



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

---

---

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

Energía Solar y Cambio Climático en el  
Distrito Federal:  
Mitigación de Gases de Efecto Invernadero  
por uso de Energía Solar

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS

presenta:

Román Damián Mondragón Rodríguez

Director de tesis:

Dr. Carlos Gay García

Centro de Ciencias de la Atmósfera

México D.F.

mayo 2015



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



---

## Hoja de Datos del Jurado

1.	Datos del alumno Mondragón Rodríguez Román Damián 63 05 13 74 Universidad Nacional Autónoma de México Centro de Ciencias de la Atmósfera Posgrado en Ciencias de la Tierra 09825245-7
2.	Datos del tutor Dr. Carlos Gay García
3.	Datos de la Tesis Energía Solar y Cambio Climático: Mitigación de Gases de Efecto Invernadero por uso de Energía Solar 195 p. 2015



# Resumen

Mediante un análisis estadístico sobre datos obtenidos del Servicio Meteorológico Nacional e Instituto de Geofísica de la UNAM, en un periodo que varía de 4 a 15 años por estación de medición, se estimó la Energía Solar disponible a partir de la obtención de Curvas de Frecuencia Acumulada de la Irradiancia Solar Global promedio durante un ciclo climatológico.

Partiendo de los resultados obtenidos de las Curvas de Frecuencia Acumulada, se obtuvieron las gráficas de Energía Solar disponible que recibe el Distrito Federal en promedio durante un año en diferentes zonas de medición.

Con la obtención de las gráficas de Energía Solar promedio mensual, se realizaron las gráficas de Horas Pico para la aplicación del recurso energético en sistemas fotovoltaicos.

Con los datos de Energía Solar promedio anual obtenidos por cada estación de medición, se realizaron los análisis de viabilidad energética y viabilidad económica sobre un programa de sustitución de calentadores solares de agua en el Distrito Federal, desprendiéndose de dichos análisis los cálculos para obtener los ahorros de energía y disminución de Gases de Efecto Invernadero. Dando como resultado final un estudio significativo enfocado a la Mitigación del Cambio Climático en el Distrito Federal.



# Índice general

Resumen	v
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. La Ciudad de México, Distrito Federal . . . . .	1
1.1.1. Zona Metropolitana del Valle de México . . . . .	2
1.2. Consumo de Energía en la ZMVM . . . . .	3
1.2.1. Sector Industrial . . . . .	4
1.2.2. Comercios y Servicios . . . . .	4
1.2.3. Sector Residencial . . . . .	4
1.2.4. Sector Transporte . . . . .	4
1.3. Cambio Climático y Radiación Solar . . . . .	5
<b>2. Antecedentes de la Radiación Solar</b>	<b>9</b>
2.0.1. Radiación . . . . .	9
2.0.2. Temperatura Efectiva de la Tierra . . . . .	10
2.0.3. Absorción de Radiación Solar por la Atmósfera . . . . .	10
2.0.4. Efecto Invernadero . . . . .	11
2.0.5. Efecto de la Nubosidad . . . . .	12
2.1. Panel Intergubernamental de Cambio Climático - Energías Renovables	13
<b>3. Metodología para el estudio de la Energía Solar</b>	<b>19</b>
3.1. Curvas de Frecuencia Acumulada . . . . .	20
3.2. Energía Solar Disponible . . . . .	21
3.3. Hora Pico . . . . .	22
<b>4. Resultados del Recurso de Energía Solar en el Distrito Federal</b>	<b>25</b>
4.1. Radiación Solar Global de un Día Promedio . . . . .	25
4.2. Irradiación Solar Global de Estaciones del Servicio Meteorológico Nacional y Ciudad Universitaria . . . . .	27

4.3.	Irradiación Solar Global de Tacubaya Promedio Mensual 1999 - 2012	28
4.4.	Irradiación Solar Global de ENCB1 Promedio Mensual 1999 - 2012	29
4.5.	Irradiación Solar Global de la Estación Tezontle Promedio Mensual 1999 - 2012	30
4.6.	Irradiación Solar Global de la Estación Ecoguardas (1999 - 2012)	31
4.7.	Irradiación Solar Global de la Estación Aeropuerto Promedio Mensual 1999 - 2003	32
4.8.	Irradiación Solar Global de la Estación Pimentel 2000 - 2005	33
4.9.	Irradiación Solar Global en el Instituto de Geofísica de la UNAM 1993 - 2005	34
4.10.	Representación de las Curvas de Frecuencia Acumulada	35
4.11.	Energía Solar Global Disponible	37
4.12.	Gráficas de Hora-Pico	38
4.12.1.	Hora Pico Estación Tacubaya	38
4.12.2.	Hora Pico Estación ENCB1	39
4.12.3.	Hora Pico Estación Tezontle	39
4.12.4.	Hora Pico Estación Ecoguardas	40
4.12.5.	Hora Pico Estación Aeropuerto	40
4.12.6.	Hora Pico Estación Pimentel	41
4.12.7.	Hora Pico Instituto de Geofísica de la UNAM	41
<b>5.</b>	<b>Análisis de Viabilidad Energética Por Uso de la Energía Solar Como Medida de Mitigación del Cambio Climático</b>	<b>43</b>
5.1.	Sustitución de Calentadores Solares de Agua en la Ciudad de México	43
5.2.	Ahorros Anuales Por Sustituir Un Calentador de GLP Por Un Calentador Solar	48
5.3.	Ahorros Anuales Por Sustituir Un Calentador de GN Por Un Calentador Solar	49
5.4.	Recuperación De La Inversión Por Sustituir Un Calentador de GLP y GN Por Un Calentador Solar	50
5.5.	Reducción de Emisiones De $CO_2$ Por Sustitución De Calentadores Solares	50
<b>6.</b>	<b>Ahorro de Energía y Factibilidad Financiera por Uso de la Energía Solar en la Ciudad de México</b>	<b>53</b>
6.1.	Tipo de Vivienda en la Ciudad de México	53
6.2.	Metodologías de Análisis Financiero	54
6.3.	Método del Valor Anual Equivalente	54

6.4. Método del Valor Presente . . . . .	55
6.5. Tasa Interna de Rendimiento . . . . .	56
6.6. Costo de Energía Ahorrada . . . . .	56
6.7. Periodo de Recuperación de la Inversión . . . . .	57
6.7.1. Consideraciones Antes de la Evaluación . . . . .	58
6.8. Análisis y Resultados . . . . .	58
6.9. Costo de Energía Ahorrada . . . . .	60
6.10. Periodo de Recuperación de la Inversión . . . . .	60
<b>7. Conclusiones</b>	<b>63</b>
<b>A. Gráficas de la Estación Tacubaya</b>	<b>67</b>
<b>B. Gráficas de la Estación Escuela Nacional de Ciencias Biológicas 1 (ENCB1)</b>	<b>89</b>
<b>C. Gráficas de la Estación Tezontle</b>	<b>111</b>
<b>D. Gráficas de la Estación Ecoguardas</b>	<b>133</b>
<b>E. Gráficas de la Estación Pimentel</b>	<b>155</b>
<b>F. Corrida Financiera Precios Constantes</b>	<b>177</b>
<b>G. Corrida Financiera Precios Corrientes</b>	<b>179</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>181</b>



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. La Ciudad de México, Distrito Federal

El Distrito Federal tiene una superficie de  $1,479 \text{ km}^2$ , en el viven aproximadamente 9 millones de personas. Es considerado como uno de los ámbitos urbanos más extensos debido a su población y extensión territorial. Forma parte de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) formada por 60 municipios aglomerados, uno de ellos en el Estado de Hidalgo, los restantes del Estado de México. Resultados del censo elaborado por el INEGI en el año 2010 la ZMVM contaba con una población de alrededor de 20 millones de habitantes [20].

El Distrito Federal se caracteriza por ser una zona de clima templado. La presencia de montañas tan altas impide el paso de las nubes de lluvia que provienen del Golfo de México o del Océano Pacífico, por lo que, las precipitaciones en la Ciudad de México no son tan abundantes. Durante los meses de mayo a noviembre se tiene la temporada húmeda y la pluviosidad es mayor entre los meses de junio y agosto. La temperatura anual promedio varía entre  $12^\circ\text{C}$  y  $16^\circ\text{C}$ , dependiendo de la delegación en que se mida por el factor de la altitud. Las temperaturas más bajas usualmente son registradas durante los meses de enero y febrero, las cuales pueden variar de  $-2^\circ\text{C}$  a  $-5^\circ\text{C}$ , en ocasiones son acompañadas de nevadas en las regiones del sur como el Ajusco. Las máximas temperaturas entre la primavera y verano pueden alcanzar los  $32^\circ\text{C}$  [20].

El clima templado subhúmedo esta presente en un 87% del territorio, 7% es de clima seco y semiseco y 6% templado húmedo. La temperatura media anual es de  $16^\circ\text{C}$ . La temperatura más alta se registra por arriba de los  $25^\circ\text{C}$  y se presenta du-

rante los meses de marzo a mayo. La temperatura más baja se registra alrededor de los  $5^{\circ}C$ , particularmente en el mes de enero. La temporada de lluvias se presenta en el verano, la precipitación total anual es variable: en la región seca es de 600 mm y en la parte templada húmeda (Ajusco) es de 1,200 mm anuales [20].

El patrón de las lluvias en la ZMVM indica que son más abundantes mientras mayor sea la altitud de un sitio. Por lo tanto las lluvias más abundantes se dan al suroeste de la capital. De esta manera es sabido que la altitud condiciona la temperatura y los ecosistemas en la ZMVM. La zona más seca y cálida comprende el norte de Iztapalapa, los territorios de Iztacalco, Venustiano Carranza y el oriente de Gustavo A. Madero. Las especies vegetales que mejor se adaptan a las condiciones climáticas de esta zona son aquellas que necesitan menos agua para sobrevivir [20].

