



Mapa Solar del Uruguay

versión 1 - abril 2010



Proyecto de Eficiencia Energética



- *Evaluación del potencial solar térmico en Uruguay y análisis de la factibilidad de su utilización.*
- Proyecto de Eficiencia Energética DNETN-MIEM, contrata a la Facultad de Ingeniería, UdelaR.
- Evaluación del recurso, diseño de bancos de ensayos para evaluar tecnologías, medición del recurso.

Proyecto de Eficiencia Energética



- *Evaluación del potencial solar térmico en Uruguay y análisis de la factibilidad de su utilización.*
- Proyecto de Eficiencia Energética DNETN-MIEM, contrata a la Facultad de Ingeniería, UdelaR.
- Evaluación del recurso, diseño de bancos de ensayos para evaluar tecnologías, medición del recurso.

Proyecto de Eficiencia Energética



- *Evaluación del potencial solar térmico en Uruguay y análisis de la factibilidad de su utilización.*
- Proyecto de Eficiencia Energética DNETN-MIEM, contrata a la Facultad de Ingeniería, UdelaR.
- Evaluación del recurso, diseño de bancos de ensayos para evaluar tecnologías, medición del recurso.

Mapa Solar del Uruguay

versión 1 - abril 2010

G. Abal¹, J. Cataldo², M. D'Angelo¹ A. Gutiérrez²

¹Instituto de Física (IF)

²Instituto de Mecánica de los Fluídos e Ingeniería Ambiental (IMFIA)

Facultad de Ingeniería - Universidad de la República

22 de abril 2010
Semana de la Eficiencia Energética
DNETN/MIEM



Contenido

- 1 Marco Institucional
- 2 El recurso solar
 - Europa
 - Argentina
 - Brasil
- 3 Datos y Metodología
 - Datos disponibles para Uruguay
 - Metodología
- 4 Mapa Solar para Uruguay
 - Mapas mensuales para el Uruguay
 - Validación
- 5 Resumen y Perspectivas

Introducción

Objetivo

Contar con información de calidad sobre la variación espacial y estacional de los promedios de irradiación solar en el Uruguay.

necesario para el diseño de equipamiento para la conversión de la energía solar en energía útil (ya sea eléctrica o térmica).

Dificultades:

- en Uruguay disponemos de poca información estadísticamente significativa de irradiación solar.
- la calidad de los datos existentes es muy variable.
- tenemos cierto atraso en cuanto al modelado de nuestro recurso solar, en relación a otros países del mundo o de la región.

Introducción

Objetivo

Contar con información de calidad sobre la variación espacial y estacional de los promedios de irradiación solar en el Uruguay.

necesario para el diseño de equipamiento para la conversión de la energía solar en energía útil (ya sea eléctrica o térmica).

Dificultades:

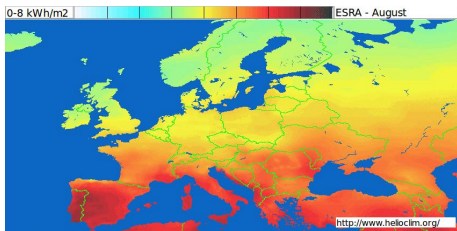
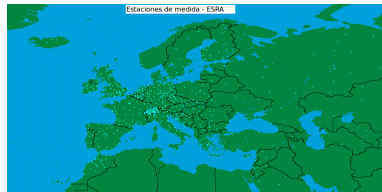
- en Uruguay disponemos de poca información estadísticamente significativa de irradiación solar.
- la calidad de los datos existentes es muy variable.
- tenemos cierto atraso en cuanto al modelado de nuestro recurso solar, en relación a otros países del mundo o de la región.

Indice

- 1 Marco Institucional
- 2 El recurso solar
 - Europa
 - Argentina
 - Brasil
- 3 Datos y Metodología
 - Datos disponibles para Uruguay
 - Metodología
- 4 Mapa Solar para Uruguay
 - Mapas mensuales para el Uruguay
 - Validación
- 5 Resumen y Perspectivas

European Solar Radiation Atlas (ESRA)

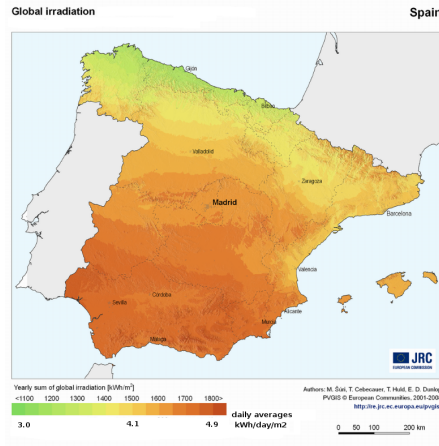
- programa de la Comisión Europea
- basado en medidas de 700+ estaciones
- promedios de 10 años: 1981-1990
- resolución espacial de 10×10 km
- <http://www.helioclim.org/esra/>



Coordinateurs :
K. Scharmer, J. Greif
THE EUROPEAN SOLAR
RADIATION ATLAS
Vol. 2 : Database and Exploitation
Software
ISBN:2-911762-22-3
Prix du livre : 350 eu.

mapas solares

una forma conveniente de representar visualmente la variación de la irradiación solar promedio en un territorio:



Indice

- 1 Marco Institucional
- 2 El recurso solar
 - Europa
 - **Argentina**
 - Brasil
- 3 Datos y Metodología
 - Datos disponibles para Uruguay
 - Metodología
- 4 Mapa Solar para Uruguay
 - Mapas mensuales para el Uruguay
 - Validación
- 5 Resumen y Perspectivas

Mapa Solar Argentino

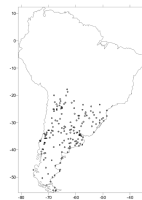
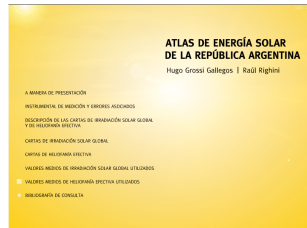
● Mapa Solar Argentino

Refs: H. Grossi Gallegos y R. Righini, Energías Renovables y Medio Ambiente, Distribución de la Radiación Solar en la R.A., 4, pp. 119-123 (1998); *ibid.*, 5, pp. 33-43 (1998); R. Righini, H. Grossi Gallegos, C. Raichijk, Renewable Energy, 30, pp. 1241-1255 (2005).

datos ?

● Red Solarimétrica Argentina

- 24 estaciones piranométricas (irradiación diaria u horaria)
- registros de radiación: entre 2 y 18 años
- 197 estaciones del SMN Argentino con medidas de heliofanía
- + heliofanía de algunas estaciones fronterizas



distribución de heliografos

Mapa Solar Argentino

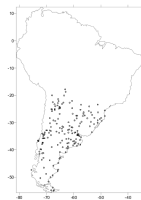
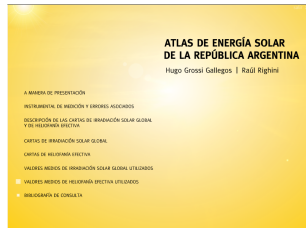
● Mapa Solar Argentino

Refs: H. Grossi Gallegos y R. Righini, Energías Renovables y Medio Ambiente, Distribución de la Radiación Solar en la R.A., 4, pp. 119-123 (1998); *ibid.*, 5, pp. 33-43 (1998); R. Righini, H. Grossi Gallegos, C. Raichijk, Renewable Energy, 30, pp. 1241-1255 (2005).

datos ?

