugar y con el sentido de latitudes decrecientes.
- \vec{u}_λ Vector unitario tangente en P , contenido en el plano paralelo del lugar y orientado hacia el este

Con los datos de latitud, declinación solar y ángulo horario, el vector de posición del Sol \vec{u}_s en este sistema de referencia puede definirse mediante:

$$\vec{u}_s = (\cos \omega \cos \delta \sin \Phi - \sin \delta \cos \Phi)\vec{u}_\phi + (\sin \omega \cos \delta)\vec{u}_\lambda + (\cos \delta \cos \Phi \cos \omega + \sin \delta \sin \Phi)\vec{u}_r \quad (7.9)$$

Si se denomina *ángulo cenital solar* (θ_z) al ángulo que forman los vectores \vec{u}_s y \vec{u}_r , y *azimut* (ψ) al ángulo formado por la proyección de dicho vector sobre un plano horizontal tangente a la superficie de la Tierra en P y el vector \vec{u}_λ , la ecuación anterior queda:

$$\vec{u}_s = (\cos \psi \sin \theta_z)\vec{u}_\phi + (\sin \psi \sin \theta_z)\vec{u}_\lambda + (\cos \theta_z)\vec{u}_r \quad (7.10)$$

Observando las ecuaciones (7.9) y (7.10) los ángulos cenital y azimutal pueden ser calculados:

$$\theta_z = \cos^{-1}(\sin \delta \sin \Phi + \cos \delta \cos \omega \cos \Phi) = \left(\frac{\pi}{2}\right) - \alpha \quad (7.11)$$

$$\psi = \cos^{-1}[(\cos \theta_z \sin \Phi - \sin \delta) / (\sin \theta_z \cos \Phi)] = \sin^{-1}[\cos \delta \sin \omega / \sin \theta_z] \quad (7.12)$$

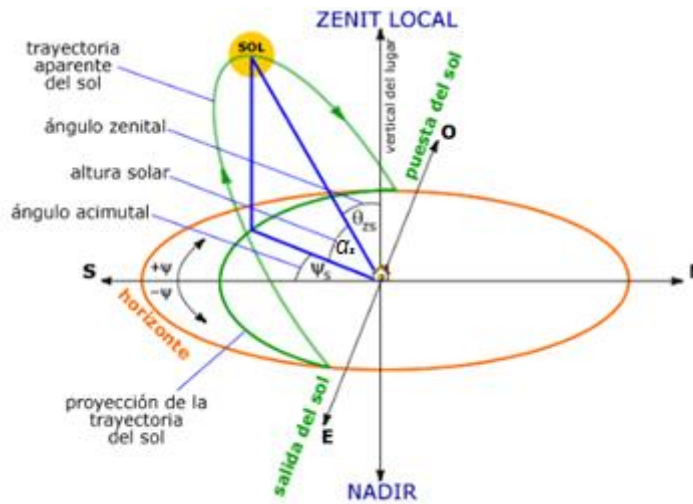


Figura 7.2 – Ángulos solares

Altura o elevación solar (α) es el ángulo que subtiende el vector posición solar con el plano horizontal tangente a la superficie terrestre en P , complementario al ángulo cenital. Para calcular los ángulos del amanecer u orto (ω_{or}) y de la puesta de sol u ocaso (ω_{oc}) simplemente hay que igualar a cero la altura solar:

$$\omega_{or} \text{ ó } \omega_{oc} = \cos^{-1}(-\tan \delta \tan \Phi) \quad (7.13)$$

Ambos son simétricos y tienen signo positivo o negativo dependiendo el convenio adoptado.

7.3. Interacción de la radiación solar con la atmósfera

Definida la *irradiancia solar* como la densidad de flujo radiante de origen solar, se denomina *constante solar* (I_{CS}) a la irradiancia solar sobre una superficie plana normal al vector posición del Sol ubicada en el límite superior de la atmósfera terrestre. El valor de esta constante ha ido variando a lo largo de los años en función de las distintas mediciones. Actualmente se considera que tiene un valor de 1367 Wm^{-2} , el cual proviene de las estimaciones realizadas por el Centro Radiológico Mundial (WRC) y adoptado por la Organización Meteorológica Mundial.

Debido a la excentricidad en la órbita terrestre este nivel de radiación no es constante a lo largo del año. Según la Ley del cuadrado tiene una variación estacional del 3,3%. La *excentricidad de la órbita terrestre* (ε) se puede calcular de diversas maneras:

$$[4] \quad \varepsilon = 1,000110 + 0,034221 \cdot \cos \Gamma + 0,001280 \cdot \sin \Gamma \quad (7.14)$$

$$[2] \quad \varepsilon = 1 + 0,03344 \cdot \cos\left(\Gamma - 2,8 \frac{\pi}{180}\right) \quad (7.15)$$

La energía que recibe una superficie normal a la dirección del vector posición del Sol se denomina *irradiancia solar extraterrestre* (I_{0n}) y representa la variación estacional de la constante solar debido a la excentricidad:

$$I_{0n} = \varepsilon \cdot I_{CS} \quad (7.16)$$

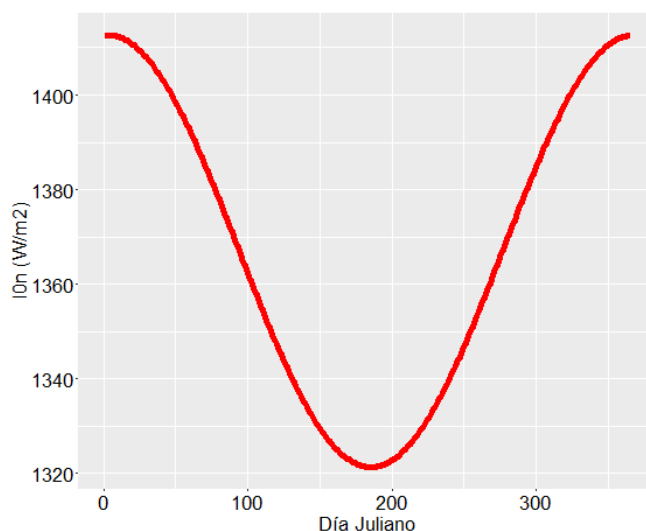


Figura 7.3 – Variación de la irradiancia solar terrestre a lo largo del año

A partir de la expresión anterior se puede calcular la irradiancia recibida por una superficie plana tangente a la superficie terrestre en el límite superior de la atmósfera (I_0):

$$I_0 = \varepsilon \cdot I_{CS} \cdot \cos \theta_z \quad (7.17)$$

En su paso por el espacio la radiación no sufre modificaciones pero cuando pasa a través de la atmósfera sufre diversos procesos de reflexión, atenuación y difusión debido a su

interacción con los distintos componentes atmosféricos: aerosoles, nubes y moléculas de ozono, anhídrido carbónico, oxígeno, agua, etc. Entre estos efectos destacan:

- Disminución de la energía radiante total registrada a nivel del suelo respecto de la recibida en el límite superior de la atmósfera.
- Modificación de las características espectrales de la radiación.
- Modificación de la distribución espacial de ésta.

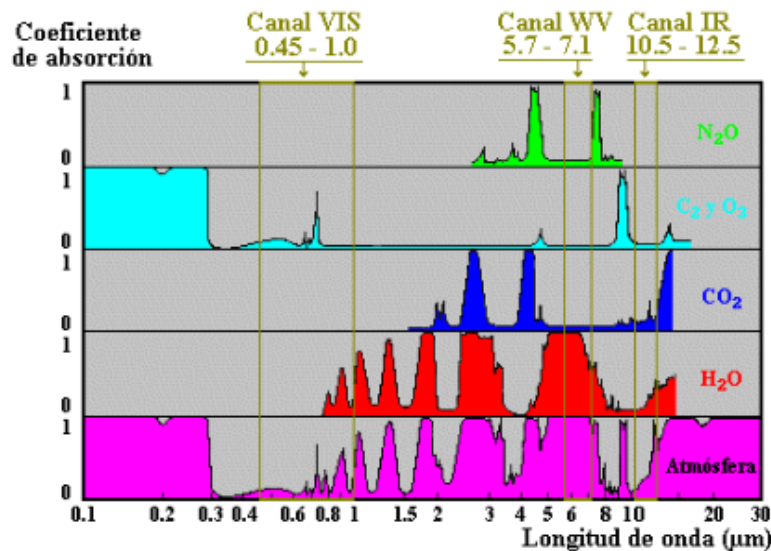


Figura 7.4 – Bandas de absorción y ventanas del espectro electromagnético [www.proteccioncivil.org]

La cantidad de radiación que se absorbe en la atmósfera es de aproximadamente el 20% de la incidente. Los principales responsables son el ozono, el anhídrido carbónico y el agua, esta última absorbe 5 veces más que el resto juntos. Estos gases actúan de forma selectiva según la longitud de onda (véase Figura 7.4):

- El vapor de agua absorbe en el infrarrojo, principalmente en las bandas centradas en 1,1; 1,4 y 1,8 μm . A partir de 2,3 μm la transmisión de la atmósfera de radiación solar es prácticamente nula.
- El ozono absorbe en el ultravioleta. La radiación con longitud de onda inferior a 0,29 μm es absorbida por el ozono.

El *scattering* provoca la atenuación de la radiación solar extraterrestre y su redistribución en todas las direcciones del espacio sin cambios significativos en la longitud de onda. Los principales responsables de este fenómeno, de mayor a menor importancia, son: el vapor de agua, los aerosoles y los componentes moleculares. Su contribución depende del tamaño y concentración. Así se define el tamaño relativo mediante un parámetro adimensional θ :

$$\theta = 2\pi r\lambda^{-1} \quad (7.18)$$

Donde r representa el tamaño de la partícula y λ la longitud de onda incidente, se distinguen tres tipos fundamentales de difusión:

- **Difusión de Rayleigh:** cuando la longitud de onda es mucho mayor que la dimensión de las partículas ($\theta \ll$), producida por oxígeno y nitrógeno. Actúa sobre las longitudes de onda más cortas en las capas altas de la atmósfera.
- **Difusión de Mie:** cuando la longitud de onda es del mismo orden que los objetos dispersores ($\theta < 50$); producida por vapor de agua, polvo y aerosoles. Afecta a las longitudes de onda de canal visible en las capas bajas de la atmósfera.
- **Difusión no selectiva:** la longitud de onda es mucho menor que el tamaño de las partículas ($\theta \gg$), la producen gotas de agua.

De este modo la cantidad de radiación que llega a la Tierra depende del espesor de la capa atmosférica que tiene que atravesar y de la concentración de partículas en suspensión. Por lo tanto se hace necesario crear parámetros que describan estos sucesos.

La *masa óptica relativa del aire* (m) permite cuantificar la distancia que recorre la radiación solar. Ignorando la curvatura terrestre y suponiendo una atmósfera homogénea con índice de refracción la unidad, este valor se expresa según [8]:

$$m = (\rho/\rho_0)[\sin \alpha^* + 0,50572(57,29578 \cdot \alpha^* + 6,07995)^{-1,6364}]^{-1} \quad (7.19)$$

Donde α^* representa la *altura solar verdadera*, altura solar corregida por los efectos de refracción atmosférica, se calcula:

$$\alpha^* = \alpha + 0,061359 \frac{0,1594 + 1,123 \cdot \alpha + 0,065656 \cdot \alpha^2}{1 + 28,9344 \cdot \alpha + 277,3971 \cdot \alpha^2} \quad (7.20)$$

Y el coeficiente (ρ/ρ_0) representa la presión atmosférica corregida por la altitud sobre el nivel del mar (z) del lugar de estudio:

$$(\rho/\rho_0) = e^{(-z/8434,5)} \quad (7.21)$$

La influencia de la concentración de los constituyentes atmosféricos se puede estimar mediante la comparación de la profundidad óptica entre un instante y la teórica calculada para un día libre de vapor de agua y aerosoles llamada *profundidad óptica de Rayleigh* (δ_r). Dada una masa óptica relativa de aire la profundidad óptica se puede estimar según [9] [10]:

$$\delta_r = \begin{cases} (6,6296 + 1,7513m - 0,1202m^2 + 0,0065m^3 - 0,00013m^4)^{-1} & \text{para } m < 20 \\ (10,4 + 0,718m)^{-1} & \text{para } m \geq 20 \end{cases} \quad (7.22)$$

La relación entre la profundidad teórica y la real se conoce como *factor de turbidez de Linke* (T_L) [11] y representa el grado de transparencia de la atmósfera. Ofrece una aproximación de los efectos vistos que sufre la radiación a su paso por la atmósfera. Se puede obtener a partir de medidas pero debido a su escasez se suele obtener mediante ajustes empíricos. Su valor depende de factores locales y/o estacionales y en Europa sufre variaciones cíclicas anuales. En la Tabla 7.1 se muestran los valores típicos según la atmósfera:

Tipo de atmósfera	T_L
Muy clara (despejado, nivel humedad bajo, pocas partículas en suspensión)	~2
Clara y cálida	~3
Húmeda y cálida	4~6
Con polución	>6

Tabla 7.1 – Valores frecuentes del factor de turbidez de Linke

7.4. Radiación solar sobre la superficie terrestre

Se pueden definir una serie de magnitudes dentro de la radiación solar que ha atravesado la atmósfera terrestre. Se denomina *irradiancia solar directa* (B) a la potencia incidente sobre una superficie por unidad de área correspondiente al ángulo sólido limitado por el disco solar. *Irradiancia solar difusa* (D) es la potencia por unidad de área recibida por una superficie procedente de la difusión atmosférica de la radiación solar. De este modo se tiene la *irradiancia solar global* (G) que es la potencia total por unidad de superficie, es decir, la suma de la directa, difusa y la *irradiancia reflejada* (R).

$$G = B + D + R \quad (7.23)$$

Si se consideran isótropas la irradiancia difusa del cielo y la procedente del suelo, la irradiancia global se puede estimar:

$$G = B \cos \theta_z + D \quad (7.24)$$

Sobre un plano horizontal, la relación entre la irradiancia solar global y la irradiancia solar extraterrestre define el *índice de transparencia atmosférica* (K_T), calculándose.

$$K_T = \frac{G}{I_0} = \frac{B \cos \theta_z + D}{I_{CS} \cdot \varepsilon \cdot \cos \theta_z} \quad (7.25)$$

7.5. El modelo de cielo claro ESRA

Las características físicas de la atmósfera modifican la energía solar que llega a la Tierra. Se pueden calcular los valores extremos de radiación.

Siguiendo en esta línea es interesante estudiar el caso de cielo claro el cual permite estimar el máximo valor que puede tomar la irradiancia global sobre una superficie horizontal.

Hay varias maneras de formular este modelo, las más sencillas no tienen en cuenta los componentes atmosféricos y proponen a partir de la elevación solar (α) estimaciones de la *irradiancia global de cielo claro sobre superficie horizontal* (G_C) (ecuación (7.26)). Otras más precisas incluyen el factor de turbidez de Linke (T_L).

$$G_C = 0,81 \cdot I_{CS} \cdot \varepsilon \cdot (\sin \alpha)^{1,15} \quad (7.26)$$

En este caso nos centraremos en el modelo que propone el Atlas Europeo de Radiación solar o modelo de ESRA, el cual es el que está implementado en CENER. Este modelo estima la *componente directa sobre superficie horizontal para cielo claro* (B_C) de la siguiente manera:

$$B_C = I_{CS} \cdot \varepsilon \cdot T_{rb}(\alpha, T_L) \sin \alpha \quad (7.27)$$

Donde $T_{rb}(\alpha, T_L)$ representa la función de transmisión de la irradiancia directa a través de la atmósfera, expresándose de la siguiente manera:

$$T_{rb}(\alpha, T_L) = e^{-0,8662 \cdot T_L \cdot m \cdot \delta_R} \quad (7.28)$$

Por otro lado, la *componente difusa sobre superficie horizontal para cielo claro* (D_C) puede estimarse a partir de la siguiente expresión:

$$D_C = I_{CS} \cdot \varepsilon \cdot T_{rd}(\alpha, T_L) = I_{CS} \cdot \varepsilon \cdot T_{rdz}(T_L) \cdot F_d(\alpha, T_L) \quad (7.29)$$

Donde $T_{rdz}(T_L)$ representa la función de transmisión de la irradiancia difusa en el cenit solar pudiendo estimarse:

$$T_{rdz}(T_L) = -0,015843 + 0,030543 \cdot T_L + 0,000379 \cdot T_L^2 \quad (7.30)$$

Y $F_d(\alpha, T_L)$ es una función de corrección angular, que puede calcularse:

$$F_d(\alpha, T_L) = A_0 + A_1 \cdot \sin \alpha + A_2 \cdot \sin^2 \alpha \quad (7.31)$$

$$A_0 = 2,6463 \cdot 10^{-1} - 6,1581 \cdot 10^{-2} T_L + 3,1408 \cdot 10^{-3} T_L^2$$

$$\text{Si } A_0 \cdot T_{rd} < 2 \cdot 10^{-3}, \quad A_0 = 2 \cdot 10^{-3} (T_{rd})^{-1}$$

$$A_1 = 2,0402 + 1,8945 \cdot 10^{-2} T_L - 1,1166 \cdot 10^{-2} T_L^2$$

$$A_2 = -1,3025 + 3,9231 \cdot 10^{-2} T_L - 8,5079 \cdot 10^{-3} T_L^2$$

A partir de estas expresiones se evalúa la irradiancia global de cielo claro sobre superficie horizontal como:

$$G_c = B_c + D_c \quad (7.32)$$

La relación entre la irradiancia global horizontal y la irradiancia global horizontal para cielo claro define un nuevo parámetro, el *índice de cielo claro* (K_c):

$$K_c = \frac{G}{G_c} \quad (7.33)$$

7.6. Instrumentación y medida de la radiación solar

Los instrumentos destinados a medir la radiación solar se denominan genéricamente como radiómetros solares. Estos transforman la energía radiante recibida en una señal eléctrica y según el proceso de conversión se clasifican en:

- **Bimetálicos:** están compuestos por una cinta bimetálica que se elonga según la energía recibida.

- **Calorímetros:** transforman la energía solar en energía calórica que a su vez varía la temperatura de un sensor, permitiendo evaluar el flujo calórico y por consiguiente la energía solar
- **Termoeléctricos:** se basan en el efecto Seebeck, su respuesta es estable frente a variaciones de temperatura.
- **Fotoeléctricos:** se basan en el efecto fotovoltaico. Baratos, respuesta temporal rápida pero muy sensibles a la temperatura.

La Organización Meteorológica Mundial propone la siguiente clasificación de los radiómetros:

Nombre	Variable medida	Empleo principal	Ángulo visión (sr)
Pirheliómetro absoluto	Radiación solar directa	Patrón primario	$5 \cdot 10^{-3}$
Pirheliómetro	Radiación solar directa	Patrón secundario Medida	$5 \cdot 10^{-3}$ a $2,5 \cdot 10^{-2}$
Pirheliómetro espectral	Radiación solar directa (banda espectral ancha)	Medida	$5 \cdot 10^{-3}$ a $2,5 \cdot 10^{-2}$
Fotómetro solar	Radiación solar directa (banda espectral estrecha)	Patrón Medida	$1 \cdot 10^{-3}$ a $1 \cdot 10^{-2}$
Piranómetro	Radiación global Radiación celeste Radiación solar reflejada	Patrón secundario Medida	2π
Piranómetro espectral	Radiación global (banda espectral ancha)	Medida	2π
Piranómetro (RSR)	Radiación global resultante	Patrón secundario Medida	4π
Pirgeómetro	Radiación de onda larga	Medida	2π
Pirradiómetro	Radiación total	Patrón secundario Medida	2π
Pirradiómetro (RSR)	Radiación total resultante	Medida	4π

Tabla 7.2 – Instrumentos meteorológicos para medida de radiación solar

Los sensores mencionados deben calibrarse para que mantengan su precisión la cual se determina según:

- Resolución: Variación más pequeña de la magnitud radiométrica detectable.
- Variación a largo plazo de la sensibilidad.
- Sensibilidad frente a las condiciones ambientales.
- Linealidad
- Desviación de la respuesta espectral respecto a la de referencia (cuerpo negro)
- Desviación de la respuesta direccional respecto a la postulada
- Constante de tiempo del instrumento

- Incertidumbres debidas a elementos auxiliares como cables, sistemas de adquisición de datos, etc.

Para medir la radiación global se emplea el piranómetro cuyo intervalo espectral está comprendido entre 0,3 y 3 μm . Éstos se clasifican según su precisión y calidad en piranómetros de alta calidad o patrones secundarios, de 1ª y de 2ª clase (ver Tabla 7.3)

	Patrón 2rio	1ª Clase	2ª Clase
Tiempo de respuesta (al 95%)	< 15 s	< 30 s	< 60 s
Resolución	$\pm 1 \text{ Wm}^{-2}$	$\pm 5 \text{ Wm}^{-2}$	$\pm 10 \text{ Wm}^{-2}$
Estabilidad (variación anual a totalidad escala)	$\pm 0,8\%$	$\pm 1,5\%$	$\pm 3\%$
No-linealidad (a totalidad de escala)	$\pm 0,5\%$	$\pm 1\%$	$\pm 3\%$
Sensibilidad térmica (variación térmica inferior a 50K)	$\pm 2\%$	$\pm 4\%$	$\pm 8\%$
Sensibilidad espectral (desviación de la absortancia media en el rango 0,3 a 3 μm)	$\pm 2\%$	$\pm 5\%$	$\pm 10\%$
Respuesta cosenoidal (respecto ideal para 10º de altura solar en día despejado)	< $\pm 3\%$	< $\pm 7\%$	< $\pm 15\%$
Respuesta azimutal (respecto media para 10º de altura solar en día despejado)	< $\pm 3\%$	< $\pm 5\%$	< $\pm 10\%$
Error máximo en medida integrada (nivel de confianza 95%)			
Radiación horaria	3%	8%	20%
Radiación diaria	2%	5%	10%

Tabla 7.3 – Clasificación de los piranómetros según norma ISO 9060

8. INTRODUCCIÓN A LOS CONCEPTOS DE TELEDETECCIÓN

El término *teledetección* se refiere al conjunto de conocimientos y técnicas orientadas a la adquisición y tratamiento de información sobre un objeto a distancia, sin contacto material con el observador. De esta manera en los siguientes apartados se verán diferentes sensores encargados de una teledetección espacial con el fin de estimar la radiación solar que llega a la Tierra.

8.1. Plataformas, sensores y canales

En este contexto se entienden por plataformas los satélites (Meteosat, MODIS, NOAA...) los cuales se encargan del transporte de los instrumentos necesarios para la captura, almacenaje y transmisión de las imágenes. Por otra parte se tienen los sensores que viajan sobre los satélites y se encargan de captar información en diferentes bandas o canales del espectro electromagnético.

La radiación que refleja la Tierra se divide en cuatro dimensiones: espacio, tiempo, longitud de onda y radiancia. De esta manera los sensores la discretizan dando lugar a cuatro niveles de resolución:

- **Resolución espacial:** es el área espacial que representa cada elemento, píxel, de la imagen. Depende de la sección angular que detecta el sensor y su distancia a la Tierra.
- **Resolución temporal:** es el tiempo que pasa en cada toma de imagen.
- **Resolución espectral:** indica la anchura de banda y el número de bandas para las cuales es sensible el sensor.
- **Resolución radiométrica:** hace referencia a la variación mínima de intensidad que es capaz de detectar. Se expresa mediante número de bits disponibles para registrar la información.

La altura y movimiento de los satélites respecto de la Tierra condiciona las características geométricas de las imágenes. Según su órbita se clasifican en:

- **Satélites geostacionarios:** realizan una órbita geosíncrona (su periodo es igual al periodo de rotación terrestre), circular y contenida en el plano ecuatorial terrestre. Se sitúan a unos 36000 km de la Tierra.
- **Satélites polares:** realizan órbitas polares (perpendiculares al plano ecuatorial terrestre) que les permiten, aprovechando el movimiento de rotación de la Tierra, captar imágenes de diferentes puntos siempre a la misma hora. Se sitúan a una altura entre 300 y 1500 km.

En los sensores opto-electrónicos la radiación se descompone en distintas bandas espectrales que son amplificadas y convertidas en señales eléctricas. Esta señal eléctrica se registra con un *nivel digital (ND)* (por ejemplo de 0 a 255 si se dispone de 8 bits por píxel). Hay dos grandes tipos:

- **Radiómetro de barrido.** La parte óptica está formada por un espejo móvil que se desplaza perpendicularmente a la trayectoria del satélite, explorando una zona en cada barrido.
- **Radiómetro de empuje.** Dispone de varios sensores que abarcan toda la zona de visión del sensor, permitiendo ampliar la resolución espacial y reducir los errores geométricos.

8.2. Satélites Meteosat

Meteosat es una familia de satélites desarrollados en Europa. El primer satélite Meteosat fue lanzado por la ESA en una órbita geoestacionaria a 36000 km sobre el Golfo de Guinea el 23 de noviembre de 1977.

Desde entonces, se han lanzado diez Meteosat más siendo el último el Meteosat-11, que entró en funcionamiento el 15 de Julio de 2015. Este último satélite, al igual que lo satélites Meteosat-8, 9 y 10, pertenece a otra generación, denominada Meteosat Segunda Generación (MSG). Además está previsto que a partir de 2020 se lancen seis satélites más pertenecientes a la tercera generación. En la Tabla 8.1 se muestran los periodos de funcionamiento de los diferentes satélites así como su localización.

Nombre	Periodo de utilización	Posición
Meteosat-1	09/12/1977 – 25/11/1979	0º/36000 km
Meteosat-2	16/08/1981 – 11/08/1988	0º/36000 km
Meteosat-3	11/08/1988 – 31/05/1995	0º/36000 km
Meteosat-4	19/06/1989 – 08/11/1995	0º/36000 km
Meteosat-5	02/03/1991 – 01/07/1998	0º/36000 km
Meteosat-6	01/07/1998 – 16/04/2007	57ºE/36000 km
Meteosat-7	15/04/2011 – 08/01/2007	0º/36000 km
Meteosat-8	08/01/2007 – 15/04/2011	57ºE/36000 km
Meteosat-9	02/09/1997 – 01/11/2006	0º/36000 km
Meteosat-10	01/11/2006 – 2016	57ºE/36000 km
Meteosat-11	28/08/2002 – 2019	3,5º/36000 km
Meteosat-12	22/12/2005 – 2021	9,5ºE/36000 km
Meteosat-13	05/07/2012 – 2022	0º/36000 km
Meteosat-14	15/07/2015	En órbita de almacenamiento

Tabla 8.1 – Satélites Meteosat

Las características físicas y técnicas han cambiado de una generación a otra. Los de la primera generación tenían un diámetro de 2,1 m, medían 3,12 m de longitud y tenían una masa aproximada de 800 kg. Sin embargo, los satélites de segunda generación son más grandes que sus predecesores teniendo unas dimensiones de 3,2 m de diámetro, 3,7 m de longitud y un peso de unos 2000 kg (ver Figura 8.1). De los satélites de tercera generación se espera que sean más grandes y pesados.

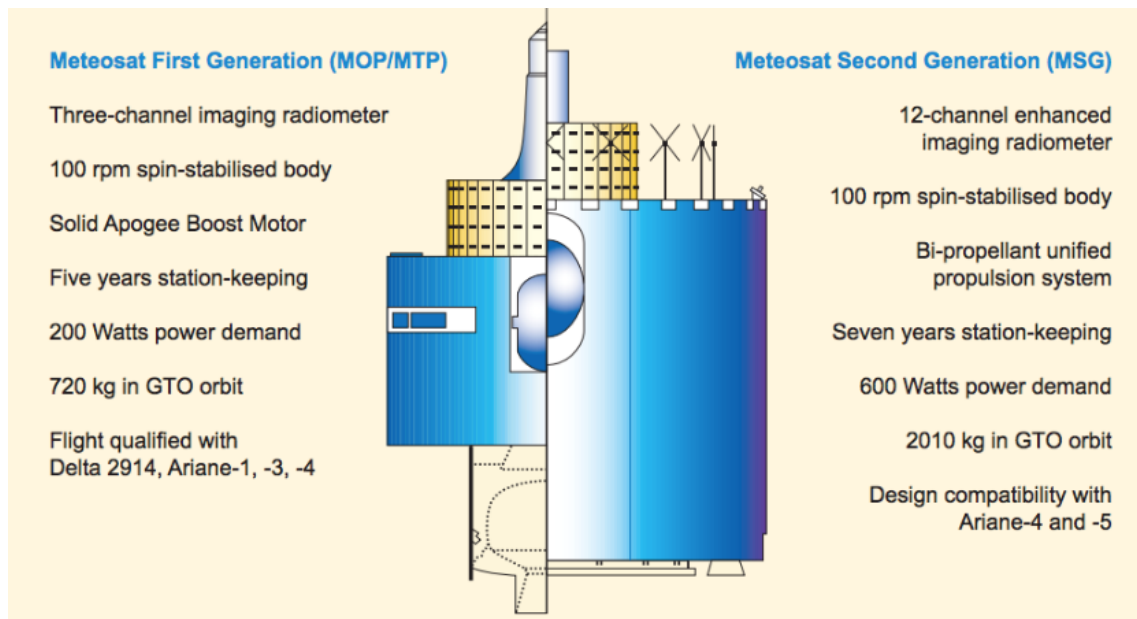


Figura 8.1 – Comparación satélites MFG y MSG [<http://danielmarin.naukas.com/>]

Ambas generaciones de satélites giran a 100 rpm alrededor de su eje alineado paralelamente al eje norte-sur de la Tierra. La localización del satélite no se mantiene constante sino que varía debido a la forma de la Tierra y a la influencia de la gravedad del Sol y de la Luna. De esta manera, todo satélite, dispone de una serie de impulsores para corregir su posición.

En los satélites de primera generación el principal elemento de detección es el sensor MVIRI (Meteorological Visible and Infrared Imager), un radiómetro de alta definición. Dispone de un telescopio tipo Ritchey-Chrétien con un diámetro de apertura primario de 400 mm y longitud focal en el espectro visible de 3,65 m.

Este radiómetro opera de manera continua en tres bandas espectrales:

- **0,5 a 0,9 μm :** banda visible (VIS), utilizada para la toma de imágenes durante el día.
- **5,7 a 7,1 μm :** banda de absorción del vapor de agua (WV), utilizada para determinar la cantidad de vapor de agua de la atmósfera.
- **10,5 a 12,5 μm :** banda del infrarrojo térmico (IR), utilizada para determinar la temperatura superficial de las grandes masa de agua (océanos, mares y lagos) y de la capa superior de las nubes.

Los satélites de segunda generación disponen de dos radiómetros: el SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager) y el GERB (Geostationary Earth Radiation Budget experiment)

El SEVIRI es un sensor que mide la radiación en el rango visible e infrarrojo del espectro en 12 canales diferentes (Figura 8.2):

- **Canales en el visible:** los canales 1 y 2 situados en los espectros $0,6 \mu\text{m}$ y $0,8 \mu\text{m}$ respectivamente. El canal 12, también llamado canal visible de alta resolución (HRV), proporciona datos de radiación electromagnética en el intervalo $0,4 - 1,1 \mu\text{m}$.
- **Canales en el infrarrojo cercano:** los canales 3 y 4, centrados en $1,6 \mu\text{m}$ y $3,9 \mu\text{m}$, aportan información acerca de la composición de las nubes, niebla y facilita la detección de incendios forestales.
- **Canales para la detección del vapor de agua:** la radiación medida por los canales 5 y 6, centrados en $6,2 \mu\text{m}$ y $7,3 \mu\text{m}$, proporcionan información sobre el contenido de vapor de agua en la columna de aire.
- **Canales en el infrarrojo térmico:** los canales 7, 9 y 10, centrados en $8,7 \mu\text{m}$, $10,8 \mu\text{m}$ y $12 \mu\text{m}$, permiten distinguir el tipo de nubes y medir la temperatura de la superficie terrestre y de las nubes.
- **Otros canales:** los canales 8 y 11, centrados en $9,7 \mu\text{m}$ y $13,4 \mu\text{m}$, se emplean para la monitorización de la contaminación atmosférica. De esta manera, el canal 8 mide la concentración de ozono y el canal 11 la concentración de dióxido de carbono.

Por su parte el radiómetro GERB proporciona información a corto y medio plazo sobre la radiación solar reflejada por la Tierra y la radiación infrarroja emitida por el conjunto Tierra-Atmósfera.

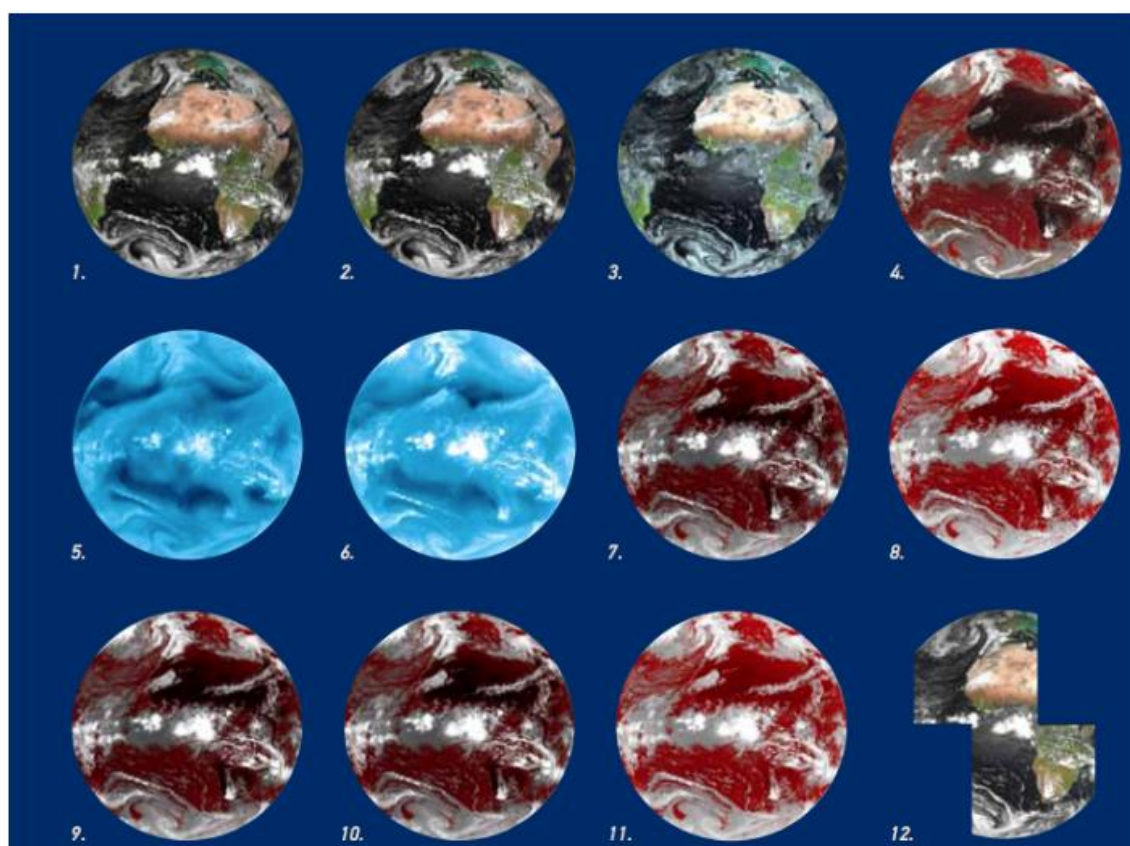


Figura 8.2 – Canales MSG [<http://danielmarin.naukas.com/>]

Otra diferencia entre los satélites de primera y de segunda generación es que los primeros proporcionan imágenes cada 30 min con una resolución de 2,5 km en el nadir, mientras que los segundos proporcionan imágenes cada 15 min y con una resolución de 1 km en el nadir, empleando el canal visible de alta resolución HRV. Además en las imágenes aportadas por los MFG la información de cada píxel varía en una escala de grises (nivel digital) de valores 0 – 255 (codificados con un byte sin signo), siendo este rango de valores, en los MSG, de 0 – 1024 (correspondientes a 10 bits)

8.3. Georreferenciación imágenes de satélite

Las imágenes procedentes de un satélite que llegan al usuario final consisten en matrices numéricas donde cada celda corresponde al nivel digital de cada píxel. Para que esta información sea viable es necesario referenciar la superficie terrestre y proyectarla sobre un plano, de tal manera que a cada píxel le corresponde unas coordenadas (georreferenciación)

La Tierra no es un esfera perfecta, sino más bien un elipsoide de revolución aplastado y abollado. Este elipsoide se define según los siguientes parámetros: *semieje mayor (a)*, *semieje menor (b)*, *excentricidad (e)* y *aplastamiento (f)*.

$$\begin{aligned}
 e &= \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} \\
 f &= \frac{a - b}{a} = 1 - \frac{b}{a} \\
 \frac{b}{a} &= 1 - f = \sqrt{1 - e^2}
 \end{aligned}
 \tag{8.1}$$

Se definen distintos elipsoides según la zona geográfica, para una mejor adaptación de los parámetros. Los valores típicos según la zona se recogen en la siguiente tabla:

Elipsoide	Semieje mayor	Semieje menor	Aplastamiento	Área de aplicación
Clarke 1866	6378206,4 m	6356583,8 m	1/295	Norte América
Clarke 1880	6378249,2 m	6356515,0 m	1/293	Sur Europa y Norte África
Internacional 1924	6378388,0 m	6356911,9 m	1/297	Europa
WSG84	6378140,0 m	6356755,0 m	1/298	Globo terráqueo (Satélites)

Tabla 8.2 – Elipsoides más frecuentemente utilizados

Así puede definirse un sistema de *coordenadas tridimensionales geográficas* o *geodésicas* en función de cualquier punto P (Figura 8.3):

- *Latitud geográfica (Φ)*, es el ángulo entre la perpendicular al elipsoide que pasa por P y el plano ecuatorial. Positiva hacia el norte.
- *Longitud geográfica (Λ)*, ángulo entre el plano meridiano del punto P y un plano meridiano de referencia. Positivo hacia el este.
- *Altura elipsoidal (l)*, distancia entre el punto P y el elipsoide de referencia en dirección normal al elipsoide.

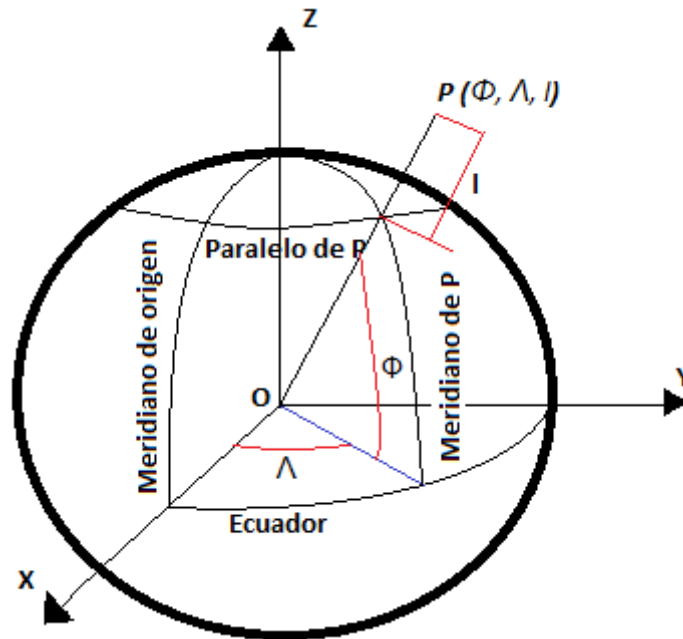


Figura 8.3 – Sistema de coordenadas tridimensionales geográficas

El siguiente paso consiste en elegir uno de los parámetros fijos que se han definido en la Tabla 8.2, esto es, elegir el valor del semieje mayor (radio ecuatorial, $a = R_e$) y del semieje menor (radio polar, $b = R_p$). Además es necesario conocer el radio orbital del satélite (R_s), su campo de visión (fov), resolución espacial de la imagen (S_R) y las coordenadas del primer píxel respecto al disco completo de la Tierra (f_0 primera línea y c_0 primera columna)

Con los parámetros fijados ya se puede proceder a calcular la posición en el plano de la imagen de un punto, $P(\Phi, \Lambda, l)$, sobre la superficie terrestre a partir de sus coordenadas geodésicas (Figura 8.4). Se sigue el siguiente procedimiento:

1. Pasar latitud geodésica a geocéntrica.

$$\Phi_C = \tan^{-1} \left(\left(1 - \frac{R_e - R_p}{R_e} \right)^2 \tan \Phi \right) \quad (8.2)$$

2. Calcular la distancia de P al centro geométrico de la Tierra (R_C)

$$R_C = R_e R_p \left[R_p^2 \cdot \cos^2 \Phi_C + R_e^2 \cdot \sin^2 \Phi_C \right]^{-1/2} \quad (8.3)$$

3. Obtener las coordenadas cartesianas de P

$$\begin{aligned} x &= R_C \cdot \cos \Phi_C \cdot \cos \Lambda \\ y &= R_C \cdot \cos \Phi_C \cdot \sin \Lambda \\ z &= R_C \cdot \sin \Phi_C \end{aligned} \quad (8.4)$$

4. Calcular el *ángulo de visión vertical* (Φ_C) formado, en este caso, por las líneas que unen P con su proyección sobre el plano ecuatorial, el punto $P'(x,y,0)$, y con la posición del satélite, el punto $S(R_s, 0, 0)$

$$\varphi_V = \widehat{PSP'} = \tan^{-1}[z(y^2 + (R_s - x)^2)^{-1/2}] \quad (8.5)$$

5. Calcular el ángulo de visión horizontal (Φ_H) formado, en este caso, por las líneas que unen el centro geométrico de la Tierra $O(0,0,0)$, con el punto $S(R_s, 0,0)$ y $P'(x,y,0)$.

$$\varphi_H = \widehat{OSP'} = \tan^{-1}[y/(R_s - x)] \quad (8.6)$$

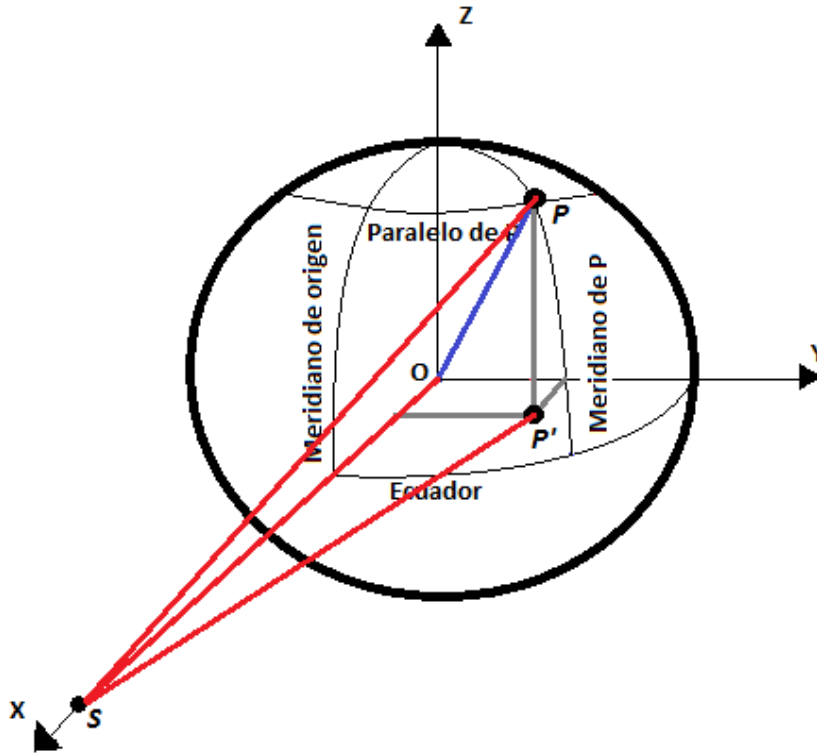


Figura 8.4 – Posición de un punto sobre la superficie terrestre

6. Con los ángulos de visión ya calculados y con los valores de campo de visión del satélite (f_{ov}), resolución espacial (S_R) y coordenadas digitales del píxel origen de la imagen (f_0, c_0) se calcula la fila (f_p) y columna (c_p) del punto $P(\Phi, \Lambda, 0)$

$$f_p = \frac{S_R}{2} + \text{int} \left(S_R \frac{\widehat{PSP'}}{f_{ov}} \right) - f_0 + \Lambda_f \quad \begin{matrix} \Lambda_f = 1 \text{ para } \Phi \geq 0 \\ \Lambda_f = 0 \text{ para } \Phi < 0 \end{matrix} \quad (8.7)$$

$$c_p = \frac{S_R}{2} + \text{int} \left(S_R \frac{\widehat{OSP'}}{f_{ov}} \right) - c_0 + \Lambda_c \quad \begin{matrix} \Lambda_c = 0 \text{ para } \Lambda \geq 0 \\ \Lambda_c = 1 \text{ para } \Lambda < 0 \end{matrix}$$

9. INTRODUCCIÓN AL LENGUAJE R

Tanto la implementación del modelo Heliosat como el programa de generación de mapas se han realizado en su totalidad en el lenguaje de programación denominado R.



Figura 9.1 – Logotipo R

R es un lenguaje y entorno de programación concebido principalmente como una herramienta para el análisis estadístico y gráfico. Se trata de un proyecto de software libre, resultado de la implementación GNU del lenguaje S.

El gran potencial de R radica en su característica de software libre ya que gracias a esta característica multitud de usuarios de todas las partes del mundo pueden publicar paquetes, librerías que extienden la configuración básica. En el caso de este proyecto se han empleado una serie de paquetes listados a continuación junto con su función:

- **ncdf4:** Lee o escribe archivos existentes en formato netCDF, o crea uno nuevo.

EL archivo de datos netCDF de Unidata es una plataforma independiente, archivos binarios que también contienen metadatos describiendo el contenido y formato de los datos en el archivo. La versión 4 de la librería netcdf almacena datos en formato de archivos HDF5; versiones anteriores almacenaban los datos en un formato personalizado. El paquete de R ncdf4 puede leer ambos formatos.

Los archivos netCDF contienen una o más variables, las cuales están normalmente estructuradas como arrays de N-dimensiones. Por ejemplo, se podría tener una variable denominada “Temperatura” que es función de la longitud, latitud y altura. Los archivos netCDF también contienen dimensiones, las cuales describen la extensión de los arrays de las variables. En el ejemplo de la Temperatura, las dimensiones son “longitud”, “latitud” y “altura”. Los datos pueden ser leídos o escritos en las variables en hyperslabs arbitrarios (por ejemplo, se pueden leer o escribir todos los valores de Temperatura para una altura dada, o para una latitud dada)

- **chron:** Crea objetos cronológicos los cuales representan fechas y tiempos del día.

Esta función es empleada dentro del programa para transformar el formato de fecha que proporciona el archivo netCDF en un formato más intuitivo, como por ejemplo: “(dd/mm/aa hh:min:ss)” haciendo referencia *dd* al día, *mm* al mes, *aa* al año, *hh* a la hora, *min* al minuto y *ss* a los segundos.

- **ggplot2:** Es una implementación de la gramática de gráficos en R. Este combina la ventaja de ambos gráficos de base y de celosía: los acondicionamientos y los ejes compartidos son manejados automáticamente, y aún se puede construir una traza paso por paso desde múltiples fuentes de datos. También implementa un sofisticado sistema de condicionamiento multidimensional y una interfaz consistente para mapear datos de forma más atractiva.

Este paquete incluye multitud de funciones que permiten la creación de distintos tipos de gráficos como histogramas, diagramas de barras, áreas, funciones... Todos ellos con una estética personalizable, a gusto del usuario, de acuerdo a los colores empleados, forma, etc.

- **ggmap:** Consiste en una colección de funciones que permiten visualizar datos y modelo espaciales sobre mapas estáticos que se extraen de diferentes fuentes, por ejemplo, Google Maps. Incluye herramientas para estas tareas, así como para geolocalización y creación de rutas.

Combinando las funciones de esta librería con las de la librería *ggplot2* se pueden generar mapas muy personalizados, tal como se verá a lo largo del desarrollo del trabajo.

- **raster:** Con esta librería se puede leer, escribir, manipular, analizar y modelar datos espaciales en cuadrícula. Para realizar todas estas acciones vienen implementadas una serie de funciones tanto básicas como de alto nivel, permitiendo el procesado de archivos muy extensos.
- **shapefiles:** Contiene funciones que permiten la lectura y escritura de *ESRI Shapefiles*. Un shapefile es un tipo de archivo que almacena información sobre la localización de determinados elementos geográficos, por ejemplo, la frontera limitante de un país.

Queda decir que para la programación en R se ha empleado el software RStudio, el cual no es más que un entorno de desarrollo integrado (IDE) para R. Incluye una consola, un editor que ayuda a la ejecución de código, así como una serie de herramientas que permiten una serie de opciones como el trazado, la depuración y la gestión del espacio de trabajo.

10. TRATAMIENTO DE IMÁGENES

10.1. Planteamiento del problema

Al analizar visualmente las imágenes proporcionadas por los satélites se pueden observar cuatro fenómenos diferentes pero de naturaleza similar:

- Presencia de un conjunto de píxeles contiguos cuya intensidad destaca de manera considerable con respecto a los píxeles periféricos, lo que se traduce en zonas cuyo albedo diverge de forma anómala con respecto al resto de la imagen.

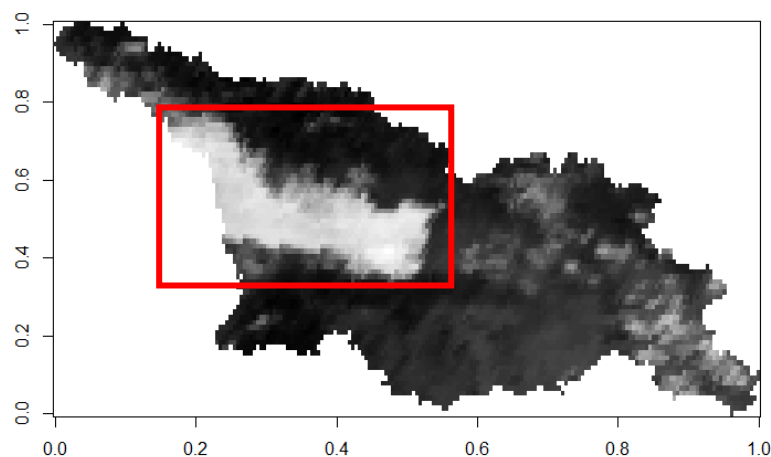


Figura 10.1 – Imagen con zona de píxeles muy destacados

- Presencia de píxeles individuales cuya intensidad hace que destaquen con respecto a los píxeles que se encuentran a su alrededor, lo que quiere decir que el albedo de esa localización resulte anómalo.

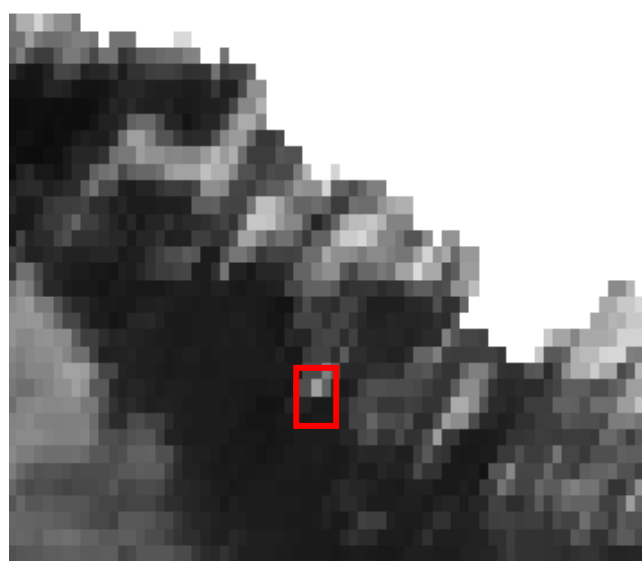


Figura 10.2 – Imagen con pixel de intensidad destacada

- Píxeles faltantes. En algunas imágenes se produce la pérdida del valor digital de algún píxel por lo que dicho píxel aparece sin colorear.
- Imágenes sin datos. Es un fenómeno similar al de píxeles individuales faltantes pero en este caso la proporción de píxeles perdidos alcanza la totalidad plena o casi de la imagen. Se produce mayoritariamente en las horas nocturnas del día.

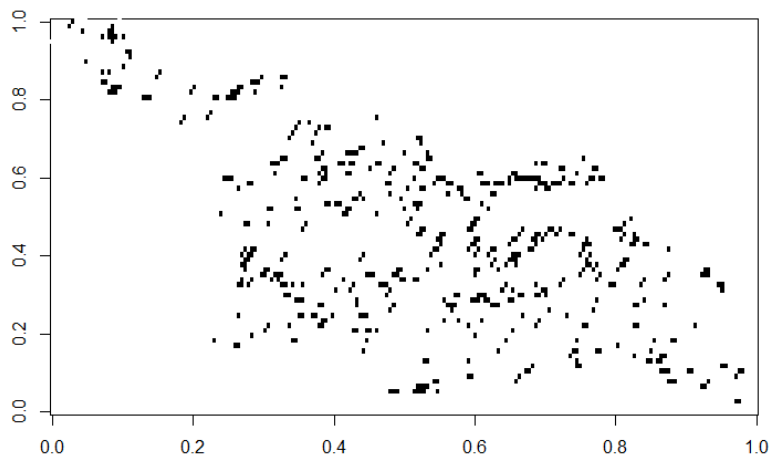


Figura 10.3 – Imagen con gran proporción de datos perdidos

Estos fenómenos se producen debido a errores de los satélites, por la presencia de fenómenos atmosféricos indeseables o por la presencia de cultivos, nieve, arena u otros elementos que modifiquen la lectura del albedo de la superficie de la Tierra.

Los fenómenos descritos pueden dar lugar a estimaciones incorrectas de la radiación solar en un punto en concreto. De este modo se ha estudiado la opción de realizar un tratamiento de las imágenes para reducir en la medida de lo posible estos errores cuando se realizan las estimaciones de un lugar en concreto.

10.2. Utilización de filtros

Dentro del mundo del tratamiento de imágenes existen una serie de filtros que suavizan la imagen, es decir, que disminuyen el contraste entre los píxeles, reduciendo en cierta medida los tres primeros fenómenos explicados anteriormente. El tema de las imágenes perdidas no se puede solucionar con el tratamiento de imágenes por lo que deberán quedar excluidas del estudio.

De este modo se ha optado por emplear un filtro lineal de media, el cual consiste en que dada una imagen $f(x,y)$ de tamaño $N \times N$, el valor del nivel de gris de la imagen suavizada $g(x,y)$ en el punto (x,y) se obtiene promediando los valores de nivel de gris de los puntos de f contenidos en una cierta vecindad de (x,y) .

$$g(x,y) = \frac{1}{M} \sum_{(n,m) \in S} f(n,m) \quad (10.1)$$

Donde $x,y=0,1,\dots,N-1$. S es el conjunto de coordenadas de los puntos vecinos a (x,y) , incluyendo el propio (x,y) , y M es el número de puntos de la vecindad. Por ejemplo, se tiene la subimagen y la máscara siguientes:

...
...	$(x-1,y-1)$	$(x,y-1)$	$(x+1,y-1)$...
...	$(x-1,y)$	(x,y)	$(x+1,y)$...
...	$(x-1,y+1)$	$(x,y+1)$	$(x+1,y+1)$...
...

Figura 10.4 – Subimagen a tratar con la máscara de suavizado

1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9

Figura 10.5 – Máscara de suavizado

Y se quiere sustituir el valor de $f(x,y)$ por el promedio de los puntos en una región de tamaño 3x3 centrada en (x,y) , es decir, se quiere asignar el valor promedio a $f(x,y)$:

$$g(x,y) = \frac{1}{9} [f(x-1,y-1) + f(x,y-1) + f(x+1,y-1) + f(x-1,y) + f(x,y) + f(x-1,y+1) + f(x,y+1) + f(x+1,y+1)] \quad (10.2)$$

Esta operación se puede realizar de forma general centrando la máscara en (x,y) y multiplicando cada punto debajo de la máscara por el correspondiente coeficiente de la máscara y sumando el resultado.

A continuación se muestra como ejemplo un mapa del albedo de Georgia (Figura 10.6) para un determinado instante al cual se le han aplicado máscaras de suavizado de 3x3 (Figura 10.7), 5x5 (Figura 10.8) y 7x7 (Figura 10.9) píxeles:

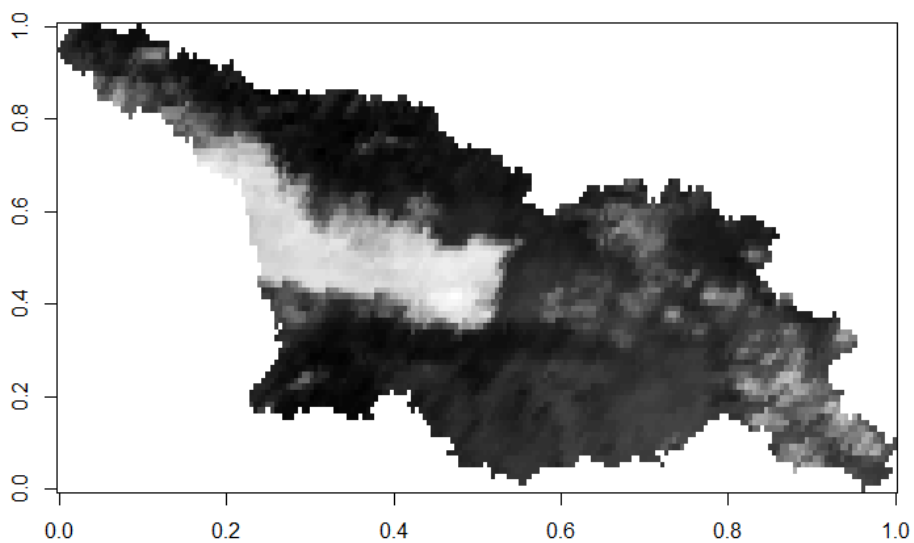


Figura 10.6 – Imagen original

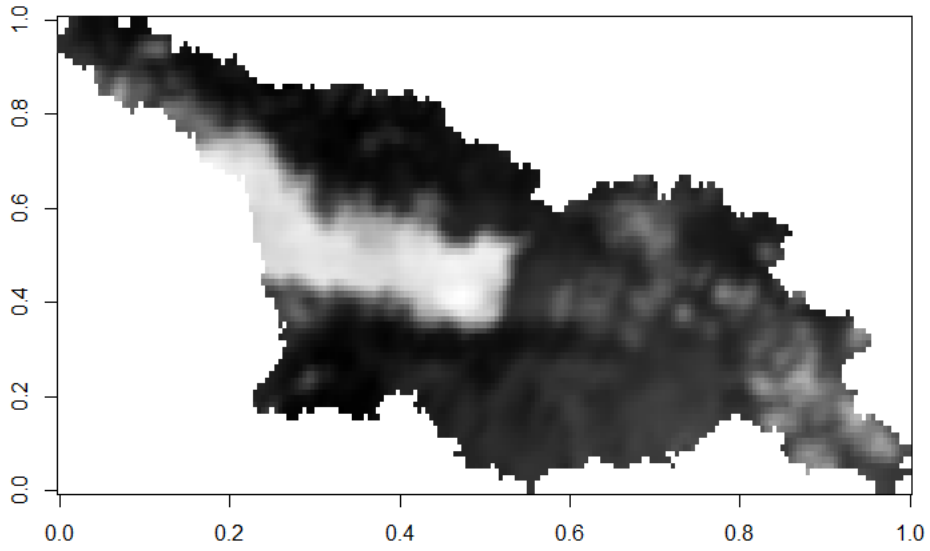


Figura 10.7 – Imagen suavizada con matriz 3x3

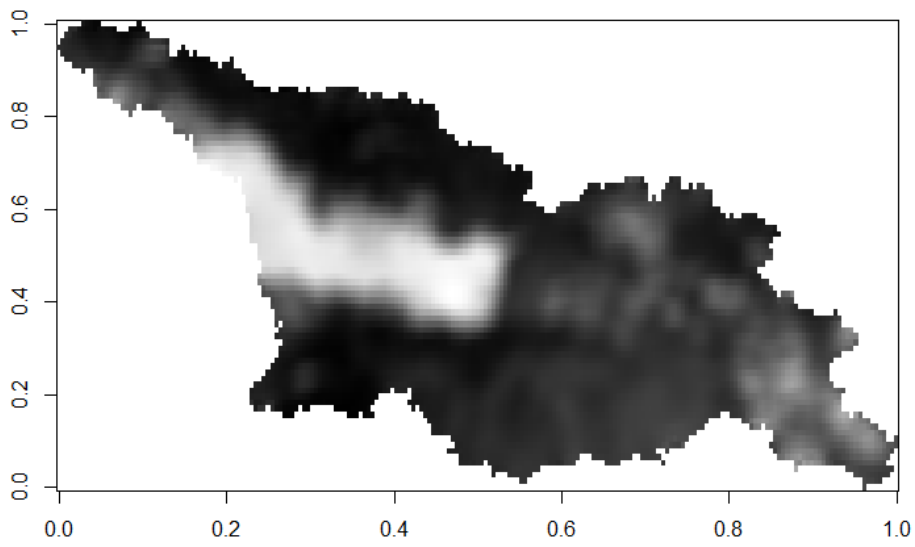


Figura 10.8 – Imagen suavizada con matriz 5x5

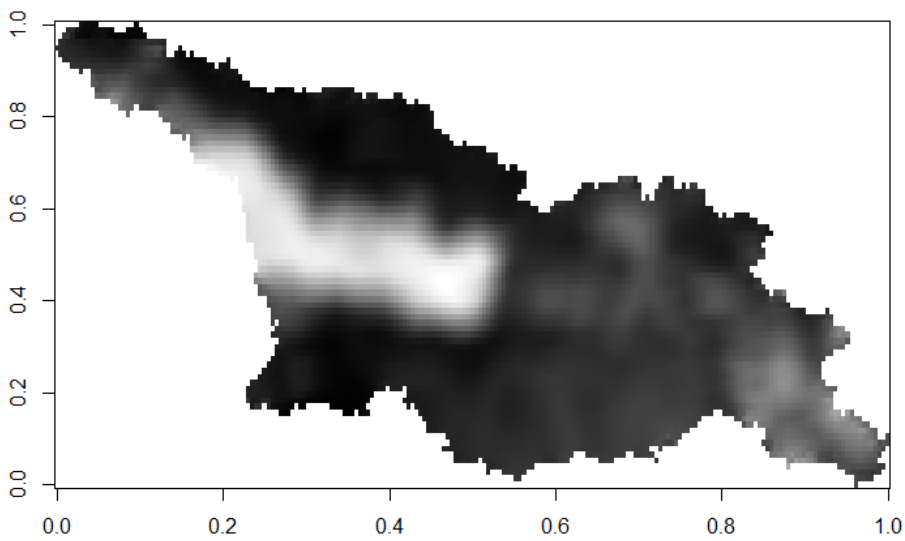


Figura 10.9 – Imagen suavizada con matriz 7x7

10.3. Resultados obtenidos

Con el fin de analizar el efecto de suavizar las imágenes con matrices de suavizado de diferentes tamaños, se ha decidido emplear los datos de los niveles digitales recogidos en la capital de Georgia, Tbilisi, entre los meses de Junio y Diciembre del 1998.

Con estos datos disponibles se han calculado la media y la desviación estándar mensuales y anuales de los datos originales y suavizados y, además, se han pintado los histogramas del nivel digital de las datos también mensuales y anuales. Toda esta información aparece expuesta ordenadamente en Tabla 10.1 y en la Tabla 10.2. Las filas coloreadas de color azul presentan el resultado de realizar la media de los valores de una misma columna, los valores que aparecen en las filas de color verde se obtienen teniendo en cuenta el conjunto de todos los datos disponibles para el periodo estudiado. Los histogramas aparecen ordenados por meses y agrupando en cada mes los resultados obtenidos con los diferentes suavizados. Éstos están disponibles para su revisión en las páginas 54-61 de este mismo documento.

	MEDIA			
	ORIGINAL	3x3	5x5	7x7
Junio	33,4627	33,5829	33,8266	34,0751
Julio	33,4551	33,5829	33,8628	34,0876
Agosto	30,7062	31,0284	31,1410	31,2339
Septiembre	32,0611	32,1586	32,2723	32,4244
Octubre	21,8273	21,9558	21,9677	21,9468
Noviembre	20,5759	20,6974	20,7025	20,7582
Diciembre	16,5922	16,6872	16,7520	16,8427
MEDIA MENSUAL	26,9544	27,1093	27,2186	27,3384
MEDIA PERIODO	26,7341	26,8907	26,9985	27,1166

Tabla 10.1 - Tabla comparativa de las medias calculadas para Tbilisi

	DESVIACIÓN			
	ORIGINAL	3x3	5x5	7x7
Junio	32,9063	32,4857	32,5797	32,6660
Julio	32,6247	33,4571	33,5133	33,5965
Agosto	29,7461	29,6536	29,6452	29,7082
Septiembre	33,6589	33,4623	33,4641	33,5292
Octubre	25,1744	25,1175	25,0336	24,9523
Noviembre	24,9509	24,8694	24,7419	24,7394
Diciembre	20,1333	20,1313	20,1577	20,2025
DESVIACIÓN MEDIA	28,5989	28,4538	28,4479	28,4849
DESVIACIÓN PERIODO	29,5696	29,4276	29,4427	29,4975

Tabla 10.2 – Tabla comparativa de las desviaciones calculadas para Tbilisi

10.4. Conclusiones

Analizando la Tabla 10.1 se puede apreciar como la media de los datos analizados se incrementa de manera proporcional al tamaño de la matriz de suavizado aplicada, lo que podría traducirse en una posterior sobreestimación de los valores de radiación tras realizar los correspondientes cálculos.

Respecto a la Tabla 10.2 se recogen las desviaciones estándares, esto es, el promedio aritmético de fluctuaciones de los datos respecto a su media. Analizando los resultados, las matrices de suavizado de 3x3 y 5x5 son las que arrojan unos valores en general inferiores con respecto a la imagen original. La matriz de 5x5 aporta unos resultados de desviaciones mensuales inferiores con respecto a la matriz 3x3, pero esta segunda arroja un resultado inferior cuando la desviación se calcula con todo el conjunto de datos del periodo. Respecto al uso de una matriz de 7x7, todos los resultados obtenidos son superiores a sus predecesoras.

Tras la observación de ambas tablas se puede concluir diciendo que, en caso de realizar un suavizado de la imagen original, las mejores opciones serían aplicar una matriz de 3x3 o de 5x5 ya que una matriz de 7x7 eleva demasiado la media, posibles sobreestimaciones, y genera unas desviaciones peores, mayor diferencia promedio de los datos con respecto a la media de los mismos.

Estas conclusiones son representativas para el estudio de un solo punto o píxel de la imagen disponible, no para el estudio de una imagen completa. En este caso se ha empleado el píxel que contiene a la capital de Georgia, Tbilisi.