### **1.1.1. Zona Metropolitana del Valle de México**

Los principales factores que condicionan la acumulación o dispersión de contaminantes atmosféricos en la Zona Metropolitana del Valle de México se debe principalmente a su posición geográfica y climática. La ZMVM presenta diferentes tipos de climas ya que se encuentra en la Zona Intertropical, por lo tanto, recibe una alta insolación durante todo el año, lo cual provoca que la temperatura ambiente sea alta [14], [11].

Esta condición se ve modificada por la altitud, de tal forma que hacia el lado noreste se presenta un clima templado semiseco, en el centro un clima templado subhúmedo, y en las regiones elevadas, a más de 2,800 msnm, se considera semifrío subhúmedo [14], [11].

La ZMVM tiene tres subtipos de climas debido a las diferencias de elevación y relieve del terreno: clima templado con lluvias en verano, clima templado húmedo y subhúmedo con lluvias en verano y clima seco. La temperatura promedio anual oscila entre los  $12^{\circ}C$  en las partes más altas, hasta los  $18^{\circ}C$  en las partes llanas. La precipitación pluvial total varía de 600 mm a 1,000 mm al año primordialmente en el verano [14], [11].

Las variaciones de temperatura que se presentan en el clima seco se dividen en dos microestaciones: la estación seca-caliente (marzo a mayo) y la estación seca-fría (noviembre a febrero). La temporada de lluvias y la humedad relativa alta, inicia a mediados de mayo y se vuelve más evidente entre junio y octubre, ocasionando que

desciendan los niveles de algunos contaminantes por la inestabilidad atmosférica. Los niveles más altos de precipitación se registran en las zonas montañosas y los más bajos en la zona oriente (nororiental) [6], [2], [25].

## 1.2. Consumo de Energía en la ZMVM

Las emisiones de Gases de Efecto Invernadero generadas en la Cuenca de México, resultan básicamente de la transformación de combustibles fósiles en energía. La energía destinada al consumo final de la Cuenca de México para el año 2010, se estimó en 706 Peta Joules (PJ) de energía para satisfacer las demandas de transporte y servicios de la población, a diferencia del año 1990 que fue de 443 PJ, lo que representó un aumento del 30 % del consumo en este periodo. Durante el 2002 en México el 72 % de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) fueron alrededor de 389 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente, resultantes de actividades asociadas con la producción, transformación, transporte y uso de energía. Más del 75 % de la electricidad en nuestro país se genera a partir de combustibles fósiles. Cabe mencionar que el transporte es el sector de mayor demanda, teniendo como insumos principales a las gasolinas y al diesel. Las acciones de mitigación de las emisiones de GEI deben incluir medidas de ahorro y uso eficiente de la energía así como la divulgación de la generación de electricidad utilizando fuentes renovables de energía, como la eólica, hidráulica, solar, etc. [10] [9].

Análisis de información climática de décadas recientes muestra que el Valle de México es vulnerable a condiciones extremas, sea que se trate de un incremento en las temperaturas, lluvias intensas o sequías. Es importante que la Ciudad de México aumente su capacidad de adaptación a los efectos del cambio climático y, con ello, reducir su vulnerabilidad ante los escenarios cada vez más probables de impactos adversos para su población [10] [9].

Gran parte de la generación de emisiones de GEI, esta asociada con la transformación de combustibles fósiles en energía. En el año 2010, la quema de estos generó lo equivalente a 45 millones de litros equivalentes de gasolina por día. Los sectores más importantes por su demanda de energía fueron: el transporte, el cual absorbió en promedio, el 47 % del consumo energético, en el sector industrial predomina el uso de gas natural y de electricidad lo cual representa el 27 %, en los sectores residencial y comercial; el consumo se satisface básicamente con electricidad y gas licuado de petróleo (gas L.P) representando el 17 % y 9 % respectivamente [10] [9].

### **1.2.1. Sector Industrial**

La ZMVM ha experimentado un proceso de descentralización de la actividad industrial de transformación a partir de los últimos años de la década de 1980. Las emisiones industriales ubicadas, siguen impactando significativamente la calidad del aire y esto se ve reflejado en el alto consumo energético de este sector, que en el año 2010 demandó 187 PJ (Gas natural: 52 PJ, Diesel industrial: 4 PJ, Gas L.P 9 PJ, Electricidad 122 PJ) [10] [9].

### **1.2.2. Comercios y Servicios**

Las actividades comerciales y de servicios tienen una participación cada vez mayor en la economía nacional y se han concentrado en zonas urbanas. Con base en el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) se sabe que al año 2010, en la ZMVM se concentraban poco más de 650 mil establecimientos agrupados en este sector, de los cuales, el 58 % son comercios y el resto servicios, el consumo energético demandado equivale a 64 PJ (Gas natural 2 PJ, Gas L.P 12 PJ, Electricidad 50 PJ).

### **1.2.3. Sector Residencial**

La vivienda, además de tener un lugar relevante en el desarrollo urbano de la Cuenca de México, representa uno de los sectores con mayor consumo de gas LP, para realizar las actividades internas cotidianas como la cocción de alimentos, el calentamiento de agua, así como de grandes cantidades de energía eléctrica para iluminación y uso de electrodomésticos.

En el año 2010, la ZMVM registró más de cinco millones de viviendas, de las cuales, el 47 % (2.4 millones) pertenecen al Distrito Federal y el resto de los 59 municipios conurbados del Estado de México (INEGI, 2011). En promedio, el 98 % de las viviendas ubicadas en la ZMVM cuenta con electricidad y consumen algún tipo de combustible, para satisfacer sus necesidades. Referente al consumo de combustible del año 2010, este sector consumió aproximadamente 123 PJ (Gas natural 8 PJ, Gas L.P 63 PJ, Electricidad 52 PJ) [10] [9].

### **1.2.4. Sector Transporte**

La falta de una mayor cobertura y eficiencia del transporte público masivo en la ZMVM, ha ocasionado que la flota vehicular de uso particular continúe creciendo rápidamente. Los autos particulares en el año 2010, representan el 80 % de las unidades destinadas al transporte de personas (3.6 millones de vehículos).

En el 2010, el sector transporte registró un consumo de 332 PJ, que representan el 40 % de la demanda total de energía, del cual la gasolina magna contribuye con 224 PJ, la gasolina premium con 19 PJ, Pemex diesel 64 PJ, Gas L.P 16 PJ y la Electricidad con 10 PJ [10] [9].

### 1.3. Cambio Climático y Radiación Solar

El cambio climático, puede entenderse como un fenómeno natural del planeta. Sin embargo, debido a que la diversidad de factores que naturalmente inciden en los procesos de cambio han sufrido modificaciones por las actividades antropogénicas de los últimos dos siglos, dicho fenómeno se ha acelerado y tornado cada vez más intenso y errático.

La temperatura del planeta y las condiciones que favorecen la vida son el resultado de la presencia de ciertos gases en la capa más baja de la atmósfera, conocida como Tropósfera. La composición química de la Tropósfera y de la Estratósfera es un factor importante en la determinación de la temperatura media de la superficie del planeta y, por lo tanto, de su clima. [6], [2]

La Tropósfera está compuesta por vapor de agua, nitrógeno ( $N_2$ ), oxígeno ( $O_2$ ), bióxido de carbono ( $CO_2$ ), metano ( $CH_4$ ) y óxido nitroso ( $N_2O$ ). El  $CO_2$ , el  $CH_4$  y el  $N_2O$  son conocidos como Gases de Efecto Invernadero (GEI), junto con los clorofluorocarburos (CFC) [17], [22].

De la gran cantidad de energía solar que diariamente recibe la Tierra, sólo el 70 % pasa a través de la atmósfera y calienta la superficie del planeta; el 30 % restante es inmediatamente reflejada al espacio. La superficie de la Tierra calentada por el sol emite radiación infrarroja en todas direcciones, ese calor es atrapado en la Tropósfera en un proceso natural llamado efecto invernadero esencial dentro del sistema climático. Los GEI y el vapor de agua son los responsables de la retención del calor en la Tropósfera y de que la Tierra mantenga una temperatura relativamente constante [17], [22].

En la Tropósfera el calor es transportado por las corrientes de aire y las nubes hasta que finalmente escapa al espacio. De acuerdo con los expertos en cambio climático, la ausencia de estos gases ocasionaría que la temperatura promedio del planeta fuera de  $-18^\circ C$ . Los cambios en el clima de la Tierra son el resultado de la propia variabilidad interna del sistema climático y del efecto de factores externos, mismos que pueden ser de origen natural o inducidos por las actividades humanas [17], [22].

Al modificarse la composición química de la Tropósfera por la concentración de GEI debida a las actividades humanas, se intensifica el efecto invernadero, se incrementa la temperatura de la atmósfera, aumenta el calentamiento global y se acelera el cambio climático. De acuerdo con los expertos reunidos en el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (por sus siglas en inglés IPCC), el sistema climático mundial experimenta una alteración de origen antropogénico desde la época preindustrial, con aumentos significativos en la temperatura durante el siglo XX, respecto de los registrados en los siglos anteriores. Las emisiones de GEI proceden, entre otras, de las siguientes fuentes: utilización de combustibles fósiles en la generación de energía eléctrica, en las industrias manufacturera, de la construcción y del transporte; de los procesos de la industria química, de la producción de metales y de la producción y consumo de halocarbonos y hexafluoruro de azufre; de la utilización de disolventes; de las emisiones fugitivas de combustibles sólidos, petróleo y gas natural; del manejo, eliminación, tratamiento e incineración de desechos sólidos; de algunas actividades agrícolas y ganaderas; y del cambio del uso de suelo que conlleva a la deforestación, entre otras [17], [22].