● Red Solarimétrica Argentina

- 24 estaciones piranométricas (irradiación diaria u horaria)
- registros de radiación: entre 2 y 18 años
- 197 estaciones del SMN Argentino con medidas de heliofanía
- + heliofanía de algunas estaciones fronterizas



distribución de heliografos

Heliofanía

- **heliofanía diaria:** tiempo con irradiancia solar sobre el umbral convencional de 120 W/m^2 (WMO)
- dato disponible en casi toda estación meteorológica
- se mide desde hace varias décadas en todo el mundo
- bien distribuido espacialmente y temporalmente (series diarias de décadas).
- buen estimador de la irradiación solar



Heliógrafo de
Campbell-Stokes

Heliofanía

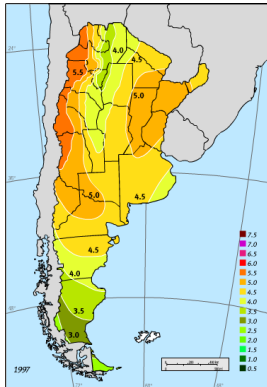
- **heliofanía diaria:** tiempo con irradiancia solar sobre el umbral convencional de 120 W/m^2 (WMO)
- dato disponible en casi toda estación meteorológica
- se mide desde hace varias décadas en todo el mundo
- bien distribuido espacialmente y temporalmente (series diarias de décadas).
- buen estimador de la irradiación solar



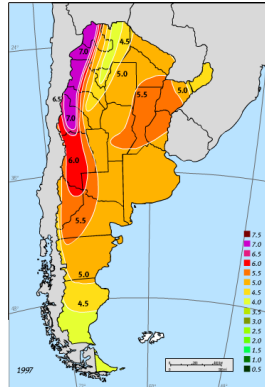
Heliógrafo de
Campbell-Stokes

Mapa Solar Argentino (1998)

irradiación global media diaria ($\text{kWh/m}^2/\text{día}$)
incerteza estimada por los autores en $\approx 10\%$



marzo



octubre

Atlas de Radiación de la República Argentina, H. grossi Gallegos, R. Righini, publ. 1998

Indice

- 1 Marco Institucional
- 2 El recurso solar
 - Europa
 - Argentina
 - **Brasil**
- 3 Datos y Metodología
 - Datos disponibles para Uruguay
 - Metodología
- 4 Mapa Solar para Uruguay
 - Mapas mensuales para el Uruguay
 - Validación
- 5 Resumen y Perspectivas

Brasil

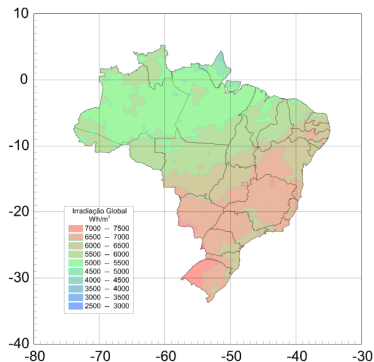
● Atlas de Radiación Solar (1998)

- colaboración INMET/MCT y el Laboratorio de Energía Solar, UFSC
- irradiación diaria media derivada de imágenes satelitales + modelo físico (BRASIL-SL)
- validado con medidas terrestres

● Centro Previsão do Tempo e Estudos Climáticos, CPTEC/INPE/MCT

- estima irradiación diaria en todo el territorio
- datos satelitales (GOES) + modelo físico (Brazil-GL 1.2)
- <http://satelite.cptec.inpe.br/>

● las estaciones del INMET miden irradiación horaria o heliofanía



distribución de irradiación global media diaria

(Wh/m²) para el mes de Enero

Brasil

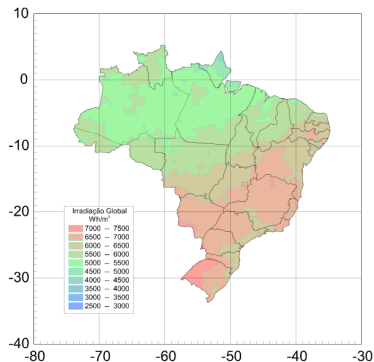
● Atlas de Radiación Solar (1998)

- colaboración INMET/MCT y el Laboratorio de Energía Solar, UFSC
- irradiación diaria media derivada de imágenes satelitales + modelo físico (BRASIL-SL)
- validado con medidas terrestres

● Centro Previsão do Tempo e Estudos Climáticos, CPTEC/INPE/MCT

- estima irradiación diaria en todo el territorio
- datos satelitales (GOES) + modelo físico (Brazil-GL 1.2)
- <http://satelite.cptec.inpe.br/>

● las estaciones del INMET miden irradiación horaria o heliofanía



distribución de irradiación global media diaria

(Wh/m²) para el mes de Enero

Brasil

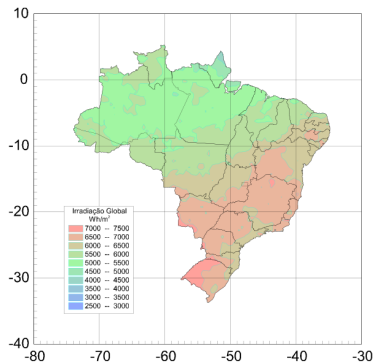
● Atlas de Radiación Solar (1998)

- colaboración INMET/MCT y el Laboratorio de Energía Solar, UFSC
- irradiación diaria media derivada de imágenes satelitales + modelo físico (BRASIL-SL)
- validado con medidas terrestres

● Centro Previsão do Tempo e Estudos Climáticos, CPTEC/INPE/MCT

- estima irradiación diaria en todo el territorio
- datos satelitales (GOES) + modelo físico (Brazil-GL 1.2)
- <http://satelite.cptec.inpe.br/>

● las estaciones del INMET miden irradiación horaria o heliofanía



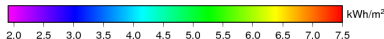
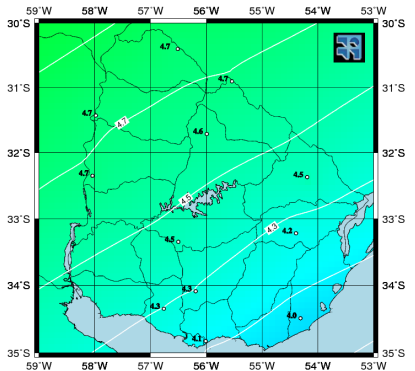
distribución de irradiación global media diaria
(Wh/m²) para el mes de Enero

Uruguay?

datos actuales indican esta
variación espacial del
promedio anual de irradiación
global diaria:

entre 4.0 y 4.8 kWh/m²

Promedio anual



irradiación

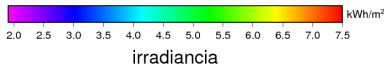
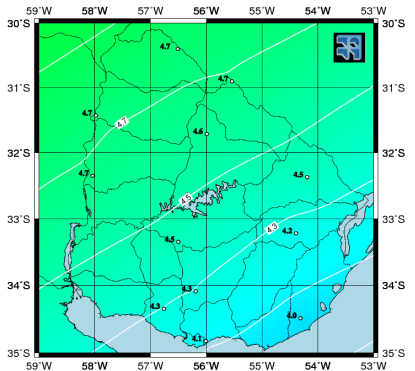


Uruguay?

datos actuales indican esta
variación espacial del
promedio anual de irradiación
global diaria:

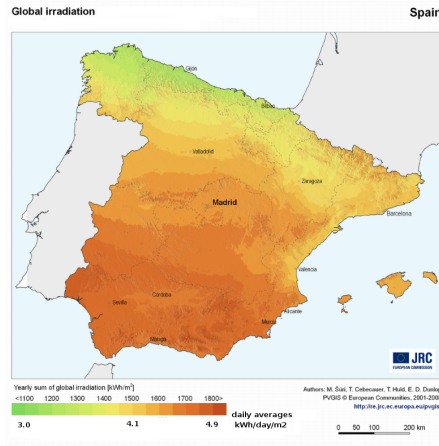
entre 4.0 y 4.8 kWh/m²

Promedio anual



mapas solares

una forma conveniente de representar visualmente la variación de la irradiación solar promedio en un territorio:



Indice

- 1 Marco Institucional
- 2 El recurso solar
 - Europa
 - Argentina
 - Brasil
- 3 Datos y Metodología**
 - Datos disponibles para Uruguay**
 - Metodología
- 4 Mapa Solar para Uruguay
 - Mapas mensuales para el Uruguay
 - Validación
- 5 Resumen y Perspectivas

datos de irradiación considerados

irradiación global diaria sobre superficie horizontal series nacionales

código	localidad	LAT	LON	período	años	instrumento	institución
ZUELA	Colonia	-34.6	-58.3	10/1969 – 11/1977	8	Kipp & Zonnen ^{1,3}	INIA– Estanzuela
ARCHI	Montevideo	-34.9	-56.2	01/1980 – 12/1984	5	Eppley Black& White ^{1,3,4,5}	FArq-FING
MELILLA	Canelones	-34.8	-56.3	10/2005 – 09/2009	4	Sensor Davis ^{2,4}	UTE
POTRERILLO	Rocha	-34.0	-53.6	01/2007 – 07/2009	2.5	Fotodiodo ES2 ^{2,4}	FAgro-Probides

Notas:

