

EVALUACION PRELIMINAR DEL RECURSO SOLAR EN ARGENTINA

H. GROSSI GALLEGOS*, I. NOLLMANN, R. LOPARDO
y G. ATIENZA

Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales
Departamento de Energía No Convencional
Avda. Mitre 3100 - 1663 San Miguel
Buenos Aires , Argentina

RESUMEN

Se presentan en este trabajo los resultados del procesamiento de los datos adquiridos durante los años de operación de la Red Solarimétrica, indicándose la distribución espacio-temporal de la radiación solar global diaria media registrada en la zona relevada, analizándose la distribución de frecuencia de la misma. Se discute la validez de los resultados y se los compara con los de otros trabajos existentes.

1. INTRODUCCION

Luego de la aparición en 1956 del conocido trabajo de Black (1) sobre la distribución de la radiación solar sobre la superficie terrestre, basado en su mayor parte en datos medidos indirectamente a través de correlaciones entre nubosidad y radiación, el que, si bien cubre el área, no utiliza datos de estaciones sudamericanas, y de la comparación llevada a cabo en 1958 por Burdecki (2) entre estos resultados y los datos del Observatorio de Voeikov, Landsberg (3) publicó en 1961 una revisión teniendo en cuenta nuevas mediciones llevadas a cabo durante el Año Geofísico Internacional, presentando un mapa de la distribución anual de la radiación global en intervalos de 20 Kcal/cm², al que comparó con los trabajos anteriores.

En la introducción de este trabajo, Landsberg comentaba que "la explotación de la radiación solar en la superficie de la tierra ha llegado a ser más que un sueño utópico. Los diseños para transformar esta energía en formas utilizables están aumentando en número y eficiencia. Extrañamente, no se obtiene fácilmente información acerca de la energía incidente de esta fuente. El costo de los equi-

pos para registrar la intensidad de la radiación solar y el experto cuidado necesario para este equipamiento ha demorado el progreso en este campo por muchos años". Los años han pasado pero lo dicho entonces tiene aún plena validez para nuestra región.

Cinco años más tarde se publicó el trabajo de Lof y colaboradores (4) en el que se presentan 12 mapas mundiales de la distribución de la radiación total diaria incidente sobre una superficie horizontal, elaborados a partir de datos medidos de radiación o heliofanía en diferentes estaciones, incluyéndose algunas de nuestro país. Para el trazo de las líneas de igual radiación se tuvieron en cuenta el valor estadístico de los promedios, la clasificación climática y la vegetación.

La resolución espacial de estos trabajos no era muy grande pero permitió una primera estimación de las condiciones que presentaba nuestro país para el aprovechamiento de la energía solar.

En la década del 70 comienzan a aparecer los primeros trabajos locales tendientes a establecer la distribución de la radiación solar en Argentina con mayor resolución espacial. La mayoría de las mediciones se realizaban con piranógrafos bimetalicos del tipo conocido como Robitzsch, excepto en seis estaciones del Servicio Meteorológico Nacional en las que se encontraban instalados piranómetros termoeléctricos; los datos de estos últimos fueron procesados y publicados en 1970 en un trabajo realizado por Kurlat y Fernández (5).

En 1971 Marone (6) publicó los resultados de sus mediciones efectuadas con un piranómetro termoeléctrico en Mendoza y en 1972 aparecen las cartas de radiación global mensual de Crivelli y Pedregal (7), construidas en base a correlaciones entre la heliofanía y la radiación global medida en nuestro país (8,9), teniendo en cuenta además el

* Miembro de la Carrera del Investigador del CONICET.

EVALUACION PRELIMINAR DEL RECURSO SOLAR EN ARGENTINA

H. GROSSI GALLEGOS*, I. NOLLMANN, R. LOPARDO
y G. ATIENZA

Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales
Departamento de Energía No Convencional
Avda. Mitre 3100 - 1663 San Miguel
Buenos Aires , Argentina

RESUMEN

Se presentan en este trabajo los resultados del procesamiento de los datos adquiridos durante los años de operación de la Red Solarimétrica, indicándose la distribución espacio-temporal de la radiación solar global diaria media registrada en la zona relevada, analizándose la distribución de frecuencia de la misma. Se discute la validez de los resultados y se los compara con los de otros trabajos existentes.

1. INTRODUCCION

Luego de la aparición en 1956 del conocido trabajo de Black (1) sobre la distribución de la radiación solar sobre la superficie terrestre, basado en su mayor parte en datos medidos indirectamente a través de correlaciones entre nubosidad y radiación, el que, si bien cubre el área, no utiliza datos de estaciones sudamericanas, y de la comparación llevada a cabo en 1958 por Burdecki (2) entre estos resultados y los datos del Observatorio de Voeikov, Landsberg (3) publicó en 1961 una revisión teniendo en cuenta nuevas mediciones llevadas a cabo durante el Año Geofísico Internacional, presentando un mapa de la distribución anual de la radiación global en intervalos de 20 Kcal/cm², al que comparó con los trabajos anteriores.

En la introducción de este trabajo, Landsberg comentaba que "la explotación de la radiación solar en la superficie de la tierra ha llegado a ser más que un sueño utópico. Los diseños para transformar esta energía en formas utilizables están aumentando en número y eficiencia. Extrañamente, no se obtiene fácilmente información acerca de la energía incidente de esta fuente. El costo de los equi-

pos para registrar la intensidad de la radiación solar y el experto cuidado necesario para este equipamiento ha demorado el progreso en este campo por muchos años". Los años han pasado pero lo dicho entonces tiene aún plena validez para nuestra región.

Cinco años más tarde se publicó el trabajo de Lof y colaboradores (4) en el que se presentan 12 mapas mundiales de la distribución de la radiación total diaria incidente sobre una superficie horizontal, elaborados a partir de datos medidos de radiación o heliofanía en diferentes estaciones, incluyéndose algunas de nuestro país. Para el trazo de las líneas de igual radiación se tuvieron en cuenta el valor estadístico de los promedios, la clasificación climática y la vegetación.

La resolución espacial de estos trabajos no era muy grande pero permitió una primera estimación de las condiciones que presentaba nuestro país para el aprovechamiento de la energía solar.

En la década del 70 comienzan a aparecer los primeros trabajos locales tendientes a establecer la distribución de la radiación solar en Argentina con mayor resolución espacial. La mayoría de las mediciones se realizaban con piranógrafos bimetalicos del tipo conocido como Robitzsch, excepto en seis estaciones del Servicio Meteorológico Nacional en las que se encontraban instalados piranómetros termoeléctricos; los datos de estos últimos fueron procesados y publicados en 1970 en un trabajo realizado por Kurlat y Fernández (5).

En 1971 Marone (6) publicó los resultados de sus mediciones efectuadas con un piranómetro termoeléctrico en Mendoza y en 1972 aparecen las cartas de radiación global mensual de Crivelli y Pedregal (7), construidas en base a correlaciones entre la heliofanía y la radiación global medida en nuestro país (8,9), teniendo en cuenta además el

* Miembro de la Carrera del Investigador del CONICET.

El surgimiento de diferentes grupos que comenzaban a trabajar en nuestro país en el aprovechamiento de la energía solar motivó que se elaborara en el entonces Departamento de Radiación Solar y Meteorología de la ex-Comisión Nacional de Estudios Geo-Heliostáticos, un proyecto de relevamiento solarimétrico con fines energéticos mediante la instalación de estaciones integradas por sensores de bajo costo y con reducción de la intervención de personal en el proceso de adquisición y elaboración de la información, proyecto que, presentado a la Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos, fue aprobado dentro del marco del Proyecto Especial N° 10 del Consejo Interamericano para la Educación, la Ciencia y la Cultura, asignándosele fondos de la Cuenta Mar del Plata a partir de 1976.

Es así que, en noviembre de 1978, y contando ya también con el apoyo de la entonces Secretaría de Estado de Ciencia y Tecnología, comenzaron a funcionar las primeras estaciones de medición de la Red Solarimétrica, la que cuenta hoy con 33 estaciones instaladas (figura 1).

Los lugares de emplazamiento, como así también el instrumental que integra las estaciones, fueron sometidos a cuidadosos estudios y el resultado de los mismos comunicado oportunamente (10 - 18).