El efecto de los factores externos en el clima se conoce como forzamiento radiativo; éste es un índice que refleja la importancia del factor como mecanismo potencial de cambio climático y mide la influencia que tiene, por ejemplo un GEI determinado, en la alteración del balance de la energía entrante y saliente en el sistema de la atmósfera terrestre. La unidad de medida del forzamiento radiativo se expresa en wats por metro cuadrado ( $W/m^2$ ) y sus valores pueden ser positivos (+), como los que se producen por el incremento en la concentración de GEI que ocasionan el calentamiento de la superficie terrestre; o bien, negativos (-), como los que surgen a partir del incremento de algunos tipos de aerosoles, que ocasionan el enfriamiento de la superficie terrestre [17], [22].

El Tercer Informe de Evaluación del IPCC dado a conocer en el año 2001 indica que, de continuar con el mismo ritmo de crecimiento de las emisiones y concentraciones atmosféricas de los GEI, la temperatura de la atmósfera terrestre podría elevarse entre  $1.4^{\circ}C$  y  $5.8^{\circ}C$  durante este siglo (IPCC 2001c:65). Como consecuencia del calentamiento de la superficie terrestre y de la disminución de las superficies nevadas y las capas de hielo, el nivel medio del mar podría elevarse entre 13 y 94 centímetros, generando cambios en los patrones climáticos con posibles efectos catastróficos en diversas zonas del planeta, incluidas mermas en la producción agrícola, aumento de la cobertura de enfermedades tropicales, inundación de las zonas costeras, cambio en los patrones de lluvias, alteración de la cobertura de bosques y amplitud de zonas desérticas. Algunos científicos afirman que los recientes acontecimientos de aumento de precipitación pluvial y mayor intensidad y número de huracanes, son parte de los

efectos del cambio climático mundial [17], [22].

Se considera que los cambios en el clima afectarán de manera diferenciada a las diversas regiones y ecosistemas del planeta, pero es previsible que sean las regiones menos desarrolladas y más pobladas las más vulnerables ante este fenómeno [17], [22], [6].

Al final de este trabajo se obtendrá un importante y valioso estudio de la caracterización del recurso de energía solar en el Distrito Federal, minuciosamente se tendrán las gráficas del comportamiento de la radiación solar y por consiguiente la energía total para un día promedio de cada mes.



# Capítulo 2

## Antecedentes de la Radiación Solar

### 2.0.1. Radiación

Se le denomina Radiación Solar directa a la parte de radiación que proviene directamente del sol (línea recta), los rayos solares que proviene en varias direcciones después de ser reflejados, dispersados o desviados por las nubes entre otros factores se le denomina Radiación Solar difusa. La latitud, la proximidad a los océanos, a los continentes, y otros, tienen un efecto importante en el balance de radiación y en el control del clima y de la meteorología en cada región del mundo.

“Radiación puede definirse como la emisión, propagación y absorción de la energía en forma de ondas electromagnéticas. El proceso de radiación se diferencia de las otras formas de energía, como convección y conducción, por el hecho de que estas siempre necesitan un medio de transmisión, ya sea sólido, líquido o gaseoso, mientras que la radiación de energía se puede presentar además en el vacío. La radiación que llega del Sol a la Tierra es la fuente principal de energía para la generación de los fenómenos en la atmósfera, en los océanos y, en general, para la vida en la Tierra. Conforme el espectro total de radiación solar (ultravioleta, UV, visible e infrarrojo, IR) penetra la atmósfera, se va modificando, de tal manera que gran parte de la radiación UV e IR son absorbidas, mientras que principalmente es la radiación visible la que llega a la superficie terrestre. La atmósfera tiene un papel muy importante en el mantenimiento del balance entre la radiación solar que entra al sistema terrestre y la radiación que sale de la Tierra, manteniendo un promedio global de temperatura superficial del orden de 15° C. Si la Tierra no tuviera una atmósfera para absorber y distribuir el calor que nos llega del sol, entonces gran parte de esa energía solar sería reflejada inmediatamente y la temperatura media sobre la superficie terrestre estaría por abajo de los 0° C. Cuando la radiación solar llega a la superficie de la Tierra, es transfor-

mada en calor y en radiación infrarroja. Esta energía es absorbida por la atmósfera y emitida de nuevo al espacio. En el término de un año y a primera aproximación, el sistema terrestre devuelve exactamente la misma cantidad de energía que llega del sol, pues de otra manera la Tierra se calentaría (o se enfriaría) ilimitadamente, por lo que difícilmente se podría mantener la vida tal y como la conocemos actualmente” [7].

### 2.0.2. Temperatura Efectiva de la Tierra

La temperatura efectiva de la tierra, puede calcularse de acuerdo a la ecuación (3.7) la cual solo depende de la distancia de la Tierra al sol (i.e. de la constante solar  $S_0$ ), la constante de Stefan-Boltzmann  $\sigma$  y el albedo  $\alpha$ . Esto se puede interpretar como si la Tierra, calentada por el sol, adquiere una temperatura de 255 °K.

$$T_E = \sqrt[4]{\frac{S_0(1 - \alpha)}{4\sigma}} = 255 \text{ K} \quad (2.1)$$

“No toda la radiación interceptada por la Tierra es absorbida; una fracción de la energía incidente es reflejada de regreso al espacio, principalmente por las nubes (aprox 20%), por los constituyentes atmosféricos (aprox 6%) y por la superficie terrestre (aprox 4%), para un total aproximado del 30%. La fracción de energía reflejada se conoce como el albedo terrestre,  $\alpha$ , la cual depende de la naturaleza de los gases atmosféricos, de las nubes y de la superficie terrestre. El valor promedio del albedo determinado por observaciones astronómicas es del orden de  $\alpha = 0.3$ ” [7].

### 2.0.3. Absorción de Radiación Solar por la Atmósfera

“Del total de energía solar que penetra al sistema terrestre (i.e. 70 %), un 20 % es absorbido por la atmósfera libre (16 % por los constituyentes atmosféricos y 4 % por las nubes). En la atmósfera libre, los principales constituyentes atmosféricos que absorben la radiación solar (UV y visible) son:  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $O$ ,  $NyO_3$ . El oxígeno y el nitrógeno atómicos, absorben en las bandas de rayos X hasta cerca de  $0.085 \mu m$ ; el oxígeno y el nitrógeno moleculares, absorben en diferentes bandas por abajo de los  $0.2 \mu m$ ; ya que estos gases se encuentran en la atmósfera superior, prácticamente no dejan pasar estas bandas de radiación solar, por abajo de los 90 km de altura. El ozono presenta algunas bandas de absorción en el UV ( $0.2 - 0.35 \mu m$ ), el visible ( $0.45 - 0.77 \mu m$ ) y el IR ( $> 4 \mu m$ ). En el infrarrojo, los principales gases absorbentes en la atmósfera son:  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $O_3$ ,  $N_2O$ ,  $CO$ ,  $O_2$ ,  $CH_4$  y  $N_2$ . En particular, son el vapor de agua, en las bandas de 0.72, 0.82, 0.94, 1.1, 1.38, 1.87, 2.7, 3.2 y  $6.3 \mu m$ ,

y el dióxido de carbono, en las bandas de 1.45, 1.6, 2.0, 2.7, 4.3, 4.8 y 5.2  $\mu\text{m}$ , los principales absorbentes de la radiación solar en el infrarrojo, aunque no absorben el total de ella, como se observa en la (Fig.2.1)” [7].

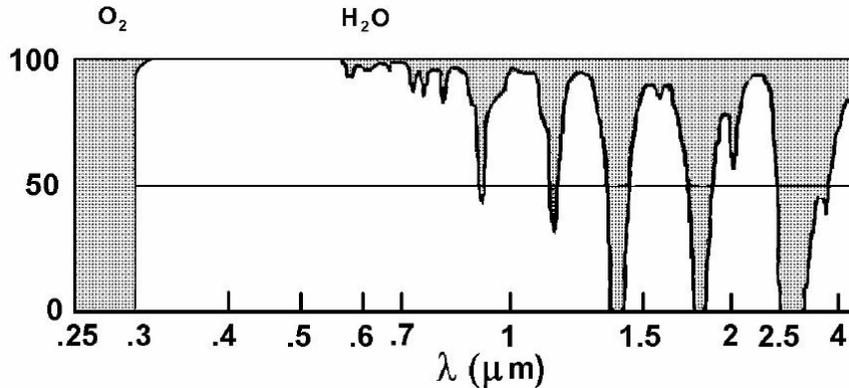


Figura 2.1: Transmisión espectral de la atmósfera. (Ivanoff, 1977)

#### 2.0.4. Efecto Invernadero

El efecto invernadero se entiende como el fenómeno por el que determinados gases presentes en la atmósfera absorben radiación infrarroja emitida de la Tierra al haberse calentado por la Radiación Solar. En la Fig.2.2 gráficamente se representa el balance de calor terrestre y de la atmósfera.