Histogramas periodo completo de estudio

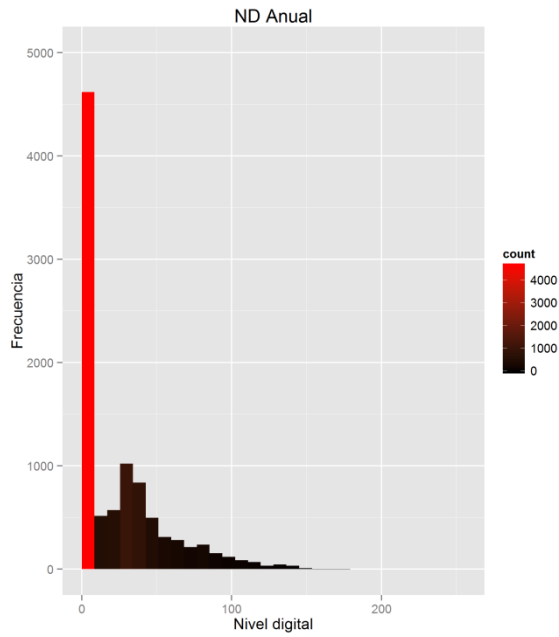


Figura 10.10 – Histograma anual datos originales

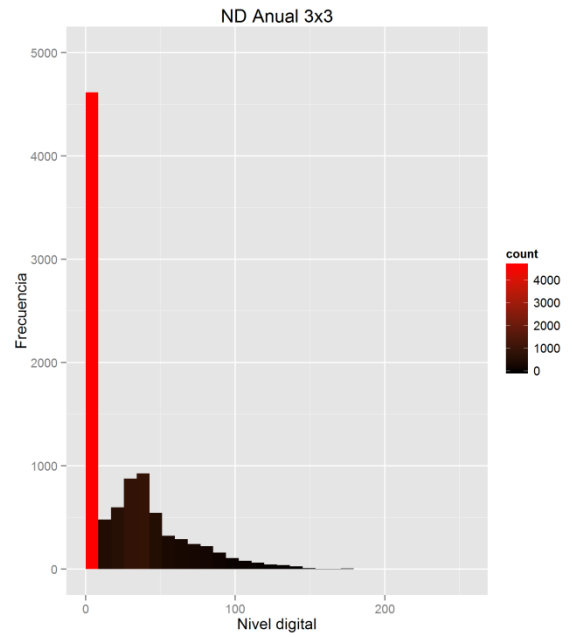


Figura 10.11 – Histograma anual con matriz 3x3

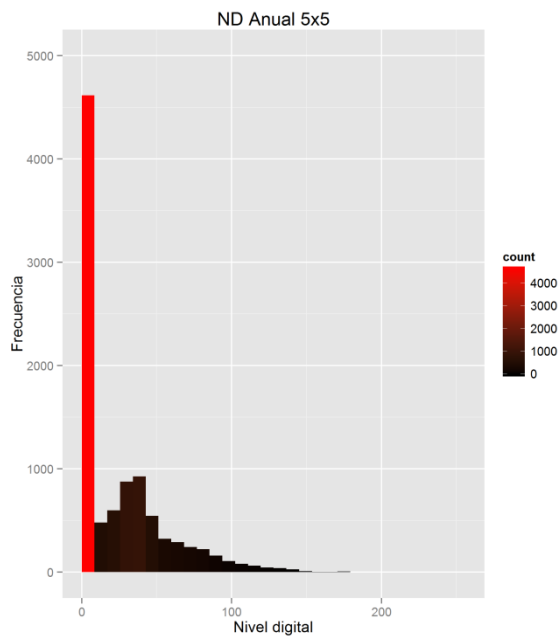


Figura 10.12 – Histograma anual con matriz 5x5

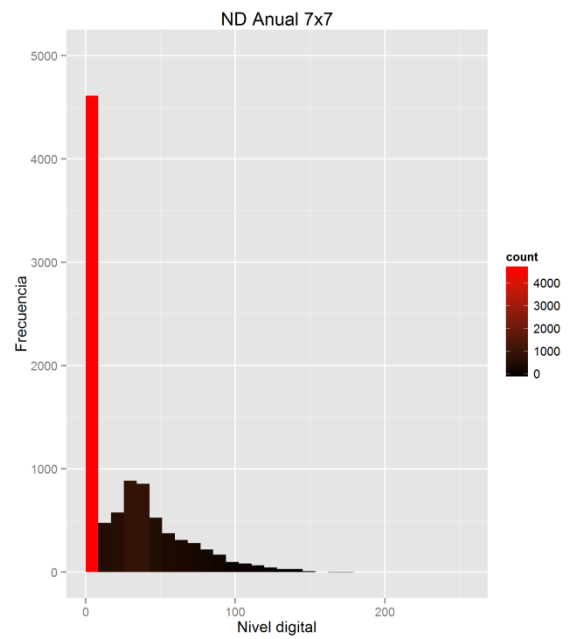


Figura 10.13 – Histograma anual con matriz 7x7

Histogramas de Junio

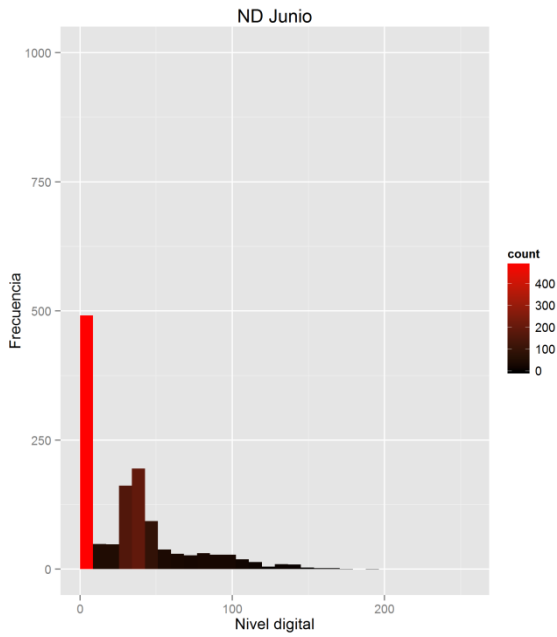


Figura 10.14 – Histograma junio datos originales

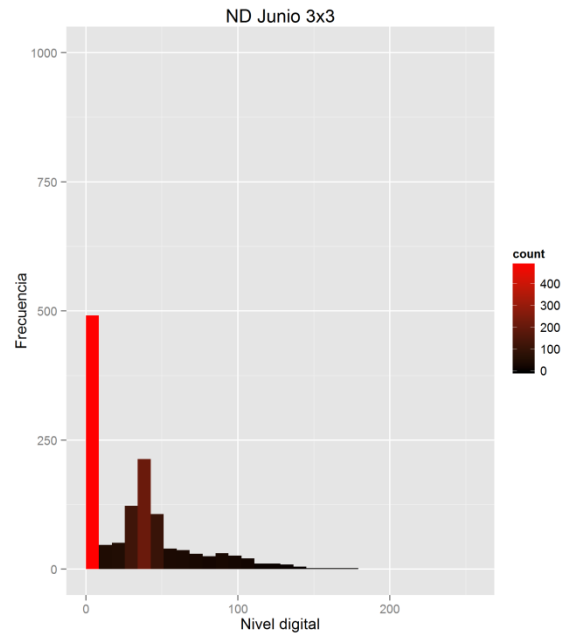


Figura 10.15 – Histograma junio con matriz 3x3

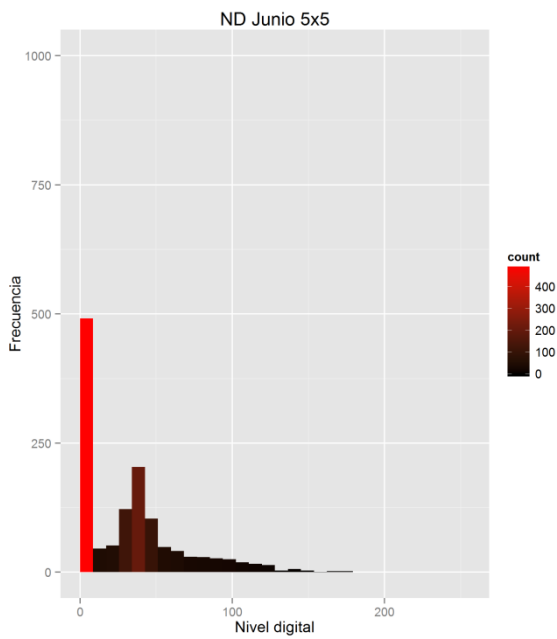


Figura 10.16 – Histograma junio con matriz 5x5

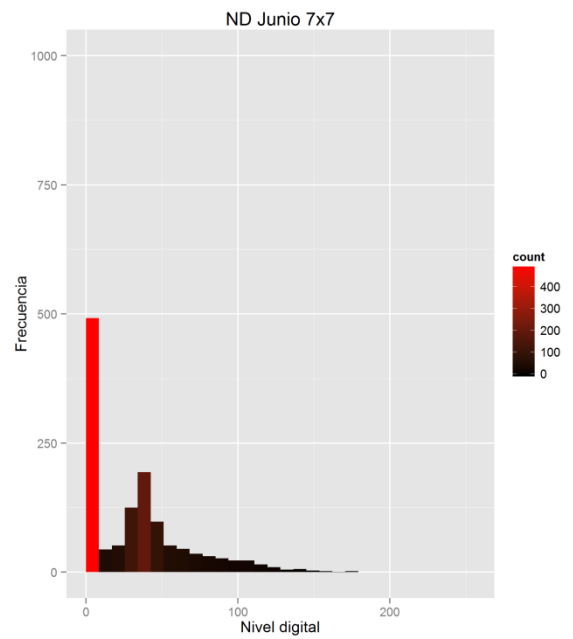


Figura 10.17 – Histograma junio con matriz 7x7

Histogramas de Julio

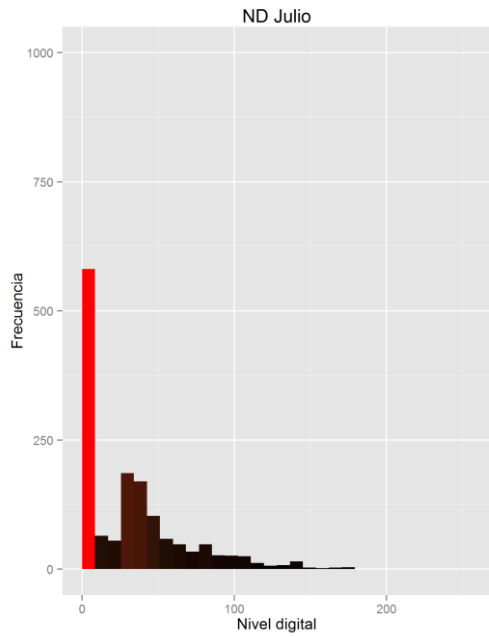


Figura 10.18 – Histograma julio datos originales

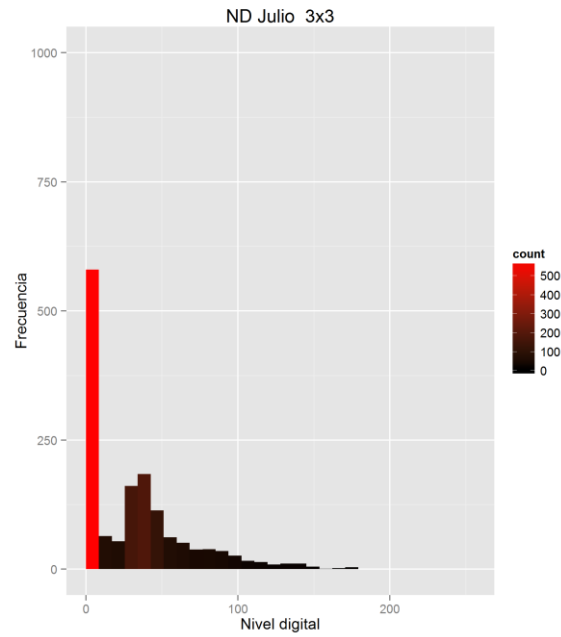


Figura 10.19 – Histograma julio con matriz 3x3

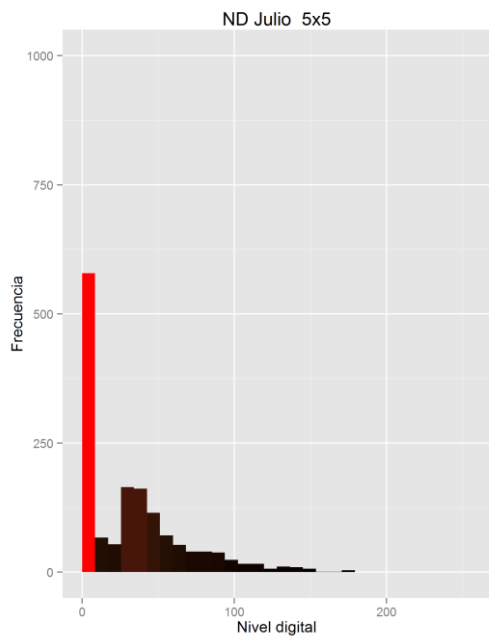


Figura 10.20 – Histograma julio con matriz 5x5

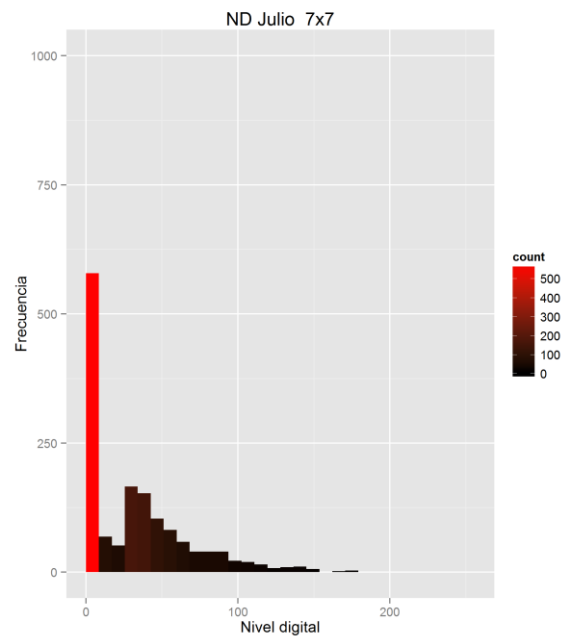


Figura 10.21 – Histograma julio con matriz 7x7

Histogramas de Agosto

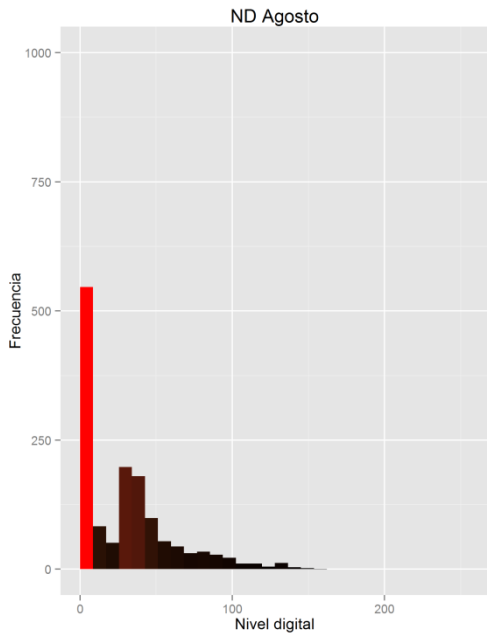


Figura 10.22 – Histograma agosto datos originales

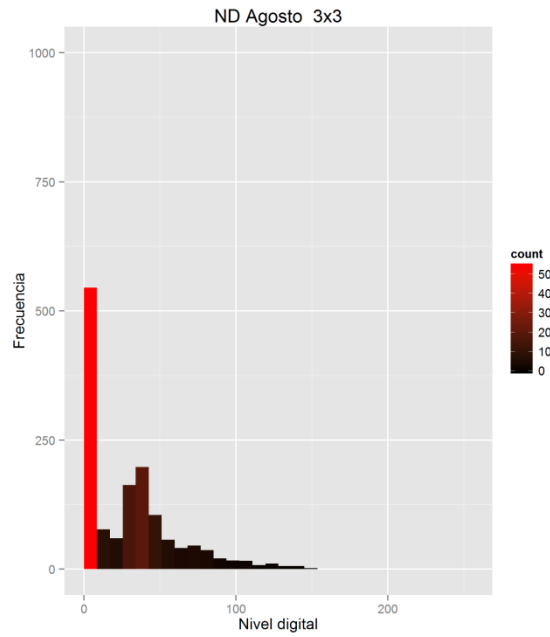


Figura 10.23 – Histograma agosto con matriz 3x3

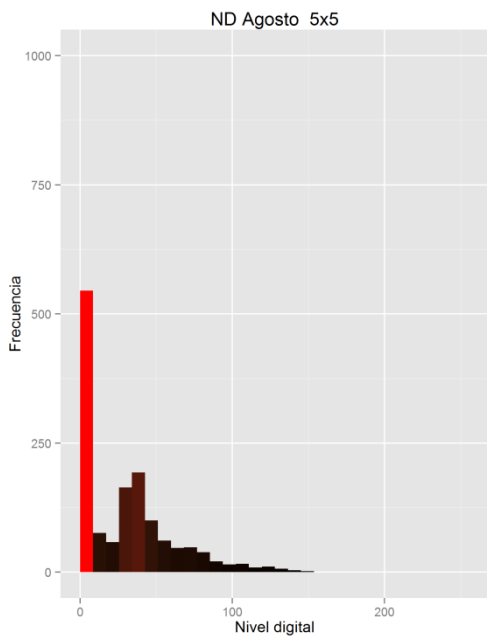


Figura 10.24 – Histograma agosto con matriz 5x5

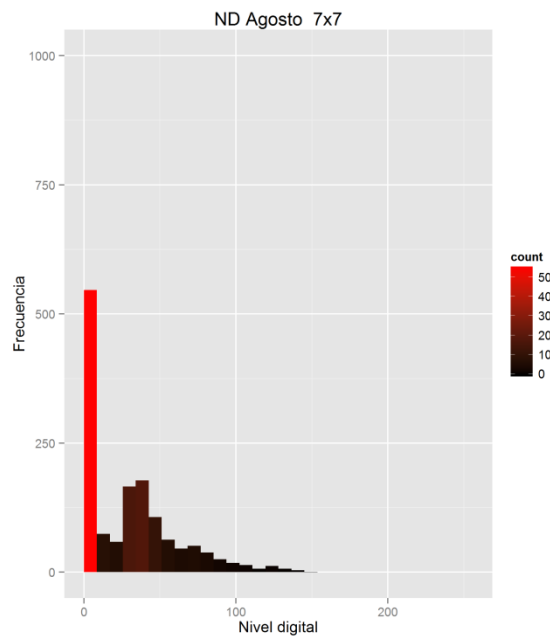


Figura 10.25 – Histograma agosto con matriz 7x7

Histogramas de Septiembre

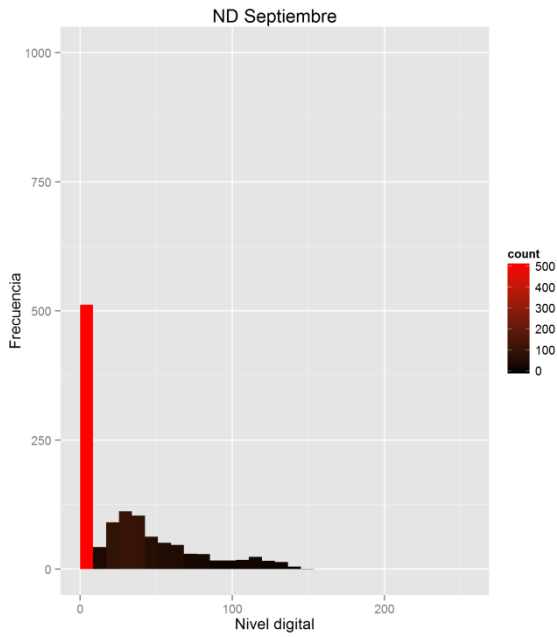


Figura 10.26 – Histograma septiembre datos originales

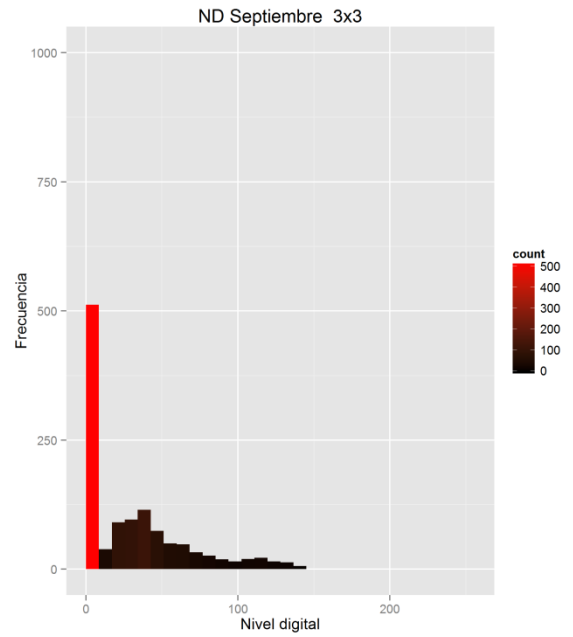


Figura 10.27 – Histograma septiembre con matriz 3x3

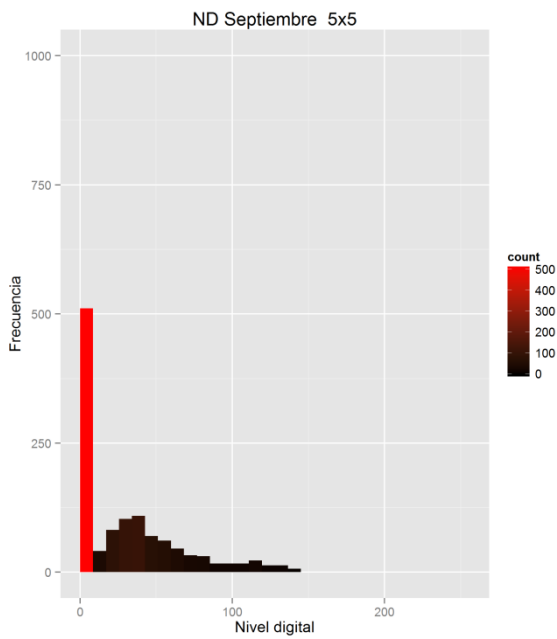


Figura 10.28 – Histograma septiembre con matriz 5x5

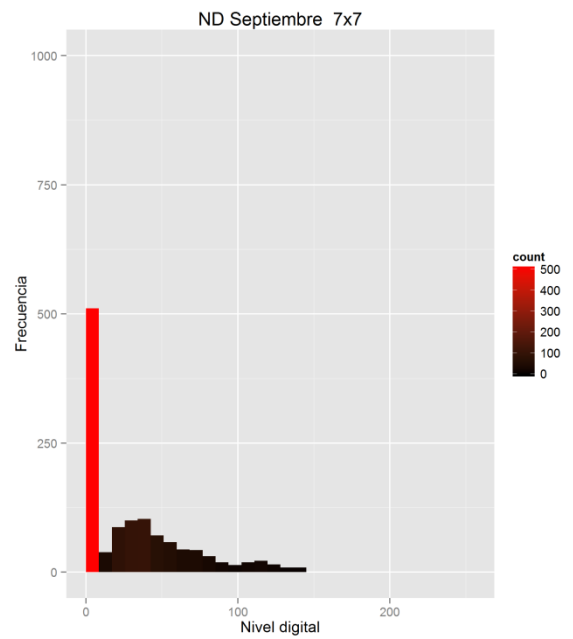


Figura 10.29 – Histograma septiembre con matriz 7x7

Histogramas de Octubre

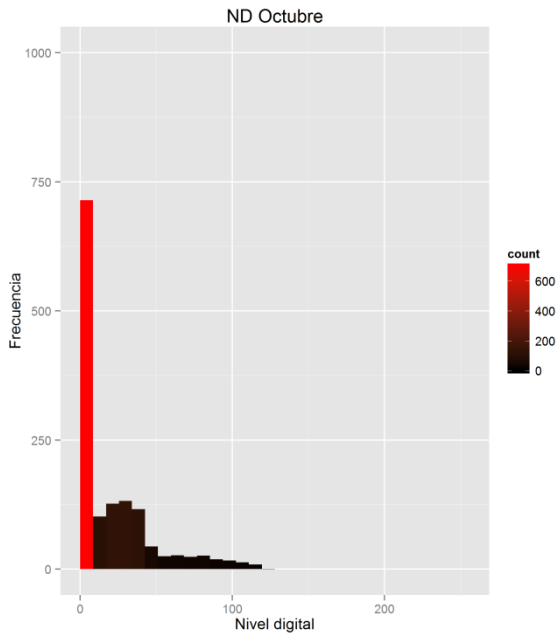


Figura 10.30 – Histograma octubre datos originales

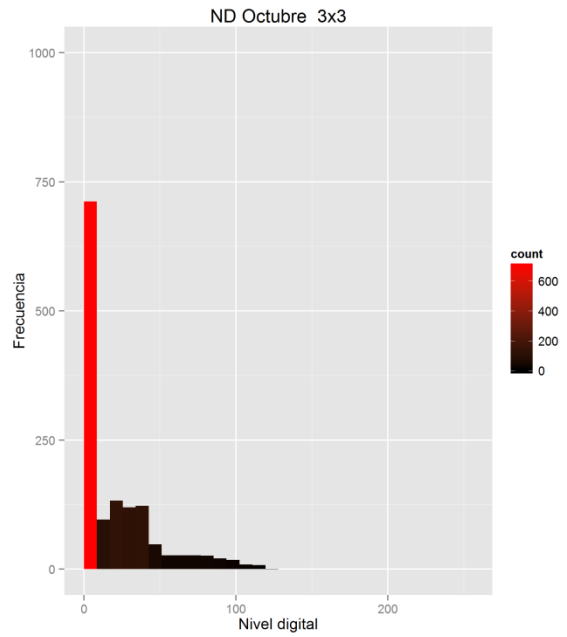


Figura 10.31 – Histograma octubre con matriz 3x3

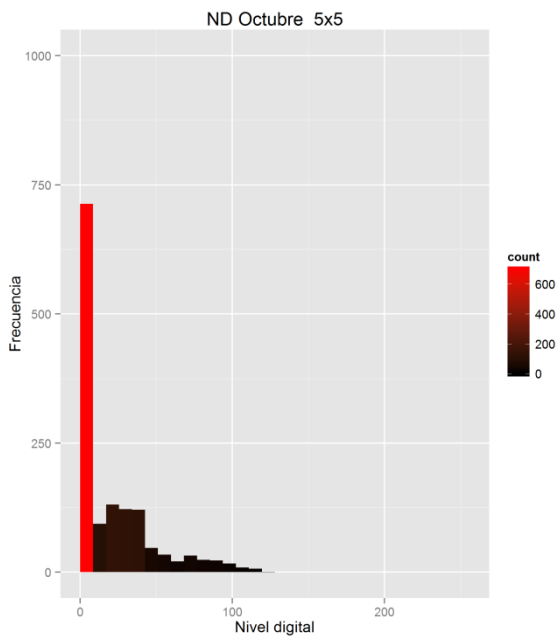


Figura 10.32 – Histograma octubre con matriz 5x5

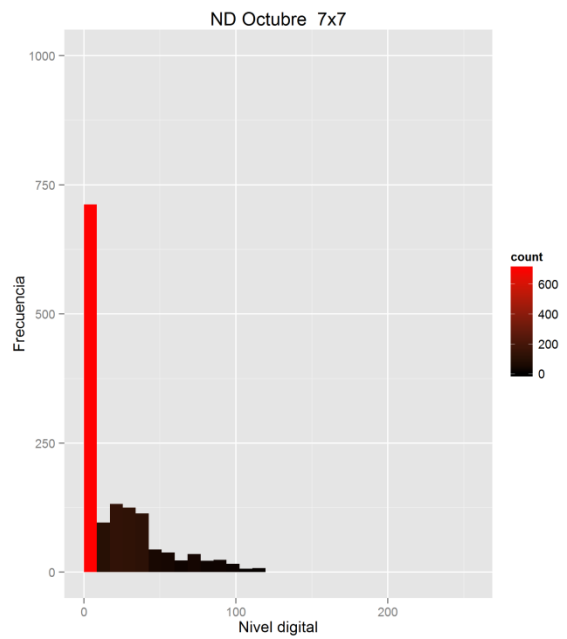


Figura 10.33 – Histograma octubre con matriz 7x7

Histogramas de Noviembre

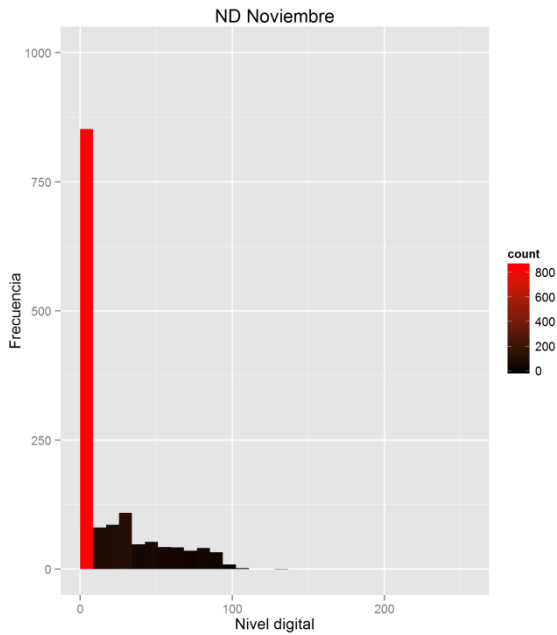


Figura 10.34 – Histograma noviembre datos originales

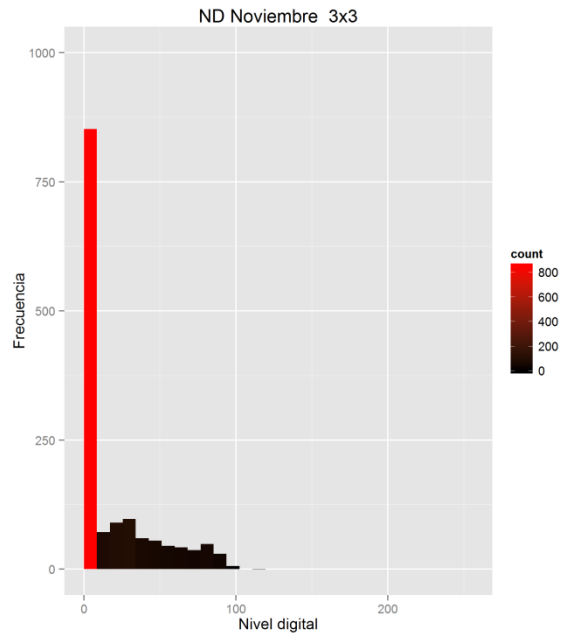


Figura 10.35 – Histograma noviembre con matriz 3x3

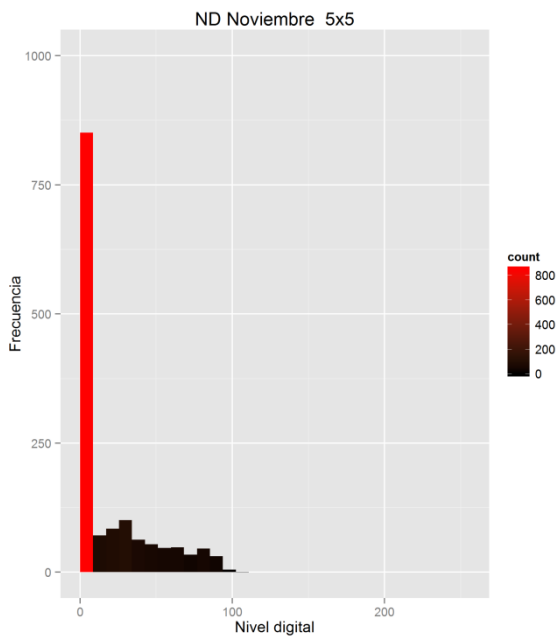


Figura 10.36 – Histograma noviembre con matriz 5x5

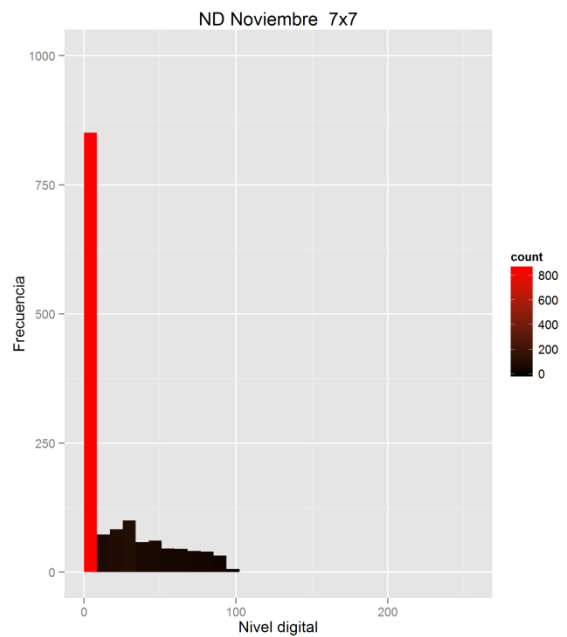


Figura 10.37 – Histograma noviembre con matriz 7x7

Histogramas de Diciembre

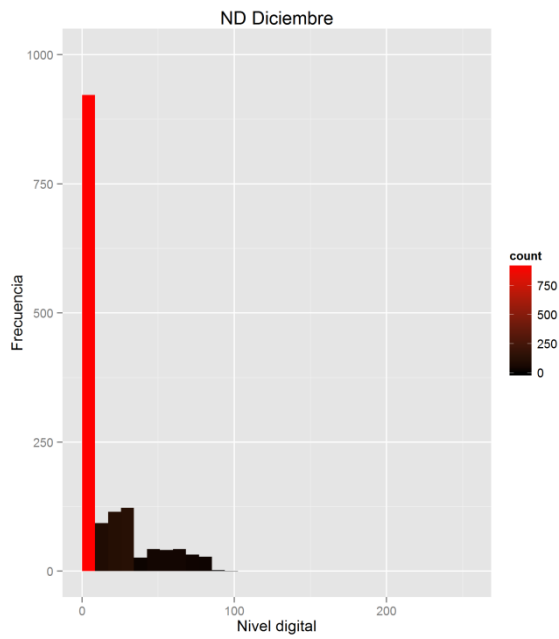


Figura 10.38 – Histograma diciembre datos originales

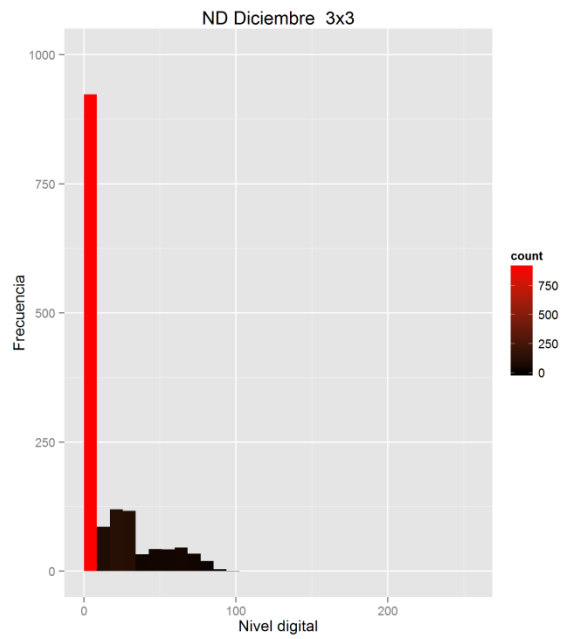


Figura 10.39 – Histograma diciembre con matriz 3x3

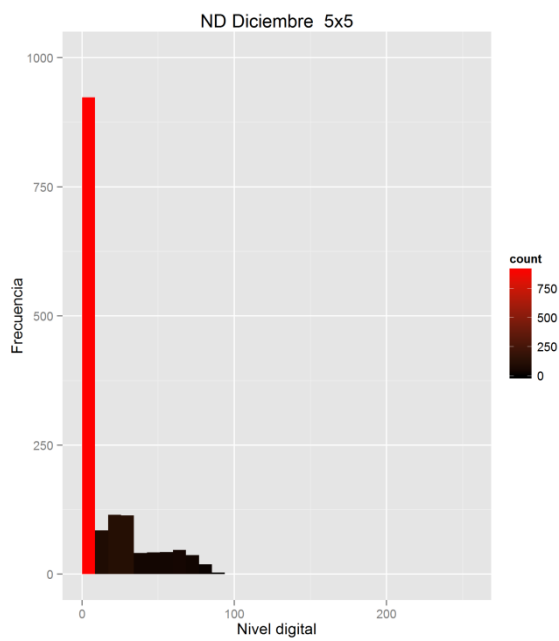


Figura 10.40 – Histograma diciembre con matriz 5x5

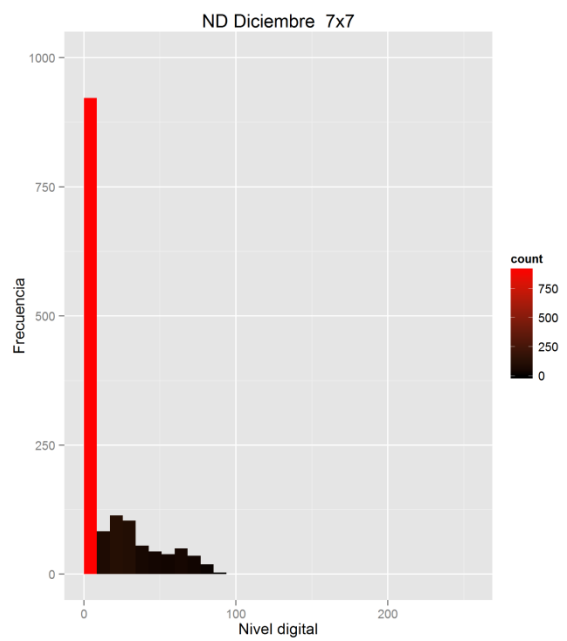


Figura 10.41 – Histograma diciembre con matriz 7x7

11. ESTUDIO DE LOS MÉTODOS HELIOSAT-1 Y HELIOSAT-2

Actualmente en CENER están implementados el método Heliosat-1, el método Heliosat-2 y una combinación de ambos con ciertas modificaciones que se estudiará en este mismo apartado más adelante.

Comenzaré por la exposición del método Heliosat-1 para continuar con su descendiente el método Heliosat-2 y finalizar con el método implementado en CENER.

11.1. Método Heliosat-1

Este método fue desarrollado por Cano y Diabatè en los años 80 [12] [13] [14]. Se considera uno de los métodos de mayor precisión para estimar la radiación solar a partir de imágenes de satélite.

El fundamento de este modelo consiste en identificar nubes de un tamaño superior al de un píxel, mediante el análisis temporal de una serie de imágenes, la estimación del albedo correspondiente a cada píxel se realiza mediante un filtro iterativo y adaptativo. Este modelo presenta dos limitaciones importantes:

- No permite detectar nubes de tamaño menor de un píxel
- Solo se puede aplicar sobre superficies que tengan comportamiento lambertiano

En el caso de La Tierra la mayor parte de la superficie continental tiene este comportamiento lambertiano. Sin embargo en el agua y en superficies que estén cubiertas por nubes este comportamiento no se llega a cumplir del todo y, por otro lado, este comportamiento también se puede cuestionar en el caso de ángulos cenitales superiores a 75°-85°.

Para cielos muy claros, se puede definir el *albedo instantáneo o aparente* (ρ^t) como la fracción de radiación visible reflejada por la superficie terrestre correspondiente a un píxel de la imagen en un instante t . Se puede expresar de la siguiente manera [15]:

$$\rho^t = \pi L^t(\alpha_{sat})(G_C K^t(\alpha_{sat}) g^t(\alpha_{sat}))^{-1} \quad (11.1)$$

Donde:

- G_C representa la irradiancia global sobre la superficie horizontal para cielo claro evaluada mediante el modelo de Perrin de Brichambau, ecuación (7.26)
- α_{sat} elevación del satélite; es el ángulo que subtiende el vector de posición del satélite con el plano horizontal en una localización concreta (análoga a la altura solar)
- $L^t(\alpha_{sat})$ es la radiancia recibida por el satélite procedente de un píxel concreto
- $K^t(\alpha_{sat})$ representa el factor de transmisión para cielo claro en función de la elevación del satélite. Puede calcularse, siguiendo el modelo de cielo claro de Perrin de Brichambau, mediante la expresión:

$$K^t(\alpha_{sat}) = 0,81(\sin\alpha_{sat})^{0,15} \quad (11.2)$$

- $g^t(\alpha_{sat})$ es una función que permite corregir parcialmente comportamientos no lambertianos; esta función se puede aproximar a la función seno:

$$g^t(\alpha_{sat}) \approx \sin \alpha_{sat} \quad (11.3)$$

La altura de un satélite respecto a un determinado píxel se puede calcular a partir de las coordenadas geográficas del píxel, latitud (Φ) y longitud (Λ), parámetros orbitales del satélite (radio orbital, R_s , y longitud geográfica nominal, Λ_0 , del satélite) y el radio ecuatorial terrestre (R_e):

$$\alpha_{sat} = \sin^{-1} \left[\frac{(R_s \cos \Phi \cos(\Lambda - \Lambda_0) - R_e)}{((R_s - R_e)^2 + 2R_s R_e (1 - \cos \Phi \cos(\Lambda - \Lambda_0)))^{1/2}} \right] \quad (11.4)$$

Si se admite que la respuesta del sensor se comporta de una forma lineal respecto al nivel digital detectado, la radiancia recibida por el sensor se puede expresar:

$$L^t = \frac{k^*}{\pi} (ND^t - ND_0) \quad (11.5)$$

Donde ND es el nivel digital registrado (escala de grises de 0 a 255), ND_0 es el valor de offset del sensor del satélite y k^* una constante de ajuste que depende de las características radiométricas del sensor.

De esta manera, según las ecuaciones (11.2), (11.3) y (11.5), es posible reescribir la ecuación (11.1) como:

$$\rho^t = k^* (ND^t - ND_0) (G_C (\sin \alpha_{sat})^{1.15})^{-1} \quad (11.6)$$

Reemplazando G_C por su valor, ecuación (7.26), es posible definir el denominado *nivel digital corregido* (ND_C^t) como:

$$ND_C^t = (ND^t - ND_0) (\varepsilon (\sin \alpha_{sat})^{1.15} (\sin \alpha)^{1.15})^{-1} \quad (11.7)$$

A partir de las ecuaciones (7.26) y (11.7) se puede reescribir la ecuación (11.6) en función del nivel digital corregido como:

$$\rho^t = a \cdot ND_C^t + b \quad (11.8)$$

Esta expresión, si se ajusta utilizando datos de Europa y África [15], puede escribirse como:

$$\rho^t = 0,0036 \cdot ND_C^t + 0,02 \quad (11.9)$$

Para calcular el coeficiente de cobertura nubosa antes hay que conocer el *albedo de referencia* (ρ_g), el cual representa el valor más probable que adquiere la reflectancia de la superficie terrestre en un instante concreto. Debido a que el albedo de la superficie terrestre varía (cambios de estación, lluvias torrenciales, nevadas) es necesario establecer un valor de referencia para cada imagen que permita identificar variaciones bruscas.

Para el cálculo del albedo de referencia antes hay que estimar en primer lugar un *albedo de referencia inicial* (ρ_g^0), siendo éste el valor mínimo del albedo aparente de una serie de imágenes con cielo despejado.

Una vez obtenido el albedo de referencia inicial se debe actualizar el valor de referencia para cada imagen. A fin de evitar que el albedo se actualice con un valor que represente una situación puntual (nevadas, lluvias...), el método propuesto por Cano y Moussu [12] limita la variación máxima admisible entre dos imágenes consecutivas (σ_A). También se deben de tener en cuenta aquellos casos en los que un píxel pueda estar cubierto de de nieve o arena (ρ_{ss}); en tal caso la reflectancia será muy elevada pero no debe ser confundida con el albedo de las nubes. Los parámetros σ_A y ρ_{ss} varían según la fuente que se consulte.

Así este método consiste en un algoritmo iterativo y adaptativo donde, una vez determinado el albedo de referencia inicial, se considera:

- Píxel cubierto por nubes. La diferencia entre el albedo aparente y el valor de referencia es tan brusca que se considera que el píxel no está despejado. En ese caso no hay actualización del albedo de referencia:

$$\rho^t > \rho_g^{t-1} + \sigma_A \rightarrow \rho_g^t = \rho_g^{t-1} \quad (11.10)$$

- Píxel despejado pero cubierto de nieve o arena. En este caso la diferencia entre el albedo aparente y el albedo de referencia está dentro de lo permitido, correspondiendo el mayor albedo al de nieve o arena. La actualización del albedo de referencia se realiza tomando como nuevo valor de referencia el aparente:

$$\begin{aligned} \rho^t < \rho_g^{t-1} + \sigma_A \\ \rho^t < \rho_{ss} < \rho_g^{t-1} \rightarrow \rho_g^t = \rho^t \end{aligned} \quad (11.11)$$

- En el resto de casos, para actualizar el valor del albedo de referencia se utiliza una ecuación mediante la cual se asigna un peso relativo al albedo aparente. El nuevo valor del albedo de referencia queda:

$$\rho_g^t = \frac{N\rho_g^{t-1} + \rho^t}{N + 1} \quad (11.12)$$

donde N representa el peso relativo que se asigna a los resultados anteriores, suavizando así la serie de albedos de referencia.

A partir de los albedos aparentes y de referencia se puede estimar el *coeficiente de cobertura nubosa* (n) mediante [12]:

$$n^t = (\rho^t - \rho_g^t)(\rho_n - \rho_g^t)^{-1} \quad (11.13)$$

Este parámetro aporta información sobre la transparencia (transmisión) de la columna atmosférica sobre el píxel en función de la fracción del píxel que se encuentra cubierta por nubes.

En la expresión anterior aparece el parámetro ρ_n , denominado *albedo aparente de las nubes* y su estimación se realiza mediante un método contrario al del albedo de referencia, es decir, en este caso se busca el valor máximo de una serie de albedos aparentes (máxima reflectancia corresponde a píxel cubierto), y calculando su valor medio (solo un valor independiente del píxel)

Obtenido el coeficiente de cobertura nubosa se puede proceder a estimar el *coeficiente de transparencia atmosférica* (K_T) teniendo en cuenta la siguiente relación lineal [16] [14] [17]:

$$K_T^t = a\eta^t + b \quad (11.14)$$

11.2. Método Heliosat-2

Este método [18] es la evolución del método estudiado en el apartado anterior. Las mejoras que aporta éste se agrupan en las siguientes categorías:

- Adopción de un nuevo modelo de cielo claro
- Utilización de coeficientes de calibración para el sensor
- Propuesta de una nueva formulación para el cálculo de los albedos
- Modificación de la relación entre irradiancia global horizontal y el coeficiente de la cobertura nubosa.

El modelo de cielo claro utilizado por Heliosat-2 es el propuesto en 4th European Solar Radiation Atlas [19]. Este modelo introduce parámetros referenciados a la calidad de la atmósfera en cada píxel mediante el factor de turbidez de Linke.

Al igual que en el método anterior, se emplean una serie de coeficientes de calibración diarios del sensor (canal visible) pero esta vez calculados según una nueva expresión, validada durante el periodo 1985-97 [20]. A partir de estos coeficientes (a^t , b^t y ND_0^t) la radiancia detectada por el sensor se puede evaluar de la siguiente manera [21]:

$$L^t = a^t(ND^t - ND_0) + b^t \quad (11.15)$$

Respecto al cálculo de los albedos, la nueva expresión propuesta es:

$$\rho^t = \pi L^t (\varepsilon I_0^{met} \sin \alpha)^{-1} \quad (11.16)$$

Donde I_0^{met} representa la irradiancia total que el sensor de cada satélite (un valor por satélite) puede detectar en el canal visible [22].

Para un día claro, la reflectancia que detecta el satélite se puede expresar en función del albedo de referencia y de las posiciones angulares del satélite y el Sol respecto al píxel estudiado. Debido al tamaño de cada píxel los efectos de reflexión y scattering múltiples se pueden despreciar [23]; con estas condiciones se puede calcular el albedo aparente mediante:

$$\rho^t = \rho_{atm}^t + \rho_g^t T^t(\alpha, T_L) T^t(\alpha_{sat}, T_L) \quad (11.17)$$

donde ρ_{atm} representa el *albedo de la atmósfera*. En el segundo sumando, ρ_g corresponde al

albedo terrestre de referencia (día claro); la función T^t representa la transmitancia global de la atmósfera tanto para la radiación incidente sobre la superficie terrestre como para la fracción reflejada hacia el satélite y T_L el factor de turbidez de Linke.

El albedo de la atmósfera se produce debido a la reflexión y difusión de la radiación que, tras interactuar con la atmósfera, llega al sensor. Si se considera que el scattering atmosférico es isótropo y homogéneo, la radiancia que es detectada por el sensor procedente de la atmósfera puede ser evaluada de forma similar a la radiancia procedente de la superficie terrestre [20]. Así la *radiancia atmosférica* (L_{atm}) se puede evaluar:

$$L_{atm}^t = \frac{D_C^t I_0^{met}}{I_{CS} \pi} (0,5 / \sin \alpha_{sat})^{0,8} \quad (11.18)$$

Donde D_C representa la componente difusa según el modelo de cielo claro. El albedo atmosférico se calcula resolviendo la ecuación (11.16) con los valores correspondientes a la elevación del satélite y radiancia atmosférica:

$$\rho_{atm}^t = \pi L_{atm}^t (\epsilon I_0^{met} \sin \alpha)^{-1} \quad (11.19)$$

Según el modelo de cielo claro, la transmitancia global de la atmósfera se calcula como la suma de la componente difusa y la componente directa. Debido al principio de reciprocidad, esta fórmula sirve tanto para la radiación incidente sobre la Tierra como para la reflejada por la misma, empleando como variables angulares la elevación solar y la elevación del satélite respectivamente:

$$T^t(\alpha, T_L) = T_{rb}^t(\alpha, T_L) + T_{rd}^t(\alpha, T_L) \quad (11.20)$$

$$T^t(\alpha_{sat}, T_L) = T_{rb}^t(\alpha_{sat}, T_L) + T_{rd}^t(\alpha_{sat}, T_L) \quad (11.21)$$

Para calcular el albedo de referencia, en este método se introduce un *albedo aparente de cielo claro* (ρ_{gc}^t) que puede calcularse según la siguiente ecuación:

$$\rho_{gc}^t = (\rho^t - \rho_{atm}^t) (T^t(\alpha) T^t(\alpha_{sat}))^{-1} \quad (11.22)$$

Esta expresión evaluada sobre un conjunto de p -imágenes, formado por todas las correspondientes a los meses de enero y julio (representantes de invierno y verano), permite calcular el albedo de referencia inicial como el correspondiente al segundo mínimo de la serie de albedos aparentes de cielo claro correspondiente a cada píxel, imponiendo un límite inferior de 0,05 [24]:

$$\rho_g^0 = \max[0,05, \min\{\rho_{gc}^i, i=1,2,\dots,(n-1),(n+1),\dots,p\} / \rho_{gc}^n = \min\{\rho_{gc}^i, i=1,2,\dots,p\}] \quad (11.23)$$

Con este albedo de referencia inicial se propone un albedo de referencia para cada uno de los meses de la serie de imágenes a analizar. Se emplea un algoritmo para la generación de este albedo [24]:

1. Cálculo de la serie de albedos aparentes de cielo claro (ρ_{gc}^t) para cada mes (m) de cada año (a).
2. Selección del segundo mínimo de la serie generada ($\rho_g^{ma,0}$).
3. Comparación del albedo anterior seleccionado con el albedo de referencia inicial. Se impone que su valor no sea mayor que el doble del valor de referencia inicial ni menor que la mitad de éste:

$$\rho_g^{ma} = \max[\min[\rho_g^{ma,0}, 2\rho_g^0], 0,5\rho_g^0] \quad (11.24)$$

Para estimar el albedo aparente de las nubes, primero se calcula el *albedo efectivo de las nubes* (ρ_{ef}) mediante la siguiente expresión [25]:

$$\rho_{ef} = 0,78 - 0,13[1 - \exp(-4(\sin \alpha)^5)] \quad (11.25)$$

Pudiendo así estimar el albedo aparente de forma análoga al albedo aparente de cielo claro (ecuación (11.22)):

$$\rho_n^{t*} = (\rho_{ef} - \rho_{atm}^t)(T^t(\alpha, T_L)T^t(\alpha_{sat}, T_L))^{-1} \quad (11.26)$$

A este valor calculado se le impone:

- Que sea mayor que 0,02 [26]
- Que no sea mayor que 2,24 veces el albedo efectivo de las nubes (factor de anisotropía máximo) [27]

$$\rho_n^t = \min[2,24\rho_{ef}, \max[\rho_n^{t*}, 0,02]] \quad (11.27)$$

De este modo, el coeficiente de cobertura nubosa queda expresado como en el método Heliosat-1 pero con la peculiaridad de que el albedo de las nubes es un parámetro temporalmente variable y el albedo de referencia un valor mensual estimado:

$$n^t = (\rho^t - \rho_g^{ma})(\rho_n^t - \rho_g^{ma})^{-1} \quad (11.28)$$

Para el cálculo de la irradiancia global horizontal este método establece una relación entre el índice de cielo claro (k_c) y el coeficiente de cobertura nubosa. De esta manera se distingue entre días despejados y cubiertos [28] [29] [30] mediante la siguiente formulación:

$$\begin{aligned} n^t < -0,2 & & k_c^t &= 1,2 \\ -0,2 < n^t < 0,8 & & k_c^t &= 1 - n^t \\ 0,8 < n^t < 1,1 & & k_c^t &= 2,0667 - 3,6667n^t + 1,6667(n^t)^2 \\ 1,1 \leq n^t & & k_c^t &= 0,05 \end{aligned} \quad (11.29)$$

La Figura 11.1 muestra la gráfica de la relación expuesta:

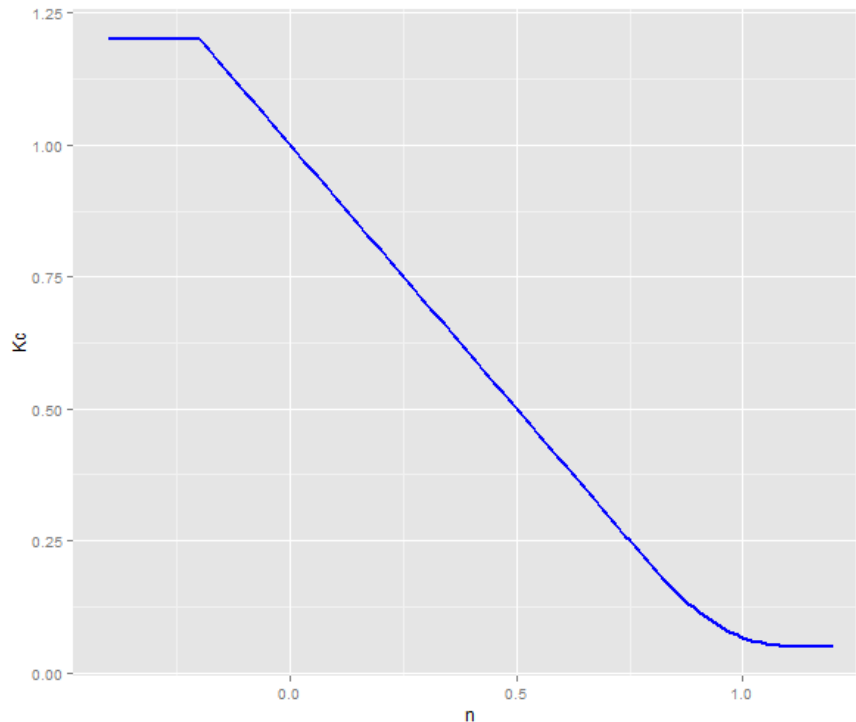


Figura 11.1 – Relación entre el índice de cielo claro y el coeficiente de cobertura nubosa

11.3. Método implementado en CENER

El método que se encuentra implementado en CENER se trata del método Heliosat-1 con ciertas modificaciones propias del método Heliosat-2 y con modificaciones propuestas por ciertos autores especializados en esta materia.

Este método sigue la siguiente secuencia de pasos para obtener la radiación directa:

1. Introducción de los datos de localización (longitud, latitud y altitud) y de Turbiedad de Linke de la estación cuyos datos medidos se van a contrastar con los resultados estimados, obtenidos mediante este método.
2. Introducción de los datos referentes al satélite cuyos datos van a ser empleados. Estos datos incluyen el radio orbital del satélite, longitud geográfica del satélite, función de calibración del sensor y offset de nivel digital del satélite.
3. Cálculo de la global de cielo claro horizontal, directa de cielo claro normal y difusa de cielo claro horizontal.
4. Introducción de: la variación máxima de albedo (σ_A) entre dos imágenes, el albedo para la nieve y la arena (ρ_{SS}), el albedo de referencia inicial (ρ_g^0) y el albedo de referencia de las nubes (ρ_n)
5. Cálculo del albedo de referencia diario.
6. Cálculo del coeficiente de cobertura nubosa.

7. Cálculo de la K_t y Global estimadas a partir de las imágenes de satélite.
8. Cálculo de la radiación directa a partir de la radiación global estimada según varios modelos: Orgill Hollands, Erbs, Reindl y Louche.

Una vez expuesto de forma general el procedimiento que se va a seguir, a continuación se muestran de forma detallada los cálculos que se encuentran ya implementados en R (ver Figura 11.2).

Procedimiento implementado

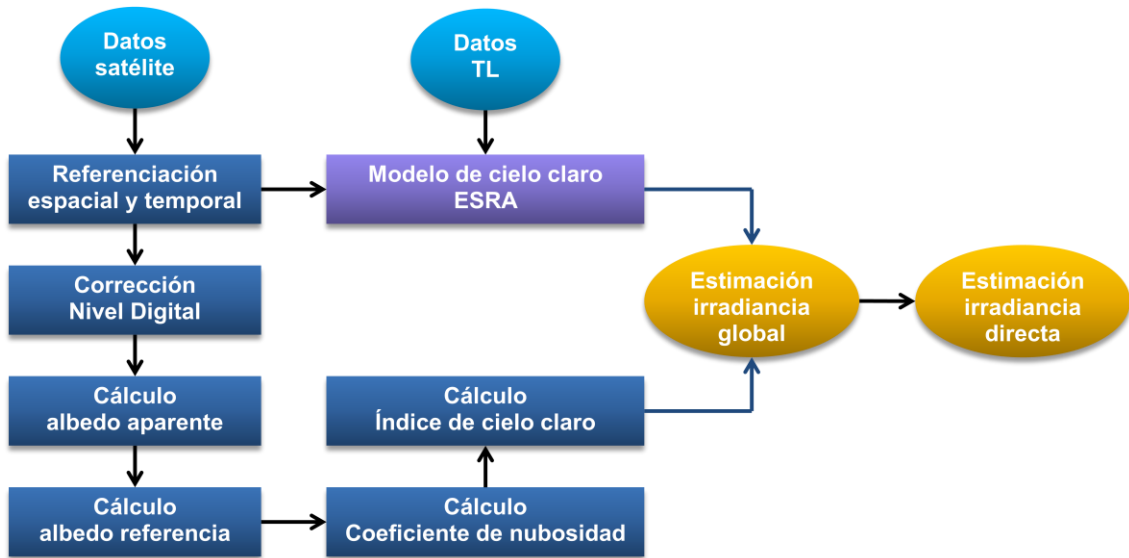


Figura 11.2 – Esquema procedimiento implementado en CENER

1. Para el cálculo de la global de cielo claro horizontal, directa de cielo claro normal y difusa de cielo claro horizontal se ha implementado un bucle en el cual se sigue la siguiente secuencia:

- Conversión de un instante dado por día, mes y año en el día juliano correspondiente, es decir, cada día de la secuencia de datos correspondiente tomará un valor comprendido entre 1 y 366, según el mes y año al que pertenezca.
- Cálculo del ángulo diario en radianes según la ecuación (7.3)
- Cálculo de la diferencia (en horas decimales) entre LAT (local apparent time) y LMT (local mean time or clock time), en el medio día solar. Las ecuaciones empleadas varían respecto de las ya expuestas, ecuación (7.1) y ecuación (7.2)(7.2), ya que han sido sacadas de la librería de funciones del método Heliosat-2.

$$ET = -0,128 \cdot \sin\left(\Gamma - 2,8 \frac{\pi}{180}\right) + (-0,165)\sin\left(2\Gamma + 19,7 \frac{\pi}{180}\right) \quad (11.30)$$

$$dt = ET + (\Lambda - \Lambda_{ref}) \frac{12}{\pi} - C_h \quad (11.31)$$

ET = Ecuación del tiempo

Λ = longitud del pixel

Λ_{ref} = longitud de referencia (tiene valor 0)

C_h = corrección horaria (en España vale 1 en invierno y 2 en verano, en este caso vale 0)

dt = offset entre LMT y LAT (horas decimales)

- Convierte la hora introducida en hora GMT

$$h = h - dt \quad (11.32)$$

- Obtención del ángulo horario según la Ecuación (7.4)
- El siguiente paso es calcular la declinación (δ) según las ecuaciones (7.7) y (7.8)
- Se calcula la excentricidad de órbita terrestre (ϵ) según la ecuación (7.14)
- Obtenida la excentricidad, se puede calcular la irradiancia solar extraterrestre instantánea (I_0) a partir de la siguiente expresión:

$$I_0 = I_{CS}\epsilon(\sin\Phi \cdot \sin\Lambda + \cos\Phi \cdot \cos\Lambda \cdot \cos\omega) \quad (11.33)$$

- El siguiente paso consiste en calcular la *altura o elevación solar* (α) la cual se entiende como el ángulo que subtende en vector posición solar con el plano horizontal tangente a la superficie de la Tierra en el punto de estudio, complementario al *ángulo cenital* (θ_z). Para ello se emplea la ecuación (7.11)

Para el ajuste adecuado de la elevación solar antes hay que conocer el *ángulo solar horario de salida del sol* (ω_{or}) y el *ángulo solar horario de puesta del sol* (ω_{oc}). Estos se calculan aplicando las siguientes expresiones:

$$horizon = \frac{-50}{60} \cdot \frac{\pi}{180} \quad (11.34)$$

$$\cos(\omega_s) = \frac{(\sin(horizon) - \sin\Phi \cdot \sin\delta)}{(\cos\Phi \cdot \cos\delta)} \quad (11.35)$$

$$\omega_s = \text{acos}(\cos(\omega_s)) \begin{cases} |\cos(\omega_s)| < 1 \rightarrow \omega_{or} = -\omega_s; \omega_{oc} = \omega_s \\ \cos(\omega_s) \geq 1 \rightarrow \omega_{or} = 0; \omega_{oc} = 0 \\ \cos(\omega_s) \leq -1 \rightarrow \omega_{or} = -\pi; \omega_{oc} = \pi \end{cases} \quad (11.36)$$

Para que el primer registro del día no aparezca con valores erróneos, se comprueba si la hora de la imagen es inferior a 0,25, en cuyo caso α tomará valor cero y θ_z pasará a valer $\pi/2$.

- Se corrige el nivel digital de la imagen según la ecuación (11.7)

$$ND_C^t = (ND^t - ND_0)(\epsilon(\sin \alpha_{\text{sat}})^{1.15}(\sin \alpha)^{1.15})^{-1} \quad (11.37)$$

- Con el nivel digital corregido se calcula el *albedo aparente* o *instantáneo* (ρ^t):

$$\rho^t = \frac{k^* \pi}{0,81 \cdot I_{CS}} ND_C^t \quad (11.38)$$

- Ahora ya se pueden calcular la componentes de radiación sobre superficie horizontal para cielo claro (global, directa y difusa) según el modelo de cielo claro de ESRA, visto en el apartado *El modelo de cielo claro ESRA* (página 35).

Hay que puntualizar en esta parte que para el cálculo de la profundidad óptica de Rayleigh (δ_r) no se ha empleado la ecuación (7.22). En su lugar se ha utilizado la propuesta por Page [31]. En esta ecuación se introduce la *masa óptica relativa del aire a nivel del mar* ($ms1$):

$$\delta_r = \begin{cases} (6,625928 + 1,92969 \cdot ms1 - 0,170073 \cdot ms1^2 + 0,011517 \cdot ms1^3 - 0,000285 \cdot ms1^4) \cdot press_corr & \text{para } m < 20 \\ (10,4 + 0,718m)^{-1} & \text{para } m \geq 20 \end{cases} \quad (11.39)$$

Siendo $press_corr$ la presión atmosférica corregida por la altitud sobre el nivel del mar (z) [31]

$$corr75 = 1,248174 - 0,011997 \cdot ms1 + 0,00037 \cdot ms1^2$$

$$corr50 = 1,68219 - 0,03059 \cdot ms1 + 0,00089 \cdot ms1^2$$

$$\text{Si } e^{-\frac{z}{z_h}} > 0,75 \rightarrow corr50 = 1$$

$$press_{corr} = \frac{\left(e^{-\frac{z}{z_h}} - 0,75\right)^2 + \left(e^{-\frac{z}{z_h}} - 1\right)^2 \cdot corr75}{\left(e^{-\frac{z}{z_h}} - 0,75\right)^2 + \left(e^{-\frac{z}{z_h}} - 1\right)^2} \quad (11.40)$$

En este punto hay que hacer un inciso ya que la función original presenta otra formulación presentada a continuación:

$$corr75 = 1,248174 - 0,011997 \cdot ms1 + 0,00037 \cdot ms1^2$$

$$corr50 = 1,68219 - 0,03059 \cdot ms1 + 0,00089 \cdot ms1^2$$

$$\text{Si } e^{-\frac{z}{z_h}} > 0,75 \rightarrow press_{corr} = \frac{\left(e^{-\frac{z}{z_h}} - 0,75\right)^2 + \left(e^{-\frac{z}{z_h}} - 1\right)^2 \cdot corr75}{\left(e^{-\frac{z}{z_h}} - 0,75\right)^2 + \left(e^{-\frac{z}{z_h}} - 1\right)^2} \quad (11.41)$$

$$\text{Si } e^{-\frac{z}{z_h}} \leq 0,75 \rightarrow \text{press}_{corr} = \frac{\left(e^{-\frac{z}{z_h}} - 0,75\right)^2 \cdot \text{corr}50 + \left(e^{-\frac{z}{z_h}} - 0,5\right)^2 \cdot \text{corr}75}{\left(e^{-\frac{z}{z_h}} - 0,75\right)^2 + \left(e^{-\frac{z}{z_h}} - 1\right)^2} \quad (11.42)$$

- Terminada esta primera parte, se procede a actualizar el albedo de referencia según el algoritmo iterativo explicado en el apartado *Método Heliosat-1* (página 62). En este caso el albedo aparente aparece con un valor de 0,8 pero no se explica su procedencia.

Con los albedos de referencia y aparente se estima el coeficiente de cobertura nubosa (n) según la ecuación (11.13)

- El apartado siguiente consiste en la estimación del *índice de transparencia atmosférica* (K_T) y de *irradiancia global horizontal* (G), por dos métodos diferentes. Para la primera se emplea la siguiente ecuación (11.43):

$$K_T^t = a \cdot n^t + b \quad (11.43)$$

Donde los coeficientes a y b han sido extraídos de la fórmula propuesta por Zarzalejo (11.44) en el artículo [32]. Donde $H1$, $H2$ y $H3$ son variables binarias que toman valor 1 solo en el caso de que en el instante en el que se calcula K_T es a las 11:00, las 12:00 o la 13:00 respectivamente, es decir, si se calcula K_T de un determinada día a las 11:00 entonces $H1$ tomará valor 1 mientras que $H2$ y $H3$ tomarán valor 0. De este modo para generalizar esta fórmula para cualquier hora, lo que se ha hecho en CENER es realizar la media de los tres coeficientes que multiplican las variables binarias y asignar ese valor al término independiente b . La ecuación resultante es la (11.45):

$$K_T^t = -0,80559 \cdot n^t + 0,72285 \cdot H1 + 0,74279 \cdot H2 + 0,73255 \cdot H3 \quad (11.44)$$

$$K_T^t = -0,80559 \cdot n^t + 0,73273 \quad (11.45)$$

La irradiancia global se estima a partir del índice de transparencia atmosférica (K_T) y la irradiancia solar extraterrestre instantánea (I_0):

$$G = K_T \cdot I_0 \quad (11.46)$$

El otro método para calcular la irradiancia global es a partir del índice de cielo claro (K_C) que a su vez depende del índice de cobertura nubosa (n), según lo visto en la ecuación (11.29). De este modo la irradiancia global queda:

$$G = K_C \cdot G_C \quad (11.47)$$

La irradiancia global calculada según la ecuación (11.47) será la que se emplee para el resto de cálculos.

4. Finalmente, con el índice de transparencia y la irradiancia global obtenida según la ecuación (11.47), se procede a estimar irradiancia directa según varios modelos [33]:

Orgill y Hollands

Orgill y Hollands estiman la fracción difusa usando K_T como la única variable. Ellos usaron los varoles de irradiancia global y difusa registrados en Toronto (Canadá, 43,8°N) para validar el modelo. La correlación está dada por las siguientes ecuaciones:

$$k_d = 1 - 0,249K_T \quad \text{si } K_T < 0,35 \quad (11.48)$$

$$k_d = 1,577 - 1,84K_T \quad \text{si } 0,35 \leq K_T \leq 0,75 \quad (11.49)$$

$$k_d = 0,177 \quad \text{si } K_T > 0,75 \quad (11.50)$$

$$B = G(1 - k_d)/\cos \theta \quad (11.51)$$

Erbs et al.

Del mismo modo que la correlación empleada por Orgill y Hollands para estimar la fracción difusa k fue derivada de los datos registrados en estaciones de latitud elevada, Erbes et al. Estudiaron el mismo tipo de correlaciones con los datos de cinco estaciones en USA con latitudes entre 31° y 42°.

En cada estación se registraron los valores horarios de la irradiancia global y directa sobre superficie horizontal. La irradiancia difusa fue obtenida como la diferencia de estas cantidades. La fracción difusa y la componente directa se calculan usando las siguientes ecuaciones:

$$k_d = 1 - 0,09K_T \quad \text{si } K_T < 0,22 \quad (11.52)$$

$$k_d = 0,9511 - 0,1604K_T + 4,388K_T^2 - 16,638K_T^3 + 12,336K_T^4 \quad \text{si } 0,22 \leq K_T \leq 0,8 \quad (11.53)$$

$$k_d = 0,165 \quad \text{si } K_T > 0,8 \quad (11.54)$$

$$B = G(1 - k_d)/\cos \theta \quad (11.55)$$

Reindl et al.

