

Modelado físico de la irradiancia solar utilizando sensado remoto

– Proy. FSE-2011-5976 –

Gonzalo Abal

Laboratorio de Energía Solar (LES)
Facultad de Ingeniería
Universidad de la República

Difusión de proyectos ANII-FSE-2011
Energía eólica, solar e hidroeléctrica
16 de Octubre de 2015



LABORATORIO DE
ENERGÍA SOLAR
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FSE-2011-5976

Modelado físico de la irradiancia solar utilizando sensado remoto

Objetivo general

Avanzar en el conocimiento del recurso solar del Uruguay

Equipo de trabajo:

- Gonzalo Abal – LES/FING/Udelar (Investigador responsable)
- Pablo Musé – IIE/FING (Investigador)
- Ricardo Siri – LES/IFFI (Investigador)
- Rodrigo Alonso Suárez – LES/Udelar (estudiante de doctorado Ing. Eléctrica)
- Daniel Aicardi – LES (estudiante de maestría Ing. Eléctrica)
- Agustín Laguarda – LES/IFFI (estudiante de maestría Ing. Energía)

FSE-2011-5976

Modelado físico de la irradiancia solar utilizando sensado remoto

Objetivo general

Avanzar en el conocimiento del recurso solar del Uruguay

Equipo de trabajo:

- Gonzalo Abal – LES/FING/Udelar (Investigador responsable)
- Pablo Musé – IIE/FING (Investigador)
- Ricardo Siri – LES/IFFI (Investigador)
- Rodrigo Alonso Suárez – LES/Udelar (estudiante de doctorado Ing. Eléctrica)
- Daniel Aicardi – LES (estudiante de maestría Ing. Eléctrica)
- Agustín Laguarda – LES/IFFI (estudiante de maestría Ing. Energía)

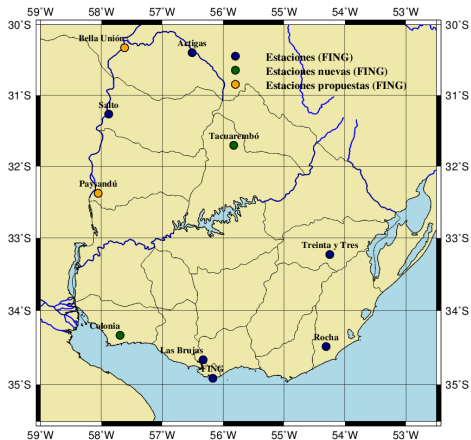
Objetivos específicos (resumidos)

- 1 Fortalecimiento y ampliación de la red de medida continua de radiación solar.
- 2 Modelado físico de la irradiancia solar a partir de imágenes satelitales.
- 3 Primeros pasos hacia predicción de variación de corto plazo del recurso solar.

Red de medida continua de radiación solar

Acciones:

- renovación del hardware de adquisición de datos en todas las estaciones
- fortalecimiento de las capacidades de medida
- ampliación de 6 a 8 puntos de medida



Estaciones de segunda generación

(ver prototipo en Ingeniería de Muestra 2015: 22 a 24/10 en FING)

- equipos autónomos
- misma tecnología (intercambiables entre si)
- redundancia en medida principal (GHI)
- envío de datos diario por red GSM al servidor del LES
- monitoreo y control on-line
- temperatura del aire en todas las estaciones



adquisidor Fischer-Scientific DT80



Sistema de gestión de datos (les.edu.uy)

Sistema de gestión de datos LES/UdelaR

Parámetros

Estación

Tipo de Medida

Escala

Fecha de Inicio

Fecha de Fin

[Enviar Consulta](#)



LABORATORIO DE
ENERGÍA SOLAR
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

Tabla con los datos

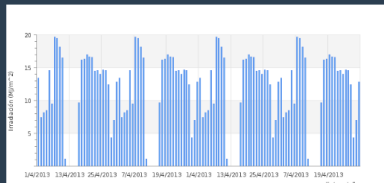
year	doy	gam	mes	day	dato	hs_real	hs_intp	logger_id	equipos_id
2013	91	1.54928	4	1	13.4	15.96	11.6		
2013	92	1.56649	4	2	7.4	15.96	11.57		
2013	93	1.58371	4	3	8.2	15.96	11.53		
2013	94	1.60092	4	4	8.5	15.96	11.5		
2013	95	1.61814	4	5	14.6	15.96	11.46		
2013	96	1.63535	4	6	9.5	15.87	11.42		
2013	97	1.65256	4	7	19.7	15.96	11.39		
2013	98	1.66978	4	8	19.5	15.91	11.35		

