

# **SOBRE LA COMPLETITUD DE LAS SERIES TEMPORALES DE RADIACION SOLAR EN LA PAMPA HÚMEDA ARGENTINA**

**Raúl Righini<sup>1</sup>, Darío Licata Caruso<sup>1</sup>, Rosana Aristegui<sup>1</sup>, Sergio Luza<sup>1</sup>, Valeria Stern<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>GERSolar – INEDES (CONICET)

Departamento de Ciencias Básicas- Universidad Nacional de Luján

Provincia de Buenos Aires

Tel. 02323-440241–e-mail:gersolarunlu@gmail.com

**RESUMEN:** En el análisis de series temporales es común la ausencia de datos en la medición de la irradiancia solar a nivel de superficie. El presente trabajo analiza exhaustivamente la influencia de faltantes de datos diarios (entre 1 y 7 días) en el cálculo de los valores diarios promedios mensuales de la irradiación solar. Se extiende el análisis realizado para la estación Lujan en un trabajo anterior a gran parte de la Pampa Húmeda argentina. Se emplean para ello datos provenientes de la red de estaciones que el GERSolar y el INTA administran en la región pampeana.

**Palabras clave:** radiación solar, completitud de series, promedios diarios mensuales.

## **INTRODUCCIÓN**

En la medición de la irradiancia solar en superficie es una constante la pérdida esporádica, en el mejor de los casos, de cierto porcentaje de datos, ya sean en base minutal, horaria, diaria u otras.

Ante ello permanentemente deben tomarse decisiones respecto a las depuraciones de las bases de datos, las que dependerán del uso que vaya a hacerse de los datos.

Un valor de entrada muy utilizado en el cálculo de distintas magnitudes, dependientes de alguna manera de la irradiancia solar en superficie, es el valor diario promedio mensual de la irradiación solar en el plano horizontal.

Algunos autores aconsejan desechar los meses que presenten más de tres días de pérdidas de datos (Grossi Gallegos et al., 2016-2017). Esa decisión resultaba razonable, dado que la probabilidad de fallos era alta en lo que hace al malfuncionamiento de los equipos durante tres días consecutivos (al menos con la tecnología presente en el almacenamiento de datos hasta hace una década atrás). Esos días pueden resultar claves, elevando el error de ese promedio a niveles incompatibles con el grado de incerteza pretendido para el cálculo de los promedios diarios mensuales.

Las nuevas tecnologías aplicadas al registro y almacenamiento de la información presentan singularidades que las diferencian de las antiguas, fundamentalmente en dos aspectos: los errores presentes son menores; la probabilidad de fallos tiene mayor aleatoriedad.

Debido a que, por un lado los valores medios resultan clave para el dimensionamiento de los sistemas de aprovechamiento de la radiación solar como fuente energética; que las series deben tener en determinados sitios una gran extensión temporal para resultar representativas; y que los faltantes de datos son un problema recurrente en todas las estaciones de medición, resulta importante evaluar de manera exhaustiva cuántos días pueden perderse sin afectar dichas medias diarias mensuales significativamente.

El pasado año se presentó un trabajo (Luza et al., 2018) que analizaba los efectos de la pérdida de días de medición en el cálculo de los valores diarios medios mensuales de irradiación solar para la estación de medición de la radiación solar situada en Luján, en el campo de la UNLu.

Esa publicación evaluó la incidencia de días faltantes en el cálculo de los valores diarios medios mensuales de irradiación solar en plano horizontal a nivel de la superficie terrestre. Los resultados (obtenidos extrayendo todas las combinaciones posibles de días faltantes entre 1 y 7 en un mes)

mostraron que calcular dicho valor medio en series diarias mensuales provoca desvíos promedios respecto a la media real menores al 4%. Los desvíos medios crecen con el número de días faltantes y también lo hacen los desvíos máximos. No obstante, es relevante que la probabilidad de cometer errores mayores al 5% resultó, en general, menor al 25% en casi todos los casos, aun con faltantes de 7 días de datos.

El análisis, por lo tanto, fijó procedimientos frente a datos faltantes en la Estación Luján. Pero dicho punto resulta poco representativo dentro de la amplia cobertura espacial que presenta la red que en la Pampa Húmeda argentina administra el GERSolar en conjunto con INTA.