Reindl et al. estimaron la fracción difusa, k , usando dos modelos diferentes desarrollados con las medidas de irradiancia global y difusa sobre una superficie horizontal registradas en cinco localizaciones en USA y Europa. En este caso se ha empleado el segundo método el cual estima la fracción difusa empleando también la elevación solar:

$$k_d = 1,020 - 0,254K_T + 0,0123 \sin \alpha \quad \text{si } K_T < 0,30 \quad (11.56)$$

$$k_d = 1,400 - 1,749K_T + 0,177 \sin \alpha \quad \text{si } 0,30 \leq K_T \leq 0,78 \quad (11.57)$$

$$k_d = 0,486K_T - 0,182 \sin \alpha \quad \text{si } K_T > 0,78 \quad (11.58)$$

$$B = G(1 - k_d) / \cos \theta \quad (11.59)$$

Louche

Louche et al. usan el índice de transparencia K_T para estimar la transmitancia directa. La correlación y la estimación de la componente directa están dadas por las siguientes ecuaciones:

$$k_b = -10,627K_T^5 + 15,307K_T^4 - 5,205K_T^3 + 0,994K_T^2 - 0,059K_T + 0,002 \quad (11.60)$$

$$B = k_b \cdot I_0 \quad (11.61)$$

La ecuación 7.80 difiere con respecto a la implementada en el modelo de CENER, quedando ésta de la forma:

$$B = k_b \cdot I_{CS} \cdot \varepsilon \quad (11.62)$$

Este error se ha corregido y se ha comprobado, mediante la realización de gráficas, cómo la expresión original arroja resultados más coherentes que los de la expresión encontrada en el programa de CENER. Por lo tanto de aquí en adelante se empleará la expresión original, es decir, la expresión corregida. Estas gráficas aparecen adjuntas en *Corrección error de la expresión de Louche* (Anexos, página 166).

12. GENERACIÓN PROGRAMA PARA RELLENO DE HUECOS

Como ya se anticipó en el apartado de tratamiento de imágenes, se pueden encontrar algunos datos faltantes que pueden dar lugar a errores en los posteriores cálculos realizados para la estimación de la radiación. El método implantado en CENER antes de comenzar a realizar los cálculos busca y elimina aquellos instantes de los que no se posee una medición. Si los instantes faltantes son muy numerosos o están muy concentrados en un determinado mes o día puede llevar a errores de estimación.

De este modo, a fin de paliar los errores producidos por la falta de datos, se ha realizado un tratamiento previo de los datos de entrada, esto es, de los niveles digitales aportados por el satélite. Este sistema consiste en rellenar los datos que faltan según el siguiente criterio que se ha considerado adecuado:

- Si falta un valor de un día, ese valor se rellena con la media del nivel digital del instante anterior y posterior.
- Si faltan entre 2 y 4 valores de un día, dichos valores se rellenan con la media del nivel digital del día.
- Si faltan más de 4 valores de un día, dichos valores se rellenan con la media mensual de los valores medios diarios del nivel digital.

12.1 Resultados obtenidos

Con el fin de comprobar la efectividad y la influencia de esta modificación, se han empleado los datos pertenecientes a la capital de Georgia, Tbilisi, situada en las coordenadas 41,4139°N 44,5001°E y a una altura de 427 m. Las fechas de estos datos van entre el 4 de Septiembre de 1998 y el 31 de Diciembre de ese mismo año. Además también se han estudiado otra serie de patrones o errores producidos durante la toma de datos del satélite y las diferencias entre emplear los métodos de Erbs, Louche, Orgill Hollands y Reindl.

Para un análisis más rápido y visual se han realizado una serie de gráficas de la radiación estimada con todos los métodos y tanto con el tratamiento previo de los datos como sin el mismo. Cada una de estas gráficas recoge la radiación estimada durante todos los instantes de un día, de tal modo que hay una gráfica para cada uno de los días de los cuales se poseen datos. Cabe destacar que en todas las gráficas se han suprimido los datos relativos a las horas nocturnas, es decir, solo se han tenido en cuenta los intervalos del día que van entre las 4:30 y las 19:30, a fin de homogeneizar las gráficas y a pesar de que en los días de invierno el intervalo de horas diurnas es inferior.

Dicho esto a continuación se recogen las conclusiones obtenidas tras un análisis minucioso de las gráficas:

- Del día 1 al día 6 de Agosto se observa un pico inusual en la radiación, siempre a la misma hora, a las 19:00. Este pico se observa en los métodos de Erbs, Orgill Hollands y Reindl, con y sin tratamiento previo de los datos. Sin embargo con el método de

Louche este pico no aparece. Ver las gráficas adjuntas en *Observación pico de radiación inusual a las 19:00 entre los días 1 al 6 de Agosto* (Anexos, página 167)

- El día 30 de Agosto se observa un pico inusual de radiación a las 18:30. Este fenómeno sucede con los métodos Erbs, Orgill Hollands y Reindl, con y sin tratamiento previo de los datos, pero no con Louche. Ir a *Observación pico de radiación inusual a las 18:30 el día 30 de Agosto* (Anexos, página 170)
- Del día 15 al día 22 de Septiembre se observa un pico inusual en la radiación, siempre a la misma hora, a las 18:00. Este pico se observa en lo métodos de Erbs, Orgill Hollands y Reindl, con y sin tratamiento previo de los datos. Sin embargo con el método de Louche este pico no aparece. Ver las gráficas adjuntas en *Observación pico de radiación inusual a las 18:00 entre los días 15 al 22 de Septiembre* (Anexos, página 171)
- Del día 9 al día 14 de Octubre se observa un pico inusual en la radiación, siempre a la misma hora, las 18:00. Este pico se observa en lo métodos de Erbs, Orgill Hollands y Reindl, con y sin tratamiento previo de los datos. Sin embargo con el método de Louche este pico no aparece. Ver las gráficas adjuntas en *Observación pico de radiación inusual a las 18:00 entre los días 9 al 14 de Octubre* (Anexos, página 175)
- Los días 2, 3, 6 y 7 de Noviembre se observa un pico inusual en la radiación, siempre a la misma hora, a las 16:30. Este pico se observa en lo métodos de Erbs, Orgill Hollands y Reindl, con y sin tratamiento previo de los datos. Sin embargo con el método de Louche este pico no aparece. Ver las gráficas adjuntas en *Observación pico de radiación inusual a las 16:30 los días 2, 3, 6 y 7 de Noviembre* (Anexos, página 192)
- Los días 4, 5, 8, 9, 12, 15, 17, 18, 19 y 21 de Diciembre se observa un pico inusual de radiación, siempre a la misma hora, a las 16:00. Este pico se observa en lo métodos de Erbs, Orgill Hollands y Reindl, con y sin tratamiento previo de los datos. Sin embargo con el método de Louche este pico no aparece. Ver las gráficas adjuntas en *Observación pico de radiación inusual a las 16:00 los días 4, 5, 8, 9, 12, 15, 17, 18, 19 y 21 de Diciembre* (Anexos, página 180)
- Los días 23 y 26 de Diciembre se observa un pico inusual de radiación, siempre a la misma hora, a las 16:30. Este pico se observa en lo métodos de Erbs, Orgill Hollands y Reindl, con y sin tratamiento previo de los datos. Sin embargo con el método de Louche este pico no aparece. Ver las gráficas adjuntas en *Observación pico de radiación inusual a las 16:30 los días 23 y 26 de Diciembre* (Anexos, página 185)
- En la gran mayoría de las gráficas aparecen unos picos anómalos de radiación al comienzo de cada día. Éstos se ven más acentuados en ciertos días como es el caso del 31 de Agosto, 7 de Noviembre, y los días 13, 14, 16, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 27, 28, 29 y 30 de Diciembre. Del mismo modo aparecen con mayor frecuencia en los métodos de Erbs, Orgill Hollands y Reindl, tanto con tratamiento previo de datos como sin él, mientras que con el método de Louche no se producen estas anomalías. Ver las

gráficas adjuntas en *Observación pico de radiación inusual a las 7:30 los días 20, 22, 24 y 25 de Diciembre* (Anexos, página 186)

12.2. Conclusiones

Tras contrastar las anomalías que se ven en las gráficas de radiación con las imágenes captadas por el satélite en esos instantes determinados (Anexos, páginas 189, 190, 191, 192, 193, 194 y 195) se han deducido las siguientes conclusiones:

- No hay una relación clara entre datos faltantes o imágenes defectuosas con los picos que se observan en las gráficas. Se pueden encontrar instantes de tiempo en los cuales las imágenes obtenidas del satélite son similares a las imágenes que se obtienen en las mencionadas anomalías y sin embargo éstas no quedan reflejadas en las susodichas gráficas. Del mismo modo hay imágenes aparentemente correctas pero que dan resultados erróneos en las gráficas de radiación, véase el caso de los días 20, 22, 24 y 25 de Diciembre a las 7:30 de la mañana.
- De lo expuesto en el punto anterior se puede pensar por tanto que los errores producidos en la estimación de la radiación tal vez provengan de los propios modelos empleados.
- Los modelos propuestos por Erbs, Orgill, Hollands y Reindl parecen aportar peores estimaciones de la radiación que el modelo propuesto por Louche. Si se observan las gráficas de radiación de los diferentes modelos se puede ver como las generadas por el modelo de Louche tienen una evolución más suave y variante con los meses del año y en ningún momento se producen los picos de sus semejantes.
- Para el caso de Georgia, en las fechas ya señaladas, la mayor parte de las pérdidas de datos se producen en horas nocturnas, entre la 1:00 y las 2:30. A parte de estas imágenes sin datos, también se ha detectado la falta por completo de imágenes en determinados instantes, es decir, dichos instantes de tiempo han sido eliminados por completo o no han sido guardados correctamente.
- Solamente se han encontrado cuatro imágenes sin datos en horas consideradas como diurnas. El efecto de rellenar estos huecos, mediante el método expuesto anteriormente, se puede ver en Anexos, página 188. De todas ellas solo la gráfica correspondiente al día 28 de Octubre presenta una variación bastante visible al suavizar un pico que se produce a las 14:30, por lo que se ha decidido presentar solo el resultado de esta gráfica. El resto solamente presentan una pequeña variación de la pendiente de radiación, apreciable si se presta la suficiente atención y se amplía la imagen.

13. ANÁLISIS DE LOS PICOS DE RADIACIÓN

Grafica radiación con anomalía

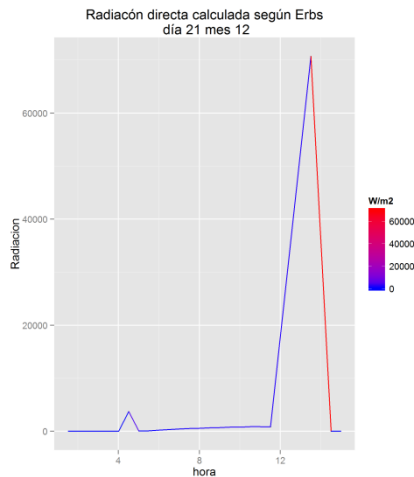


Figura 13.1 – Ejemplo gráfica de radiación con anomalía

Grafica radiación rectificada

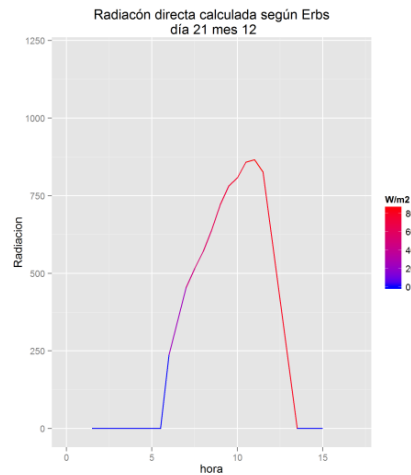


Figura 13.2 – Ejemplo gráfica de radiación con anomalía rectificada

13.1. Búsqueda del origen

Una vez analizados de forma detallada los datos de entrada así como los resultados obtenidos y la forma de obtenerlos se ha llegado a detectar cuál es el origen de estas anomalías. Todo se debe a que el programa implementado realiza una comparación del ángulo solar horario (ω) de cada instante con los ángulos del ocaso (ω_{oc}) y del orto (ω_{or}) de tal manera que si el primero no tiene un valor comprendido entre los otros dos, es decir, son horas nocturnas, se le da un valor nulo a la altura solar (α). El problema sucede cuando el ángulo solar está ligeramente dentro de los límites, reconociéndose en ese caso que ya es de día, con lo cual se le da un valor mínimo a la altura solar. Al darse la confluencia de este ínfimo valor junto con la existencia de irradiancia global, si se atiende a la ecuación (11.51) (11.51), ambos fenómenos provocan la sobreestimación de picos de radiación directa tal y como se puede ver en las gráficas adjuntas (Anexos, páginas 167 - 186). Cabe decir que este fenómeno no es visible en las gráficas obtenidas por el modelo de Louche ya que éste estima la radiación directa mediante el índice de transparencia (ecuación (11.60) (11.60)) y la irradiancia instantánea (ecuación (11.61))

13.2. Solución adoptada

El procedimiento seguido para la corrección de estas erratas ha sido en primer lugar intentar modificar la función que realizaba la comparación de los ángulos, pero se ha visto que ésta no llegaba a solucionar de manera efectiva el error. La solución definitiva ha consistido en modificar unas líneas del código en la cual se comprobaba si el valor de irradiancia directa estimada era negativa, en cuyo caso se le asignaba valor nulo por ser un resultado erróneo. De esta manera, además de comprobar si el valor de la irradiancia es negativo, se comprueba que el valor de la irradiancia directa no sea diez veces superior que el valor de irradiancia global estimada, en cuyo caso se le asignará valor nulo. La validez de esta validación se basa en la

observación de los resultados finales en los cuales se pudo ver como aquellos instantes en las que se observaba esta anomalía la relación entre ambas irradiancias era superior a diez.

Implementada la modificación en el código original, se han vuelto a generar de nuevo los resultados y se han graficado los mismos para poder comparar y validar esta modificación introducida. A modo de ejemplo, se han adjuntado las gráficas correspondientes a los días 21 y 22 de Diciembre por considerarse muestras suficientes y válidas para demostrar la efectividad. Pueden encontrarse en *Resultados obtenidos tras la modificación del código original* (Anexos, página 196) de este mismo documento.

14. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO SOLIS

14.1. Desarrollo

El modelo de cielo claro de SOLIS está desarrollado dentro del proyecto Heliosat-3 y está basado en métodos de cálculos de transferencia de radiación (RTM). Aquí se ha implementado una versión simplificada de dicho método debido a que los cálculos de transferencia de radiación consumen demasiados recursos y tiempo de computación, por lo que extendido a, por ejemplo, todos los puntos de un país tardaría un tiempo excesivo.

Este modelo RTM requiere como parámetros de entrada la columna de vapor de agua y el contenido de aerosoles. Ambos parámetros han sido extraídos del MACC Reanalysis dataservert [34] el cual suministra diferentes parámetros con cobertura global de la Tierra entre los años 2003 y 2012.

Las nuevas expresiones que este modelo introduce, y en consecuencia se han implementado en R, son las siguientes [35] [36]:

$$B_C = I'_0 \cdot \exp\left(-\frac{\tau_b}{\sin^b \alpha}\right) \quad (14.1)$$

$$G_C = I'_0 \cdot \exp\left(-\frac{\tau_g}{\sin^g \alpha}\right) \sin \alpha \quad (14.2)$$

$$D_C = I'_0 \cdot \exp\left(-\frac{\tau_d}{\sin^d \alpha}\right) \quad (14.3)$$

Donde I'_0 es la irradiancia extraterrestre mejorada y τ_b , τ_g y τ_d son respectivamente las profundidades ópticas totales de directa, global y difusa. Mientras que b , g y d son los correspondientes parámetros de adecuación obtenidos de los cálculos de RTM.

Los rangos de la altura y de los parámetros atmosféricos usados que llevan a una correcta adecuación son los siguientes:

- Nivel del mar < altura < 7000 m
- $0 < aod_{700} < 0,45$
- $0,2 \text{ cm} < w < 10 \text{ cm}$

Donde w es la columna de vapor de agua en cm y aod_{700} es la profundidad óptica de aerosol en 700 nm. La formulación de los diferentes parámetros del modelo se expone a continuación:

$$I'_0 = I_0 \cdot \left(I_{02} \cdot aod_{700}^2 + I_{01} \cdot aod_{700} + I_{00} + 0,071 \cdot \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) \right)$$

$$\text{con } I_{00} = 1,08 \cdot w^{0,0051}$$

$$I_{01} = 0,97 \cdot w^{0,032}$$

$$I_{o2} = 0,12 \cdot w^{0,56}$$

Donde p_0 es la presión atmosférica al nivel del mar y p la presión atmosférica a la altura considerada.

Coefficientes para la ecuación (14.1):

$$\tau_b = t_{b1} \cdot aod_{700} + t_{b0} + t_{bp} \cdot \ln\left(\frac{p}{p_0}\right)$$

$$\text{con } t_{b1} = 1,82 + 0,056 \cdot \ln(w) + 0,0071 \cdot \ln^2(w)$$

$$t_{b0} = 0,33 + 0,045 \cdot \ln(w) + 0,0096 \cdot \ln^2(w)$$

$$t_{bp} = 0,0089 \cdot w + 0,13$$

$$b = b_1 \cdot \ln(w) + b_0$$

$$\text{con } b_1 = 0,00925 \cdot aod_{700}^2 + 0,0148 \cdot aod_{700} - 0,0172$$

$$b_0 = -0,7565 \cdot aod_{700}^2 + 0,5057 \cdot aod_{700} + 0,4557$$

Coefficientes para la ecuación (14.2)(**14.2**):

$$\tau_g = t_{g1} \cdot aod_{700} + t_{g0} + t_{gp} \cdot \ln\left(\frac{p}{p_0}\right)$$

$$\text{con } t_{g1} = 1,24 + 0,047 \cdot \ln(w) + 0,0061 \cdot \ln^2(w)$$

$$t_{g0} = 0,27 + 0,043 \cdot \ln(w) + 0,0090 \cdot \ln^2(w)$$

$$t_{gp} = 0,0079 \cdot w + 0,1$$

$$g = -0,0147 \cdot \ln(w) - 0,3079 \cdot aod_{700}^2 + 0,2846 \cdot aod_{700} + 0,3798$$

Coefficientes para la ecuación (14.3)(**14.3**):

$$\tau_d = t_{d4} \cdot aod_{700}^4 + t_{d3} \cdot aod_{700}^3 + t_{d2} \cdot aod_{700}^2 + t_{d1} \cdot aod_{700} + t_{d0} + t_{dp} \cdot \ln\left(\frac{p}{p_0}\right)$$

Para $aod_{700} < 0,05$:

$$t_{d4} = 86 \cdot w - 13800$$

$$t_{d3} = -3,11 \cdot w + 79,4$$

$$t_{d2} = -0,23 \cdot w + 74,8$$

$$t_{d1} = 0,092 \cdot w - 8,86$$

$$t_{d0} = 0,0042 \cdot w + 3,12$$

$$t_{dp} = -0,83 \cdot (1 + aod_{700})^{-17,2}$$

Para $aod_{700} \geq 0,05$:

$$t_{d4} = -0,21 \cdot w + 11,6$$

$$t_{d3} = 0,27 \cdot w - 20,7$$

$$t_{d2} = -0,134 \cdot w + 15,5$$

$$t_{d1} = 0,0554 \cdot w - 5,71$$

$$t_{d0} = 0,0057 \cdot w + 2,94$$

$$t_{dp} = -0,71 \cdot (1 + aod_{700})^{-15}$$

$$d = -0,337 \cdot aod_{700}^2 + 0,63 \cdot aod_{700} + 0,116 + d_p \cdot \ln\left(\frac{p}{p_0}\right)$$

$$\text{con } d_p = 1/(18 + 152 \cdot aod_{700})$$

14.2. Conclusiones

Este modelo se ha introducido dentro del método implementado en CENER, sustituyendo así el modelo de cielo claro de ESRA que empleaba. De este modo se ha procedido a la ejecución del programa para el cálculo de la irradiancia directa sobre la capital de Georgia, Tbilisi, y su posterior representación mediante gráficas diarias.

Comparando las gráficas obtenidas con el nuevo modelo con las del anterior, se puede observar cómo con SOLIS los niveles de radiación van variando a lo largo del año, obteniéndose los valores más pequeños en los meses de invierno y los más altos en los meses de verano. Esta variación de los niveles de radiación con la estación del año no se aprecia con el modelo de ESRA. Otro aspecto de mejora del nuevo modelo se aprecia en que los picos de radiación anómalos que se producían en las horas iniciales y finales del día desaparecen, consiguiendo curvas de radiación más suaves y progresivas. Para observar en detalle las diferencias entre ambos métodos se han adjuntado una serie de gráficas comparativas en *Comparación SOLIS - ESRA* (Anexos, página 197).

Aparentemente el modelo SOLIS arroja unas estimaciones de la radiación directa más acertadas que el modelo ESRA, aunque para una verificación válida de estas mejoras es necesario realizar una comparación de los resultados de ambos modelos con las mediciones realizadas en estaciones terrestres.

15. VALIDACIÓN DEL MODELO SOLIS

Con el fin de validar los resultados obtenidos con el nuevo modelo de cielo claro (SOLIS) implementado y compararlos con los que se obtenían con el modelo que ya estaba implementado en CENER (ESRA), se han empleado los datos relativos a cinco estaciones situadas en diferentes zonas geográficas del globo terráqueo (Tabla 15.1 y Figura 15.1).

Estación	Código	Localización	Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud (m)
Cabauw	CAB	Países Bajos	51,9711	4,9627	0
Ilorin	ILO	Nigeria	8,533	4,5667	350
Payerne	PAY	Suiza	46,815	6,944	448
Tamanrasset	TAM	Argelia	22,78	5,51	1369
Toravere	TOR	Estonia	58,254	26,462	72

Tabla 15.1 – Datos geográficos de las estaciones

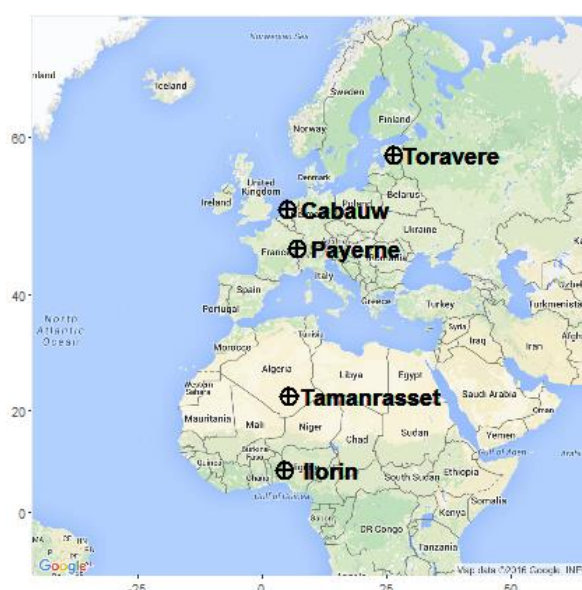


Figura 15.1 – Posición de las estaciones

Han hecho falta dos clases diferentes de datos, los correspondientes a las mediciones de tierra en las diferentes estaciones y los aportados por el satélite Meteosat-7 en esas coordenadas concretas. Los primeros tienen una resolución temporal horaria mientras que los segundos su resolución temporal es cada media hora. De esta manera ha sido necesario un filtrado previo de los datos para conseguir que los instantes de tiempo de cada fuente coincidan, teniendo así la misma cantidad de datos y en los mismos instantes para cada estación.

De este modo ha quedado el siguiente número de muestras para cada estación:

- Cabauw: 8907 muestras horarias
- Ilorin: 18521 muestras horarias
- Payerne: 11501 muestras horarias
- Tamanrasset: 26891 muestras horarias
- Toravere: 26894 muestras horarias

Cabe decir que la validación se ha realizado tanto con los valores correspondientes a la radiación global como los relativos a la radiación directa. Para la estimación de la radiación directa se han utilizado los métodos descritos en el apartado 11.3 en combinación con los dos modelos de cielo claro disponibles.

15.1. Modo de cálculo de los errores

Realizar la validación de los modelos viene a significar estudiar la precisión de los mismos, para lo cual se calculan los errores cometidos al estimar la radiación. En este trabajo se evalúan tres tipos diferentes de errores y el coeficiente de determinación, todos ellos explicados a continuación.

MAE

Es el *error absoluto medio* y para su cálculo se emplea la siguiente expresión:

$$MAE = \sum_{i=1}^N \frac{|\hat{x}^i - x^i|}{N} \quad (15.1)$$

Siendo \hat{x}^i el valor estimado mediante el modelo, x^i corresponde al valor medio de los datos medidos y N es el número de observaciones realizadas.

También se calcula el MAE en porcentaje:

$$MAE (\%) = 100 \cdot \frac{MAE}{\bar{x}} \quad (15.2)$$

Donde:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^N \frac{x^i}{N} \quad (15.3)$$

MBE

Es el *error sistemático* que se comete al estimar y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$MBE = \sum_{i=1}^N \frac{(\hat{x}^i - x^i)}{N} \quad (15.4)$$

Este error proporciona información sobre la tendencia del modelo a sobreestimar o subestimar la variable modelizada. De igual manera que el caso anterior también se calcula en porcentaje:

$$MBE (\%) = 100 \cdot \frac{MBE}{\bar{x}} \quad (15.5)$$

RMSE

Es el *error cuadrático medio* el cual mide el promedio de los errores al cuadrado, es decir, la diferencia entre los valores estimados y medidos. Se usa la siguiente expresión:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{x}^i - x^i)^2}{N}} \quad (15.6)$$

$$RMSE (\%) = 100 \cdot \frac{RMSE}{\bar{x}} \quad (15.7)$$

R²

Es el *coeficiente de determinación* y sirve para informar sobre el grado de ajuste entre los modelos, calculándose del siguiente modo:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{x}^i - x^i)^2}{\sum_{i=1}^N (x^i - \bar{x})^2} \quad (15.8)$$

15.2. Resultados obtenidos

En las siguientes hojas se recogen los resultados obtenidos en las diferentes estaciones, para las cuales se han calculado los diferentes errores descritos anteriormente para los datos horarios, y para las radiaciones global y directa.

Cabauw

A continuación aparecen una serie de tablas en las cuales están recogidos los errores, relativos a los datos horarios, cometidos tanto mensual como anualmente en las coordenadas geográficas correspondientes a Cabauw. Las tablas pertenecen los errores de radiación global, radiación directa según Reindl, radiación directa según Orgill Holands, radiación directa según Erbs y radiación directa según Louche. Seguido de cada tabla aparece un gráfico de dispersión correspondiente a esos datos de estudio. En todos estos gráficos se ha comprobado si existe relación lineal entre las medidas de radiación y las estimaciones para evaluar la precisión de estas últimas.

El periodo de estudio comprende entre el 01/02/2005 y el 16/02/2006.

Datos horarios*Radiación Global*

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m²)	29	36	63	86	91	89	71	74	80	59	31	21	60
MAE (%)	84	75	62	53	46	37	37	42	52	66	81	89	50
MBE (W/m²)	-28	-35	-63	-73	-70	-72	-56	-62	-79	-58	-29	-19	-53
MBE (%)	-82	-74	-62	-45	-36	-30	-29	-35	-50	-65	-78	-83	-44
RMSE (W/m²)	63	76	112	139	139	134	113	116	128	107	65	45	106
RMSE (%)	186	159	110	86	70	56	59	65	82	120	174	198	90

Tabla 15.2 - Errores en la estimación de la radiación global horaria en Cabauw

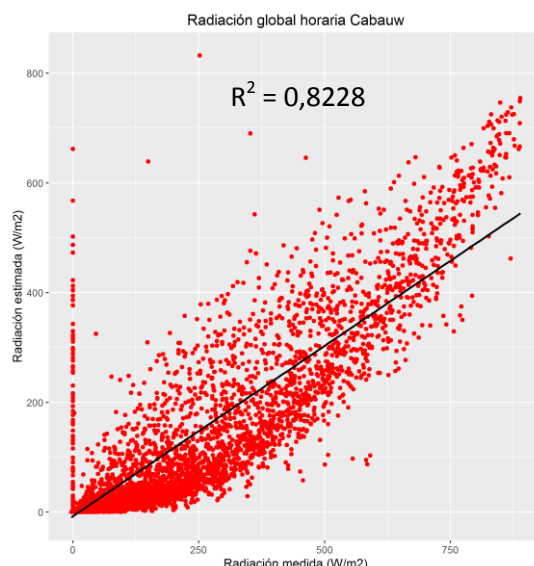


Figura 15.2 – Radiación global horaria medida frente a estimada en Cabauw

En este caso, como se puede ver en la Figura 15.2 la relación entre los datos medidos y estimados no es lineal del todo por lo que las estimaciones de radiación global horaria no son del todo precisas.

Radiación directa según Reindl

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m2)	47	34	42	98	96	103	64	76	84	77	43	28	65
MAE (%)	89	85	76	68	63	53	56	57	66	75	86	92	66
MBE (W/m2)	-46	-31	-35	-88	-79	-78	-26	-36	-44	-63	-40	-25	-49
MBE (%)	-87	-78	-64	-62	-52	-40	-22	-27	-34	-62	-79	-82	-50
RMSE (W/m2)	144	111	121	192	171	178	124	138	160	170	127	100	146
RMSE (%)	274	276	221	134	113	91	108	103	127	165	253	329	150

Tabla 15.3 – Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Reindl en Cabauw

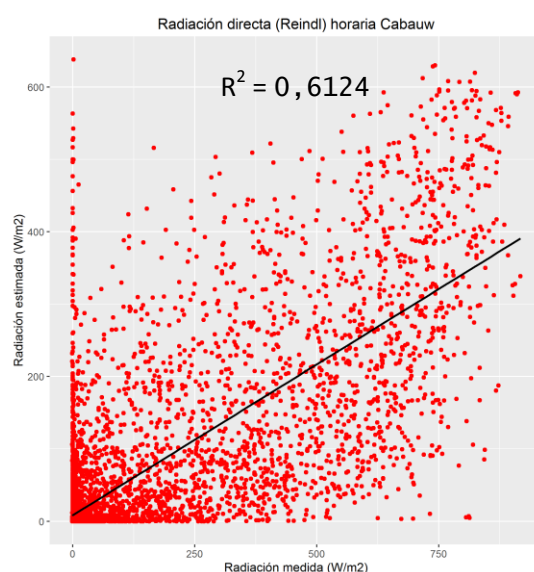


Figura 15.3 – Radiación directa horaria medida frente a estimada según Reindl en Cabauw

En este caso, como se puede ver en la Figura 15.3 la relación entre los datos medidos y estimados no es para nada lineal por lo que las estimaciones de radiación directa horaria, usando Reindl, no se pueden considerar precisas.

Radiación directa según Orgill Hollands

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m2)	48	35	42	99	97	102	65	77	84	79	44	28	66
MAE (%)	92	88	77	69	64	52	56	57	67	77	88	94	67
MBE (W/m2)	-47	-33	-36	-90	-79	-76	-24	-37	-46	-66	-41	-26	-49
MBE (%)	-89	-81	-65	-63	-52	-39	-21	-27	-36	-64	-82	-86	-50
RMSE (W/m2)	148	114	123	195	172	178	126	139	162	174	130	102	148
RMSE (%)	281	284	225	136	113	91	110	104	128	169	260	336	152

Tabla 15.4 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Orgill Hollands en Cabauw

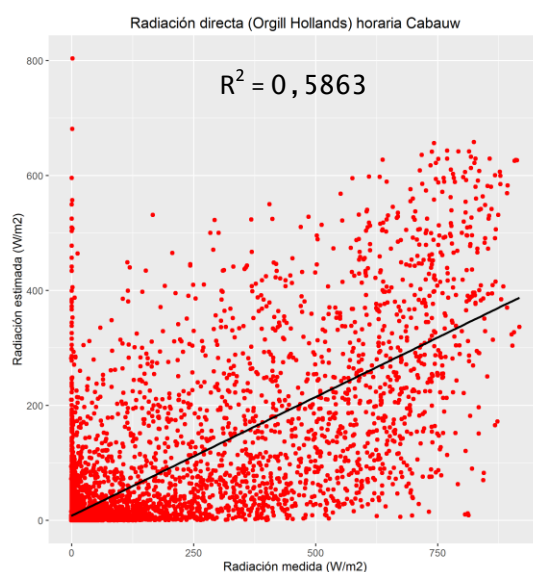


Figura 15.4 - Radiación directa horaria medida frente a estimada según Orgill Hollands en Cabauw

En este caso, como se puede ver en la Figura 15.4 la relación entre los datos medidos y estimados no es para nada lineal por lo que las estimaciones de radiación directa horaria, usando Orgill Hollands, no se pueden considerar precisas.

Radiación directa según Erbs

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m2)	48	35	42	96	95	98	64	76	82	78	44	28	64
MAE (%)	91	88	76	67	62	50	55	56	65	76	88	94	66
MBE (W/m2)	-47	-33	-36	-88	-76	-70	-20	-33	-42	-64	-41	-26	-47
MBE (%)	-89	-82	-66	-61	-50	-36	-18	-25	-34	-63	-82	-86	-49
RMSE (W/m2)	148	114	122	189	168	172	125	137	159	171	130	102	146
RMSE (%)	281	284	223	132	111	88	108	102	126	166	259	337	149

Tabla 15.5 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Erbs en Cabauw

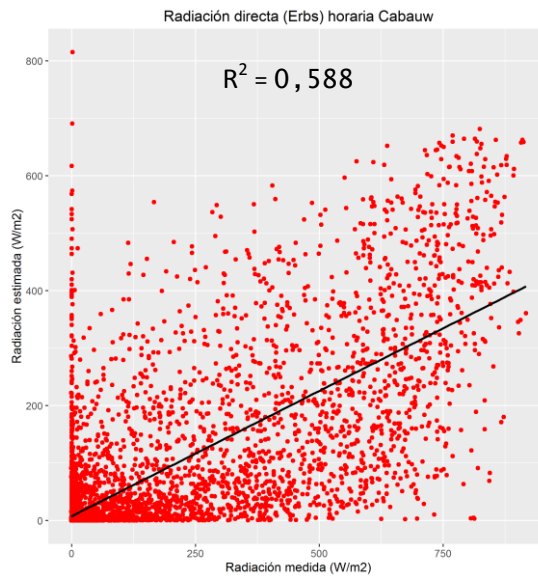


Figura 15.5 - Radiación directa horaria medida frente a estimada según Erbs en Cabauw

En este caso, como se puede ver en la Figura 15.5 la relación entre los datos medidos y estimados no es para nada lineal por lo que las estimaciones de radiación directa horaria, usando Erbs, no se pueden considerar precisas.

Radiación directa según Louche

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m2)	32	28	39	63	78	81	87	118	124	104	61	32	69
MAE (%)	61	71	71	44	51	42	75	88	99	101	122	105	71
MBE (W/m2)	-21	-9	3	-9	1	30	73	102	107	64	22	0	29
MBE (%)	-40	-23	6	-6	1	16	63	76	85	62	44	-2	29
RMSE (W/m2)	96	83	110	125	142	152	168	216	238	238	178	97	160
RMSE (%)	181	207	200	87	93	78	145	161	189	231	357	322	164

Tabla 15.6 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Louche en Cabauw

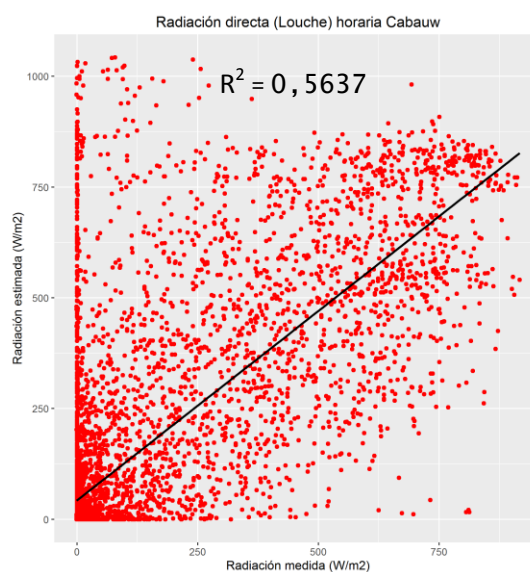


Figura 15.6 - Radiación directa horaria medida frente a estimada según Louche en Cabauw

En este caso, como se puede ver en la Figura 15.6 la relación entre los datos medidos y estimados no es para nada lineal por lo que las estimaciones de radiación directa horaria, usando Louche, no se pueden considerar precisas.

Ilorin

A continuación aparecen una serie de tablas en las cuales están recogidos los errores, relativos a los datos horarios, cometidos tanto mensual como anualmente en las coordenadas geográficas correspondientes a Ilorin. Las tablas pertenecen los errores de radiación global, radiación directa según Reindl, radiación directa según Orgill Holands, radiación directa según Erbs y radiación directa según Louche. Seguido de cada tabla aparece un gráfico de dispersión correspondiente a esos datos de estudio. En todos estos gráficos se ha comprobado si existe relación lineal entre las medidas de radiación y las estimaciones para evaluar la precisión de estas últimas.

El periodo de estudio comprende entre el 06/05/2003 y el 12/07/2005.

Datos horarios

Radiación Global

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m²)	45	64	76	63	53	53	91	74	69	52	48	42	61
MAE (%)	25	32	33	29	27	30	73	51	35	27	26	23	33
MBE (W/m²)	-37	-58	-68	-37	-8	-2	62	42	9	-8	-28	-39	-12
MBE (%)	-21	-29	-29	-17	-4	-1	50	28	5	-4	-15	-21	-6
RMSE (W/m²)	79	112	127	109	97	97	186	147	126	96	85	74	116
RMSE (%)	45	56	54	50	50	54	150	100	64	50	45	40	63

Tabla 15.7 - Errores en la estimación de la radiación global horaria en Ilorin

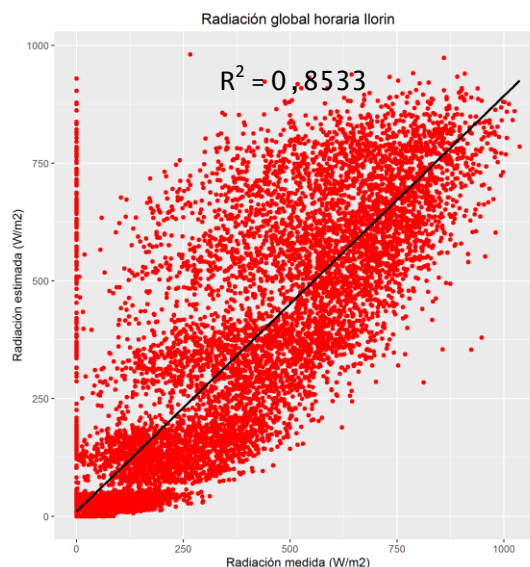


Figura 15.7 - Radiación global horaria medida frente a estimada en Ilorin

En este caso, como se puede ver en la Figura 15.7 la relación entre los datos medidos y estimados tiene cierta linealidad por lo que las estimaciones de radiación global horaria son algo precisas.

Radiación directa según Reindl

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m2)	44	73	97	77	56	51	64	45	55	56	53	36	59
MAE (%)	25	37	41	36	29	29	51	31	28	29	28	19	32
MBE (W/m2)	-34	-68	-89	-66	-40	-34	22	-4	-35	-32	-32	-29	-35
MBE (%)	-19	-34	-38	-31	-20	-19	18	-2	-18	-16	-17	-16	-19
RMSE (W/m2)	82	131	164	137	103	95	130	91	103	108	100	73	112
RMSE (%)	47	66	70	63	53	53	105	62	52	55	53	39	61

Tabla 15.8 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Reindl en Ilorin

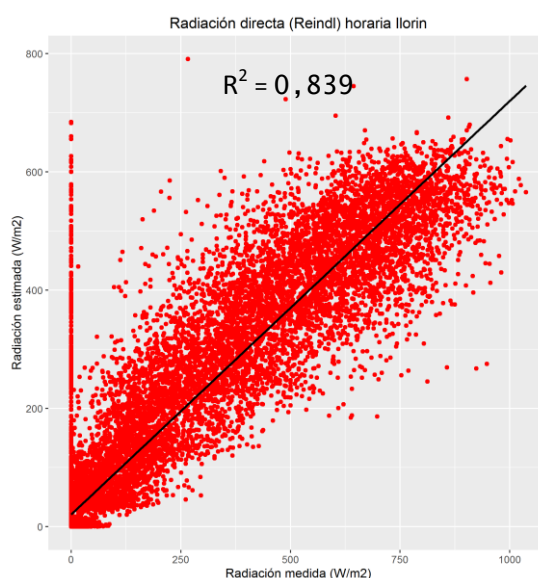


Figura 15.8 - Radiación directa horaria medida frente a estimada según Reindl en Ilorin

En este caso, como se puede ver en la Figura 15.8 la relación entre los datos medidos y estimados tiene cierta linealidad por lo que las estimaciones de radiación directa horaria, según Reindl, son algo precisas.

Radiación directa según Orgill Hollands

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m2)	40	68	90	70	50	47	64	44	51	51	49	32	54
MAE (%)	23	34	38	33	26	26	51	30	26	26	26	17	30
MBE (W/m2)	-31	-63	-83	-59	-33	-28	28	3	-27	-26	-28	-27	-30
MBE (%)	-17	-32	-35	-27	-17	-16	23	2	-14	-13	-15	-14	-16
RMSE (W/m2)	75	121	152	124	92	86	133	91	95	98	91	65	104
RMSE (%)	43	61	65	58	48	48	108	62	48	51	49	35	57

Tabla 15.9- Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Orgill Hollands en Ilorin

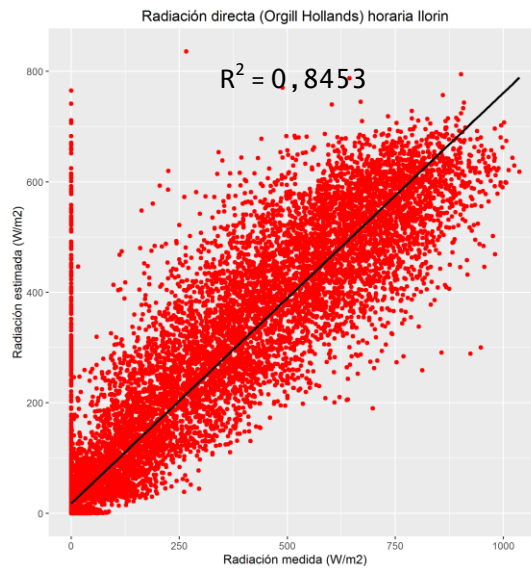


Figura 15.9 - Radiación directa horaria medida frente a estimada según Orgill Hollands en Ilorin

En este caso, como se puede ver en la Figura 15.9 la relación entre los datos medidos y estimados tiene cierta linealidad por lo que las estimaciones de radiación directa horaria, según Orgill Hollands, son algo precisas.

Radiación directa según Erbs

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m2)	37	63	85	65	46	44	66	45	49	48	45	28	52
MAE (%)	21	32	36	30	24	24	53	31	25	25	24	15	28
MBE (W/m2)	-24	-57	-76	-52	-24	-20	36	12	-18	-17	-20	-20	-22
MBE (%)	-14	-28	-32	-24	-13	-11	29	8	-9	-9	-11	-11	-12
RMSE (W/m2)	68	114	143	116	85	80	139	93	90	92	85	58	100
RMSE (%)	39	57	61	54	44	45	113	63	46	47	45	31	54

Tabla 15.10 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Erbs en Ilorin

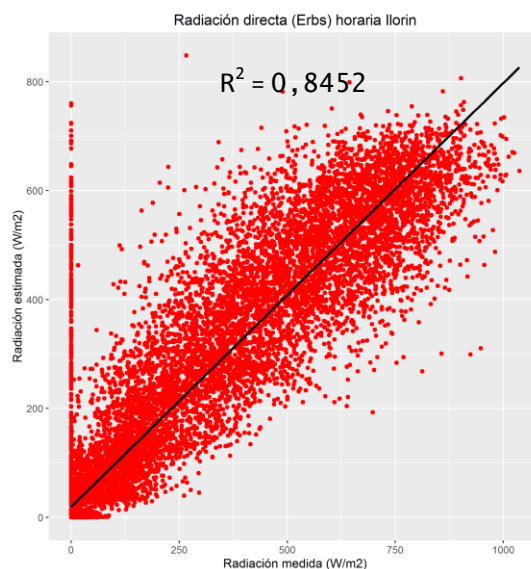


Figura 15.10 - Radiación directa horaria medida frente a estimada según Erbs en Ilorin

En este caso, como se puede ver en la Figura 15.10 la relación entre los datos medidos y estimados tiene cierta linealidad por lo que las estimaciones de radiación directa horaria, según Erbs, son algo precisas.

Radiación directa según Louche

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m ²)	207	178	181	187	179	173	213	192	166	153	168	191	182
MAE (%)	118	89	77	87	93	96	172	130	84	79	90	103	99
MBE (W/m ²)	206	176	172	178	173	168	211	189	157	146	165	191	178
MBE (%)	118	88	73	82	89	94	170	128	80	75	88	103	96
RMSE (W/m ²)	339	305	310	307	299	287	340	308	284	274	296	321	306
RMSE (%)	193	153	132	142	155	160	274	209	144	141	158	172	166

Tabla 15.11 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Louche en Ilorin

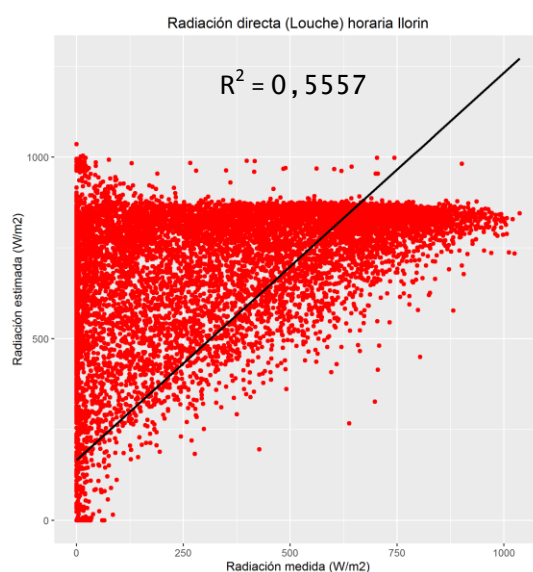


Figura 15.11 - Radiación directa horaria medida frente a estimada según Louche en Ilorin

En este caso, como se puede ver en la Figura 15.11 la relación entre los datos medidos y estimados no es para nada lineal por lo que las estimaciones de radiación directa horaria, según Louche, no se pueden considerar como precisas.

Payerne

A continuación aparecen una serie de tablas en las cuales están recogidos los errores, relativos a los datos horarios, cometidos tanto mensual como anualmente en las coordenadas geográficas correspondientes a Payerne. Las tablas pertenecen los errores de radiación global, radiación directa según Reindl, radiación directa según Orgill Holands, radiación directa según Erbs y radiación directa según Louche. Seguido de cada tabla aparece un gráfico de dispersión correspondiente a esos datos de estudio. En todos estos gráficos se ha comprobado si existe relación lineal entre las medidas de radiación y las estimaciones para evaluar la precisión de estas últimas.

El periodo de estudio corresponde a los meses de agosto a diciembre de 2003 a 2005 y el mes de julio de 2005. Debido a que no se poseen datos de Enero a Junio en las tablas aparecen

como NA los errores pertenecientes a este mes, indicando que no poseen ningún valor numérico.

Datos horarios

Radiación Global

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m2)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	84	75	75	47	33	24	52
MAE (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	34	35	41	51	61	67	43
MBE (W/m2)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	-48	-54	-67	-39	-29	-21	-42
MBE (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	-20	-25	-37	-42	-54	-59	-34
RMSE (W/m2)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	127	116	119	90	70	56	96
RMSE (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	52	54	65	99	129	158	78

Tabla 15.12 - Errores en la estimación de la radiación global horaria en Payerne

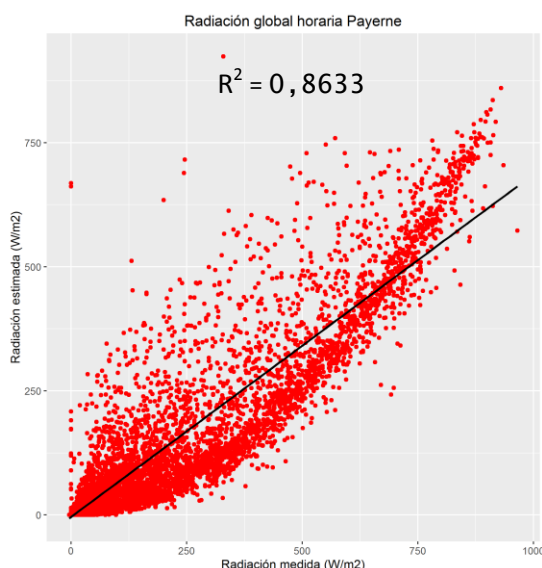


Figura 15.12 - Radiación global horaria medida frente a estimada en Payerne

En este caso, como se puede ver en la Figura 15.12 la relación entre los datos medidos y estimados no llega a ser del todo lineal por lo que las estimaciones de radiación global horaria tienen cierta precisión.

Radiación directa según Reindl

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m2)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	113	100	105	62	53	43	75
MAE (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	51	48	62	69	88	98	62
MBE (W/m2)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	-52	-58	-43	-27	-19	-17	-34
MBE (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	-24	-28	-25	-30	-32	-39	-28
RMSE (W/m2)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	176	164	175	135	128	120	148
RMSE (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	80	80	103	151	213	275	123

Tabla 15.13 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Reindl en Payerne

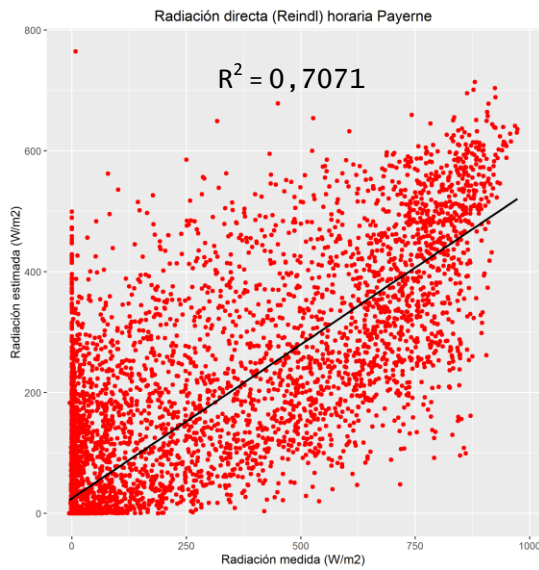


Figura 15.13 - Radiación directa horaria medida frente a estimada según Reindl en Payerne

En este caso, como se puede ver en la Figura 15.13 la relación entre los datos medidos y estimados no es lineal por lo que las estimaciones de radiación directa horaria, según Reindl, no son muy precisas.

Radiación directa según Orgill Hollands

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m2)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	113	98	104	61	53	42	74
MAE (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	52	48	61	69	87	95	62
MBE (W/m2)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	-49	-57	-45	-31	-23	-21	-36
MBE (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	-22	-28	-27	-34	-38	-47	-30
RMSE (W/m2)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	178	163	176	137	131	122	149
RMSE (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	81	79	104	154	217	280	124

Tabla 15.14 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Orgill Hollands en Payerne



Figura 15.14 - Radiación directa horaria medida frente a estimada según Orgill Hollands en Payerne

En este caso, como se puede ver en la Figura 15.14 la relación entre los datos medidos y estimados no es lineal por lo que las estimaciones de radiación directa horaria, según Orgill Hollands, no son muy precisas.

Radiación directa según Erbs

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m2)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	112	96	102	60	52	42	72
MAE (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	51	47	60	67	86	95	60
MBE (W/m2)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	-41	-50	-39	-28	-21	-20	-32
MBE (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	-19	-24	-23	-31	-35	-45	-27
RMSE (W/m2)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	176	159	171	133	128	121	146
RMSE (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	80	77	101	149	213	277	122

Tabla 15.15 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Erbs en Payerne

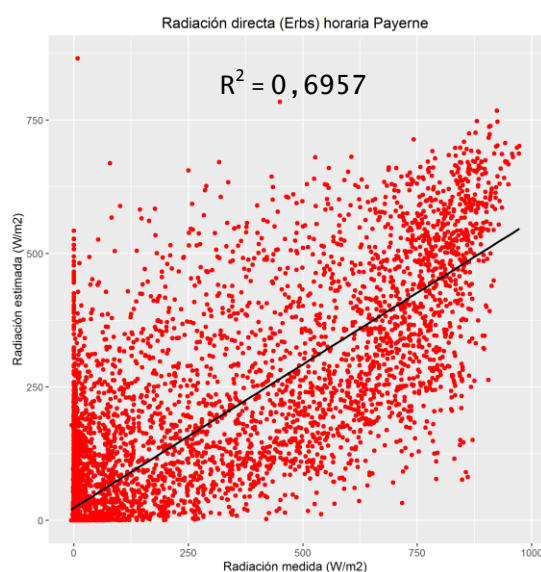


Figura 15.15 - Radiación directa horaria medida frente a estimada según Erbs en Payerne

En este caso, como se puede ver en la Figura 15.15 la relación entre los datos medidos y estimados no es lineal por lo que las estimaciones de radiación directa horaria, según Erbs, no son muy precisas.

Radiación directa según Louche

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m2)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	137	129	162	127	123	114	131
MAE (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	62	63	96	143	204	261	109
MBE (W/m2)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	122	115	151	117	113	102	119
MBE (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	56	56	89	132	188	233	100
RMSE (W/m2)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	223	227	296	267	271	255	261
RMSE (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	101	111	174	299	450	583	218

Tabla 15.16 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Louche en Payerne

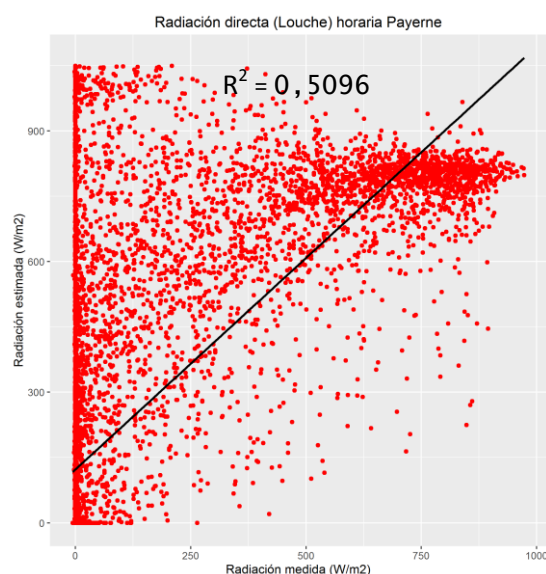


Figura 15.16 - Radiación directa horaria medida frente a estimada según Louche en Payerne

En este caso, como se puede ver en la Figura 15.16 la relación entre los datos medidos y estimados no es lineal por lo que las estimaciones de radiación directa horaria, según Louche, no son precisas.

Tamanrasset

A continuación aparecen una serie de tablas en las cuales están recogidos los errores, relativos a los datos horarios, cometidos tanto mensualmente como anualmente en las coordenadas geográficas correspondientes a Tamanrasset. Las tablas pertenecen los errores de radiación global, radiación directa según Reindl, radiación directa según Orgill Holands, radiación directa según Erbs y radiación directa según Louche. Seguido de cada tabla aparece un gráfico de dispersión correspondiente a esos datos de estudio. En todos estos gráficos se ha comprobado si existe relación lineal entre las medidas de radiación y las estimaciones para evaluar la precisión de estas últimas.

El periodo de estudio comprende entre el 01/01/2003 y el 16/02/2006.

Datos horarios

Radiación Global

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m2)	85	89	107	94	92	86	93	91	100	98	92	85	92
MAE (%)	44	39	34	29	29	30	30	30	34	39	43	45	35
MBE (W/m2)	-72	-74	-97	-82	-78	-63	-80	-78	-87	-89	-86	-78	-80
MBE (%)	-37	-32	-31	-26	-25	-22	-25	-26	-30	-35	-40	-41	-30
RMSE (W/m2)	140	145	158	140	137	134	138	138	149	151	145	137	143
RMSE (%)	72	63	50	44	44	47	44	46	51	61	69	73	54

Tabla 15.17 - Errores en la estimación de la radiación global horaria en Tamanrasset

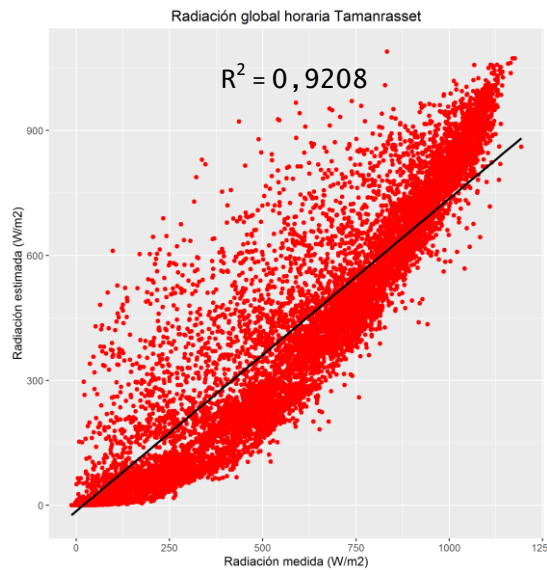


Figura 15.17 – Radiación global horaria medida frente a estimada en Tamanrasset

En este caso, como se puede ver en la Figura 15.17 la relación entre los datos medidos y estimados no llega a ser del todo lineal por lo que las estimaciones de radiación global horaria son algo precisas.

Radiación directa según Reindl

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m2)	168	158	161	124	105	92	106	112	118	136	147	157	133
MAE (%)	60	55	46	43	41	50	40	45	45	49	53	57	49
MBE (W/m2)	-129	-114	-134	-76	-48	5	-57	-58	-75	-109	-127	-130	-89
MBE (%)	-46	-40	-39	-26	-19	3	-22	-23	-28	-40	-46	-47	-33
RMSE (W/m2)	280	258	249	195	171	154	171	180	187	220	246	265	221
RMSE (%)	99	90	71	67	67	83	65	72	70	80	89	96	82

Tabla 15.18 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Reindl en Tamanrasset

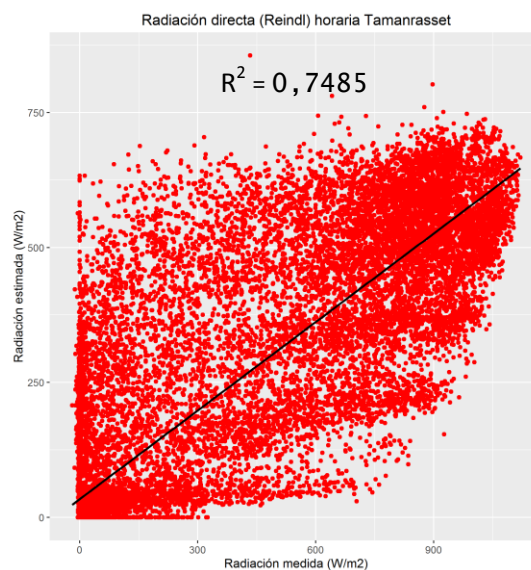


Figura 15.18 - Radiación directa horaria medida frente a estimada según Reindl en Tamanrasset

En este caso, como se puede ver en la Figura 15.18 la relación entre los datos medidos y estimados no es lineal por lo que las estimaciones de radiación directa horaria, según Reindl, no son del todo precisas.

Radiación directa según Orgill Hollands

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m²)	169	157	157	120	102	93	101	109	114	134	147	158	131
MAE (%)	60	55	45	42	40	50	39	43	43	49	53	57	49
MBE (W/m²)	-131	-114	-129	-68	-39	14	-48	-49	-69	-107	-127	-132	-85
MBE (%)	-46	-40	-37	-23	-15	7	-18	-20	-26	-39	-46	-48	-31
RMSE (W/m²)	282	258	244	193	170	158	167	177	182	218	248	268	221
RMSE (%)	100	90	70	66	67	86	64	70	69	79	89	97	81

Tabla 15.19 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Orgill Hollands en Tamanrasset

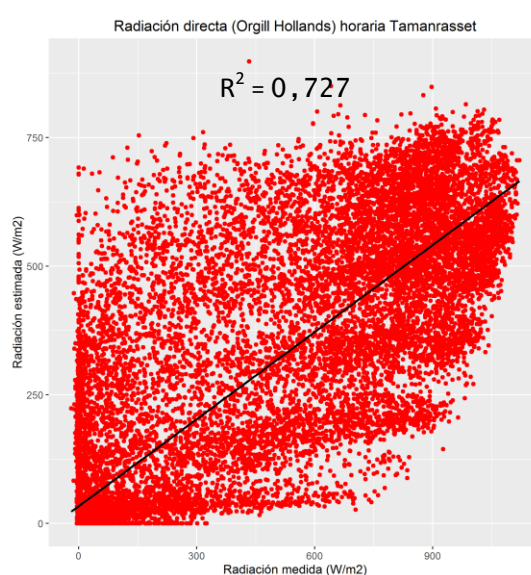


Figura 15.19 - Radiación directa horaria medida frente a estimada según Orgill Hollands en Tamanrasset

En este caso, como se puede ver en la Figura 15.19 la relación entre los datos medidos y estimados no es lineal por lo que las estimaciones de radiación directa horaria, según Orgill Hollands, no son del todo precisas.

Radiación directa según Erbs

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m²)	165	153	150	116	100	95	98	105	110	127	141	153	127
MAE (%)	58	53	43	40	39	51	37	42	41	46	51	56	47
MBE (W/m²)	-123	-105	-118	-57	-29	23	-38	-40	-59	-98	-119	-124	-76
MBE (%)	-44	-37	-34	-20	-11	12	-14	-16	-22	-35	-43	-45	-28
RMSE (W/m²)	275	250	235	188	167	162	163	173	175	208	237	259	214
RMSE (%)	98	88	68	65	66	88	62	69	66	76	86	94	79

Tabla 15.20 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Erbs en Tamanrasset

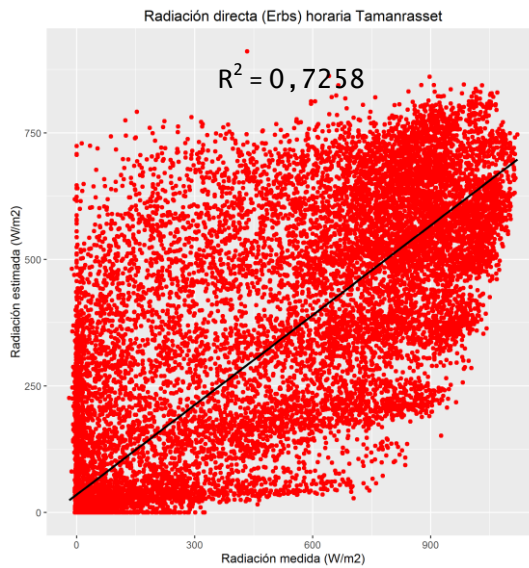


Figura 15.20 - Radiación directa horaria medida frente a estimada según Erbs en Tamanrasset

En este caso, como se puede ver en la Figura 15.20 la relación entre los datos medidos y estimados no es lineal por lo que las estimaciones de radiación directa horaria, según Orgill Hollands, no son del todo precisas.

Radiación directa según Louche

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m2)	136	137	139	168	175	215	165	179	174	125	129	136	156
MAE (%)	48	48	40	58	69	117	63	71	66	46	47	49	57
MBE (W/m2)	74	73	68	135	151	207	145	156	150	87	78	82	116
MBE (%)	26	26	20	46	60	112	55	62	56	31	28	30	43
RMSE (W/m2)	248	248	239	287	291	336	283	303	306	243	261	261	276
RMSE (%)	88	87	69	99	115	182	108	120	115	88	94	95	102

Tabla 15.21 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Louche en Tamanrasset

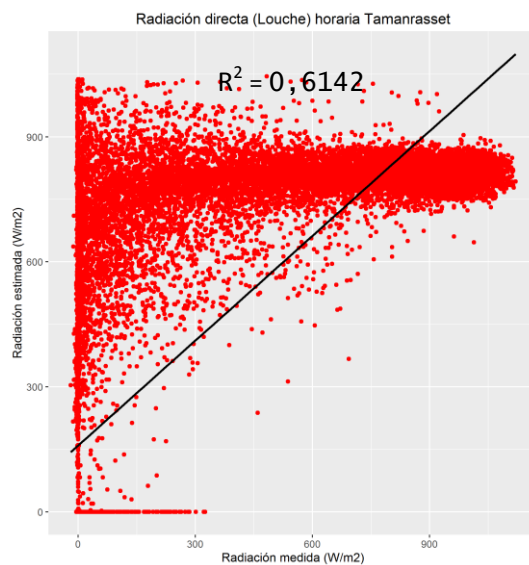


Figura 15.21 - Radiación directa horaria medida frente a estimada según Louche en Tamanrasset

En este caso, como se puede ver en la Figura 15.21 la relación entre los datos medidos y estimados no es para nada lineal por lo que las estimaciones de radiación directa horaria, según Louche, no se pueden considerar precisas.

Toravere

A continuación aparecen una serie de tablas en las cuales están recogidos los errores, relativos a los datos horarios, cometidos tanto mensual como anualmente en las coordenadas geográficas correspondientes a Toravere. Las tablas pertenecen los errores de radiación global, radiación directa según Reindl, radiación directa según Orgill Holands, radiación directa según Erbs y radiación directa según Louche. Seguido de cada tabla aparece un gráfico de dispersión correspondiente a esos datos de estudio. En todos estos gráficos se ha comprobado si existe relación lineal entre las medidas de radiación y las estimaciones para evaluar la precisión de estas últimas.

El periodo de estudio comprende entre el 01/01/2003 y el 16/02/2006.

Datos horarios

Radiación Global

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m²)	13	33	74	91	103	108	110	95	74	40	14	9	62
MAE (%)	83	74	63	53	49	45	48	51	59	72	84	88	54
MBE (W/m²)	-13	-31	-66	-72	-63	-67	-77	-77	-65	-35	-11	-8	-47
MBE (%)	-81	-71	-57	-42	-30	-28	-34	-42	-51	-62	-70	-83	-41
RMSE (W/m²)	34	72	132	153	165	167	170	157	132	84	36	23	121
RMSE (%)	209	162	114	89	78	71	74	85	105	150	221	240	106

Tabla 15.22 - Errores en la estimación de la radiación global horaria en Toravere

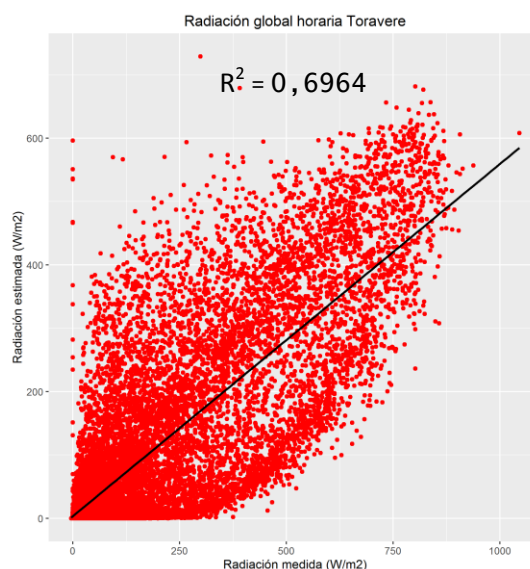


Figura 15.22 - Radiación global horaria medida frente a estimada en Toravere

En este caso, como se puede ver en la Figura 15.22 la relación entre los datos medidos y estimados se desvía de la linealidad por lo que las estimaciones de radiación global horaria no se pueden considerar precisas.