En el interín, otros investigadores procesaron datos existentes y publicaron trabajos de carácter regional o nacional (19 - 22). Ultimamente, la Organización Meteorológica Mundial publicó doce mapas de la distribución de la radiación solar global, expresada como fracción de la teórica a top de atmósfera, basado en datos obtenidos desde satélites (23).

2. TRATAMIENTO DE LOS DATOS

Entre las estaciones instaladas se seleccionaron aquellas que por lo menos presentaban un año completo de datos (la estación de Anguil, La Pampa, no cumplía este requisito pero se la incluyó de todas maneras como indicativa de zona); se dejaron de lado las ubicadas en la Antártida ya que ellas merecen un tratamiento especial debido a los problemas que surgen con los elevados ángulos de incidencia, la al-



Figura 1

ta reflectividad y las múltiples reflexiones.

Se fijó como índice de confiabilidad para el valor máximo aceptable de radiación solar el 85% de la extraterrestre y se lo utilizó como filtro en el programa de computación preparado a efectos de archivo y procesamiento de los datos diarios. Se procesaron así los valores publicados en los Boletines de la Red, quedando depurados y almacenados algo más de 20.000 datos obtenidos desde enero de 1979 hasta diciembre de 1982 en las 25 estaciones que se indican en la Tabla I, con algunas excepciones en las que se agregaron algunos meses de 1983.

Cabe acotar que esta revisión permitió detectar algunos errores, como el que afectó los valores provenientes de Colonia Santa Rosa, Salta, en el segundo semestre de 1981, debido a la utilización de un valor equivocado para la constante de acoplamiento entre el solarímetro y el integrador, los que debieron ser multiplicados por 1,63 para obtener su valor correcto. Además, ante las diferencias anotadas entre las estaciones de San Miguel y de Castelar, distantes pocos kilómetros, se solicitó registraran durante un día entero

ESTACION	UBICACION		ALTURA (m)	PERIODO		NUMERO DE DATOS				
	LAT. S	LONG. O		DESDE	HASTA	MAY-JUN JUL	AGO-SET OCT	NOV-DIC ENE	FEB-MAR ABR	ANUAL
1 Abra Pampa	22°50'	65°51'	3484	Jun79	Dic82	26	107	111	47	291
2 Alto Valle	39°01'	67°40'	242	May79	Dic82	353	359	324	265	1301
3 Anguil	36°30'	63°59'	165	Jul82	Mar83	-	82	87	-	165
4 Balcarce	37°45'	58°18'	130	Jun82	May83	88	88	88	77	341
5 Bariloche	41°09'	71°10'	836	May79	Dic82	332	259	182	205	978
6 Cerrillos	24°54'	65°29'	1250	Mar80	Dic82	86	149	151	119	505
7 Cerro Azul	27°39'	55°26'	283	Set79	Dic82	276	335	333	265	1209
8 Colonia Santa Rosa	23°22'	64°30'	322	Set81	Dic82	84	148	144	84	460
9 El Sombrerito	27°39'	58°46'	57	Set79	Dic82	235	196	321	263	1015
10 Famallá	27°03'	65°25'	363	Ene79	Dic82	231	160	300	236	927
11 Marcos Juárez	32°41'	62°07'	115	Ene79	Dic82	368	366	365	354	1453
12 Mercedes	29°10'	58°01'	95	May80	Dic82	241	268	209	122	840
13 Oliveros	32°33'	60°51'	27	Jun81	Dic82	92	92	92	77	353
14 Paraná	31°50'	60°31'	110	Ene79	Dic82	269	232	360	293	1154
15 Pergamino	33°56'	60°34'	65	Dic81	Dic82	89	80	68	88	325
16 Rafaela	31°17'	61°33'	100	Ene79	Dic82	361	362	367	348	1438
17 Rama Caída	34°40'	68°23'	692	Feb80	Dic82	263	274	230	241	1008
18 Roque Sáenz Peña	26°52'	60°27'	90	Set79	Dic82	123	90	97	74	384
19 Rosario de la Frontera	25°47'	64°59'	780	Mar79	Dic82	287	242	235	266	1030
20 San Carlos	25°53'	65°53'	1710	Ene79	Dic82	195	153	134	187	669
21 San Juan	31°37'	68°32'	618	Feb81	Dic82	149	87	144	172	552
22 San Miguel	34°33'	58°44'	26	Ago79	Dic82	268	333	297	264	1162
23 Trelew	43°14'	65°18'	10	Jul79	Dic82	112	161	111	86	470
24 Villa Mercedes	33°43'	65°29'	515	Feb80	Dic82	276	242	242	251	1011

TABLA I

con el sensor cubierto, lo que se hizo el 29 de abril de 1983, anotándose un registro en estas condiciones de $2,0 \text{ MJ/m}^2$, el que se debe a señales emitidas por las plantas transmisoras de radios comerciales ubicadas en las proximidades de la estación. Esta diferencia no es constante a lo largo del tiempo, por lo que se decidió no incluir a Castelar en esta estadística.

3. VARIACIONES ESPACIALES DE LA RADIACION

SOLAR

Las variaciones en los valores de la radiación solar recibida en tierra se deben fundamentalmente a dos motivos: efectos latitudinales y efectos climáticos.

En el primero de los casos, se reciben en promedio diario anual a tope de atmósfera $33,62 \text{ MJ/m}^2$ en Abrapampa y $27,62 \text{ MJ/m}^2$ en Trelew, lo que daría como resultado un gradiente de $-0,29 \text{ MJ/m}^2 (\text{día grado})^{-1}$, pero cabe aclarar que la variación total en verano está por debajo del error instrumental del sistema Red, error estimado en un 6%, mientras que para las variaciones de otoño, invierno y primavera, en la mayoría de los casos, una separación de 3° en latitud no provoca variaciones que superen el nivel antes citado. Sin embargo, para latitudes elevadas, la diferencia en invierno puede superar el 15%.

En el segundo caso, que es sin duda el más importante, se consideró conveniente aumentar la estadística; se agruparon entonces tres meses alrededor de los correspondientes a los solsticios y equinoccios. Es así que se procesaron los datos de mayo-junio-julio, agosto-setiembre-octubre, noviembre-diciembre-enero y febrero-marzo-abril. En base a estos agrupamientos se calculó el valor medio (\bar{H}), la desviación standard (s) y el coeficiente de variación (s/\bar{H}); entre otros posibles estadísticos de la distribución, como por ejemplo la mediana y los cuartiles, el rango inter-cuartil y el porcentaje de días con energías mayores o menores que un dado valor, se ha calculado el conocido como estimador de "skewness", esto es, de la asimetría de la distribución, a_3 , que se construye como el cociente entre el momento de tercer orden y el cubo de la raíz cuadrada del momento de segundo orden (24). Todos ellos se indican para cada estación en la Tabla II.

4. VALOR MEDIO Y COMPLETITUD

Como se mostrara ya una vez en el Boletín semestral (25), la pérdida de datos puede afectar de manera importante el valor de la media aritmética calculada en base a los valores restantes de la radiación. Se tomaron en esa oportunidad dos registros completos y, eliminando datos, se procesaron nuevamente. El resultado fue que, para pequeños a-

partamientos de la completitud máxima, el error introducido en el promedio no era grande, pero a medida que aumentaba el número de registros perdidos la magnitud del error crece apreciablemente, siendo más marcado en períodos de baja radiación.

En realidad, tendríamos que diferenciar en este trabajo dos tipos de incompletitud: la que surge al provocar, por el corte arbitrario de la estadística, que un período de tres meses o un año quede rúnco y que, en consecuencia, no represente cabalmente al mismo, y el que surge de la pérdida de datos en el período en que realmente funcionó la estación y que habla de la calidad de la información proveniente de ella. Ambos tipos de completitud se incluyen, por separado, en la Tabla III, oscilando los valores entre el 20 y el 99%; por lo tanto, teniendo en cuenta este dato y además la extensión de los registros, es posible ponderar los resultados de la estadística.

Los valores medios calculados se indican en los mapas de las figuras 2, 3, 4, 5 y 6. Se observa en el correspondiente a la media anual una zona bastante homogénea en valores alrededor de los $16 \text{ MJ/m}^2 (\text{día})^{-1}$, zona que se diferencia marcadamente en los otros mapas estacionales.

