

RADIACION SOLAR TOTAL Y DIRECTA SOBRE SUPERFICIES DE CUALQUIER INCLINACION Y ORIENTACION EN BARCELONA.

A. Coronas (*)
M. Villarrubia (**)

Quaderns
d'enginyeria

4(1983)1 p. 127-147

Resumen

A partir de los valores medios horarios de las irradiancias global y difusa sobre la superficie horizontal durante el periodo de tres años 1.973-75 en Barcelona (Pedralbes), se han calculado los valores de la irradiación solar diaria total y directa en promedio mensual, estival, invernal y anual, para superficies inclinadas y con diversas orientaciones. Asimismo, se presentan en promedio mensual, los valores de la irradiancia incidente sobre una superficie que siguiese al Sol en su trayectoria diaria.

Summary

Monthly estival, invernal and annual of total and direct irradiation upon a tilted surface with some orientations, in Barcelona, have been calculated from the global and diffuse - average hourly solar irradiance on a horizontal surface. Values of irradiance upon a surface which follows the sun in its daily trajectory, are presented.

1.- Introducció

El conocimiento de la radiación solar incidente sobre superficies inclinadas y con diversas orientaciones es fundamental en cualquier proyecto cuya finalidad sea el aprovechamiento de la energía solar, ya sea mediante procesos fototérmicos o fotovoltaicos. Los sistemas basados en células fotovoltaicas o en colectores solares con concentración utilizan tan sólo la radiación solar directa, mientras que los colectores solares planos hacen uso tanto de la componente directa como de la difusa, es decir de la radiación total.

Frecuentemente los datos de radiación solar disponible están referidos a la superficie horizontal (suelo) y dado que la posición relativa del Sol respecto a una superficie plana en posición estática respecto al suelo, cambia durante el día y la época del año, las relaciones que permiten obtener la radiación solar incidente sobre dicha superficie conocida la correspondiente a la superficie horizontal serán función de la hora del día y de la época del año. De esta forma, es necesario dividir el día en intervalos de tiempo (usualmente una hora) y a partir de las irradiancias medias horarias directa y difusa sobre el suelo, calcular sus valores respectivos para la superficie inclinada en dicho intervalo horario. La irradiación total diaria se obtendrá al sumar los valores de la irradiación solar total horaria correspondientes a todos los intervalos horarios considerados.

(*) Facultad de Química. Universidad de Tarragona.

(**) Facultad de Física. Universidad de Barcelona.

Muchas estaciones meteorológicas, no suelen suministrar datos horarios de radiación directa y difusa, sino únicamente el valor de la irradiación solar global diaria. Es preciso - por tanto en estas circunstancias para la determinación de la radiación solar incidente - sobre superficies inclinadas, realizar estimaciones a partir de la irradiación global diaria para la obtención de los valores horarios. Así por ejemplo, a partir de datos promedios de un conjunto de estaciones, se han llevado a cabo una serie de estudios estadísticos sobre la distribución temporal a lo largo del día de la radiación solar incidente sobre la superficie horizontal que han permitido la elaboración de una serie de gráficos en los que el cociente entre los valores de la irradiación solar global horaria y diaria, respectivamente, se representa en función de la duración del día y del intervalo horario considerado, y así como el cociente entre los valores de la irradiación diaria difusa y global, en función de un índice de nubosidad, definido como el cociente entre los valores de la irradiación diaria global y extraterrestre [1,2,3]. Estos estudios realizados por Liu y Jordan constituyen una aproximación aceptable ante la ausencia de datos horarios de radiación directa y difusa.

En el presente trabajo, se procede al cálculo de la radiación solar sobre superficies planas inclinadas y con orientaciones diversas, a partir de los valores medios horarios de la irradiancia solar directa y difusa sobre el suelo en Barcelona. Estos cálculos se han realizado para el período de tres años (1973-75), a partir de los datos suministrados por la Cátedra de Física del Aire de la Universidad de Barcelona, y corresponden a la zona de Pedralbes, en la ciudad de Barcelona, caracterizada por la longitud de 2°7' (E) y una latitud de 41° 23' (N).

2.- Proceso de cálculo

Conocidos los valores medios horarios de la irradiancia solar global y difusa, se obtiene por diferencia entre ambos, el valor correspondiente para la componente directa de la radiación solar.

Para una superficie plana inclinada un ángulo s con respecto a la superficie horizontal (suelo) y con un acimut γ , se define el factor R_b como el cociente entre la irradiancia solar directa $I_{b,s,\gamma}$ sobre una superficie de inclinación s y acimut γ , y la irradiancia solar directa correspondiente a una superficie horizontal $I_{b,o}$. El factor R_b se puede expresar en función de los ángulos de incidencia θ y θ_z sobre la superficie considerada y el suelo respectivamente, a través de la expresión [3]:

$$R_b = \frac{I_{b,s,\gamma}}{I_{b,o}} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (1)$$

El ángulo de incidencia de la radiación solar directa sobre una superficie caracterizada por una inclinación s y un acimut γ , se puede determinar a través de la expresión:

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \phi \cos s - \sin \delta \cos \phi \sin s \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cos s \cos h + \cos \delta \sin \phi \sin s \cos \gamma \cos h + \cos \delta \sin s \sin \gamma \sin h \quad (2)$$

en donde :

- δ declinación solar
- ϕ latitud del lugar
- h ángulo horario

El ángulo θ_z puede obtenerse a partir de la expresión anterior, considerando el caso que la superficie sea horizontal ($s=0$), con lo cual se tiene:

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos h \quad (3)$$

Admitiendo la hipótesis de Liu y Jordan [2] para la determinación de la componente difusa la irradiancia solar total $I_{t,s,\gamma}$ correspondiente a una superficie de inclinación s y acimut γ será [3] :

$$I_{t,s,\gamma} = R_b I_{b,o} + \frac{1 + \cos s}{2} I_{d,o} + \frac{1 - \cos s}{2} \rho (I_{d,o} + I_{b,o}) \quad (4)$$

La expresión anterior pone de manifiesto que la irradiancia solar total es el resultado de la superposición de la componente directa, difusa y reflejada por los alrededores de la superficie considerada. Para el cálculo de esta última, admitiremos en nuestro trabajo una reflectancia ρ igual a 0,2.

La expresión (4) puede utilizarse con suficiente aproximación para el cálculo de los valores medios horarios de la irradiancia solar total sin más que tomar como valor del ángulo horario el correspondiente al instante que coincide con el punto medio del intervalo horario considerado y conocer los valores medios horarios de las irradiancias directa y difusa para una superficie horizontal en dicho intervalo horario.

Una vez determinados los valores medios horarios de la irradiancia total para todos los intervalos horarios en que se ha dividido el día, la irradiación solar total diaria $H_{t,s,\gamma}$ sobre la superficie inclinada, se obtiene a partir de la suma de los valores de la irradiación solar total horaria para todos los intervalos horarios del día, desde la salida hasta la puesta de sol para la superficie inclinada. Es interesante hacer notar que la irradiancia media horaria o simplemente irradiancia si se expresa en Kcal/h.m^2 coincide numéricamente con la irradiación horaria expresada en Kcal/m^2 .

El proceso descrito para determinar la irradiación solar total diaria $H_{t,s,\gamma}$ a partir de la expresión (4), puede seguirse igualmente para determinar la irradiación solar directa diaria $H_{b,s,\gamma}$ correspondiente a una superficie con cualquier inclinación y orientación sin más que considerar únicamente el primer sumando de la expresión (4) correspondiente a la -

radiación directa.

El valor del ángulo horario h_s correspondiente a la salida y puesta del sol para una superficie inclinada y orientada al sur, viene dado por la expresión :

$$\cos h_s = - \operatorname{tg} (\phi - s) \operatorname{tg} \delta \quad (5)$$

En el caso general de una superficie inclinada con orientación cualquiera, los valores de los ángulos horarios $h_{s,\gamma}$ y $h'_{s,\gamma}$ de salida y puesta de sol se determinan a través de las expresiones :

$$\left. \begin{aligned} h_{s,\gamma} &= - \operatorname{arccos} \left[\frac{A B \mp \sqrt{A^2 - B^2 + 1}}{A^2 + 1} \right] \\ h'_{s,\gamma} &= \operatorname{arccos} \left[\frac{A B \pm \sqrt{A^2 - B^2 + 1}}{A^2 + 1} \right] \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

en donde :

$$A = \frac{\operatorname{sen} \phi}{\operatorname{tg} \gamma} + \frac{\cos \phi}{\operatorname{sen} \gamma \operatorname{tg} s}$$

$$B = -\operatorname{tg} \delta \left(\frac{\operatorname{sen} \phi}{\operatorname{sen} \gamma \operatorname{tg} s} - \frac{\cos \phi}{\operatorname{tg} \gamma} \right)$$

En la expresión (6), los signos corresponden respectivamente (superior e inferior) a las situaciones este ($\gamma < 0$) y oeste ($\gamma > 0$).