Dicha red consta de 9 estaciones de medición en un área aproximada de 240.000 km<sup>2</sup>. La extensión del área de cobertura y la posibilidad de comportamientos diferentes de las series temporales de radiación en los distintos sitios de medición ameritan extender el análisis realizado en Luján al resto de las estaciones que conforman la red.

## **ANTECEDENTES**

El GERSolar y el INTA administran una red de medición de la radiación solar establecida, fundamentalmente, en estaciones meteorológicas de INTA. La red cuenta, en alguna de sus estaciones, con más de diez años de medición de valores de irradiación solar, habiéndose mejorado sus prestaciones durante los últimos años a través de la instalación de sensores piranométricos de calidad y adquirentes de datos que permiten integrar los niveles de irradiación una vez por minuto. Al día de hoy la red está constituida por las estaciones: Anguil, Balcarce, Luján, Pergamino, Paraná, Marcos Juárez, General Villegas, Concepción del Uruguay y Barrow.

Regularmente esa red brinda información del valor diario promedio mensual, obteniéndose el mapa que lo representa a través del uso del kriging como método de interpolación en el área de cobertura de la red (<http://www.gersol.unlu.edu.ar/index.html>).

La operación sostenida de la red durante varios años (siete años en promedio) ha permitido trazar los mapas de irradiación solar preliminares correspondientes a dicha zona (Aristegui et al. 2018).

El objetivo primario de la red es adquirir datos que permitan dimensionar sistemas de aprovechamiento energético de la radiación solar y, al mismo tiempo, brindar información de interés agro-meteorológico y biológico.

Las estaciones están equipadas con piranómetros Kipp&Zonen, modelos CMP11, CMP5 y Eppley, modelo 8-48 (Black & White). Todos ellos son regularmente calibrados (cada dos años) en el Laboratorio de Calibración del GERSolar (Righini, Aristegui, 2015).

La incerteza promedio de estas mediciones se evalúa en un 5%. Dicho valor resulta plenamente aceptable para la mayoría de las aplicaciones que utilicen la energía solar como fuente primaria de energía. Los adquirentes de datos empleados son de la firma Campbell, modelos CR1000 y CR800, cuyo error asociado a la medición de voltaje resulta despreciable frente a las incertezas con que se determinan las sensibilidades de los solarímetros.

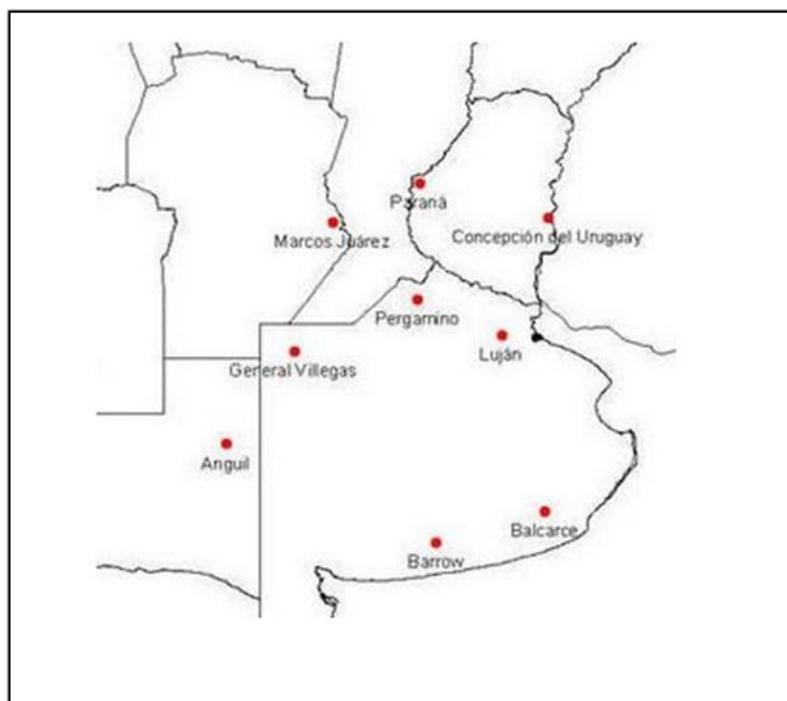


Fig. 1. Ubicación de los sitios de medición de la Red Solarimétrica Regional de la Pampa Húmeda.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se trabajó con datos de medición proveniente de ocho estaciones pertenecientes a la red pampeana que el GERSolar administra juntamente con INTA: Anguil, Balcarce, Pergamino, Paraná, Marcos Juárez, General Villegas, Concepción del Uruguay y Barrow. El registro de los datos tiene en la actualidad una frecuencia minutal.