De los resultados anotados merece una revisión el que corresponde al período de verano (noviembre-diciembre-enero) en Pergamino, por ser demasiado elevado y haberse detectado en forma coincidente algunos problemas en el sensor.

En estos mapas se han agregado los valores presentados por Kurlat y Fernández y por Marone (referencias 5 y 6) ya que, en general, las diferencias con los datos de la Red no superan el error instrumental antes señalado y se gana de esta manera en la cobertura del país.

5. DISTRIBUCIONES DE FRECUENCIA

Con los datos archivados se han construido las distribuciones de frecuencia de valores de energía recibida por unidad de área en cada lugar a lo largo de los diferentes días del año, las que también deben ser ponderadas de acuerdo a la completitud a la que antes de hizo referencia. En la figura 7 se pueden observar ejemplos de lo obtenido.

Si la distribución fuera normal (gaussiana), el coeficiente de "skewness" sería nulo. Pero generalmente las distribuciones de frecuencia de valores de radiación diaria son asimétricas. Sobre un período corto, la principal variable que ejerce control sobre los totales diarios es la capa de nubes, la distribución de la cual es en la mayoría de los casos asimétrica. Se puede llegar a observar en algunos lugares distribuciones bi-modales.

N.º DE ESTACION	MAY--JUN--JUL			AGO--SET--OCT			NOV--DIC--ENE			FEB--MAR--ABR			ANUAL							
	\bar{H}	s	s/ \bar{H}	α_3	\bar{H}	s	s/ \bar{H}	α_3	\bar{H}	s	s/ \bar{H}	α_3	\bar{H}	s	s/ \bar{H}	α_3				
	1	15,6	5,7	0,37	-1,65	24,7	5,9	0,24	-1,34	28,4	4,9	0,17	-1,56	18,6	10,4	0,56	-0,82	24,3	7,8	0,32
2	6,9	2,9	0,42	-0,27	15,6	6,2	0,40	-0,08	26,1	5,3	0,20	-1,70	17,2	6,7	0,39	-0,49	16,2	8,8	0,54	+0,12
3	-	-	-	-	15,6	5,9	0,38	-0,05	22,6	6,6	0,29	-1,35	-	-	-	-	-	-	-	-
4	6,2	3,3	0,53	+0,24	13,8	6,8	0,49	+0,47	22,7	7,8	0,34	-0,53	16,3	6,7	0,41	-0,00	14,7	8,7	0,59	+0,40
5	6,3	3,0	0,48	+0,09	14,0	7,0	0,50	+0,26	26,5	6,5	0,25	-1,14	17,0	6,8	0,40	-0,09	14,3	9,2	0,64	+0,52
6	10,6	3,9	0,37	-0,68	16,6	6,9	0,42	-0,46	19,3	7,3	0,38	-0,49	15,3	7,5	0,49	-0,18	16,1	7,4	0,46	-0,10
7	10,7	4,7	0,44	-0,58	15,0	6,9	0,46	-0,35	20,3	7,1	0,35	-0,89	17,7	5,4	0,31	-0,98	16,1	7,1	0,44	-0,27
8	8,9	5,3	0,60	+0,12	14,3	7,1	0,50	-0,48	17,1	7,9	0,46	-0,18	12,5	6,5	0,52	+0,01	13,9	7,5	0,54	+0,03
9	11,2	4,9	0,44	-0,49	16,8	7,8	0,46	-0,35	23,1	8,0	0,35	-0,94	19,3	6,5	0,34	-0,75	18,1	8,2	0,45	-0,20
10	9,7	4,5	0,46	-0,43	14,8	7,0	0,47	-0,42	18,9	8,6	0,46	-0,46	14,2	7,4	0,52	+0,17	14,7	8,0	0,54	+0,18
11	9,1	3,7	0,41	-0,54	16,1	6,4	0,40	-0,30	23,6	7,1	0,30	-0,93	17,6	6,9	0,39	-0,42	16,6	8,1	0,49	+0,09
12	10,7	4,1	0,38	-0,50	17,0	6,9	0,41	-0,25	24,0	8,2	0,34	-1,03	19,0	6,5	0,34	-0,50	17,2	8,2	0,48	+0,12
13	7,8	4,0	0,51	-0,15	15,6	6,1	0,39	-0,09	22,6	5,8	0,26	-1,03	16,2	6,9	0,43	-0,33	15,5	7,9	0,51	-0,01
14	10,2	4,0	0,39	-0,64	17,2	7,2	0,42	-0,28	24,5	7,7	0,31	-0,86	18,8	7,5	0,40	-0,49	18,3	8,6	0,47	-0,00
15	8,5	4,1	0,48	-0,06	15,4	6,1	0,40	+0,05	26,7	6,9	0,26	-1,86	18,0	6,8	0,38	-0,32	16,6	8,7	0,52	+0,20
16	9,6	4,1	0,43	-0,46	16,0	6,5	0,41	-0,29	23,7	7,2	0,30	-0,97	17,5	6,7	0,38	-0,47	16,7	8,0	0,48	+0,06
17	9,8	3,4	0,35	-0,81	17,1	6,2	0,36	-0,32	26,4	5,1	0,19	-1,41	18,0	6,9	0,38	-0,58	17,5	8,1	0,46	+0,02
18	9,9	4,2	0,42	-0,44	17,0	7,3	0,43	-0,31	18,5	9,5	0,51	-0,32	13,8	5,2	0,38	-0,73	14,5	7,6	0,52	+0,32
19	10,0	4,1	0,41	-0,52	14,4	6,1	0,42	-0,59	18,6	7,8	0,42	-0,59	13,2	6,6	0,50	-0,10	13,8	6,9	0,50	+0,11
20	14,2	2,8	0,20	-1,28	18,8	4,7	0,25	-1,03	19,3	8,3	0,43	-0,59	19,4	5,7	0,29	-0,63	17,7	5,9	0,33	-0,19
21	11,9	3,8	0,32	-0,90	18,9	7,0	0,37	-0,51	29,6	4,5	0,15	-2,17	22,2	5,8	0,26	-0,69	20,8	8,4	0,40	-0,21
22	7,8	3,7	0,47	-0,29	14,9	6,2	0,42	-0,18	23,4	7,0	0,30	-1,19	16,7	7,0	0,42	-0,30	15,8	8,2	0,52	+0,10
23	5,7	2,1	0,37	+0,01	14,3	5,5	0,38	-0,07	23,6	5,7	0,24	-1,17	16,2	6,5	0,40	-0,41	14,8	8,1	0,55	+0,19
24	9,0	3,3	0,37	-0,71	15,8	5,7	0,36	-0,21	23,8	7,2	0,30	-1,03	16,8	6,7	0,40	-0,27	16,1	7,9	0,49	+0,24

TABLE II

N ^o DE ESTACION	COMPLETITUD POR CORTE Y PERDIDA DE DATOS (%)					COMPLETITUD POR PERDIDA DE DATOS (%)				
	MAY-JUN JUL	AGO-SET OCT	NOV-DIC ENE	FEB-MAR ABR	ANUAL	MAY-JUN JUL	AGO-SET OCT	NOV-DIC ENE	FEB-MAR ABR	ANUAL
1	7,1	29,1	32,9	17,6	19,9	7,7	29,1	32,9	17,6	22,2
2	95,9	97,6	96,1	99,3	89,1	95,9	97,6	96,1	99,3	97,1
3	-	89,1	94,6	-	-	-	89,1	94,6	-	-
4	95,7	95,7	95,7	86,5	93,4	95,7	95,7	95,7	86,5	93,4
5	90,2	70,4	54,1	76,8	67,0	90,2	70,4	54,1	76,8	73,0
6	31,2	54,0	61,6	44,6	46,0	31,2	54,0	61,6	49,8	48,8
7	100,0	91,0	98,8	99,3	82,8	100,0	99,4	98,8	99,3	99,3
8	91,3	80,4	94,1	94,4	63,0	91,3	96,7	94,1	94,4	94,5
9	85,1	53,3	95,3	98,5	69,5	85,1	58,2	95,3	98,5	83,4
10	62,8	43,5	81,5	64,7	63,5	62,8	43,5	81,5	64,7	63,5
11	100,0	99,5	99,2	99,4	99,5	100,0	99,5	99,2	99,4	99,5
12	87,3	97,1	85,3	68,5	76,7	87,3	97,1	85,3	68,5	82,6
13	50,0	50,0	60,1	86,5	48,4	60,1	50,0	60,1	86,5	61,0
14	73,1	63,0	97,8	82,3	79,0	73,1	63,0	97,8	82,3	79,0
15	96,7	87,6	44,4	99,0	89,0	96,7	87,6	55,3	99,0	99,0
16	98,1	98,4	99,8	97,8	98,5	98,1	98,4	99,8	97,8	98,5
17	97,3	99,3	93,9	90,3	92,1	95,3	99,3	98,3	90,3	95,8
18	44,6	24,5	28,8	27,8	26,3	44,6	26,7	28,8	27,8	31,5
19	78,0	65,8	69,8	74,7	70,6	78,0	65,8	69,8	81,1	73,5
20	53,0	41,6	36,4	52,5	45,8	53,0	41,6	36,4	52,5	45,8
21	81,0	47,3	94,1	97,2	75,6	81,0	47,3	94,1	97,2	79,0
22	97,1	90,5	88,1	98,9	79,6	97,1	90,5	88,1	98,9	93,1
23	30,4	43,8	32,9	32,2	32,2	36,5	43,8	32,9	32,2	36,8
24	100,0	87,7	98,8	94,0	92,3	100,0	87,7	98,8	94,0	95,0