[Información](#)

[Descargar datos](#)

Gráficas

[Previo](#)



[Siguiente](#)

Día típico de cada mes

se publica un resumen con datos horarios

Hora UTC-3	Global (Wh/m ²)	Difusa* (Wh/m ²)	Directa** (Wh/m ²)
0	0	0	0
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0
6	0	0	0
7	126	126	0
8	397	238	159
9	519	312	208
10	697	349	349
11	915	366	549
12	652	522	130
13	249	249	0
14	370	370	0
15	743	372	372
16	679	271	407
17	416	291	125
18	329	164	164
19	88	79	9
20	0	0	0
21	0	0	0
22	0	0	0
23	0	0	0

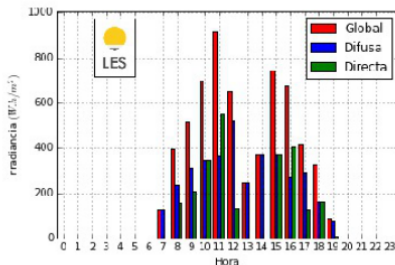
REPORTE MENSUAL DE RECURSO SOLAR Diciembre 2011

LOCALIDAD: ARTIGAS (AR)
Latitud: -30.4, Longitud: -56.51, Altura: 121m snm

Promedio mensual de irradiación solar global diaria
sobre plano horizontal: 22.4 MJ/m²



Irradiación solar horaria sobre plano horizontal para el día promedio: 14 de Diciembre



* Calculado a través de un modelo de radiación solar difusa ajustado para Uruguay por el Laboratorio de Energía Solar

Medidas especiales

medidas continuas de radiación difusa y directa (CSP)

radiación difusa



Artigas, Tacuarembó, T. y Tres

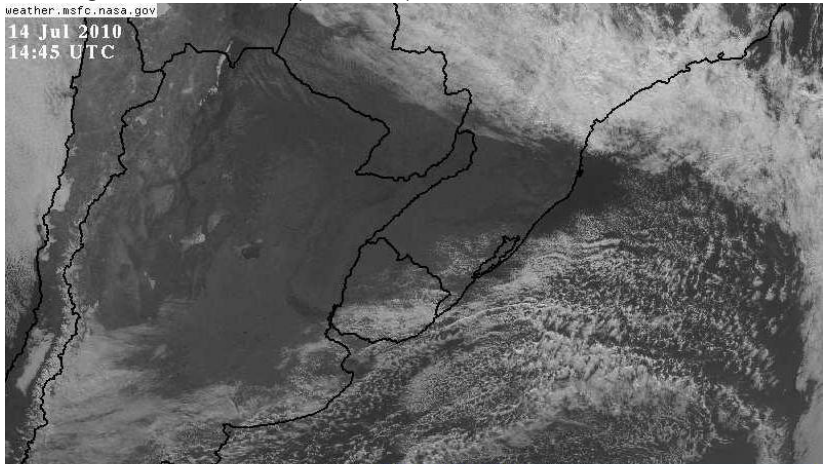
medida de referencia (LES)



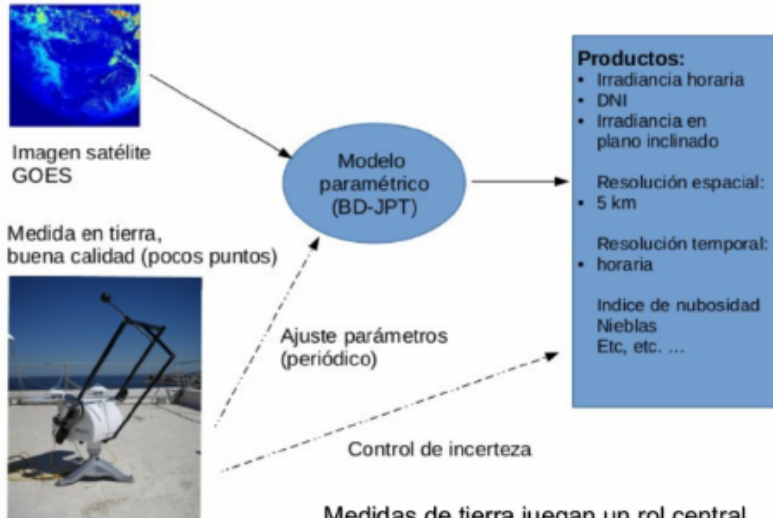
Salto

Modelado de irradiancia solar por satélite

Contamos con solo cinco años de medidas, pero tenemos 15 años de imágenes de satélite (GOES-E), una cada 30 min.