Para evaluar la influencia de la pérdida de datos se realizó idéntico procedimiento al aplicado en la estación Luján, descrito en el artículo publicado el pasado año:

- Se extrajeron una serie de días (desde uno hasta siete) en cada uno de los meses de las series completas de datos disponibles para cada estación de la red. La extracción cubrió todas las combinaciones posibles de esa cantidad de días faltantes dentro de cada mes analizado.
- El valor absoluto de la diferencia porcentual (relativa al promedio sin extracción) de los promedios sin extracción y los promedios con extracción se denominó desvío, y fue calculado para cada una de las extracciones realizadas en cada mes de datos disponibles en las estaciones. En promedio, se analizaron siete años de datos.
- También se calcularon los desvíos máximos para los distintos días faltantes en cada estación y la probabilidad de que los desvíos superasen el 5% (siempre referido a los valores diarios medios mensuales).

Los desvíos, así obtenidos, permitieron evaluar exhaustivamente las consecuencias que la pérdida de datos de una serie trae aparejada en lo que hace al cálculo de los valores diarios medios mensuales.

## RESULTADOS

En las Tablas 1 y 2 se muestran algunos de los resultados, a modo de ejemplo, considerándose no menos de 5 años de datos en cada estación.

		<b>Días extraídos</b>											
		<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>
<b>Barrow</b>	1	0,53	0,79	0,76	1,20	1,08	0,89	1,11	1,03	1,14	0,93	0,81	0,56
	2	0,78	1,13	1,12	1,68	1,48	1,29	1,54	1,48	1,60	1,30	1,21	0,83
	3	0,97	1,39	1,39	2,05	1,83	1,59	1,90	1,83	1,96	1,60	1,51	1,03
	4	1,14	1,63	1,63	2,41	2,14	1,85	2,23	2,13	2,30	1,87	1,78	1,22
	5	1,30	1,86	1,85	2,74	2,43	2,10	2,53	2,42	2,62	2,13	2,02	1,39
	6	1,46	2,08	2,06	3,06	2,71	2,34	2,83	2,70	2,92	2,37	2,26	1,55
	7	1,60	2,29	2,27	3,37	2,99	2,58	3,11	2,98	3,22	2,61	2,48	1,71
<b>Marcos Juárez</b>	1	0,65	1,02	0,82	1,14	1,19	0,86	1,17	0,91	1,05	0,94	0,94	0,79
	2	0,92	1,44	1,23	1,63	1,60	1,25	1,59	1,31	1,49	1,34	1,37	1,13
	3	1,14	1,78	1,51	2,01	1,99	1,53	1,99	1,63	1,83	1,63	1,67	1,38
	4	1,35	2,09	1,75	2,35	2,33	1,80	2,31	1,93	2,13	1,91	1,95	1,62
	5	1,54	2,38	1,99	2,68	2,65	2,04	2,63	2,20	2,42	2,17	2,22	1,84
	6	1,72	2,66	2,22	2,99	2,95	2,28	2,92	2,46	2,70	2,42	2,48	2,05
	7	1,89	2,95	2,44	3,29	3,25	2,51	3,22	2,70	2,98	2,67	2,73	2,33

*Tabla 1: Desvíos medios porcentuales en función del número de días faltantes en el cálculo mensual para las estaciones de Barrow y Marcos Juárez.*