Radiación directa según Reindl

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m2)	24	56	121	133	135	134	131	105	100	70	25	22	86
MAE (%)	119	104	87	75	76	76	69	73	83	99	139	123	81
MBE (W/m2)	-11	-31	-74	-70	-45	-36	-57	-40	-49	-37	-5	-11	-38
MBE (%)	-56	-58	-54	-39	-26	-20	-30	-28	-41	-51	-28	-61	-36
RMSE (W/m2)	89	154	236	225	216	213	211	182	195	172	89	83	178
RMSE (%)	446	287	170	127	122	120	111	126	162	242	494	472	168

Tabla 15.23 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Reindl en Toravere

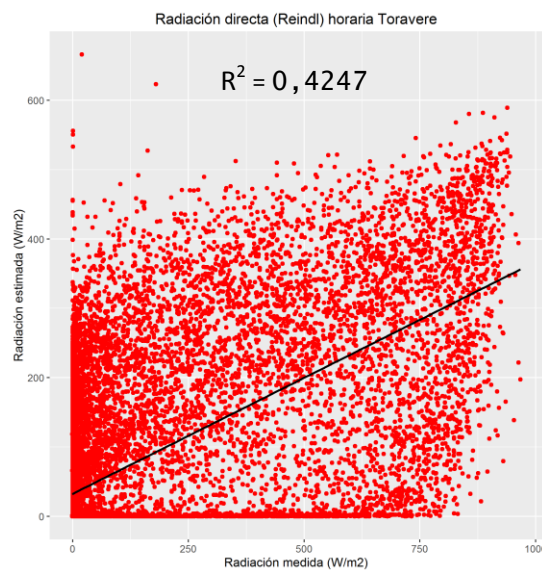


Figura 15.23 - Radiación directa horaria medida frente a estimada según Reindl en Toravere

En este caso, como se puede ver en la Figura 15.23 la relación entre los datos medidos y estimados no es para nada lineal por lo que las estimaciones de radiación directa horaria, según Reindl, no se pueden considerar precisas.

Radiación directa según Orgill Hollands

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m2)	24	57	123	134	136	134	132	106	101	72	26	22	86
MAE (%)	121	106	89	75	77	76	69	73	85	101	144	127	82
MBE (W/m2)	-11	-32	-76	-72	-46	-36	-58	-42	-51	-37	-5	-10	-38
MBE (%)	-56	-60	-55	-41	-26	-20	-30	-29	-43	-52	-25	-58	-36
RMSE (W/m2)	90	157	240	228	217	214	212	184	198	176	91	84	180
RMSE (%)	452	292	173	128	123	121	112	127	165	247	505	476	170

Tabla 15.24 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Orgill Hollands en Toravere

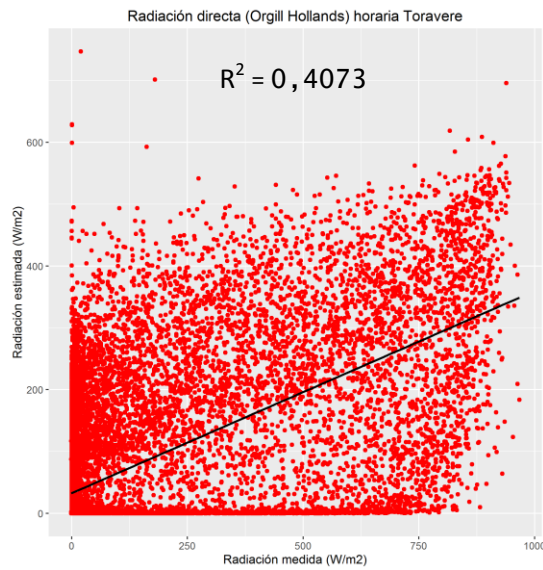


Figura 15.24 - Radiación directa horaria medida frente a estimada según Orgill Hollands en Toravere

En este caso, como se puede ver en la Figura 15.23 la relación entre los datos medidos y estimados no es para nada lineal por lo que las estimaciones de radiación directa horaria, según Orgill Hollands, no se pueden considerar precisas.

Radiación directa según Erbs

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m2)	24	57	122	132	134	134	130	105	100	72	26	22	86
MAE (%)	122	106	88	74	76	76	68	73	84	101	145	127	81
MBE (W/m2)	-11	-32	-74	-67	-39	-29	-50	-37	-48	-36	-4	-10	-35
MBE (%)	-55	-59	-53	-38	-22	-16	-27	-26	-40	-51	-24	-57	-33
RMSE (W/m2)	90	157	238	223	214	213	208	181	195	175	91	84	178
RMSE (%)	452	292	171	126	121	120	110	125	163	245	504	476	168

Tabla 15.25 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Erbs en Toravere

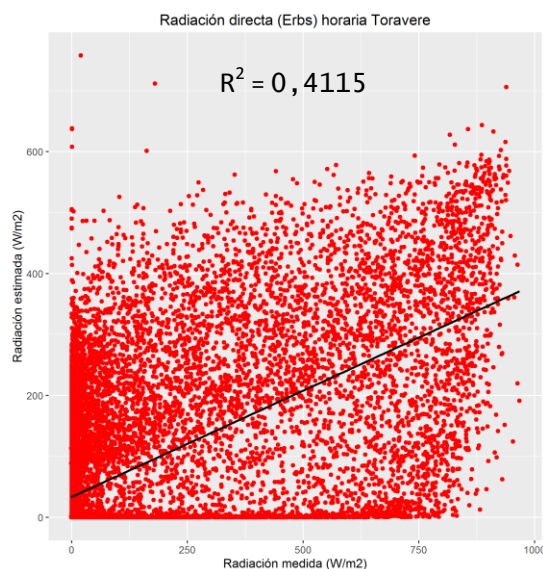


Figura 15.25 - Radiación directa horaria medida frente a estimada según Erbs en Toravere

En este caso, como se puede ver en la Figura 15.25 la relación entre los datos medidos y estimados no es para nada lineal por lo que las estimaciones de radiación directa horaria, según Erbs, no se pueden considerar precisas.

Radiación directa según Louche

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m ²)	100	132	209	219	241	237	235	215	209	177	125	100	180
MAE (%)	500	246	151	124	136	134	124	149	174	248	697	567	171
MBE (W/m ²)	77	75	100	138	163	157	154	156	141	120	107	77	120
MBE (%)	385	140	72	78	92	89	81	108	118	169	598	436	114
RMSE (W/m ²)	268	296	369	372	384	364	370	361	374	363	314	263	341
RMSE (%)	1340	551	266	209	217	205	195	250	311	509	1751	1489	324

Tabla 15.26 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Louche en Toravere

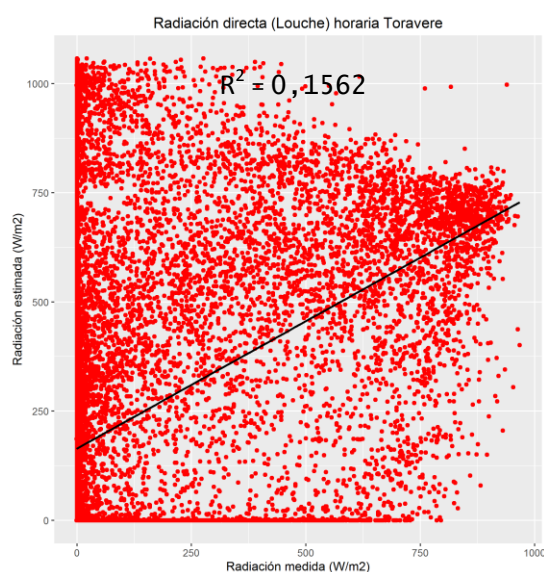


Figura 15.26 - Radiación directa horaria medida frente a estimada según Louche en Toravere

En este caso, como se puede ver en la Figura 15.26 la relación entre los datos medidos y estimados no es para nada lineal por lo que las estimaciones de radiación directa horaria, según Erbs, no se pueden considerar precisas.

Presentados individualmente los resultados obtenidos para todas y cada una de las estaciones, se ha decidido recoger en dos gráficas de barras, una para los valores horarios y otra para los diarios, los diferentes tipos de errores obtenidos de todas las estaciones. Todo esto con el fin de una comparación visual rápida de la variabilidad de los mismos según la zona geográfica.

Primero aparecen expuestas las gráficas de los errores cometidos en las estimaciones horarias, tanto para la radiación global como para la radiación directa por los diferentes métodos, y seguido aparecen los resultados para los datos diarios.

Datos horarios

Radiación Global

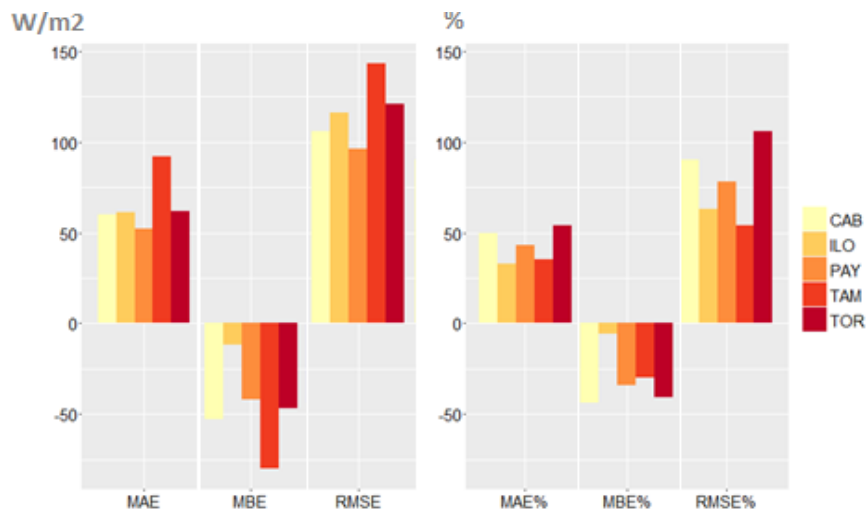


Figura 15.27 - Comparación de los errores en la estimación de la radiación global horaria

Radiación directa según Reindl

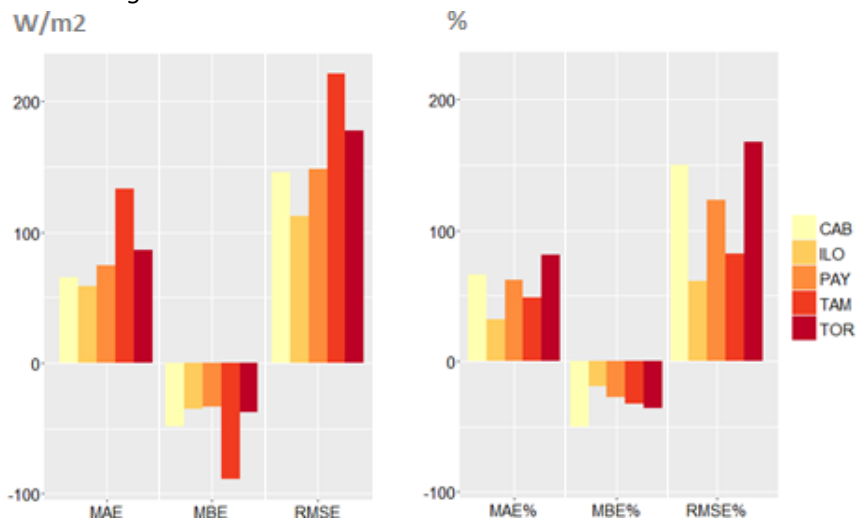


Figura 15.28 - Comparación de los errores en la estimación de la radiación directa horaria según Reindl

Radiación directa según Orgill Hollands

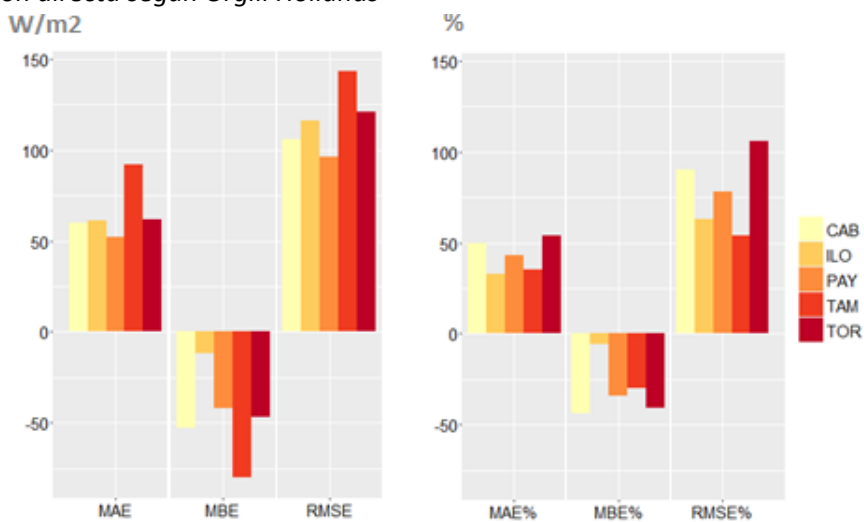


Figura 15.29 - Comparación de los errores en la estimación de la radiación directa horaria según Orgill Hollands

Radiación directa según Erbs

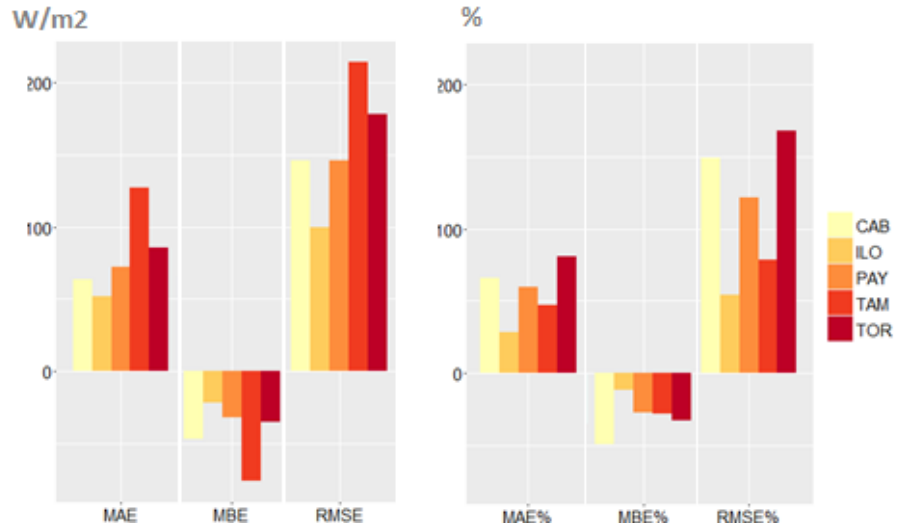


Figura 15.30 - Comparación de los errores en la estimación de la radiación directa horaria según Erbs

Radiación directa según Louche

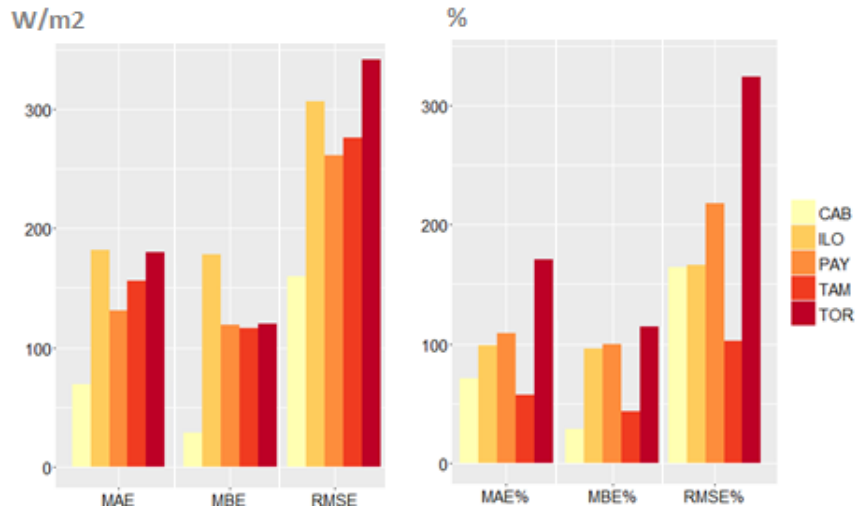


Figura 15.31 - Comparación de los errores en la estimación de la radiación directa horaria según Louche

Datos diarios

Radiación Global

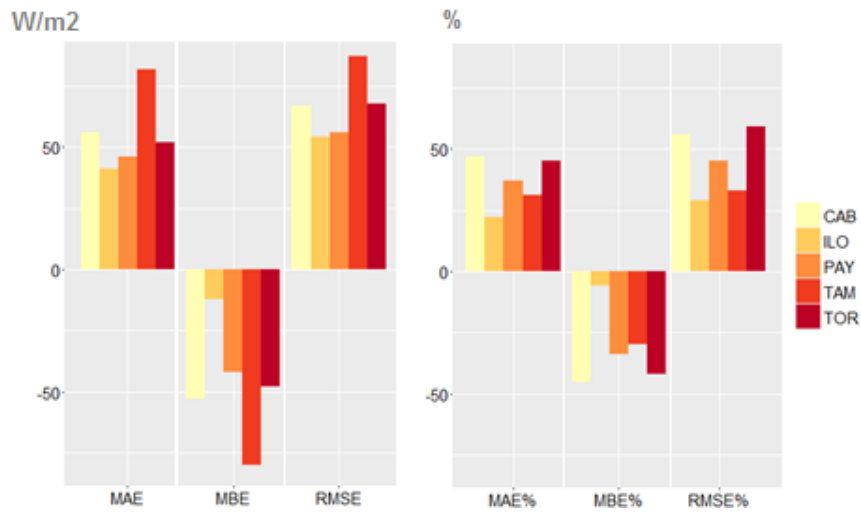


Figura 15.32 - Comparación de los errores en la estimación de la radiación global diaria

Radiación directa según Reindl

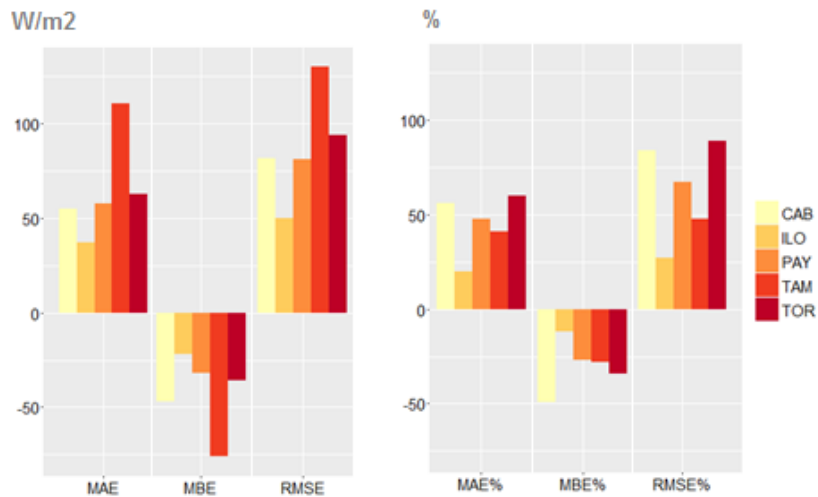


Figura 15.33 - Comparación de los errores en la estimación de la radiación directa diaria según Reindl

Radiación directa según Orgill Hollands

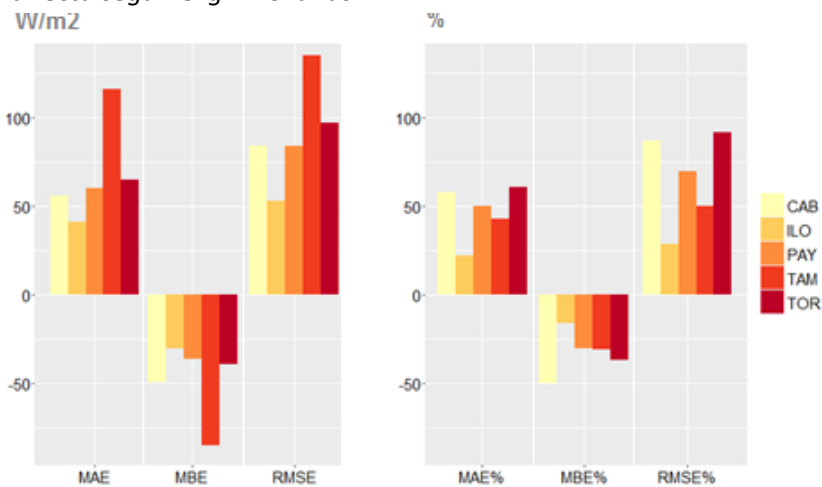


Figura 15.34 - Comparación de los errores en la estimación de la radiación directa diaria según Orgill Hollands

Radiación directa según Erbs

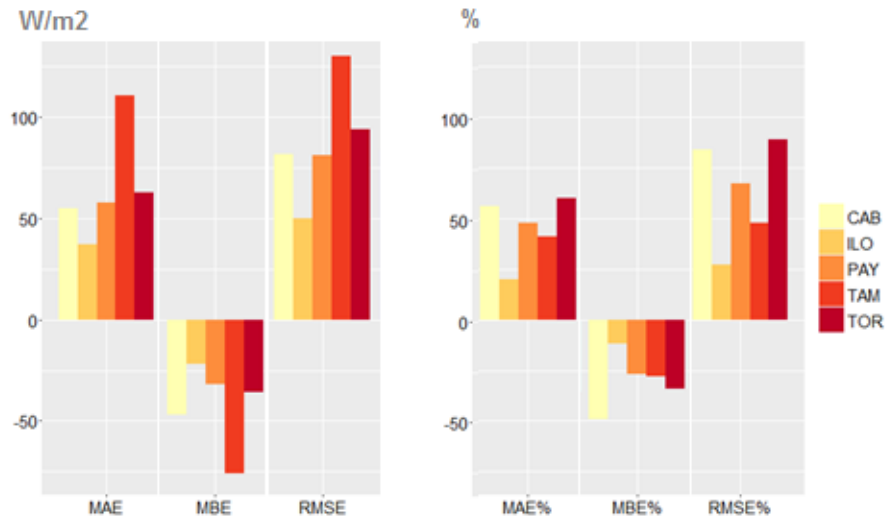


Figura 15.35 - Comparación de los errores en la estimación de la radiación directa diaria según Erbs

Radiación directa según Louche

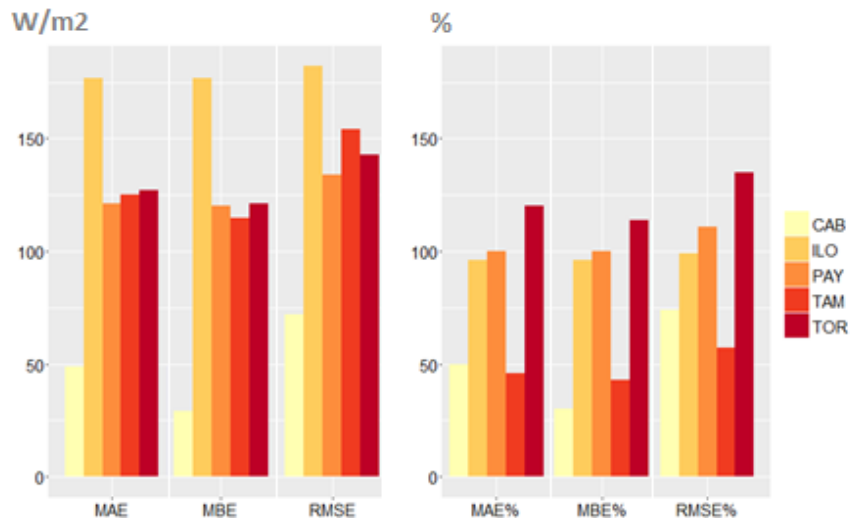


Figura 15.36 - Comparación de los errores en la estimación de la radiación directa diaria según Louche

15.2.1. Análisis de los resultados de la validación

En las siguientes líneas se analizarán los resultados obtenidos tras las estimaciones con valores horarios y diarios.

Radiación global

Respecto a la radiación global se obtiene:

- Un MAE de alrededor del 50% para las estaciones de Cabauw y Toravere y un 43% para la estación de Payerne, obteniéndose los errores porcentuales más bajos en las estaciones de Ilorin y Tamanrasset dónde el error oscila en torno al 30%.
- Si se analizan los resultados de MBE obtenidos se puede ver que estos arrojan un valor negativo en todas las estaciones, lo cual quiere decir que el modelo implementado tiende a subestimar la radiación que llega a la tierra. Este error toma valores negativos en todos los meses, siendo los mejores parados los pertenecientes a la estación veraniega, es decir, los meses de Mayo, Junio, Julio y Agosto. El error medio cometido ronda en torno al 30-40%, excepto Ilorin que obtiene un error de tan solo el 6%, debido a que es el único lugar donde se sobreestima la radiación los meses de Julio, Agosto y Septiembre, lo cual compensa algo la subestimación del resto de los meses.
- Por último, el RMSE presenta mayor variabilidad dándose los peores resultados en Cabauw y Toravere, con un 90% y 106% respectivamente, seguidos de Payerne, con un 78%, y los mejores resultados pertenecen a Ilorin y Tamanrasset, con un 63% y 54% respectivamente.
- Los resultados presentados en los puntos anteriores corresponden a los datos horarios. Los errores cometidos con los datos diarios son inferiores debido a que se reducen el número de datos y a que las diferencias entre los mismos se suavizan. EL único error que se mantiene con valor constante en todas las estaciones es el MBE, que sigue subestimando los resultados.

Por lo tanto, se puede concluir diciendo que este modelo funciona mejor durante los meses en los que las condiciones atmosféricas son más estables y hay una menor nubosidad, esto es, los meses de verano. Del mismo modo, aquellas estaciones localizadas en climas con una meteorología más estable, Ilorin y Tamanrasset, presentan unos errores inferiores al resto, siendo aquellas estaciones con una latitud muy alta, Toravere, las que presentan peores resultados.

Radiación directa

Ahora se van a analizar de una manera similar los resultados obtenidos al estimar la radiación directa:

- Los modelos de Reindl, Erbs y Orgill Hollands arrojan unos resultados similares dentro de cada estación, siendo el método de Louche el más diferenciado del resto. Mientras que los tres primeros tienden a subestimar la radiación, el método de Louche sobreestima los resultados, además de aportar unos resultados generales peores.
- Centrándose en los modelos con mejores resultados, se obtiene un MAE del 81% en Toravere, siendo la estación peor parada, mientras que Payerne y Cabuw obtienen un error alrededor del 60%, Tamanrasset presenta un error del 49% y la estación con mejor resultado es Ilorin con un 32%. Los resultados obtenidos por Louche para las estaciones, en el orden expuesto en la frase anterior, son 171%, 109%, 71%, 57% y 99%.
- Analizando el MBE, la estación con el peor resultado es Cabauw con un -50%, seguida de Toravere y Tamanrasset, -36 y -33% respectivamente, Payerne, -28%, y por último de nuevo, con el mejor resultado, Ilorin que presenta un -19%. En este caso los resultados obtenidos con Louche son peores en todas las estaciones excepto en Cabauw donde el error pasa de un -50% a un 29%.
- Por último, analizando el RMSE da unos valores muy elevados, superiores al 100%, en las estaciones de Cabuw, Payerne y Toravere. En Tamanrasset e Ilorin el error no supera el 100% pero sigue siendo elevado, 84% y 61% respectivamente. Con Louche el error supera el 100% en todas las estaciones, llegándose a alcanzar un error del 324% en Toravere.
- Los errores obtenidos con los valores diarios son inferiores en todas las estaciones, excepto el MBE que se mantiene constante, tal como sucedía con los datos de radiación global.

Las conclusiones que se pueden sacar de todo esto es que el método de Louche puede quedar prácticamente descartado debido a que arroja unos resultados bastante peores que el resto al estimar la radiación directa. Por otro lado, igual que ocurría con la radiación global, los meses de Mayo, Junio, Julio y Agosto presentan mejores resultados que el resto al igual que las estaciones situadas más al sur.

15.3. Comparación de los resultados con modelo de CENER

Analizado individualmente el nuevo modelo SOLIS, resulta de interés compararlo con el modelo implementado en CENER, es decir, con el modelo de cielo claro ESRA. Para ello se presentan una serie de tablas que recogen los errores para cada estación y unos gráficos de barras en los que aparecen los errores obtenidos con ambos métodos, para una comparación más dinámica. La comparación se ha limitado a los datos horarios.

Cabauw

A continuación aparecen los errores cometidos por el modelo ESRA, para la radiación global y directa, en la estación de Cabauw. Así como la comparación con los errores cometidos con SOLIS.

Radiación Global

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m ²)	12	17	29	40	51	48	48	41	27	20	14	11	29
MAE (%)	34	36	28	25	26	20	25	23	17	22	37	47	25
MBE (W/m ²)	-9	-9	-14	3	7	15	25	18	2	-6	-5	-4	2
MBE (%)	-26	-18	-14	2	4	6	13	10	1	-6	-12	-17	2
RMSE (W/m ²)	27	39	58	83	106	99	88	84	49	38	30	26	66
RMSE (%)	78	82	57	51	54	42	46	47	32	43	80	113	56

Tabla 15.27 - Errores en la estimación de la radiación global horaria en Cabauw (ESRA)



Figura 15.37 – Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación global en Cabauw

Radiación directa según Reindl

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m²)	35	30	41	71	77	83	75	89	103	35	30	41	63
MAE (%)	67	74	76	49	51	43	65	66	82	67	74	76	65
MBE (W/m²)	-18	-7	1	-16	-14	6	53	66	76	-18	-7	1	15
MBE (%)	-35	-18	2	-11	-9	3	46	49	60	-35	-18	2	16
RMSE (W/m²)	98	82	121	174	135	143	159	180	217	98	82	121	152
RMSE (%)	186	205	221	121	89	73	138	134	172	186	205	221	156

Tabla 15.28 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Reindl en Cabauw (ESRA)

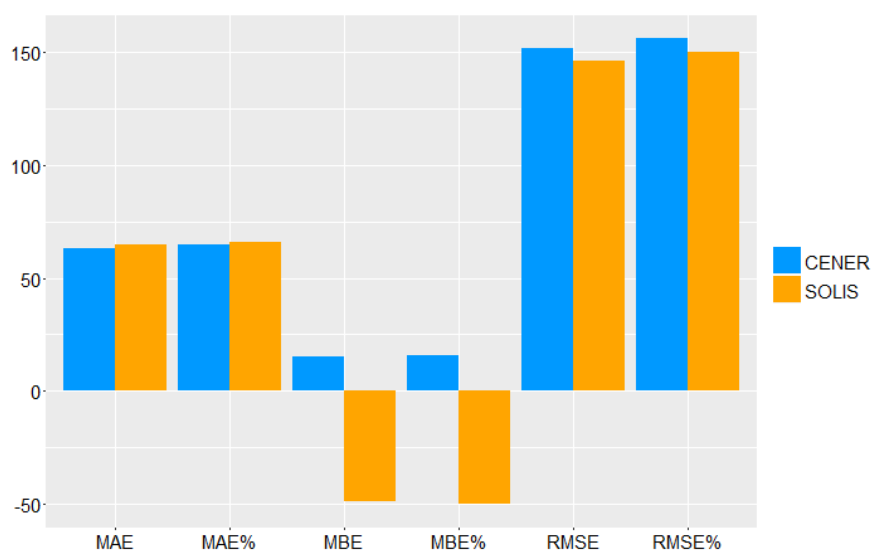


Figura 15.38 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación directa (Reindl) en Cabauw

Radiación directa según Orgill Holands

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m²)	39	31	43	75	78	83	77	87	105	90	67	30	66
MAE (%)	75	77	78	53	51	42	67	65	83	87	134	100	67
MBE (W/m²)	-25	-12	-2	-21	-18	5	55	61	74	30	20	-7	12
MBE (%)	-47	-30	-3	-14	-12	2	47	46	59	29	39	-23	13
RMSE (W/m²)	110	86	140	221	136	145	188	205	267	229	278	91	182
RMSE (%)	208	214	255	154	90	74	163	153	211	222	555	302	187

Tabla 15.29 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Orgill Hollands en Cabauw (ESRA)

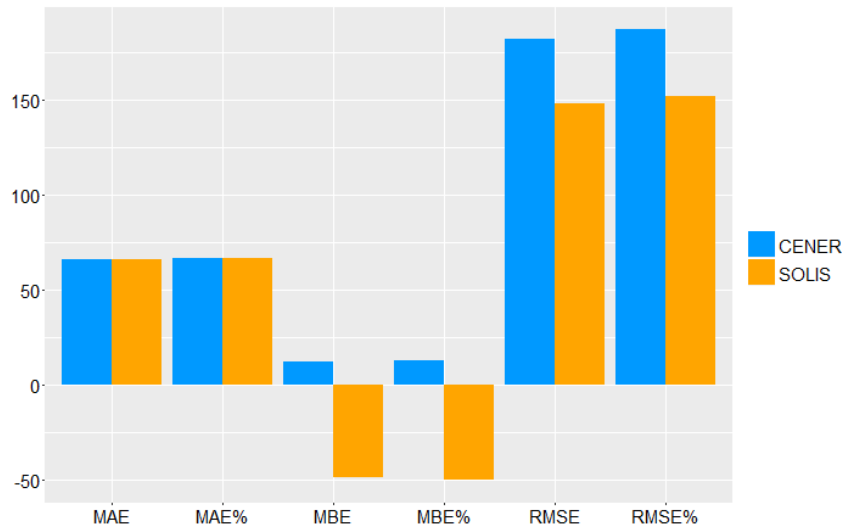


Figura 15.39 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación directa (Orgill Hollands) en Cabauw

Radiación directa según Erbs

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m²)	39	30	41	71	77	81	80	91	108	90	67	30	66
MAE (%)	74	75	75	49	50	42	70	68	86	88	134	101	67
MBE (W/m²)	-25	-13	-2	-16	-13	14	61	68	82	35	20	-7	16
MBE (%)	-48	-33	-4	-11	-8	7	53	51	65	34	41	-24	16
RMSE (W/m²)	110	86	141	219	137	146	195	212	275	232	282	93	185
RMSE (%)	208	213	257	153	90	75	169	158	218	226	563	308	190

Tabla 15.30 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Erbs en Cabauw (ESRA)

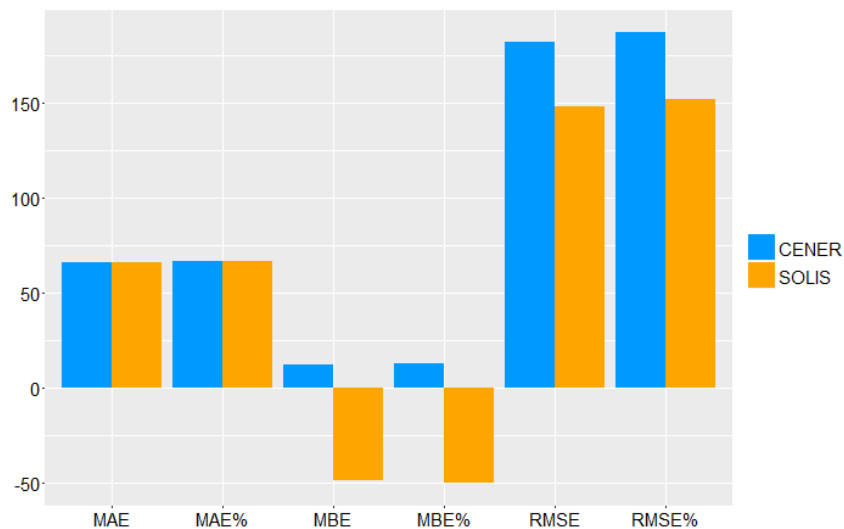


Figura 15.40 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación directa (Erbs) en Cabauw

Radiación directa según Louche

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m²)	32	28	39	63	78	81	87	118	124	104	61	32	69
MAE (%)	61	71	71	44	51	42	75	88	99	101	122	105	71
MBE (W/m²)	-21	-9	3	-9	1	30	73	102	107	64	22	0	29
MBE (%)	-40	-23	6	-6	1	16	63	76	85	62	44	-2	29
RMSE (W/m²)	96	83	110	125	142	152	168	216	238	238	178	97	160
RMSE (%)	181	207	200	87	93	78	145	161	189	231	357	322	164

Tabla 15.31 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Louche en Cabauw (ESRA)

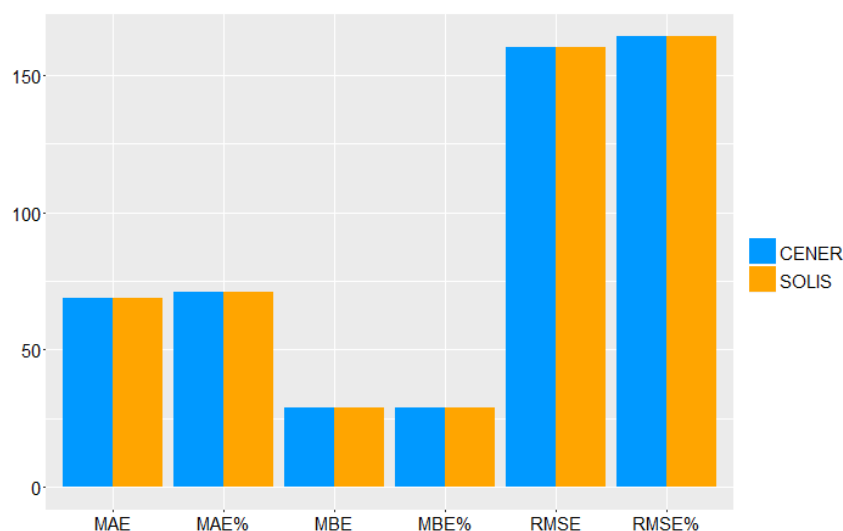


Figura 15.41 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación directa (Louche) en Cabauw

Ilorin

A continuación aparecen los errores cometidos por el modelo ESRA, para la radiación global y directa, en la estación de Ilorin. Así como la comparación con los errores cometidos con SOLIS.

Global

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m²)	78	75	82	91	83	88	150	138	101	82	64	54	92
MAE (%)	45	38	35	42	43	49	122	94	51	42	34	29	50
MBE (W/m²)	78	74	79	90	81	86	148	136	98	81	63	54	90
MBE (%)	44	37	34	42	42	48	120	92	49	42	33	29	49
RMSE (W/m²)	131	128	136	157	146	153	268	235	177	150	118	93	167
RMSE (%)	75	64	58	73	76	85	216	160	90	77	63	50	90

Tabla 15.32 - Errores en la estimación de la radiación global horaria en Ilorin (ESRA)

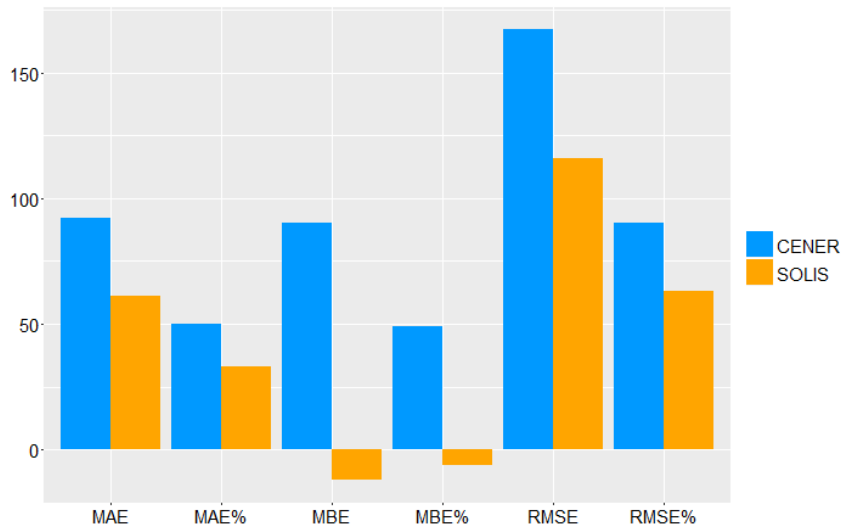


Figura 15.42 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación global en Ilorin

Radiación directa según Reindl

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m²)	131	110	125	136	116	111	154	141	122	108	109	115	123
MAE (%)	75	55	53	63	60	62	124	96	62	56	59	62	67
MBE (W/m²)	128	100	94	109	89	89	145	131	95	81	93	111	105
MBE (%)	73	50	40	51	46	49	117	89	48	41	50	60	57
RMSE (W/m²)	221	197	220	220	190	183	252	227	265	190	197	201	214
RMSE (%)	126	99	93	102	98	102	203	154	135	98	105	108	116

Tabla 15.33 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Reindl en Ilorin (ESRA)

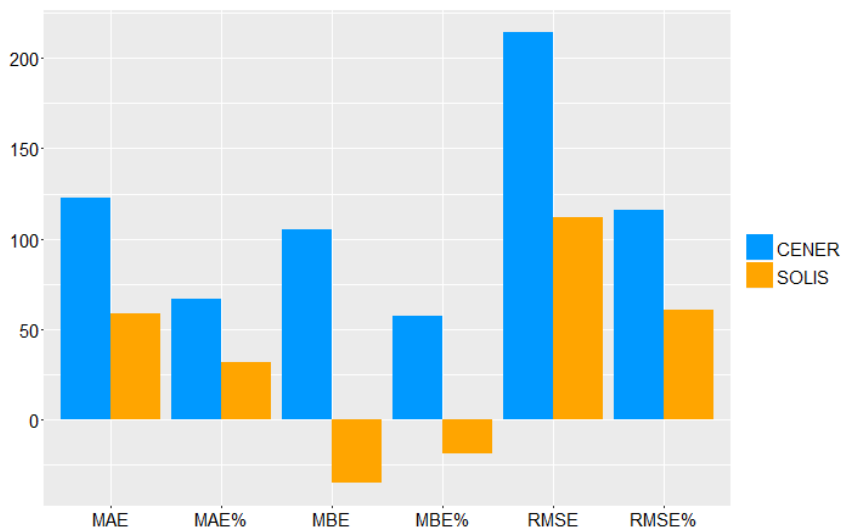


Figura 15.43 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación directa (Reindl) en Ilorin

Radiación directa según Orgill Hollands

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m²)	129	108	128	128	108	104	150	137	124	101	103	111	119
MAE (%)	74	54	54	59	56	58	121	93	63	52	55	60	64
MBE (W/m²)	128	103	109	112	91	89	145	132	106	84	93	110	108
MBE (%)	73	52	47	52	47	50	117	90	54	43	50	59	58
RMSE (W/m²)	212	187	258	207	177	169	246	219	318	180	185	189	213
RMSE (%)	121	94	110	96	91	94	199	148	161	93	99	101	116

Tabla 15.34 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Orgill Hollands en Ilorin (ESRA)

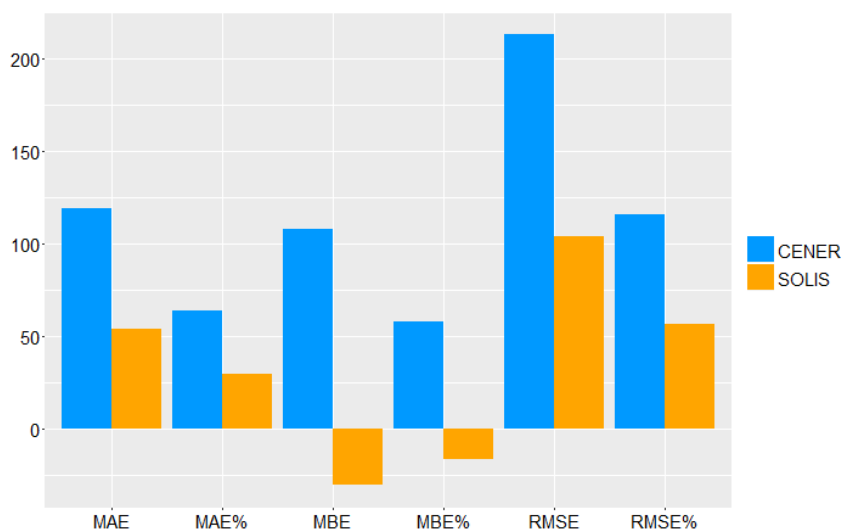


Figura 15.44 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación directa (Orgill Hollands) en Ilorin

Radiación directa según Erbs

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m²)	142	120	138	139	117	113	162	151	133	109	113	123	130
MAE (%)	81	60	59	64	60	63	131	102	68	56	61	66	70
MBE (W/m²)	141	117	125	128	106	104	159	147	121	98	107	123	122
MBE (%)	81	59	53	59	55	58	129	100	61	50	57	66	66
RMSE (W/m²)	229	203	270	222	190	183	263	236	328	193	199	205	228
RMSE (%)	131	102	115	103	98	102	212	160	166	99	106	110	123

Tabla 15.35 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Erbs en Ilorin (ESRA)

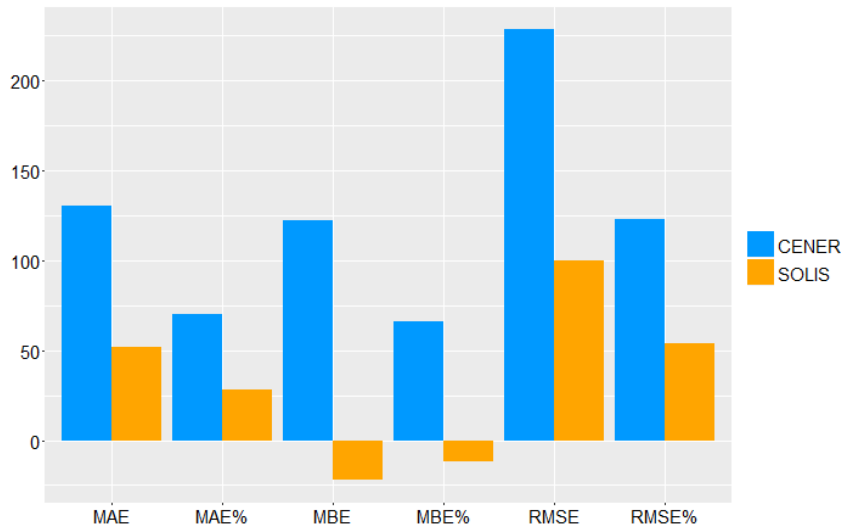


Tabla 15.36 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación directa (Erbs) en Ilorin

Radiación directa según Louche

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m2)	207	178	181	187	179	173	213	192	166	153	168	191	182
MAE (%)	118	89	77	87	93	96	172	130	84	79	90	103	99
MBE (W/m2)	206	176	172	178	173	168	211	189	157	146	165	191	178
MBE (%)	118	88	73	82	89	94	170	128	80	75	88	103	96
RMSE (W/m2)	339	305	310	307	299	287	340	308	284	274	296	321	306
RMSE (%)	193	153	132	142	155	160	274	209	144	141	158	172	166

Tabla 15.37 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Louche en Ilorin (ESRA)

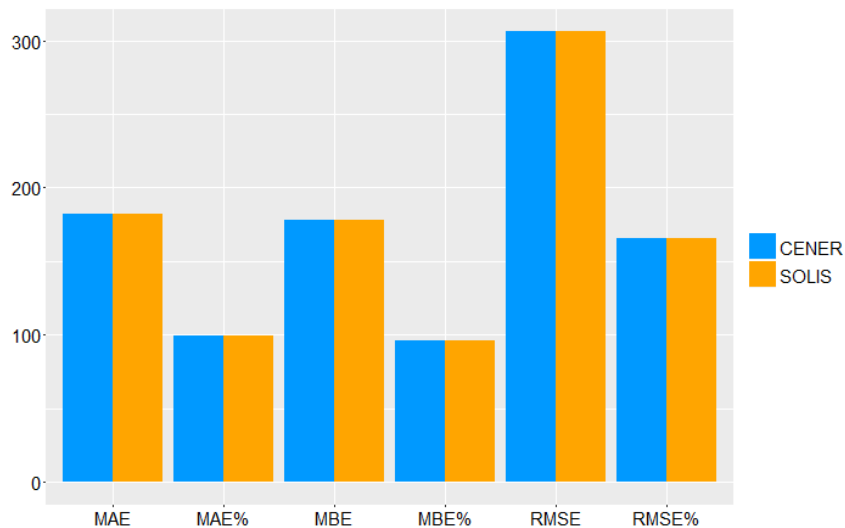


Figura 15.45 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación directa (Erbs) en Ilorin

Payerne

A continuación aparecen los errores cometidos por el modelo ESRA, para la radiación global y directa, en la estación de Payerne. Así como la comparación con los errores cometidos con SOLIS.

Global

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m2)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	61	47	35	36	25	21	35
MAE (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	25	22	19	40	46	60	28
MBE (W/m2)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	51	40	24	25	16	15	26
MBE (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	21	19	13	28	30	41	21
RMSE (W/m2)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	118	96	69	68	51	43	72
RMSE (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	48	45	38	75	94	123	59

Tabla 15.38 - Errores en la estimación de la radiación global horaria en Payerne (ESRA)

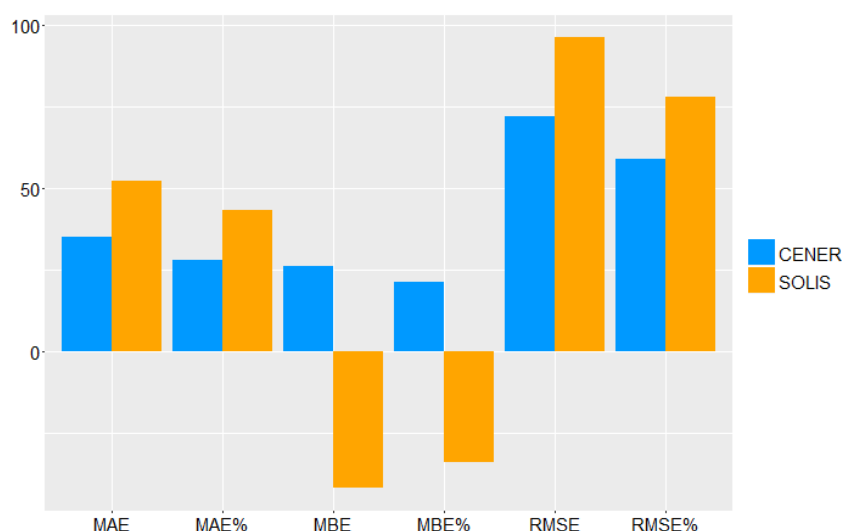


Figura 15.46 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación global en Payerne

Radiación directa según Reindl

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m2)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	105	100	127	103	90	92	102
MAE (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	48	49	75	115	149	211	85
MBE (W/m2)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	76	73	102	85	74	77	82
MBE (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	35	35	60	95	123	177	68
RMSE (W/m2)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	172	187	249	300	182	196	223
RMSE (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	78	91	147	336	302	448	187

Tabla 15.39 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Reindl en Payerne (ESRA)

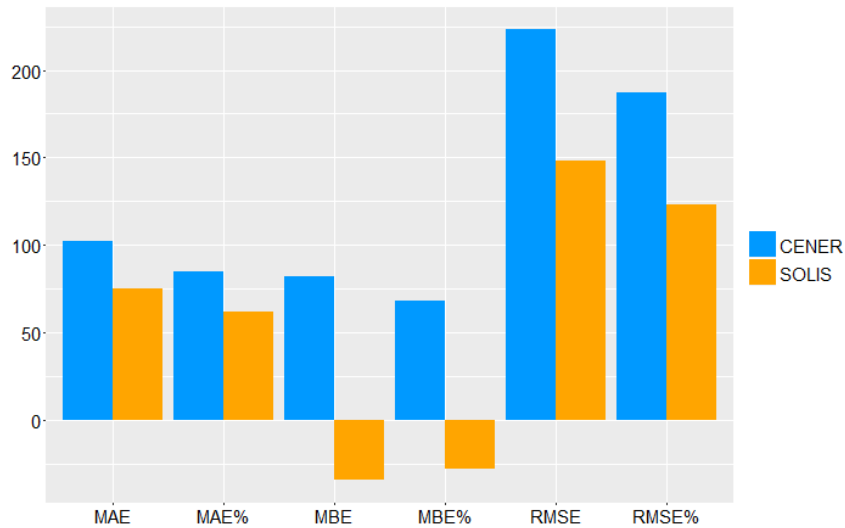


Figura 15.47 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación directa (Reindl) en Payerne

Radiación directa según Orgill Hollands

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m2)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	101	96	126	116	88	90	103
MAE (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	46	47	74	130	145	206	86
MBE (W/m2)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	74	71	100	94	68	71	80
MBE (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	34	35	59	105	112	162	67
RMSE (W/m2)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	171	202	284	470	185	205	283
RMSE (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	78	99	167	527	306	467	236

Tabla 15.40 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Orgill Hollands en Payerne (ESRA)

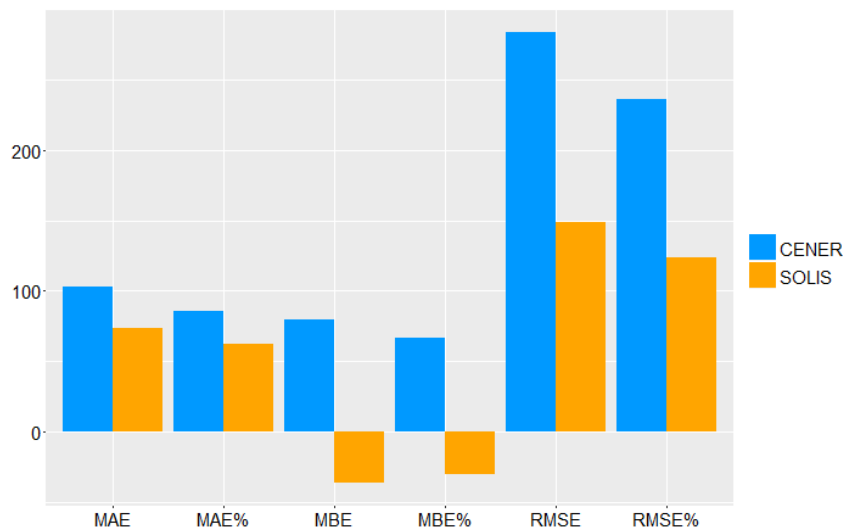


Figura 15.48 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación directa (Orgill Hollands) en Toravere

Radiación directa según Erbs

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m²)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	108	101	130	118	90	92	106
MAE (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	49	49	77	132	149	211	88
MBE (W/m²)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	87	83	112	101	73	75	88
MBE (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	39	40	66	113	120	171	74
RMSE (W/m²)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	183	212	293	479	191	210	290
RMSE (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	83	103	172	537	317	481	242

Tabla 15.41 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Erbs en Payerne (ESRA)

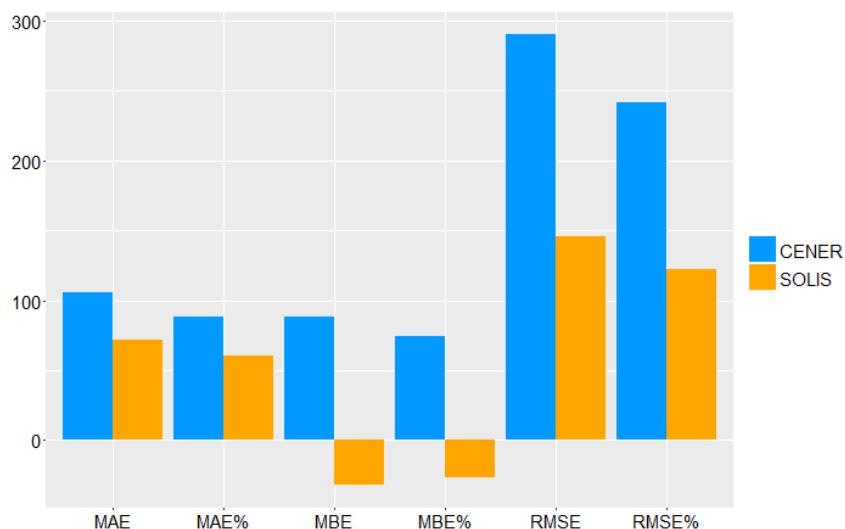


Figura 15.49 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación directa (Erbs) en Payerne

Radiación directa según Louche

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m²)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	137	129	162	127	123	114	131
MAE (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	62	63	96	143	204	261	109
MBE (W/m²)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	122	115	151	117	113	102	119
MBE (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	56	56	89	132	188	233	100
RMSE (W/m²)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	223	227	296	267	271	255	261
RMSE (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	101	111	174	299	450	583	218

Tabla 15.42 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Louche en Toravere (ESRA)

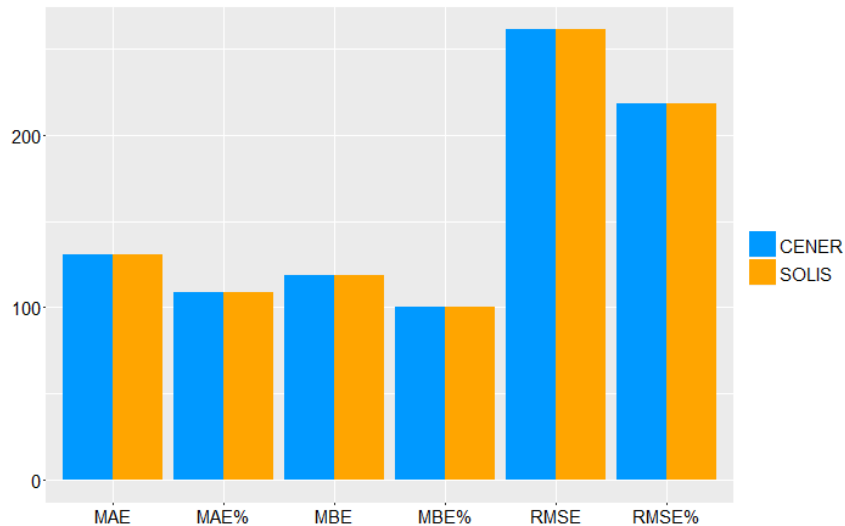


Figura 15.50 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación directa (Louche) en Toravere

Tamanrasset

A continuación aparecen los errores cometidos por el modelo ESRA, para la radiación global y directa, en la estación de Tamanrasset. Así como la comparación con los errores cometidos con SOLIS.

Radiación Global

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m²)	46	56	47	46	58	82	51	51	48	35	29	27	48
MAE (%)	24	24	15	15	19	29	16	17	16	14	14	14	18
MBE (W/m²)	39	47	37	45	57	80	48	48	45	27	23	25	43
MBE (%)	20	20	12	14	18	28	15	16	15	11	11	13	16
RMSE (W/m²)	99	110	90	91	108	145	96	100	99	78	57	61	97
RMSE (%)	51	48	28	28	34	51	30	33	34	31	27	32	37

Tabla 15.43 - Errores en la estimación de la radiación global horaria en Tamanrasset (ESRA)

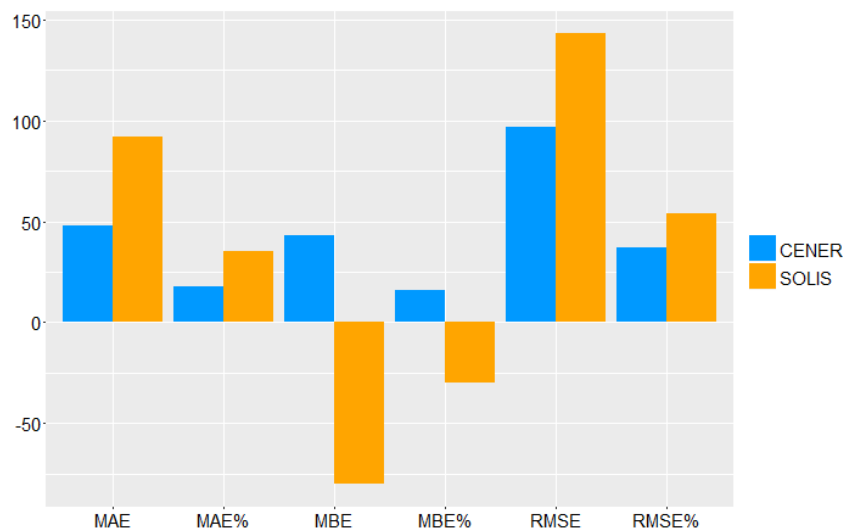


Figura 15.51 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación global en Tamanrasset

Radiación directa según Reindl

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m²)	123	132	139	155	166	202	148	155	157	110	108	116	142
MAE (%)	44	46	40	53	65	109	56	62	59	40	39	42	52
MBE (W/m²)	75	81	75	124	143	192	125	127	127	63	55	65	103
MBE (%)	27	28	22	43	56	104	47	50	48	23	20	24	38
RMSE (W/m²)	229	242	254	259	272	312	250	258	303	207	204	218	252
RMSE (%)	81	85	73	89	107	169	95	102	114	75	74	79	93

Tabla 15.44 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Reindl en Tamanrasset (ESRA)

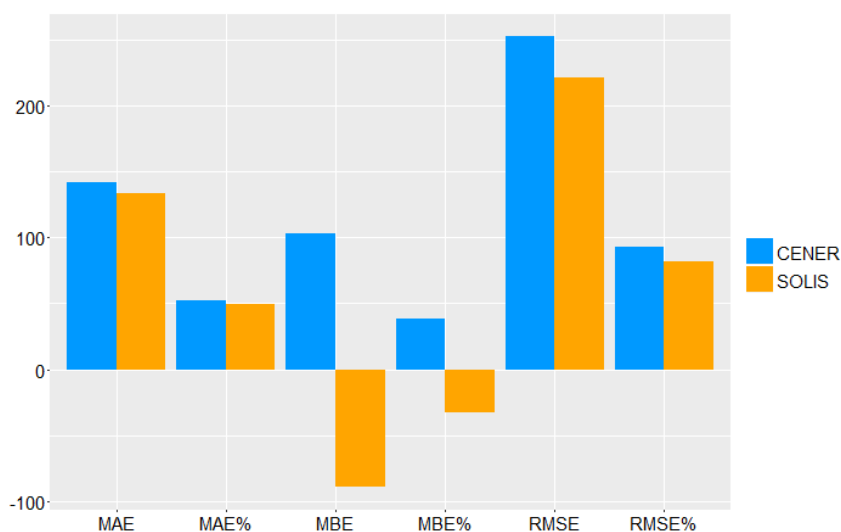


Figura 15.52 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación directa (Reindl) en Tamanrasset

Radiación directa según Orgill Hollands

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m²)	115	123	132	146	163	202	141	146	159	103	107	110	136
MAE (%)	41	43	38	50	64	110	54	58	60	37	39	40	50
MBE (W/m²)	62	74	76	126	148	197	129	129	139	60	52	54	102
MBE (%)	22	26	22	44	58	107	49	51	53	22	19	20	38
RMSE (W/m²)	215	227	264	248	266	312	240	248	380	196	207	207	253
RMSE (%)	76	79	76	85	105	169	91	99	143	71	75	75	93

Tabla 15.45 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Orgill Hollands en Tamanrasset (ESRA)

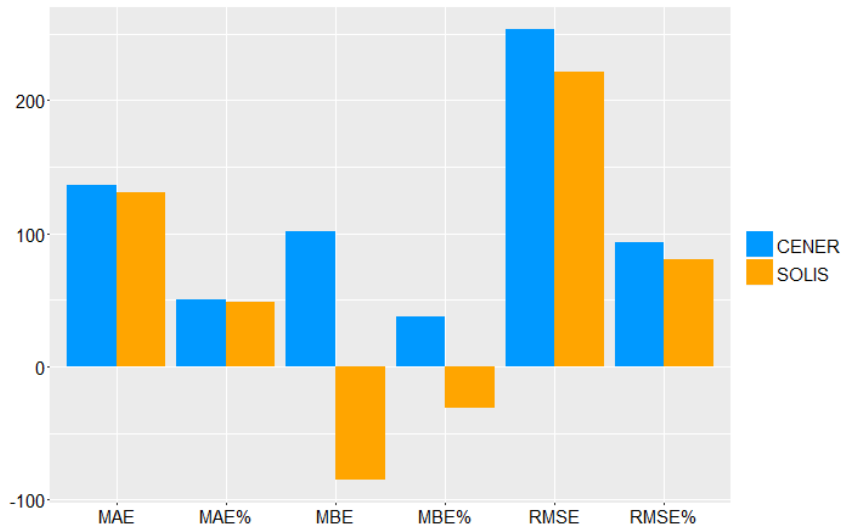


Figura 15.53 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación directa (Orgill Hollands) en Tamanrasset

Radiación directa según Erbs

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m2)	116	126	136	157	176	218	153	156	169	106	108	110	143
MAE (%)	41	44	39	54	70	118	58	62	63	38	39	40	53
MBE (W/m2)	79	92	96	146	167	215	147	147	158	77	69	70	120
MBE (%)	28	32	27	50	66	117	56	59	59	28	25	26	44
RMSE (W/m2)	225	240	275	266	285	334	258	265	393	205	213	214	267
RMSE (%)	80	84	79	92	112	181	98	105	148	74	77	78	98

Tabla 15.46 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Erbs en Tamanrasset (ESRA)

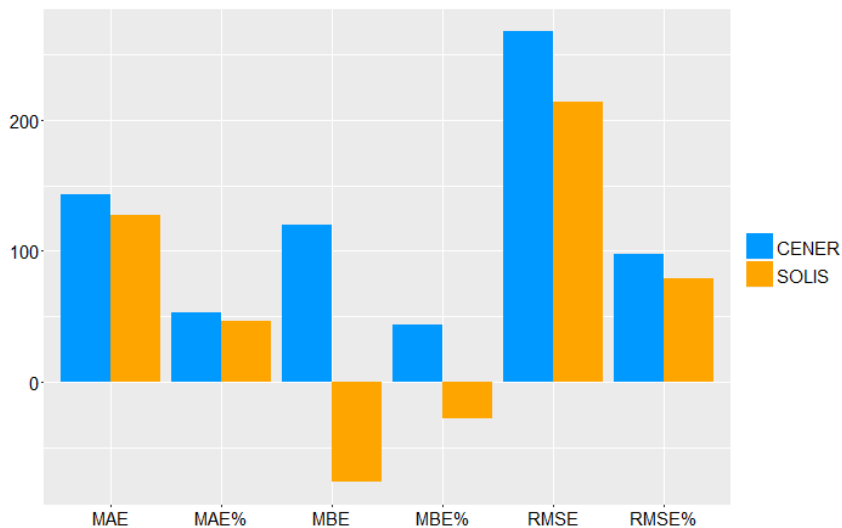


Figura 15.54 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación directa (Erbs) en Tamanrasset

Radiación directa según Louche

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m²)	136	137	139	168	175	215	165	179	174	125	129	136	156
MAE (%)	48	48	40	58	69	117	63	71	66	46	47	49	57
MBE (W/m²)	74	73	68	135	151	207	145	156	150	87	78	82	116
MBE (%)	26	26	20	46	60	112	55	62	56	31	28	30	43
RMSE (W/m²)	248	248	239	287	291	336	283	303	306	243	261	261	276
RMSE (%)	88	87	69	99	115	182	108	120	115	88	94	95	102

Tabla 15.47 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Louche en Tamanrasset (ESRA)

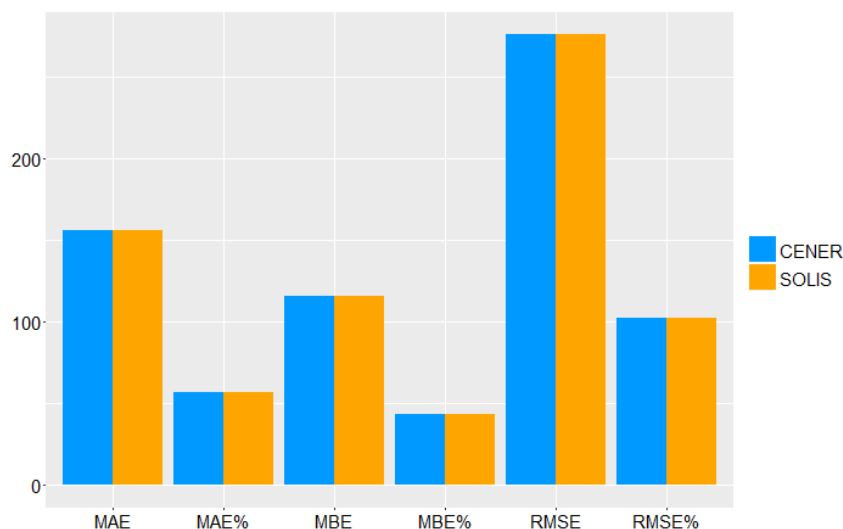


Figura 15.55 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación directa (Louche) en Tamanrasset

Toravere

A continuación aparecen los errores cometidos por el modelo ESRA, para la radiación global y directa, en la estación de Toravere. Así como la comparación con los errores cometidos con SOLIS.