TABLA III

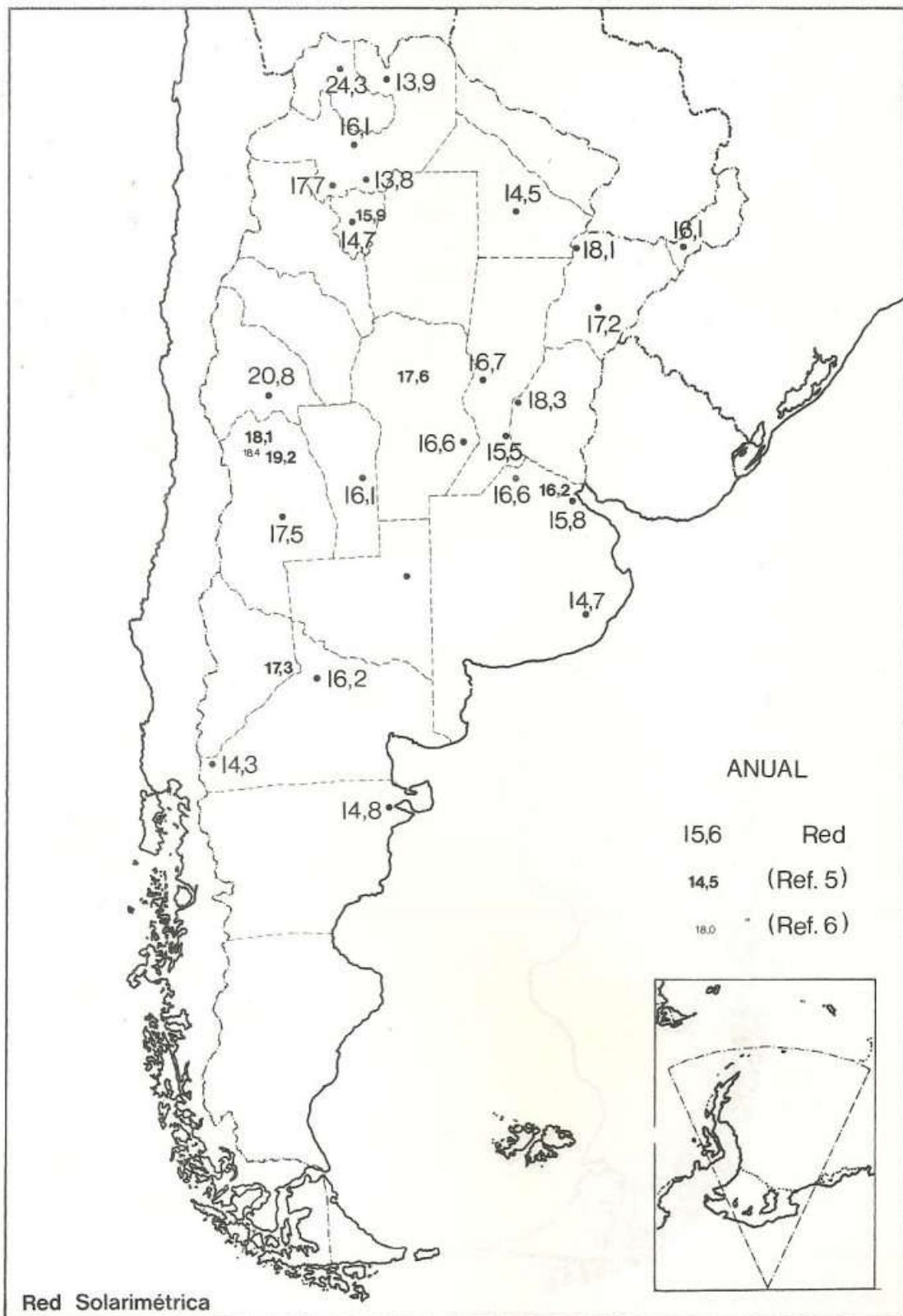


Figura 2

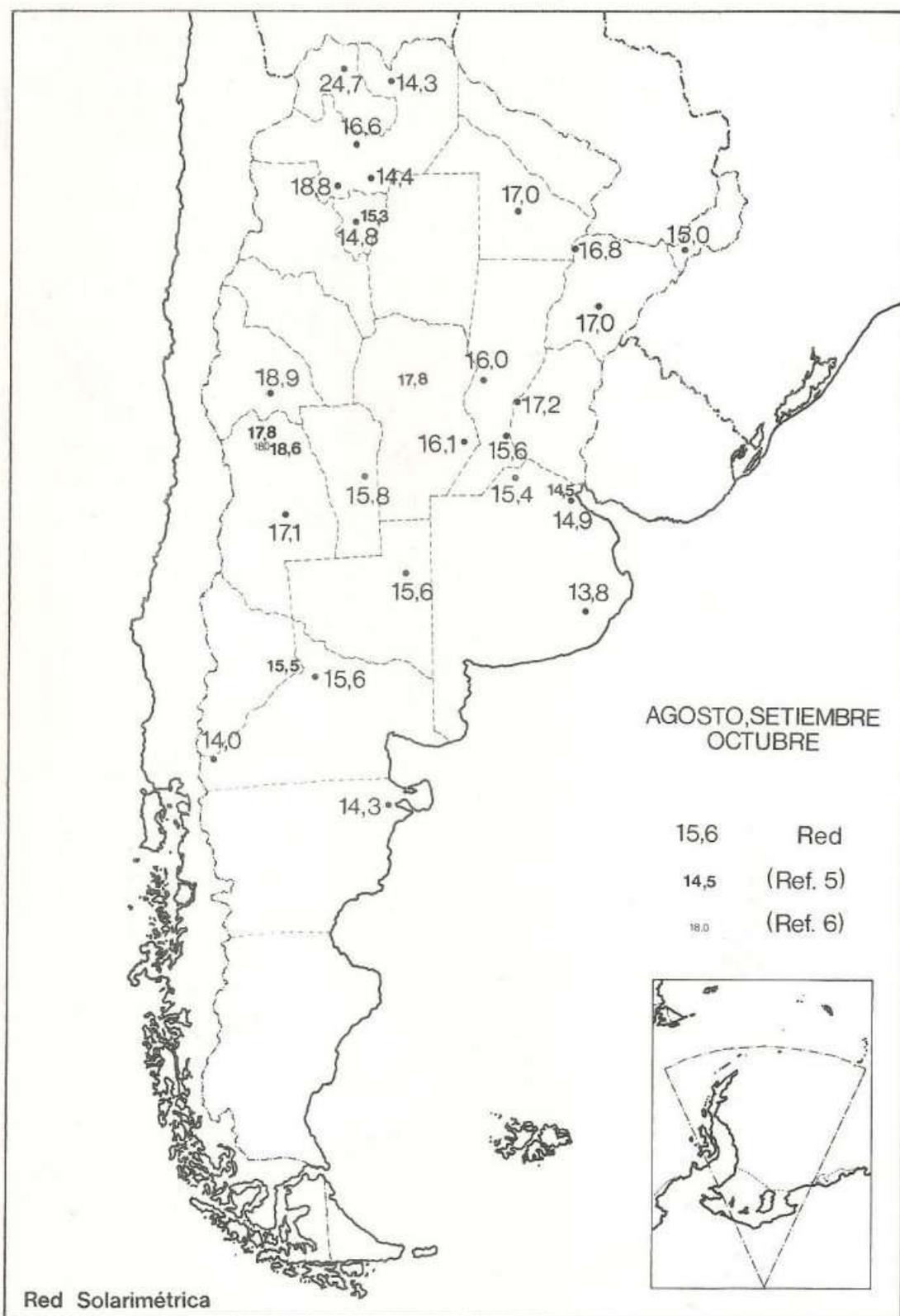