		<b>Días extraídos</b>											
		<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>
<b>Gral. Villegas</b>	1	2,77	3,18	2,90	2,87	2,78	2,72	3,04	2,78	3,15	3,05	3,00	2,82
	2	5,3	5,46	4,71	5,80	5,70	5,39	6,13	5,66	6,36	5,78	5,96	5,71
	3	8,09	3,49	6,79	8,79	8,48	8,22	9,24	8,60	9,79	8,52	8,64	8,58
	4	10,31	0,34	8,94	11,42	11,38	10,93	12,42	11,58	13,43	11,05	11,36	11,47
	5	11,93	2,59	10,92	14,37	14,31	13,44	15,41	14,63	17,09	14,02	14,12	14,33
	6	13,54	5,00	12,88	17,28	17,40	16,14	18,42	17,62	20,50	16,65	16,65	17,13
	7	15,09	7,49	14,50	20,09	20,67	18,75	21,52	20,83	24,14	19,33	19,22	18,60
<b>Pergamino</b>	1	3,03	3,26	2,78	3,25	2,92	3,18	2,99	3,19	3,21	2,79	3,09	2,99
	2	5,40	4,89	5,15	6,49	5,85	6,24	6,08	6,35	6,28	5,63	5,81	5,58
	3	7,72	5,56	7,50	9,65	8,71	8,97	9,07	9,04	9,48	8,26	8,50	7,91
	4	9,94	3,39	9,81	12,93	11,70	12,16	12,06	12,01	12,95	11,27	11,15	9,77
	5	11,82	3,86	12,08	16,17	14,89	15,34	15,18	15,18	16,68	14,08	13,19	11,45
	6	13,78	1,44	13,59	19,22	18,28	18,54	17,98	18,30	19,66	17,27	15,18	13,35
	7	15,39	3,14	14,77	22,13	21,92	21,47	20,68	21,44	22,86	20,58	17,82	15,19

*Tabla 2, Desvíos máximos porcentuales en función del número de días faltantes en el cálculo mensual para las estaciones de General Villegas y Pergamino.*

Las tablas anteriores, dadas para algunas estaciones, son bastante similares para el resto de los sitios de medición de la red solarimétrica. Más allá de pequeñas variaciones locales, los promedios resultan representativos del comportamiento general.

		Días extraídos											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Paraná	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,25	0,44	0,07	0,92	0,90	0,38	2,19	0,70	1,32	0,54	0,69	0,08
	3	1,76	1,40	0,54	2,25	7,16	3,05	9,47	3,04	2,81	2,57	1,55	0,58
	4	3,43	3,14	1,48	4,75	12,70	6,47	14,02	5,74	5,59	5,96	4,07	1,32
	5	4,65	5,86	3,00	8,97	17,74	9,87	19,16	8,74	9,40	9,56	7,11	2,38
	6	7,88	9,10	4,86	13,07	22,62	13,39	23,51	11,63	13,81	14,17	9,70	4,71
	7	10,48	12,14	6,91	16,80	27,11	17,44	27,66	14,79	18,05	18,30	13,12	7,33
Anguil	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,22	0,53	0,65	1,38	4,95	1,61	1,72	3,23	2,76	2,80	0,46	0,43
	3	0,44	0,98	2,14	4,90	14,66	3,28	8,16	4,94	4,73	7,07	1,23	0,89
	4	0,87	1,88	3,54	9,79	22,68	7,02	15,45	11,53	13,42	15,26	2,34	2,13
	5	1,51	3,06	6,73	14,98	28,76	13,42	20,67	18,36	18,38	20,69	3,58	3,38
	6	2,31	4,93	11,00	19,71	34,20	18,90	26,08	23,31	23,11	25,75	6,58	6,20
	7	3,20	8,47	15,49	24,39	38,88	23,20	30,68	27,76	28,20	30,56	10,34	10,30

Tabla 3: Probabilidad de que los desvíos de las medias mensuales sean mayores al 5%, en función del número de días faltantes en el cálculo mensual para las estaciones de Paraná y Anguil.

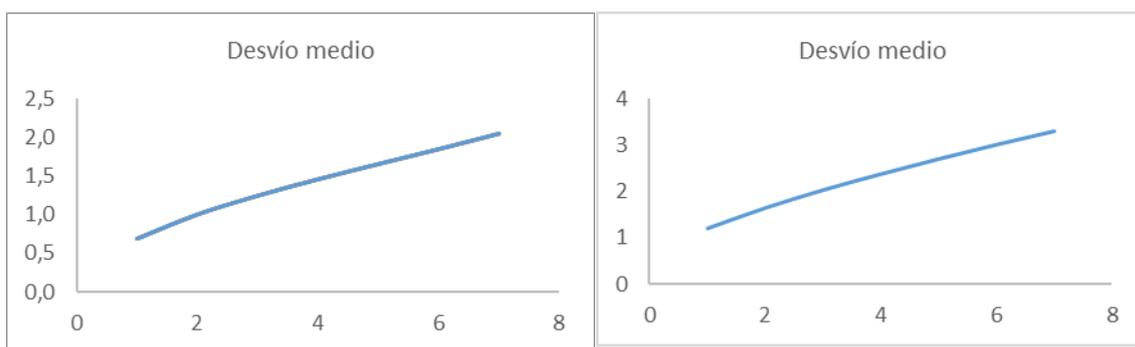


Figura 2: Desvíos medios porcentuales promedio de todas las estaciones, en función del número de días faltantes para los meses de enero (izquierda) y mayo (derecha).