Radiación Global

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m²)	18	34	71	95	120	123	115	96	81	50	26	15	68
MAE (%)	111	77	61	56	57	52	50	52	65	90	159	154	60
MBE (W/m²)	4	3	8	28	47	46	45	28	22	17	12	5	21
MBE (%)	23	7	7	16	22	19	19	15	18	30	73	48	19
RMSE (W/m²)	36	62	111	140	169	169	165	140	121	87	51	32	116
RMSE (%)	225	141	96	81	80	72	72	76	96	155	319	327	102

Tabla 15.48 - Errores en la estimación de la radiación global horaria en Toravere (ESRA)

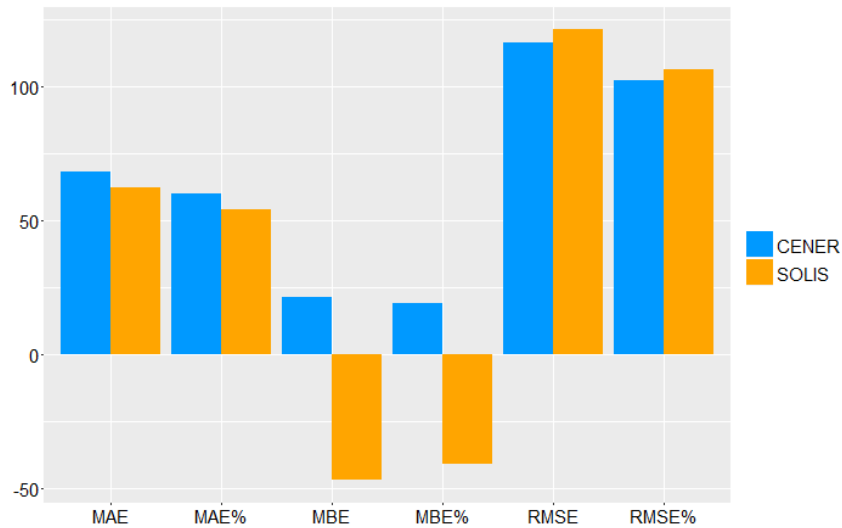


Figura 15.56 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación global en Toravere

Radiación directa según Reindl

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m2)	80	120	169	189	197	195	191	178	165	140	95	112	150
MAE (%)	398	224	122	106	111	110	100	124	137	196	532	636	142
MBE (W/m2)	57	64	56	96	111	108	103	114	91	82	78	91	87
MBE (%)	284	118	40	54	62	61	54	79	76	116	434	514	82
RMSE (W/m2)	190	301	282	472	298	279	277	302	279	317	226	320	299
RMSE (%)	952	561	204	266	169	157	146	209	233	444	1261	1811	284

Tabla 15.49 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Reindl en Toravere (ESRA)

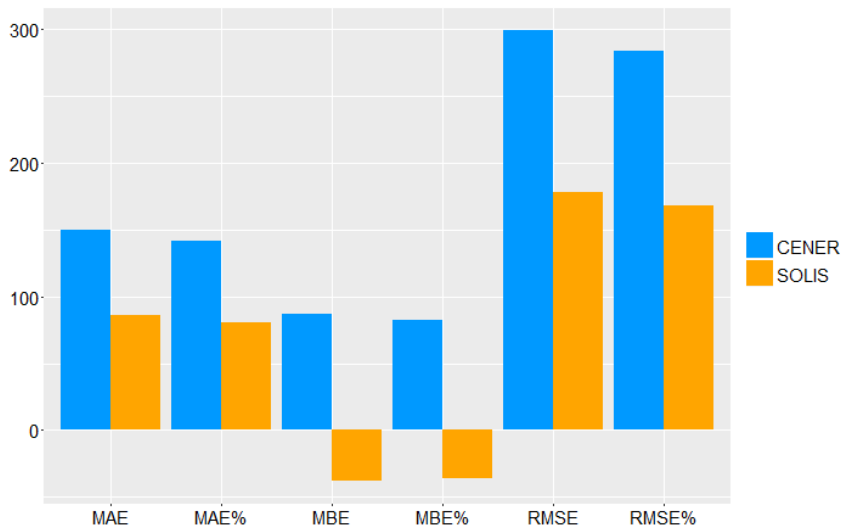


Figura 15.57 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación directa (Reindl) en Toravere

Radiación directa según Orgill Hollands

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m2)	96	148	189	207	211	200	199	194	180	161	115	170	170
MAE (%)	479	276	136	117	119	113	105	134	150	225	642	963	161
MBE (W/m2)	71	86	67	108	121	110	108	125	100	97	96	148	102
MBE (%)	356	161	49	61	69	62	57	86	83	136	534	835	97
RMSE (W/m2)	247	443	330	623	338	288	295	377	335	409	298	540	389
RMSE (%)	1236	825	238	352	191	163	155	261	279	574	1661	3057	369

Tabla 15.50- Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Orgill Hollands en Toravere (ESRA)

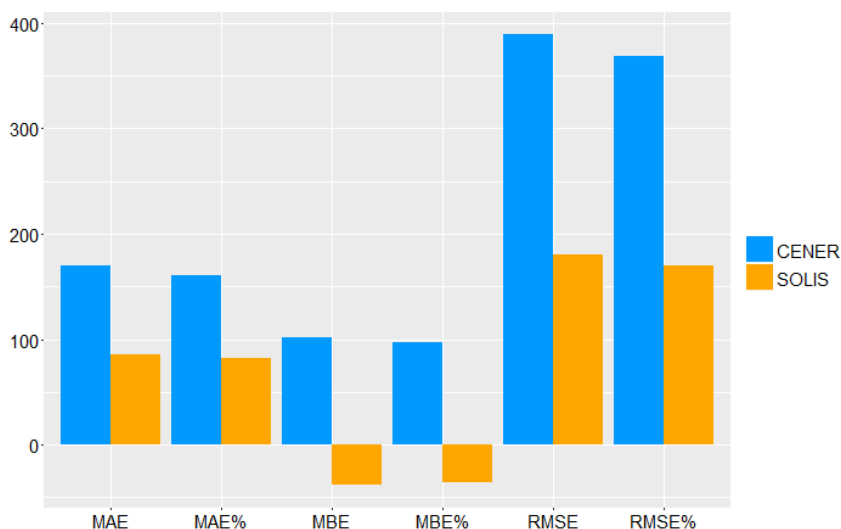


Figura 15.58 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación directa (Orgill Hollands) en Toravere

Radiación directa según Erbs

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m2)	98	150	191	209	215	206	204	199	183	163	117	173	173
MAE (%)	488	280	138	118	122	117	108	138	152	228	652	977	164
MBE (W/m2)	73	89	74	119	134	123	122	135	108	101	98	150	110
MBE (%)	365	166	53	67	76	70	64	94	90	142	546	849	104
RMSE (W/m2)	252	450	335	633	346	298	304	385	341	416	303	548	396
RMSE (%)	1259	838	241	357	196	168	160	267	284	583	1690	3103	376

Tabla 15.51 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Erbs en Toravere (ESRA)

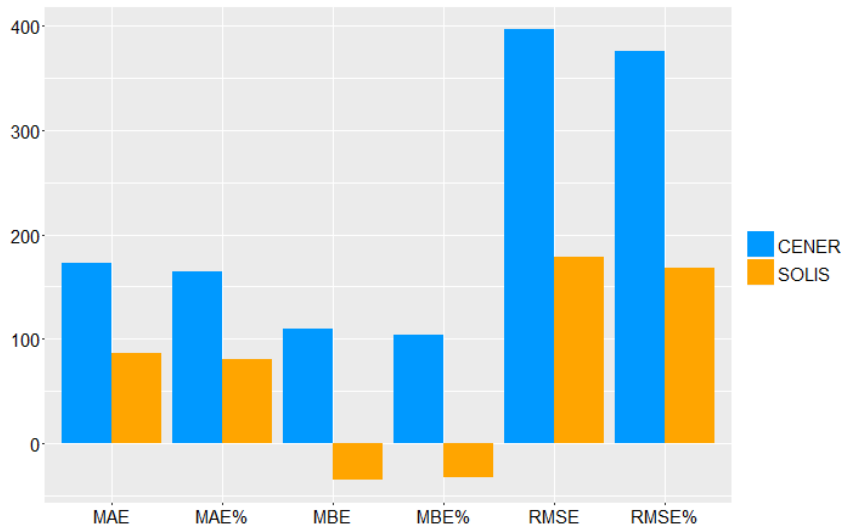


Figura 15.59 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación directa (Erbs) en Toravere

Radiación directa según Louche

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
MAE (W/m2)	100	132	209	219	241	237	235	215	209	177	125	100	180
MAE (%)	500	246	151	124	136	134	124	149	174	248	697	567	171
MBE (W/m2)	77	75	100	138	163	157	154	156	141	120	107	77	120
MBE (%)	385	140	72	78	92	89	81	108	118	169	598	436	114
RMSE (W/m2)	268	296	369	372	384	364	370	361	374	363	314	263	341
RMSE (%)	1340	551	266	209	217	205	195	250	311	509	1751	1489	324

Tabla 15.52 - Errores en la estimación de la radiación directa horaria según Louche en Toravere (ESRA)

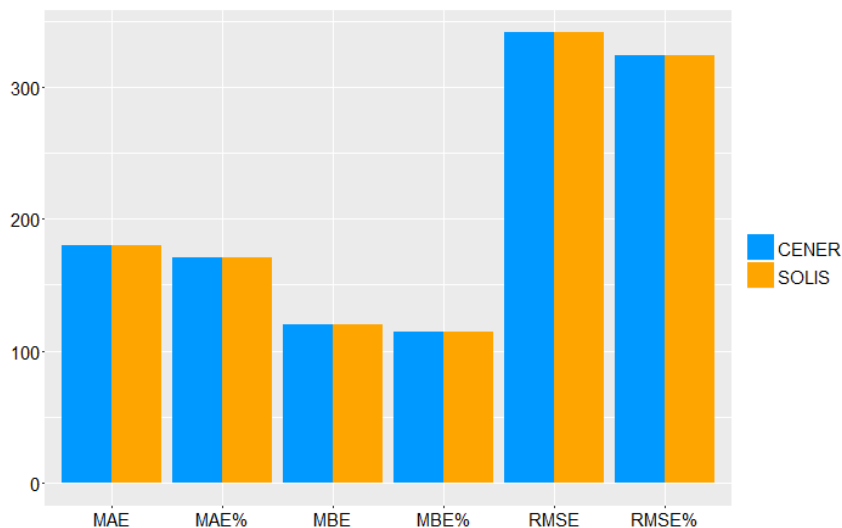


Figura 15.60 - Comparación errores cometidos según el modelo para la radiación directa (Louche) en Toravere

15.3.1. Conclusiones de la comparación con modelo de CENER

Una vez expuestas las gráficas comparativas de las diferentes estaciones, se pueden sacar una serie de conclusiones expuestas a continuación:

- El modelo ESRA realiza unas estimaciones de la radiación global más exactas que las del modelo SOLIS. Solo en el caso de Ilorin el modelo de SOLIS da unos errores de estimación menores que el modelo de ESRA.
- En todos los casos el modelo ESRA sobreestima la radiación global mientras que el modelo SOLIS tiende a subestimarla siempre.
- En cuanto a la estimación de la radiación directa, una combinación del modelo SOLIS + Erbs, SOLIS + Orgill Hollands o SOLIS + Reindl, aporta mejores resultados que los obtenidos mediante una combinación del modelo ESRA más cualquiera de los tres modelos expuestos. Las combinaciones de SOLIS más esos modelos subestiman la radiación directa mientras que con ESRA se tiende a sobreestimar.
- Los resultados obtenidos con Louche son independientes del modelo de cielo claro usado. Esto se debe a la manera en que Louche estima la radiación directa, expuesta en el apartado *Método implementado en CENER* (página 68). En todos los casos Louche sobreestima la radiación y da unos errores mayores que los otros métodos de estimación de radiación directa expuestos.

Por lo tanto, se puede concluir que si lo que se desea estimar es la radiación global lo mejor es optar por el modelo de cielo claro de ESRA, ya implementado en CENER, pero si lo que se quiere es estimar la radiación directa lo mejor es optar por el modelo de SOLIS y uno de los modelos de radiación directa que mejores resultados dan, Erbs, Orgill Hollands o Reindl. La situación anterior sugiere el análisis de la posibilidad de combinación de los diferentes métodos dado que parecen tener comportamientos complementarios.

15.4. Comparación de los resultados con modelo de CENER modificado

En vistas de los resultados obtenidos, los cuales muestran que a pesar de que el modelo de cielo claro ESRA es más preciso para estimar la irradiancia global a la hora de estimar la irradiancia directa empeora bastante. Se ha decidido realizar una comparación del modelo de cielo claro SOLIS con el modelo implementado en CENER realizando la modificación vista en *ANÁLISIS DE LOS PICOS DE RADIACIÓN - Solución adoptada* (página 78).

Esta comparación sirve para ver la influencia de esta anomalía en los resultados generales y comprobar si realmente interesa a CENER implementar un nuevo modelo entero con las consecuentes modificaciones del código o realizar las modificaciones necesarias, menos costosas, para eliminar esa anomalía.

A continuación se muestran los resultados obtenidos tras la nueva estimación de la irradiancia directa con los mismos datos que anteriormente pero empleando el modelo de

CENER modificado. A fin de evitar un masificación de gráficas y en vistas de los resultados anteriores, en los que se ve que los modelos de directa Erbs, Reindl y Orgill Hollands aportan resultados muy similares, se ha decidido mostrar una gráfica comparativa de Erbs y de Louche en combinación con los dos modelos de cielo Claro y otro par de gráficas en las que se comparan los resultados del modelo de CENER antes y después de la modificación.

Cabauw

A continuación aparecen las gráficas comparativas mencionadas para la estación de Cabauw.

SOLIS – CENER (modificado)

Radiación directa según Erbs

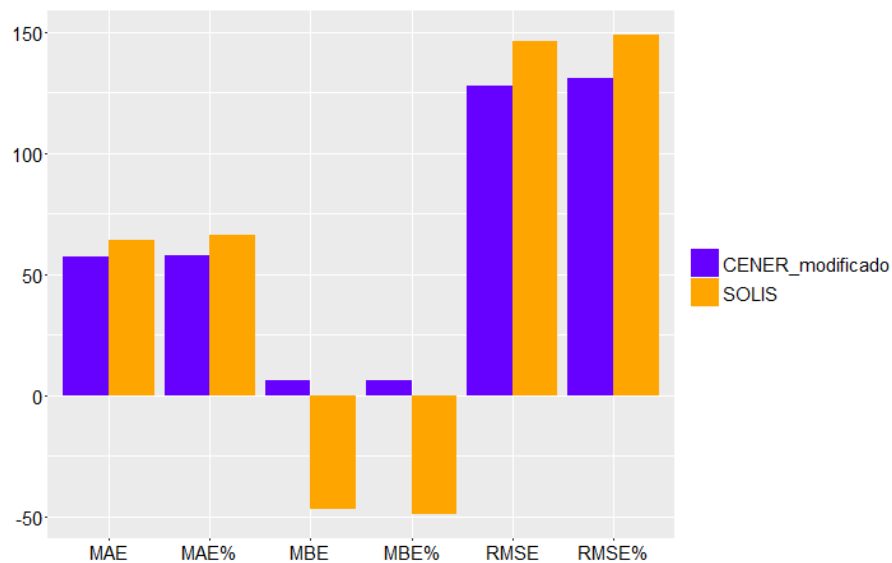


Figura 15.61 - Comparación errores con modelo CENER corregido (Erbs) en Cabauw

Radiación directa según Louche

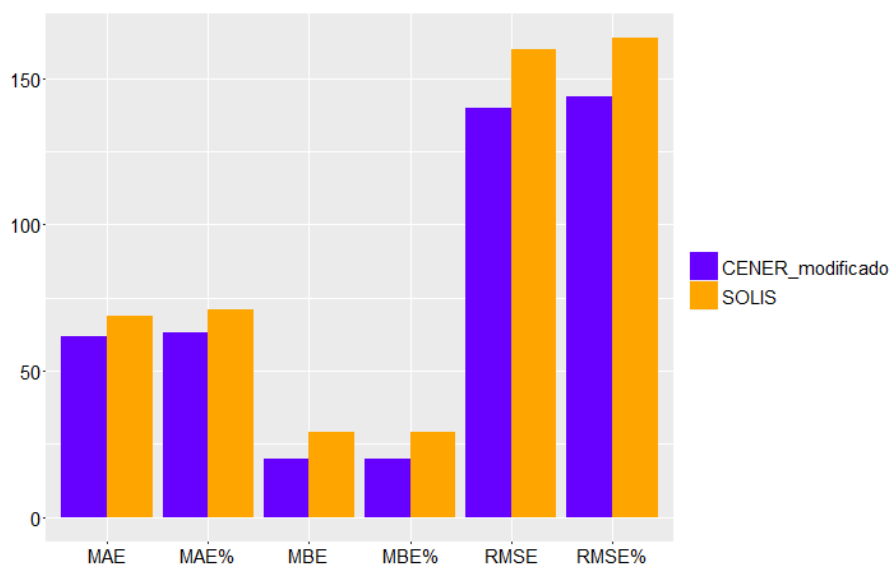


Figura 15.62 - Comparación errores con modelo CENER corregido (Louche) en Cabauw

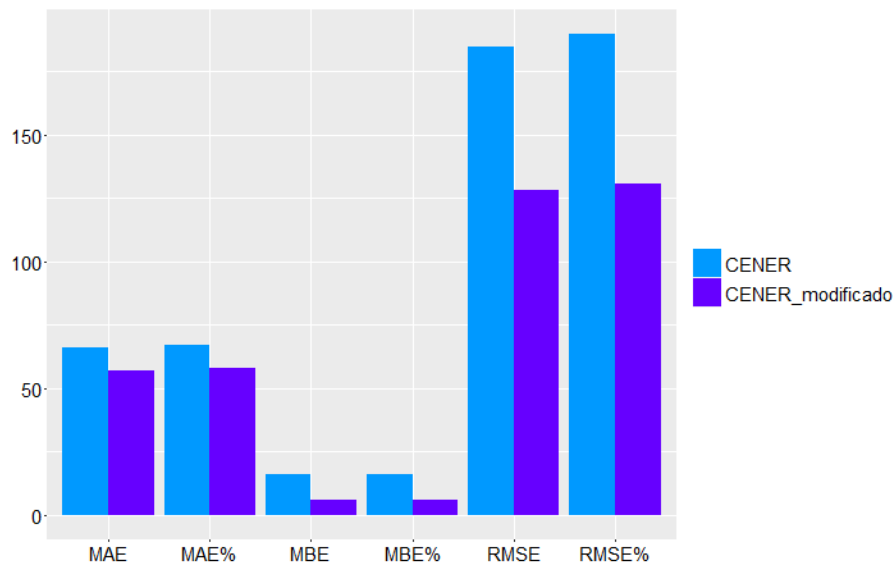
CENER (original) – CENER (modificado)*Radiación directa según Erbs*

Figura 15.63 - Comparación errores entre modelo CENER original y modificado (Erbs) en Cabauw

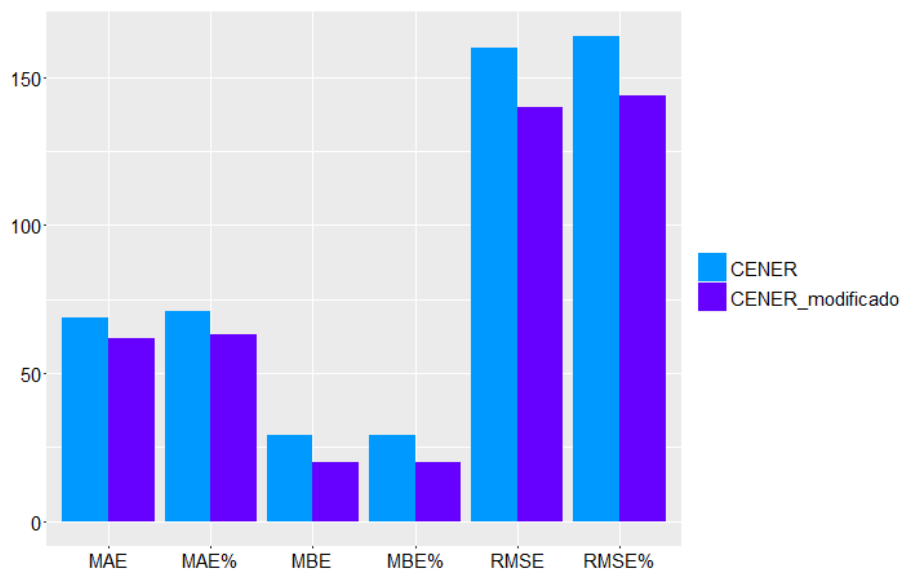
Radiación directa según Louche

Figura 15.64 - Comparación errores entre modelo CENER original y modificado (Louche) en Cabauw

La modificación introducida produce una mejora en Erbs del 9% para el MAE, del 10% para el MBE y del 59% para el RMSE, viéndose en la interpretación de este último como efectivamente se han reducido de manera importante estas anomalías.

En el caso de Louche las mejoras que se consiguen son inferiores ya que este modelo no introducía picos anómalos de radiación.

Ilorin

A continuación aparecen las gráficas comparativas mencionadas para la estación de Ilorin.

SOLIS – CENER (modificado)

Radiación directa según Erbs

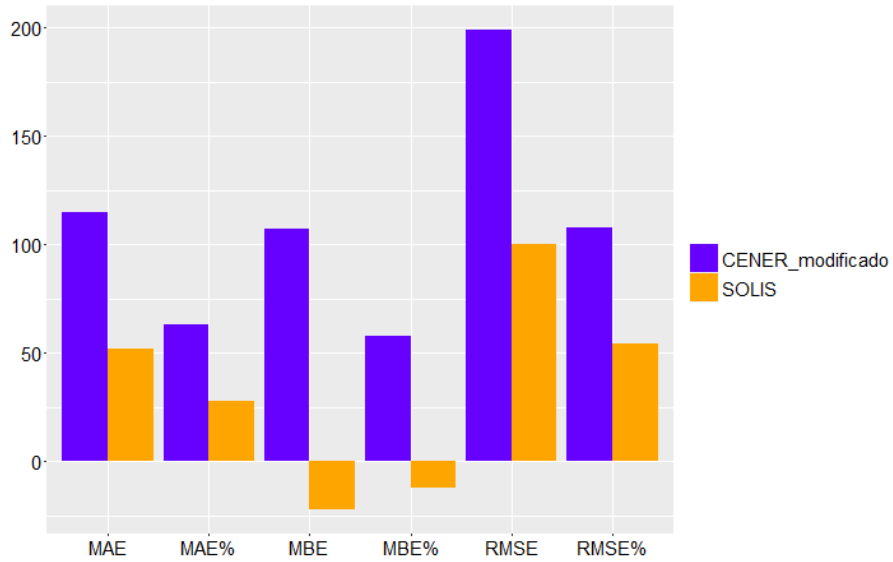


Figura 15.65 - Comparación errores con modelo CENER corregido (Erbs) en Ilorin

Radiación directa según Louche

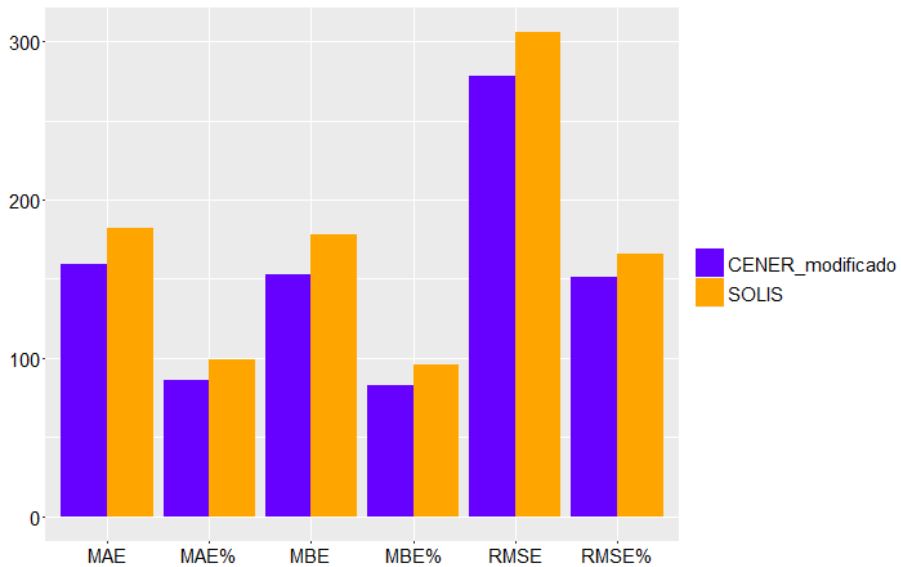


Figura 15.66 - Comparación errores con modelo CENER corregido (Louche) en Ilorin

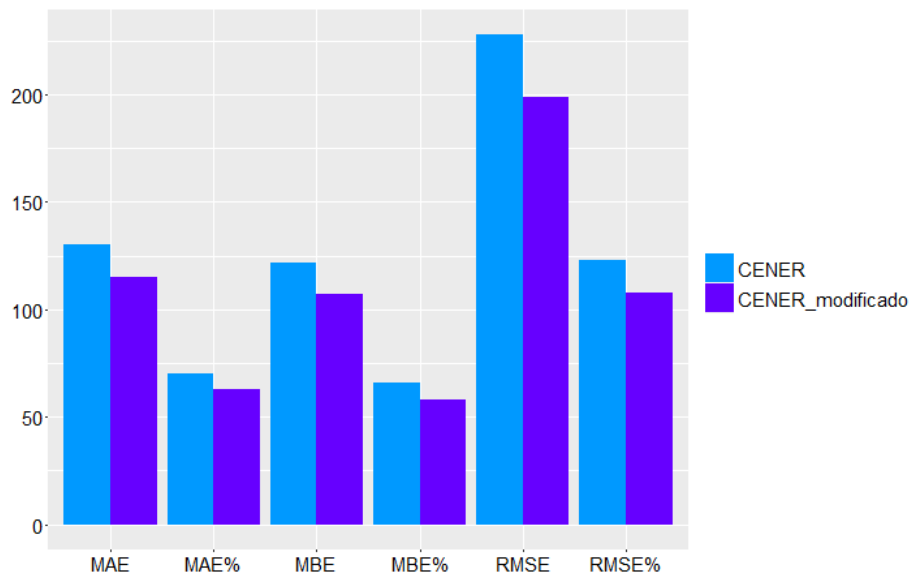
CENER (original) – CENER (modificado)*Radiación directa según Erbs*

Figura 15.67 - Comparación errores entre modelo CENER original y modificado (Erbs) en Ilorin

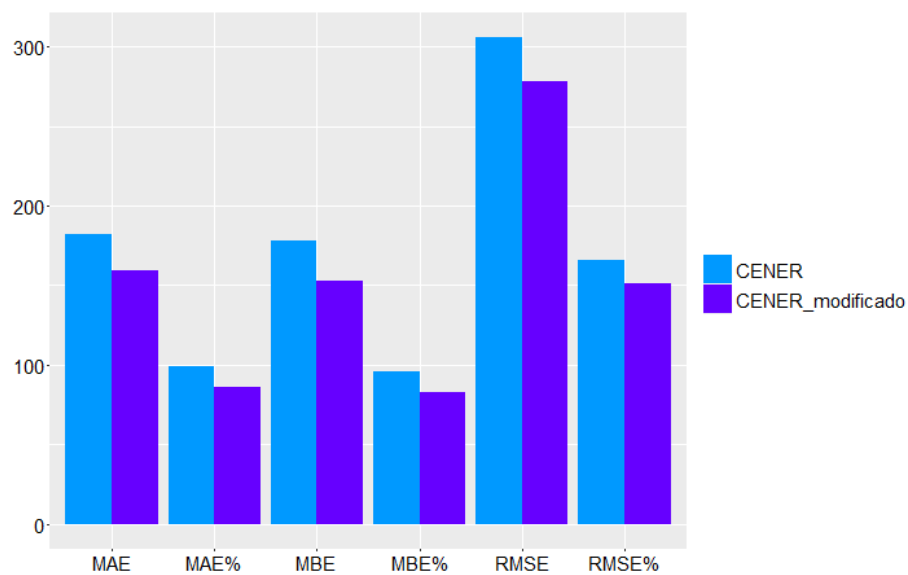
Radiación directa según Louche

Figura 15.68 - Comparación errores entre modelo CENER original y modificado (Louche) en Ilorin

La modificación introducida produce una mejora en Erbs del 7% para el MAE, del 8% para el MBE y del 15% para el RMSE, viéndose en la interpretación de este último que en el caso de la estación de Ilorin la presencia de los picos anómalos de radiación era insignificante.

En el caso de Louche las mejoras que se consiguen son inferiores ya que este modelo no introducía picos anómalos de radiación.

Payerne

A continuación aparecen las gráficas comparativas mencionadas para la estación de Payerne.

SOLIS – CENER (modificado)

Radiación directa según Erbs

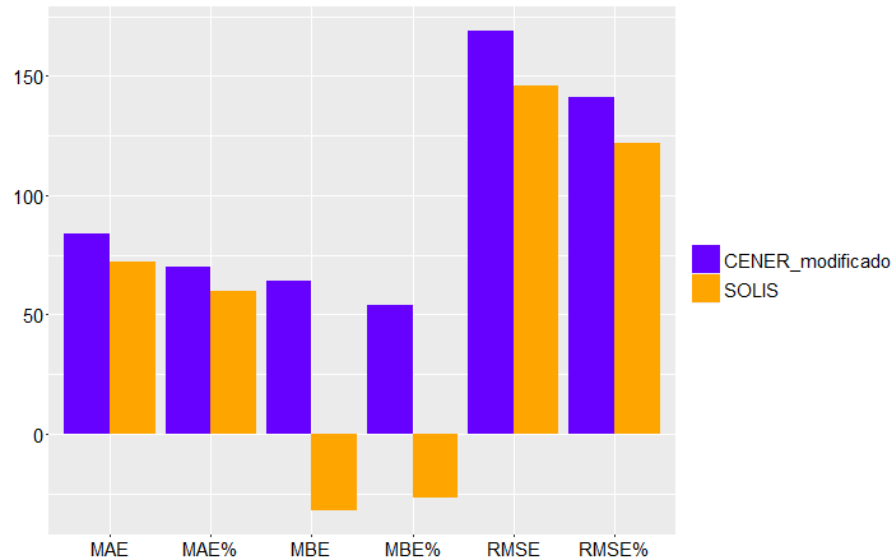


Figura 15.69 - Comparación errores con modelo CENER corregido (Erbs) en Payerne

Radiación directa según Louche

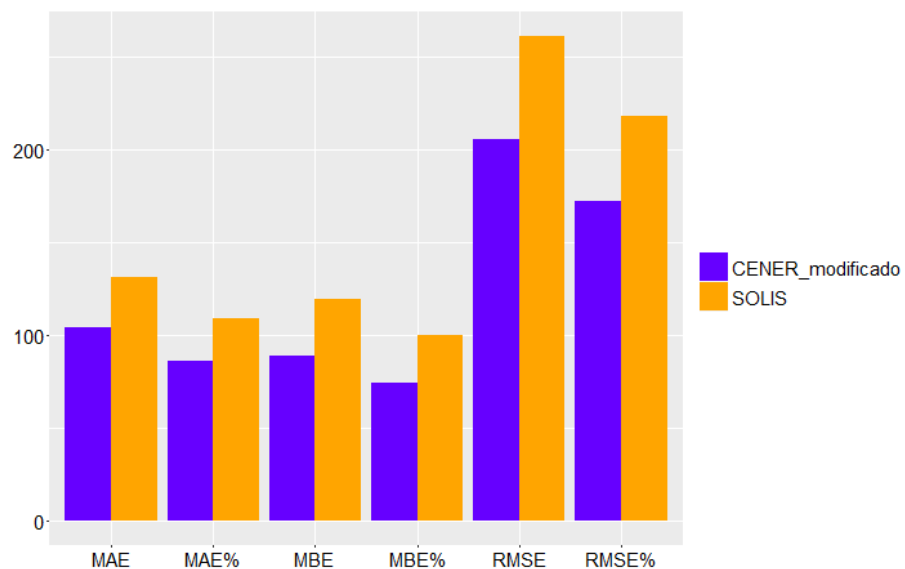


Figura 15.70 - Comparación errores con modelo CENER corregido (Louche) en Payerne

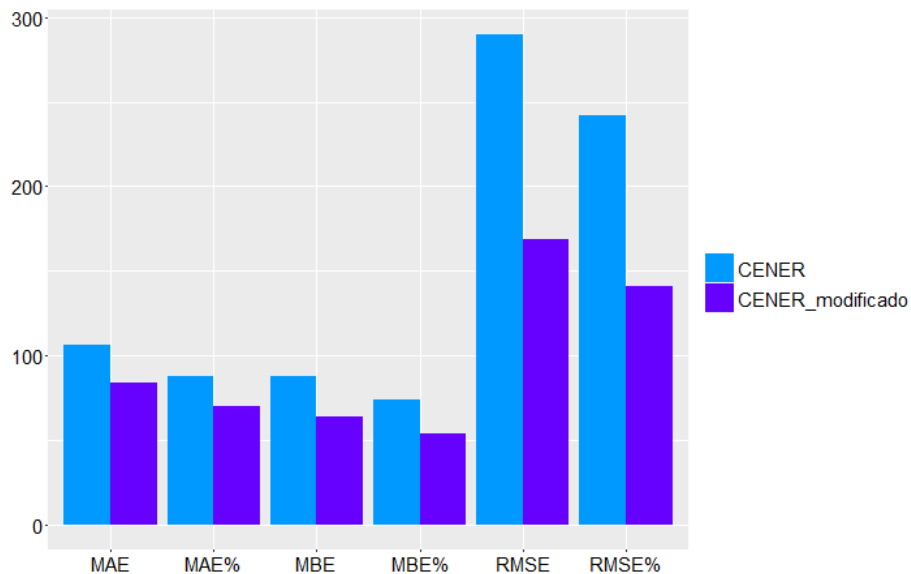
CENER (original) – CENER (modificado)*Radiación directa según Erbs*

Figura 15.71 - Comparación errores entre modelo CENER original y modificado (Erbs) en Payerne

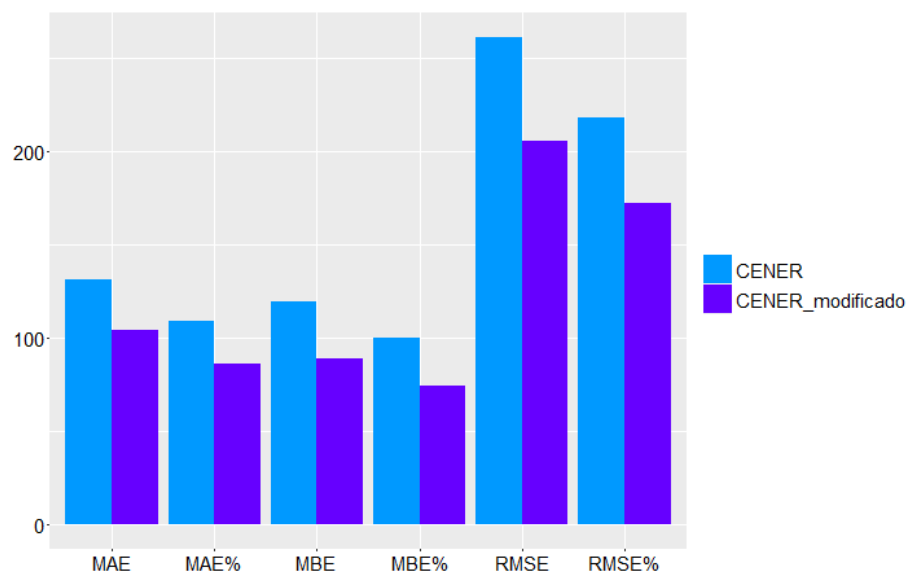
Radiación directa según Louche

Figura 15.72 - Comparación errores entre modelo CENER original y modificado (Louche) en Payerne

La modificación introducida produce una mejora en Erbs del 18% para el MAE, del 20% para el MBE y del 101% para el RMSE, viéndose en la interpretación de este último como efectivamente se han reducido de manera importante estas anomalías.

En el caso de Louche las mejoras que se consiguen son inferiores ya que este modelo no introducía picos anómalos de radiación.

Tamanrasset

A continuación aparecen las gráficas comparativas mencionadas para la estación de Tamanrasset.

SOLIS – CENER (modificado)

Radiación directa según Erbs

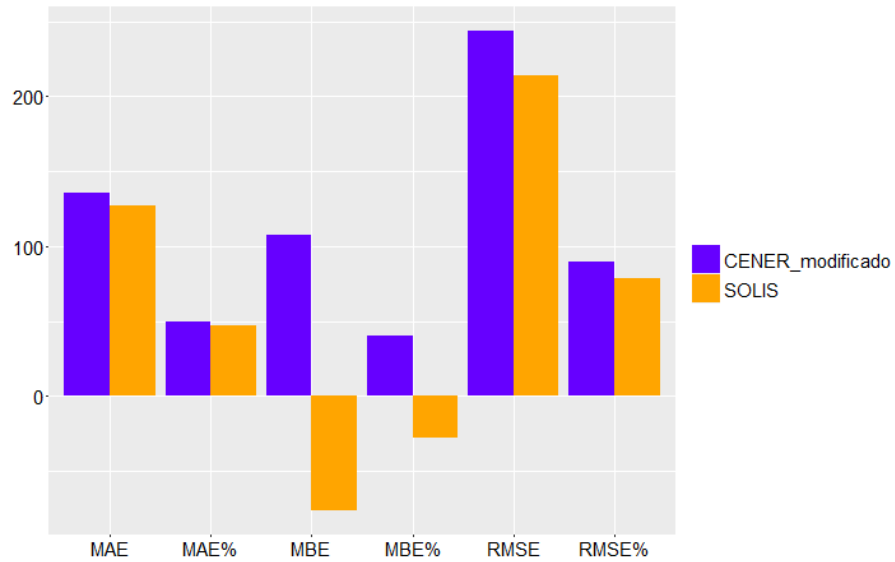


Figura 15.73 - Comparación errores con modelo CENER corregido (Erbs) en Tamanrasset

Radiación directa según Louche

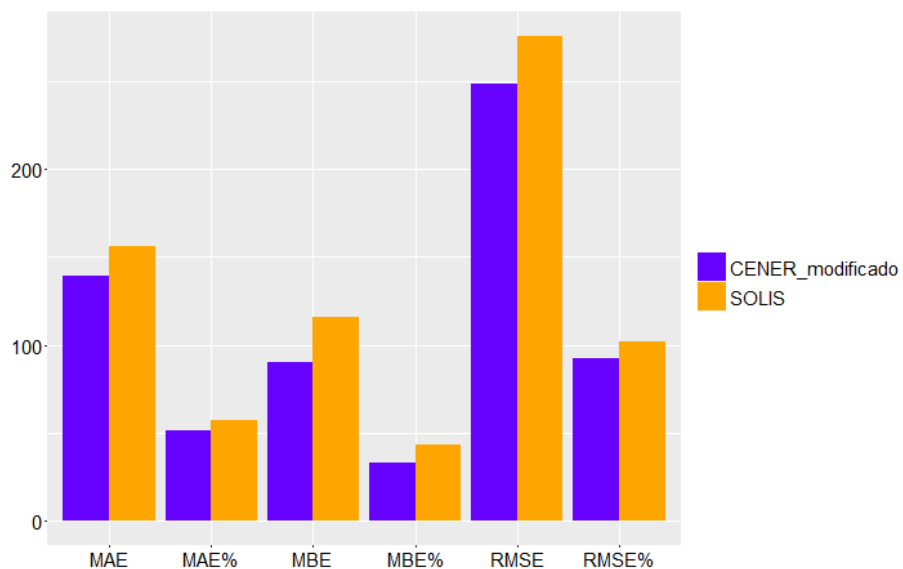


Figura 15.74 - Comparación errores con modelo CENER corregido (Louche) en Tamanrasset

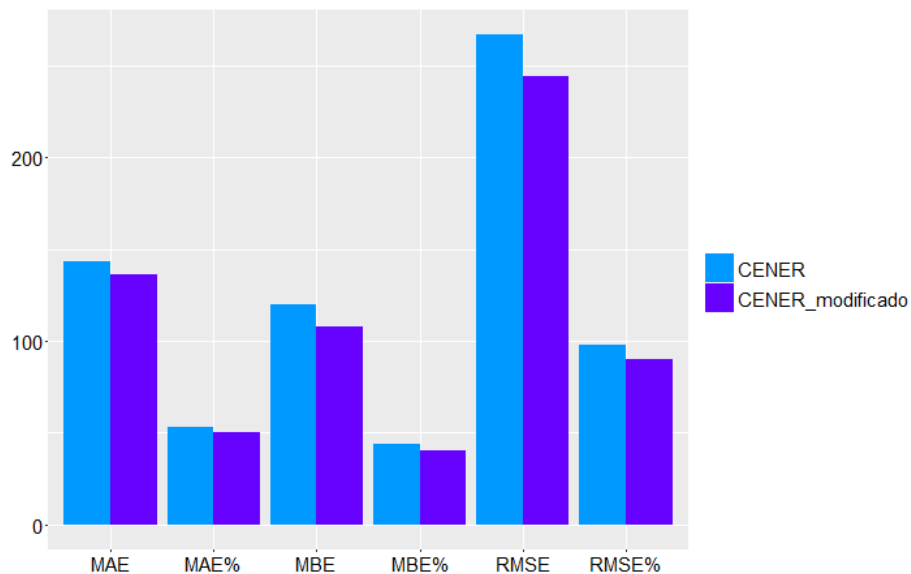
CENER (original) – CENER (modificado)*Radiación directa según Erbs*

Figura 15.75 - Comparación errores entre modelo CENER original y modificado (Erbs) en Tamanrasset

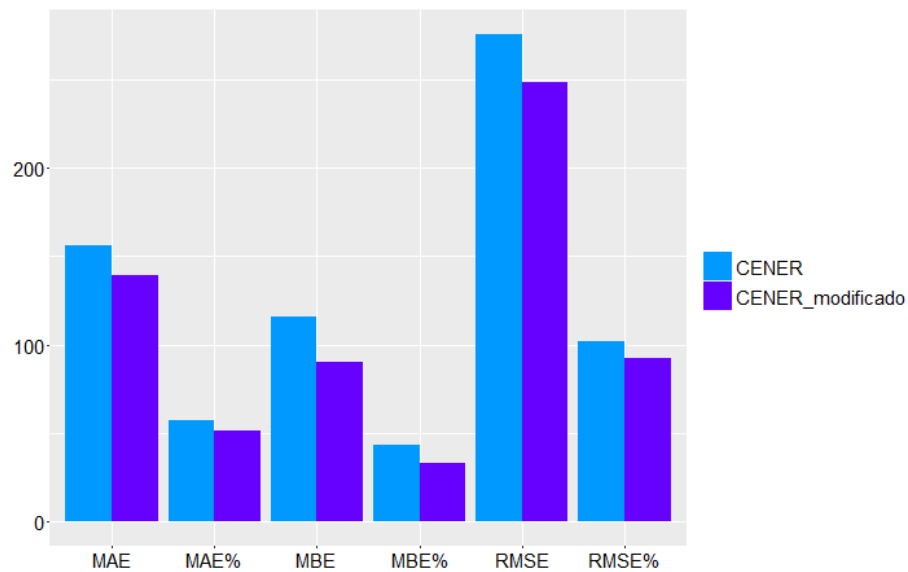
Radiación directa según Louche

Figura 15.76 - Comparación errores entre modelo CENER original y modificado (Louche) en Tamanrasset

La modificación introducida produce una mejora en Erbs del 3% para el MAE, del 4% para el MBE y del 8% para el RMSE, viéndose en la interpretación de este último que en el caso de la estación de Tamanrasset la presencia de los picos anómalos de radiación era insignificante.

En el caso de Louche las mejoras que se consiguen son inferiores ya que este modelo no introducía picos anómalos de radiación.

Toravere

A continuación aparecen las gráficas comparativas mencionadas para la estación de Toravere.

SOLIS – CENER (modificado)

Radiación directa según Erbs

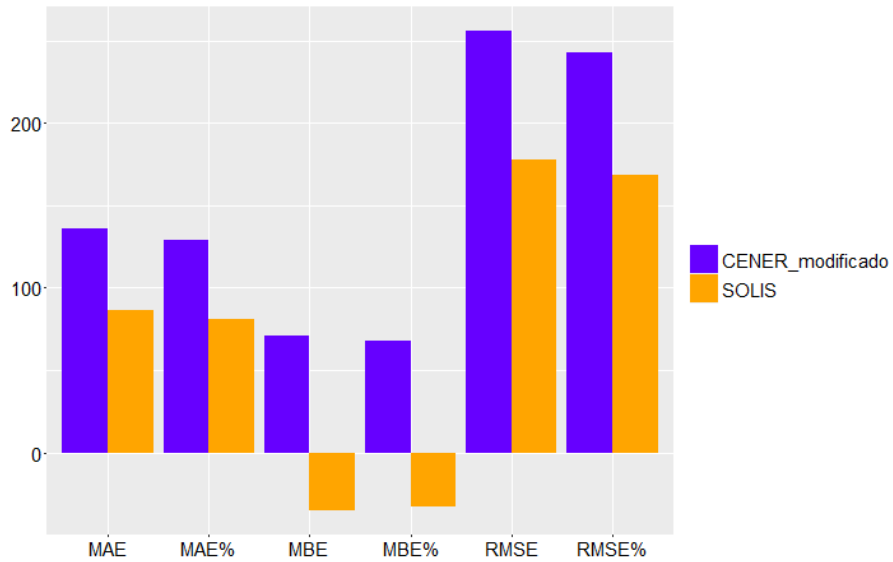


Figura 15.77 - Comparación errores con modelo CENER corregido (Erbs) en Toravere

Radiación directa según Louche

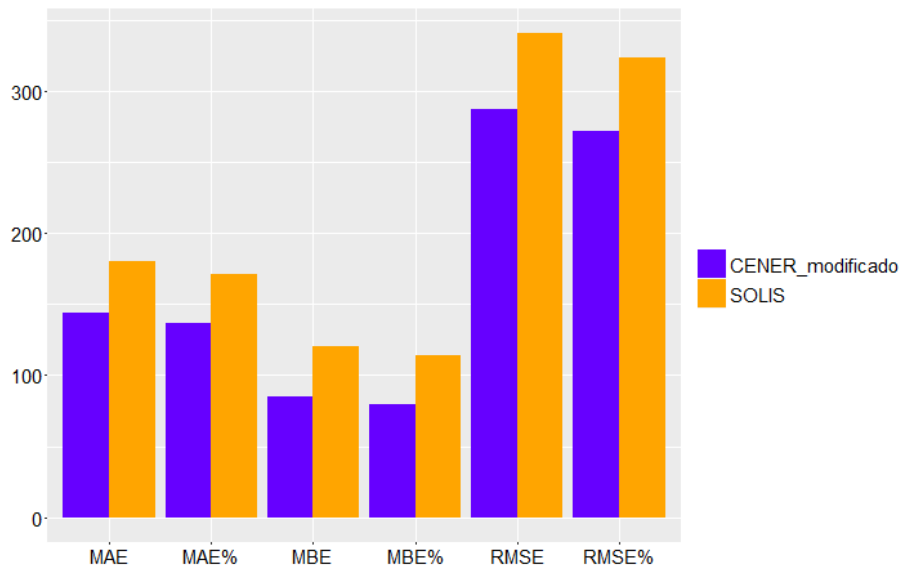


Figura 15.78 - Comparación errores con modelo CENER corregido (Louche) en Toravere

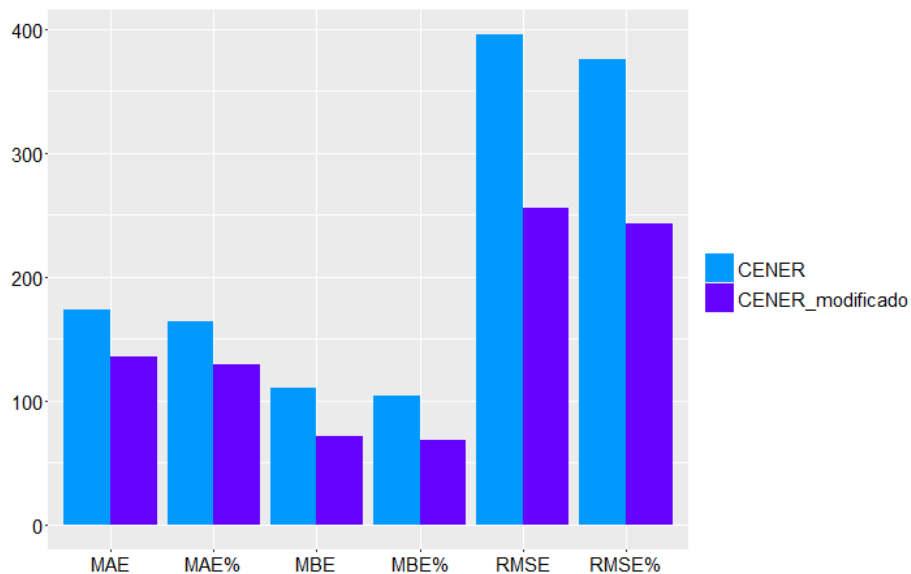
CENER (original) – CENER (modificado)*Radiación directa según Erbs*

Figura 15.79 - Comparación errores entre modelo CENER original y modificado (Erbs) en Toravere

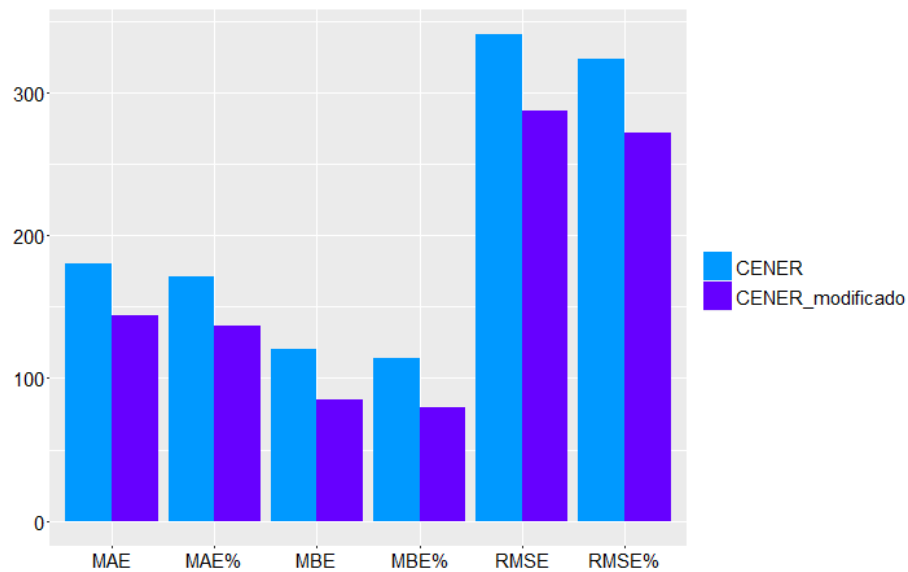
Radiación directa según Louche

Figura 15.80 - Comparación errores entre modelo CENER original y modificado (Louche) en Toravere

La modificación introducida produce una mejora en Erbs del 18% para el MAE, del 20% para el MBE y del 101% para el RMSE, viéndose en la interpretación de este último como efectivamente se han reducido de manera importante estas anomalías.

En el caso de Louche las mejoras que se consiguen son inferiores ya que este modelo no introducía picos anómalos de radiación.

15.4.1. Conclusiones de la comparación con el modelo de CENER modificado

La modificación introducida para la eliminación de los picos anómalos produce efectivamente una reducción del error cometido por la combinación del modelo de cielo claro de CENER (ESRA) con uno de los modelos de directa. Sin embargo esta modificación no es suficiente para alcanzar los mejores resultados que se obtienen con la combinación del modelo de SOLIS con uno de los modelos de directa. Solo en el caso de Cabauw, donde antes de la modificación ya se obtenían resultados ligeramente mejores con el modelo de CENER, se consigue una mayor diferenciación tras esta modificación, dejando el modelo de CENER como más preciso que el nuevo modelo implementado

Observando las gráficas comparativas y en concreto el error RMSE en %, se puede ver como en aquellos lugares con mayor estabilidad atmosférica, Ilorin y Tamanrasset, la presencia de picos anómalos era menor mientras que en las estaciones más al norte, como Toravere, se consigue una gran reducción de este error por la abundancia de estos picos que han sido eliminados. Esta relación entre las condiciones atmosféricas y la presencia de anomalías se debe a que una preestimación errónea de la irradiancia global conduce a un mayor error en la estimación de la irradiancia directa, siendo más probable la presencia de estas anomalías.

15.5. Comparación de los modelos de directa

Como se ha deducido en el apartado anterior, a la hora de estimar la radiación directa lo mejor es optar por una combinación del modelo de cielo claro SOLIS más uno de los modelos de directa. De este modo, resulta interesante comparar los resultados obtenidos en cada estación con cada uno de los modelos de estimación de la radiación directa para determinar cuál de ellos funciona mejor.

Así se han realizado una serie de gráficas de barras comparativas, una para cada estación, en las cuales aparecen contrapuestos los errores cometidos con cada uno de los modelos de directa. Dichas gráficas aparecen ordenadas a continuación.

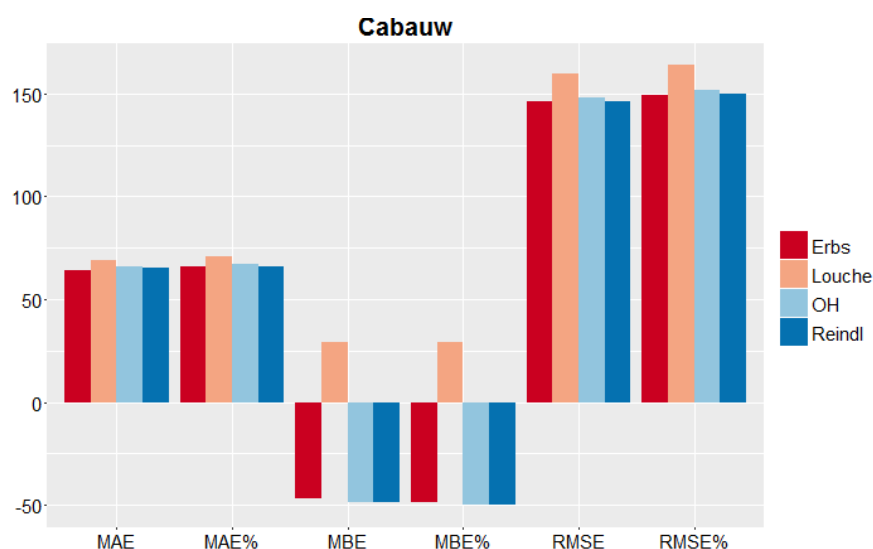


Figura 15.81 – Comparación errores estimación radiación directa por los diferentes modelos (Cabauw)

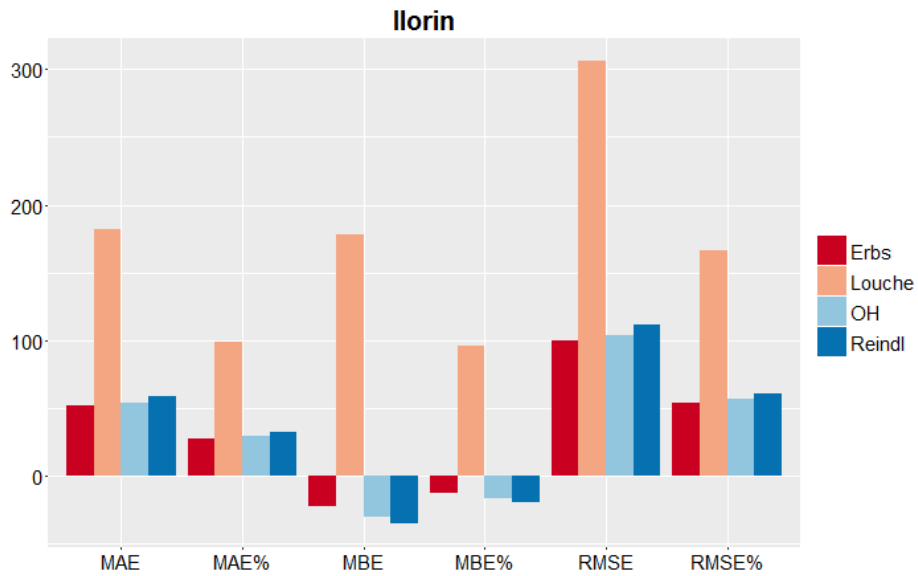


Figura 15.82 - Comparación errores estimación radiación directa por los diferentes modelos (Ilorin)

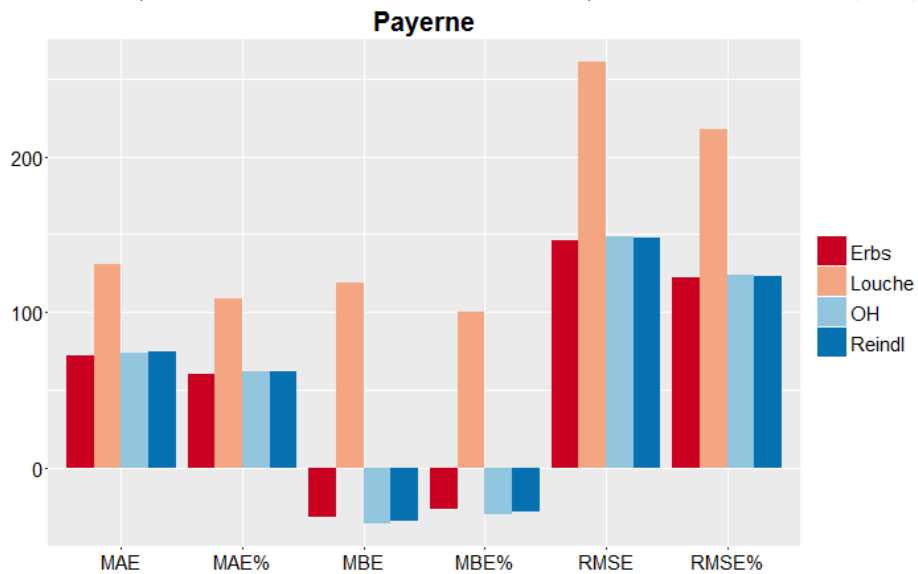


Figura 15.83 - Comparación errores estimación radiación directa por los diferentes modelos (Payerne)

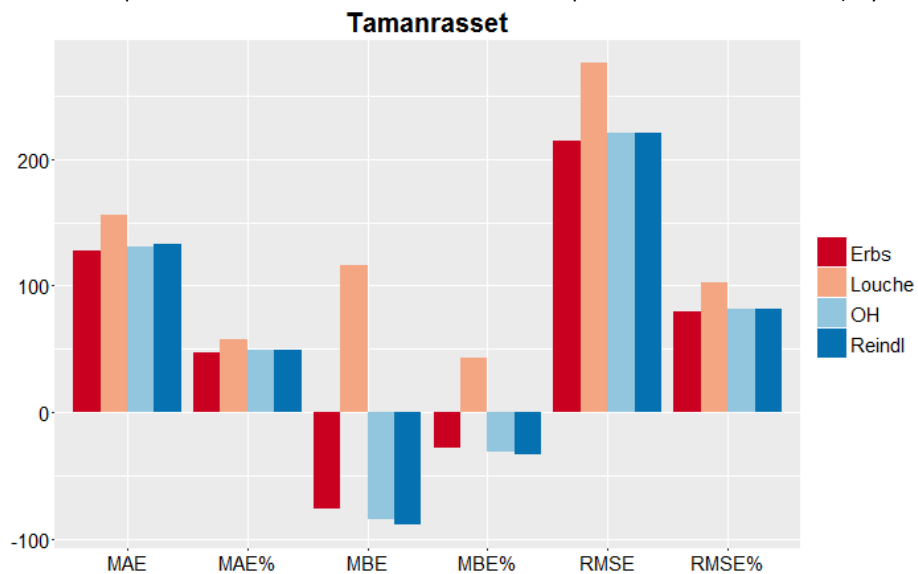


Figura 15.84 - Comparación errores estimación radiación directa por los diferentes modelos (Tamanrasset)

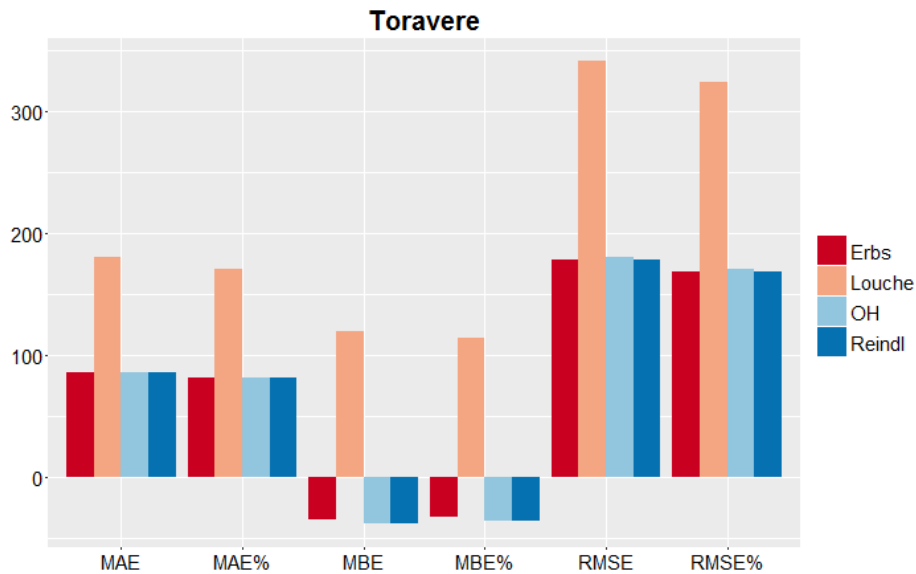


Figura 15.85 - Comparación errores estimación radiación directa por los diferentes modelos (Toravere)

Como ya había quedado claro en apartados anteriores el modelo de Louche es el que peores resultados arroja mientras que entre los tres mejores hay muy poca diferencia entre ellos, alrededor de un 2% entre el mejor y el peor. Sin embargo, aunque esta diferencia no sea muy significativa, se puede afirmar que el modelo para la estimación de radiación directa que da unos errores menores es el de Erbs.

Se puede concluir diciendo que, de acuerdo a los modelos analizados en este trabajo, la mejor manera de estimar la radiación directa, de un solo punto o de un mapa completo, es mediante la combinación del modelo de cielo claro SOLIS con el modelo de estimación de radiación directa Erbs.

16. CREACIÓN SOFTWARE PARA GENERAR MAPAS DE RADIACIÓN

El método implementado en CENER está preparado para el cálculo de la radiación sobre un solo punto para un determinado margen temporal. Esto puede resultar útil para la validación de métodos y para la observación de puntos muy concretos del globo terrestre pero no resulta útil cuando lo que se desea es estimar la radiación que llega a una comunidad, un país, un continente, es decir, a una zona amplia donde los puntos a analizar son múltiples.

De este modo se ha decidido adaptar el código del programa para que en vez de trabajar para un solo punto concreto realice los cálculos pertinentes para todos los puntos de un mapa dado, pudiendo generar así mapas de radiación estimada de la zona deseada. El funcionamiento es similar al de un solo punto, es decir, en cada iteración se señala un punto del mapa y se extrae toda la serie de niveles digitales pertenecientes al mismo para todo el periodo de estudio a partir de los cuales se estima la irradiancia para cada instante. Esto significa que el programa no funciona yendo instante a instante calculando cada viaje la irradiancia de todos los puntos, si no que va de punto a punto calculando cada viaje la irradiancia de todos los instantes de ese punto.

Para que este software pueda sufrir posibles futuras mejoras o modificaciones específicas por parte del usuario, se ha diseñado con una estructura modular. Con estructura modular se quiere decir que determinadas funciones del mismo pueden ser modificadas o sustituidas por otras, por ejemplo, actualmente dispone de la opción de elegir entre dos modelos de cielo claro pero se podría incluir tantos otros como se desearan y tener la posibilidad de elegir entre ellos. Como se ve en el esquema de la Figura 16.22 también se puede conseguir que dependiendo del módulo que se escoja (en este caso por módulo se entiende el ejemplo del modelo de cielo claro elegido) se realizarán unas determinadas funciones u otras.

Para que cualquier usuario pueda ejecutar de manera simple y sencilla el programa desarrollado, éste se ha dividido en una serie de secciones en cada una de las cuales se realiza una tarea concreta y delimitada. Las diferentes secciones creadas se explican y exponen de forma ordenada, tal como aparecen en el programa, en los siguientes apartados.

Directorio de trabajo

En esta parte se introduce la dirección en la cual se tienen almacenados tanto los datos de entrada como las funciones de las cuales se va a hacer uso. Conviene que ambos elementos estén almacenados dentro de la misma carpeta ya que en caso contrario se deberá andar cambiando el directorio cuando se vayan a cargar las funciones o los datos de entrada.

```
1  
2 #Directorio de trabajo:  
3  
4 setwd("C:\\Users\\djimenez/Desktop|generacion_mapas_rad")  
5
```

Figura 16.1 – Sección *Directorio de trabajo*

Librerías

Se realiza la activación de las diferentes librerías, previamente descargadas y correctamente instaladas en R, que son necesarias para poder realizar determinadas tareas.

```

6 ▾ #-----
7   # Librerías
8 ▾ #-----
9
10  library('ncdf4')
11  library('chron')
12  library("ncdf4.helpers")
13  library("reshape2")
14  library("ggplot2")
15  library("ggmap")
16  library("shapefiles")
17  library("raster")
18

```

Figura 16.2 – Sección *Librerías*

Funciones

Aquí se cargan todas aquellas funciones que se han creado y se ejecutarán en determinadas zonas del programa.

```

19 ▾ #-----
20  # Funciones
21 ▾ #-----
22
23  source("albedos_ref_ini.r")
24  source("georreferencia.r")
25  source("matriz_long.r")
26  source("matriz_lat.r")
27  source("datos_twc.r")
28  source("datos_aod.r")
29  source("componentes_cs.r")
30  source("albedoref_cnub.r")
31  source("kt_G_est.r")
32  source("B_irradiance.r")
33  source("aod700_sols.r")

```

Figura 16.3 – Sección *Funciones*

Archivos NetCDF

En este caso se dispone de tres archivos de este tipo que contienen los mapas de nivel digital, de aerosoles y de vapor de agua respectivamente. Para poder acceder a los datos que contienen antes es necesario volcarlos en diferentes variables, una para cada archivo. Este volcado general de los datos se realiza en este apartado.

```

70 ▾ #-----
71  # Archivos netcdf
72 ▾ #-----
73
74  id_ncfile <-nc_open("TimeSeries_Meteosat2_Iberia_2011.nc")
75  twc_file <-nc_open("01012011_31122011_Iberica_TwC.nc")
76  aod_file <-nc_open("01012011_31122011_Iberica_AOD.nc")
77

```

Figura 16.4 – Sección *Archivos NetCDF*

Datos generales constantes

La idea de esta sección es por un lado seleccionar el modelo que se va a emplear para la realización de los mapas de radiación, esto es, guardar en una variable el nombre del modelo deseado, ESRA o SOLIS, y por otro dejar definidas aquellas variables cuyo valor se va a mantener constante durante la ejecución del programa. Entre estas variables constantes se encuentran: el radio orbital del satélite, la longitud geográfica del satélite, el radio ecuatorial terrestre, el offset del nivel digital del satélite, la función de calibración del satélite, la constante solar, etc.

```

78 #-----
79 # Datos generales constantes
80 #-----
81
82 # Elegir el modelo de cielo claro: "ESRA" o "SOLIS"
83 modelo <- "SOLIS"
84
85 rsat <- 36000 #radio orbital satélite km
86 lon0 <- 57.3*pi/180 #longitud geográfica nominal del satélite en radianes
87 radT <- 6378 #radio ecuatorial terrestre km
88
89 nd0 <- 5 #offset satélite nivel digital
90 cct <- 0.533#función calibración sensor
91
92 s0 = 1367.0 #constante solar w/m2
93 lambda_ref=0
94 summer_corr=0
95
96 sigmaa <- 0.09 #variación de albedo máxima admisible entre dos imágenes
97 ross <- 0.80 #albedo sand snow Tesis Luis Zarzalejo pag 81

```

Figura 16.5 – Sección *Datos generales constantes*

Datos nivel digital

Aquí se extraen las longitudes y latitudes de los puntos del mapa de niveles digitales. Con estos datos se construyen dos matrices: una que contiene las longitudes de cada uno de los puntos del mapa y otra que contiene las latitudes de los mismos. Al extraer los mapas, matrices, de niveles digitales estos no aparecen georreferenciados por lo que es necesario crear una máscara o matriz de longitudes y otra de latitudes, de las mismas dimensiones que la matriz de niveles digitales, para poder tener georreferenciados todos y cada uno de los puntos.

Además también se extraen las fechas o instantes a que corresponden cada una de las matrices de datos extraídas. Los instantes de toma de datos son cada media hora y sirven para localizar en el tiempo cada uno de los datos obtenidos y para realizar una criba de acuerdo a la hora a la que fueron tomadas. En esta criba primero se obtienen las horas de los diferentes instantes y posteriormente se buscan y guardan solamente aquellas matrices de datos que fueron tomadas en horas comprendidas entre las 4:30 y las 19:30, horas consideradas como diurnas.