3.- Resultados obtenidos

Los datos de partida han sido los correspondientes a la irradiancia solar global y difusa sobre la superficie horizontal (suelo) para los años 1973-74-75 en Barcelona, facilitados por el Departamento de Física del Aire de la Universidad. Los valores de la irradiancia directa correspondiente a la superficie horizontal se determinan simplemente por diferencia entre los de la global y difusa.

Mediante un programa de cálculo adecuado escrito en FORTRAN IV, se han determinado los valores de la irradiancia total y directa correspondientes a una superficie inclinada y de cualquier orientación, en promedio para el periodo de los tres años considerados, según el proceso de cálculo descrito en el apartado anterior. A lo largo de este trabajo se han considerado superficies con inclinaciones comprendidas entre 0° y 90° , con un intervalo de 5° , así como orientaciones de este a oeste en intervalos de 15° para el acimut de la superficie. Se ha procurado presentar los resultados más interesantes relativos a la radiación solar total y directa. Ello es debido al interés que en la práctica posee dicha información, pues

mientras que el conocimiento de la radiación total (directa más difusa) es fundamental para cálculos de climatización y aprovechamiento de la energía solar por medio de colectores planos, el de radiación directa lo es en el uso de colectores con sistemas de concentración o en sistemas con células fotovoltaicas.

En la tabla 1, se presentan en promedio mensual los valores de la irradiancia total y directa sobre la superficie horizontal (suelo), para las distintas horas del día en tiempo solar verdadero (TSV), dándose a su vez los valores en promedio anual, estival e invernal. El período estival comprende desde abril a septiembre (ambos inclusive) y el invernal desde octubre a marzo. En la última columna de esta tabla se incluye la irradiación diaria (energía incidente diaria por unidad de área) correspondiente.

A partir de los datos de radiación directa horaria se ha procedido a determinar la irradiancia solar directa incidente sobre una superficie que siguiese al sol en su movimiento diario, de forma tal que se produjese una incidencia normal de los rayos solares sobre la superficie en cada momento. Los resultados se presentan en la tabla 2 en promedio mensual y para distintas horas del día en tiempo solar verdadero (TSV), así como en media anual, estival e invernal, siendo la última columna la correspondiente a la irradiación directa diaria. En la figura 1, se representan los valores de la irradiancia directa correspondiente a la superficie que siguiese al sol en su trayectoria y los de la irradiancia directa sobre la superficie horizontal (suelo), en promedio anual, estival e invernal. El conocimiento de los resultados de la tabla 2, puede ser de interés para el proyecto de colectores con elementos de concentración que estén dotados de sistemas apropiados para el seguimiento del sol a lo largo del día.

En la tabla 3, se presentan los valores de la irradiación solar diaria total y directa en promedio mensual para superficies inclinadas y con unas determinadas orientaciones. Los valores de la inclinación α respecto al suelo varían desde $\alpha = 0^\circ$ hasta 90° (superficie vertical) en intervalos de 15° y las orientaciones corresponden a valores acimut $\gamma = 0^\circ$ (orientación sur), $\gamma = 45^\circ$ (orientación sudeste o sudoeste) y $\gamma = 90^\circ$ (orientación este u oeste). Los valores de la irradiación solar total y directa diaria en promedio anual, estival e invernal se presentan en las tablas 4a, 4b, y 4c respectivamente para inclinaciones α comprendidas entre 0° y 90° en intervalos de 5° y para valores del acimut γ entre 0° y 90° en intervalos de 15° .

Las figuras comprendidas desde 2a hasta 2f inclusive, muestran la irradiación solar total y directa diaria en promedio anual, estival e invernal respectivamente para el período 1973-1975 en Barcelona. En toda esta colección de curvas, puede apreciarse la existencia de un valor máximo de la irradiación para cada valor del acimut considerado. Es interesante hacer notar la pequeña influencia que produce una pequeña desviación de la superficie respecto de la orientación sur ($\gamma = 0^\circ$), ya que como puede apreciarse las curvas correspondientes

a $\gamma = 0^\circ$ (sur) y $\gamma = 15^\circ$ son casi coincidentes o muy próximas entre sí en todos los casos.

Las variaciones de la irradiación diaria frente al acimut, son mucho mayores en el caso de la radiación directa durante el período invernal, que durante el estival, ya que incluso en este último caso las curvas se presentan relativamente próximas entre sí, para toda la serie de valores del acimut comprendidos entre 0° y 90° .

En la figura 3 se representan las variaciones de la irradiación solar directa a lo largo del año, para el período 1973-75 para el caso de una superficie que siguiese al sol en su trayectoria y la correspondiente a la superficie horizontal (suelo).

Las figuras comprendidas desde 4a hasta 4f inclusive, muestran la variación de la irradiación solar total y directa diaria a lo largo del año para distintas inclinaciones ($s = 0^\circ$ a 90° , en intervalo de 10°) y para los valores del acimut $\gamma = 0^\circ$ (orientación sur), $\gamma = 45^\circ$ (orientación sudeste o sudoeste) y $\gamma = 90^\circ$ (orientación este u oeste). Finalmente en la figura 5, se presenta el cociente entre los valores de la irradiación diaria en promedio anual para los casos $\gamma = 45^\circ$ y 90° y el correspondiente a la orientación sur ($\gamma = 0^\circ$), para la radiación total y directa y en donde puede apreciarse la presencia de unos mínimos (Más acusados cuanto mayor es γ) situados en una zona correspondiente a inclinaciones s comprendidas entre 60° y 80° .

BIBLIOGRAFIA

- [1] Duffie, J.A. y Beckman, W.A. Solar Energy Thermal Processes. Wiley Interscience. New-York 1.974
- [2] Liu, B. y Jordan, R.C. "The Long-Term Average Performance of Flat-Plate Solar Energy Collectors". Solar Energy, Vol. 7 pp 53-70, 1.963
- [3] Villarrubia, M., Coronas, A. y Llorens M. "Evaluación de la radiación solar para sistemas de conversión de energía". Energía. Julio-Agosto 1980.

Lista de símbolos

- h : ángulo horario
- h_s : ángulo horario de salida del sol para una superficie con inclinación s orientada al sur.
- $h_{s,\gamma}$, $h'_{s,\gamma}$: ángulos horarios de salida y puesta de sol para una superficie con inclinación s y acimut γ
- H_b : irradiación solar directa diaria para una superficie que siguiese al sol en su trayectoria (MJ/m^2)
- $H_{t,s,\gamma}$, $H_{b,s,\gamma}$: Irradiación solar diaria total y directa sobre una superficie con inclinación s y acimut γ (MJ/m^2)
- $I_{b,o}$, $I_{d,o}$: Irradiancia solar directa y difusa sobre una superficie horizontal -- (suelo) (w/m^2)
- $I_{d,s}$: Irradiancia solar difusa sobre una superficie con inclinación s (w/m^2)
- $I_{r,s}$: Irradiancia solar reflejada por los alrededores sobre una superficie con inclinación s (w/m^2)
- $I_{t,s,\gamma}$, $I_{b,s,\gamma}$: Irradiancias solar total y directa correspondientes a una superficie de inclinación y acimut γ (w/m^2)
- R_b : Factor de conversión de la irradiancia solar directa sobre la superficie horizontal (suelo) a la correspondiente a una superficie con inclinación s y acimut γ
- s : ángulo de inclinación de la superficie respecto del plano horizontal (suelo)
- θ : ángulo de incidencia del rayo solar sobre una superficie inclinada
- θ_s : ángulo de incidencia del rayo solar sobre una superficie inclinada y orientada al sur
- θ_z : ángulo de incidencia del rayo solar sobre la superficie horizontal (suelo)
- δ : declinación solar
- ϕ : latitud
- ρ : reflectancia difusa de los alrededores de la superficie considerada
- γ : acimut de la superficie

Subíndices

- b : indica radiación directa
- d : indica radiación difusa
- t : indica radiación total