- (1) registro original en banda de papel, luego digitalizada.
- (2) registro electrónico automático.
- (3) disponible públicamente en <http://mesasolar.org>
- (4) serie con registros horarios
- (5) incluye medidas de componente directa

series Brasileñas solicitadas al INMET

código	localidad	LAT	LON	ALT (m)	período	años
A804	Livramento	-30.8	-55.6	328	11/2001 – 9/2009	7.8
A836	Jaguarão	-32.6	-53.4	47	01/2007 – 09/2009	2.6
A827	Bagé	-31.3	-54.0	230	01/2007 – 09/2009	2.6
A899	Chuí	-33.7	-53.4	26	03/2008-09/2009	1.5

datos de irradiación considerados

irradiación global diaria sobre superficie horizontal series nacionales

código	localidad	LAT	LON	período	años	instrumento	institución
ZUELA	Colonia	-34.6	-58.3	10/1969 – 11/1977	8	Kipp & Zonnen ^{1,3}	INIA– Estanzuela
ARCHI	Montevideo	-34.9	-56.2	01/1980 – 12/1984	5	Eppley Black & White ^{1,3,4,5}	FArq-FING
MELILLA	Canelones	-34.8	-56.3	10/2005 – 09/2009	4	Sensor Davis ^{2,4}	UTE
POTRERILLO	Rocha	-34.0	-53.6	01/2007 – 07/2009	2.5	Fotodiodo ES2 ^{2,4}	FAgro-Probides

Notas:

- (1) registro original en banda de papel, luego digitalizada.
- (2) registro electrónico automático.
- (3) disponible públicamente en <http://mesasolar.org>
- (4) serie con registros horarios
- (5) incluye medidas de componente directa

series Brasileñas solicitadas al INMET

código	localidad	LAT	LON	ALT (m)	período	años
A804	Livramento	-30.8	-55.6	328	11/2001 – 9/2009	7.8
A836	Jaguarão	-32.6	-53.4	47	01/2007 – 09/2009	2.6
A827	Bagé	-31.3	-54.0	230	01/2007 – 09/2009	2.6
A899	Chuí	-33.7	-53.4	26	03/2008-09/2009	1.5

datos de irradiación considerados

series Argentinas (RSA) vecinas al litoral del Uruguay:



datos del Atlas de Energía Solar de la República Argentina, H. Grossi Gallegos y R. Righini, mayo 2007.

Localidad	LAT	LON	ALT (m)	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
Monte Caseros	-30.3	-57.7	54	6.9	6.1	5.2	4.1	3.1	2.5
Concepción del Uruguay	-32.5	-58.3	25	6.7	6.1	5.0	3.9	2.9	2.4
Guaqueguaychú	-33.0	-58.6	21	6.6	5.9	4.5	3.7	2.6	2.0
Salto Grande	-31.2	-57.9	37	6.9	6.1	4.9	3.9	3.0	2.4

Localidad	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
Monte Caseros	2.7	3.3	4.2	5.6	6.5	7.0
Concepción del Uruguay	2.5	3.2	4.3	5.4	6.5	6.9
Guaqueguaychú	2.2	2.9	3.7	5.0	6.2	6.3
Salto Grande	2.5	3.3	4.1	5.5	6.3	6.8

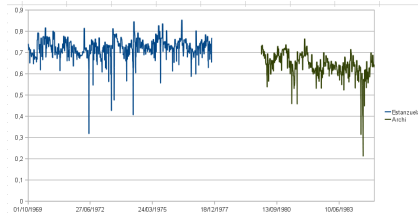
Promedios mensuales de irradiación solar global diaria incidente sobre plano horizontal (en kWh/m²) usados en el Mapa Solar Argentino. Provenientes de series de medidas (previas a 1998) registradas por los sensores de la Red Solarimétrica Argentina.

H. Grossi Gallegos, Distribución de la Radiación Solar Global en la República Argentina, I: Análisis de la información, Energías Renovables y Medio Ambiente (ERMA), 4, pp 13-17 (1998). *ibid.* II: Cartas de Radiación, ERMA, 5, pp. 33-42 (1998).

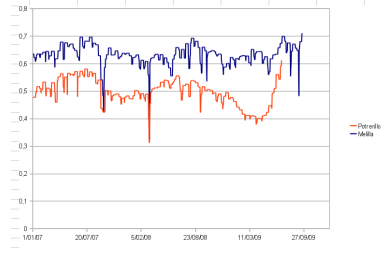
series de radiación uruguayas

máximo móvil (10 días)
irradiación diaria normalizada (K_T) vs. fecha

ZUELA vs. Archi



Potreriillo vs. Melilla



series de irradiación utilizadas

- 4 series largas se usan como base para establecer correlaciones con la heliofanía:

ZUELA (INIA), Melilla (UTE), Livramento (INMET-Brasil) y Salto Grande (Argentina)

- 5 series regionales mas cortas se reservan para validación

Jaguarón, Bagé (INMETc), Monte Caseros, Concepción del Uruguay, Gualeguachú (RSArg)

- 3 series no fueron utilizadas: Potrerillo, Archi, Chui-INMET

series de irradiación utilizadas

- 4 series largas se usan como base para establecer correlaciones con la heliofanía:

ZUELA (INIA), Melilla (UTE), Livramento (INMET-Brasil) y Salto Grande (Argentina)

- 5 series regionales mas cortas se reservan para validación

Jaguarón, Bagé (INMETc), Monte Caseros, Concepción del Uruguay, Gualaguachú (RSArg)

- 3 series no fueron utilizadas: Potrerillo, Archi, Chui-INMET

series de irradiación utilizadas

- 4 series largas se usan como base para establecer correlaciones con la heliofanía:

ZUELA (INIA), Melilla (UTE), Livramento (INMET-Brasil) y Salto Grande (Argentina)

- 5 series regionales mas cortas se reservan para validación

Jaguarón, Bagé (INMETc), Monte Caseros, Concepción del Uruguay, Gualeguachú (RSArg)

- 3 series no fueron utilizadas: Potrerillo, Archi, Chui-INMET

datos de Heliofanía

se consideraron 4 conjuntos de datos:

código	dato	estaciones	período	años	institución
DNM-1	promedio de total mensual	12	1981-1990	9	DNM ¹
DNM-2	total mensual sin promediar	11	1986 - 2005	20	DNM ²
DNM-3	valor diario promedio	14	2000 - 2008	9	DNM ³
INIA	valor diario promedio	5	1971-2008	38	INIA ⁴

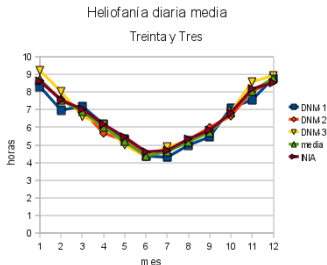
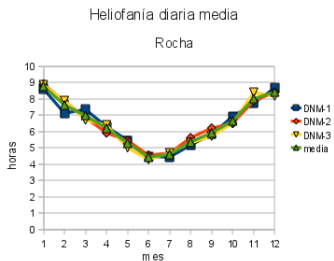
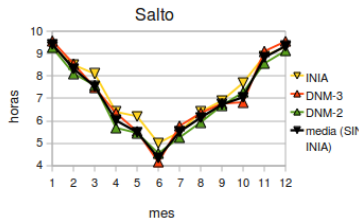
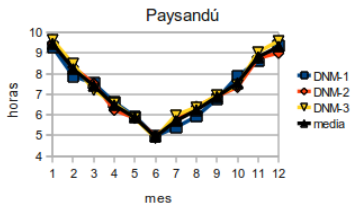
Notas:

los conjuntos de estaciones presentan superposiciones
DNM = Dirección Nacional de Meteorología
INIA = Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias

- (1) disponibles en línea <http://www.meteorologia.com.uy/>
- (2) datos aportados por el SMN Argentino, por gestión de H. Grossi.
- (3) series adquiridas a la DNM en octubre 2009
- (4) disponibles en línea <http://www.inia.org.uy/>

promedios de heliofanía

la heliofanía media presenta fuerte variación estacional



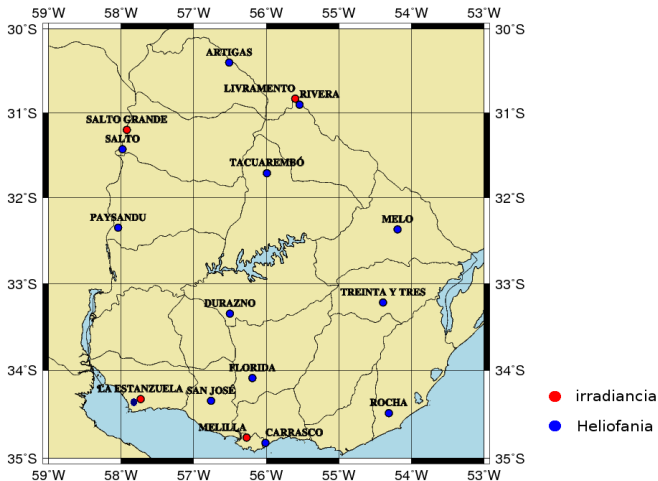
datos de Heliofanía

usamos datos de 12 estaciones de la serie DNM-3 de valores diarios promediados para el período 2000-2008.