Figura 3

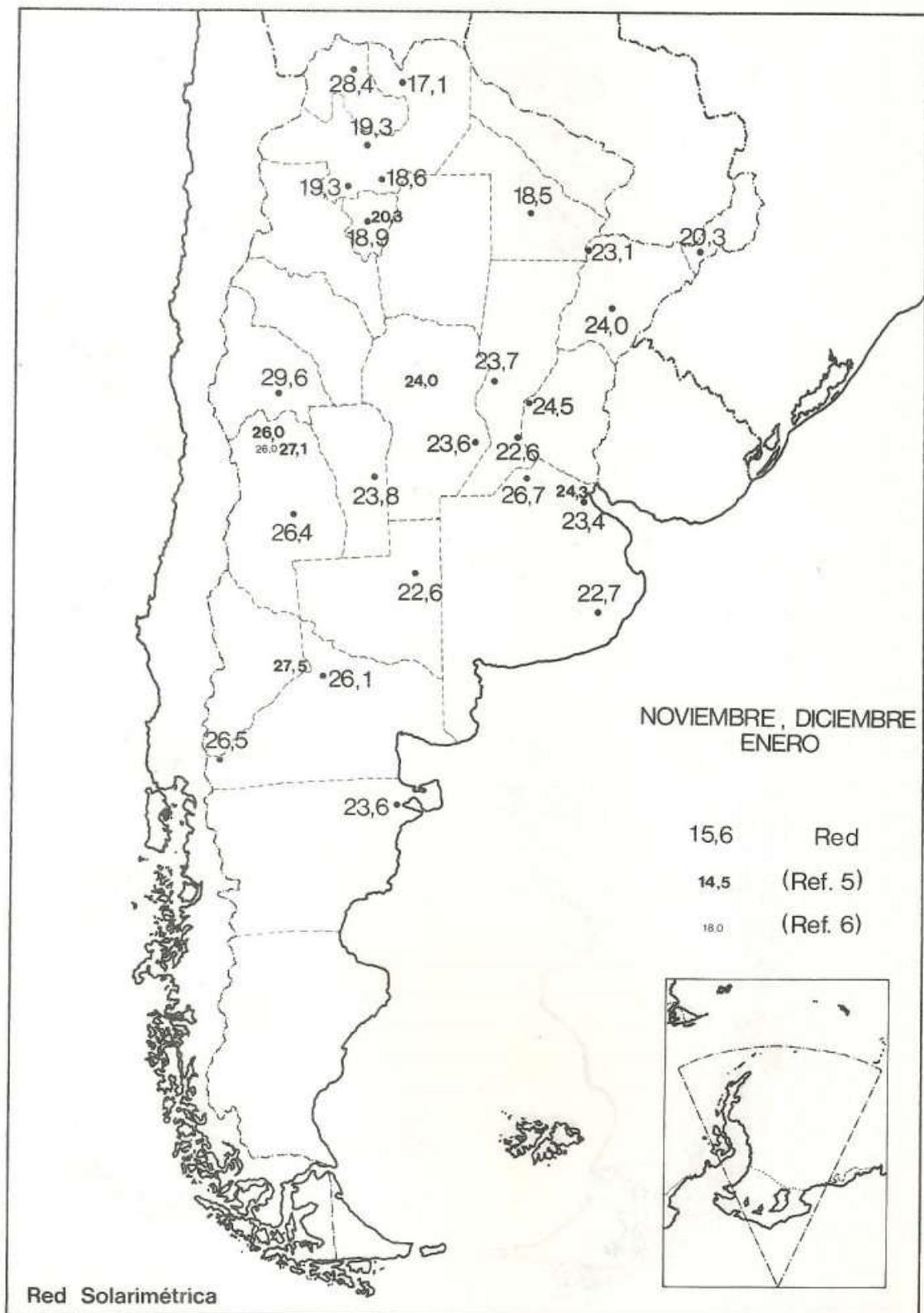
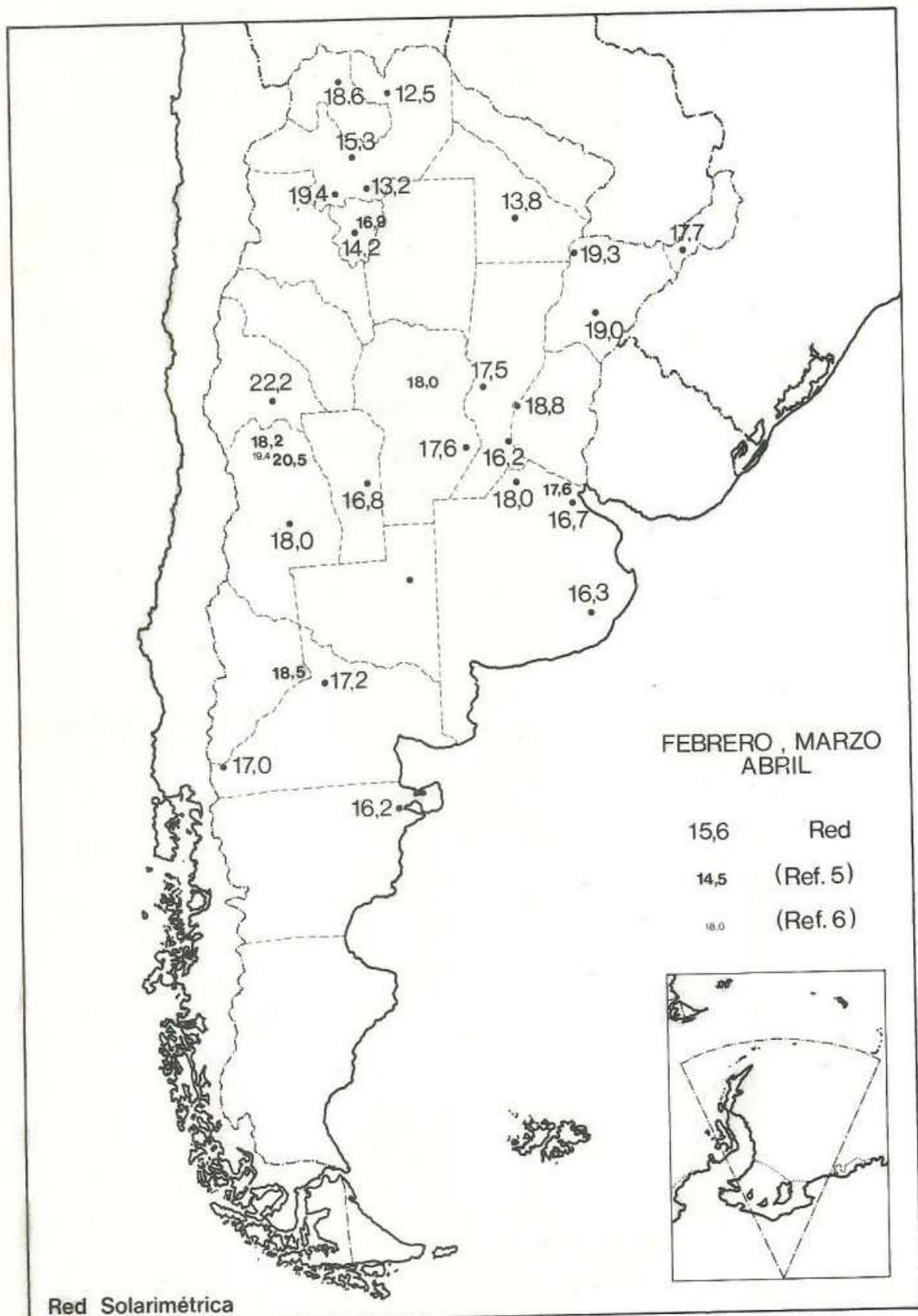