IRRADIANÇIA SOLAR TOTAL Y DIRECTA EN PROMEDIO MENSUAL SOBRE LA SUPERFICIE HORIZONTAL (SUELO) Lugar: Barcelona Lat. 41°23'(N) Long. 2°7'(E) Período: tres años (1973-75) Unidades: w/m ²													Total diario (MJ/m ²)				
Hora solar	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16		16-17	17-18	18-19	19-20
ENE	0,0	0,0	0,1	22,8	131,4	251,6	334,8	384,9	375,3	329,0	240,0	123,9	20,1	0,0	0,0	0,0	8,0
	0,0	0,0	0,0	10,2	81,5	169,0	234,2	274,8	266,5	226,1	156,5	73,1	7,6	0,0	0,0	0,0	5,4
FEB	0,0	0,0	5,7	91,3	213,2	311,1	389,2	430,2	442,8	372,7	278,4	162,7	53,6	1,5	0,0	0,0	9,9
	0,0	0,0	0,3	48,2	125,2	195,5	246,8	267,5	276,0	226,3	167,4	93,4	27,1	0,0	0,0	0,0	6,1
MAR	0,0	0,2	21,7	113,1	239,1	365,5	470,9	517,3	520,3	457,5	400,4	273,7	149,2	42,9	1,6	0,0	12,9
	0,0	0,0	7,6	50,3	121,2	203,1	275,6	303,5	298,9	252,8	220,4	131,4	58,8	10,8	0,0	0,0	7,0
ABR	0,0	14,2	113,0	254,8	398,2	533,2	613,5	676,0	682,2	621,5	505,0	385,1	242,3	105,0	14,5	0,0	18,6
	0,0	3,3	55,6	135,3	239,8	329,6	397,9	454,5	461,2	410,9	313,1	235,7	138,1	50,7	3,4	0,0	11,6
MAY	1,6	48,8	165,5	300,1	447,1	566,6	654,0	740,9	741,2	679,6	578,1	441,8	304,9	160,1	46,5	1,7	21,2
	0,0	20,2	90,1	185,0	279,0	365,9	436,3	510,8	507,5	460,3	385,4	276,5	179,4	78,4	12,8	0,0	13,6
JUN	6,9	75,8	198,3	338,0	471,5	576,1	684,7	707,8	700,7	661,8	580,3	456,6	324,4	184,1	60,7	5,3	21,7
	0,0	34,3	110,7	201,4	282,4	360,4	448,9	457,8	458,6	433,0	377,3	289,5	191,8	97,8	20,5	0,0	13,6
JUL	3,9	71,5	200,4	329,1	475,7	612,7	709,9	779,8	778,8	731,0	644,0	507,2	359,6	195,9	59,8	3,5	23,2
	0,0	34,3	118,9	210,1	312,9	421,8	502,7	572,7	581,6	542,1	471,3	358,8	245,5	116,1	24,1	0,0	16,3
AGO	0,5	33,9	155,5	298,7	447,7	583,4	693,6	747,3	736,5	679,5	578,3	447,0	293,8	131,0	27,0	0,2	21,1
	0,0	13,1	85,1	186,4	292,8	398,7	494,3	523,7	522,9	471,3	385,9	289,7	176,5	63,7	8,7	0,0	14,1
SEP	0,0	2,7	60,1	183,0	317,6	430,7	505,3	574,7	567,1	518,8	426,8	305,2	174,0	51,0	2,2	0,2	14,8
	0,0	0,0	27,0	97,3	193,2	268,7	325,9	378,0	378,7	330,2	263,4	174,5	86,0	16,3	0,0	0,0	9,1
OCT	0,0	0,0	10,1	95,0	213,4	324,9	411,1	461,8	452,8	416,0	331,4	211,5	93,6	9,9	0,0	0,0	10,9
	0,0	0,0	2,0	45,2	120,4	201,0	265,7	303,8	293,7	256,9	206,3	122,2	44,9	1,8	0,0	0,0	6,7
NOV	0,0	0,0	0,4	31,4	121,4	223,8	294,8	341,6	339,0	290,7	214,2	116,6	29,3	0,6	0,0	0,0	7,2
	0,0	0,0	0,0	10,8	57,9	123,9	177,0	216,2	206,3	165,6	112,8	50,7	8,0	0,0	0,0	0,0	4,1
DIC	0,0	0,0	0,0	9,6	63,8	189,4	260,5	302,5	297,1	257,0	188,4	87,7	11,1	0,1	0,0	0,0	6,1
	0,0	0,0	0,0	1,7	39,7	110,0	157,4	188,9	188,3	162,6	115,0	45,0	2,0	0,0	0,0	0,0	3,6
Media anual	1,1	20,6	77,6	172,3	293,9	411,0	498,8	552,6	550,0	498,9	411,9	291,4	171,3	73,5	17,7	0,9	14,6
	0,0	8,8	41,4	97,8	177,1	260,5	328,4	369,2	368,1	326,6	263,5	177,2	97,1	36,3	5,8	0,0	9,2
Media estiv	2,2	41,2	148,8	284,0	427,3	551,0	644,2	705,9	703,1	660,9	554,6	426,2	283,2	137,9	27,7	1,8	20,2
	0,0	17,5	81,2	169,3	267,8	358,8	435,6	484,6	486,9	443,4	368,6	272,9	169,6	70,5	11,6	0,0	13,1
Media inver	0,0	0,0	6,3	60,6	166,9	277,8	360,5	406,7	404,4	354,2	275,1	163,2	59,5	9,2	0,3	0,0	9,2
	0,0	0,0	1,7	27,6	90,8	167,1	226,3	259,4	255,1	215,4	163,5	86,2	24,7	2,1	0,0	0,0	5,5

Tabla 1.- Irradiancia solar total y directa en promedio mensual sobre la superficie horizontal (suelo) para el período 1973-75 en Barcelona

IRRADIANCIA SOLAR DIRECTA EN PROMEDIO MENSUAL PARA UNA SUPERFICIE QUE SIGUIESE AL SOL EN SU TRAYECTORIA. Período tres años (1973-74-75)																							
Lugar: Barcelona		Latitud: 41° 23' (N)		Longitud: 2° 7' (E)		Unidades: w/m ²																Total diario (MJ/m ²)	
Hora solar	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20							
ENE	0	0	0	1	418	521	563	595	577	547	486	379	13	0	0	0	14,8						14,8
FEB	0	0	11	317	410	447	462	460	475	427	385	312	179	2	0	0	14,0						14,0
MAR	0	0	44	190	260	355	409	420	415	378	384	301	223	53	2	0	12,4						12,4
ABR	0	5	263	341	426	472	501	538	545	516	447	419	349	239	4	0	18,2						18,2
MAY	1	144	295	383	433	472	502	557	553	529	495	427	367	254	90	1	19,8						19,8
JUN	3	203	317	385	416	447	500	485	486	483	468	426	367	280	121	2	19,4						19,4
JUL	3	232	360	415	471	531	568	614	624	612	594	540	484	351	162	2	23,6						23,6
AGO	0	63	332	423	484	540	593	593	592	566	522	478	398	243	35	0	21,1						21,1
SEP	0	2	152	304	397	431	452	489	489	457	421	356	265	96	1	0	15,5						15,5
OCT	0	0	4	254	353	421	463	484	468	446	427	350	240	5	0	0	14,1						14,1
NOV	0	0	0	55	251	344	391	434	416	371	317	222	42	0	0	0	10,2						10,2
DIC	0	0	0	7	245	379	414	443	442	428	397	277	9	0	0	0	10,9						10,9
Media anual	1	55	146	254	380	446	484	509	506	480	445	373	242	126	35	0	16,1						16,1
Media estiv	1	113	288	376	438	482	519	546	549	528	493	442	374	247	72	1	19,7						19,7
Media inver	0	0	0	138	326	411	451	473	466	434	401	308	117	10	0	0	12,8						12,8

Tabla 2.- Irradiancia solar directa en promedio mensual para una superficie que siguiese al sol en su trayectoria (incidencia normal) para el período 1973-75 en Barcelona