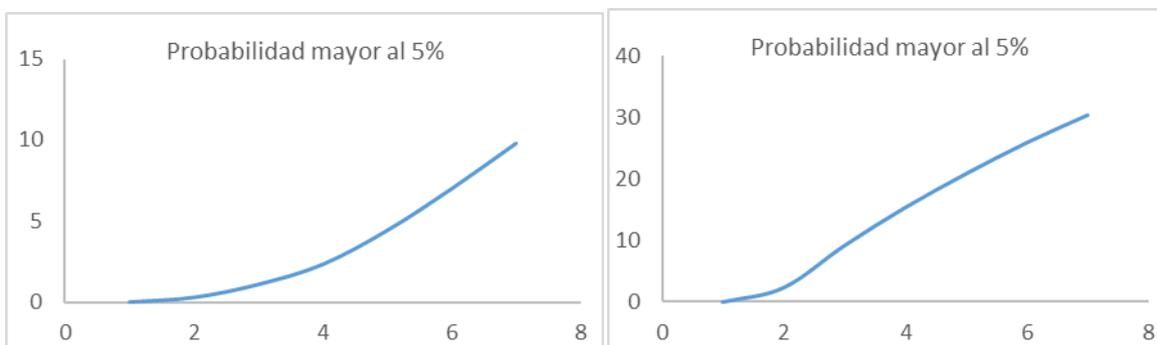


Figura 3: Probabilidad porcentual de que los valores medios difieran de los reales en un valor mayor al 5%, en función del número de días faltantes para los meses de enero (izquierda) y julio (derecha).

En general puede notarse que en ninguna estación los desvíos medios superan el 4%, aún en los meses en los que el cálculo se realiza con falta de siete días. Por supuesto que hay desvíos superiores a ese valor (que crecen a medida que crece el número de días faltantes). Los desvíos máximos pueden ser

importantes (pueden llegar al 22% para 7 días en algunas estaciones, aunque rondan el 15% con ese número de días faltantes). Pero la probabilidad de que ocurran es relativamente baja. El valor más alto de esa probabilidad se da en Marcos Juárez, durante el mes de abril, con 7 días faltantes (43,3%). En el resto de los sitios, la probabilidad de desvío mayor al 5% es sensiblemente menor. En particular durante los meses de primavera y verano, las probabilidades de desvío mayor al 5% resultan menores al 30% en todas las estaciones (en particular en los meses de verano).

Como era de esperar, los resultados obtenidos dependen de la variabilidad de la radiación solar en cada estación. La variabilidad media está definida por el siguiente coeficiente:

$$V = \frac{\sigma}{\bar{X}} \cdot 100$$

donde  $\bar{X}$  representa el valor medio de la radiación solar diaria media mensual y  $\sigma$  su desvío estándar.

Cuanto mayor sea la variabilidad mayores serán los desvíos medios y máximos. De igual modo la función que represente la probabilidad de error mayor al 5% irá creciendo con el número de días faltantes en el cálculo de los valores diarios medios mensuales. El siguiente gráfico da cuenta de las variabilidades en cada una de las estaciones para cada mes.