“El lado izquierdo de la Fig 2.2 muestra lo que sucede con el espectro de onda corta, visible y de onda larga de la radiación solar. Todas las cantidades se expresan en %, de tal manera que la radiación solar que incide en el tope de la atmósfera es el 100 %. Cerca del 20 %, del flujo incidente, es absorbido por la atmósfera y cerca del 30 %, conocido como el albedo terrestre, es reflejado, 4 % por el suelo y 26 % por la atmósfera y las nubes, esta energía reflejada se pierde totalmente y no juega ningún papel en el calentamiento de la superficie terrestre ni de la atmósfera. Tanto la atmósfera como la superficie del suelo deberán perder la energía que ganan, pues de otra manera la temperatura aumentaría indefinidamente. Así también en el lado derecho de la Fig.2.2 se muestra la radiación terrestre de onda larga. El flujo de radiación infrarroja emitida por el suelo es de 115 % (más del doble de la energía solar que incide en la superficie), un 10 % sale directamente al espacio y un 105 %

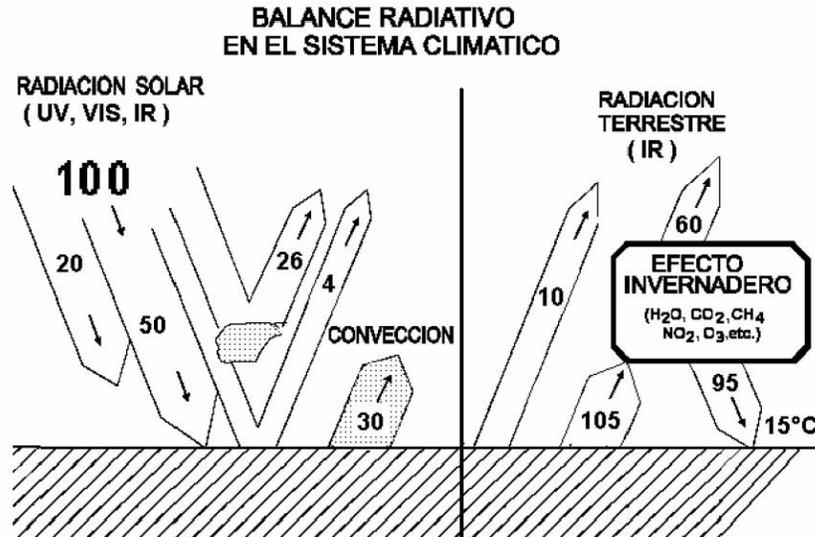


Figura 2.2: Balance de calor en el sistema atmosférico (%). En el lado izquierdo se indica la distribución de la radiación solar; en el lado derecho se indica la distribución de la radiación terrestre

es absorbida por la atmósfera (por los conocidos gases de invernadero), la cual regresa un 95 % al suelo y emite un 60 % hacia el espacio exterior. Ya que 50 % de la radiación solar incide en el suelo, parecería que el suelo estuviera ganando un 30 % más de energía de la que emite; sin embargo, el exceso de energía se pierde en forma de calor latente (convección y evaporación) y calor sensible, procesos mediante los cuales se inyecta calor y humedad a la atmósfera, permitiendo la generación de una gran parte de los fenómenos meteorológicos” [7].

### 2.0.5. Efecto de la Nubosidad

Más adelante se presentarán las gráficas que muestran la intensidad en horas de Radiación Solar para un día promedio de cada mes las cuales tienen un comportamiento similar al de la Fig.2.3, tales efectos pueden explicarse conforme a que “si la cobertura de las nubes es considerable, se convierte en una importante barrera para la radiación solar (visible), reflejándola, y para la terrestre (infrarroja), absorbiéndola. La radiación absorbida y reflejada, dependerá de la cantidad total de nubosidad presente en la atmósfera. Este efecto de barrera de la cobertura nubosa significa

variaciones menos extremas de la temperatura superficial, pues durante el día las temperaturas no serían tan altas, mientras que durante la noche no serían tan bajas, como sería el caso de no existir una nubosidad que detuviera la radiación solar y terrestre, respectivamente” [7].

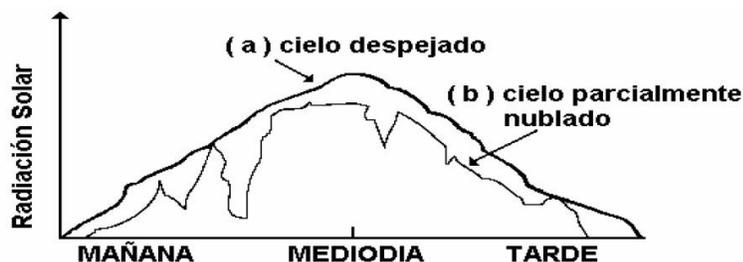


Figura 2.3: Efecto de la cobertura de nubes en la radiación solar incidente en la superficie terrestre: (a) en una atmósfera clara, sin nubes y (b) en una atmósfera parcialmente nublada. [7]

## 2.1. Panel Intergubernamental de Cambio Climático - Energías Renovables

La demanda de servicios energéticos y asociados, para cumplir con el desarrollo social y económico y mejorar el bienestar y la salud, va en aumento. Todas las sociedades requieren de servicios de energía para satisfacer las necesidades humanas básicas (por ejemplo, la iluminación, la cocina, la comodidad del espacio, la movilidad y la comunicación) y servir a los procesos productivos. Desde aproximadamente 1850, el uso mundial de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas) ha aumentado a dominar el suministro de energía, dando lugar a un rápido crecimiento de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) [21].

Las emisiones de gases de efecto invernadero resultantes de la prestación de servicios de energía han contribuido significativamente al incremento histórico en Gases de Efecto Invernadero en la atmósfera. En el Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental del Cambio Climático, conocido por el acrónimo en inglés IPCC (AR4) (intergovernmental Panel on Climate Change) se concluyó que la mayoría del aumento observado de la temperatura media mundial desde mediados del siglo XX es

muy probable que se deba al aumento observado de las concentraciones de los gases de efecto invernadero antropogénicos (gases de efecto invernadero) [21].

Los datos recientes confirman que el consumo mundial de combustibles fósiles representan la mayoría de las emisiones antropogénicas mundiales de GEI. Las emisiones siguen aumentando y las concentraciones de  $CO_2$  aumentarán a más de 390 ppm, un 39 % por encima de los niveles preindustriales, a finales de 2010 [21].

Hay múltiples opciones para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero del sistema de energía y al mismo tiempo satisfacer la demanda mundial de servicios energéticos. Algunas de estas opciones son posibles, tales como la conservación y eficiencia energética, sustitución de combustibles fósiles, energías renovables, entre otros, los cuales fueron evaluados en el cuarto reporte del IPCC. En este reporte se hizo una evaluación completa de cualquier cartera de opciones de mitigación que implican una evaluación de su potencial de mitigación respectivamente, así como todos los riesgos asociados, los costos y su contribución al desarrollo sostenible [21].

Además de tener un grande potencial para mitigar el cambio climático, las energías renovables pueden proporcionar mayores beneficios. Si se aplican correctamente, contribuirán al desarrollo económico y social, fácil acceso al uso correcto de la energía, y reducir los impactos negativos sobre el medio ambiente y la salud [21].

En la mayoría de las condiciones de aumentar la cuota de energías renovables en el marco de la energía se requieren políticas para estimular cambios en el sistema energético. El desarrollo de las tecnologías de energías renovables ha incrementado rápidamente en los últimos años, y su participación se prevé que aumente considerablemente de acuerdo a las mayores mitigaciones propuestas en los escenarios climáticos, las políticas adicionales serían necesarias para atraer a los incrementos necesarios y así favorecer la inversión en tecnologías e infraestructura [21].

En los mercados de energías renovables se tiene una gran variedad de tecnologías. Varios tipos de energías renovables pueden suministrar energía eléctrica, energía térmica y energía mecánica, así como la generación de energías limpia se podría satisfacer a los multiples servicios que satisfacen las necesidades cotidianas. Algunas tecnologías de energías renovables se pueden implementar en puntos descentralizados como en el medio rural y urbano, mientras que otros se despliegan principalmente en grandes redes de energía centralizadas. Un número creciente de tecnologías de energías renovables son técnicamente maduros y se están desplegando a escala signi-

ficativa, otros están en una primera fase de madurez técnica y el despliegue comercial empieza a llenar los mercados especializados [21].

Radiación Solar Directa (IPCC): Las tecnologías energéticas aprovechan la energía de la radiación solar para producir electricidad a partir de la concentración de energía solar, energía térmica (calefacción o de refrigeración), para satisfacer las necesidades de iluminación directa y potencialmente para poder producir combustibles que pueden ser utilizados para el transporte y otros fines. Muchas, pero no todas las tecnologías son modulares en la naturaleza, lo que permite su uso tanto en sistemas centralizados y sistemas de energía descentralizados. La energía solar es variable y, en cierta medida, impredecible, aunque el perfil temporal de la producción de energía solar en algunas circunstancias se correlaciona bastante bien con la demanda de energía de almacenamiento, la energía térmica ofrece la opción de mejorar el control de salida para algunas tecnologías como la calefacción solar directa [21].

A escala mundial, se estima que las energías renovables representaron el 12.9 % del total de los 492 exajulios ( $1 \text{ Exajulio} = 10^{18} \text{ joules}$ ) de suministro de energía primaria consumida en el 2008. La mayor contribuidor de energía fue la biomasa con 10.2 %, el 60 % de la biomasa se usa para las cocinas y aplicaciones de calefacción en los países en desarrollo. En 2008, las energías renovables contribuyeron con aproximadamente el 19 % del suministro mundial de electricidad (16 % por energía hidroeléctrica y el 3 % por otras ER), los biocombustibles han contribuido con el 2 % del suministro de combustible para el transporte vial en el mundo, la biomasa tradicional (17 %), biomasa moderna (8 %), la energía solar térmica y geotérmica (2 %), juntos dan un total del 27 % de la demanda mundial de calor. La contribución de las energías renovables para el suministro de energía primaria varía sustancialmente por país y región (Fig.2.4) [21].