IRRADIACION SOLAR DIARIA TOTAL Y DIRECTA EN PROMEDIO MENSUAL													
Lugar: Barcelona		Latitud: 41° 23'(N)		Longitud: 2° 7'(E)									
Unidades: MJ/m ²		Periodo: 3 años (1973-74-75)											
Acimut $\gamma = 0^\circ$ (Orientación Sur)													
Inclinaciones (grad)	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Total anual
0°	8,0	9,9	12,9	18,6	21,2	21,7	23,3	21,1	14,8	10,9	7,2	6,1	5329
	5,4	6,1	7,0	11,6	13,6	13,6	16,3	14,1	9,1	6,7	4,1	3,6	3358
15°	10,9	12,4	14,3	19,7	21,5	21,7	23,4	21,9	16,3	13,0	9,1	8,3	5804
	8,4	8,3	8,4	12,8	14,1	13,6	16,5	15,0	10,6	8,8	6,0	5,9	3869
30°	13,2	13,7	15,0	19,8	20,9	20,6	22,4	21,7	16,9	14,4	10,6	10,0	6023
	10,7	10,0	9,4	13,1	13,6	12,7	15,6	14,9	11,4	10,3	7,5	7,7	4161
45°	14,8	14,6	15,0	18,9	19,2	18,6	20,4	20,4	16,7	15,0	11,5	11,2	5950
	12,4	11,0	9,6	12,5	12,2	11,0	13,8	13,8	11,4	11,1	8,6	9,0	4124
60°	15,5	14,6	14,3	17,2	16,7	15,9	17,4	18,1	15,6	14,8	11,7	11,8	5585
	13,2	11,2	9,2	11,0	10,0	8,7	11,1	11,8	10,6	11,1	9,0	9,6	3832
75°	15,3	13,9	12,9	14,6	13,6	12,6	13,8	15,0	13,8	13,8	11,3	11,7	4928
	13,1	10,7	8,2	8,9	7,2	5,9	7,7	9,0	9,1	10,4	8,8	9,7	3321
90°	14,2	12,4	10,9	11,5	10,0	9,1	9,9	11,3	11,3	12,1	10,3	10,9	4088
	12,1	9,5	6,7	6,1	4,1	2,9	4,1	5,7	7,0	8,9	8,0	9,0	2555
Acimut $\gamma = 45^\circ$ (Orientación Sudeste/Sudoeste)													
15°	10,0	11,6	13,8	19,3	21,4	21,6	23,1	21,7	15,9	12,3	8,6	7,6	5658
	7,5	7,8	7,9	12,4	13,9	13,5	16,2	14,7	10,2	8,1	5,4	5,1	3723
30°	11,6	12,8	14,1	19,2	20,7	20,7	22,1	21,4	16,2	13,1	9,5	8,6	5767
	9,1	9,0	8,4	12,5	13,4	12,8	15,3	14,6	10,7	9,1	6,5	6,3	3869
45°	12,5	13,3	13,8	18,3	19,2	19,0	20,3	20,2	15,8	13,3	10,0	9,3	5585
	10,1	9,7	8,4	11,8	12,2	11,4	13,7	13,6	10,5	9,4	7,1	7,0	3796
60°	12,7	13,1	12,9	16,7	17,0	16,7	17,8	18,2	14,7	12,9	9,9	9,4	5220
	10,4	9,7	7,8	10,6	10,3	9,5	11,5	11,9	9,7	9,2	7,2	7,3	3504
75°	12,2	12,3	11,5	14,5	14,4	14,0	14,9	15,6	13,1	11,8	9,4	9,0	4636
	10,0	9,1	6,8	8,8	8,1	7,2	8,8	9,7	8,4	8,4	6,8	7,1	2993
90°	11,1	10,9	9,7	11,9	11,6	11,2	11,8	12,7	11,0	10,3	8,3	8,2	3986
	9,0	7,9	5,5	6,6	5,7	4,9	6,0	7,1	6,6	7,1	6,0	6,4	2409
Acimut $\gamma = 90^\circ$ (Orientación Este/Oeste)													
15°	7,9	10,1	12,6	18,2	20,8	21,4	22,6	20,8	14,7	10,8	7,2	6,0	5220
	5,4	6,2	6,7	11,4	13,3	13,3	15,7	13,9	9,0	6,6	4,1	3,5	3285
30°	7,8	9,9	11,9	17,4	19,7	20,2	21,2	19,8	14,1	10,3	7,0	5,8	5001
	5,3	6,2	6,3	10,6	12,4	12,3	14,4	13,0	8,5	6,3	3,9	3,4	3103
45°	7,6	9,6	11,1	16,1	18,0	18,6	19,3	18,3	13,1	9,8	6,6	5,5	4636
	5,1	6,0	5,7	9,6	11,0	11,0	12,7	11,7	7,8	5,8	3,7	3,2	2811
60°	7,1	9,0	10,0	14,5	16,1	16,6	17,2	16,5	11,9	9,0	6,2	5,1	4198
	4,8	5,6	4,9	8,4	9,4	9,4	10,8	10,2	6,9	5,3	3,4	3,0	2482
75°	6,5	8,2	8,8	12,7	13,9	14,4	14,9	14,4	10,5	8,0	5,5	4,7	3687
	4,3	5,0	4,1	6,9	7,6	7,6	8,8	8,4	5,8	4,6	3,0	2,7	2081
90°	5,7	7,2	7,5	10,8	11,7	12,1	12,5	12,2	9,0	6,9	4,8	4,1	3139
	3,6	4,3	3,2	5,4	5,8	5,8	6,7	6,6	4,6	3,7	2,5	2,2	1643

Tabla 3.- Irradiación solar diaria total y directa en promedio mensual para superficies de diversas inclinaciones y orientaciones para el periodo 1973-75 en Barcelona

IRRADIACION SOLAR TOTAL DIARIA EN PROMEDIO ANUAL SOBRE SUPERFICIES INCLINADAS Y ORIENTADAS

LUGAR : Barcelona LATITUD: 41°23' (N) LONGITUD : 2°7' (E)

UNIDADES : MJ/M2 PERIODO : 3 años (1973-74-75)

***** INCLINACION *****

0° 5° 10° 15° 20° 25° 30° 35° 40° 45° 50° 55° 60° 65° 70° 75° 80° 85° 90°

	0°	14,6	15,1	15,6	15,9	16,2	16,4	16,5	16,6	16,5	16,3	16,0	15,7	15,3	14,8	14,2	13,5	12,8	12,0	11,2
A	15°	14,6	15,1	15,5	15,9	16,2	16,4	16,5	16,5	16,4	16,2	16,0	15,6	15,2	14,7	14,1	13,4	12,7	12,0	11,2
C	30°	14,6	15,0	15,4	15,7	16,0	16,1	16,2	16,2	16,1	15,9	15,6	15,3	14,9	14,4	13,8	13,2	12,5	11,8	11,0
I	45°	14,6	14,9	15,3	15,5	15,7	15,7	15,8	15,7	15,6	15,3	15,1	14,7	14,3	13,8	13,3	12,7	12,1	11,4	10,7
M	60°	14,6	14,8	15,0	15,2	15,2	15,2	15,2	15,0	14,9	14,6	14,3	13,9	13,5	13,1	12,6	12,0	11,4	10,8	10,2
U	75°	14,6	14,7	14,8	14,8	14,7	14,6	14,5	14,3	14,0	13,7	13,4	13,0	12,6	12,1	11,7	11,1	10,6	10,1	9,5
T	90°	14,6	14,5	14,5	14,3	14,1	13,9	13,7	13,4	13,1	12,7	12,4	12,0	11,5	11,1	10,6	10,1	9,7	9,2	8,6

IRRADIACION SOLAR DIRECTA DIARIA EN PROMEDIO ANUAL SOBRE SUPERFICIES INCLINADAS Y ORIENTADAS

LUGAR : Barcelona LATITUD : 41° 23' (N) LONGITUD : 2°7' (E)

UNIDADES : MJ/M2 PERIODO : 3 años (1973-74-75)

***** INCLINACION *****

0° 5° 10° 15° 20° 25° 30° 35° 40° 45° 50° 55° 60° 65° 70° 75° 80° 85° 90°

	0°	9,2	9,8	10,2	10,6	11,0	11,2	11,4	11,4	11,4	11,3	11,1	10,9	10,5	10,1	9,6	9,1	8,4	7,8	7,0
A	15°	9,2	9,7	10,2	10,6	10,9	11,1	11,3	11,3	11,3	11,2	11,1	10,8	10,5	10,0	9,6	9,0	8,4	7,7	7,0
C	30°	9,2	9,7	10,1	10,4	10,7	10,9	11,0	11,1	11,0	10,9	10,7	10,5	10,1	9,7	9,3	8,7	8,2	7,5	6,9
I	45°	9,2	9,6	9,9	10,2	10,4	10,5	10,6	10,6	10,5	10,4	10,2	9,9	9,6	9,2	8,7	8,2	7,7	7,2	6,6
M	60°	9,2	9,5	9,7	9,9	10,0	10,0	10,0	9,9	9,8	9,6	9,4	9,1	8,8	8,4	8,0	7,6	7,1	6,6	6,0
U	75°	9,2	9,3	9,4	9,5	9,4	9,4	9,3	9,1	9,0	8,7	8,5	8,2	7,9	7,5	7,1	6,7	6,3	5,8	5,4
T	90°	9,2	9,2	9,1	9,0	8,9	8,7	8,5	8,3	8,0	7,7	7,4	7,1	6,8	6,5	6,1	5,7	5,3	4,9	4,5