Figura 4



Red Solarimétrica

Figura 5

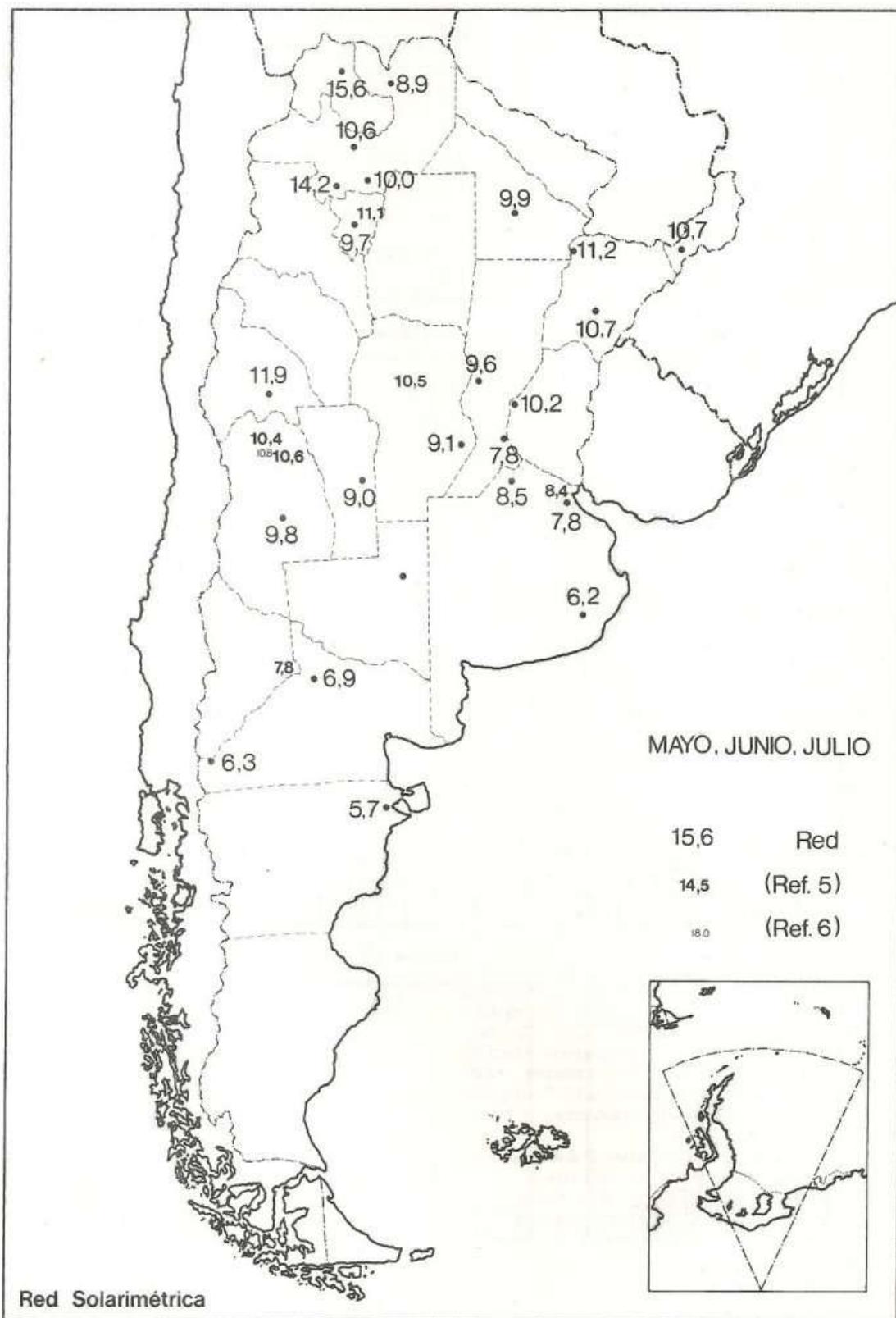


Figura 6

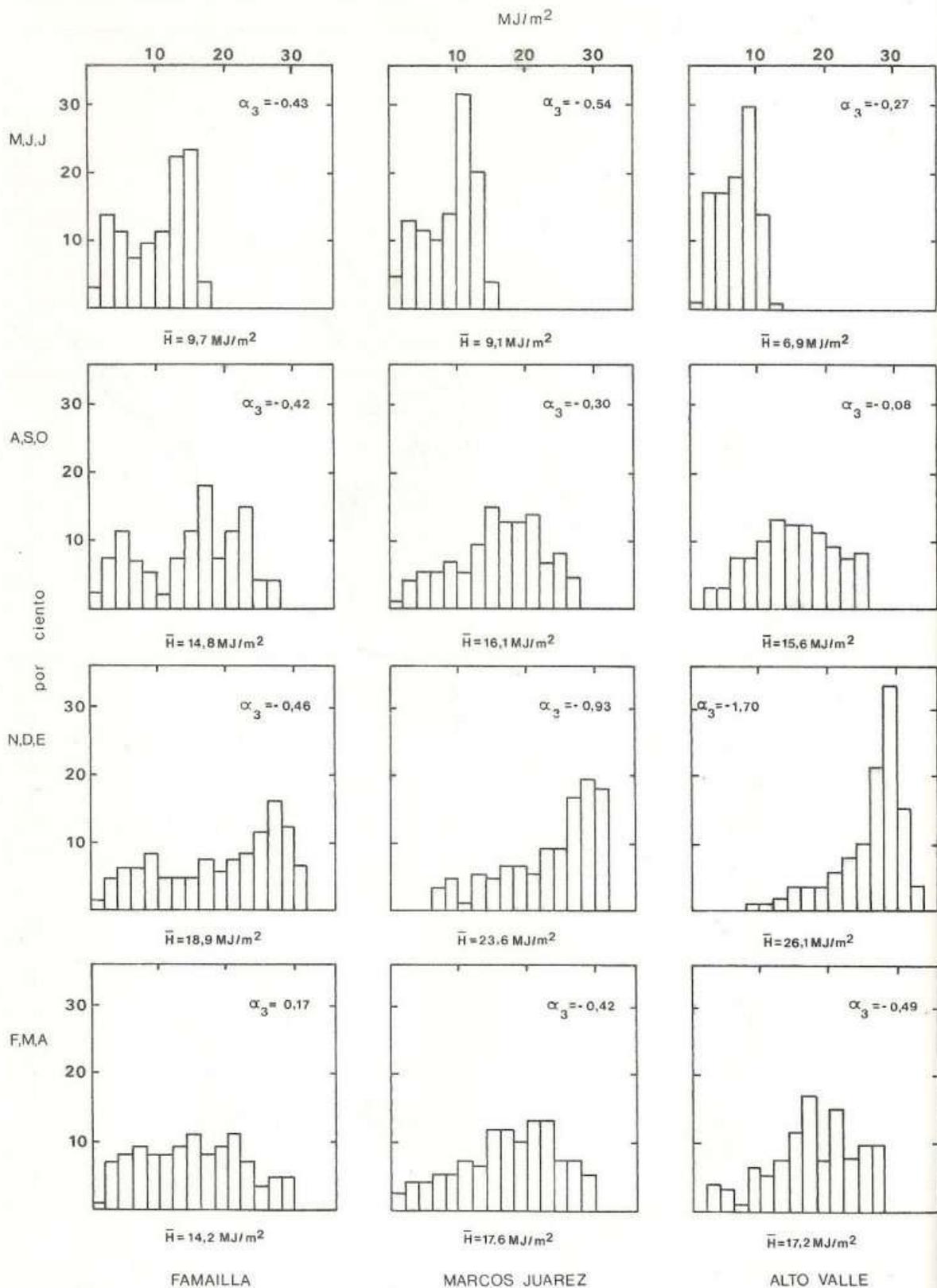


Figura 7

La consecuencia principal de estos valores obtenidos para la asimetría (Tabla II), valores a menudo elevados (entre -2,17 y +0,47) es invalidar varios de los estadísticos diseñados para usar con muestras normales o casi normales, esto es, la media y la dispersión standard.