El despliegue de energías renovables se ha incrementado rápidamente en los últimos años. Varios tipos de políticas en los gobiernos, la disminución del costo de muchas tecnologías de energía renovable, los cambios en los precios de los combustibles fósiles, el incremento de la demanda de energía y otros factores han fomentado el aumento continuo de uso de la energía renovable. A pesar de los problemas mundiales sobre la capacidad financiera, las energías renovables siguieron creciendo rápidamente en el 2009 en comparación con lo que se había instalado en los últimos años, entre ellos: la energía eólica (32 % de aumento, 38 Gigawatts (GW)), la energía hidráulica (3 % de incremento, es decir 31 GW), la energía fotovoltaica conectada a la red (53 %, 7.5 GW añadidos), la energía geotérmica (del 4 %, 0.4 GW), y la energía solar para calentamiento de agua y calefacción (21 %, 31 GW). Los biocombustibles represen-

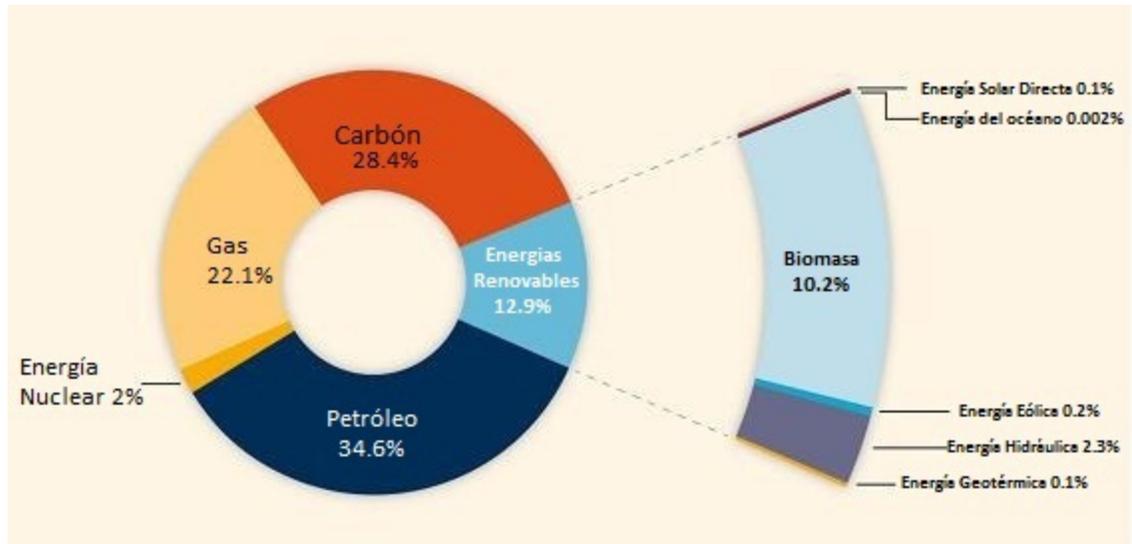


Figura 2.4: Consumo de los recursos de energía primaria global y energía renovables en el 2008 [21]

taron el 2% de la demanda de combustible por transporte de carretera en 2008 y casi el 3% en 2009. La producción anual de etanol aumentó a 1.6 EJ (76 mil millones de litros) a finales de 2009 y el biodiesel a 0.6 EJ (17 mil millones de litros) [21].

De los aproximadamente 300 GW de nueva electricidad generada y acumulada globalmente durante los años 2008 y 2009, 140 GW provienen por la adición de las energías renovables. En conjunto, los países en desarrollo acogen el 53% de la capacidad de generación de electricidad mundial por energías renovables. A finales de 2009, el uso de energías renovables para calentar agua y calefacción en los mercados también incluyeron la biomasa moderna (270 GW), solar (180 GW), y geotérmica (60 GW). El uso descentralizado de energías renovables (excluyendo la biomasa tradicional) en el cumplimiento de las necesidades de energía rural en los hogares, pueblos y villas también aumentó, incluyendo las centrales hidroeléctricas, diversos métodos de uso de biomasa moderna, fotovoltaica, eólica o sistemas híbridos que combinan múltiples tecnologías [21].

El potencial global técnico de energías renovables no limitará el crecimiento continuo del uso de energías renovables y una amplia gama estimada esta presentada en la literatura, pero los estudios han encontrado consistentemente que el potencial

global técnico total para energías renovables es substancialmente más grande que la demanda de energía global. El potencial técnico de energía solar es el más alto entre los recursos de energías renovables, pero existe potencial técnico importante para las otras fuentes de energía renovable. Incluso en regiones con niveles relativamente bajos de potencial técnico para cualquier recurso de energía renovable, normalmente hay importantes oportunidades para el despliegue más amplio en comparación con los niveles actuales. A más largo plazo y en los niveles más altos de implementación, sin embargo, los potenciales técnicos indican un límite a la contribución de un tipo de tecnologías de energías renovable. Factores como la preocupación por la sostenibilidad, la aceptación pública, los sistemas de integración, las restricciones por infraestructura o los factores económicos también puede limitar el despliegue de las tecnologías de energías renovables [21].

El cambio climático tendrá un impacto en el tamaño y la distribución geográfica de los potenciales técnicos de fuentes de energía renovable, pero la investigación sobre la magnitud de estos posibles efectos es incipiente. Debido a que las fuentes de energía renovable, en muchos casos dependen del clima, el cambio climático global afectará la base de los recursos para las energías renovables, aunque el precio de la naturaleza y la magnitud de estos impactos son inciertos. El futuro del potencial técnico para la bioenergía podría estar influenciado por el cambio climático a través de los impactos sobre la producción de biomasa, tales como las condiciones del suelo alterado, las precipitaciones, la productividad de los cultivos y otros factores. En la energía solar, aunque el factor del cambio climático alterará la distribución y la variabilidad de la cubierta de nubes, se espera que el impacto de estos cambios en el potencial técnico general sea pequeño [21].

Una variedad de retos específicos de tecnología, además de los costos pueden necesitar ser dirigidas al permitir que las energías renovables tengan significativamente mayor nivel de contribución a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero [21].

Por el aumento y la utilización sostenible de la bioenergía, mediante un diseño adecuado, con la aplicación y el seguimiento de la sostenibilidad se pueden minimizar los impactos negativos y maximizar los beneficios con respecto al desarrollo social, económico y el medio ambiente. Para la energía solar, las barreras regulatoras e institucionales pueden impedir el despliegue como las cuestiones de integración, transmisión e implementación [21].

Para la energía geotérmica, un reto importante sería demostrar que los sistemas geotérmicos mejorados pueden establecerse económicamente, sostenible y ampliamente. Nuevos proyectos de energía hidráulica pueden tener impactos ecológicos y sociales que son muy específicos, pero requieren de un mayor despliegue de herramientas mejoradas para la evaluación de la sostenibilidad y la ardua colaboración con los partidos políticos de gobierno en cada región [21], [24], [18].

## Capítulo 3

# Metodología para el estudio de la Energía Solar

El objetivo principal de esta investigación es evaluar la Energía Solar que recibe el Distrito Federal en promedio durante un año, para esto es necesario conocer como es el comportamiento del recurso solar que entra al al Distrito Federal, ya que el clima varía de acuerdo a las diferentes zonas donde se tomen los datos de irradiación global.

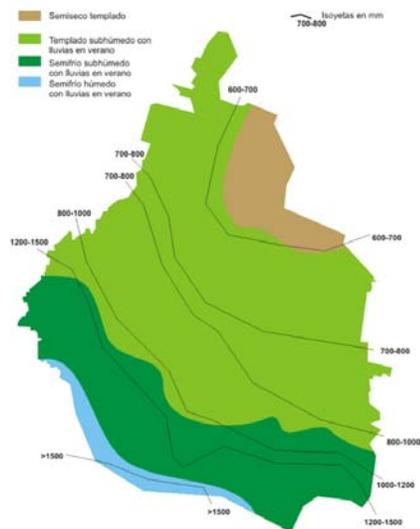


Figura 3.1: Climas del Distrito Federal. (wikipedia.org - Mapas Geográficos del Distrito Federal)

Los datos ocupados para el desarrollo de este trabajo fueron medidos en las estaciones de Tezontle, Ecoguardas, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas 1, Pimentel y Aeropuerto, los cuales fueron proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

También se trabajo con datos del Observatorio de Radiación Solar, ubicado en el Instituto de Geofísica de la UNAM en Ciudad Universitaria, el cual funge como Centro Regional de Radiación, entre sus funciones ofrece a instituciones como el SMN, a profesionales usuarios de instrumental para medir radiación solar, el servicio de calibración y referenciación de pirheliómetros y piranómetros contra instrumentos de referencia estándar, reconocidos por la Organización Meteorológica Mundial. Por consiguiente todos los datos aquí ocupados son confiables.

Con el procesamiento adecuado de los datos se puede conocer la Energía Solar disponible en la zona de medición. Para esto es importante realizar curvas de Frecuencia Acumulada, las cuales se explican a continuación.

### 3.1. Curvas de Frecuencia Acumulada

Para estimar la energía solar disponible en un sitio de mediciones de una forma estadística, ésta se puede obtener a partir de las curvas de frecuencia acumulada (CFA) de la irradiancia solar global promedio durante al menos un ciclo climatológico [19], [1].

Las curvas de frecuencia acumulada se definen como aquellas que representan la frecuencia, en términos del número de horas promedio, con la que la irradiancia global incidente es mayor o igual a cierto nivel crítico, ( $I_c$ ) [19], [1].

Para construir las curvas de frecuencia acumulada de la irradiancia, correspondiente al período de tiempo que cubran los datos disponibles, se realiza de la siguiente manera:

Esporádicamente, dependiendo de la cantidad de nubes, el tipo de nube y la disposición de éstas con respecto al punto de observación, el valor de la constante solar puede ser superado instantáneamente, por lo general, los valores máximos esperados no superan los 1400 W/m<sup>2</sup> en superficie. Este rango de energía (0-1400 W/m<sup>2</sup>) se subdivide en niveles críticos ó umbrales de la irradiancia solar global de acuerdo con el interés práctico que se tenga para las diferentes aplicaciones que involucran

el aprovechamiento de la energía solar. En este caso específico, los niveles críticos de irradiancia solar global, se establecerán a cada 25 W/m<sup>2</sup>. Una vez hecha esta subdivisión, se procede a contar el número de veces que la irradiancia minuto a minuto se ubicó dentro de los intervalos de los niveles críticos [19], [1].