Tabla 4a. - Irradiación solar diaria total y directa en promedio anual para el periodo 1973-75 en Barcelona.-

IRRADIACION SOLAR TOTAL DIARIA EN PROMEDIO ESTIVAL SOBRE SUPERFICIES INCLINADAS Y ORIENTADAS

LUGAR : Barcelona

LATITUD : 41°23' (N)

LONGITUD : 2°7' (E)

UNIDADES : MJ/M2

PERIODO : 3 años (1973-74-75)

***** INCLINACION *****

0° 5° 10° 15° 20° 25° 30° 35° 40° 45° 50° 55° 60° 65° 70° 75° 80° 85° 90°

	0°	20,2	20,5	20,7	20,8	20,8	20,7	20,4	20,1	19,6	19,1	18,4	17,7	16,8	15,9	14,9	13,9	12,8	11,6	10,5
A	15°	20,2	20,5	20,7	20,8	20,8	20,6	20,4	20,1	19,6	19,1	18,4	17,7	16,9	16,0	15,0	14,0	12,9	11,8	10,7
C	30°	20,2	20,5	20,7	20,7	20,7	20,5	20,3	20,0	19,5	19,0	18,4	17,7	16,9	16,1	15,2	14,2	13,3	12,3	11,2
I	45°	20,2	20,4	20,6	20,6	20,5	20,3	20,1	19,8	19,3	18,8	18,2	17,6	16,9	16,1	15,3	14,4	13,5	12,6	11,7
M	60°	20,2	20,4	20,4	20,4	20,3	20,1	19,8	19,4	19,0	18,5	17,9	17,3	16,7	15,9	15,2	14,4	13,6	12,7	11,9
U	75°	20,2	20,3	20,2	20,1	19,9	19,7	19,3	18,9	18,5	18,0	17,4	16,8	16,2	15,5	14,8	14,1	13,3	12,6	11,8
T	90°	20,2	20,2	20,0	19,8	19,6	19,2	18,8	18,3	17,8	17,3	16,7	16,1	15,5	14,9	14,2	13,5	12,8	12,1	11,4

IRRADIACION SOLAR DIRECTA DIARIA EN PROMEDIO ESTIVAL SOBRE SUPERFICIES INCLINADAS Y ORIENTADAS

LUGAR : Barcelona

LATITUD : 41°23' (N)

LONGITUD : 2° 7' (E)

UNIDADES : MJ/M2

PERIODO : 3 años (1973-74-75)

***** INCLINACION *****

0° 5° 10° 15° 20° 25° 30° 35° 40° 45° 50° 55° 60° 65° 70° 75° 80° 85° 90°

	0°	13,1	13,4	13,7	13,8	13,8	13,7	13,6	13,3	12,9	12,4	11,9	11,2	10,5	9,7	8,8	7,9	7,0	5,9	4,9
A	15°	13,1	13,4	13,7	13,8	13,8	13,7	13,5	13,3	12,9	12,4	11,9	11,3	10,6	9,8	8,9	8,1	7,1	6,1	5,2
C	30°	13,1	13,4	13,6	13,7	13,7	13,6	13,4	13,2	12,8	12,4	11,9	11,3	10,6	9,9	9,1	8,3	7,4	6,6	5,7
I	45°	13,1	13,4	13,5	13,6	13,5	13,4	13,2	13,0	12,6	12,2	11,7	11,2	10,6	9,9	9,2	8,5	7,7	6,9	6,1
M	60°	13,1	13,3	13,4	13,4	13,3	13,1	12,9	12,6	12,3	11,9	11,4	10,9	10,3	9,7	9,1	8,4	7,7	7,0	6,3
U	75°	13,1	13,2	13,2	13,1	13,0	12,7	12,5	12,2	11,8	11,4	10,9	10,4	9,9	9,3	8,8	8,1	7,5	6,9	6,2
T	90°	13,1	13,1	13,0	12,8	12,6	12,3	11,9	11,6	11,1	10,7	10,2	9,7	9,2	8,7	8,1	7,6	7,0	6,4	5,8

Tabla 4b.- Irradiación solar diaria total y directa en promedio estival para el periodo 1973-75 en Barcelona.-

IRRADIACION SOLAR TOTAL DIARIA EN PROMEDIO INVERNAL SOBRE SUPERFICIES INCLINADAS Y ORIENTADAS

LUGAR : Barcelona

LATITUD : 41° 23' (N)

LONGITUD : 2° 7' (E)

UNIDADES : MJ/M2

PERIODO : 3 años (1973-75)

***** INCLINACION *****
 0° 5° 10° 15° 20° 25° 30° 35° 40° 45° 50° 55° 60° 65° 70° 75° 80° 85° 90°

	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°	65°	70°	75°	80°	85°	90°
A	9,2	9,9	10,6	11,3	11,9	12,4	12,8	13,2	13,5	13,7	13,8	13,8	13,8	13,7	13,5	13,2	12,8	12,3	11,8
C	9,2	9,9	10,6	11,2	11,8	12,3	12,7	13,1	13,3	13,5	13,6	13,6	13,6	13,4	13,2	12,9	12,5	12,1	11,6
I	9,2	9,8	10,4	11,0	11,5	11,9	12,3	12,6	12,8	12,9	13,0	13,0	12,9	12,7	12,5	12,2	11,8	11,3	10,8
M	9,2	9,7	10,2	10,7	11,0	11,4	11,6	11,8	12,0	12,0	12,0	12,0	11,8	11,6	11,4	11,0	10,7	10,2	9,7
U	9,2	9,6	9,9	10,2	10,4	10,6	10,8	10,9	10,9	10,9	10,8	10,7	10,5	10,3	10,1	9,7	9,4	9,0	8,5
T	9,2	9,4	9,5	9,7	9,7	9,8	9,8	9,8	9,8	9,7	9,5	9,4	9,2	8,9	8,6	8,3	8,0	7,7	7,3
T	9,2	9,2	9,1	9,1	9,0	8,9	8,8	8,7	8,5	8,4	8,2	8,0	7,7	7,5	7,2	7,0	6,7	6,3	6,0

IRRADIACION SOLAR DIRECTA DIARIA EN PROMEDIO INVERNAL SOBRE SUPERFICIES INCLINADAS Y ORIENTADAS

LUGAR : Barcelona

LATITUD : 41° 23' (N)

LONGITUD : 2° 7' (E)

UNIDADES : MJ/M2

PERIODO : 3 años (1973-74-75)

***** INCLINACION *****
 0° 5° 10° 15° 20° 25° 30° 35° 40° 45° 50° 55° 60° 65° 70° 75° 80° 85° 90°

	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°	65°	70°	75°	80°	85°	90°
A	5,5	6,2	7,0	7,6	8,2	8,8	9,3	9,7	10,0	10,3	10,4	10,6	10,6	10,5	10,4	10,2	9,9	9,5	9,0
C	5,5	6,2	6,9	7,6	8,2	8,7	9,1	9,5	9,8	10,1	10,3	10,3	10,4	10,3	10,1	9,9	9,6	9,2	8,8
I	5,5	6,1	6,8	7,3	7,9	8,3	8,7	9,1	9,3	9,5	9,6	9,7	9,7	9,6	9,4	9,2	8,9	8,5	8,0
M	5,5	6,0	6,5	7,0	7,4	7,8	8,1	8,3	8,5	8,6	8,7	8,7	8,6	8,5	8,3	8,0	7,7	7,4	7,0
U	5,5	5,9	6,2	6,5	6,8	7,0	7,2	7,4	7,4	7,5	7,5	7,4	7,3	7,2	7,0	6,7	6,4	6,1	5,8
U	5,5	5,7	5,9	6,0	6,1	6,2	6,3	6,3	6,3	6,2	6,2	6,1	5,9	5,8	5,6	5,3	5,1	4,8	4,5
T	5,5	5,5	5,5	5,4	5,4	5,3	5,2	5,1	5,0	4,9	4,8	4,7	4,5	4,3	4,1	3,9	3,7	3,5	3,3

Tabla 4c.- Irradiación solar diaria total y directa en promedio invernal para el periodo 1973-75 en Barcelona.-