Modelado de irradiancia solar por satélite



Medidas de tierra juegan un rol central

Base de imágenes GOES del LES al 31/12/2014

satélite	inicio	fin	imágenes
GOES 8	01/01/2000	31/03/2003	123775
GOES 12	01/04/2003	14/04/2010	259445
GOES 13	14/04/2010	31/12/2014	230080
total	01/01/2000	31/12/2014	613300

histórico de 15 años con mas de medio millón de archivos, ocupando ~ 12 Tb de disco.

Permite generar productos que requieren décadas de información:

- Año Meteorológico Típico (2015)
- Mapa Solar del Uruguay (versión 2 - 2015)

Base de imágenes GOES del LES al 31/12/2014

satélite	inicio	fin	imágenes
GOES 8	01/01/2000	31/03/2003	123775
GOES 12	01/04/2003	14/04/2010	259445
GOES 13	14/04/2010	31/12/2014	230080
total	01/01/2000	31/12/2014	613300

histórico de 15 años con mas de medio millón de archivos,
ocupando ~ 12 Tb de disco.

Permite generar productos que requieren décadas de información:

- Año Meteorológico Típico (2015)
- Mapa Solar del Uruguay (versión 2 - 2015)

Modelo BD-JPT

⇒ Irradiación global horaria sobre plano horizontal

$$GHI = G_{SC} F_n \cos \theta_z \left(a + b \cos \theta_z + c \cos^2 \theta_z \right) + d \left(F_R^2 - F_{Ro}^2 \right)$$

depende de:

- ángulo cenital del Sol θ_z (día, hora, ubicación)
- factor de reflectancia F_R (satélite, una vez calibrado)

detalles:

R. Alonso, G. Abal, R. Siri, P. Musé, Solar Energy (2012) 86:3205–3215;

R. Alonso, G. Abal, R. Siri, P. Musé, Energy Procedia (2014) 57:1237-1246.

BD-JPT: desempeño optimizado para Uruguay

contra datos de tierra (red UTE):

- horario: $rRMSD = 13\%$ de la media (95600 horas)
- diario: $rRMSD = 6 \%$ de la media (5600 días)
- media mensual: $rRMSD = 4 \%$ (260 meses)

a nivel diario es comparable a una medida de campo
resolución espacial: ~ 5 km

modelo físico: GL 1.2

J.C. Ceballos et al., (2004) Journal of Geophysical Research, 109(D2):D02211.

modelo simplificado a tres bandas (UV+VIS+IR)

- UV (absorción por Ozono en estratósfera, conservativo en tropósfera)
- Visible (absorción por Ozono en estratósfera, conservativo en tropósfera)
- Infrarrojo (absorción, principalmente por H_2O y CO_2)
- no considera efecto de aerosoles en la atmósfera
- usa índice de nubosidad C de imagen de satélite GOES
- requiere columna de agua precipitable w y CO_2

modelo físico: índice de nubosidad C

para cada pixel

$$C = \frac{R_p - R_{min}}{R_{max} - R_{min}}$$

donde

R_p = reflectancia planetaria

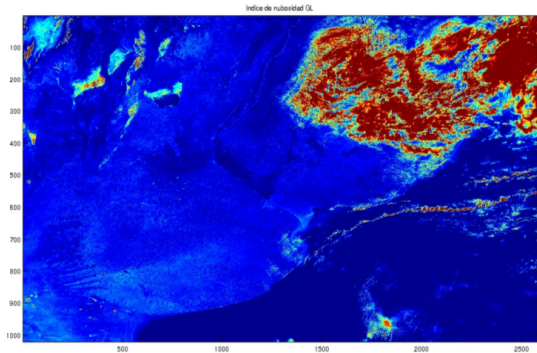
R_{max} = maximo de
reflectancia

R_{min} = mínimo de
reflectancia

medida adimensionada de
nubosidad en un pixel

$C = 0$: cielo despejado

$C = 1$: cielo cubierto



C obtenido a partir de $R_{min} = \text{cte.}$

GL1.2 horario - implementación LES

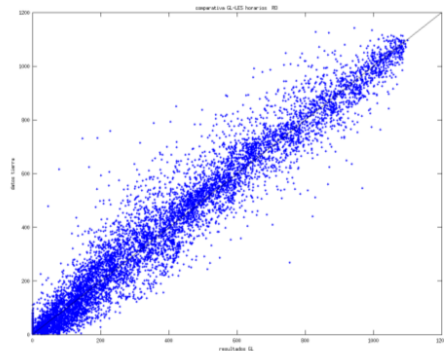
comparación con datos de 7 estaciones de tierra