Con el resultado de este cálculo, las curvas de frecuencia acumulada para cada mes del año y para el sitio de observación se representan en una gráfica donde la ordenada es el eje de la irradiancia (W/m<sup>2</sup>) subdividido en tantos intervalos como niveles críticos se tengan y la abscisa es el eje en donde se representa el tiempo en que la irradiancia se ubicó dentro del intervalo del nivel crítico a lo largo del día durante periodos de 1 minuto desde que sale el Sol hasta que se oculta [19], [1].

Para cada nivel crítico de irradiancia ( $I_c$ ) se obtiene el tiempo en horas por día y se denota como:

$$N_h(I) \quad (3.1)$$

Donde la expresión  $N_h(I)$  se denomina como el tiempo que opera directamente la radiación solar sobre el collector.

## 3.2. Energía Solar Disponible

De esta forma y partiendo de los valores obtenidos de las Curvas de Frecuencia Acumuladas, se puede calcular la Energía Solar Disponible integrando sobre la diferencial de cada nivel crítico de irradiancia ( $dl$ ), de la siguiente forma: [19], [1]:

$$E_{disponible} I_c = \int_{I_c}^{I_{max}} N_h(I) dl \quad (3.2)$$

Notamos que si consideramos:

$$E_{disponible}(I_c = 0) = E_{total} \quad (3.3)$$

La representación gráfica se muestra en la (Figura 2.2):

En donde la Energía Solar Disponible es el área sombreada, delimitada por la Curva de Frecuencia Acumulada (CFA), el eje vertical (Y) y la línea horizontal que representa el nivel crítico de irradiancia como límite mínimo ( $I_c$ ) y la irradiancia máxima como límite superior (Fig.3.2) ( $I_{max}$ ) [19], [1].

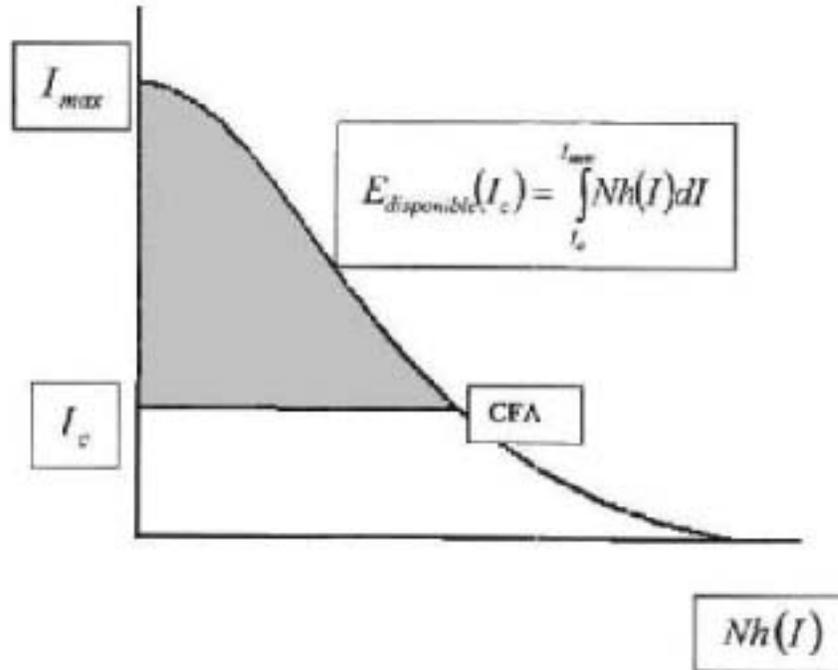


Figura 3.2: Energía Disponible

### 3.3. Hora Pico

A el total de energía recibida diariamente, por unidad de área, en un sitio particular, se le ha denominado Recurso Solar, este valor representa la irradiación diaria que se obtiene a partir de un promedio diario, semanal, mensual, ó anual. Las unidades usadas comúnmente para este concepto en el Sistema Internacional (SI), son los Joules sobre metro cuadrado  $J/m^2$  [19].

Para la aplicación del Recurso Solar en los Sistemas Fotovoltaicos, se ha tomado por convención otra unidad para especificar el recurso solar. En un día claro a nivel del mar, un captador horizontal puede recibir una irradiancia directa aproximada de  $1000 W/m^2$  al medio día solar. Por lo anterior, se le ha llamado irradiancia-pico, al valor de  $1000 W/m^2$ . En consecuencia, a la cantidad de irradiación recibida en un captador durante un tiempo de una hora, se ha convenido llamarla hora-pico [19].

Para expresar al recurso solar en unidades de horas-pico, debe recordarse que el área bajo la curva de irradiancia contra tiempo representa la irradiación del día. Si se considera que esta área es igual al área de un rectángulo cuya altura corresponde a una irradiancia-pico de  $1000 \text{ watts}/\text{m}^2$ , entonces la base de este rectángulo es el número de horas en que supuestamente el sol debería haber brillado con esta intensidad para obtener la misma irradiación del día (Fig.3.3). Las horas-pico de un sitio determinado, se obtiene al dividir el valor de la irradiación diaria en  $\text{Wh}/\text{m}^2$ , entre  $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ . El resultado será el número de horas-pico en que el captador estuvo aparentemente recibiendo el valor pico de la irradiancia [19].

Por ejemplo, si la irradiación diaria de un lugar específico fue de  $4650 \text{ W}/\text{m}^2$ , al dividir entre la irradiancia pico ( $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ ), obtenemos un resultado de 4.65 horas-pico para ese lugar en ese día en particular, es decir el equivalente a una irradiancia solar de  $1000 \text{ W}/\text{m}^2$  recibida de manera continua durante 4.65 horas (4 horas y 39 minuto [19]).

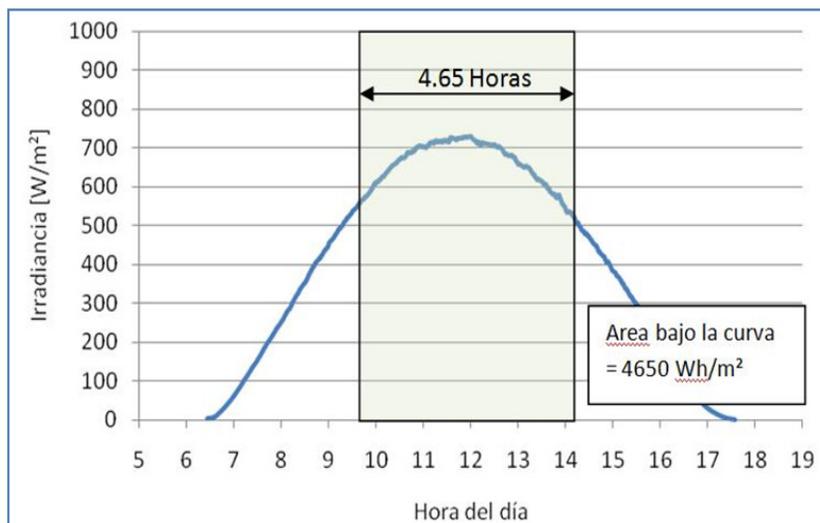


Figura 3.3: Horas - Pico de para un lugar determinado



## Capítulo 4

# Resultados del Recurso de Energía Solar en el Distrito Federal

En esta sección se describirá el mecanismo que se siguió, cómo se preparó la información de los datos solicitados y las condiciones que se tomaron en cuenta para la realización de este estudio.

Para desarrollar el análisis sobre el recurso de energía solar en el Distrito Federal es necesario primero conocer el comportamiento de la radiación solar global para un día promedio de cada mes del año en cada estación de medición estudiada.

Con la obtención de esta información, se podrá realizar el estudio sobre las Curvas de Frecuencia Acumulada (C.F.A), las cuales son necesarias para la interpretación del recurso Energético Solar.

### 4.1. Radiación Solar Global de un Día Promedio

Los datos proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional corresponden a las estaciones de Tacubaya, Tezontle, Aeropuerto, Ecoguardas, Pimentel y la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas 1. El periodo de medición en la mayoría de las estaciones esta comprendido desde de 1999 - 2012 , en algunas otras de 2000 - 2005 y 2008 - 2012, más adelante se especificarán los periodos correspondientes por estación. Para lograr obtener las gráficas que a continuación se mostrarán, las cuales refieren el comportamiento de la radiación solar para un día promedio de cada mes, fue necesario primero, adecuar el horario con el que fueron reportados los datos ori-

ginales ya que las estaciones registran con el tiempo medido desde el Meridiano de Greenwich. Los datos de radiación solar global son registrados cada 10 min y son medidos en  $Watts/m^2$  por medio de piranómetros. Para un mes de 31 días se tienen 4464 datos registrados, para 30 días 4320 datos, para 28 días 4032 datos y para un año bisiesto con un mes de 29 días se tienen 4176 datos. Fue necesario desarrollar un programa que permitiera insertar espacios donde había saltos en el tiempo y en días que no contenían registro alguno de radiación solar; en estos casos la base de datos se complementó haciendo un promedio general de todos los años comprendidos por cada dato registrado, de esta manera se pudieron completar toda la base de datos en todos los meses por cada año.

La gráfica que a continuación se muestra, representa el comportamiento de la radiación solar desde que sale el sol hasta que se oculta. Hay meses del año en los cuales en ciertas épocas hay más intensidad de calor y se llegan a superar los  $1000 \frac{Watts}{m^2}$ . Todas las gráficas por mes, año y por estación se encuentran en el anexo.