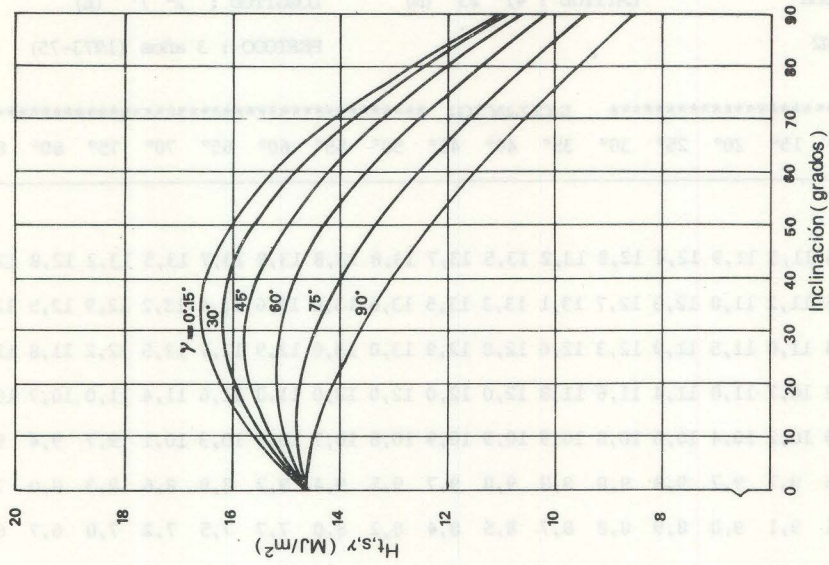


Fig. 2a.-Irradiación solar total diaria, en promedio anual, sobre una superficie inclinada y con distintas orientaciones, para el período 1973 - 1975 en Barcelona (Pedralbes)

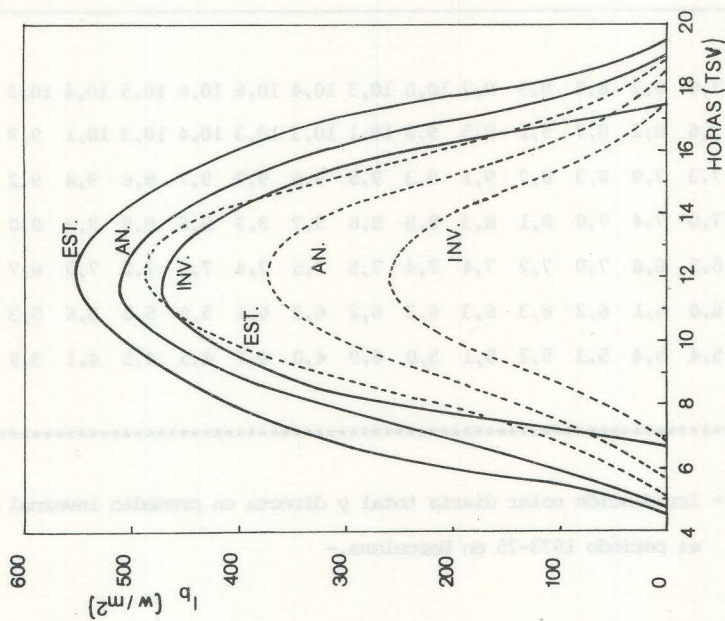


Fig. 1.- Irradiación directa sobre una superficie que sigue al sol en su trayectoria (línea con trazo fino) y sobre el suelo (línea discontinua), en promedios anual, estival e invernal, en función de la hora del día (TSV) y para el período 1973 - 1975 en Barcelona (Pedralbes)

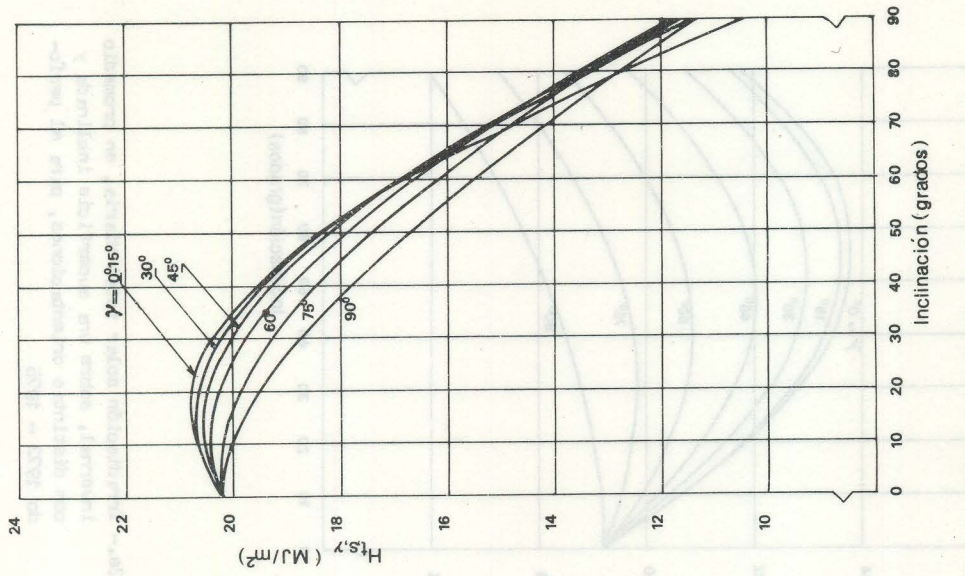


Fig. 2a.- Irradiación solar total diaria, en promedio estival, sobre una superficie inclinada y con diversas orientaciones, para el período 1973 - 1975 en Barcelona

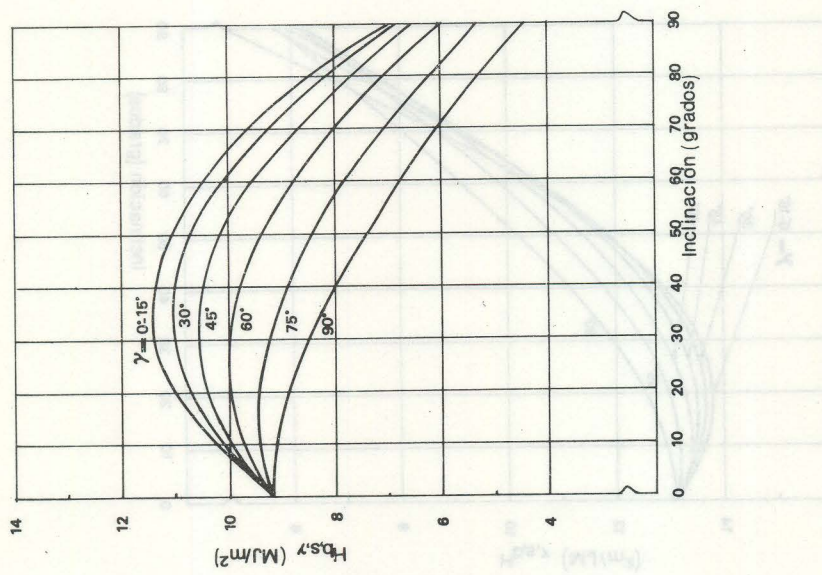


Fig. 2b.- Irradiación solar directa diaria, en promedio anual, sobre una superficie inclinada y con distintas orientaciones, para el período 1973 - 1975 en Barcelona

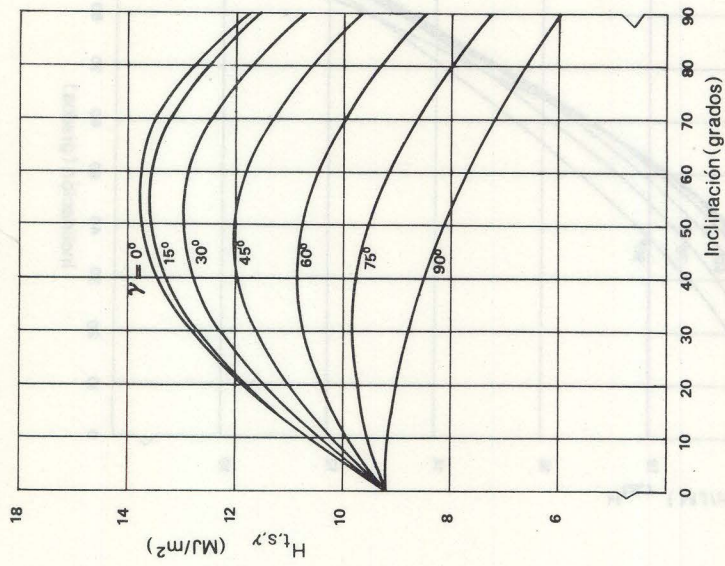


Fig. 2e.- Irradiación solar total diaria, en promedio invernal, sobre una superficie inclinada y con distintas orientaciones, para el período 1973 - 1975