LOCALIDAD	LAT	LON	ALT (m)
Artigas	-30.4	-56.5	120.9
Carrasco	-34.8	-56.0	32.9
Durazno	-33.4	-56.5	92.8
Florida	-34.1	-56.2	67.0
Melo	-32.4	-54.2	100.4
Paysandú	-32.3	-58.0	61.1
Rivera	-30.9	-55.5	241.9
Rocha	-34.5	-54.3	18.2
Salto	-31.4	-58.0	33.6
San José	-34.3	-56.8	72.0
Tacuarembó	-31.7	-55.8	140.0
Treinta y Tres	-33.2	-54.4	46.6

Además, se usó Heliofanía del INIA en La Estanzuela (Colonia) para correlacionar con la serie ZUELA.

distribución espacial de los datos



Indice

- 1 Marco Institucional
- 2 El recurso solar
 - Europa
 - Argentina
 - Brasil
- 3 Datos y Metodología**
 - Datos disponibles para Uruguay
 - Metodología**
- 4 Mapa Solar para Uruguay
 - Mapas mensuales para el Uruguay
 - Validación
- 5 Resumen y Perspectivas

metodología

simplificando un poco:

- 1 **normalización** (irradiación y heliofanía diarias)
- 2 **correlación** entre promedios de irradiación – heliofanía: (a,b)
- 3 **dependencia espacial** de la correlación
- 4 usar la correlación para **estimar irradiación** a partir de heliofanía
- 5 **codificar con color** la irradiación media estimada (por interpolación) en una grilla de $10 \times 10 \text{ km}$
- 6 trazar **isolíneas de irradiación** media

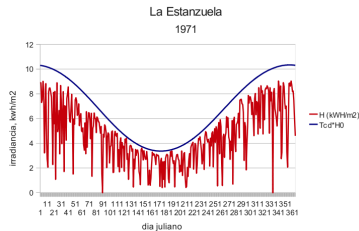
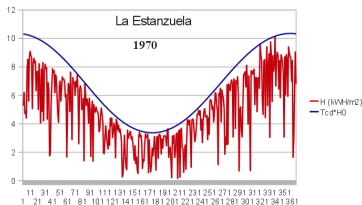
similar a la usada para el Atlas Solar Argentino:

(1) R. Righini, H. Grossi Gallegos, C. Raichijk, Approach to drawing new global solar irradiation contour maps for Argentina,

Renewable Energy, **30**, pp. 1241-1255, 2005.

normalización: índice de claridad, K_T

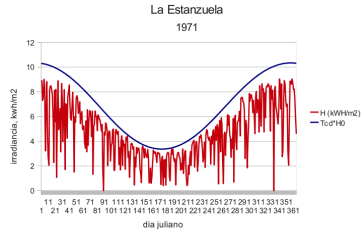
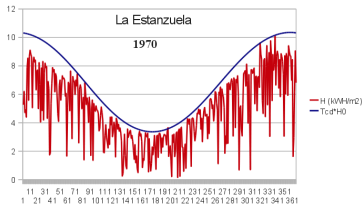
- H_0 irradiación diaria incidente fuera de la atmósfera: depende del día del año ($n = 1 \dots 365$) y de la latitud.
- $0,8 * H_0$ vs. día del año
- H , irradiación diaria medida vs. n



- transmitancia máxima (día claro) $\approx 80\%$: irradiación diaria normalizada $K_T = H/H_0 < 0,8$

normalización: índice de claridad, K_T

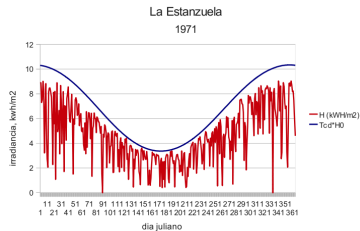
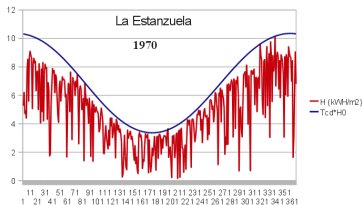
- H_0 irradiación diaria incidente fuera de la atmósfera: depende del día del año ($n = 1 \dots 365$) y de la latitud.
- $0,8 * H_0$ vs. día del año
- H , irradiación diaria medida vs. n



- transmitancia máxima (día claro) $\approx 80\%$: irradiación diaria normalizada $K_T = H/H_0 < 0,8$

normalización: índice de claridad, K_T

- H_0 irradiación diaria incidente fuera de la atmósfera: depende del día del año ($n = 1 \dots 365$) y de la latitud.
- $0,8 * H_0$ vs. día del año
- H , irradiación diaria medida vs. n



- transmitancia máxima (día claro) $\approx 80\%$: irradiación diaria normalizada $K_T = H/H_0 < 0,8$

correlación de Armstrong–Prescott

- se normaliza la irradiación media diaria \bar{H} en el mes m

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} \rightarrow \text{irradiación relativa}$$

\bar{H}_0 : promedio de **irradiación extraterrestre** en el mes.

- heliofanía relativa para el mes m

$$\frac{\bar{N}}{\bar{N}_0} \rightarrow \text{heliofanía relativa}$$

\bar{N}_0 : promedio de **horas de sol máximas** para el mes.

- **correlación de Armstrong–Prescott:**

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} = a + b \frac{\bar{N}}{\bar{N}_0}$$

muy usada en todo el mundo para estimar la irradiación global media a partir de la heliofanía media.

correlación de Armstrong–Prescott

- se normaliza la irradiación media diaria \bar{H} en el mes m

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} \rightarrow \text{irradiación relativa}$$

\bar{H}_0 : promedio de **irradiación extraterrestre** en el mes.

- heliofanía relativa para el mes m

$$\frac{\bar{N}}{\bar{N}_0} \rightarrow \text{heliofanía relativa}$$

\bar{N}_0 : promedio de **horas de sol máximas** para el mes.

- correlación de Armstrong–Prescott:

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} = a + b \frac{\bar{N}}{\bar{N}_0}$$

muy usada en todo el mundo para estimar la irradiación global media a partir de la heliofanía media.

correlación de Armstrong–Prescott

- se normaliza la irradiación media diaria \bar{H} en el mes m

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} \rightarrow \text{irradiación relativa}$$

\bar{H}_0 : promedio de **irradiación extraterrestre** en el mes.

- heliofanía relativa para el mes m

$$\frac{\bar{N}}{\bar{N}_0} \rightarrow \text{heliofanía relativa}$$

\bar{N}_0 : promedio de **horas de sol máximas** para el mes.

- **correlación de Armstrong–Prescott:**

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} = a + b \frac{\bar{N}}{\bar{N}_0}$$

muy usada en todo el mundo para estimar la irradiación global media a partir de la heliofanía media.

metodología

en más detalle

- 1 Normalización: índice de claridad \bar{H}/\bar{H}_0 y la heliofanía relativa \bar{N}/\bar{N}_0 para cada mes $m = 1, 2 \dots 12$
- 2 Se obtienen, por regresión lineal, coeficientes a_i y b_i para cuatro lugares ($i = 1, \dots, 4$) para los que se dispone de medidas de irradiación y heliofanía diaria (promedios estadísticamente significativos: períodos de $T \geq 5$ años con datos diarios de calidad).
- 3 Se estima, por interpolación, la dependencia espacial $a(x, y)$ y $b(x, y)$ para el territorio nacional.
- 4 Para cada mes ($m = 1, 2, \dots, 12$), a partir de la correlación Armstrong-Prescott con $a(x, y)$ y $b(x, y)$ específicos para cada sitio (x, y) con medidas confiables de Heliofanía confiables,

$$\bar{H}(x, y; m) = \bar{H}_0(x, y; m) \left[a(x, y) + b(x, y) \frac{\bar{N}(x, y; m)}{\bar{N}_0(x, y; m)} \right]$$

se estima irradiación global media $\bar{H}(x, y; m)$ a partir de Heliofanía media $\bar{N}(x, y; m)$. Esto re-introduce la variación estacional (m) en el estimativo de irradiación media $\bar{H}(x, y; m)$.

- 5 Para cada mes, se estima la variación espacial de la irradiación global diaria media en el territorio y se codifica en una escala de colores.
- 6 Se trazan isolíneas de irradiación global.