Datos de columna de vapor de agua

Antes de poder tratar los datos hay que descárgalos y para ello hay que seguir el siguiente procedimiento:

- 1- Acceder a la página de *MACC Reanalays* [34], en la cual hay que estar registrado para poder descargar los datos requeridos:

Figura 16.6 – Página MACC Reanalays

- 2- Una vez dentro de la página hay que seleccionar: el intervalo de tiempo, las horas de toma de dato, el paso y el parámetro que se desea conocer. En este caso se ha seleccionado unas fechas del 01/01/2005 al 31/12/2006, todas las horas, un paso de cero y el parámetro a descargar es el total de columna de vapor de agua.

Figura 16.7 – Selección del intervalo de tiempo (MACC Reanalays)

Figura 16.8 – Selección de las horas y del paso (MACC Reanalays)

<input checked="" type="checkbox"/> Total column water vapour	<input type="checkbox"/> Type of high vegetation
<input type="checkbox"/> Type of low vegetation	<input type="checkbox"/> UV visible albedo for diffuse radiation
<input type="checkbox"/> UV visible albedo for direct radiation	<input type="checkbox"/> Volumetric soil water layer 1
<input type="checkbox"/> Volumetric soil water layer 2	<input type="checkbox"/> Volumetric soil water layer 3
<input type="checkbox"/> Volumetric soil water layer 4	

[Select All or Clear](#)

View the MARS request Retrieve GRIB Retrieve NetCDF

Figura 16.9 – Selección del parámetro a obtener (MACC Reanalysis)

- 3- Elegidas las configuraciones anteriores se pulsa uno de los botones que aparecen al final, es decir, *Retrieve GRIB* o *Retrieve NetCDF*. Aquí se selecciona el tipo de archivo NetCDF ya que este formato es el mismo que el de los mapas de albedo y es fácil de manejar.

Cuando se pulsa sobre *Retrieve NetCDF* se pasa a otra pantalla en la cual aparece un resumen de lo que se está pidiendo y donde hay que indicar el área de la cual se quieren obtener los datos además del paso en grados entre los puntos del área.

[< Return to selection](#)

Additional filtering

Current request

Stream:	Atmospheric model
Parameter:	Total column water vapour
Dataset:	macc_reanalysis
Step:	0
Version:	rean
Type of level:	Surface
Time:	00:00:00, 06:00:00, 12:00:00, 18:00:00
Date:	20050101 to 20061231
Type:	Analysis
Class:	MACC

Figura 16.10 – Resumen del pedido (MACC Reanalysis)

The request will be done using the following attributes:

Area: Custom [\(change\)](#)

- Default (as archived)
- South Asia
- Inter-tropical band
- Northern Hemisphere
- Southern Hemisphere
- Tropical Pacific
- Europe
- North America
- Indonesia
- Custom: N W S E

Figura 16.11 – Selección de área de estudio (MACC Reanalysis)

Grid: 0.125x0.125 (change)

- 0.125x0.125
- 0.25x0.25
- 0.5x0.5
- 0.75x0.75
- 1x1
- 1.125x1.125
- 1.5x1.5
- 2x2
- 2.5x2.5
- 3x3

[Retrieve now](#)

Figura 16.12 – Selección del paso entre puntos (MACC Reanalysis)

- 4- Por último, con todos los parámetros configurados, se pulsa sobre el botón *Retrieve now* lo cual lleva a una última pantalla donde, tras una breve espera, aparece la opción de descargar el archivo deseado.

Explicado el procedimiento de obtención de los datos, queda explicar las acciones que se llevan a cabo en esta sección del programa. Similar a la sección anterior, primero se extraen las longitudes y latitudes de los puntos del mapa de vapor de agua y después se extraen las fechas. Estos datos se toman cada seis horas, siendo las horas de toma de datos las 00:00, las 06:00, las 12:00 y las 18:00. En este caso no se construyen matrices de longitudes y latitudes al no ser necesarias de acuerdo a la forma de ejecución del programa.

Datos de aerosoles

La forma de obtención de los datos de aerosoles es similar a la descrita para los datos de columna de vapor de agua, en este caso habría que seleccionar la opción *Total Aerosol Optical Depth at 700nm*.

En cuanto a las acciones realizadas en esta sección, aquí solamente se extraen las longitudes y latitudes de los puntos. En este caso se tiene un mapa por día, es decir, la toma de datos de aerosoles solo se realiza una vez al día.

Datos alturas

En este caso se tiene un archivo que contiene los datos de las diferentes alturas de un país deseado. Dicho archivo contiene además información sobre la extensión que abarca, es decir, sobre las longitudes y latitudes máximas y mínimas. A partir de estos extremos y conociendo las dimensiones de la matriz de datos de altura, se pueden generar dos vectores, cada uno de los cuales contienen las longitudes y latitudes de cada punto de la matriz respectivamente.

Para un mejor entendimiento del proceso, a continuación se muestran los pasos a seguir con un mapa de alturas de, por ejemplo, España:

- 1- Lo primero de todo es descargar los datos que se desean, en este caso el mapa de alturas de España. Para ello se va a la página que aparece en la referencia [37] y se procede a su descarga.

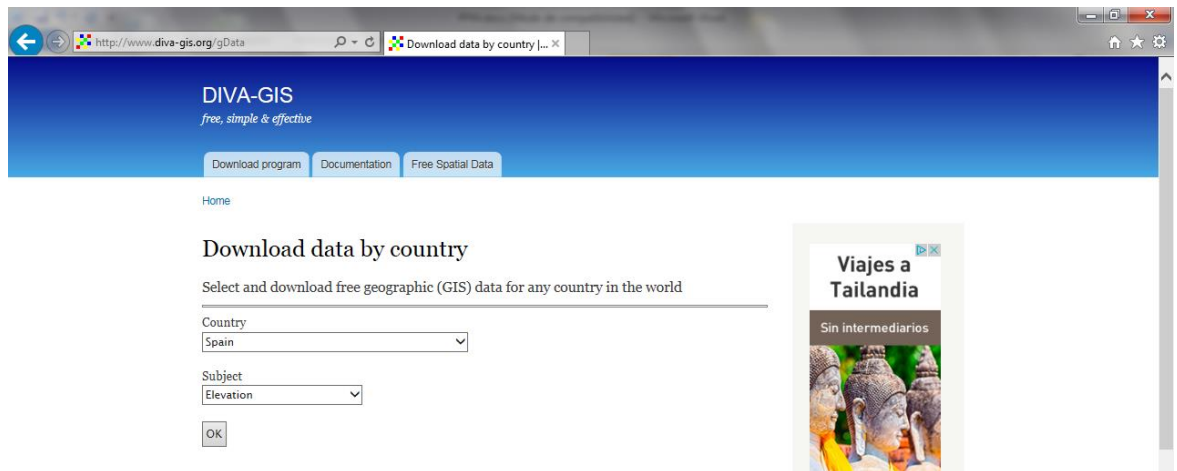


Figura 16.13 – Página DIVA-GIS para la descarga de mapas de altitud

- 2- Una vez descargados los datos estos aparecen comprimidos en un archivo, por lo que habrá que descomprimirlos.

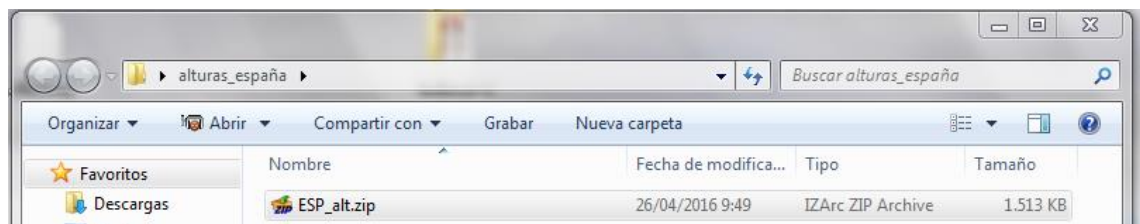


Figura 16.14 – Archivo descargado de la página DIVA-GIS

- 3- En el caso de los datos de España aparecen 6 archivos, 3 de los cuales pertenecen a la Península Ibérica e Islas Baleare (los archivos que comienzan por ESP) y los otros 3 pertenecen a las Islas Canarias (los archivos que comienzan por ESP2). En este caso nos centraremos en los de la península.

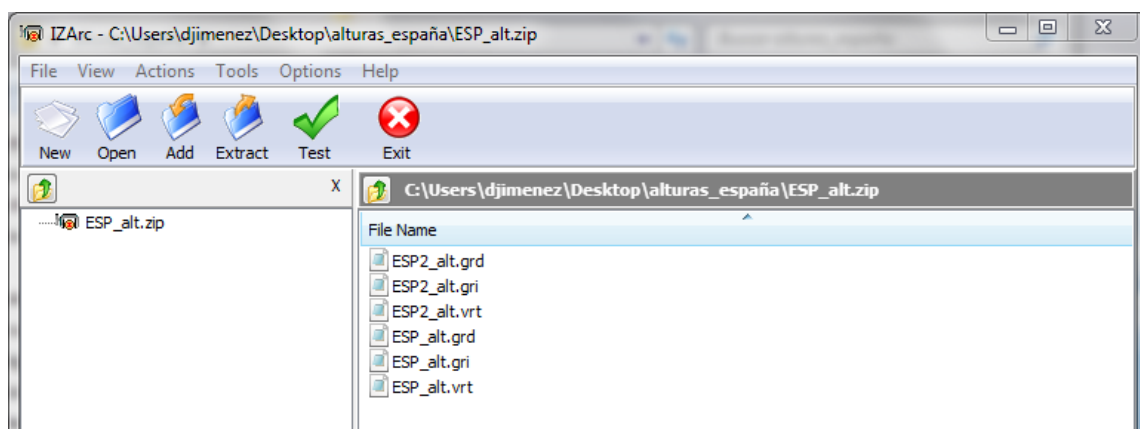
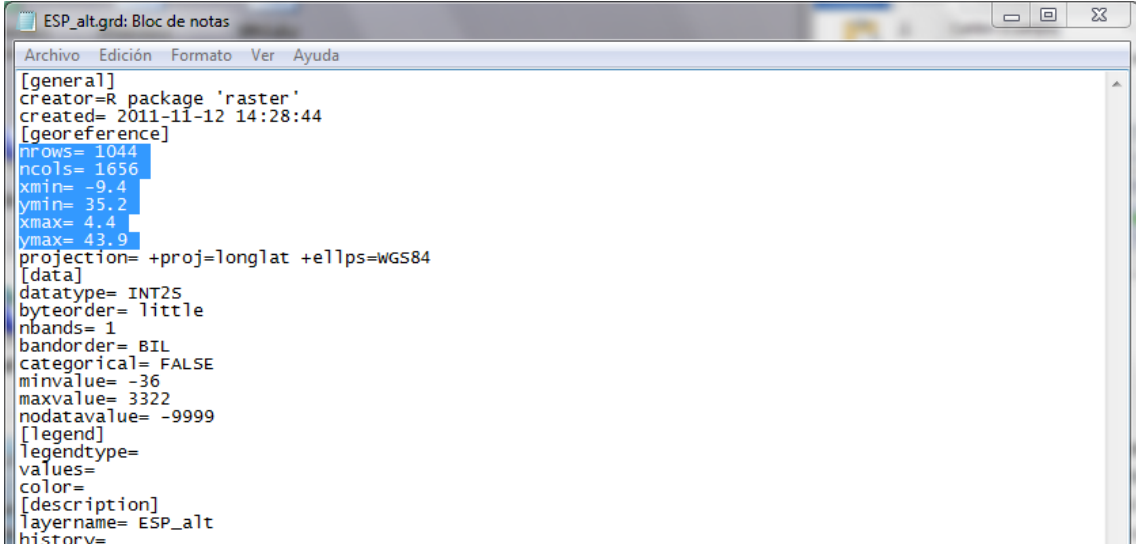


Figura 16.15 – Descompresión del archivo descargado de la página DIVA-GIS

- 4- El siguiente paso consiste en abrir con el *Bloc de notas* el archivo con extensión **.grd* ya que este contiene información sobre las dimensiones del mapa, esto es, número de filas y de columnas, así como las longitudes y latitudes máximas y mínimas. Aporta más datos pero en este caso solo resultan de interés los mencionados.
- Para poder extraer en forma de matriz los datos referentes a las alturas es necesario copiar los tres archivos mencionados al directorio de trabajo, además de tener descargado en R la librería *raster*.



```
[general]
creator=R package 'raster'
created= 2011-11-12 14:28:44
[georeference]
nrow= 1044
ncol= 1656
xmin= -9.4
ymin= 35.2
xmax= 4.4
ymax= 43.9
projection= +proj=longlat +ellps=WGS84
[data]
datatype= INT2S
byteorder= little
nbands= 1
bandorder= BTL
categorical= FALSE
minvalue= -36
maxvalue= 3322
nodatavalue= -9999
[legend]
legendtype=
values=
color=
[description]
layername= ESP_alt
history=
```

Figura 16.16 – Datos presentes en el archivo con extensión **.grd*

- 5- A partir de esta información se pueden construir los vectores de longitudes y latitudes mencionados. Para ello simplemente hay que escribir la siguiente línea de código en R:

```
long_alt <- seq(-9.4,4.4,by=(9.4+4.4)/1656)
lat_alt <- seq(43.9,35.2,by=-(43.9-35.2)/1044)
```

Figura 16.17 – Construcción vectores de longitudes y latitudes

Con estas expresiones se generan una serie de datos que van desde un máximo a un mínimo. Por ejemplo, en *long_alt* se tendrán 1656 datos que irán desde -9,4°W a 4,4°E con un paso de $(9,4+4,4)/1656= 0,00833333^{\circ}$. En realidad se genera un dato más de lo deseado, por lo tanto se tendrán 1657 datos en lugar de 1656 con lo que habrá que eliminar el último.

- 6- A partir de estos vectores generados y de la matriz de datos de alturas, se puede generar un mapa georreferenciado de las alturas con el fin de comprobar que todos los datos descargados y obtenidos son correctos.

A continuación aparece a la izquierda el mapa georreferenciado (Figura 16.18) de las alturas de España y a la derecha un mapa descargado de google (Figura 16.19) para comprobar que las cotas son correctas.

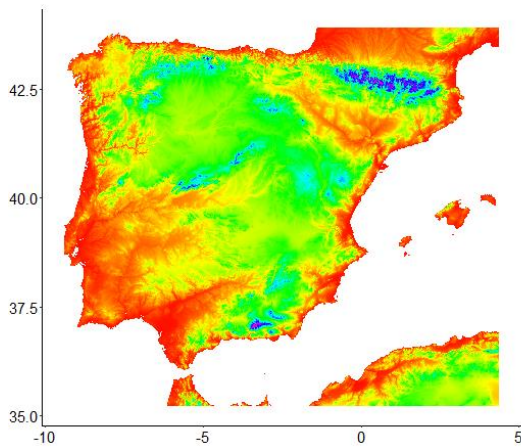


Figura 16.18 – Mapa altitudes georreferenciado

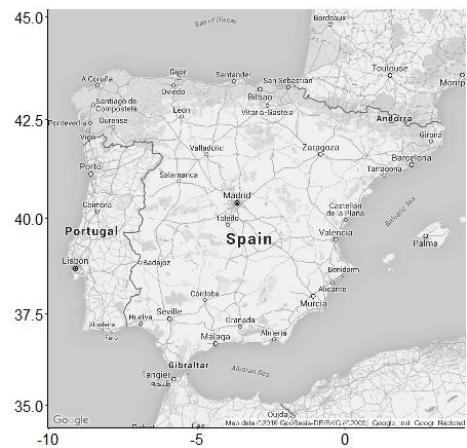


Figura 16.19 – Mapa comparativo de cotas

Datos Turbidez de Linke

No se ha encontrado ningún lado en el cual se suministren mapas de una serie de puntos con datos de la Turbidez de Linke. Lo único que se ha logrado encontrar son páginas que suministran datos mensuales para puntos individuales de la Tierra. De este modo se hace necesaria una introducción manual de estos datos para una serie de puntos, los que el usuario crea necesario, de manera que los mismos conformen una matriz de forma rectangular.

Se ha elegido la página [38] como medio para obtener los datos de la Turbidez de Linke. En ella tan solo hay que introducir la latitud, longitud y altura para obtener los valores mensuales del susodicho punto.

Figura 16.20 – Página de SODA para obtener los datos de Turbidez de Linke

Con los datos de los puntos seleccionados introducidos, el programa se encarga de interpolar estos datos de manera que se conforme un mapa con un paso entre puntos de $0,125^\circ$ de longitud y $0,125^\circ$ de latitud. Paso equivalente al de los mapas de aerosoles y de vapor de agua. La interpolación se realiza primero entre las diferentes longitudes y después entre las latitudes.

Cálculo albedo de referencia inicial y albedo aparente de las nubes

De acuerdo a lo propuesto en la tesis de Luis Zarzalejo [39] es necesario establecer un nivel de albedo de referencia inicial para cada píxel y para ello hay que realizar una secuencia, implementada como una función (*albedo_ref_ini*) en el programa:

- En primer lugar, mediante inspección visual, hay que seleccionar un conjunto de imágenes, por lo menos diez, correspondientes a diferentes días despejados. Estas imágenes se seleccionaran entre las primeras del periodo de estudio.
- A continuación se estima el albedo aparente para cada píxel en cada imagen.
- Por último se identifica el valor mínimo de la serie de albedos aparentes correspondientes a cada píxel como albedo de referencia inicial.

De una forma similar que para la estimación del albedo aparente inicial se realiza la estimación del albedo aparente de las nubes. En lo que difiere con respecto a la secuencia anteriormente descrita es que en este caso se seleccionan imágenes cubiertas por nubes y en lugar de elegir el albedo con valor mínimo se elige el albedo aparente de valor máximo.

Lo que se consigue de esta manera es generar un mapa de albedos de referencia iniciales, un valor para cada píxel, y un mapa de albedos aparentes de las nubes.

Ejecución del bucle principal

En este bucle se recorren uno a uno todos los puntos del mapa extrayendo cada viaje todos los datos relativos al periodo de estudio. Extraídos todos los datos del píxel de estudio se sigue la siguiente secuencia de ejecución (para una visión más detallada ver el diagrama de flujo de la Figura 16.22):

1. Se comprueba que al menos más de la mitad de los mismos tengan un valor que no sea nulo, ya que en caso contrario querrá decir que dicho píxel no pertenece a la región de estudio delimitada.
2. Si el píxel de estudio pasa el filtro anterior, a continuación se extraen la longitud y la latitud de ese punto a partir de las matrices de longitudes y latitudes creadas en la sección de programa ya definida. Además se eliminan todos aquellos datos de nivel digital que no pertenezcan a las horas diurnas.
3. El próximo paso consiste en la extracción de la altura del píxel de estudio haciendo uso de las coordenadas del mismo para localizarla dentro del archivo correspondiente. Con la altura se calcula la corrección por altura.

4. Según el modelo de cielo claro que se haya seleccionado se extraerán los datos de vapor de agua y de aerosoles, cuando se seleccione el modelo de SOLIS, o de Turbidez de Linke, cuando se haya seleccionado el modelo de ESRA.
5. Se extraen los datos de albedo de referencia inicial y de albedo aparente de las nubes del píxel de estudio y se calcula la elevación del satélite respecto del píxel en radianes.
6. A partir de este punto se realizan los cálculos descritos en el apartado *Método implementado en CENER* (página 68). Cabe señalar que dependiendo del método elegido los cálculos a realizar cambiarán, usando las expresiones descritas en el apartado *IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO SOLIS* (página 80), para SOLIS, o las ecuaciones del apartado *El modelo de cielo claro ESRA* (página 35), para ESRA.
7. Finalmente se almacenarán en un array de tres dimensiones los valores de radiación directa calculada.

Creación archivo NetCDF

Con el fin de no perder los datos generados al cerrar el programa, se ha decidido generar un archivo NetCDF. En este archivo se definen tres dimensiones (longitud, latitud y tiempo) y dos variables (irradiancia global e irradiancia directa según Erbs) que se desarrollan en las dimensiones definidas.

Generación de mapas

A partir del archivo generado en la sección anterior se puede proceder a la generación de mapas de irradiancia tanto global como directa. Para ello se ha generado un bucle en el cual primero se extraen todos los datos de un determinado instante, esto es, la matriz de datos, de dimensiones longitud y latitud, de un determinado instante de tiempo. Con los datos extraídos se hace uso de la función *ggplot()* para imprimir estos datos con un escala de colores que permita diferenciar los valores que toma la irradiancia según la zona del mapa.

En la parte final del bucle se escribe una línea de código que permite guardar el mapa (ver Figura 16.21) generado en cada iteración, de manera que se tienen tantos mapas como instantes de tiempo se hayan procesado.

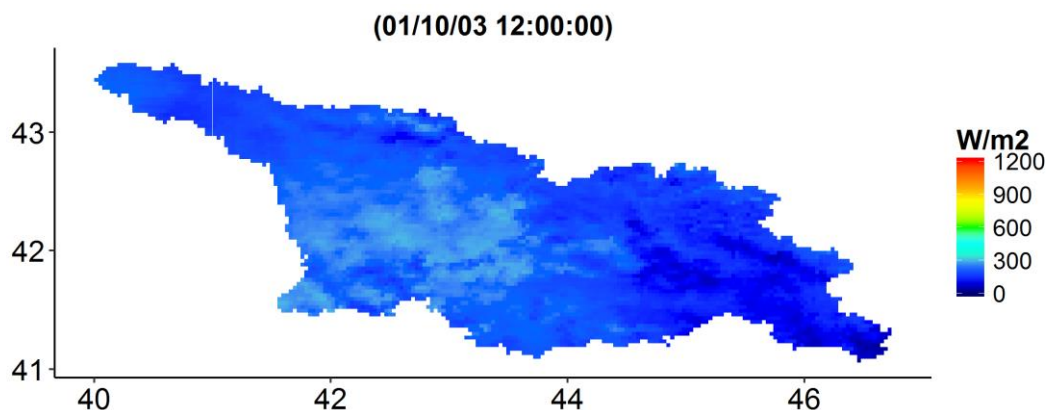


Figura 16.21 – Ejemplo de mapa de irradiancia directa generado

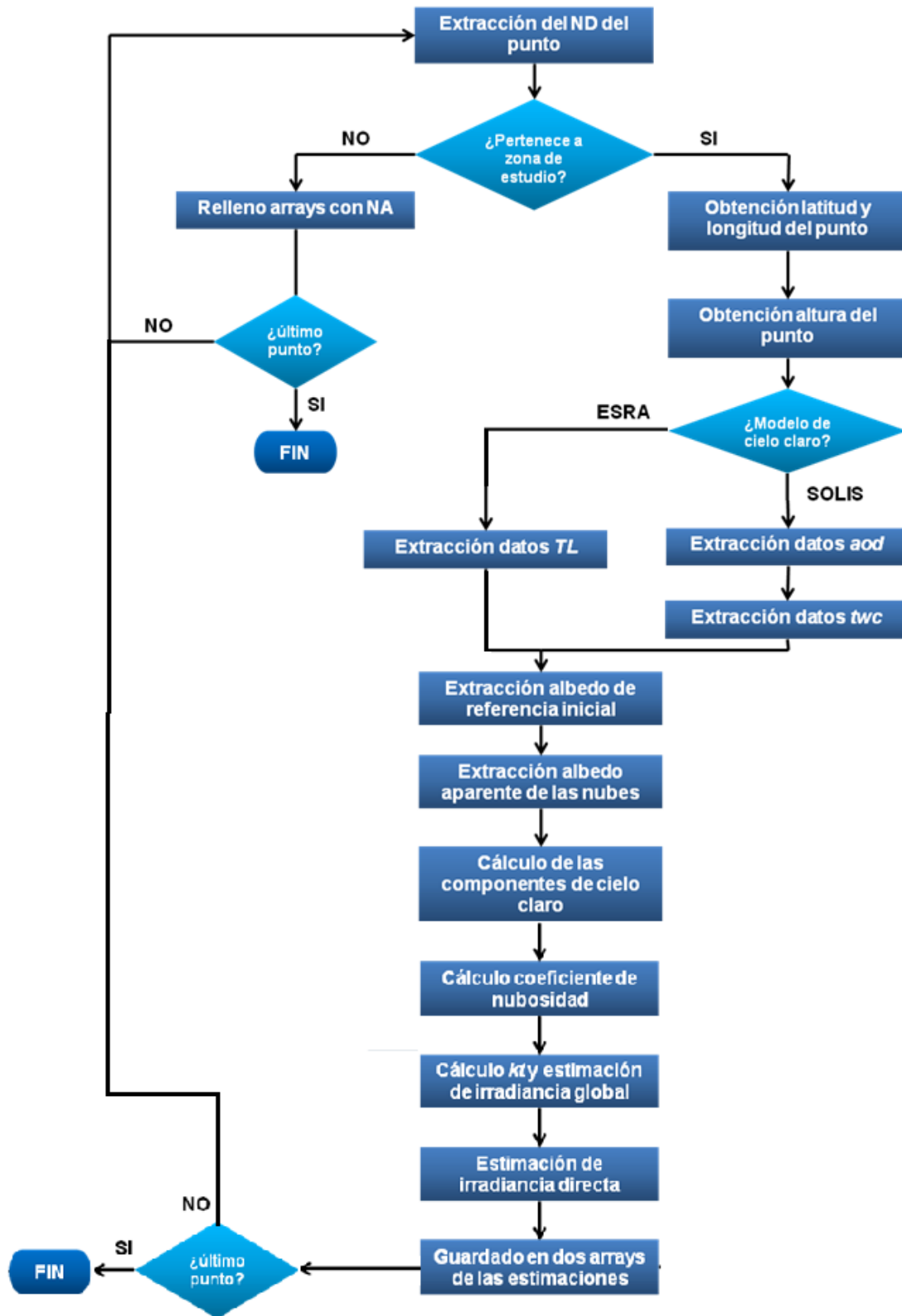


Figura 16.22 – Diagrama del proceso de ejecución del bucle principal del software

16.1. Análisis resultados de la generación de mapas

A fin de comprobar los resultados del software desarrollado se han empleado como ejemplo los datos de Georgia referentes al mes de enero de 2003. Con éstos se ha ejecutado el programa primero empleando el modelo ESRA y posteriormente el modelo SOLIS.

Realizada la estimación se han generado una serie de mapas de radiación directa y global para comparar los resultados obtenidos por ambos modelos de cielo claro, esto es, para comparar los mapas obtenidos con ESRA con los obtenidos mediante SOLIS. Los mapas que se exponen como ejemplo en *Comparación mapas de irradiancia directa* (Anexos, página 199) representan la irradiancia directa calculada según Erbs y según Louche para los días 1 y 2 de diciembre a diferentes horas. Por otro lado, en *Comparación mapas de irradiancia global* (Anexos, página 203) se muestran los mapas de irradiancia global estimada por los dos modelos de cielo claro, para los días 1 y 17 de diciembre.

Analizando visualmente los mapas obtenidos se pueden comprobar todos aquellos fenómenos que se han ido detectando a lo largo del desarrollo del presente trabajo. Entre éstos se encuentran:

- Los picos anómalos de radiación al comienzo de los días, producidos por la combinación del modelo de cielo claro ESRA con uno de los modelos de estimación de la radiación directa estudiados, a excepción de Louche.
- La sobreestimación que produce la combinación citada en el punto anterior. Los mapas así producidos tienen unos colores más cálidos lo que, según la leyenda adjunta a cada mapa, indica unos valores de radiación elevados.
- La independencia del modelo de Louche con respecto del modelo de cielo claro a la hora de estimar de la radiación directa sobre la Tierra. Se puede apreciar como los mapas producido por ESRA+Louche y SOLIS+ Louche son idénticos.
- Observando los mapas de irradiancia global se comprueba que efectivamente las estimaciones realizadas por el modelo SOLIS parecen quedar por debajo de los niveles reales de radiación global que llegan a la Tierra, independientemente de la hora del día se mantienen los colores azules oscuros los cuales corresponden a niveles de irradiancia inferior a 300 W/m^2 . Sin embargo, los mapas generados por el modelo ESRA presentan una evolución más marcada a lo largo del día, variando la combinación de colores lo que significa una variación del nivel de irradiancia, y unos valores más acordes a la realidad. La conclusión que se saca de esto es que, como efectivamente ya se había destacado en la validación, el modelo ESRA es el más preciso de los dos en cuanto a estimación de irradiancia global.

16.2. Optimización del software

Uno de los factores importantes del software desarrollado es el tiempo de ejecución. Este parámetro es importante debido a que el volumen de datos a procesar es muy elevado, pequeñas variaciones en el tiempo de ejecución de cada iteración del bucle principal se pueden transformar en horas en el cómputo total.

Con el fin de reducir este tiempo al mínimo, se han llevado a cabo una serie de medidas que se exponen a continuación:

- Analizando el programa se han encontrado una serie de funciones cuya ejecución no resultan necesarias para la finalidad última del programa, la estimación de la irradiancia. De esta manera, en el caso del modelo SOLIS, se han dejado de calcular las componentes de cielo claro directa y difusa ya que la componente global no depende de estas dos. Para el cálculo de la irradiancia directa solo se ha preservado el modelo de directa que mejores resultados aportaba, el modelo de Erbs.
- Una de las tareas que más tiempo consume es la de escritura de datos. Siguiendo esta línea solo se han escrito, y por lo tanto se han conservado dentro de cada iteración del bucle, aquellos resultados necesarios como entradas en funciones a posteriori, eliminado de esta manera todo dato innecesario, es decir, cada proceso de escritura irrelevante.
- Otra manera de reducir el tiempo de ejecución es reduciendo el número de datos a procesar. Esto se ha conseguido de dos maneras: por un lado se ha reducido el número de instantes a trabajar y por otro se han descartado una serie de puntos. La primera medida se ha llevado a cabo eliminando aquellos instantes de tiempo que pertenecen a horas nocturnas, por lo que su estimación de la irradiancia carece de sentido pues va a dar un resultado nulo. La segunda medida consiste en encontrar aquellos puntos del mapa que no pertenecen a la zona de estudio, los cuales se identifican por tener un valor nulo (NA) en todos los instantes, en cuyo caso se les asigna directamente también un valor nulo en la estimación de la irradiancia, sin realizar todos los cálculos pertinentes.

Además del proceso de ejecución del programa, en la velocidad también influyen las características del hardware empleado.

Medida del tiempo de ejecución

A modo de ejemplo se han empleado los datos de Georgia referentes al mes de enero de 2003. Con éstos se ha ejecutado el programa primero empleando el modelo ESRA y posteriormente el modelo SOLIS.

En la Tabla 16.1 se muestran las características del ordenador empleado y en la Tabla 16.2 aparecen recogidos los tiempos de ejecución de los modelos ESRA y SOLIS antes y después de la optimización, así como el número total de datos procesados.

En la Tabla 16.2 la columna *nº de puntos* hace referencia al conjunto de puntos que componen cada matriz, la varianza entre los modelos optimizados y los originales se debe a que en los primeros no se tienen en cuenta los puntos fuera de la zona de estudio. La columna *nº datos* resulta de multiplicar el número de puntos de cada mapa por el número de mapas o *nº instantes*. Finalmente en la columna *tiempo ejecución* aparecen separados el *tiempo de estimación* (tiempo que tarda el programa en ejecutar todas las secciones definidas hasta la de *Creación archivo NetCDF*) y el *tiempo de impresión de mapas* (tiempo que tarda el programa en ejecutar la sección nombrada como *Generación de mapas*)

Características ordenador	
Procesador	Intel Core i3-4130 CPU 3,40 GHz
Memoria RAM	4 GB
Disco duro	148 GB
Tarjeta gráfica	Intel HD Graphics 4400
Sistema Operativo	Windows 7 Professional (64 bits)

Tabla 16.1 – Características del ordenador

Modelo	Nº puntos	Nº instantes	Nº datos	Tiempo ejecución
SOLIS	16302	1480	24126960	60 min estimación 9 min imprimir mapas
SOLIS*	7265	961	6981665	32 min estimación 6 min imprimir mapas
ESRA	16302	1480	24126960	40 min estimación 9 min imprimir mapas
ESRA*	7265	961	6981665	22 min estimación 6 min imprimir mapas

Tabla 16.2 – Tiempos de ejecución según el modelo

Como cabía esperar los modelos optimizados (señalados con *) tienen unos tiempos de ejecución inferiores ya que además de reducir el número de datos a procesar (se pasa de 24.126.960 a 6.981.665 datos) se han llevado a cabo las diferentes medidas expuestas anteriormente. El mayor ahorro de tiempo se produce en el modelo SOLIS, donde éste se reduce en 28 minutos, mientras que el modelo ESRA tiene un ahorro de tiempo de 18 minutos.

Aunque una reducción del tiempo del orden de minutos pueda parecer insignificante hay que tener en cuenta que aquí solo se están procesando los datos referentes a un mes de Georgia, un país pequeño. Siguiendo una simple regla de tres, el tiempo que se tardaría en estimar la irradiación de los datos de un año entero de Georgia usando el modelo de SOLIS optimizado sería de 6,4 horas. Si en su lugar se empleara el modelo original se tardarían 12 horas, lo que significa una sustancial diferencia de 6 horas.

El modelo de ESRA requiere un tiempo de ejecución menor debido a que requiere un menor número de operaciones que el modelo SOLIS. Si se tienen en cuenta los resultados obtenidos en la validación, en el caso de querer obtener solamente mapas de radiación global sería más conveniente emplear el modelo ESRA debido a este ahorro de tiempo.

Por último cabe señalar que un incremento en el número de datos a procesar incrementa proporcionalmente el tiempo de ejecución mientras que una mejora en las características del ordenador empleado reduciría significativamente este tiempo.

17. CONCLUSIONES

A continuación se describen las conclusiones y resultados más importantes surgidos en el marco del presente proyecto. Junto a ellas se exponen también posibles líneas futuras de desarrollo que quedan abiertas:

- Entre los modelos estudiados, el modelo de cielo claro ESRA, implementado en el método Heliosat que se emplea en CENER, realiza unas estimaciones de la irradiancia global más precisas que el modelo de cielo claro SOLIS, implementado durante el desarrollo del proyecto.
- Cuando se combinan los modelos de cielo claro con uno de los modelos de directa estudiados (Erbs, Orgill Hollands, Reindl o Louche) las mejores estimaciones de irradiancia directa se consiguen con la combinación de SOLIS más Erbs.
- El modelo ESRA tiende a sobreestimar los valores de irradiancia global que llegan a un determinado lugar.
- El modelo SOLIS, al contrario que el modelo ESRA, tiene una tendencia a subestimar los valores de irradiancia global que llegan a la superficie terrestre
- Durante el estudio del modelo que estaba implementado en CENER se observó que en determinadas circunstancias éste producía unos picos anómalos de irradiancia directa. En concreto se observó que dichas anomalías se producían al comienzo y final de algunos días debido a la combinación de la presencia de irradiancia global estimada y una altura solar muy pequeña.
- Se realizaron las correcciones oportunas consiguiendo la eliminación de la anomalía. A pesar de eliminar estas anomalías, la combinación del modelo de cielo claro SOLIS más el modelo de directa Erbs consigue unas mejores estimaciones de la irradiancia directa.
- Se ha desarrollado un programa para completar aquellos instantes de tiempo faltantes de una serie de datos aportados por el satélite.
- Se ha diseñado e implementado un software que permite que cualquier usuario sea capaz de generar archivos NetCDF con las estimaciones de irradiancia directa y global para un dominio a partir de imágenes de satélite. Este software tiene una estructura modular de manera que cualquier parte del mismo puede ser sustituida o modificada para integrar futuras mejoras o modificar su funcionalidad. Además se ha conseguido que este software pueda ser ejecutado en paralelo dentro del cluster disponible en CENER.
- A partir de los archivos NetCDF, conseguidos con el software generado, el paso para obtener mapas de radiación diarios, mensuales y/o anuales es muy sencillo por lo que cualquier usuario versado en este tema es capaz de realizar dicha tarea.

Como líneas futuras de desarrollo más inmediatas cabe destacar:

- Análisis de complementariedad y posible combinación de los diferentes modelos de cielo claro para una estimación más precisa tanto de irradiancia global como directa.
- Adaptación de los modelos para el uso de imágenes procedentes de otros satélites geoestacionarios como el GOES y el MTSAT.
- Diseño de un sistema integrado de gestión de datos y generación de mapas para su uso y distribución.
- Optimización del gasto computacional analizando el uso de otros lenguajes de programación.
- Integración de las salidas en entornos de sistemas de información geográfica (GIS).

18. BIBLIOGRAFÍA

- [1] W. A. Beckman, J. W. Bugler, P. I. Cooper, J. A. Duffie y otros, «Units and symbols in solar energy,» *Solar Energy*, nº 21, pp. 65-68, 1978.
- [2] J. A. Duffie y W. A. Beckman, *Solar engineering of thermal process*, New York, 1991.
- [3] 2. ESRA, *The European solar radiation atlas. Vol. 1: Fundamentals and maps*, París: Scharmer, K. y Reif, J. Les Presses de l'Ecole des Mines.
- [4] J. W. Spencer, «Fourier series representation of the position of the sun,» *Search*, vol. 2, p. 172.
- [5] P. I. Cooper, «The absorption of radiation in solar stills,» *Solar Energy*, vol. 12, pp. 333-346, 1969.
- [6] B. Bourges, «Improvement in solar declination computation,» *Solar Energy*, vol. 35, pp. 367-369, 1985.
- [7] M. J. Carvalho y B. Bourges, «Project EUFRAT final scientific report.,» *Solar Energy and Development in the European Community*, pp. 12.1-12.74, 1986.
- [8] F. Kasten y A. T. Young, «Revised optical air mass tables and approximation formula,» *Applied Optics*, vol. 28, pp. 4735-4738, 1989.
- [9] A. Louche, M. Maurel, G. Simonnot, G. Peri y otros, «Determination of Angstrom's turbidity coefficient from direct total solar irradiance measurements,» *Solar Energy*, vol. 38, pp. 89-96, 1987.
- [10] F. Kasten, «The linke turbidity factor based on improved values of integral Rayleigh optical thickness,» *Solar Energy*, vol. 56, pp. 239-244, 1996.
- [11] F. Linke, «Transmissions-Koeffizient and Trübungsfaktor.,» *Beit. Phys. fr. Atmos*, vol. 10, pp. 91-103, 1922.
- [12] D. Cano, J. M. Monget, M. Albuissou, H. Guillard, N. Regas y L. Wald, «A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data,» *Solar Energy*, vol. 37, nº 1, pp. 31-39, 1986.
- [13] L. Diabaté, . H. Demarcq, N. Michaud-Regas y L. Wald, «Estimating incident solar radiation at the surface from images of the Earth transmitted by geostationary satellites: the Heliosat Project,» *International Journal of Solar Energy*, vol. 5, pp. 261-278, 1988.
- [14] L. Diabaté, *Determination du rayonnement solaire a l'aide d'images satellitaires. Thèse de*

Doctoract en Sciences, École Nationale Superieure des Mines de Paris, Paris, 1989.

- [15] G. Moussu, L. Diabaté, D. Obrecht y L. Wald, «A method for the mapping of the apparent ground brightness using visible images from geostationary satellites,» *International Journal of Remote Sensing*, vol. 10, pp. 1207-1225, 1989.
- [16] W. Grüter, H. Guillard, W. Möser, J. M. Monget, W. Palz, E. Raschke, R. E. Reinhardt, P. Schwarzmam y L. Wald, Solar radiation data from satellite images, Solar energy R&D in the European Community, Series F. Reidel Publishing Company, 1986.
- [17] E. Raschke, R. Stuhlmann, W. Palz y T. C. Steemers, Solar radiation atlas of Africa, Rotterdam: Balkema Publishers, 1991.
- [18] C. Rigollier, M. Lefèvre y L. Wald, «The method Heliosat-2 for deriving shortwave solar radiation from satellite images,» *Solar Energy*, vol. 77, nº 2, pp. 159-169, 2004.
- [19] ESRA, 2000a, The European solar radiation atlas. Vol. 2: Database and exploitation software, París: Scharmer, K. y Reif, J. Les Presses de l'Ecole des Mines.
- [20] C. Rigollier, Vers un accès à une climatologie du rayonnement solaire: estimation de l'irradiation globale à partir d'images satellitales. Thèse de Doctorat en Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication, Université de Nice-Sophia Antipoles, 2000.
- [21] C. Rigollier, M. Lefèvre y L. Wald, «Heliosat version 2. Integration and exploitation of networked Solar radiation Databases for environment monitoring,» 2001, pp. 1-94.
- [22] C. Rigollier, M. Lefèvre, P. Blanc y L. Wald, «The operational calibration of images taken in the visible channel of Meteosat series of satellites,» *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 19, pp. 1285-1293, 2002.
- [23] D. Tanré, D. Deroo, P. Duhaut y M. Herman, «Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum: the 5S code,» *Internal Journal of Remote Sensing*, vol. 11, nº 4, pp. 659-668, 1990.
- [24] M. Lefèvre, M. Albuissou y L. Wald, Description of the software Heliosat-II for the conversion of images acquired by Meteosat satellites in the visible band into maps of solar radiation available at ground level., Paris, 2002.
- [25] V. R. Taylor y L. L. Stowe, «Reflectance characteristics of uniform earth and cloud surfaces derived from NIMBUS-7 ERB,» *Journal of Geophysical Research*, vol. 89, pp. 4987-4996, 1984.
- [26] O. Bauer, Les échanges océan-atmosphère dans l'Atlantique subtropical nor-est: apports de Meteosat., 1996.

- [27] V. R. Taylor y L. L. Stowe, Atlas of reflectance patterns for uniform Earth and clouds surfaces (NIMBUS-7 ERB, 61 days). NOAA Technical Report NESDIS 10, Washington DC, 1984.
- [28] M. Fontoynton, D. Dumortier, D. Heinemann, A. Hammer, J. Olseth, A. Skartveit, P. Ineichen, C. Reise, J. Page, L. Roche, H. G. Beyer y L. Wald, «a www server which provides high quality daylight and solar radiation data for Western and Central Europe,» de *9th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography*, Paris, 1998.
- [29] C. Rigollier y L. Wald, «Towards operational mapping of solar radiation from Meteosat images,» de *18th EARSeL symposium on Operational remote sensing for sustainable development*, Enschede, 1998.
- [30] C. Rigollier y L. Wald, «Using METEOSAT images to map the solar radiation: improvement of the Heliosat method.,» de *9th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography*, Paris, 1998.
- [31] O. M. ParisTech, «Observation, Impacts, Energy,» [En línea]. Available: http://www.oie.mines-paristech.fr/Donnees/data12/1205-OIE_csmodels_lib.c.
- [32] L. F. Zarzalejo, L. Ramirez y J. Polo, «Artificial intelligence techniques applied to hourly global irradiance estimation from satellite-derived cloud index,» *ScienceDirect*, nº 30, pp. 1685-1697, 2005.
- [33] F. Batlles, M. Rubio, J. Tovar, F. Olmo y L. Alados-Arboledas, «Empirical modeling of hourly direct irradiance by means of hourly global irradiance,» *Pergamon*, nº 25, pp. 675-688, 2000.
- [34] ECMWF, «MACC Reanalysis,» [En línea]. Available: <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/macc-reanalysis/levtype=sfc/>.
- [35] P. Ineichen, «A broadband simplified version of the Solis clear sky model,» *Solar Energy*, vol. 82, pp. 758-762, 2008.
- [36] R. Mueller, K. Dagested, P. Ineichen, M. Schroedter-Homscheidt, S. Cros, D. Dumortier, R. Kuhlemann, J. Olseth, G. Piernavieja, C. Reise, L. Wald y D. Heinemann, «Rethinking satellite-based solar irradiance modelling. The SOLIS clear-sky module,» *Solar Energy*, vol. 91, pp. 160-174, 2004.
- [37] «DIVA-GIS,» [En línea]. Available: <http://www.diva-gis.org/gData>.
- [38] SODA, «Solar Energy Services for Professionals,» [En línea]. Available: http://www.soda-is.com/eng/services/service_invoke/gui.php?xml_descript=soda_tl.xml#parameters.
- [39] L. F. Zarzalejo, Estimación de la irradiancia global horaria a partir de imágenes de satélite.

Desarrollo de modelos empíricos, Madrid, 2005.

- [40] K. F. Dagestad y J. A. Olseth, «A modified algorithm for calculating the cloud index,» *ScienceDirect*, nº 81, pp. 280-289, 2007.
- [41] NASA, «AERONET Data download tool,» [En línea]. Available: http://aeronet.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/webtool_opera_v2_new.
- [42] K. Johnson, «Making Maps in R,» [En línea]. Available: <http://www.kevjohnson.org/making-maps-in-r-part-2/>.
- [43] Mollie, «GPS Basemaps in R Using get_map,» [En línea]. Available: http://www.r-bloggers.com/gps-basemaps-in-r-using-get_map/.
- [44] CNIG, «Equipamiento geográfico de referencia nacional,» [En línea]. Available: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/equipamiento.do?method=descargarEquipamiento&codEquip=2>.
- [45] C. Hormann, «Digital elevation data,» [En línea]. Available: http://www.viewfinderpanoramas.org/Coverage%20map%20viewfinderpanoramas_org3.htm.

upna
Universidad
Pública de Navarra
Nafarroako
Unibertsitate Publikoa

Anexos

Estimación de la radiación solar a partir de imágenes de satélite:
Implementación del método Heliosat

Autor: Darío Jiménez Galán

Peticionario: CENER.

Titulación: Máster en Ingeniería Industrial

Director: Fermín Francisco Mallor Giménez

Departamento: Estadística e Investigación Operativa

Curso: 2015/2016

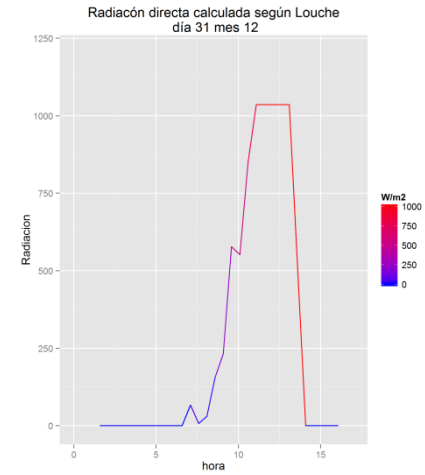
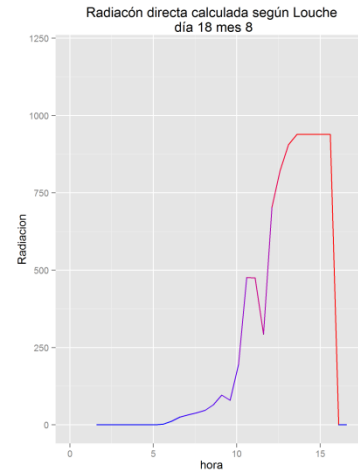
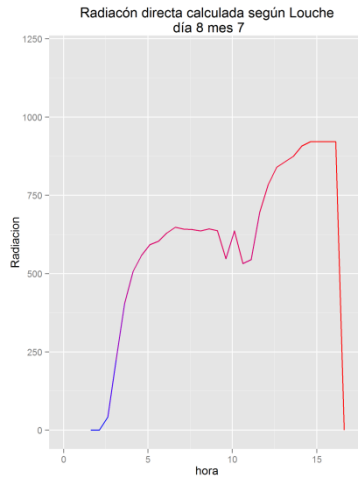
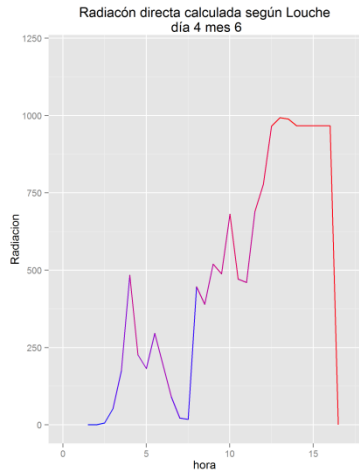
Lugar y fecha: Pamplona, 20 de Junio de 2016

ÍNDICE ANEXOS

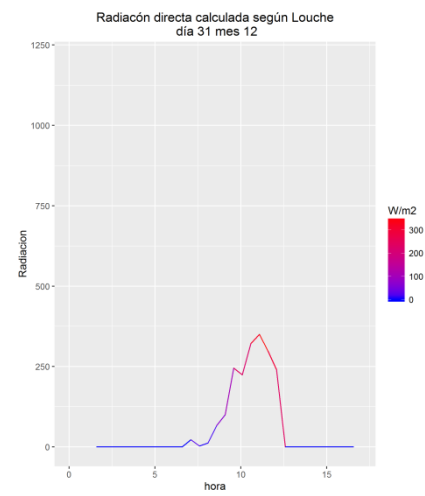
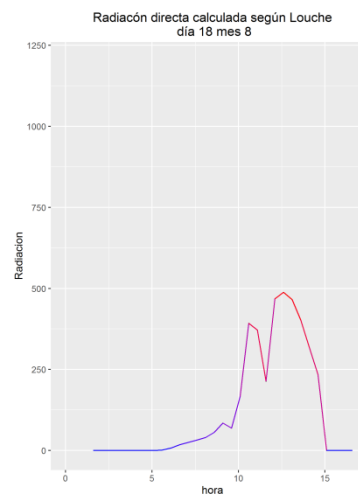
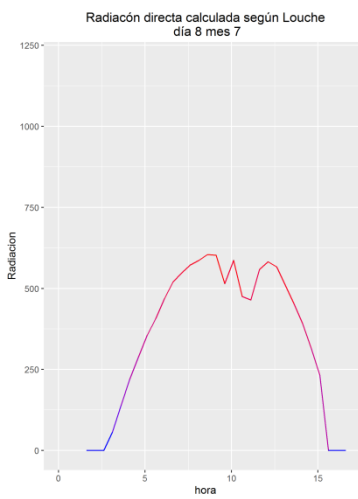
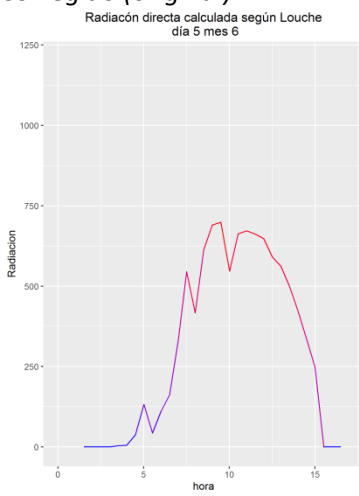
Corrección error de la expresión de Louche	166
Observación pico de radiación inusual a las 19:00 entre los días 1 al 6 de Agosto	167
Observación pico de radiación inusual a las 18:30 el día 30 de Agosto.....	170
Observación pico de radiación inusual a las 18:00 entre los días 15 al 22 de Septiembre	171
Observación pico de radiación inusual a las 18:00 entre los días 9 al 14 de Octubre	175
Observación pico de radiación inusual a las 16:30 los días 2, 3, 6 y 7 de Noviembre	178
Observación pico de radiación inusual a las 16:00 los días 4, 5, 8, 9, 12, 15, 17, 18, 19 y 21 de Diciembre	180
Observación pico de radiación inusual a las 16:30 los días 23 y 26 de Diciembre	185
Observación pico de radiación inusual a las 7:30 los días 20, 22, 24 y 25 de Diciembre.....	186
Comparación de gráficas obtenidas con los datos originales y con los datos de entrada modificados.....	188
Imágenes de anomalía del 1 al 6 de Agosto.....	189
Imágenes de anomalía del 15 al 22 de Septiembre	190
Imágenes de anomalía del 9 al 14 de Octubre.....	191
Imágenes de anomalía de los días 2, 3, 6 y 7 de Noviembre	192
Imágenes de anomalías de los días 4, 5, 8, 9, 12, 15, 17, 18, 19 y 21 de Diciembre	193
Imágenes de anomalías de los días 23 y 26 de Diciembre.....	194
Imágenes de anomalías de los días 20, 22, 24 y 25 de Diciembre	195
Resultados obtenidos tras la modificación del código original.....	196
Comparación SOLIS - ESRA	197
Comparación mapas de irradiancia directa	199
Comparación mapas de irradiancia global.....	203

Corrección error de la expresión de Louche

CENER (erróneo)

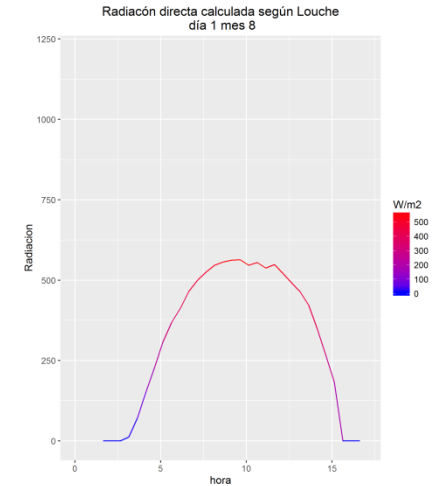
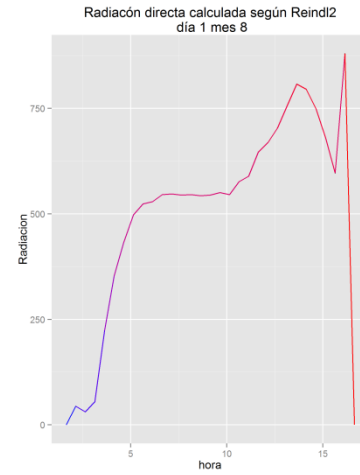
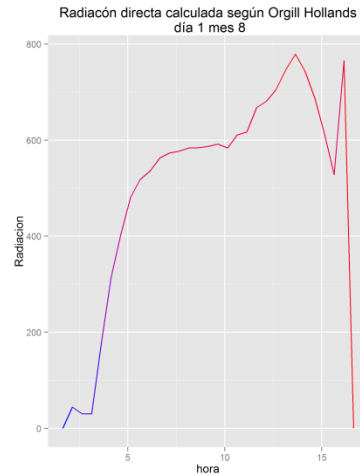
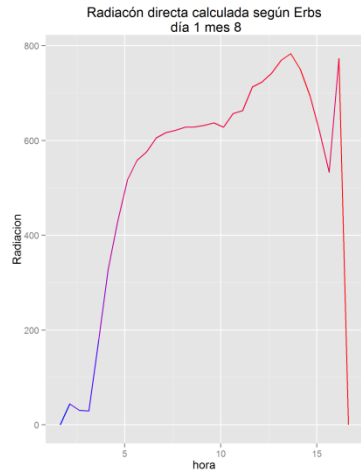


Corregido (original)

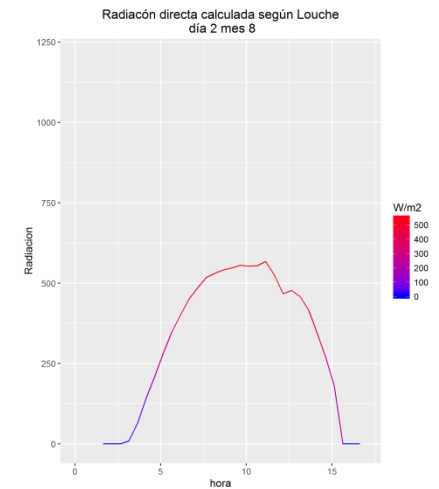
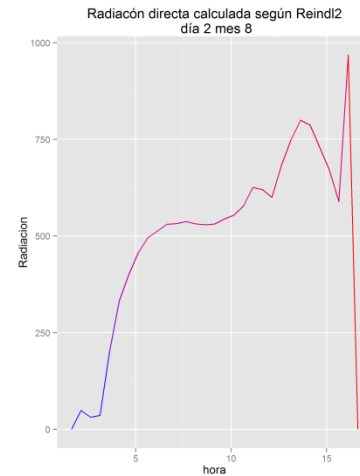
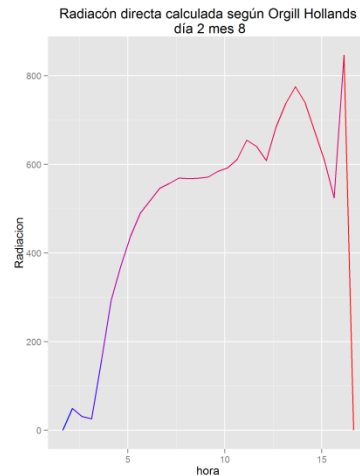
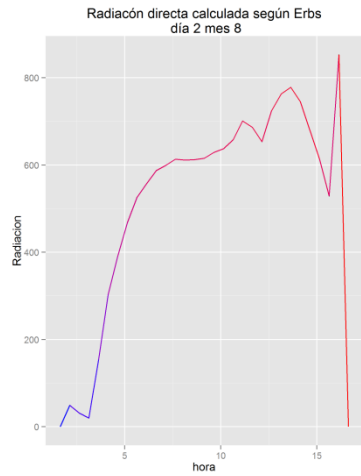


Observación pico de radiación inusual a las 19:00 entre los días 1 al 6 de Agosto

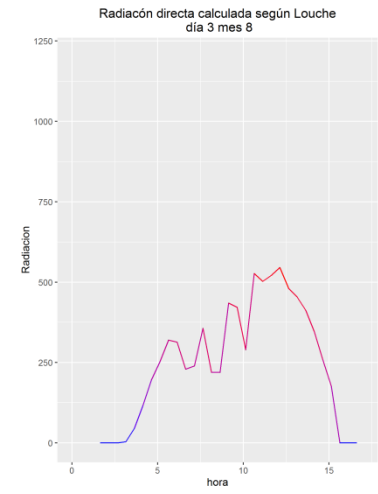
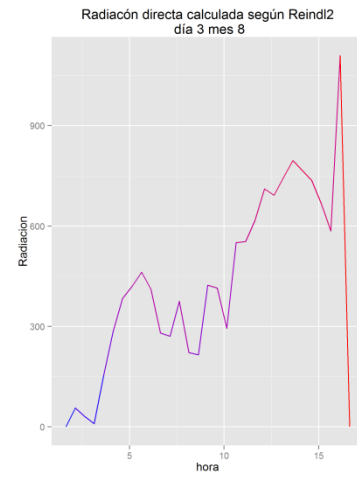
Día 1 de Agosto



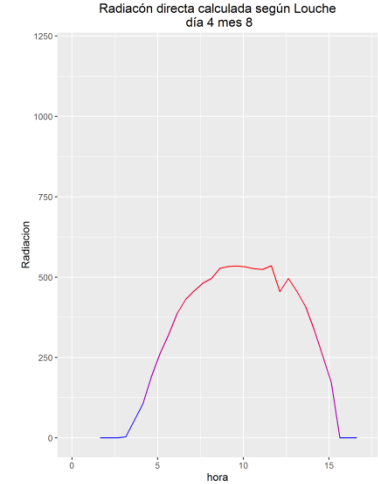
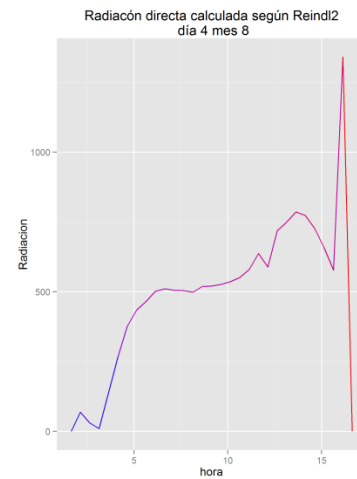
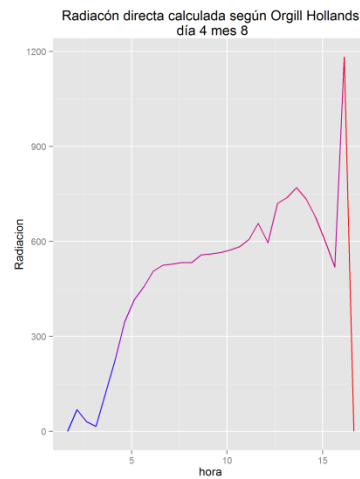
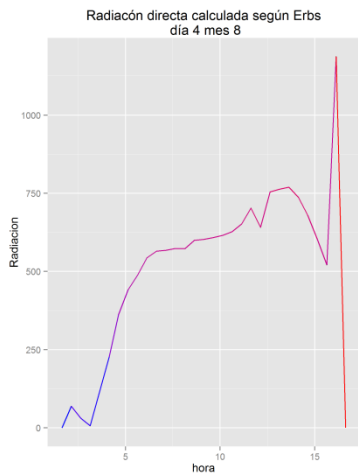
Día 2 de Agosto



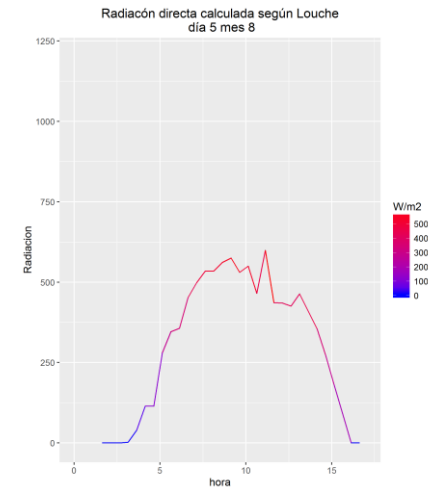
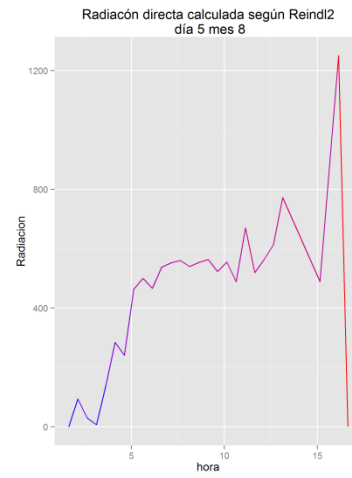
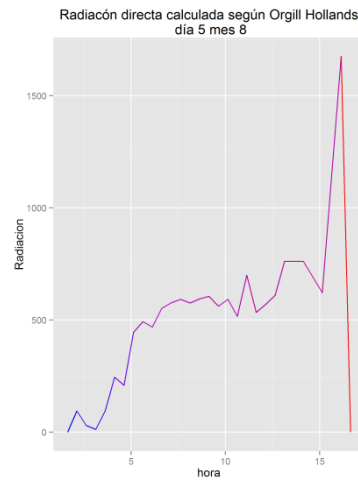
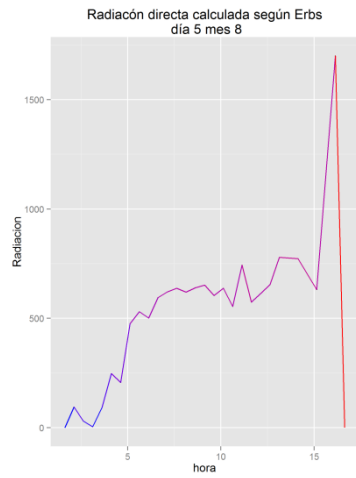
Día 3 de Agosto



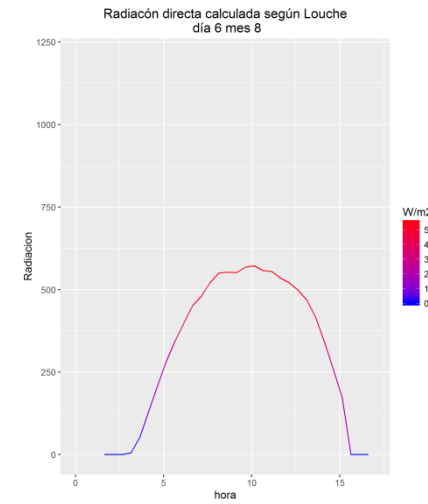
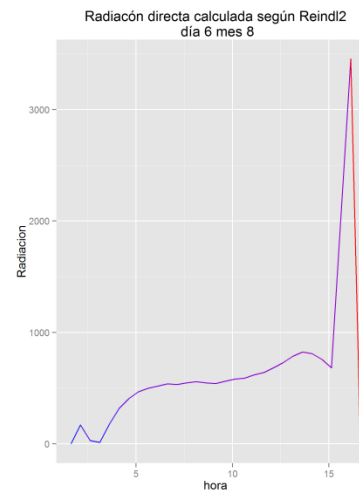
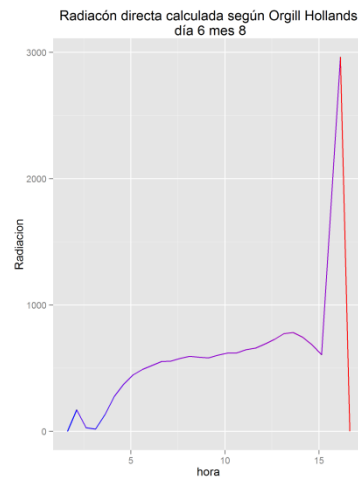
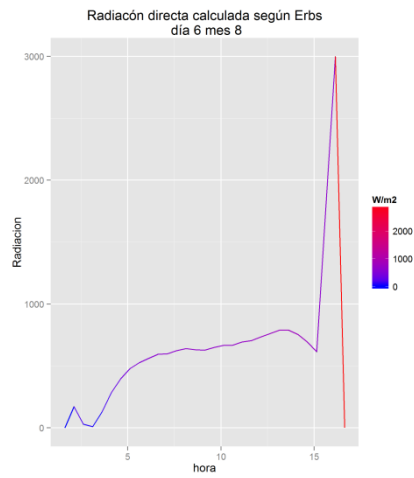
Día 4 de Agosto



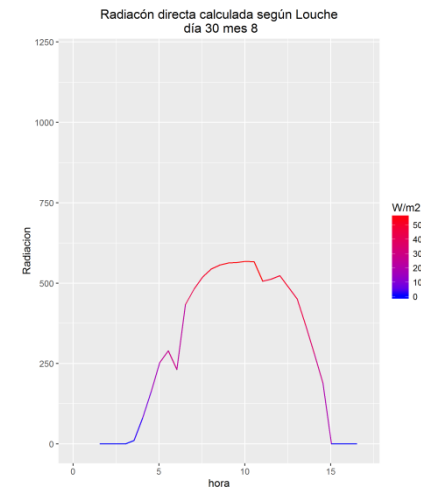
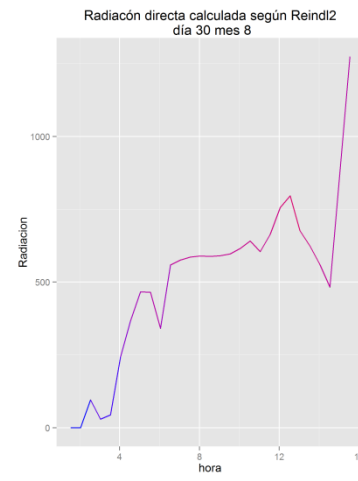
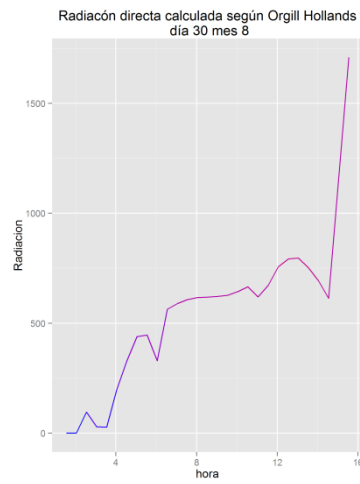
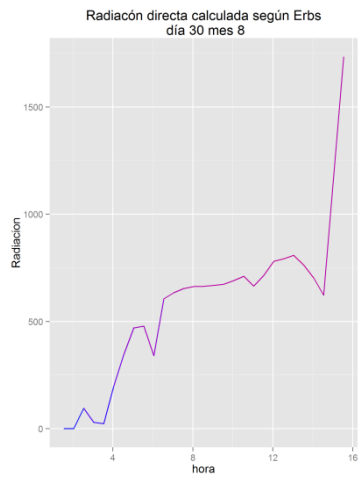
Día 5 de Agosto



Día 6 de Agosto

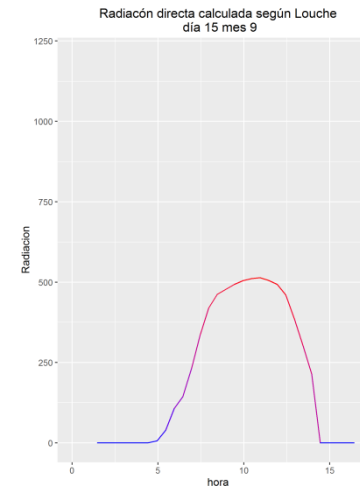
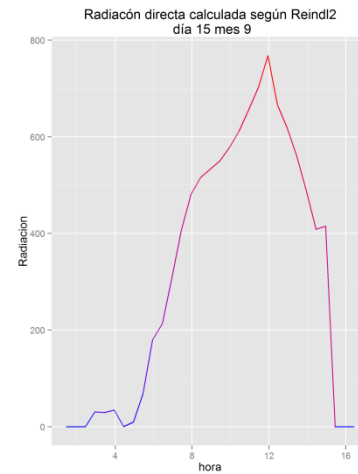
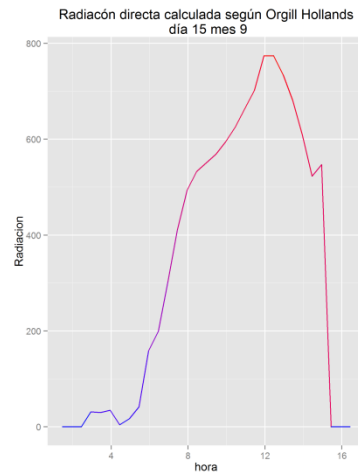
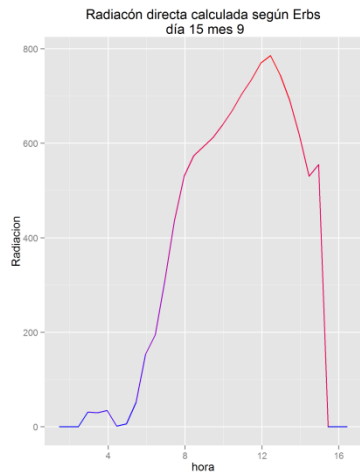