Estación Rocha

Comparación de datos horarios

todos horario	LB	AR	SA	TT	RO	RB	MM
MBD	6.55 1.81 %	-25.4 -6.3 %	-24.1 -6.04 %	-17.0 -4.45 %	-9.40 -2.60 %	3.60 0.94 %	7.89 2.06 %
DSD	69.4 19.3 %	81.4 20.3 %	80.7 20.2 %	79.6 20.9 %	70.2 19.4 %	74.3 19.5 %	74.4 19.5 %
RMS	69.7 19.3 %	85.3 21.2 %	84.2 21.1 %	81.4 21.3 %	70.8 19.6 %	74.3 19.5 %	74.8 19.6 %
MAD	46.7 13.0 %	62.8 15.6 %	61.9 15.5 %	57.0 14.9 %	48.1 13.3 %	51.0 13.4 %	51.5 13.5 %

$r\text{RMSD} \sim 20\%$ de la media
alentador, para una primera
implementación sin optimizar...



GL1.2 diario - implementación LES

comparación con datos de 7 estaciones de tierra

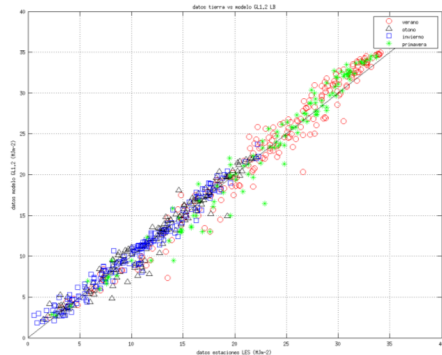
Estación Las Brujas

Comparación de datos diarios

todos diario	LB	AR	SA	TT	RO	RB	MM
MBD	0.130 0.766 %	-1.35 -7.06 %	-1.25 -6.76 %	-0.945 -5.36 %	-0.549 -3.15 %	0.0270 0.149 %	0.24 1.36 %
DSD	1.36 7.96 %	1.63 8.50 %	1.69 9.15 %	1.43 8.14 %	1.31 7.49 %	1.89 10.4 %	1.48 8.26 %
RMS	1.36 8.00 %	2.12 11.0 %	2.10 11.4 %	1.72 9.74 %	1.42 8.12 %	1.89 10.4 %	1.50 8.37 %
MAD	1.02 5.96 %	1.74 9.08 %	1.67 9.06 %	1.37 7.77 %	1.06 6.09 %	1.36 7.51 %	1.09 6.09 %

$r\text{RMSD} \sim 9.6\%$ de la media

bueno, considerando que hay
bastantes cosas para
optimizar...



Predicción a corto plazo (preliminar)

Fundamento: la alta variabilidad de irradiancia solar sobre planta PV afecta estabilidad de una red.

Se estudia la posibilidad de predicción horaria con el uso de **redes neuronales**

- datos de 3 estaciones (LB, RM, MM) entre 2010 y 2014
- red neural con dos capas ocultas
- predictores considerados: k_t , TA , D_v , n
- se entrena la red y luego se genera k_{t+1} en LB

Resultados: $r\text{RMSD} \sim 23\% - 25\%$, dependiendo del conjunto de entradas seleccionado. No parece muy alentador...

En suma:

- a) Se robustece y expande la **red de medidas** continuas de radiación solar
- b) Se completa una **base de imágenes de satélite GOES** (15 años). Se las calibra siguiendo métodos de NOAA y se calcula la reflectancia planetaria.
- c) Se genera el producto **índice de nubosidad**, de interés para modelos físicos de radiación.
- d) Se implementa para Uruguay el primer **modelo físico de radiación solar** (GL1.2) con resultados bastante alentadores.
- e) Se realiza un primer intento de **predicción de irradiancia** en el corto plazo, en base a redes neurales.

Proy FSE-2011-5976 – formación de RRHH

Trabajan en temas del proyecto (vinculados con sus tesis):

- un estudiante de doctorado en Ing. Eléctrica
- dos estudiantes de maestría en Ing. de la Energía
- tres ayudantes y pasantes de iniciación PEDECIBA

Se generaron **nuevas capacidades en el país** en relación con el procesamiento local de imágenes del satélite GOES.

Muchas Gracias !