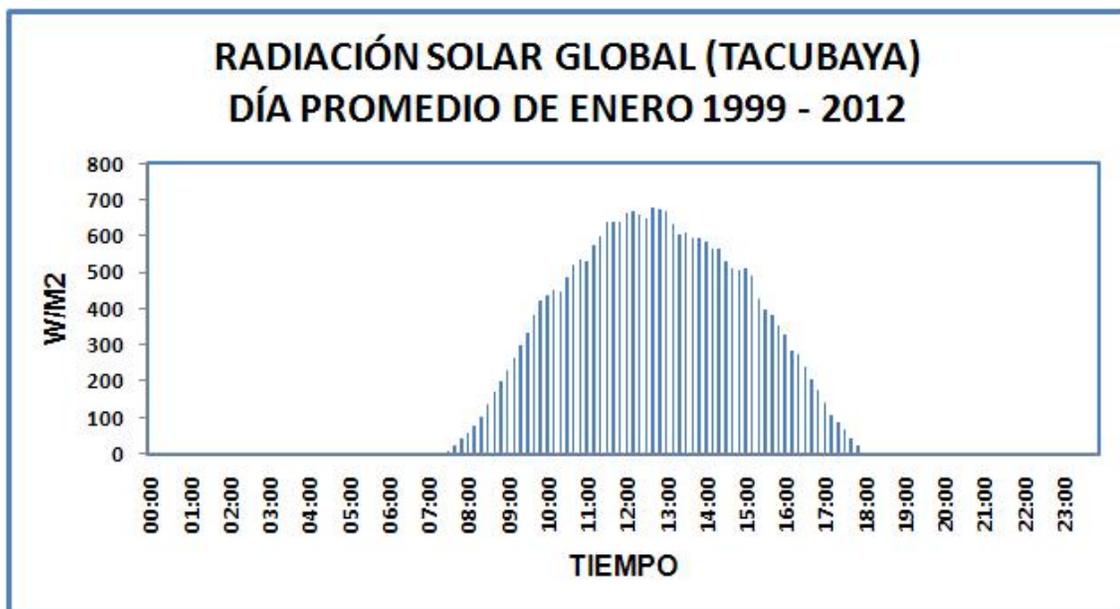


Figura 4.1: Comportamiento representativo de la Radiación Solar para un día promedio de enero en Tacubaya

## 4.2. Irradiación Solar Global de Estaciones del Servicio Meteorológico Nacional y Ciudad Universitaria

Con los datos proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional y una vez obtenidas las gráficas de radiación solar para un día promedio del mes, se realizó un cambio en la unidad de medida de los datos que inicialmente fueron reportados en  $\frac{Watts}{m^2}$  a  $\frac{MJ}{m^2}$ , esto debido a que para reportar la información de la irradiación solar, es necesario que se haga esta conversión cuyos resultados se ocuparán para los cálculos posteriores.

Trabajando con los datos cambiados a la nueva unidad de medida, sumamos la energía registrada cada 10 minutos en todo el mes, esto nos da como resultado la energía total que recibe un mes en particular por cada año en  $\frac{MJ}{m^2}$ , al dividir toda esta energía entre el número de días respectivamente obtenemos así la energía promedio para un día cualquiera de ese mes en  $\frac{MJ}{m^2 \text{ día}}$ . Análogamente este mismo procedimiento se repitió para todas las estaciones de medición antes mencionadas.

De esta manera nos damos cuenta que, por ejemplo, para la estación Tacubaya se obtienen 12 resultados, uno por cada mes por cada año. Las gráficas desarrolladas muestran el promedio de todos los Eneiros por cada año, todos los Febreros, etc. En el anexo se muestran todas las gráficas de irradiación solar de todos los meses en todos los años y todas las estaciones trabajadas.

Una vez obtenidos los valores de energía por cada mes y por cada año, el siguiente paso fue promediar todos los meses respectivamente, obteniendo así resultados pesados de energía representativos de cada mes. Al graficar los 12 meses podemos definir como ha sido el comportamiento de la Climatología Solar del sitio de observación. Entendiéndose por esto, como el promedio de la irradiación solar global que llega a la superficie en cada zona de medición. Este procedimiento se realizó sucesivamente para cada estación meteorológica. Ver gráficas

### 4.3. Irradiación Solar Global de Tacubaya Promedio Mensual 1999 - 2012

ENE	FEB	MZO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGS	SEP	OCT	NOV	DIC
15.47	18.28	21.33	22.03	20.96	18.56	17.76	17.43	16.20	16.33	16.02	14.92

Tabla 4.1: Energía Solar Disponible Promedio Diaria Mensual Sobre un Plano Horizontal [ $MJ/m^2/día$ ] Tacubaya

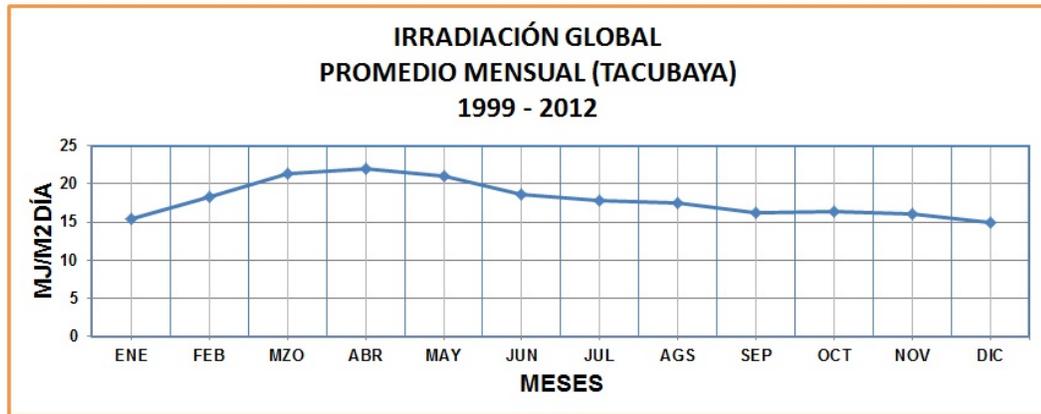


Figura 4.2: Irradiación Solar Global en Tacubaya (1999 - 2012)

### 4.4. Irradiación Solar Global de ENCB1 Promedio Mensual 1999 - 2012

ENE	FEB	MZO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGS	SEP	OCT	NOV	DIC
15.53	17.71	21.06	21.64	21.09	19.24	17.93	17.68	16.15	16.66	15.85	14.62

Tabla 4.2: Energía Solar Disponible Promedio Diaria Mensual Sobre un Plano Horizontal [ $MJ/m^2/dia$ ] ENCB1

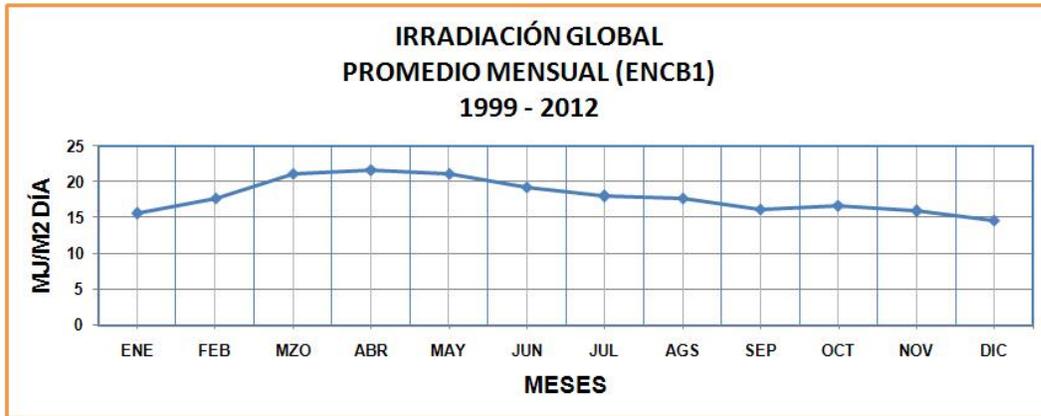


Figura 4.3: Irradiación Solar Global en ENCB1 (1999 - 2012)

## 4.5. Irradiación Solar Global de la Estación Tezontle Promedio Mensual 1999 - 2012

ENE	FEB	MZO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGS	SEP	OCT	NOV	DIC
14.37	17.48	20.43	21.30	20.84	18.82	18.05	17.99	16.21	16.68	16.01	14.54

Tabla 4.3: Energía Solar Disponible Promedio Diaria Mensual Sobre un Plano Horizontal [ $MJ/m^2/día$ ] Tezontle

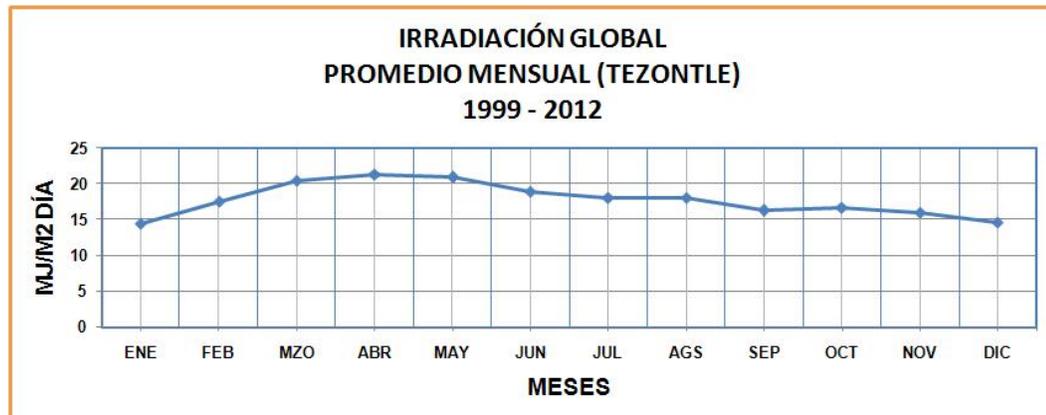


Figura 4.4: Irradiación Solar Global en Tezontle (1999 - 2012)