(1) R. Righini, H. Grossi Gallegos, C. Raichijk, Approach to drawing new global solar irradiation contour maps for Argentina, Renewable Energy, 30, pp. 1241-1255, 2005.

metodología

en más detalle

- 1 Normalización: índice de claridad \bar{H}/\bar{H}_0 y la heliofanía relativa \bar{N}/\bar{N}_0 para cada mes $m = 1, 2 \dots 12$
- 2 Se obtienen, por regresión lineal, coeficientes a_i y b_i para cuatro lugares ($i = 1, \dots 4$) para los que se dispone de medidas de irradiación y heliofanía diaria (promedios estadísticamente significativos: períodos de $T \geq 5$ años con datos diarios de calidad).
- 3 Se estima, por interpolación, la dependencia espacial $a(x, y)$ y $b(x, y)$ para el territorio nacional.
- 4 Para cada mes ($m = 1, 2, \dots 12$), a partir de la correlación Armstrong-Prescott con $a(x, y)$ y $b(x, y)$ específicos para cada sitio (x, y) con medidas confiables de Heliofanía confiables,

$$\bar{H}(x, y; m) = \bar{H}_0(x, y; m) \left[a(x, y) + b(x, y) \frac{\bar{N}(x, y; m)}{\bar{N}_0(x, y; m)} \right]$$

se estima irradiación global media $\bar{H}(x, y; m)$ a partir de Heliofanía media $\bar{N}(x, y; m)$. Esto re-introduce la variación estacional (m) en el estimativo de irradiación media $\bar{H}(x, y; m)$.

- 5 Para cada mes, se estima la variación espacial de la irradiación global diaria media en el territorio y se codifica en una escala de colores.
- 6 Se trazan isolíneas de irradiación global.

(1) R. Righini, H. Grossi Gallegos, C. Raichijk, Approach to drawing new global solar irradiation contour maps for Argentina,

Renewable Energy, **30**, pp. 1241-1255, 2005.

metodología

en más detalle

- 1 Normalización: índice de claridad \bar{H}/\bar{H}_0 y la heliofanía relativa \bar{N}/\bar{N}_0 para cada mes $m = 1, 2 \dots 12$
- 2 Se obtienen, por regresión lineal, coeficientes a_i y b_i para cuatro lugares ($i = 1, \dots 4$) para los que se dispone de medidas de irradiación y heliofanía diaria (promedios estadísticamente significativos: períodos de $T \geq 5$ años con datos diarios de calidad).
- 3 Se estima, por interpolación, la dependencia espacial $a(x, y)$ y $b(x, y)$ para el territorio nacional.
- 4 Para cada mes ($m = 1, 2, \dots 12$), a partir de la correlación Armstrong-Prescott con $a(x, y)$ y $b(x, y)$ específicos para cada sitio (x, y) con medidas confiables de Heliofanía confiables,

$$\bar{H}(x, y; m) = \bar{H}_0(x, y; m) \left[a(x, y) + b(x, y) \frac{\bar{N}(x, y; m)}{\bar{N}_0(x, y; m)} \right]$$

se estima irradiación global media $\bar{H}(x, y; m)$ a partir de Heliofanía media $\bar{N}(x, y; m)$. Esto re-introduce la variación estacional (m) en el estimativo de irradiación media $\bar{H}(x, y; m)$.

- 5 Para cada mes, se estima la variación espacial de la irradiación global diaria media en el territorio y se codifica en una escala de colores.
- 6 Se trazan isolíneas de irradiación global.

(1) R. Righini, H. Grossi Gallegos, C. Raichijk, Approach to drawing new global solar irradiation contour maps for Argentina, Renewable Energy, 30, pp. 1241-1255, 2005.

metodología

en más detalle

- 1 Normalización: índice de claridad \bar{H}/\bar{H}_0 y la heliofanía relativa \bar{N}/\bar{N}_0 para cada mes $m = 1, 2 \dots 12$
- 2 Se obtienen, por regresión lineal, coeficientes a_i y b_i para cuatro lugares ($i = 1, \dots, 4$) para los que se dispone de medidas de irradiación y heliofanía diaria (promedios estadísticamente significativos: períodos de $T \geq 5$ años con datos diarios de calidad).
- 3 Se estima, por interpolación, la dependencia espacial $a(x, y)$ y $b(x, y)$ para el territorio nacional.
- 4 Para cada mes ($m = 1, 2, \dots, 12$), a partir de la correlación Armstrong-Prescott con $a(x, y)$ y $b(x, y)$ específicos para cada sitio (x, y) con medidas confiables de Heliofanía confiables,

$$\bar{H}(x, y; m) = \bar{H}_0(x, y; m) \left[a(x, y) + b(x, y) \frac{\bar{N}(x, y; m)}{\bar{N}_0(x, y; m)} \right]$$

se estima irradiación global media $\bar{H}(x, y; m)$ a partir de Heliofanía media $\bar{N}(x, y; m)$. Esto re-introduce la variación estacional (m) en el estimativo de irradiación media $\bar{H}(x, y; m)$.

- 5 Para cada mes, se estima la variación espacial de la irradiación global diaria media en el territorio y se codifica en una escala de colores.
- 6 Se trazan isolíneas de irradiación global.

(1) R. Righini, H. Grossi Gallegos, C. Raichijk, Approach to drawing new global solar irradiation contour maps for Argentina,

Renewable Energy, **30**, pp. 1241-1255, 2005.

metodología

en más detalle

- 1 Normalización: índice de claridad \bar{H}/\bar{H}_0 y la heliofanía relativa \bar{N}/\bar{N}_0 para cada mes $m = 1, 2 \dots 12$
- 2 Se obtienen, por regresión lineal, coeficientes a_i y b_i para cuatro lugares ($i = 1, \dots 4$) para los que se dispone de medidas de irradiación y heliofanía diaria (promedios estadísticamente significativos: períodos de $T \geq 5$ años con datos diarios de calidad).
- 3 Se estima, por interpolación, la dependencia espacial $a(x, y)$ y $b(x, y)$ para el territorio nacional.
- 4 Para cada mes ($m = 1, 2, \dots 12$), a partir de la correlación Armstrong-Prescott con $a(x, y)$ y $b(x, y)$ específicos para cada sitio (x, y) con medidas confiables de Heliofanía confiables,

$$\bar{H}(x, y; m) = \bar{H}_0(x, y; m) \left[a(x, y) + b(x, y) \frac{\bar{N}(x, y; m)}{\bar{N}_0(x, y; m)} \right]$$

se estima irradiación global media $\bar{H}(x, y; m)$ a partir de Heliofanía media $\bar{N}(x, y; m)$. Esto re-introduce la variación estacional (m) en el estimativo de irradiación media $\bar{H}(x, y; m)$.

- 5 Para cada mes, se estima la variación espacial de la irradiación global diaria media en el territorio y se codifica en una escala de colores.
- 6 Se trazan isolíneas de irradiación global.

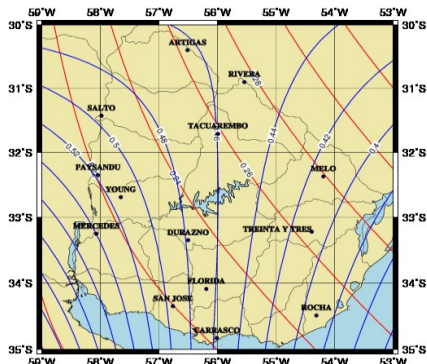
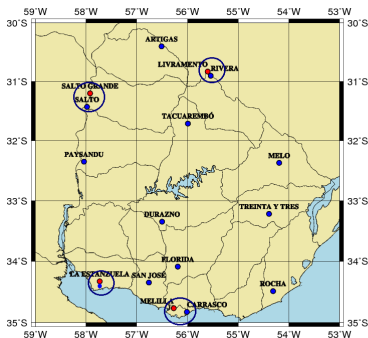
(1) R. Righini, H. Grossi Gallegos, C. Raichijk, Approach to drawing new global solar irradiation contour maps for Argentina, *Renewable Energy*, **30**, pp. 1241-1255, 2005.