Observación pico de radiación inusual a las 18:30 el día 30 de Agosto

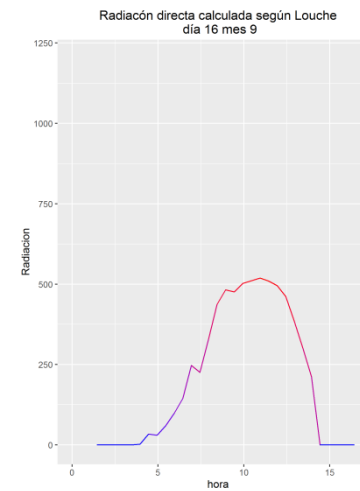
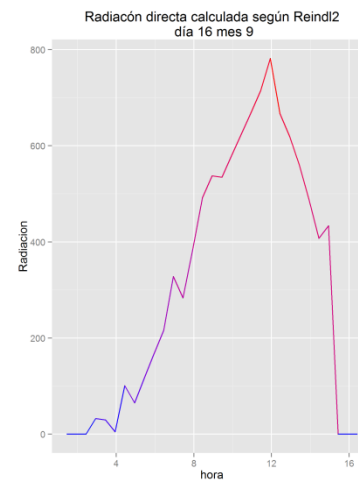
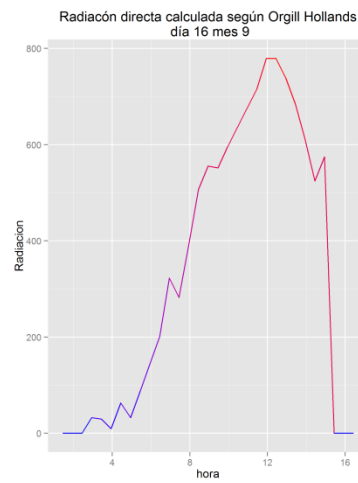
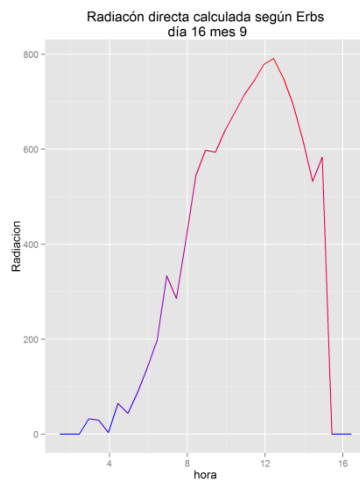


Observación pico de radiación inusual a las 18:00 entre los días 15 al 22 de Septiembre

Día 15 de Septiembre

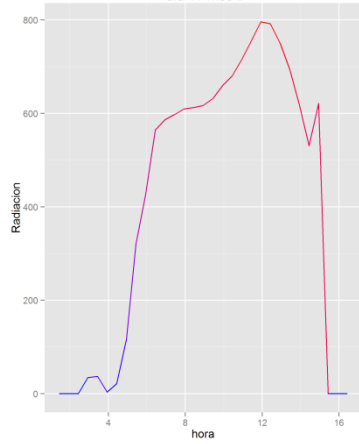


Día 16 de Septiembre

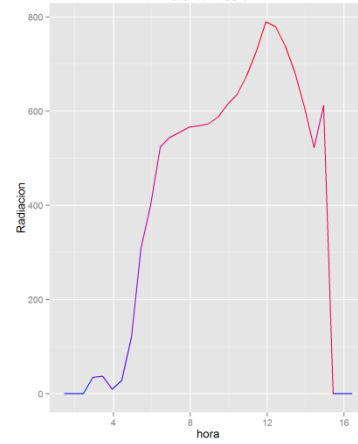


Día 17 de Septiembre

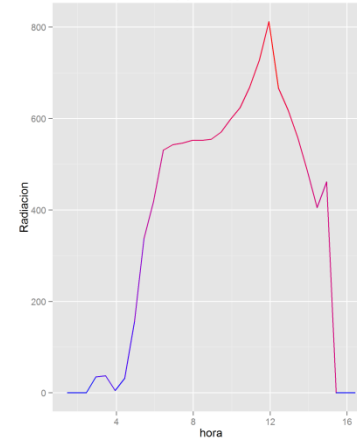
Radiación directa calculada según Erbs día 17 mes 9



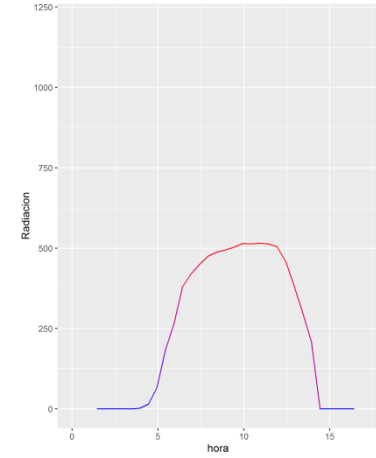
Radiación directa calculada según Orgill Hollands día 17 mes 9



Radiación directa calculada según Reindl2 día 17 mes 9

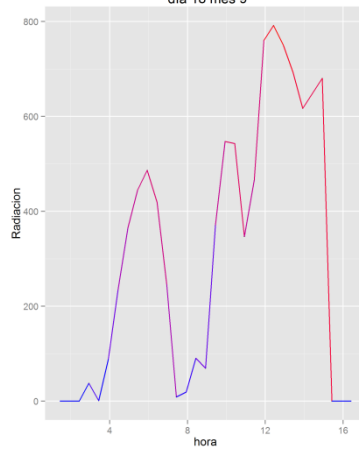


Radiación directa calculada según Louche día 17 mes 9



Día 18 de Septiembre

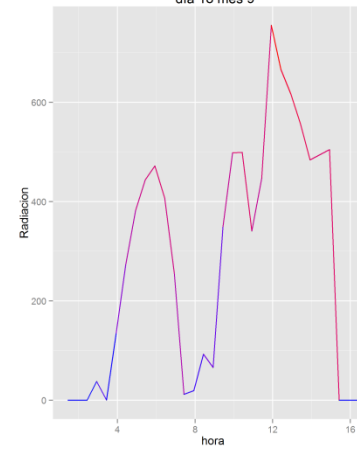
Radiación directa calculada según Erbs día 18 mes 9



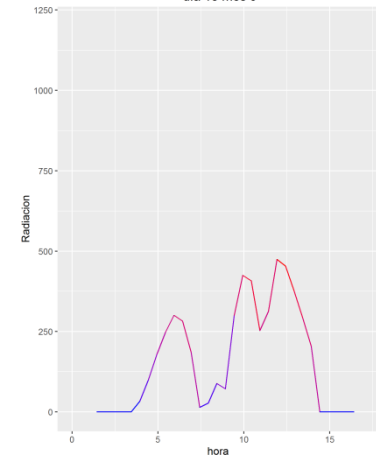
Radiación directa calculada según Orgill Hollands día 18 mes 9



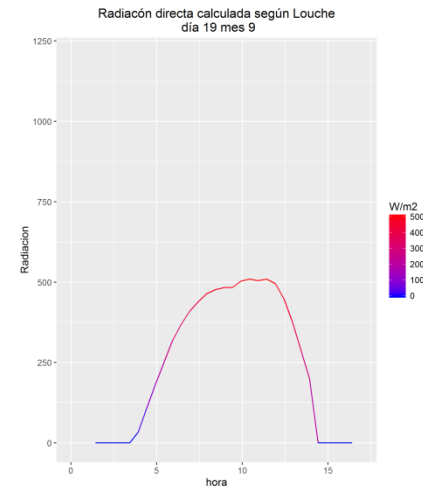
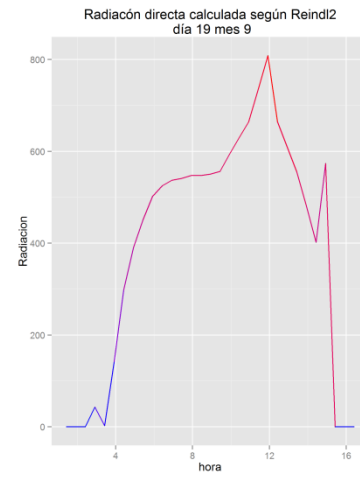
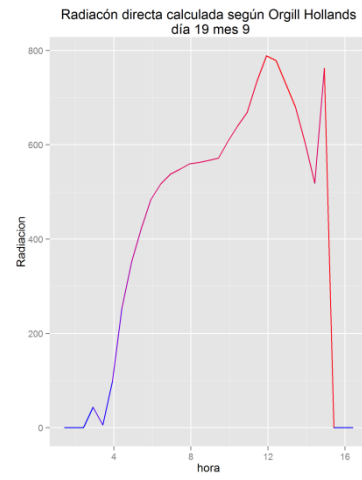
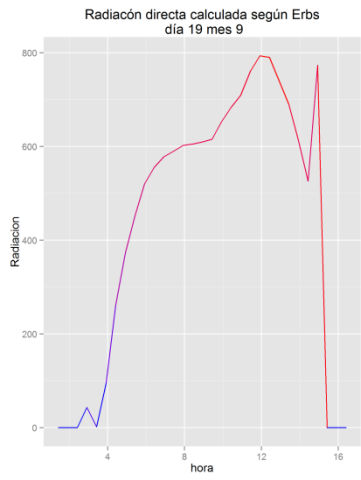
Radiación directa calculada según Reindl2 día 18 mes 9



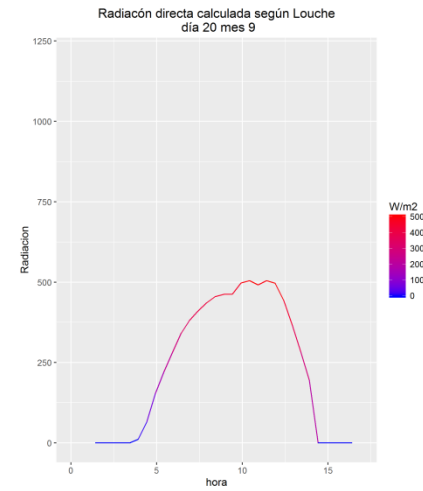
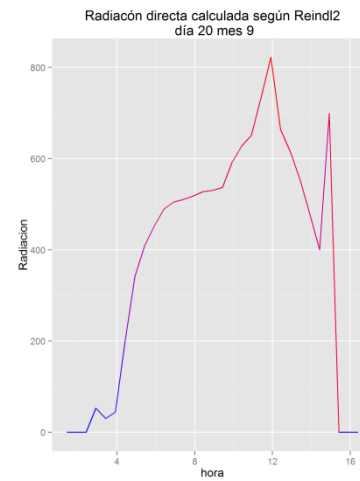
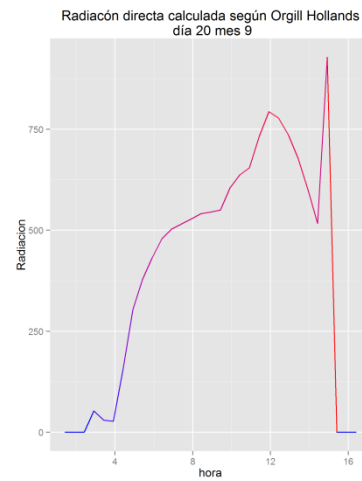
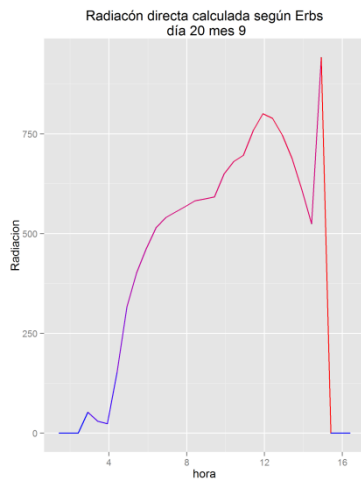
Radiación directa calculada según Louche día 18 mes 9



Día 19 de Septiembre

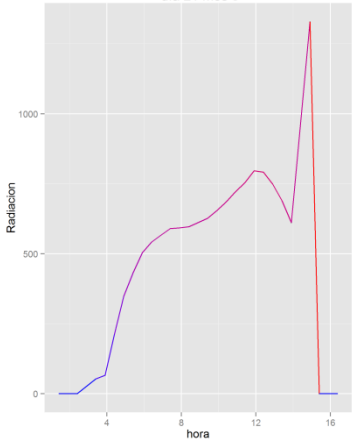


Día 20 de Septiembre

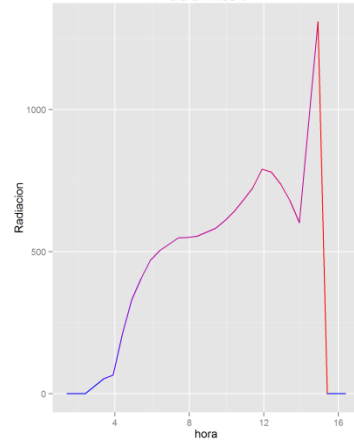


Día 21 de Septiembre

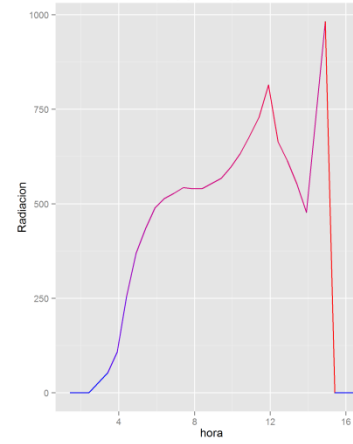
Radiación directa calculada según Erbs
día 21 mes 9



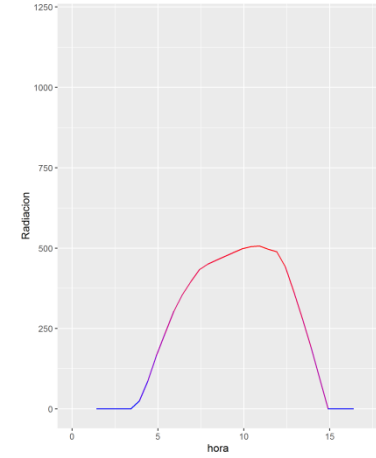
Radiación directa calculada según Orgill Hollands
día 21 mes 9



Radiación directa calculada según Reindl2
día 21 mes 9

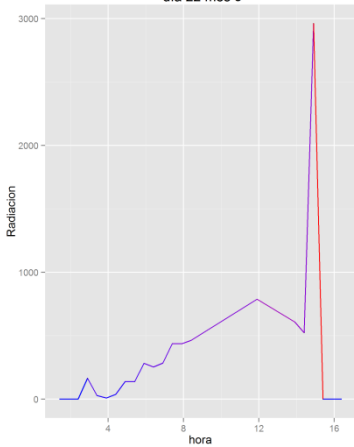


Radiación directa calculada según Louche
día 21 mes 9

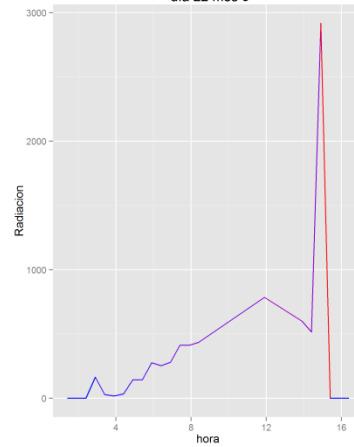


Día 22 de Septiembre

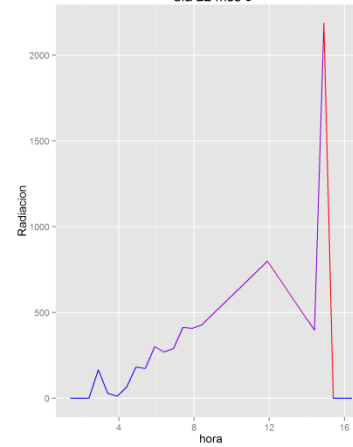
Radiación directa calculada según Erbs
día 22 mes 9



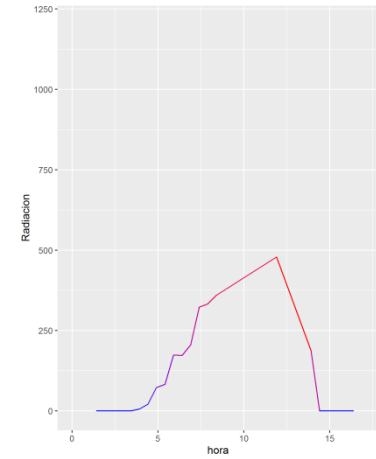
Radiación directa calculada según Orgill Hollands
día 22 mes 9



Radiación directa calculada según Reindl2
día 22 mes 9

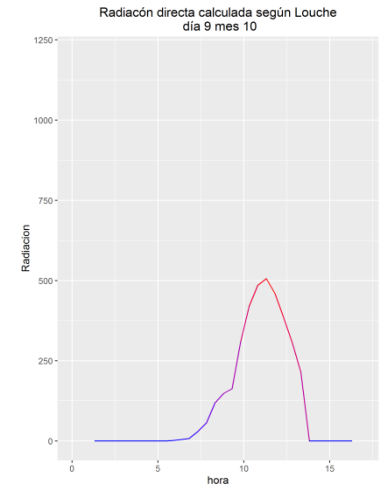
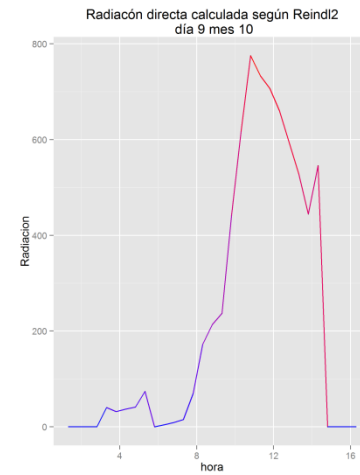
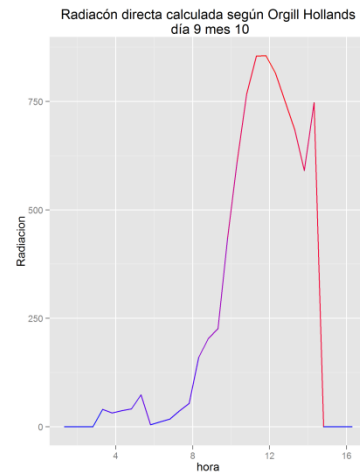
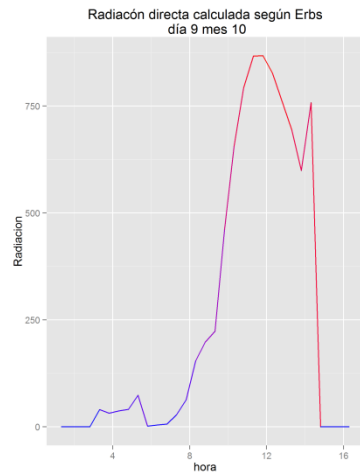


Radiación directa calculada según Louche
día 22 mes 9

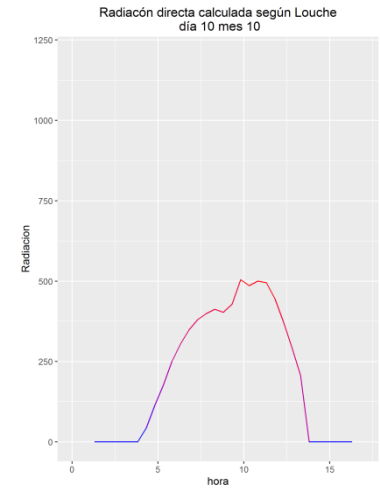
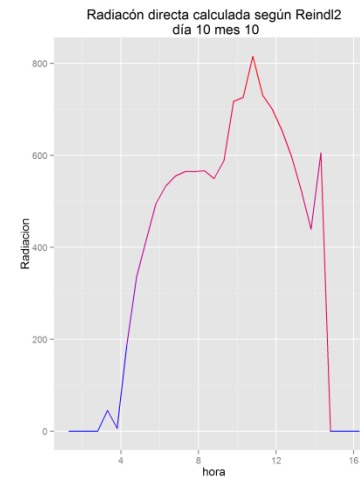
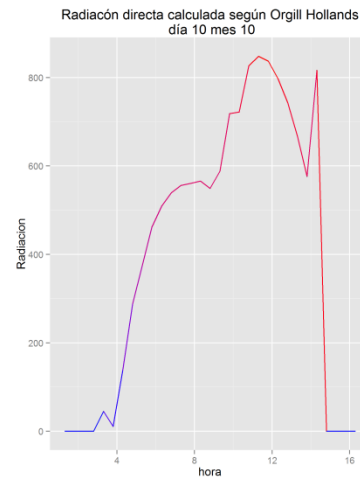
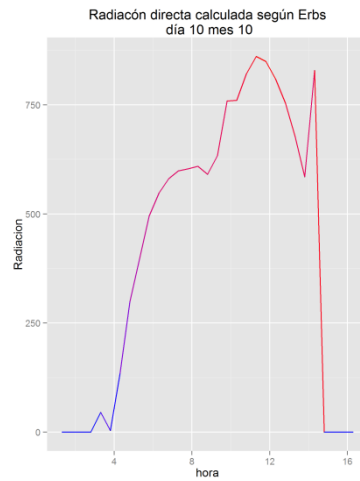


Observación pico de radiación inusual a las 18:00 entre los días 9 al 14 de Octubre

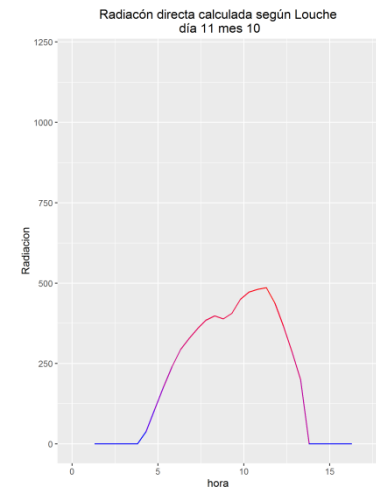
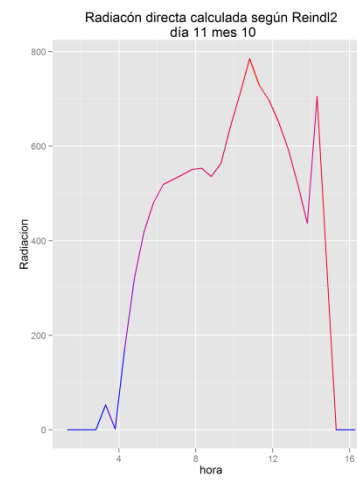
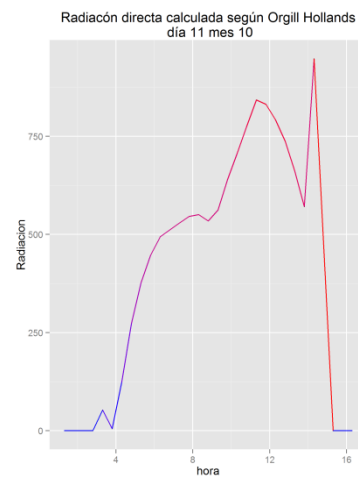
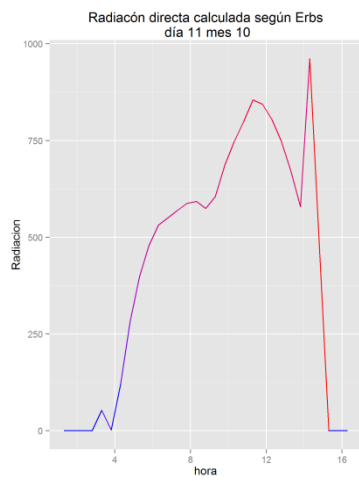
Día 9 de Octubre



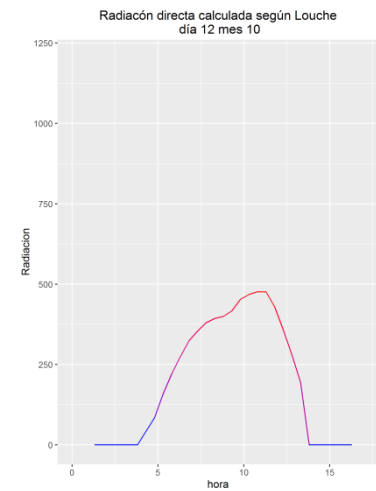
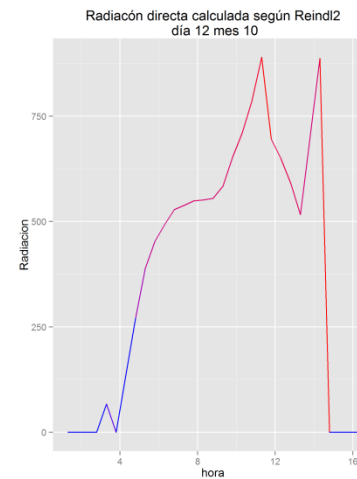
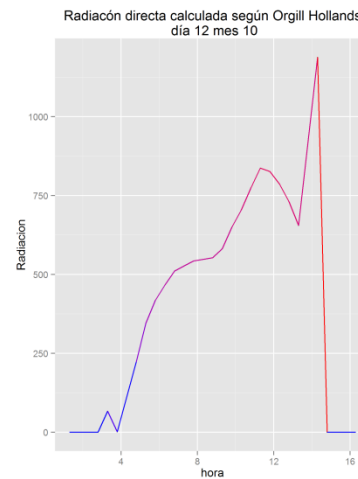
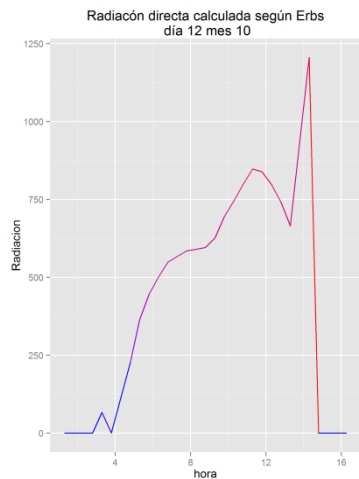
Día 10 de Octubre



Día 11 de Octubre

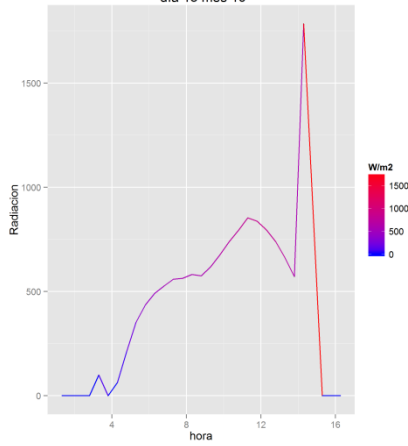


Día 12 de Octubre

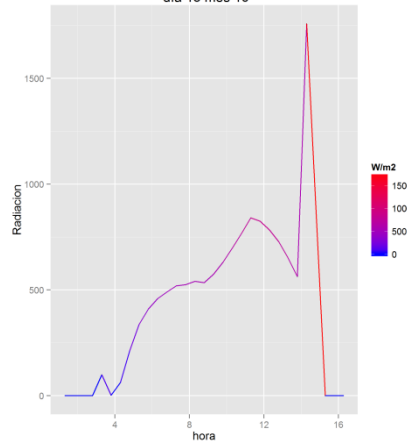


Día 13 de Octubre

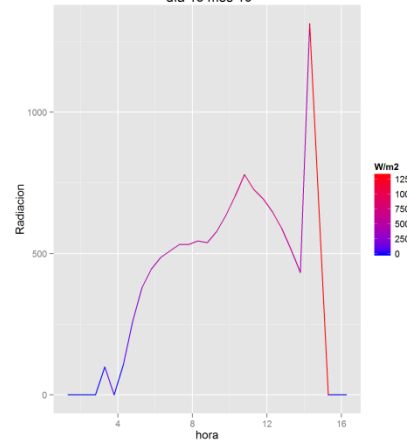
Radiación directa calculada según Erbs día 13 mes 10



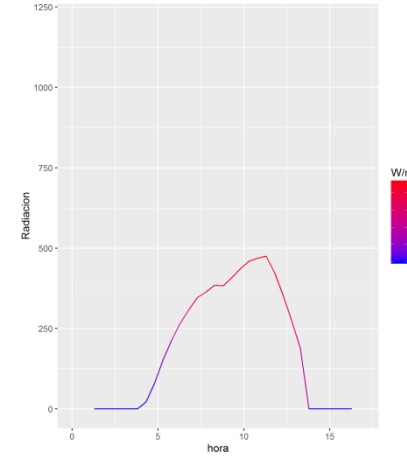
Radiación directa calculada según Orgill Hollands día 13 mes 10



Radiación directa calculada según Reindl2 día 13 mes 10

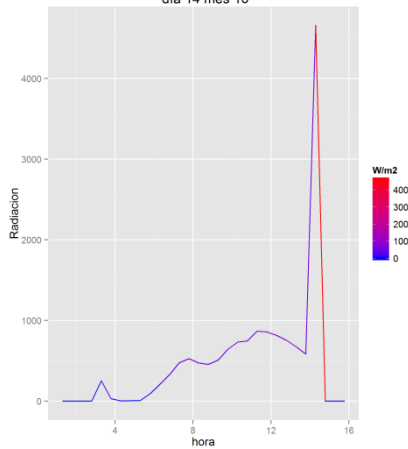


Radiación directa calculada según Louche día 13 mes 10

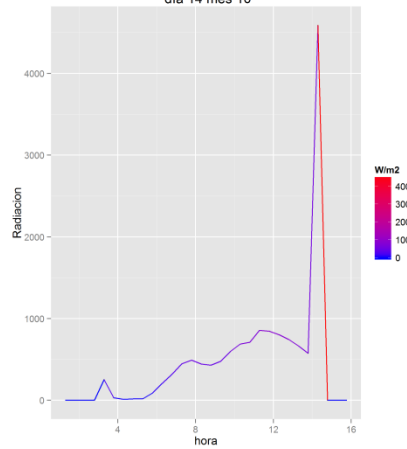


Día 14 de Octubre

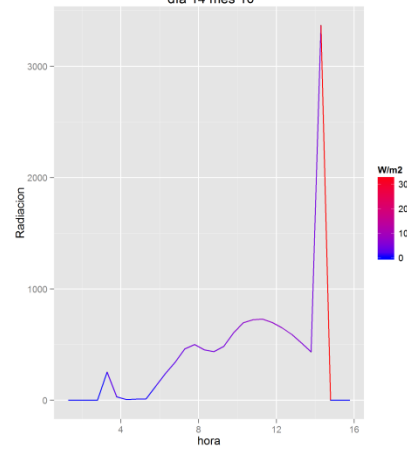
Radiación directa calculada según Erbs día 14 mes 10



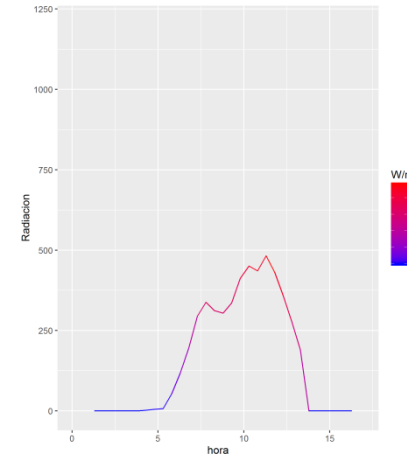
Radiación directa calculada según Orgill Hollands día 14 mes 10



Radiación directa calculada según Reindl2 día 14 mes 10

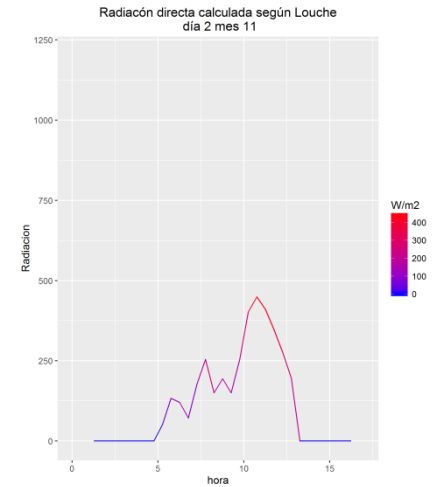
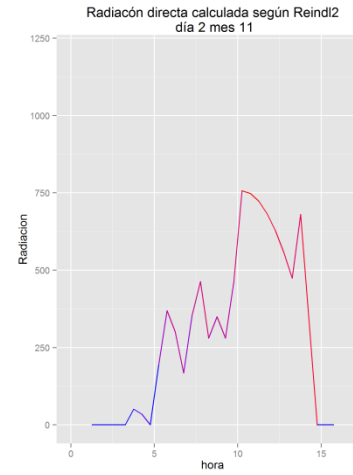
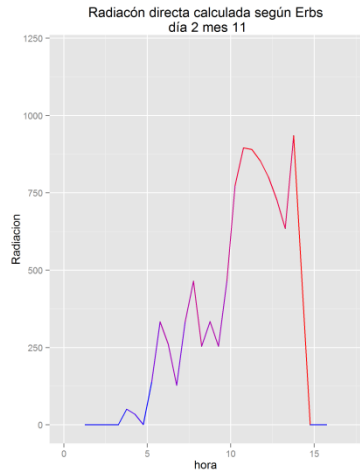


Radiación directa calculada según Louche día 14 mes 10

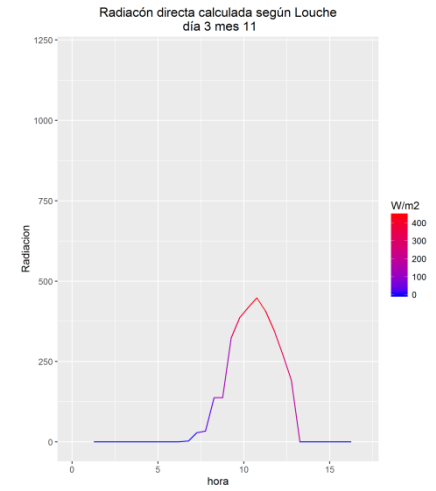
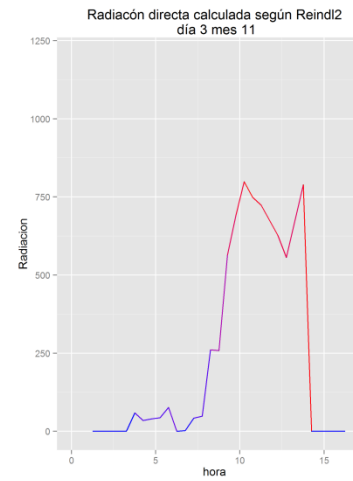
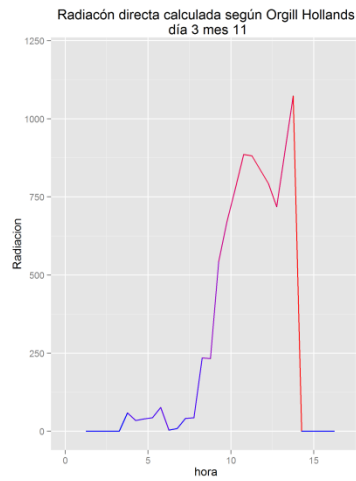
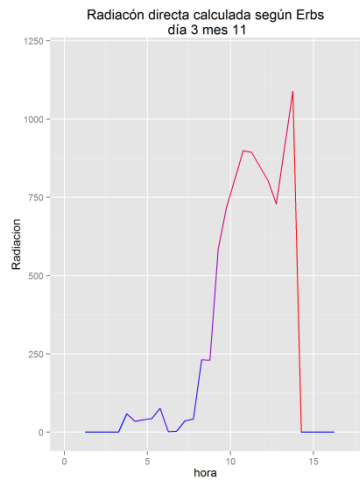


Observación pico de radiación inusual a las 16:30 los días 2, 3, 6 y 7 de Noviembre

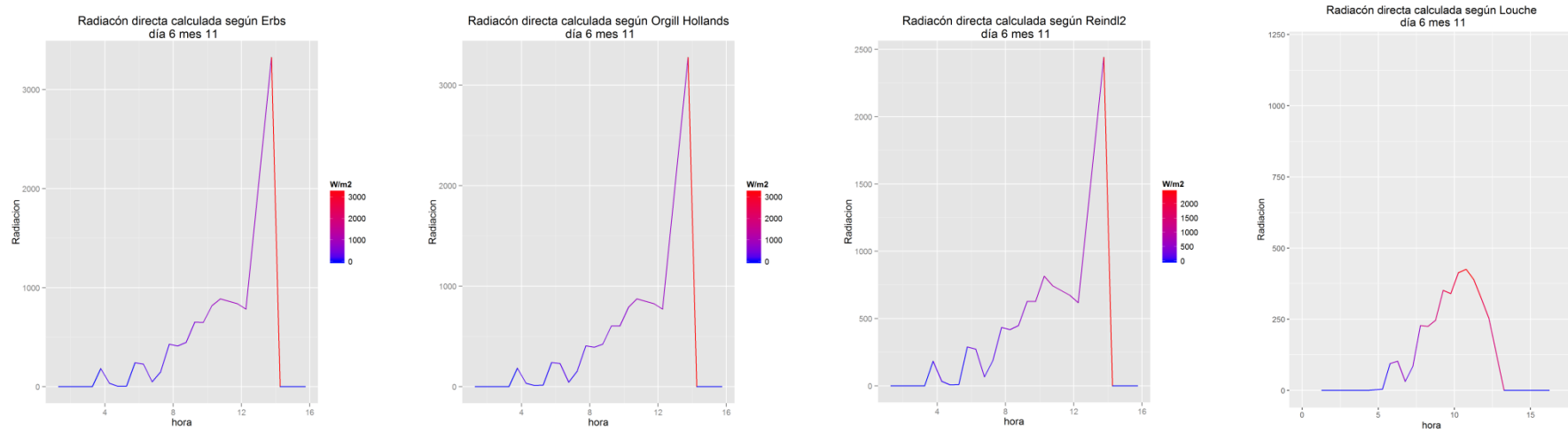
Día 2 de Noviembre



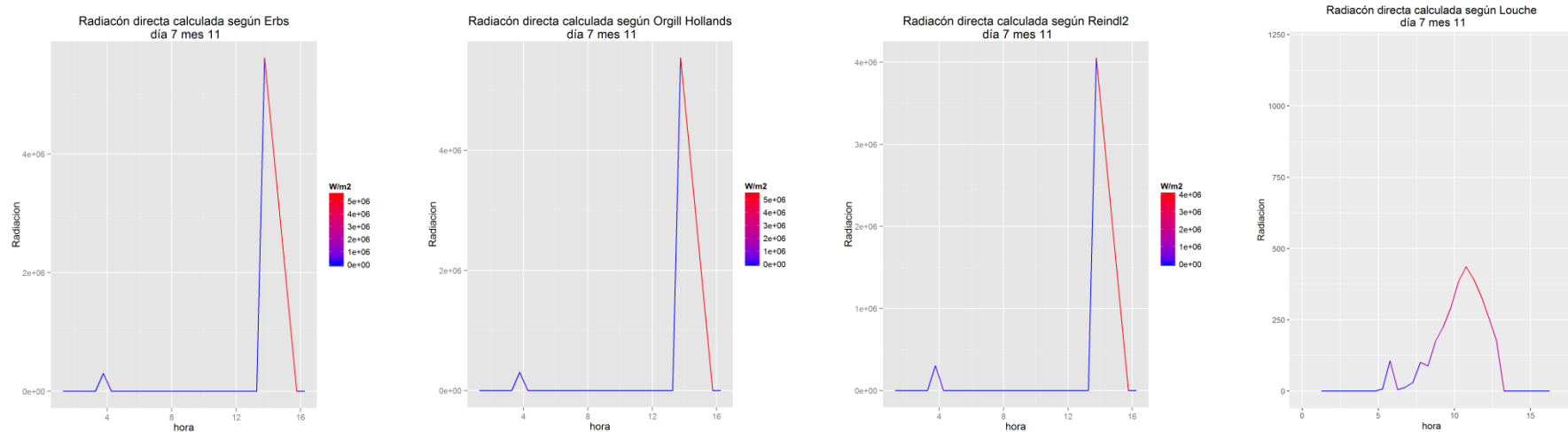
Día 3 de Noviembre



Día 6 de Noviembre

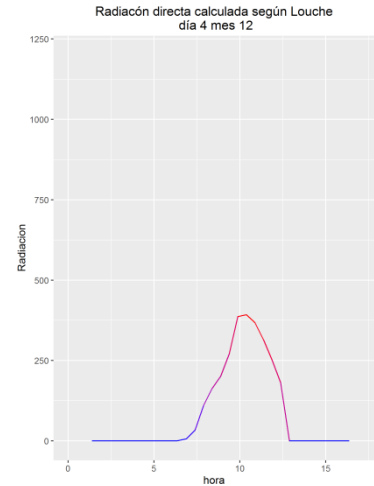
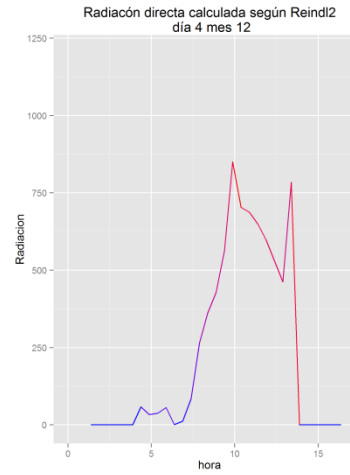
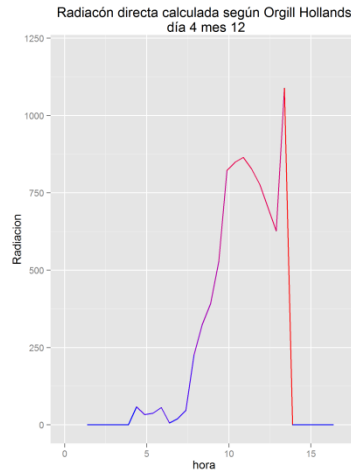
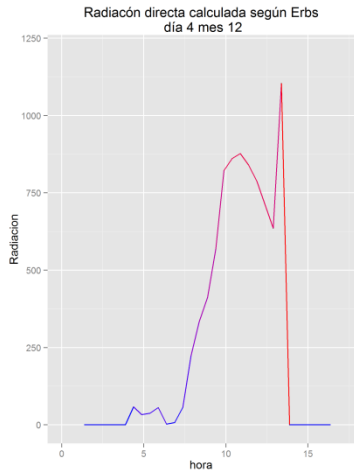


Día 7 de Noviembre

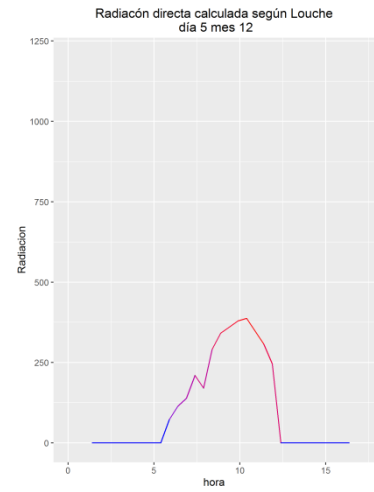
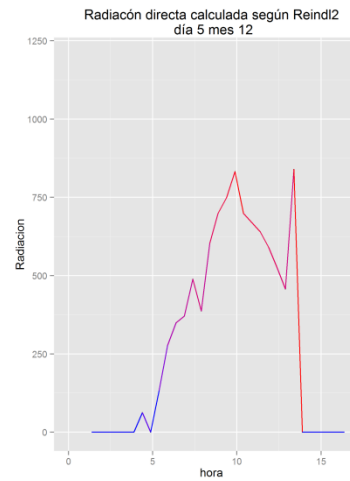
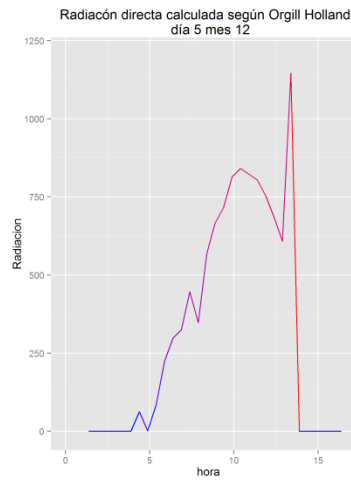
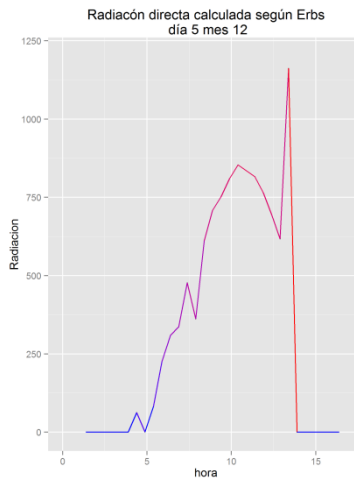


Observación pico de radiación inusual a las 16:00 los días 4, 5, 8, 9, 12, 15, 17, 18, 19 y 21 de Diciembre

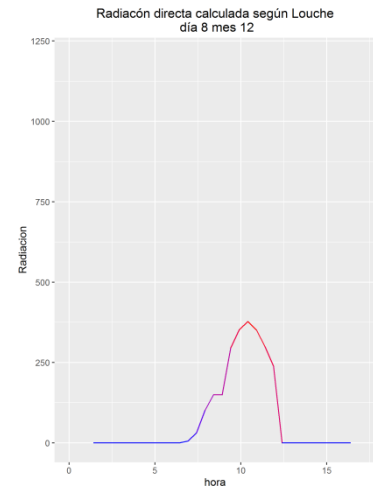
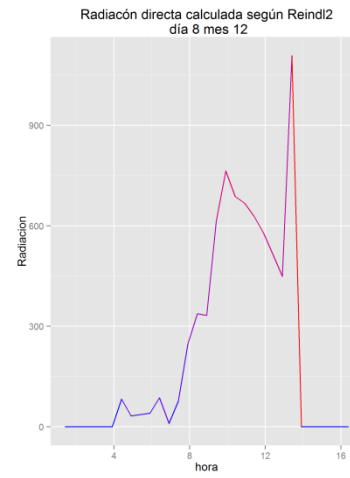
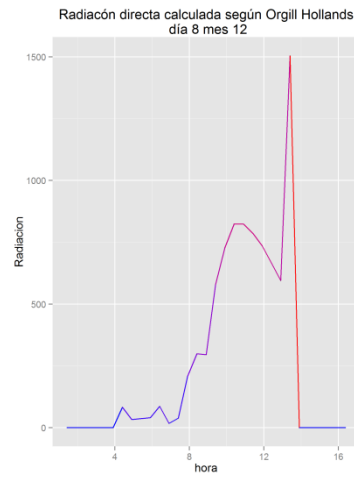
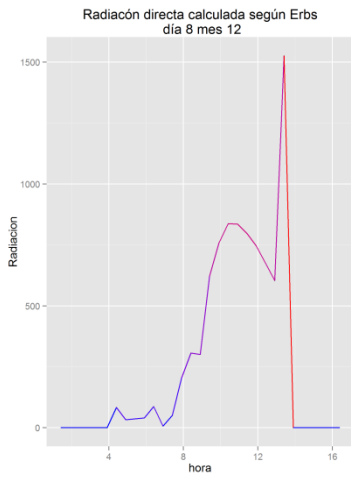
Día 4 de Diciembre



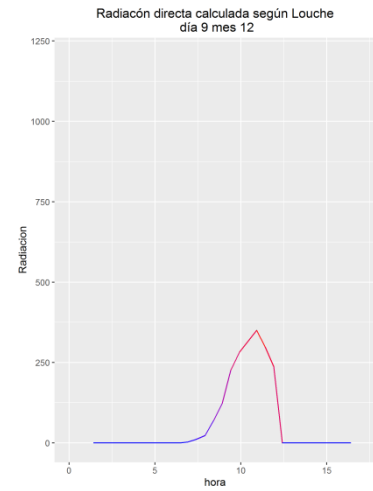
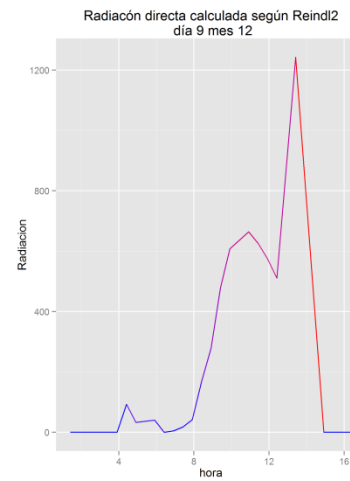
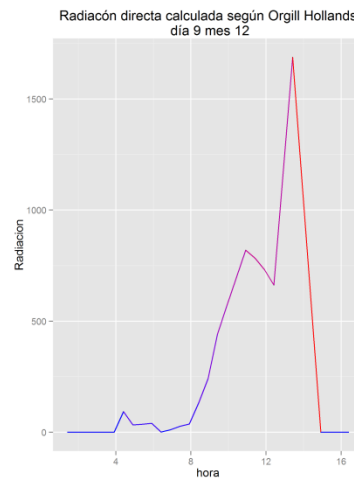
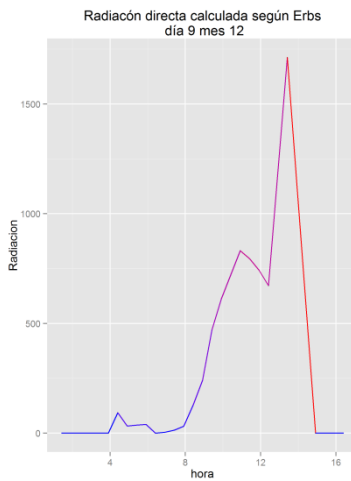
Día 5 de Diciembre



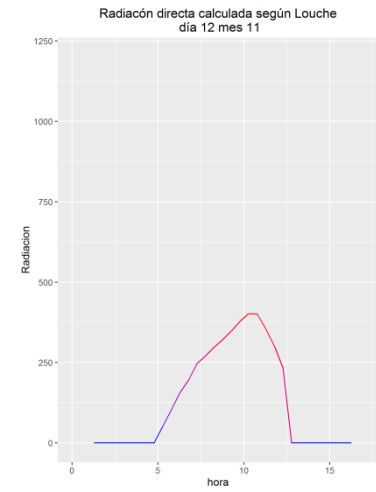
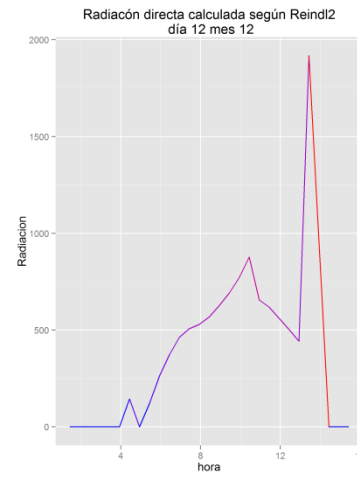
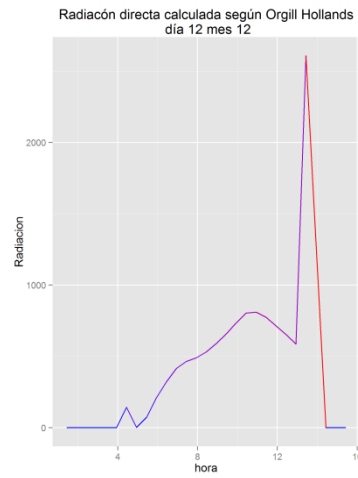
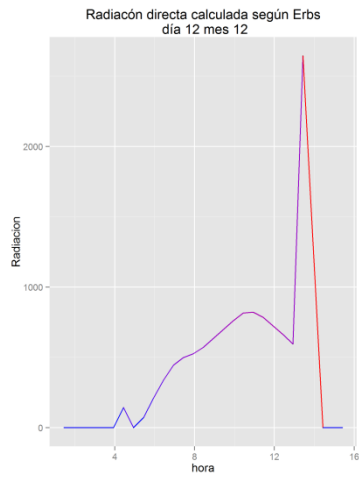
Día 8 de Diciembre



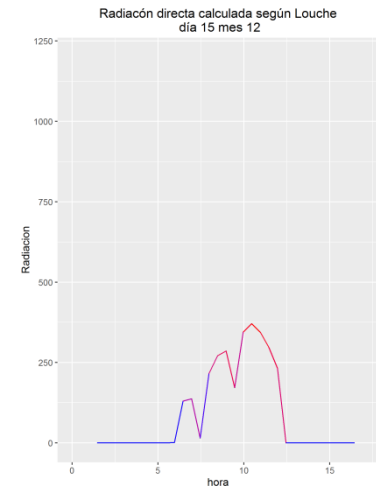
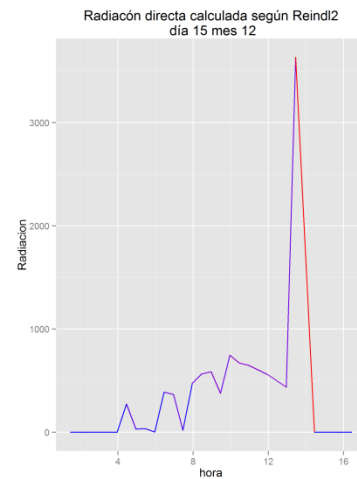
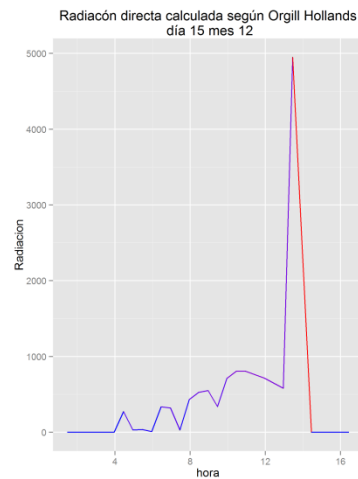
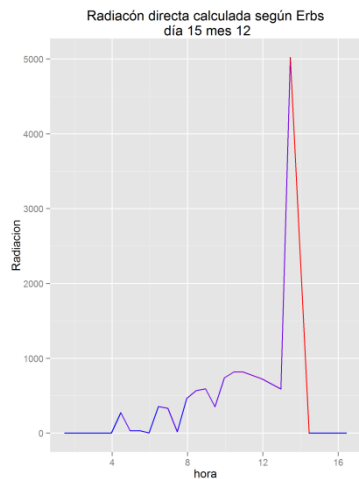
Día 9 de Diciembre



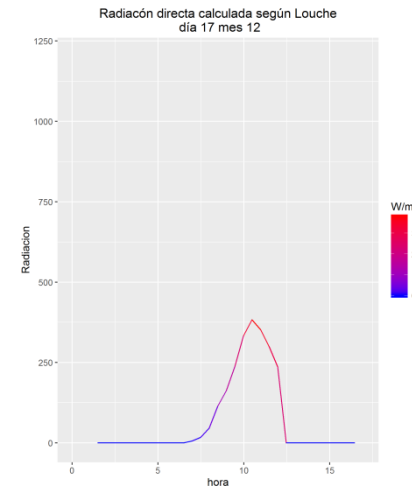
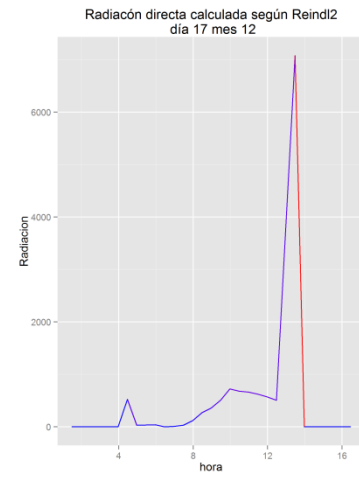
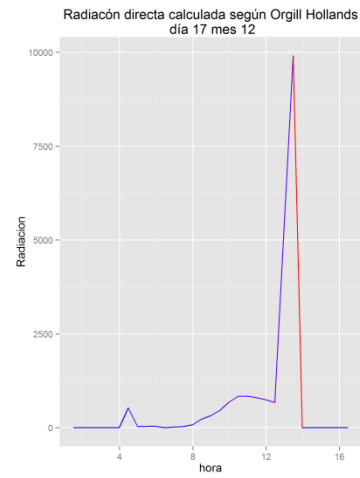
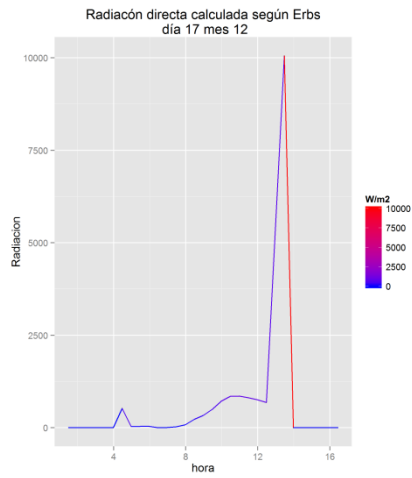
Día 12 de Diciembre



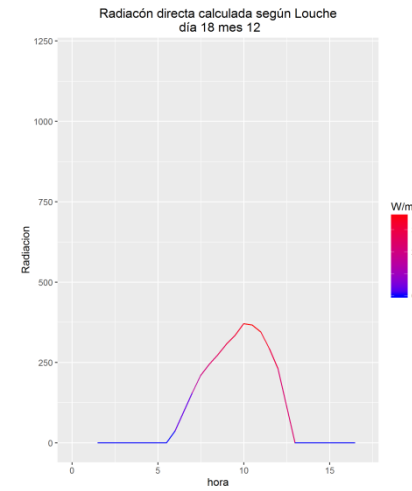
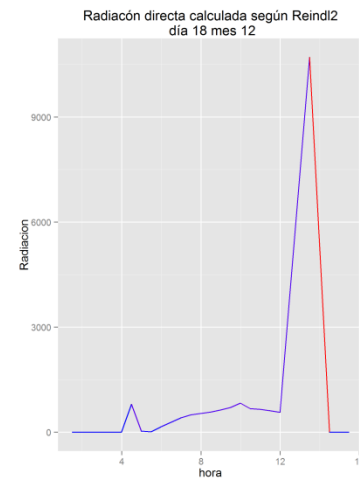
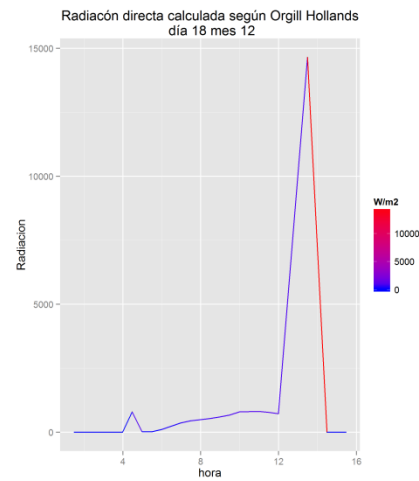
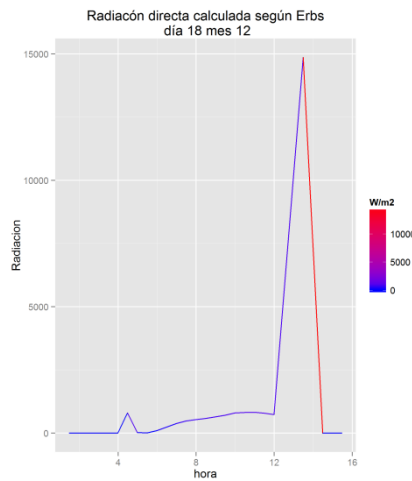
Día 15 de Diciembre



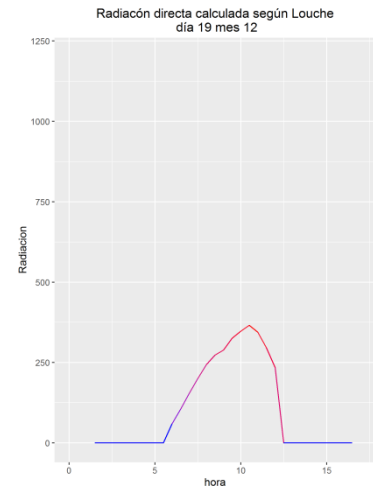
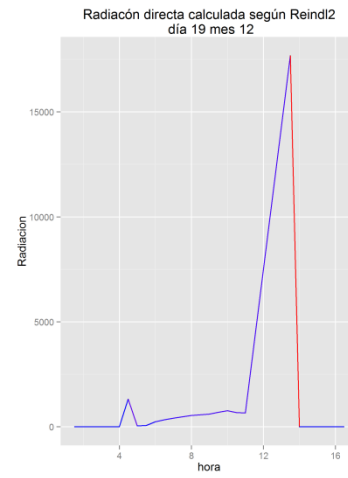
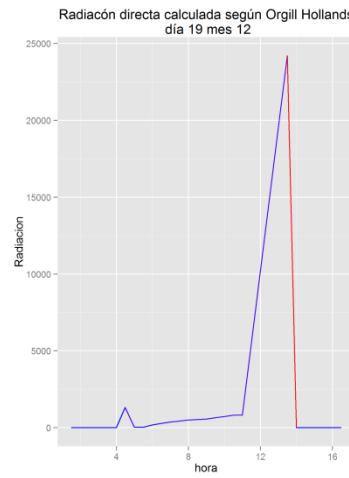
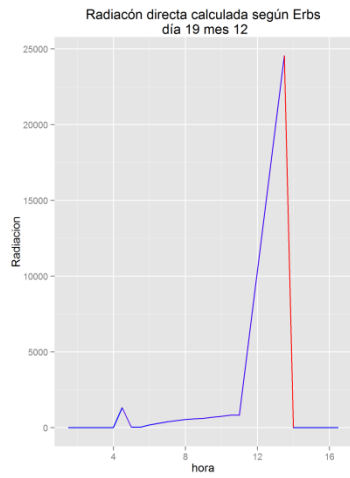
Día 17 de Diciembre



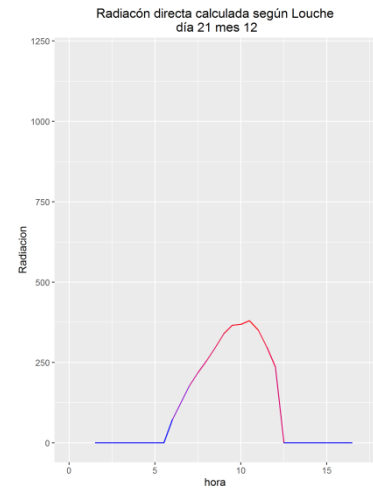
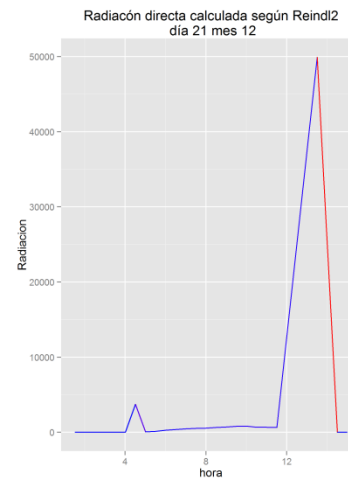
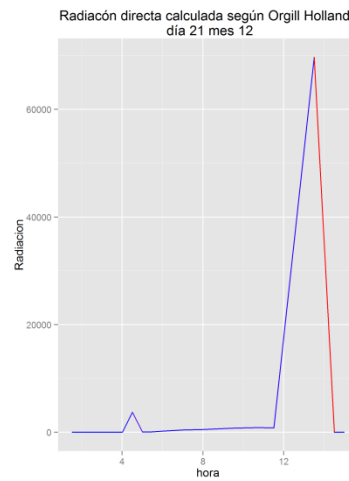
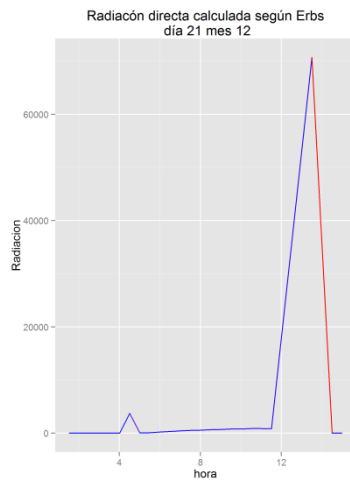
Día 18 de Diciembre



Día 19 de Diciembre

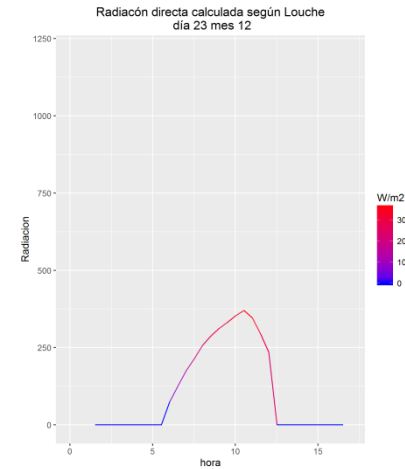
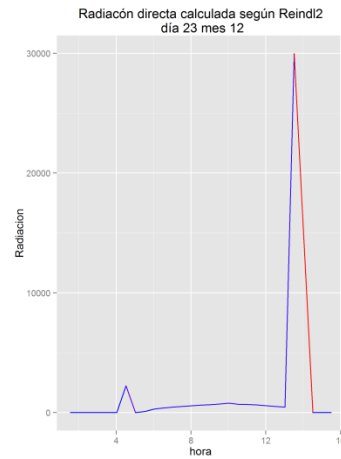
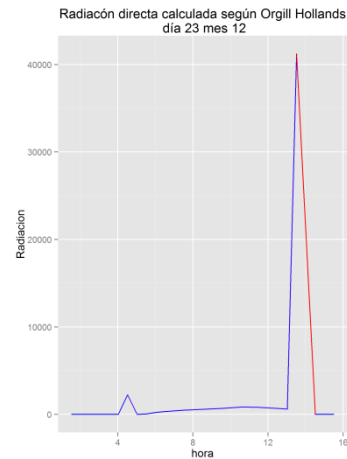
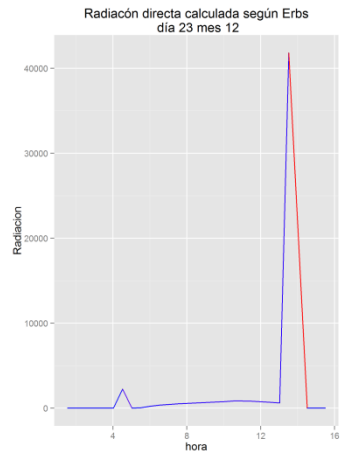


Día 21 de Diciembre

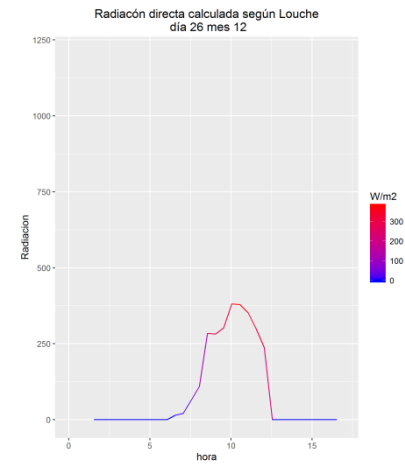
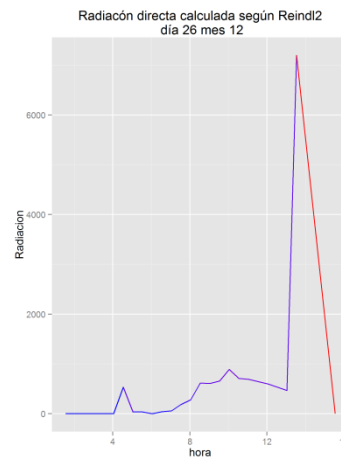
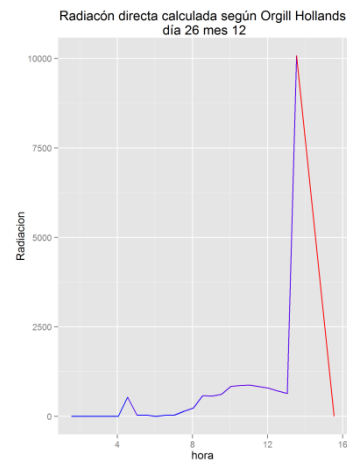
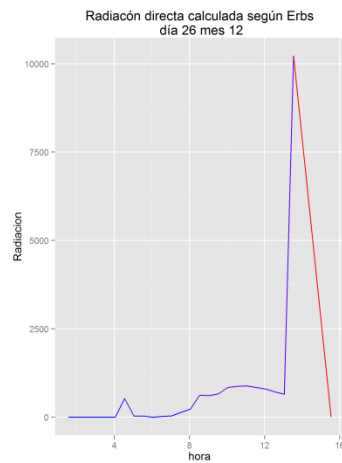