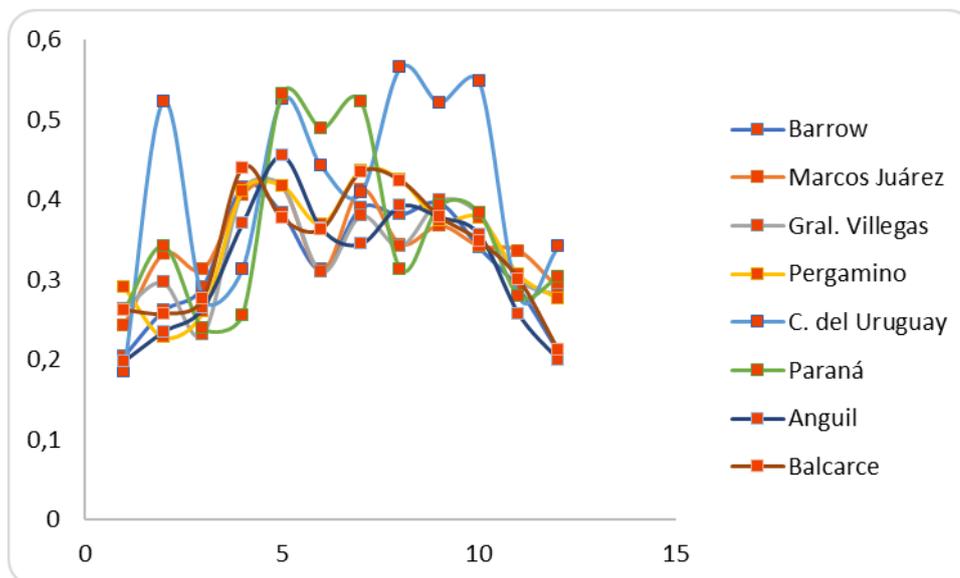


Figura 4: Coeficiente de variabilidad media para cada una de las estaciones de la red pampeana para cada mes

Puede notarse que, en general, la variabilidad tiende a crecer durante los meses invernales (los de menor irradiación solar), ya que el denominador en la ecuación que define el coeficiente de variabilidad es menor. A pesar de que algunos sitios presentan situaciones especiales debido a particularidades climáticas zonales (tal como ocurre en Concepción del Uruguay), esa tendencia se mantiene a grandes rasgos en todos los lugares donde están instaladas las estaciones de medición.

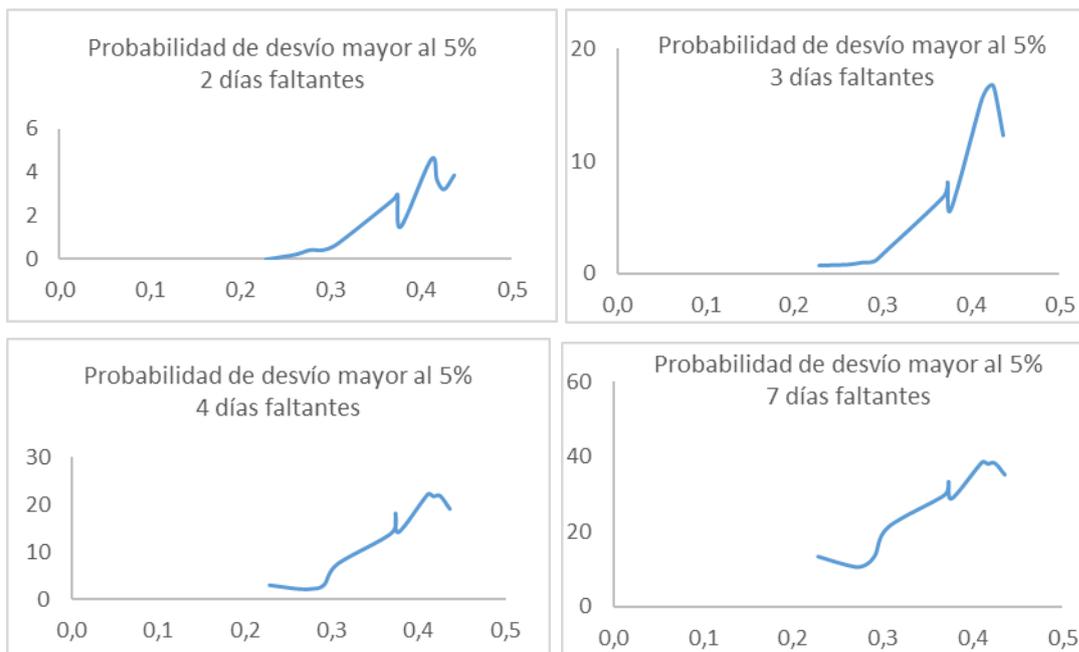


Figura 5: Probabilidad de desvío mayor al 5% en función del coeficiente de variabilidad para cada número de días faltantes. Estación Pergamino.