Valores de a y b básicos

por regresión lineal, en 4 ubicaciones:

Estación	LON	LAT	a	b
La Estanzuela	-34.3	-57.7	0.21	0.55
Melilla	-34.8	-56,3	0,22	0,47
Salto Grande	-31.2	-57.9	0.23	0.49
Livramento	-30.8	-53.3	0.28	0.45

variación espacial de a y b
(interpolación + isólinas)



Estimación de irradiación media

- valores de a y b para las 12 estaciones seleccionadas:

LOCALIDAD	LAT	LON	a(x, y)	b(x, y)
Artigas	-30.4	-56.5	0.26	0.46
Carrasco	-34.8	-56.0	0.22	0.46
Durazno	-33.4	-56.5	0.23	0.48
Florida	-34.1	-56.2	0.23	0.47
Melo	-32.4	-54.2	0.28	0.41
Paysandú	-32.3	-58.0	0.22	0.52
Rivera	-30.9	-55.5	0.28	0.45
Rocha	-34.5	-54.3	0.25	0.39
Salto	-31.4	-58.0	0.23	0.50
San José	-34.3	-56.8	0.22	0.50
Tacuarembó	-31.7	-55.8	0.26	0.46
Treinta y Tres	-33.2	-54.4	0.26	0.41

- irradiación $\rightarrow \bar{H}(x, y; m) = \bar{H}_0(x, y; m) \left[a(x, y) + b(x, y) \frac{\bar{N}(x, y; m)}{N_0(x, y; m)} \right]$
- interpolación + código de color + isóneas \rightarrow mapa solar

Estimación de irradiación media

- valores de a y b para las 12 estaciones seleccionadas:

LOCALIDAD	LAT	LON	a(x, y)	b(x, y)
Artigas	-30.4	-56.5	0.26	0.46
Carrasco	-34.8	-56.0	0.22	0.46
Durazno	-33.4	-56.5	0.23	0.48
Florida	-34.1	-56.2	0.23	0.47
Melo	-32.4	-54.2	0.28	0.41
Paysandú	-32.3	-58.0	0.22	0.52
Rivera	-30.9	-55.5	0.28	0.45
Rocha	-34.5	-54.3	0.25	0.39
Salto	-31.4	-58.0	0.23	0.50
San José	-34.3	-56.8	0.22	0.50
Tacuarembó	-31.7	-55.8	0.26	0.46
Treinta y Tres	-33.2	-54.4	0.26	0.41

- irradiación $\rightarrow \bar{H}(x, y; m) = \bar{H}_0(x, y; m) \left[a(x, y) + b(x, y) \frac{\bar{N}(x, y; m)}{\bar{N}_0(x, y; m)} \right]$
- interpolación + código de color + isóneas \rightarrow mapa solar

Estimación de irradiación media

- valores de a y b para las 12 estaciones seleccionadas:

LOCALIDAD	LAT	LON	a(x, y)	b(x, y)
Artigas	-30.4	-56.5	0.26	0.46
Carrasco	-34.8	-56.0	0.22	0.46
Durazno	-33.4	-56.5	0.23	0.48
Florida	-34.1	-56.2	0.23	0.47
Melo	-32.4	-54.2	0.28	0.41
Paysandú	-32.3	-58.0	0.22	0.52
Rivera	-30.9	-55.5	0.28	0.45
Rocha	-34.5	-54.3	0.25	0.39
Salto	-31.4	-58.0	0.23	0.50
San José	-34.3	-56.8	0.22	0.50
Tacuarembó	-31.7	-55.8	0.26	0.46
Treinta y Tres	-33.2	-54.4	0.26	0.41

- irradiación $\rightarrow \bar{H}(x, y; m) = \bar{H}_0(x, y; m) \left[a(x, y) + b(x, y) \frac{\bar{N}(x, y; m)}{\bar{N}_0(x, y; m)} \right]$
- interpolación + código de color + isóneas \rightarrow **mapa solar**

Software utilizado es libre

Todo el software utilizado para este trabajo
(y para esta presentación) es **Software Libre**.

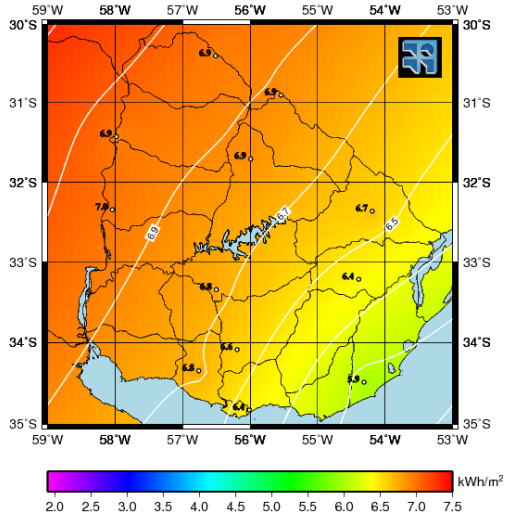
- Sistema operativo Linux (Ubuntu 9.10)
- Compiladores GNU Fortran 97 y C
- Open Office – procesador de textos y planilla electrónica
- L^AT_EX – composición de texto y presentaciones
- GMT – Generic Mapping Tools
- R – paquete de utilidades para análisis estadístico



Indice

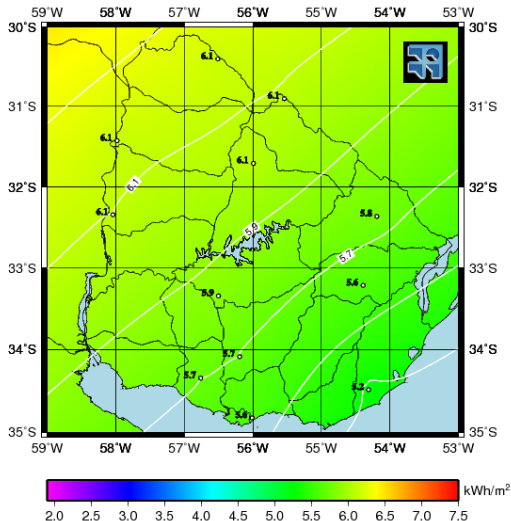
- 1 Marco Institucional
- 2 El recurso solar
 - Europa
 - Argentina
 - Brasil
- 3 Datos y Metodología
 - Datos disponibles para Uruguay
 - Metodología
- 4 **Mapa Solar para Uruguay**
 - **Mapas mensuales para el Uruguay**
 - Validación
- 5 Resumen y Perspectivas