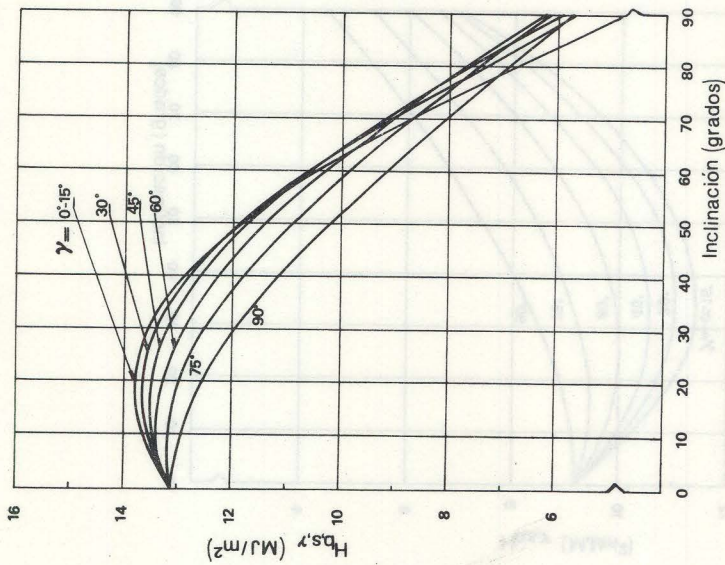


Fig. 2d.- Irradiación solar directa diaria, en promedio estival, sobre una superficie inclinada y con diversas orientaciones, para el período 1973-1975

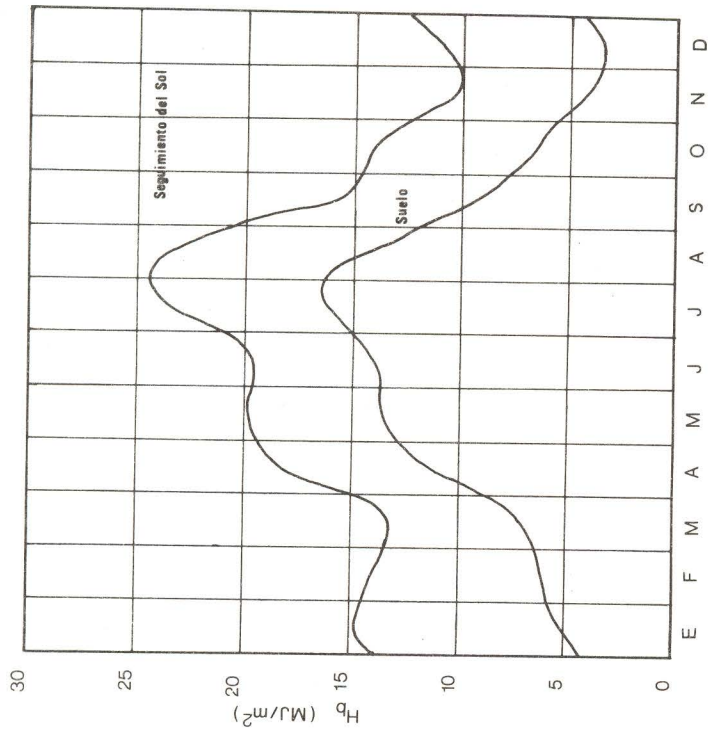


Fig. 3.- Irradiación solar directa diaria para una superficie que siguiese al sol en su trayectoria y para la superficie horizontal (suelo). Período 1973 - 1975 en Barcelona

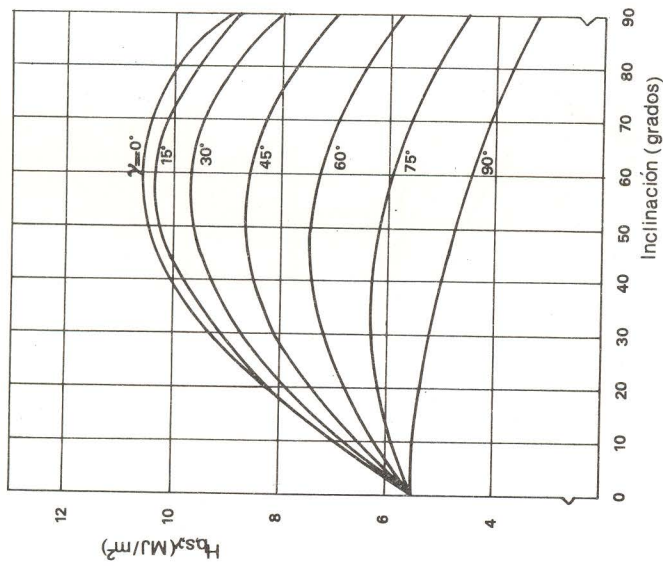


Fig. 2f.- Irradiación solar directa diaria, en promedio invernal, sobre una superficie inclinada y con distintas orientaciones, para el período 1973-1975

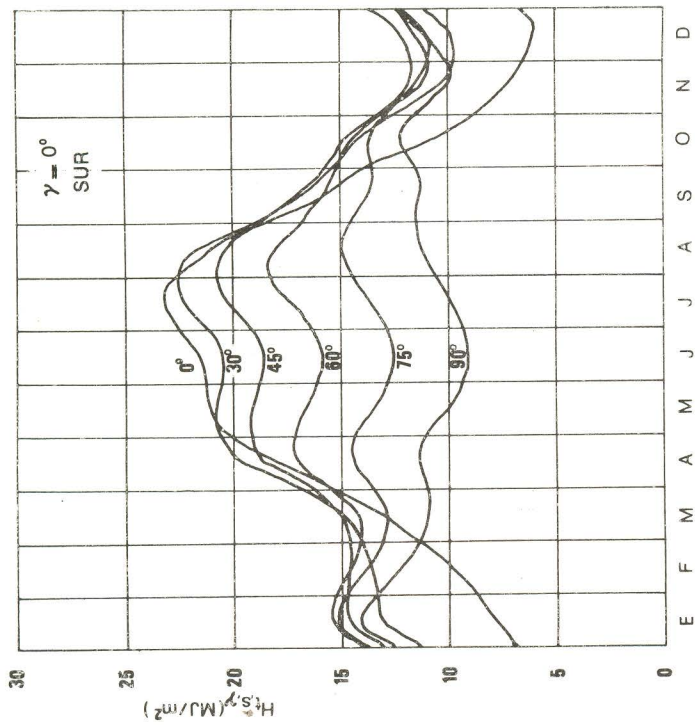


Fig. 4a.- Irradiación solar total diaria sobre una superficie orientada al sur ($\gamma = 0^\circ$) y para distintas inclinaciones. Período 1973 - 1975 en Barcelona

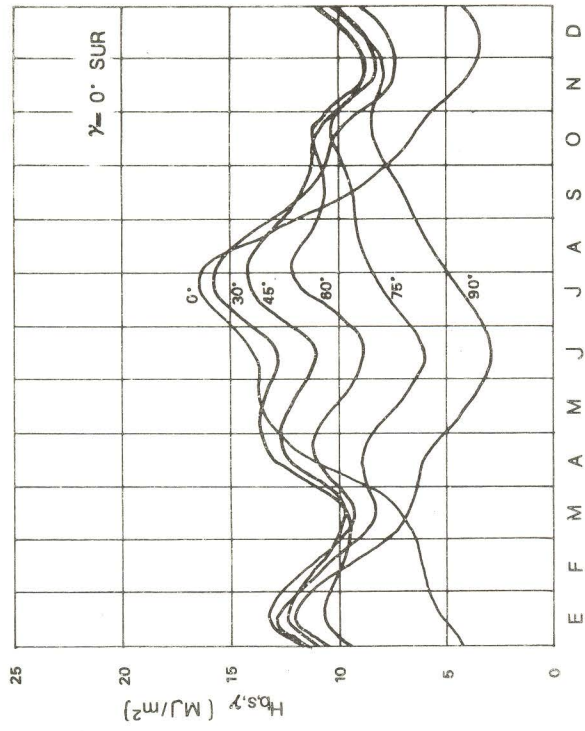


Fig. 4b.- Irradiación solar directa diaria sobre una superficie orientada al sur ($\gamma = 0^\circ$) y para distintas inclinaciones. Período 1973 - 1975 en Barcelona