El uso de la media aritmética como indicador de los valores más probables a encontrar en un dado lugar puede llevar a errores muy serios. Se usa este estadístico olvidándose que es el valor más probable sólo para la distribución normal o para una binomial. Considerar a la media aritmética como aquel valor por debajo o por encima del cual ocurre el 50% de los casos observados es un error, excepto en el caso de las distribuciones antes citadas, lo cual no corresponde en general a las distribuciones de frecuencia de valores de insolación (26).

En lugar de la media y de la desviación standard se debiera usar la mediana y el rango inter-cuartil, los cuales no dependen de la forma de la distribución. El único justificativo del uso de la media aritmética es que, conocido su valor para un período determinado, se obtiene la insolación total multiplicando su valor por el número de días del período, lo cual puede ser útil para cálculos agronómicos o similares.

Como simple ejemplo ilustrativo se calcularon las medianas para la estación de Alto Valle; en el período mayo-junio-julio la mediana corresponde a 9 MJ/m²día mientras que la media es 6,9 MJ/m²día; en agosto-setiembre-octubre la mediana es 17 y la media 15,6; en noviembre-diciembre-enero, 29 y 26 respectivamente y en febrero-marzo-abril, 20 y 17,2 MJ/m²día.

6. EXTRAPOLACION DE LOS VALORES

La variabilidad de la radiación solar recibida depende esencialmente de la escala de tiempo considerada (27). Por ejemplo, la variabilidad de las llamadas "mediciones instantáneas", promediadas sobre unos pocos minutos, es muy grande y puede alcanzar el rango entre de las cantidades medidas.

Si dos localidades están muy separadas en distancia o en elevación, experimentarán diferentes condiciones climáticas y habrá diferencias sistemáticas en los valores de la radiación sobre períodos largos de tiempo. Por el contrario, si dos localidades están razonablemente próximas y en la misma región climática, las diferencias en la radiación pueden esperarse que sean pequeñas sobre períodos largos de tiempo. En una escala corta,

las diferencias sobrevienen debido a que no se experimentan simultáneamente las mismas condiciones en todas las localidades. La distribución de estas diferencias diarias puede aproximarse por una normal.

Quando existe una red de medición de la radiación en superficie es posible hacer una estimación de la variabilidad espacial para períodos no menores que un día.

En un campo homogéneo, los estadísticos característicos de un punto son los mismos para todos los puntos del campo, y los de dos puntos (funciones de correlación) sólo dependen de la distancia entre los puntos. La coherencia espacial en el campo de radiación se puede estudiar a través de la variación del coeficiente de variabilidad c_v como función de la separación entre estaciones (28). Este coeficiente se define como

$$c_v = \frac{\sigma}{0,5 (\bar{H}_1 + \bar{H}_2)} \times 100\% \quad (1)$$

en donde σ es la desviación standard de las diferencias diarias en los valores de la radiación solar para dos estaciones dadas y \bar{H}_1 y \bar{H}_2 son los valores medios diarios en esos lugares.

Tomando el error de medición ya citado del 6% para los datos diarios de la Red como estimador de la desviación standard de la medición, no serán estadísticamente significativas las diferencias del orden del 8,5% entre los valores recibidos en dos estaciones del mismo campo de radiación.

Si bien es necesario verificar localmente los resultados obtenidos por Hay y Suckling (29) en Canadá (figura 8), considerándolos como válidos en una primera aproximación podemos ver que, dentro de un nivel de confianza del 67%, para mantenernos por debajo de un error del 15% no es posible extrapolar datos diarios más allá de los 60 km.

Esta distancia puede ser mejorada si se acumulan o promedian los valores de la radiación sobre períodos mayores que un día; esto lleva a que el mismo error de extrapolación, para valores correspondientes a un período de tres días, permita extenderse hasta 180 km y a 500 km para 7 días, suponiendo que el campo de radiación permanece homogéneo a esa distancia.

Si se desea llevar el nivel de confianza al 90%, se multiplican los valores hallados por 1,64 (factor de corrimiento de las abscisas que provoca que la integral de la función de distribución normal de las diferencias dia-

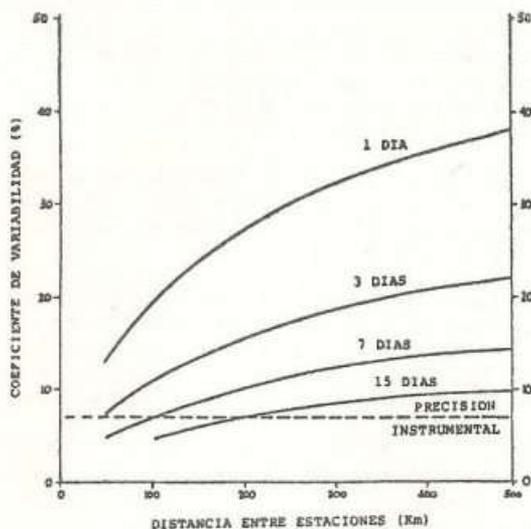


Figura 8

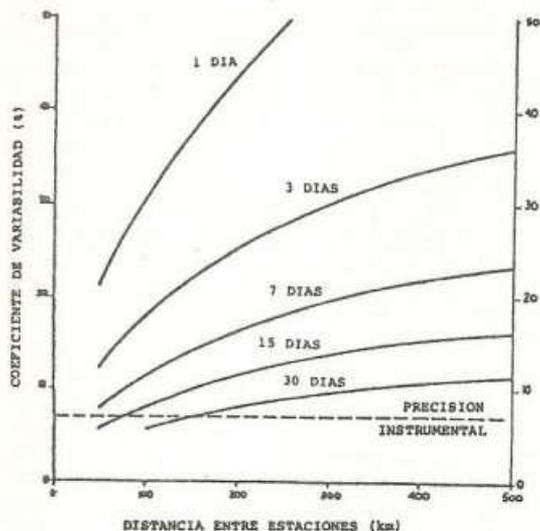


Figura 9

rias tome el valor del nivel de confianza citado), obteniéndose de esta manera las curvas de la figura 9. Esto reduce las distancias de extrapolación permitidas para un cierto nivel de error, pero aumenta la probabilidad de que el error de extrapolación sea el fijado.

Se puede ver entonces que, para valores mensuales y una precisión instrumental del 7,1% (diferencia esperable entre dos mediciones hechas en el mismo sitio si cada una tiene un error del 5%, que es el caso de la red canadiense), se pueden extrapolar los datos dentro de esa cota hasta 170 km. Para la precisión de la Red Solarimétrica local es posible extrapolar los datos mensuales, con un nivel de confianza del 90%, hasta una distancia de 200 km sin exceder el error instrumental, lo que es prácticamente coincidente

con la recomendación hecha por Gandin (30) al fijar una separación de 500 km entre estaciones, en áreas no montañosas, para una red mundial para obtener totales mensuales de radiación.

En aplicaciones prácticas estos errores de extrapolación pueden ser bastantes serios. Sirva como ejemplo el presentado por Granger (31): una extrapolación a una distancia de 250 km da lugar a un error probable del 10%; para un valor de radiación de $35 \text{ MJ/m}^2\text{día}$ representa $3,5 \text{ MJ/m}^2\text{día}$. Para un colector de 70 m^2 de área con una eficiencia del 20% este error alcanza a 50 MJ/día y representa el 25% del requerimiento diario de calor doméstico para una casa de 135 m^2 con $3135 \text{ (}^\circ\text{C)días}$ y una pérdida de calor de $56,7 \text{ KJ/m}^2\text{(}^\circ\text{C día)}^{-1}$.

7. COMPARACION DE LOS RESULTADOS DE OTROS TRABAJOS CON RESPECTO A LOS DE LA RED

Se observa en general una buena correspondencia con los resultados del trabajo de Crivelli y Pedregal. En él se toman meses tipo en lugar de estaciones, pero comparando mes central del período con trimestre se puede señalar:

- en marzo presenta un buen ajuste, a excepción de la zona comprendida entre 40 y 45°S en la que los datos de la Red son más altos;
- en junio existe buena correspondencia excepto en la zona central (35 a 45°S) en la que los valores guardan igual relación que la señalada antes;
- en setiembre hay acuerdo en la zona de Cuyo y en la zona Central pero para el Norte resultan altos y en Litoral y Patagonia bajos;
- en diciembre hay buena correspondencia excepto en la región Norte-Central que parece sobreestimada.