Enero

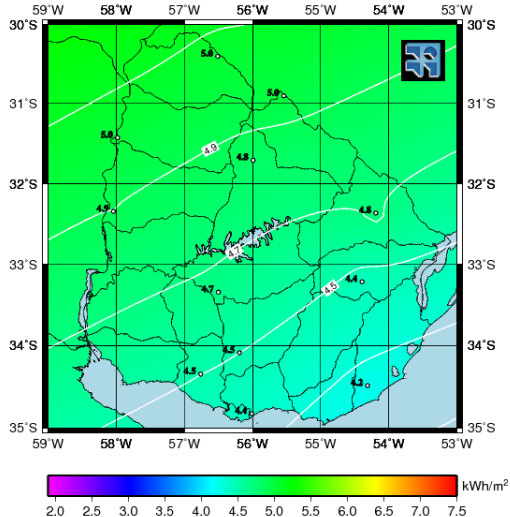


irradiación

Febrero

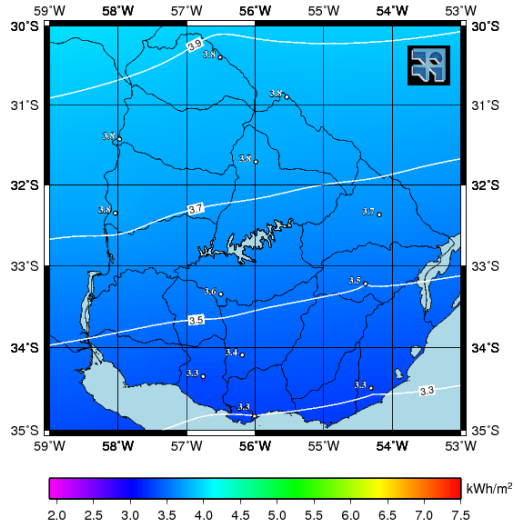


Marzo

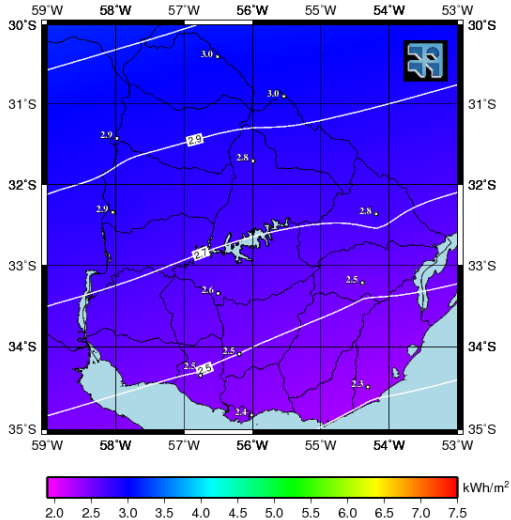


irradiencia

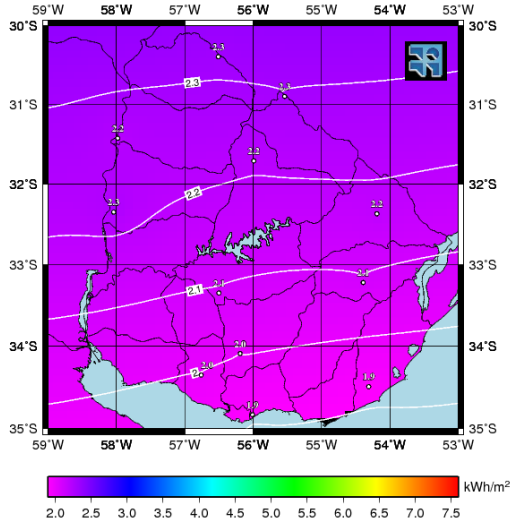
Abril



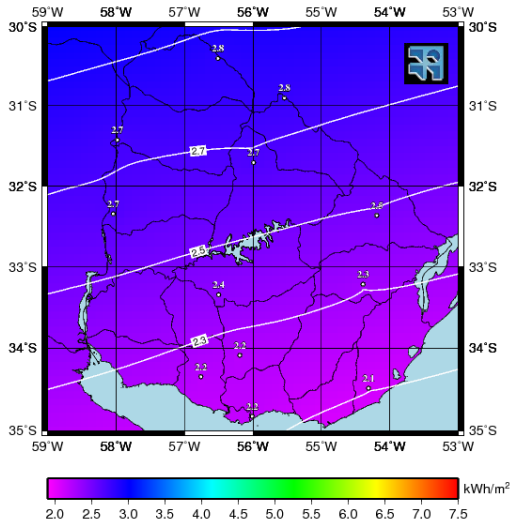
Mayo



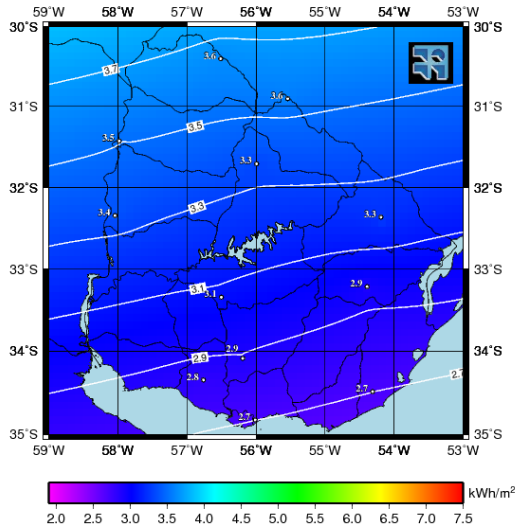
Junio



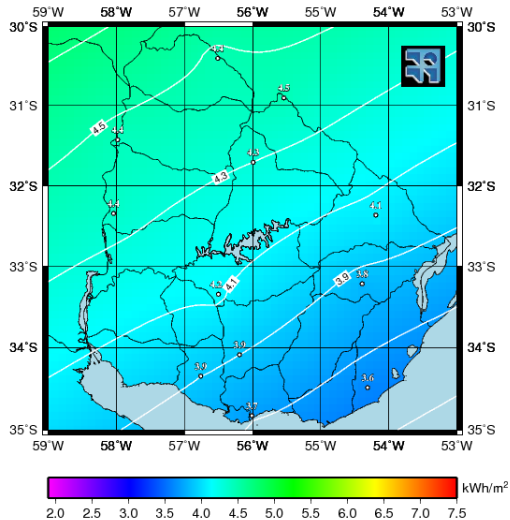
Julio



Agosto

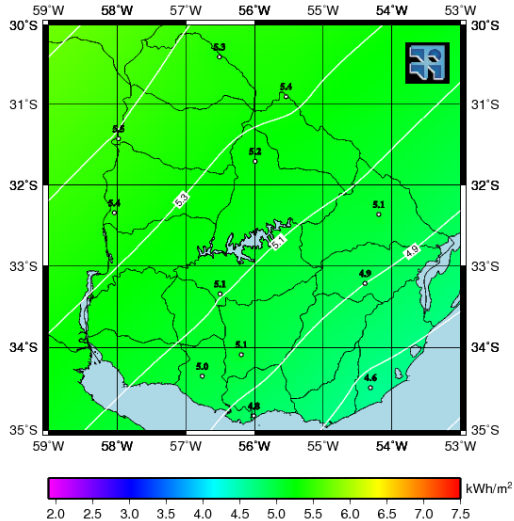


Setiembre



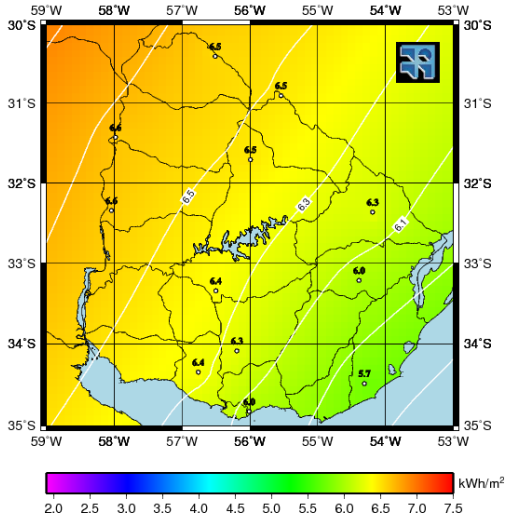
irradiación

Octubre



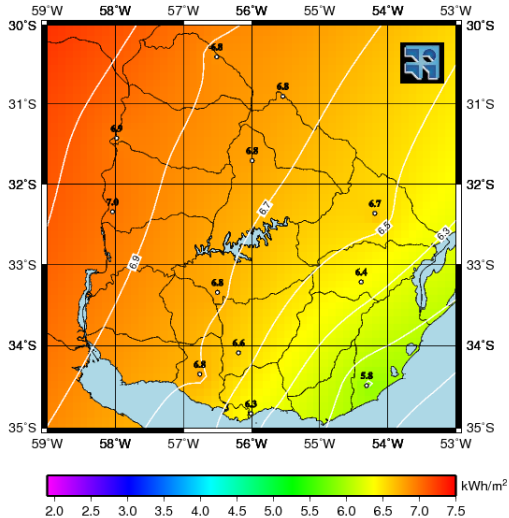
irradiación

Noviembre

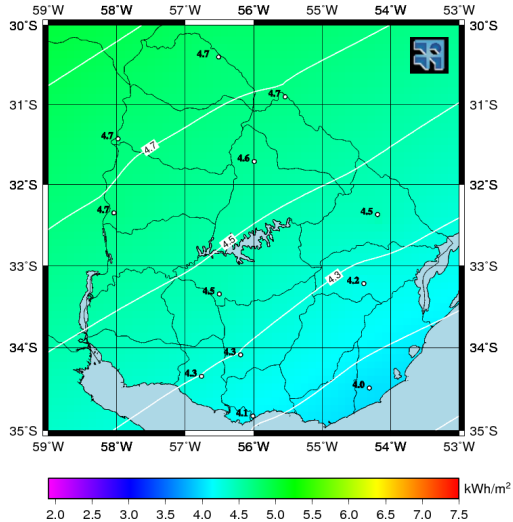


irradiación

Diciembre



Promedio anual



irradiación

Indice

- 1 Marco Institucional
- 2 El recurso solar
 - Europa
 - Argentina
 - Brasil
- 3 Datos y Metodología
 - Datos disponibles para Uruguay
 - Metodología
- 4 **Mapa Solar para Uruguay**
 - Mapas mensuales para el Uruguay
 - **Validación**
- 5 Resumen y Perspectivas

hacia una validación

Primeros pasos:

- 1 **contrastar con datos de la región (5 series de irradiación global)**
- 2 **contrastar con datos propios (calidad controlada): se requiere generar nuevas series de datos de irradiación (estadísticamente significativas) en diferentes puntos de nuestro territorio**
- 3 **uso de imágenes satelitales para estimar radiación:**
 - modelos físicos (transferencia radiativa) – tienden a fallar en días cubiertos
 - modelos estadísticos – deben ser calibrados con medidas de piranómetros en tierra

hacia una validación

Primeros pasos:

- 1 contrastar con datos de la región (5 series de irradiación global)
- 2 contrastar con datos propios (calidad controlada): se requiere generar nuevas series de datos de irradiación (estadísticamente significativas) en diferentes puntos de nuestro territorio
- 3 uso de imágenes satelitales para estimar radiación:
 - modelos físicos (transferencia radiativa) – tienden a fallar en días cubiertos
 - modelos estadísticos – deben ser calibrados con medidas de piranómetros en tierra

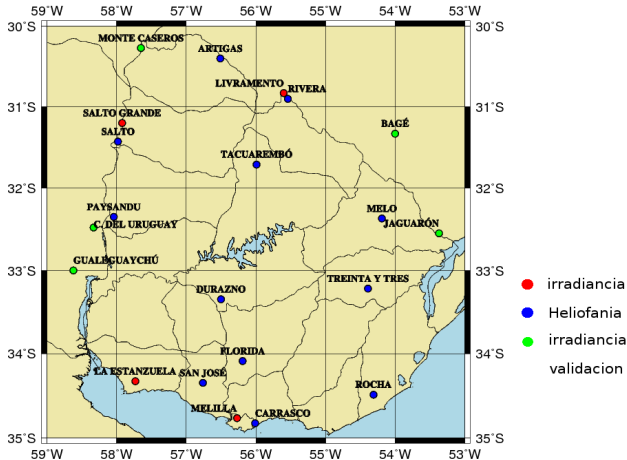
hacia una validación

Primeros pasos:

- 1 contrastar con datos de la región (5 series de irradiación global)
- 2 contrastar con datos propios (calidad controlada): se requiere generar nuevas series de datos de irradiación (estadísticamente significativas) en diferentes puntos de nuestro territorio
- 3 uso de imágenes satelitales para estimar radiación:
 - modelos físicos (transferencia radiativa) – tienden a fallar en días cubiertos
 - modelos estadísticos – deben ser calibrados con medidas de piranómetros en tierra

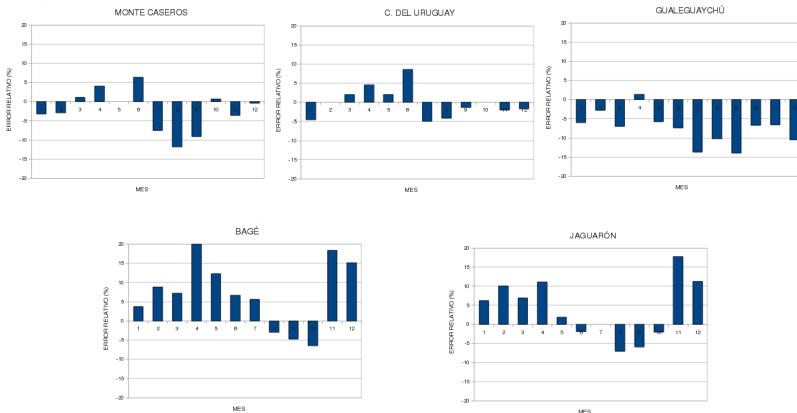
comparación (preliminar) con datos regionales

5 series de radiación regionales usadas para comparar



comparación (preliminar) con datos regionales

Cinco estaciones de validación: Bagé, Jaguarão (INMET) y Concepción del Uruguay, Monte Caseros y Gualeguaychú (RSArg) con irradiación diaria promedio para cada mes. El **error relativo** (%) es típicamente inferior a $\sim 15\%$



nuevos datos: prototipo operacional

ubicación: estación INIA en Las Brujas, Canelones



Sistemas propios de medición de campo

Funcionamiento básico

- Censan el piranómetro cada 20 segundos y almacenan un dato por minuto (el promedio de 3 valores).
- Cada medianoche el equipo envía los datos del día (un dato por minuto, las 24 horas).
- Los datos se procesan usando software confeccionado a medida para obtener los promedios horarios.

Características técnicas (tecnología nacional)

- **Piranómetro:** Kipp & Zonen CMP-6
- **Registrador electrónico:** desarrollado como un proyecto de fin de carrera de Ing. Eléctrica, registra entradas analógicas con una resolución de 12 bits en un rango 0-5V.
- **Amplificador:** produce un rango de tensión de salida de 2.6V, con una resolución en irradiación de 0.56 W/m^2 .

Sistemas propios de medición de campo

Funcionamiento básico

- Censan el piranómetro cada 20 segundos y almacenan un dato por minuto (el promedio de 3 valores).
- Cada medianoche el equipo envía los datos del día (un dato por minuto, las 24 horas).
- Los datos se procesan usando software confeccionado a medida para obtener los promedios horarios.

Características técnicas (tecnología nacional)

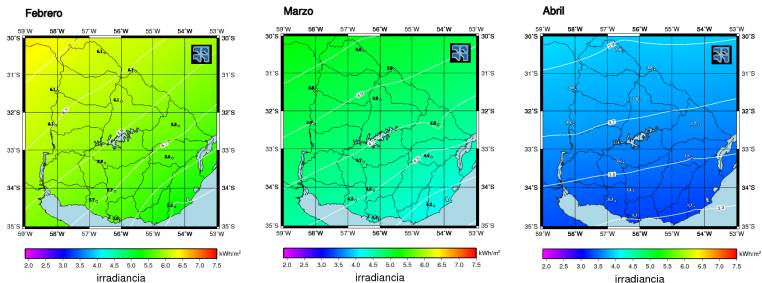
- **Piranómetro:** Kipp & Zonen CMP-6
- **Registrador electrónico:** desarrollado como un proyecto de fin de carrera de Ing. Eléctrica, registra entradas analógicas con una resolución de 12 bits en un rango 0-5V.
- **Amplificador:** produce un rango de tensión de salida de 2.6V, con una resolución en irradiación de 0.56 W/m^2 .

comparación con medidas recientes

Las Brujas, Canelones, 2010

mes	promedio (MSU)	medidas	dif (%)
febrero 2010	5.6	5.6	0
marzo 2010	4.4	5.3	20
abril ¹ 2010	3.3	3.7	12

(1) promedio de los registros de abril hasta el 20/04/2010



Resumen y Perspectivas

El *mapa solar* no es algo estático, sino que debe entenderse como un proceso incremental que tiende a una mejora continua en el conocimiento del recurso solar en el Uruguay.

algunas direcciones a futuro:

- análisis de incertidumbre y significancia estadística de las series
- incorporar la variación temporal de a y b
- extender la implementación de medidas de campo automáticas
- modelado de irradiancia a partir de imágenes satelitales
- separación de componentes directa y difusa
- estudio de complementariedad entre el recurso hídrico y el solar
- estudio de complementariedad entre el recurso eólico y el solar

Resumen y Perspectivas

El *mapa solar* no es algo estático, sino que debe entenderse como un proceso incremental que tiende a una mejora continua en el conocimiento del recurso solar en el Uruguay.

algunas direcciones a futuro:

- análisis de incertidumbre y significancia estadística de las series
- incorporar la variación temporal de a y b
- extender la implementación de medidas de campo automáticas
- modelado de irradiancia a partir de imágenes satelitales
- separación de componentes directa y difusa
- estudio de complementariedad entre el recurso hídrico y el solar
- estudio de complementariedad entre el recurso eólico y el solar

Agradecimientos



Los siguientes individuos e instituciones han colaborado directa o indirectamente con este trabajo, aportando RRHH, datos, financiamiento, uso de equipamientos e instalaciones o asesoramiento:

- Dirección Nacional de Energía y Tecnología Nuclear, DNETN/MIEM
- PEDECIBA – Física
- UTE, Gerencia de Planificación de la Explotación
- Dirección Nacional de Meteorología – DNM, Uruguay
- GRAS (Clima), Unidad de Agro-clima y Sistemas de información del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias – INIA
- Mesa Solar – Uruguay
- Dr. Hugo Grossi Gallegos, GER Solar, División Física, Depto. de Ciencias Básicas, Universidad Nacional de Luján, Argentina
- Ing. J. L. Duomarco
- Ing. Pedro Galione
- Ing. Ventura Nunes, Bach. Pablo Toscano, IIE, Facultad de Ingeniería - UdeLaR
- Dra. Graciela Lesino y Dr. Luis Saravia, Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta (UNSA), República Argentina
- Servicio Meteorológico Nacional – SMN, Argentina.
- Instituto Nacional de Meteorología – INMET Brasil.
- PROBIDES
- Ing. Rodolfo Pedocchi, Unidad de Sistemas Ambientales, Facultad de Agronomía, UdeLaR
- Institutos de Física (IF), de Ingeniería Eléctrica (IIE), de Mecánica de Fluidos e Ing. Ambiental (IMFIA), Facultad de Ingeniería - Universidad de la República, Uruguay

FIN

Muchas gracias por su atención!