Esa variabilidad está relacionada con la probabilidad de calcular los valores diarios medios mensuales con un error superior al 5%. Es de esperar que la probabilidad no sólo crezca con el número de días extraídos sino también con la variabilidad de la irradiación solar. Efectivamente, esa relación creciente se da en todas las estaciones y depende del número de días faltantes. Cuando los días faltantes son pocos, la probabilidad es casi independiente de la variabilidad, pero a medida que crece el número de datos ausentes, la correlación creciente entre datos faltantes y variabilidad es más acusada y, obviamente, se hace mayor cuando el número de días faltantes es mayor. A modo de ejemplo se muestra en la Fig. 5 la relación para la estación Pergamino.

## CONCLUSIONES

Del análisis sistemático del cálculo de la radiación solar diaria media en función del número de días de datos faltantes en el cálculo del promedio, se desprende que pueden extenderse los resultados obtenidos anteriormente para Luján al resto de la Pampa Húmeda. En efecto, las estaciones de la red pampeana de medición tienen un comportamiento similar a la estación Luján ante una determinada cantidad de días faltantes para el cálculo de los valores medios. A medida que los días faltantes se incrementan, aumentan los desvíos, y si bien esos desvíos pueden alcanzar en algunos casos valores máximos importantes (pudiendo llegar al 22% para 7 días faltantes) la probabilidad de sufrir desvíos mayores al 5% resulta en general, menor al 30%, aún para un número alto de días faltantes.

Es decir que, en el peor de los casos, en la estación que presenta desvíos mayores, en la más desfavorable de las estaciones, con el más alto número de días ausentes, la probabilidad de cometer un error superior al 5% promediando sobre los datos existentes resulta menor al 43%.

Este hecho, según nuestra opinión, resulta significativo en la decisión que se tome a la hora de descartar informaciones provenientes de meses enteros en las redes de medición por ausencia de datos diarios.

En todo caso, esa decisión debe basarse en apreciaciones basadas en datos reales con estadística suficiente.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer el trabajo desinteresado de todos los observadores de INTA y UNLu que operan la red de estaciones de la Pampa Húmeda argentina, y de su coordinadora Gabriela Posse: Marta Borda, Laura Belmonte; Lorena Carreño, Matías Cambareri. Sebastián Bazán, Matías Parquet, Hernán Sceglio, Néstor Garcarena; Gustavo Maffini, Sebastián Muñoz, Nicolás Vaiman y Gabriela Posse.

## **REFERENCIAS**

Grossi Gallegos H., Coquet E. Influencia de la pérdida de datos sobre los promedios de irradiación solar global. Revista Averma, Vol 4, pp. 11.53-11.61 (2016).

Grossi Gallegos, H. , Coquet, E: La pérdida de datos diarios de irradiación solar global y una evaluación sobre su influencia en los promedios mensuales. Revista de Climatología. Vol 17, pp: 45-57 (2017).

Luza Regueiro S, Righini R., Bazán S. y Roldán A: Sobre la completitud de las series temporales de datos de irradiación solar en Luján, Provincia de Bs. As. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (ISSN 0329-5184) Vol. 22, pp. 7.21-7.26 2018.

Righini R. y Aristegui R.: Caracterización del nuevo laboratorio de calibración del GERSolar. Avances en Energías Renovables y medio Ambiente, (ISSN 0329-5184),Vol. 3, pp. 11.01-11.09, 2015.

Aristegui R., Righini R., Stern V., Lell J., Bazán S., Nuevo Atlas de Radiación Solar de la Pampa Húmeda Argetntina: Resultados preliminares. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (ISSN 0329-5184) Vol. 22, pp. 7.11-7.19 2018.

## **ABOUT OF THE COMPLETENESS OF THE TEMPORARY SERIES OF SOLAR RADIATION IN THE PAMPA HÚMEDA ARGENTINA**

### **ABSTRACT**

The absence of data in the measurement of solar irradiance at the surface level is common in the analysis of time series. The present work exhaustively analyzes the influence of missing daily data (between 1 and 7 days) in the monthly average daily values of solar irradiation calculation. The previous work for the Lujan station is extended, to Pampa Húmeda argentina. For this purpose, data from the network of stations that GERSolar and INTA administer in the Pampean region are used.

**Keywords:** solar radiation, series completeness, monthly daily averages