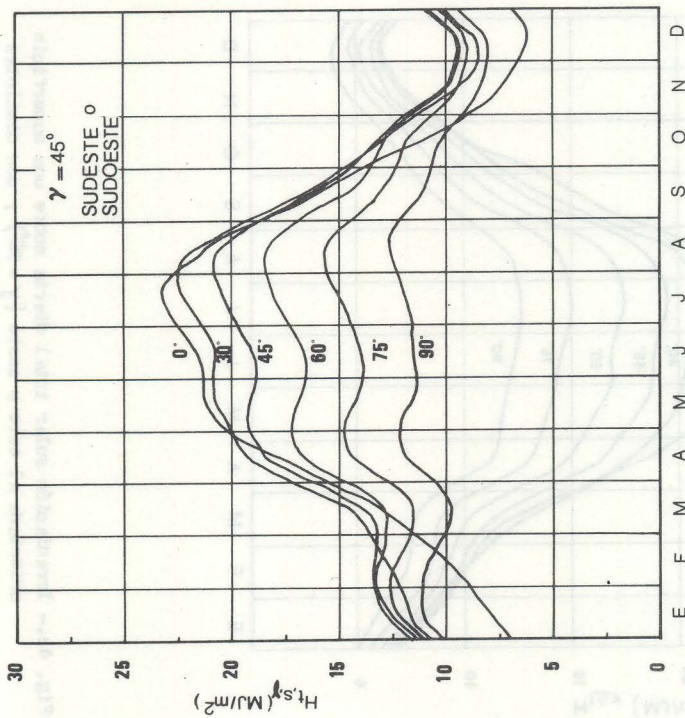


Fig. 4c.- Irradiación solar total diaria sobre una superficie orientada al sudeste ($\gamma = 45^\circ$) y para distintas inclinaciones. Período 1973-1975 en Barcelona

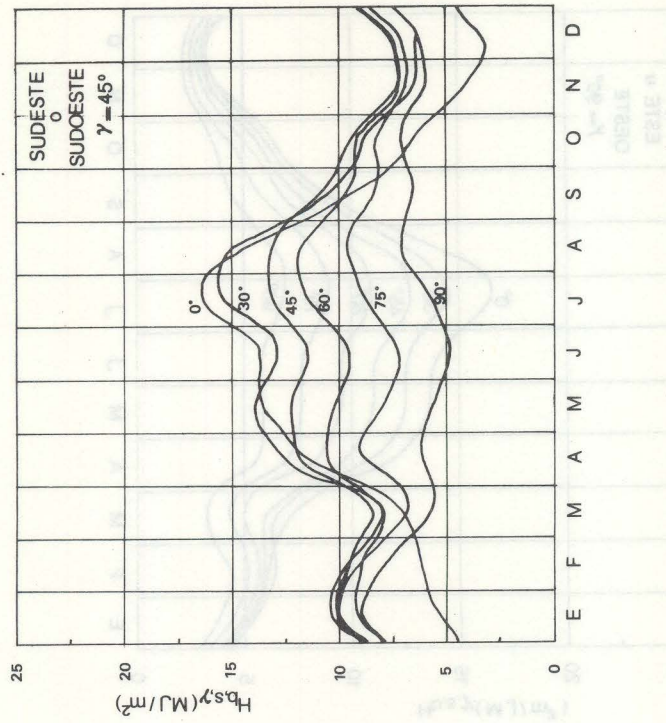


Fig. 4d.- Irradiación solar directa diaria sobre una superficie orientada al sudeste ($\gamma = 45^\circ$) y para distintas inclinaciones. Período 1973 - 1975 en Barcelona

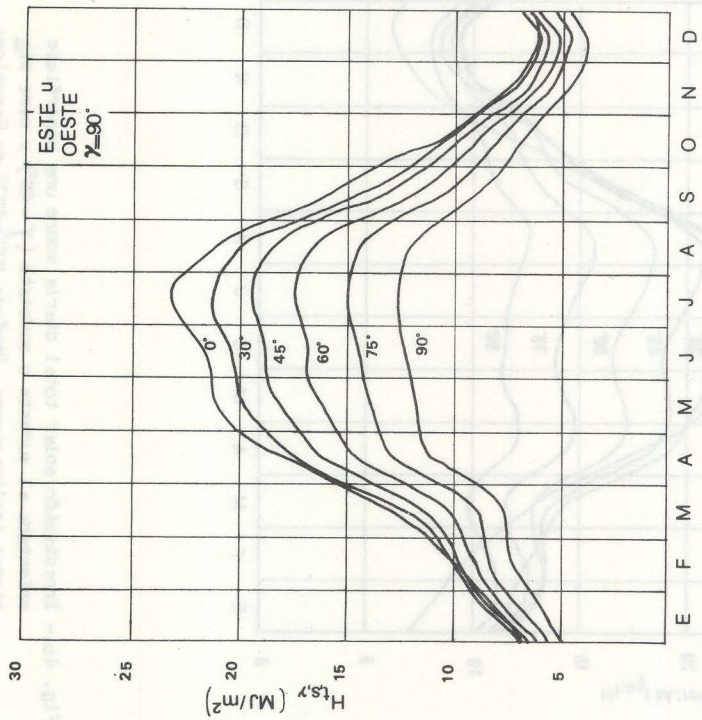


Fig. 4e.- Irradiación solar total diaria sobre una superficie orientada al este u oeste ($\gamma = 90^\circ$) y con distintas inclinaciones. Período 1973 - 1975 en Barcelona

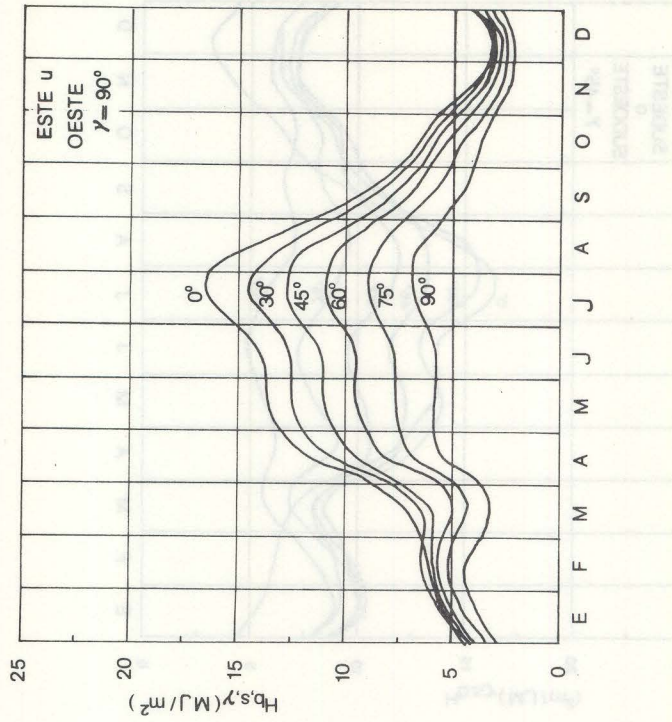
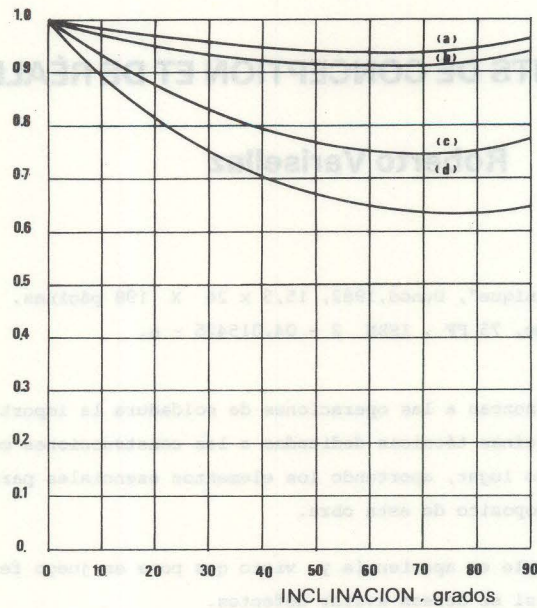


Fig. 4f.- Irradiación solar directa diaria sobre una superficie orientada al este u oeste ($\gamma = 90^\circ$) y para distintas inclinaciones. Período 1973 - 1975 en Barcelona



a : $H_{t,45}/H_{t,0}$
 b : $H_{b,45}/H_{b,0}$
 c : $H_{t,90}/H_{t,0}$
 d : $H_{b,90}/H_{b,0}$

Fig. 5.- Distintas relaciones de irradiación, total y directa,
 en promedio anual y para distintas orientaciones.
 Período 1973 - 1975 en Barcelona