El trabajo de Fernández y García considera dos meses extremos: diciembre, en el que los valores coinciden con los de la Red en el Litoral y en el norte de la zona cordillerana, pero a parecen subestimados en la Patagonia y sobreestimados en la zona Central; junio, en el que los valores parecen estar subestimados en general, excepto en el Noroeste.

Con respecto al trabajo de Lof y colaboradores se observan los siguientes hechos:

- en marzo hay correspondencia en el Litoral y en la zona entre 35 y 40°S , mientras que el Norte aparece sobreestimado;
- en junio hay correspondencia entre 35 y 40°S , pero el Norte está también sobreestimado;
- en setiembre hay bastante buena correspondencia, a excepción del Noroeste que está sobreestimado;
- en diciembre los valores están en general sobreestimados.

En lo que se refiere a los trabajos de carácter regional, se observa que con el de Alanís

y colaboradores sólo hay correspondencia en la ciudad de Salta, apareciendo en todas las estaciones valores sobreestimados, excepto en invierno.

Los valores de Iriarte y colaboradores para Catamarca son del orden de los esperables en la Red, si bien en verano resultan algo elevados.

En cuanto al trabajo de Saravia y colaboradores muestra una resolución espacial que la Red Solarimétrica no puede ofrecer; como es de suponer, presentan coincidencia en las zonas en las que se utilizaron las estaciones de la Red; en general, en invierno parecen levemente sobreestimados, a excepción de Tucumán.

Para terminar, en lo referente a los datos anuales se puede verificar un buen ajuste entre este trabajo y el de Crivelli y Pedregal, mientras que los valores de Fernández y García coinciden en la parte Central pero resultan sobreestimados en el Litoral.

8. AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha contado con la financiación de la Subsecretaría de Ciencia y Tecnología (SUBCYT) y de la Organización de los Estados Americanos (OEA).

Se agradece asimismo la colaboración prestada por el ingeniero Alfredo Rapallini en la confección de los programas, del señor Jorge Mikelman en la confección de los mapas y de los señores Marcelo Sánchez y Manuel Peralta en el procesado de los datos.

9. REFERENCIAS

1. J.N.Black, The Distribution of Solar Radiation Over the Earth's Surface. Arch. Met. Geophys. Biokl. B.Bd 7, H.2.,165(1956).
2. F.Burdecki, Remarks on the Distribution of Solar Radiation Over the Surface of the Earth. Arch. Met. Geophys. Biokl. B.Bb 8, 326 (1958).
3. H.Landsberg, Solar Radiation over the Earth's Surface. Solar Energy, vol.V, N°3, 95 (1961).
4. G.Lof, J.Duffie y C.Smith, World Distribution of Solar Radiation. Solar Energy, vol.10,N°1, 27 (1966).
5. M.C. de Kurlat y R.Fernández, Radiación solar en la Argentina. Acta Scientifica N°19 (1970).
6. V.J.Marone, Radiación solar en Chacras de Coria, Mendoza, República Argentina. Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias, tomo XVII, N°1-2, 59 (1971).
7. E.Crivelli y M.A.Pedregal, Cartas de radiación solar global de la República Argentina. Meteorológica, vol. III, N°1,2,3, 80 (1972)
8. H.Abeledo, M.C. de Kurlat y R.Fernández, Relación entre la duración relativa de la insolación y la radiación solar global en la Argentina. Presentado en el Primer Congreso Argentino de Meteorología, Buenos Aires, octubre de 1970 (resumen publicado en Meteorológica, vol. III, 33, 1971)
9. E.Crivelli y H.Abeledo, Posibilidades de trazar cartas de radiación global en la Argentina a partir de datos de heliofanía. Meteorológica, vol. II, 26 (1971).
10. M.García y R.Fernández, Red Solarimétrica en la Argentina. Actas del Segundo Congreso Latinoamericano de Energía Solar, Joao Pessoa, Brasil, 43 (1978).
11. R.Lopardo y R.Fernández, Estudio técnico-económico del instrumental necesario para la Red Solarimétrica en la República Argentina. Actas del Segundo Congreso Latinoamericano de Energía Solar, Joao Pessoa, Brasil, 113 (1978).
12. M.García, R.Lopardo, G.Atienza y S.Radice lla, Red Solarimétrica en la República Argentina. Revista Geofísica del Instituto Panamericano de Geografía e Historia N°9, México, 57 (1978).
13. R.Lopardo, M.García y G.Atienza, Aspectos técnicos de la Red Solarimétrica. Actas de la IV Reunión de Trabajo de la ASADES, La Plata, 365 (1978).
14. M.García, R.Lopardo, G.Atienza y S.Radice lla, Red Solarimétrica en la República Argentina. Simposio sobre Tecnología Aplicada a Sistemas de Energía Solar, G.Best y M.Martínez (ed.), Jurica, México, 77 (1979).
15. R.Lopardo, M.García y G.Atienza, Comportamiento de un detector fotovoltaico en distintas condiciones. Actas de la V Reunión de Trabajo de la ASADES, Córdoba, 5 (1979).
16. H.Grossi Gallegos, R.Lopardo y G.Atienza, Estudio comparativo de la respuesta de sensores de radiación en diferentes ángulos. Actas de la VI Reunión de Trabajo de la ASADES, Catamarca, 227 (1980).
17. H.Grossi Gallegos, R.Lopardo y G.Atienza, Solar radiation network in Argentina. Proc. ISES Congress SOLAR WORLD FORUM, Brighton, Inglaterra, 2456 (1981).
18. H.Grossi Gallegos, R.Lopardo y G.Atienza, Ensayo y calibración del instrumental de la Red Solarimétrica de la República Argentina. Actas de la Tercera Reunión Latinoamericana de Energía Solar, Guadalajara, México, 14 (1981).
19. E.Alanis, A.Fabris, R.Gaspar y J.Souto, Procesamiento de datos de radiación en la Provincia de Salta. Actas de la II Reunión de Trabajo de la ASADES, Salta, 383 (1976)
20. R.Fernández y M.García, Climatología de la radiación solar en Argentina. Actas de la III Reunión de Trabajo de la ASADES, Mendoza, 9 (1977).
21. A.Iriarte, E.S. de Buenader, S.B. de Biagi y E.Toledo, Procesamiento y análisis de datos de radiación en la Provincia de Catamarca. Actas de la V Reunión de Trabajo de la ASADES, Córdoba, 13 (1979).
22. L.Saravia, G.Lesino, R.Requena, L.Cardón, C.Gramajo, E.Giménez, F.Guerrero, E.Fontanilla, L.Castro Padula y R.Falú, Estudio del bioclima y de la vivienda rural tradi-

- cional en el noroeste argentino. Actas de la VII Reunión de Trabajo de la ASADES, Rosario, 146 (1980).
23. W.M.O.-World Meteorological Organization, Meteorological aspects of the utilization of solar radiation as an energy source. Technical Note No.172, Anexo, Geneva, Suiza (1981).
 24. M.Kendall, The advanced theory of statistic, Macmillan Publishing Co., Inc., New York, vol. 1, 88 (1977).
 25. Boletín de la Red Solarimétrica, 1er. semestre 1981, VII (1981).
 26. I.Bennet, Frequency of daily insolation in Anglo North America during June and December. Solar Energy, vol.11, No 1,41(1967).
 27. W.M.O.-World Meteorological Organization, Meteorological aspects of the utilization of solar radiation as an energy source. Technical Note No.172, Geneva, Switzerland, 189 (1981).
 28. R.Wilson, Radiation network assesment and design. Proc. 1st Canadian Solar Radiation Data Workshop, J.E.Hay y T.Won (eds.), Toronto, Canadá, 105 (1978).
 29. J.Hay and Ph.Suckling, An assesment of the networks for measuring and modelling solar radiation in British Columbia and adjacent areas of Western Canada. Canad. Geographer. vol. XXIII, No.3, 223(1979).
 30. L.W.Gandin, The planning of the world actinometric network, World Meteorological Organization, Commission of Climatology fifth session, CCI-V/Doc.30, Appendix A and B (1969).
 31. O.Granger, Climatology of global solar radiation in California and an interpolation technique based on orthogonal functions. Solar Energy, vol.24,153(1980).