Observación pico de radiación inusual a las 16:30 los días 23 y 26 de Diciembre

Día 23 de Diciembre

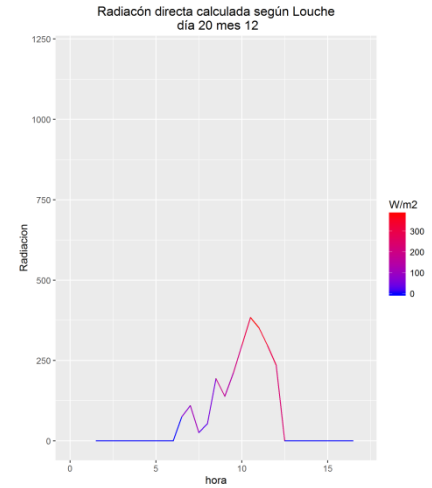
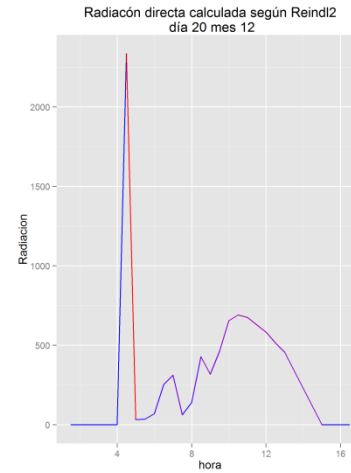
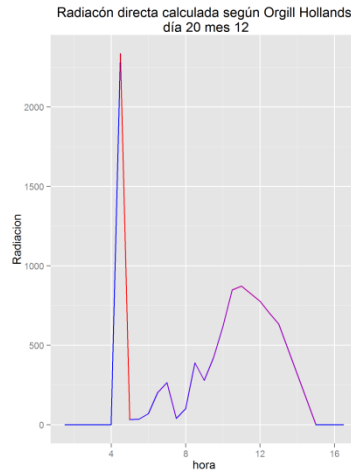
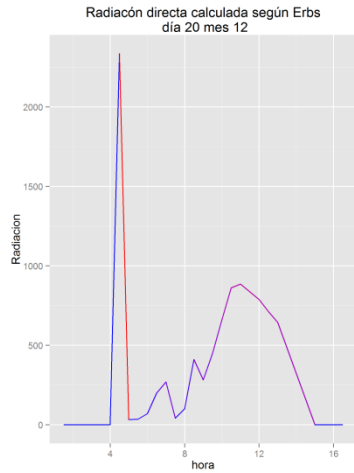


Día 26 de Diciembre

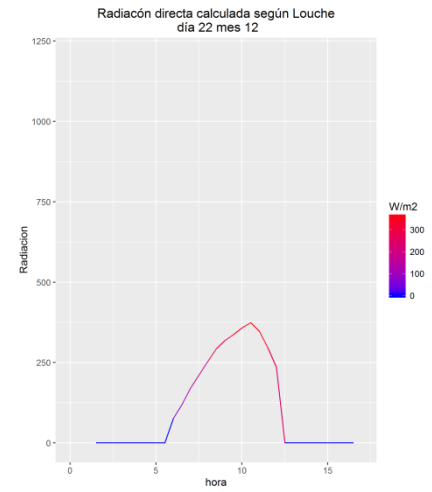
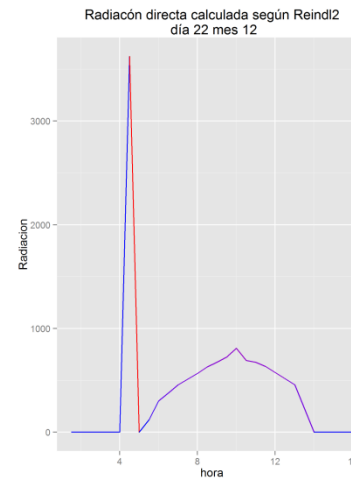
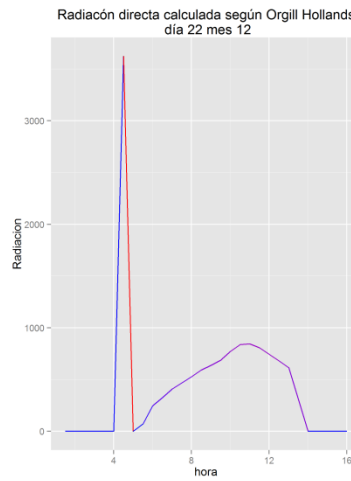
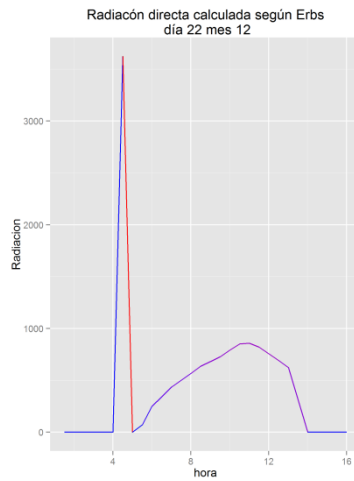


Observación pico de radiación inusual a las 7:30 los días 20, 22, 24 y 25 de Diciembre

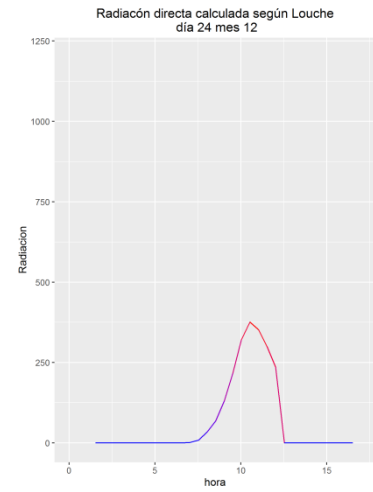
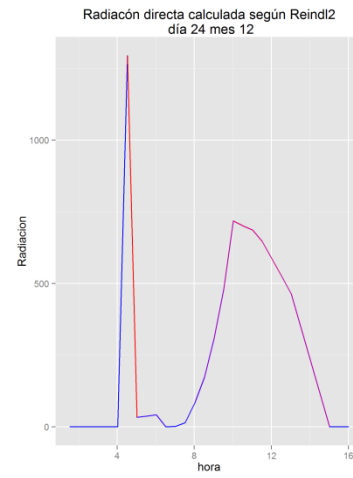
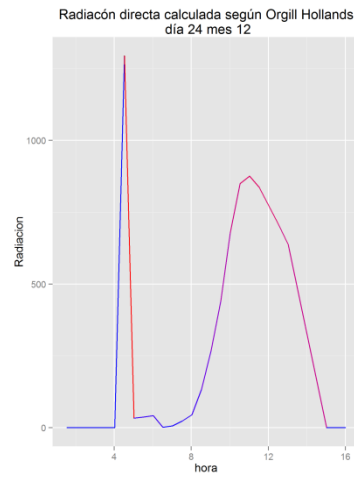
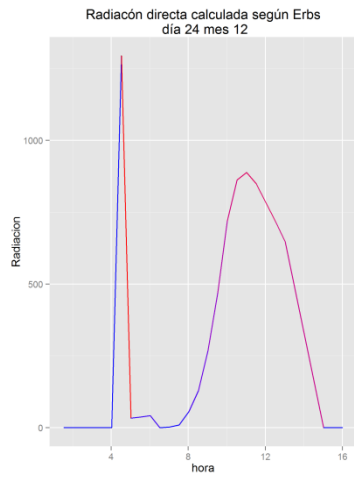
Día 20 de Diciembre



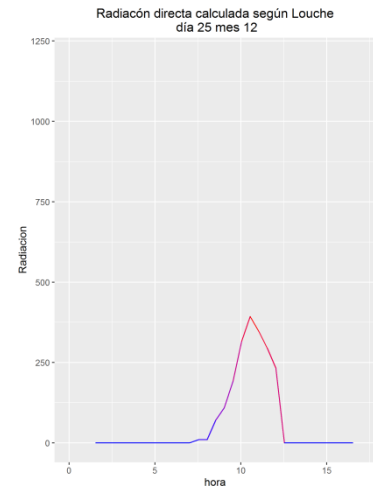
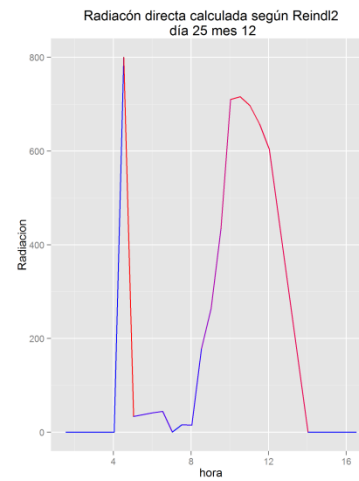
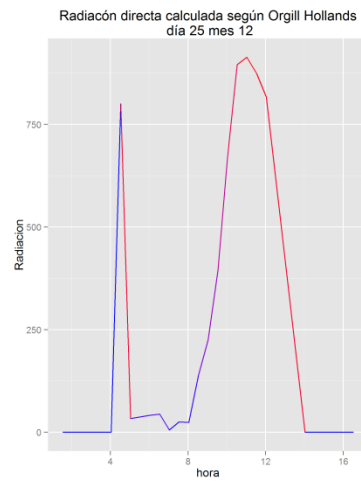
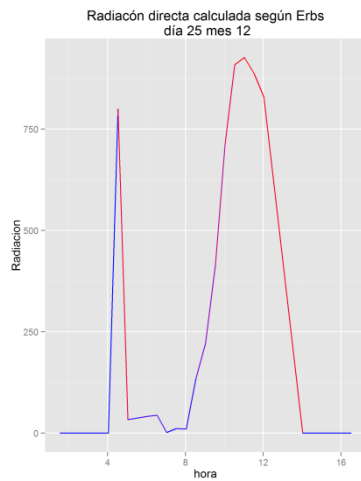
Día 22 de Diciembre



Día 24 de Diciembre



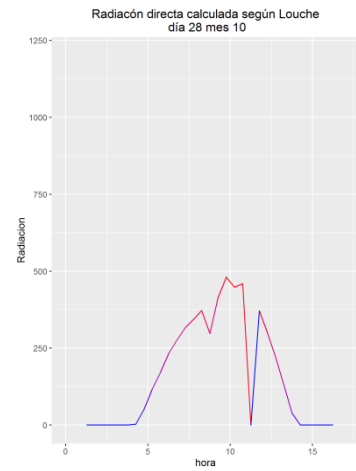
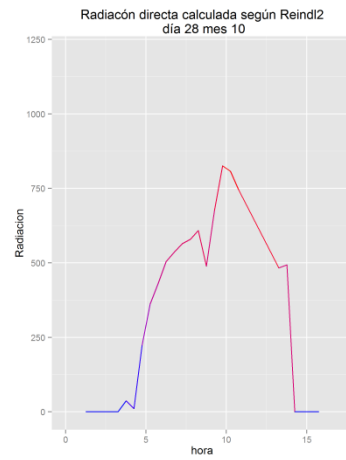
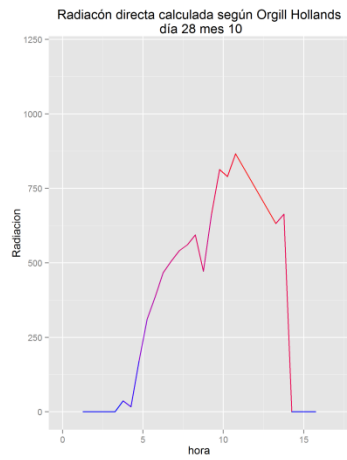
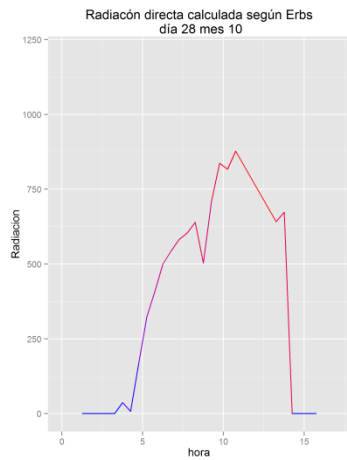
Día 25 de Diciembre



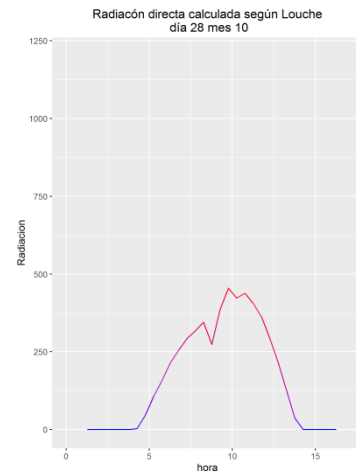
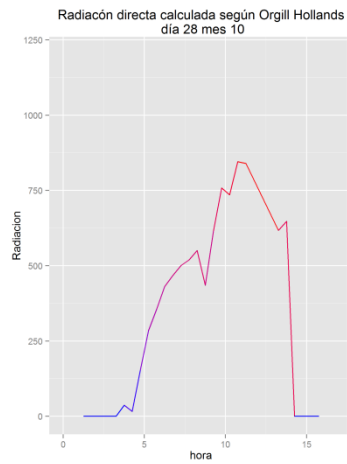
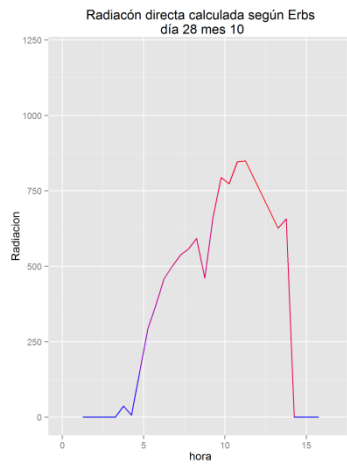
Comparación de gráficas obtenidas con los datos originales y con los datos de entrada modificados

Día 28 de Octubre

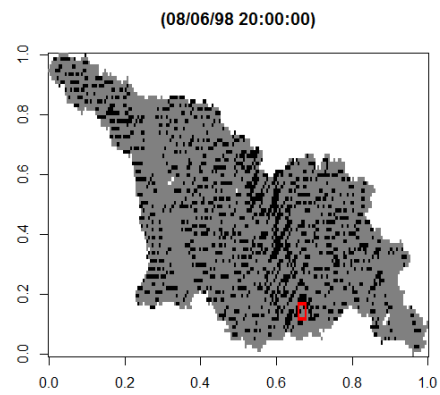
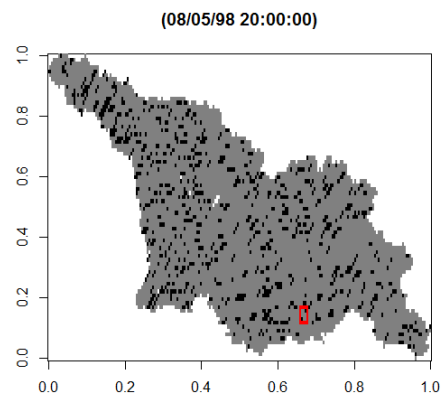
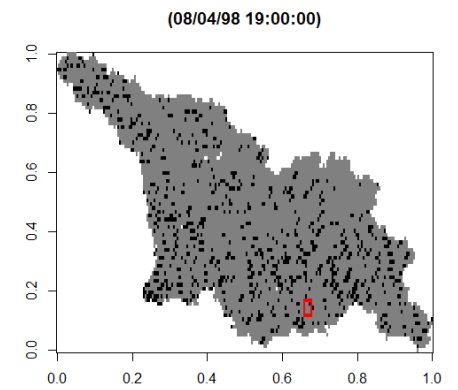
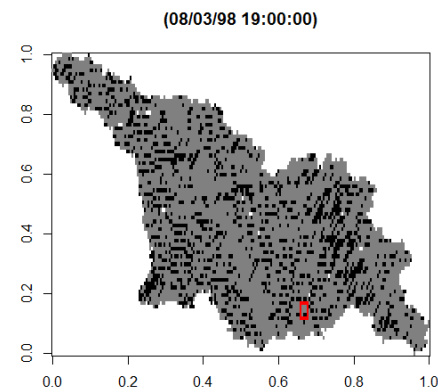
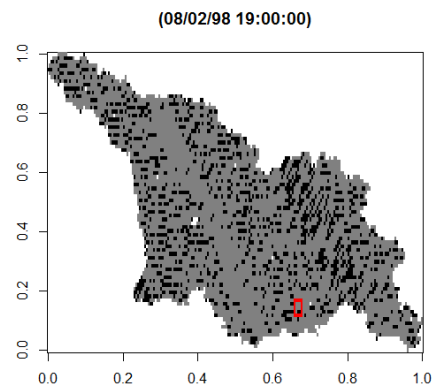
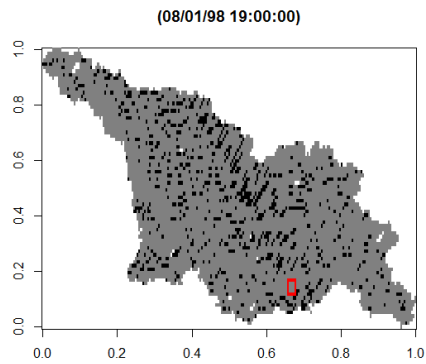
Datos originales



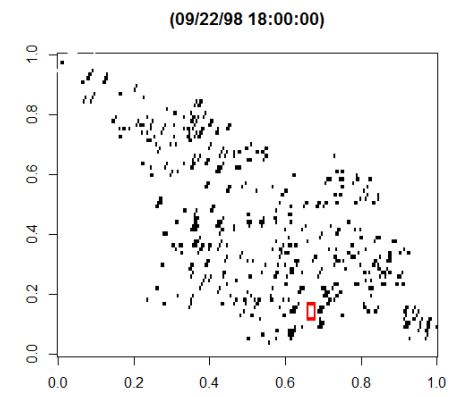
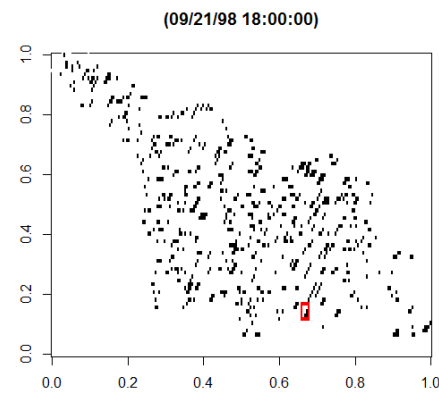
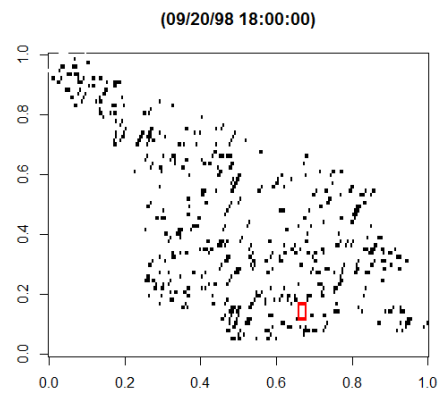
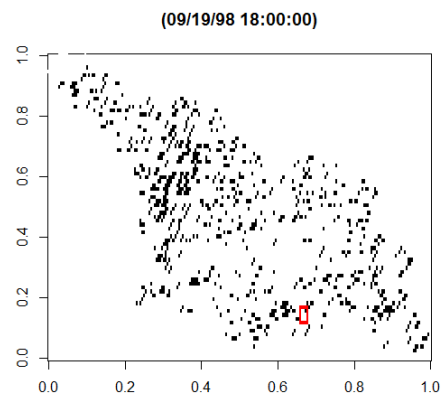
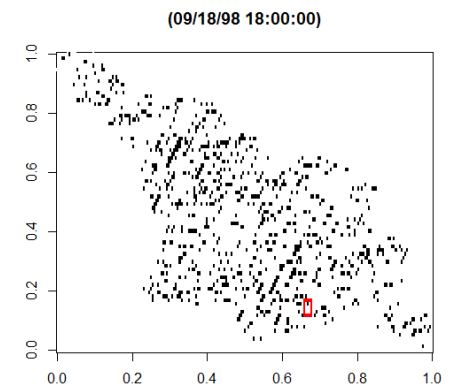
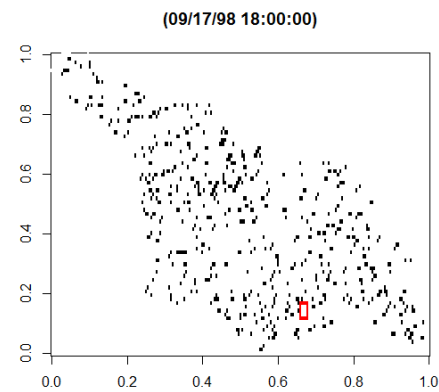
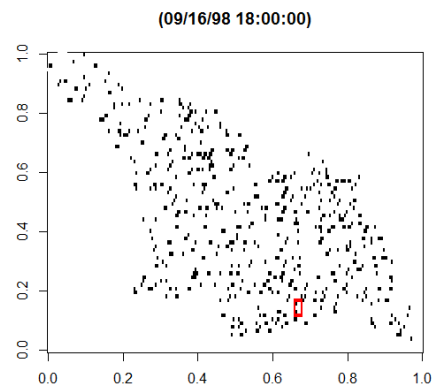
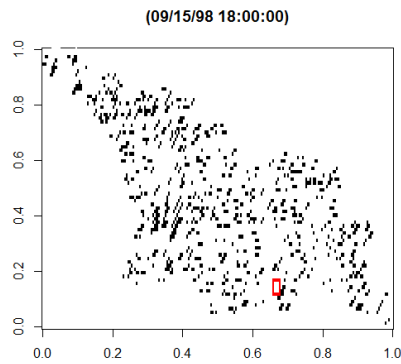
Datos modificados



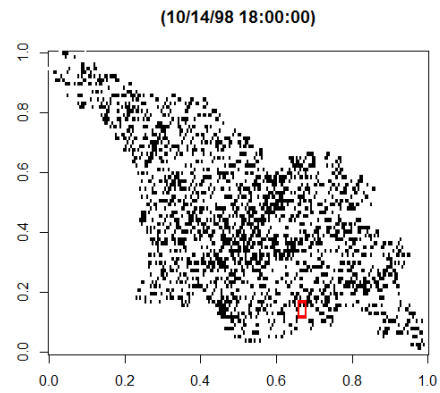
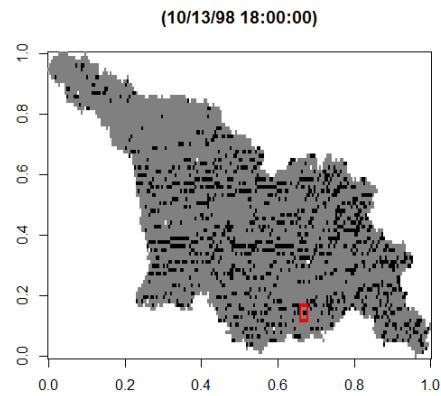
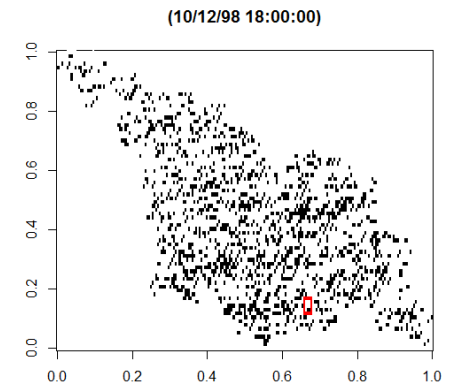
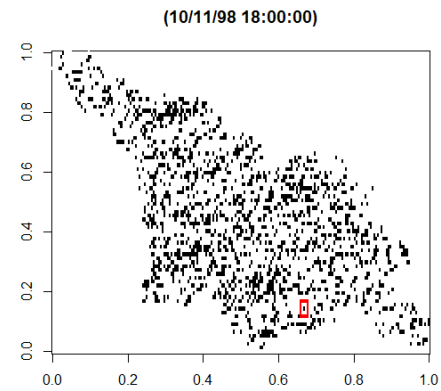
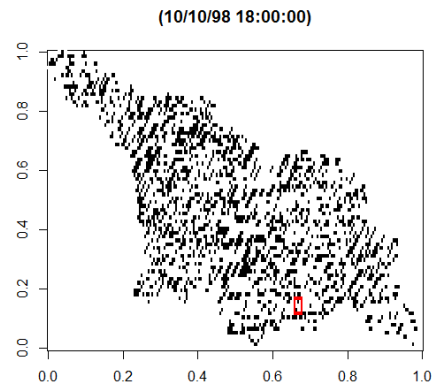
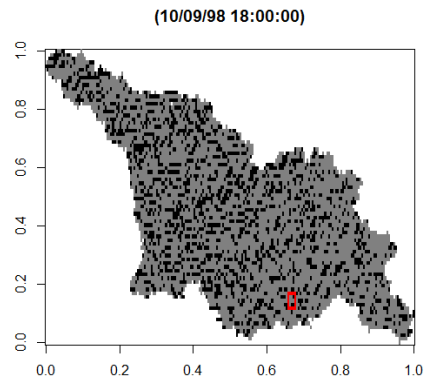
Imágenes de anomalía del 1 al 6 de Agosto



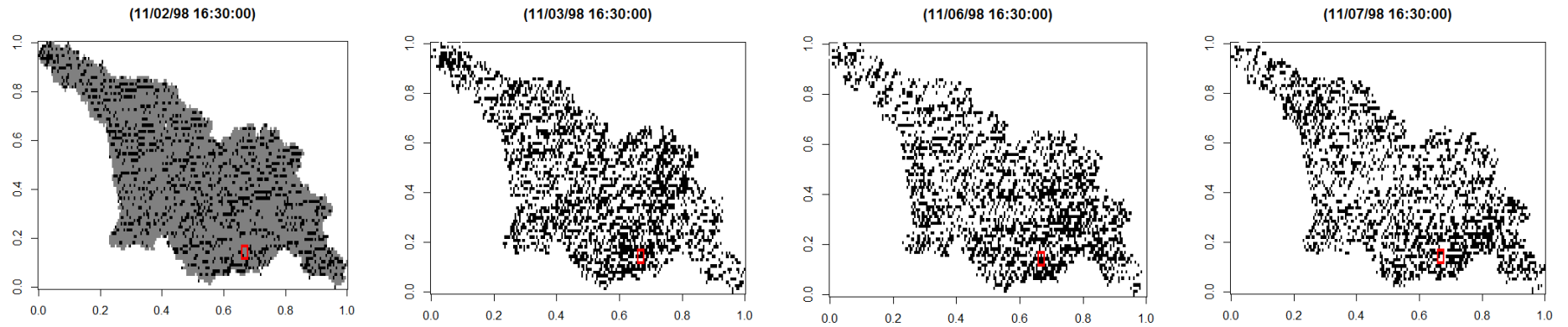
Imágenes de anomalía del 15 al 22 de Septiembre



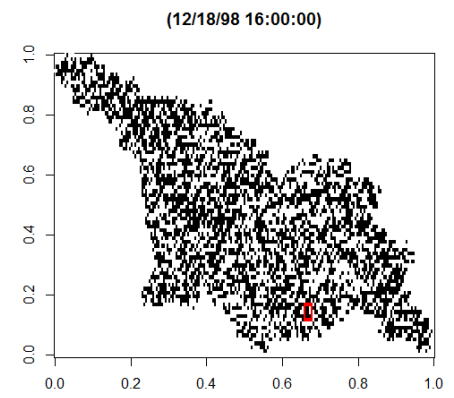
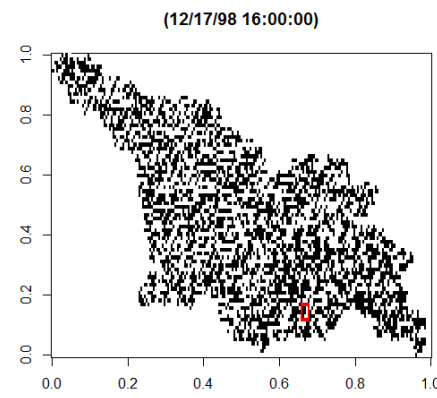
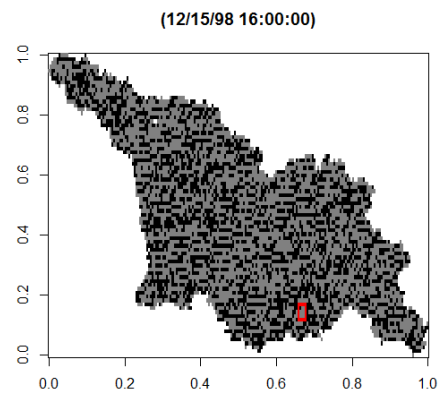
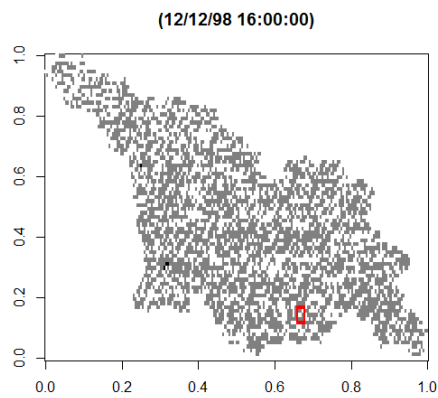
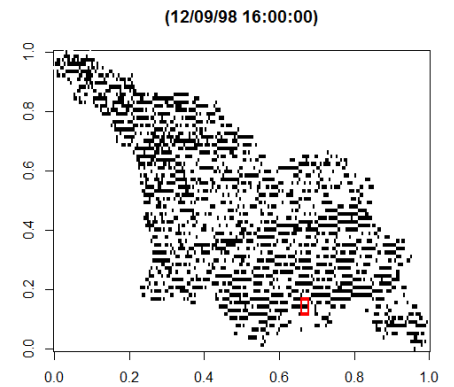
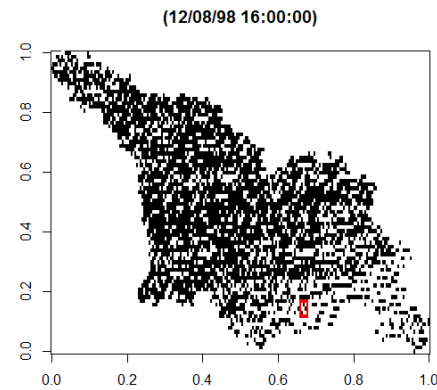
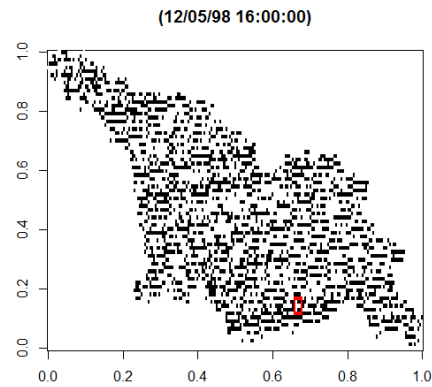
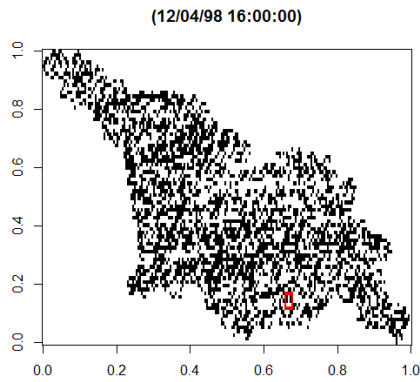
Imágenes de anomalía del 9 al 14 de Octubre

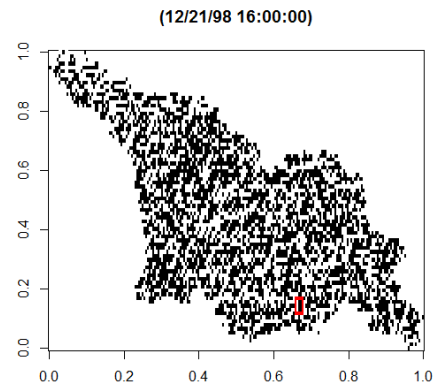
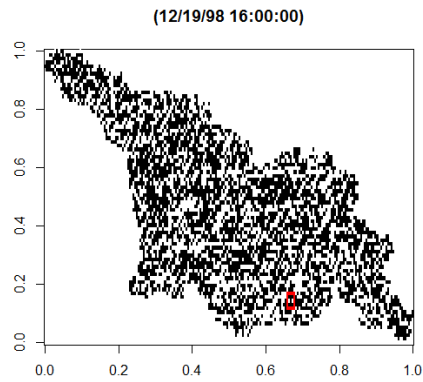


Imágenes de anomalía de los días 2, 3, 6 y 7 de Noviembre

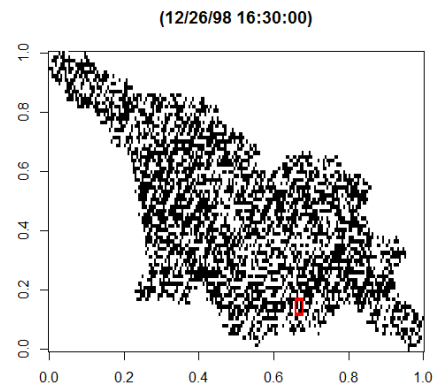
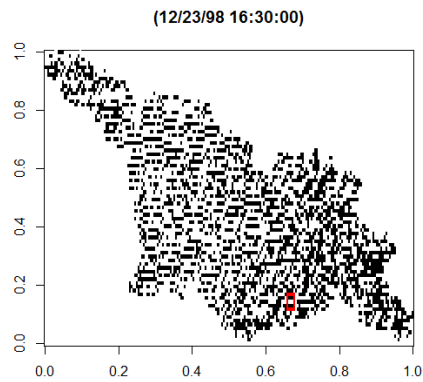


Imágenes de anomalías de los días 4, 5, 8, 9, 12, 15, 17, 18, 19 y 21 de Diciembre

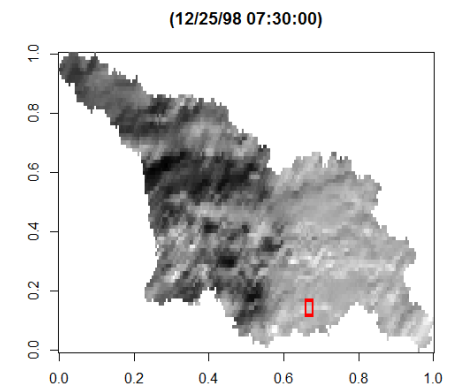
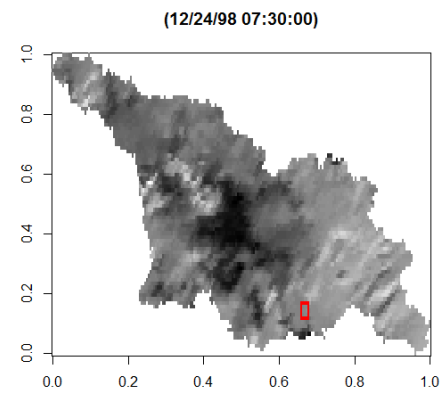
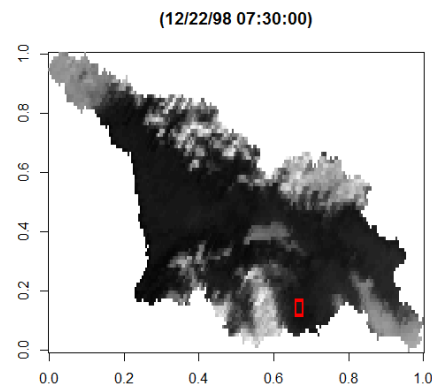
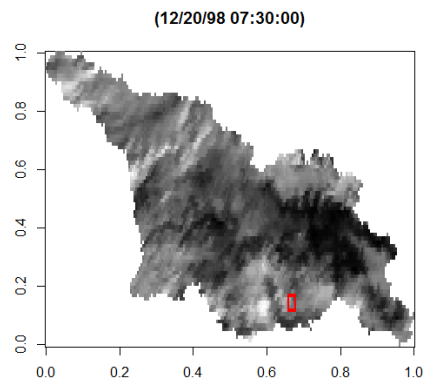




Imágenes de anomalías de los días 23 y 26 de Diciembre

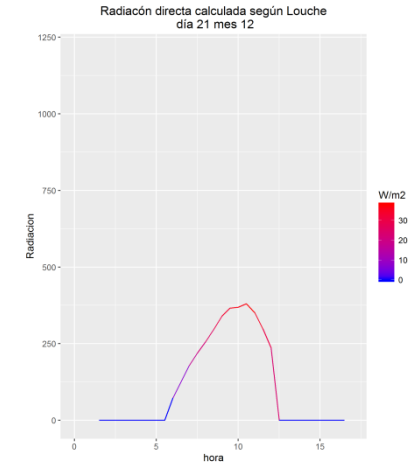
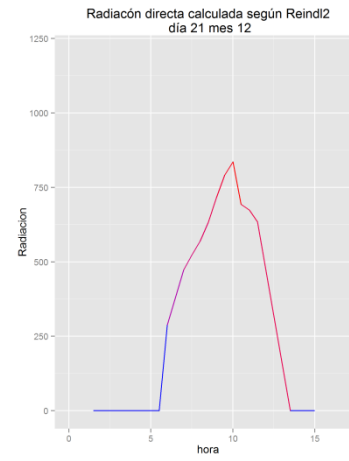
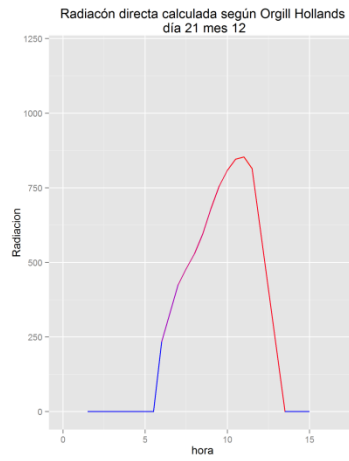
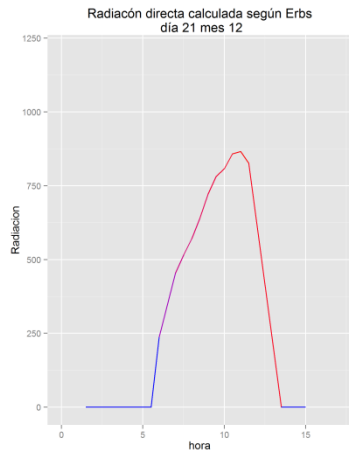


Imágenes de anomalías de los días 20, 22, 24 y 25 de Diciembre

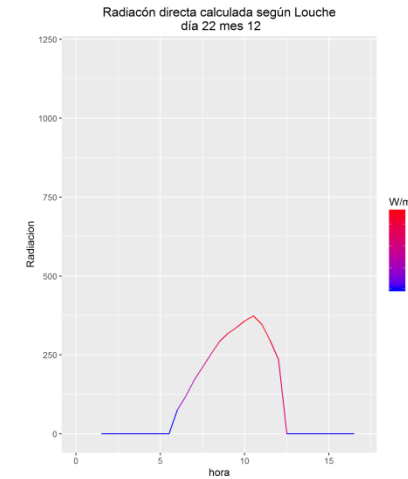
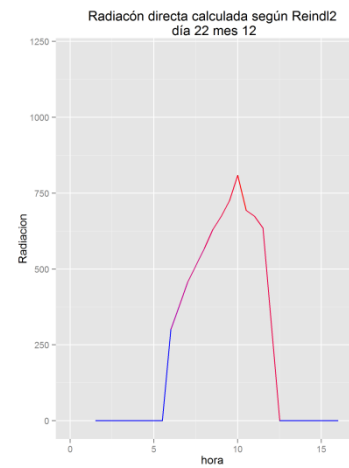
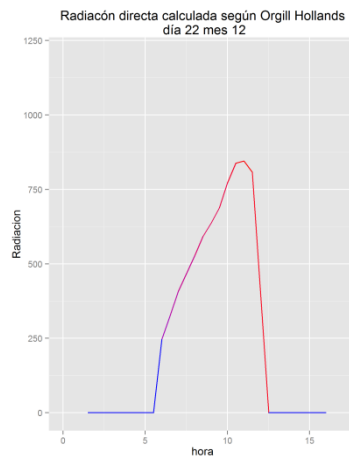
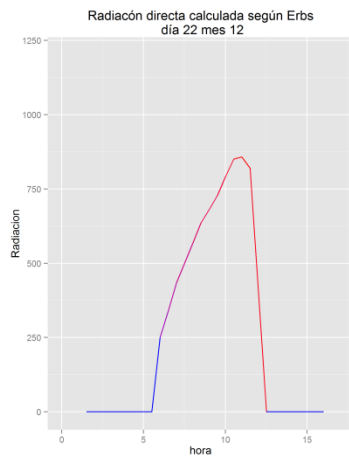


Resultados obtenidos tras la modificación del código original

Día 21 de Diciembre

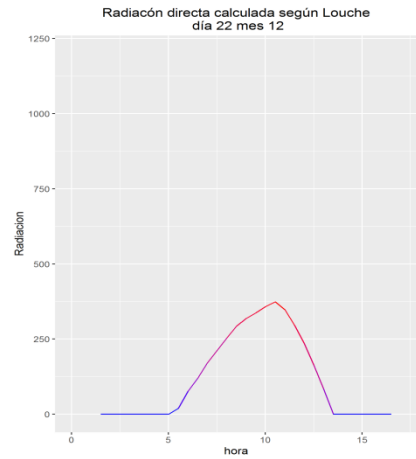
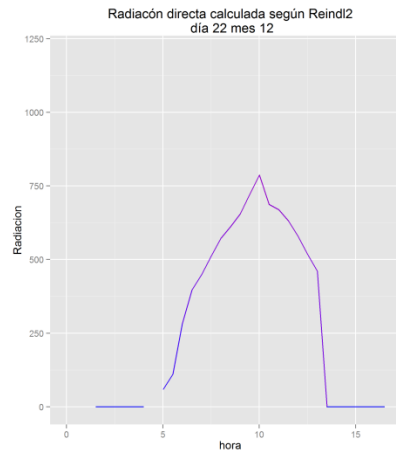
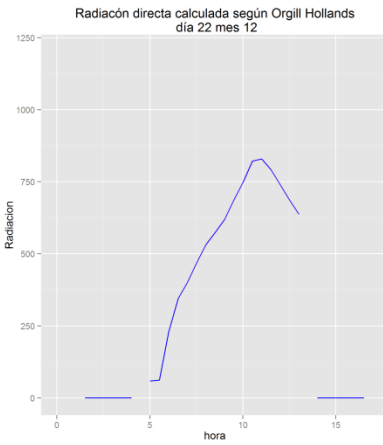
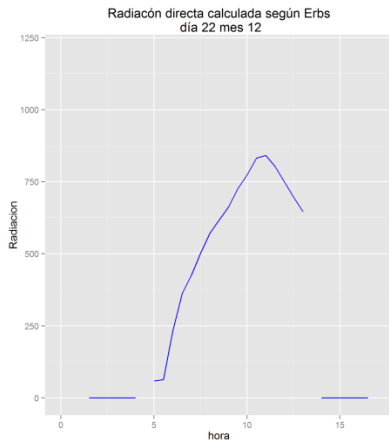


Día 22 de Diciembre

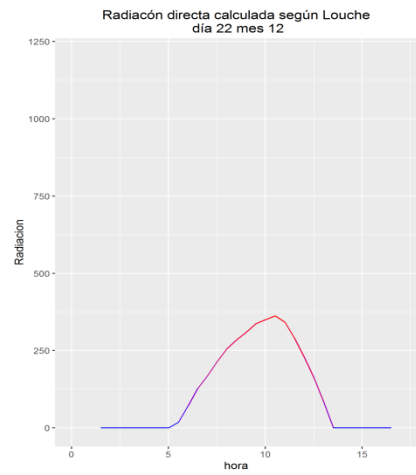
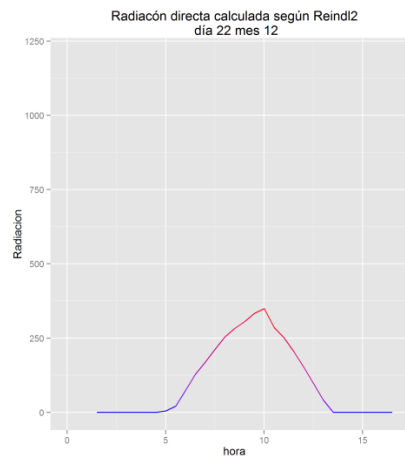
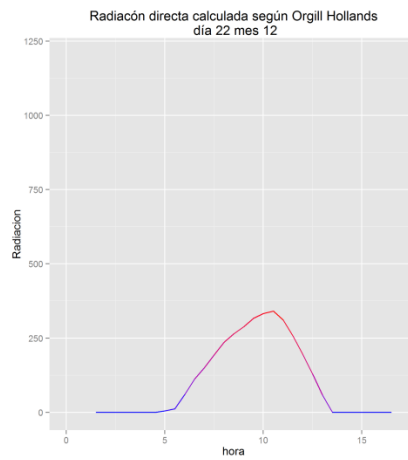
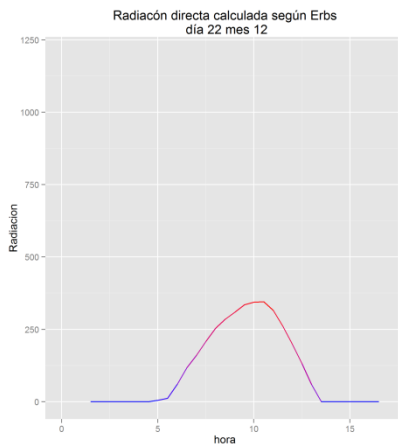


Comparación SOLIS - ESRA

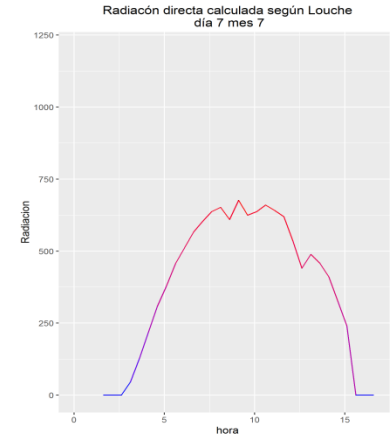
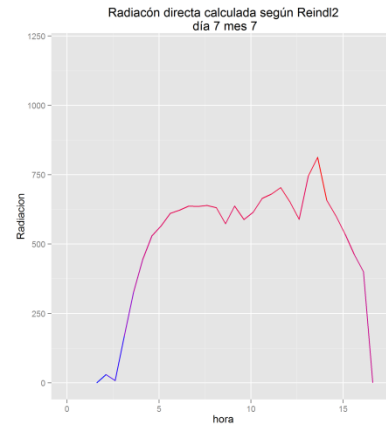
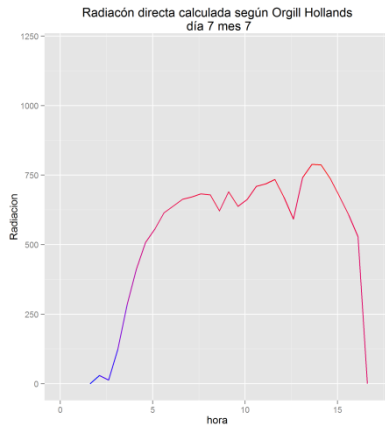
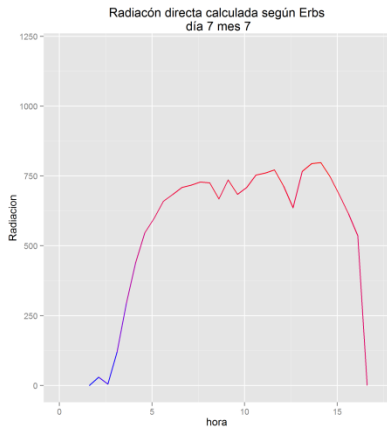
Día 22 de Diciembre
ESRA



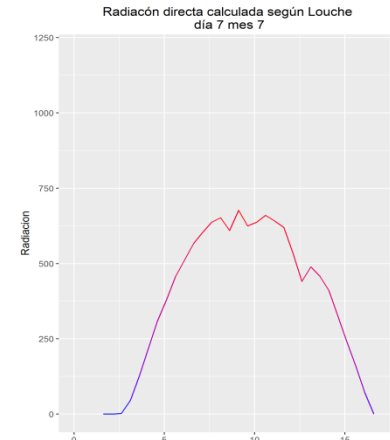
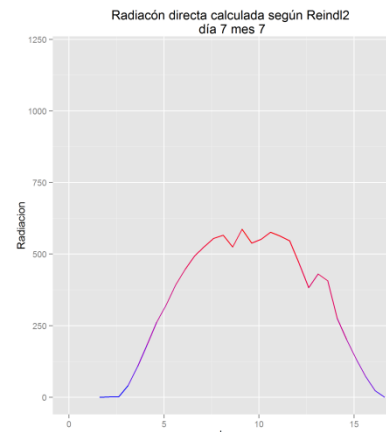
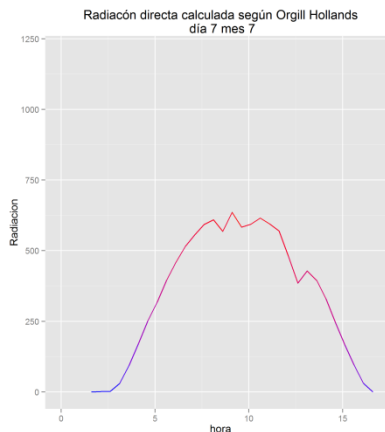
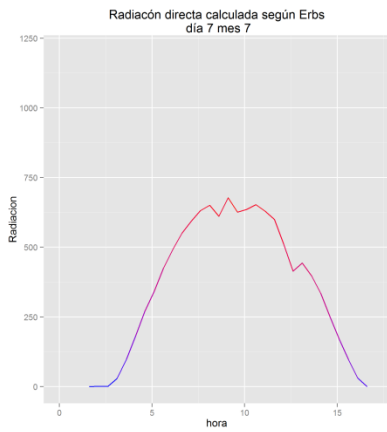
SOLIS



Día 7 de Julio
ESRA

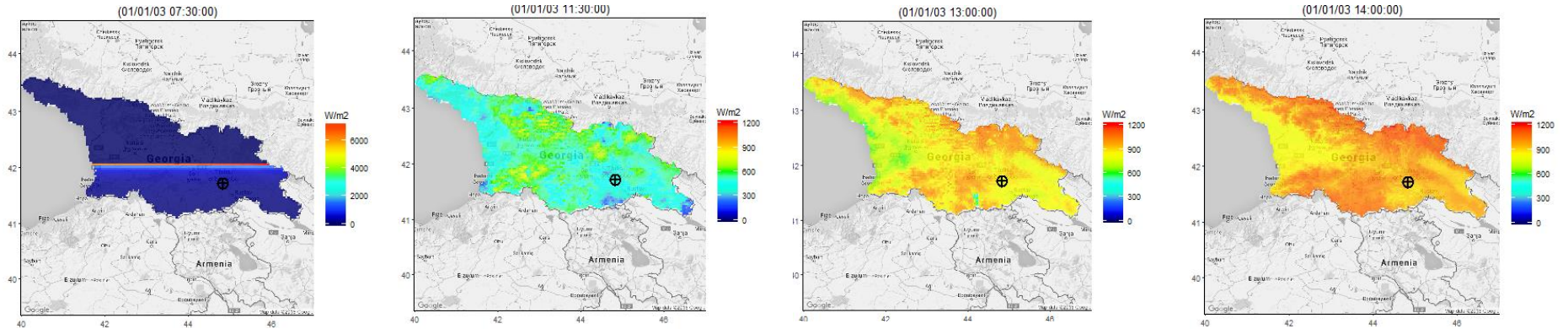


SOLIS

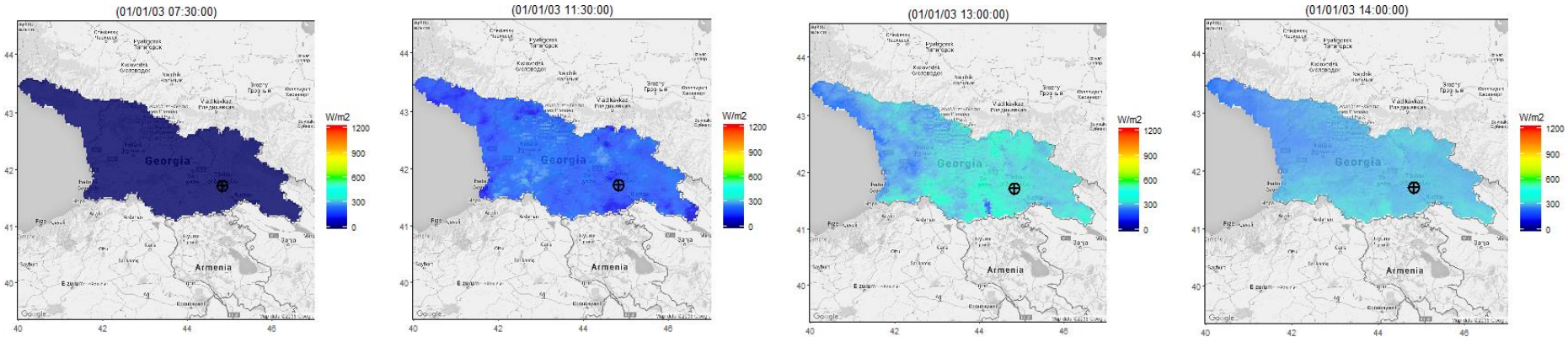


Comparación mapas de irradiancia directa

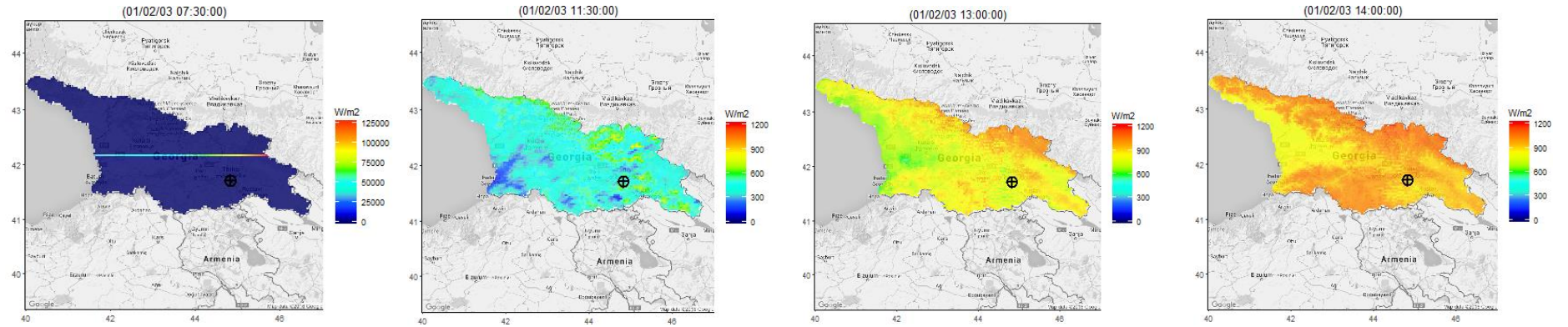
ESRA+ Erbs



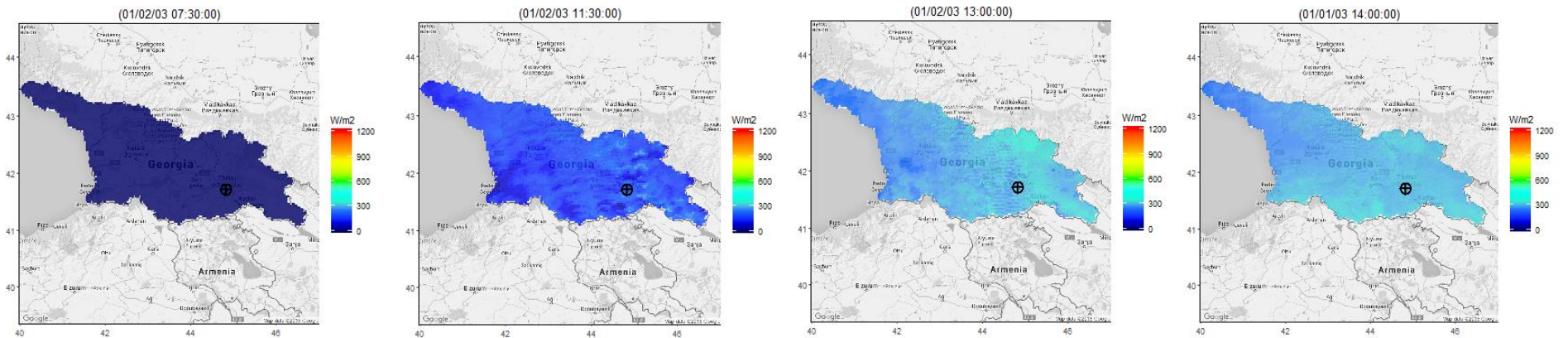
SOLIS + Erbs



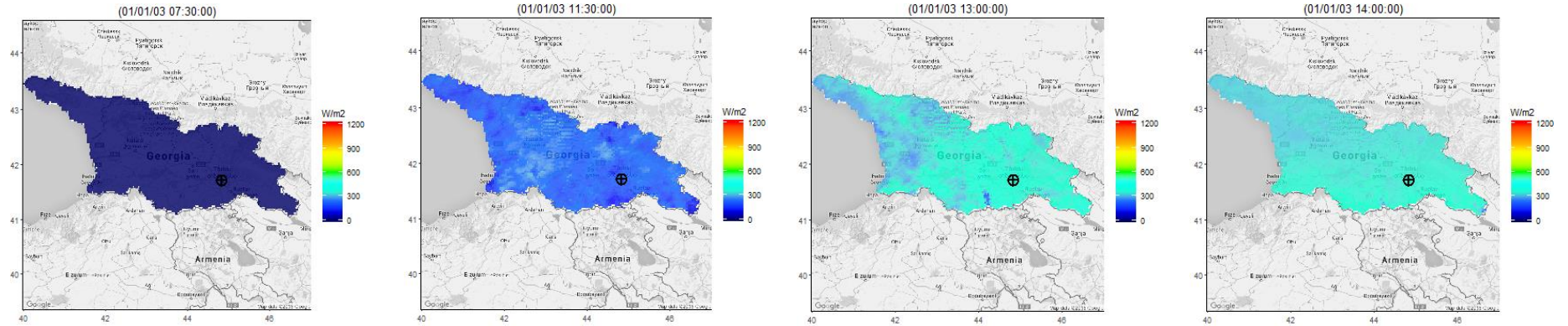
ESRA + Erbs



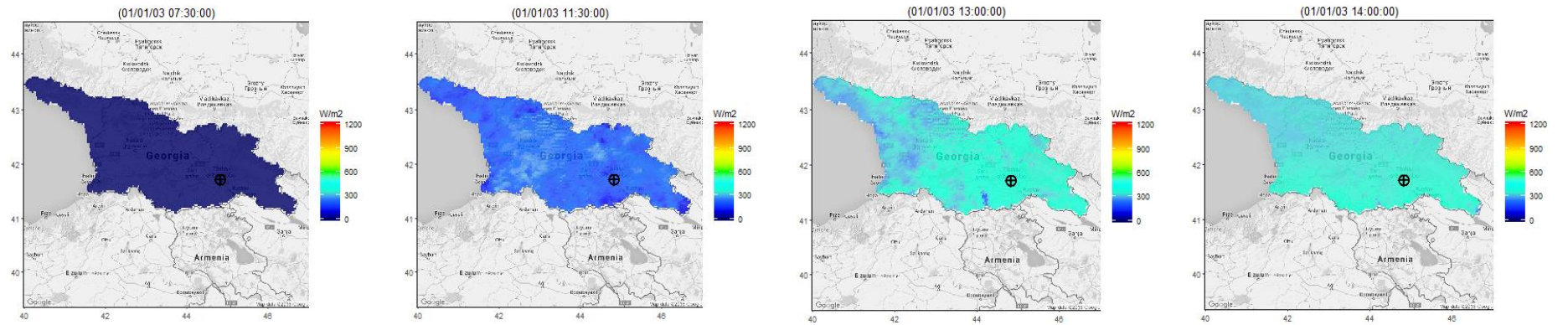
SOLIS + Erbs



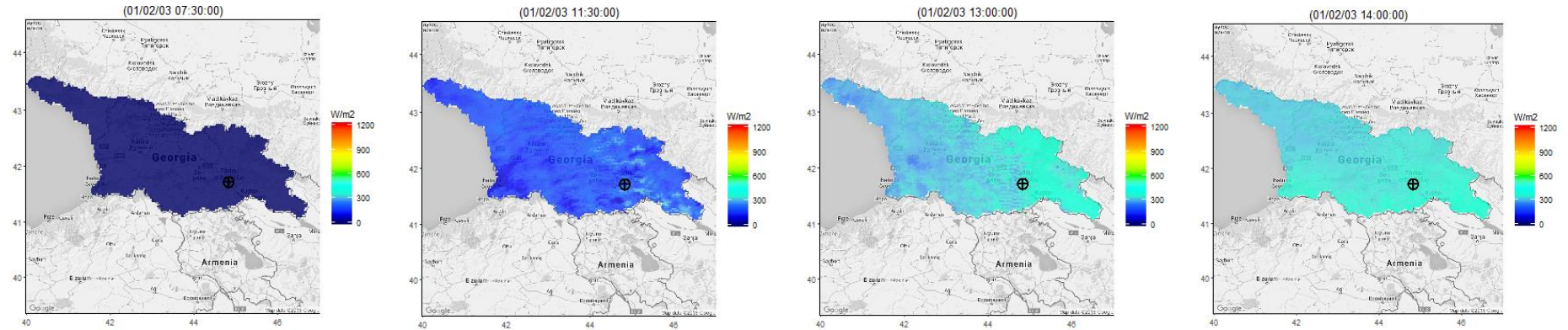
ESRA + Louche



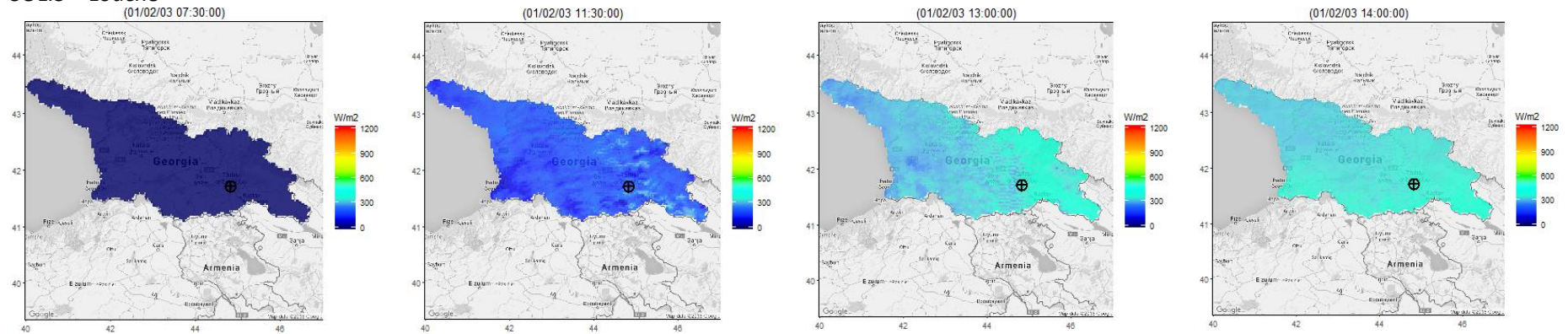
SOLIS + Louche



ESRA + Louche

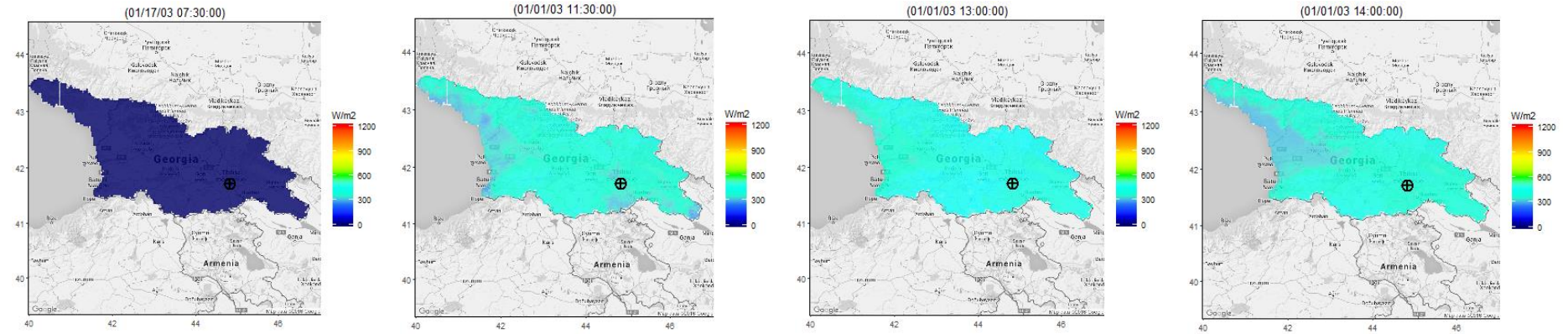


SOLIS + Louche

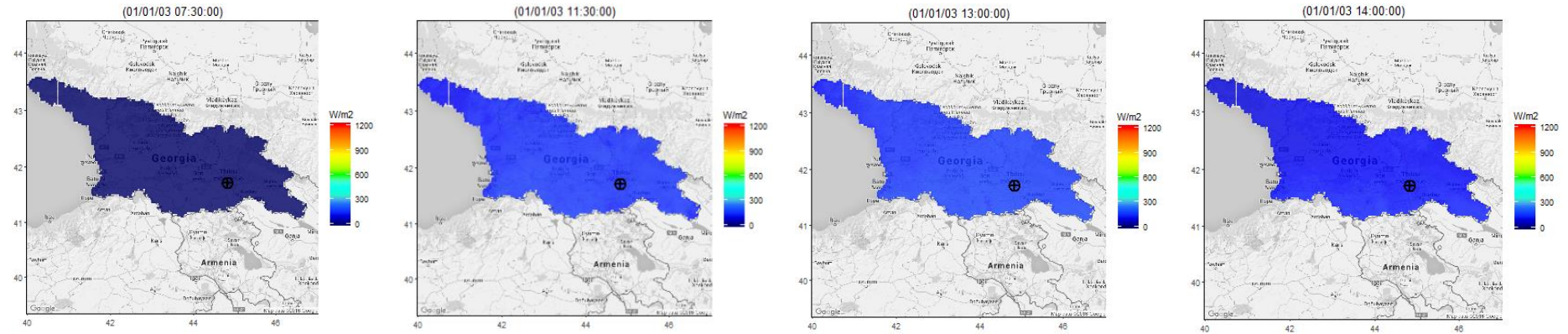


Comparación mapas de irradiancia global

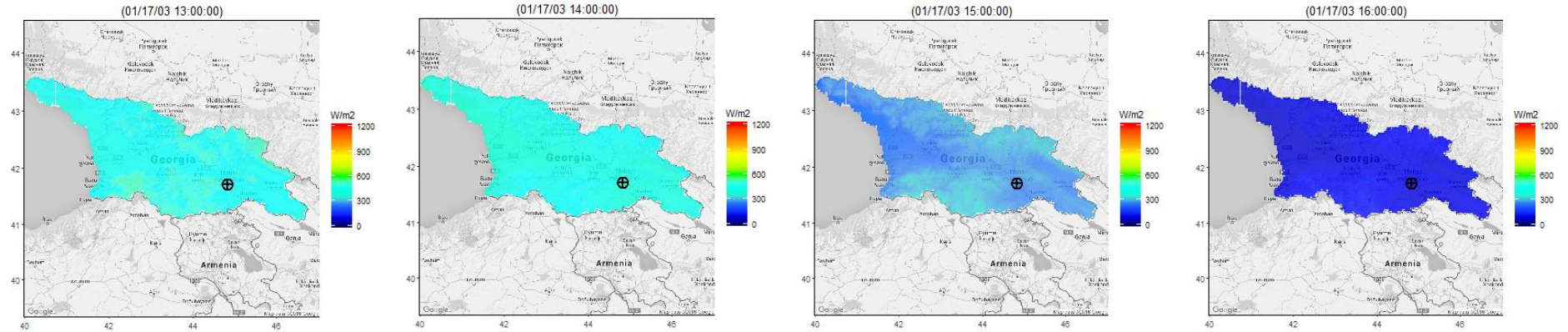
ESRA



SOLIS



ESRA



SOLIS