## 4.6. Irradiación Solar Global de la Estación Ecoguardas (1999 - 2012)

ENE	FEB	MZO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGS	SEP	OCT	NOV	DIC
15.69	17.81	21.44	21.56	20.78	18.71	17.03	17.71	15.55	17.15	15.98	16.25

Tabla 4.4: Energía Solar Disponible Promedio Diaria Mensual Sobre un Plano Horizontal [ $MJ/m^2 dia$ ] Ecoguardas



Figura 4.5: Irradiación Solar Global en Ecoguardas (2008 - 2012)

### 4.7. Irradiación Solar Global de la Estación Aeropuerto Promedio Mensual 1999 - 2003

ENE	FEB	MZO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGS	SEP	OCT	NOV	DIC
18.21	17.94	21.39	21.96	21.13	17.85	19.49	18.73	17.52	17.39	16.04	14.67

Tabla 4.5: Energía Solar Disponible Promedio Diaria Mensual Sobre un Plano Horizontal [ $MJ/m^2 dia$ ] Aeropuerto

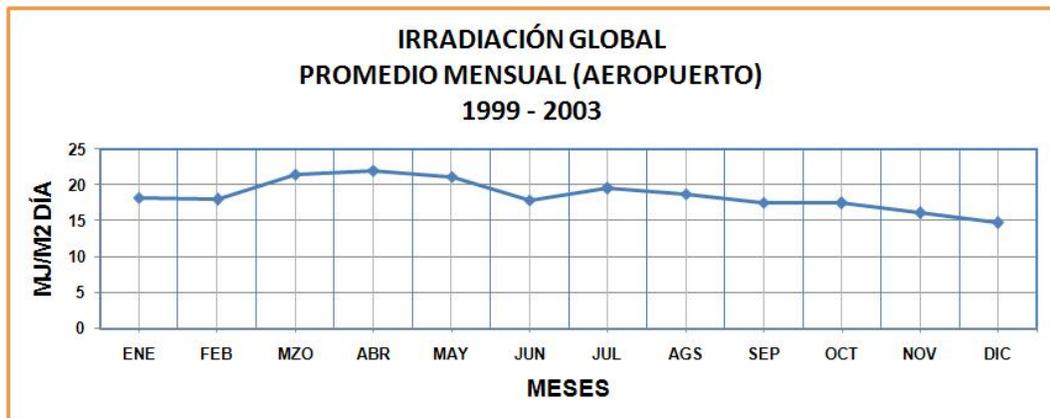


Figura 4.6: Irradiación Solar Global en Aeropuerto (1993 - 2003)

## 4.8. Irradiación Solar Global de la Estación Pimentel 2000 - 2005

ENE	FEB	MZO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGS	SEP	OCT	NOV	DIC
15.61	18.35	20.80	21.33	20.58	17.55	18.59	17.97	16.05	16.70	16.31	14.56

Tabla 4.6: Energía Solar Disponible Promedio Diaria Mensual Sobre un Plano Horizontal [ $MJ/m^2 dia$ ] Pimentel

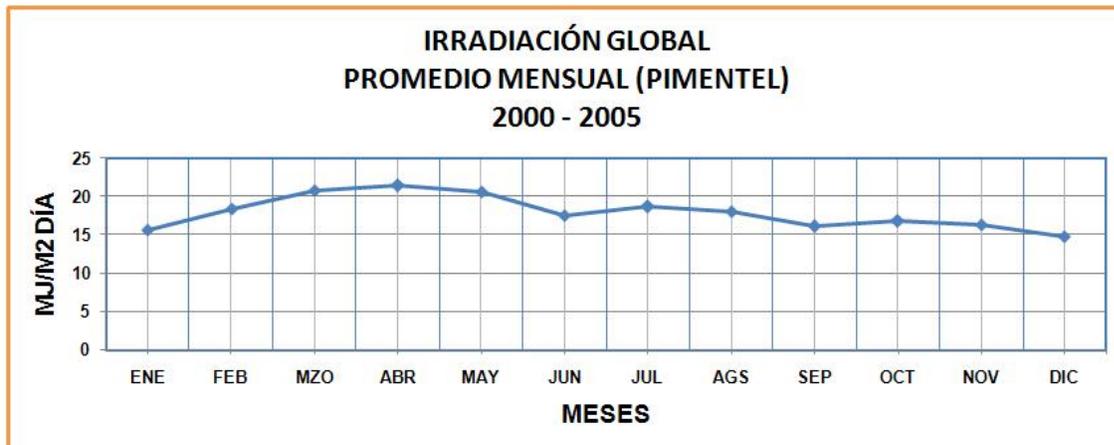


Figura 4.7: Irradiación Solar Global en Pimentel (2000 - 2005)

## 4.9. Irradiación Solar Global en el Instituto de Geofísica de la UNAM 1993 - 2005

ENE	FEB	MZO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGS	SEP	OCT	NOV	DIC
17.5	19.2	22.2	22.5	21.8	19.0	19.7	19.1	16.6	16.3	16.1	15.5

Tabla 4.7: Energía Solar Disponible Promedio Diaria Mensual Sobre un Plano Horizontal [ $MJ/m^2 dia$ ] IG.UNAM [[www.geofisica.unam.mx/ors/ors-red.html](http://www.geofisica.unam.mx/ors/ors-red.html)] [19].

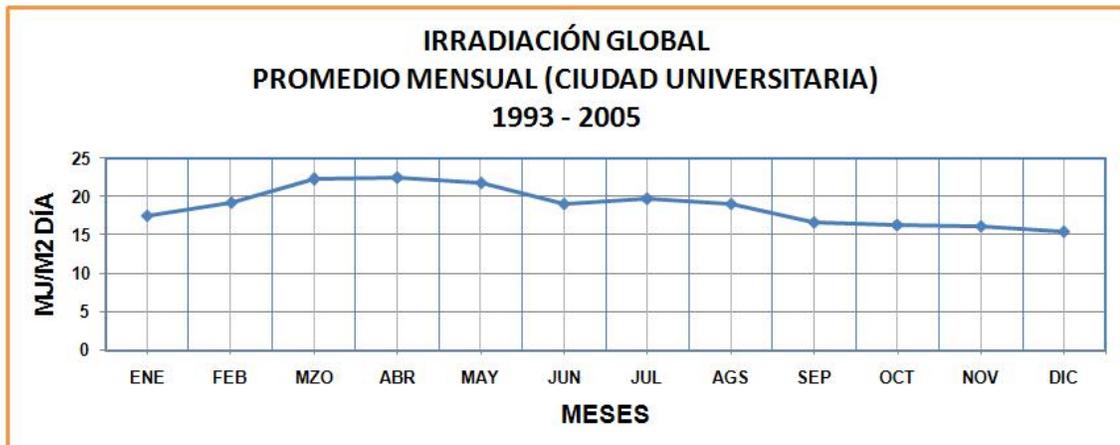


Figura 4.8: Irradiación Solar Global en el Instituto de Geofísica de la UNAM (1993-2005) [19]

El promedio de energía anual como un resultado pesado es el dato que se utilizará para hacer los cálculos de ahorro de Energía y disminución de Gases de Efecto Invernadero por cada zona puesto que la metodología así lo define.

La energía anual calculada resultante del análisis de datos antes mencionado para cada estación se muestra en la tabla siguiente.

TACUBAYA 1999 - 2012	ENCB 1 1999 -2012	TEZONTLE 1999 - 2012	ECOGUARDAS 2008 - 2012
17.94 $\frac{MJ}{m^2}$	17.98 $\frac{MJ}{m^2}$	17.73 $\frac{MJ}{m^2}$	17.97 $\frac{MJ}{m^2}$
GEOFÍSICA 1993 - 2005	PIMENTEL 2000 - 2005	AEROPUERTO 1999 - 2003	
18.79 $\frac{MJ}{m^2}$	17.87 $\frac{MJ}{m^2}$	18.21 $\frac{MJ}{m^2}$	

Tabla 4.8: Promedio Anual de Energía Solar

## 4.10. Representación de las Curvas de Frecuencia Acumulada

Sin embargo como nos indica la teoría, toda la radiación solar que llega a la superficie no representa el total de energía que se puede ocupar ya que los umbrales de energía o niveles críticos no son constantes durante todo el día y por eso es importante saber como es el comportamiento de la energía solar a través del tiempo de un día promedio de cada mes y para esto es necesario realizar Curvas de Frecuencia Acumulada (C.F.A).

Las C.F.A obtenidas de la irradiancia solar global sobre un plano horizontal fueron realizadas para los 12 meses del año para todas las estaciones meteorológicas, estableciendo los niveles críticos de irradiancia solar global cada  $25\frac{W}{m^2}$  hasta un máximo de  $1400\frac{W}{m^2}$  alcanzados en un día totalmente claro de nubes. Trabajando mes con mes sobre una matriz que contiene los valores de irradiancia solar durante todos los días de cada mes y todos los años trabajados; al obtener el número de veces que la irradiancia solar cada 10 min se ubicó dentro de los intervalos de los niveles críticos, se procedió a obtener la frecuencia para un mes promedio, diviendo el número de veces que la irradiancia se mantuvo dentro de los niveles críticos entre el total de años trabajados, posteriormente se obtuvo la frecuencia para un día promedio dividiendo la frecuencia por mes promedio entre el número de días de cada mes respectivamente. Una vez tenida esta subdivisión, se obtuvieron las frecuencias acumuladas sumando consecutivamente la frecuencia por día promedio, al multiplicar por diez cada intervalo de nivel crítico se obtienen los minutos que en realidad

se mantuvo cada cierto nivel de irradiancia por cada día y finalmente al dividir entre 60 min, conocemos el total de horas que permanece la irradiancia solar global por intervalos de niveles críticos para un día promedio de cada mes. Una gráfica se muestra a continuación, todas las gráficas de C.F.A por cada mes y de cada estación meteorológica se encuentran en el anexo.

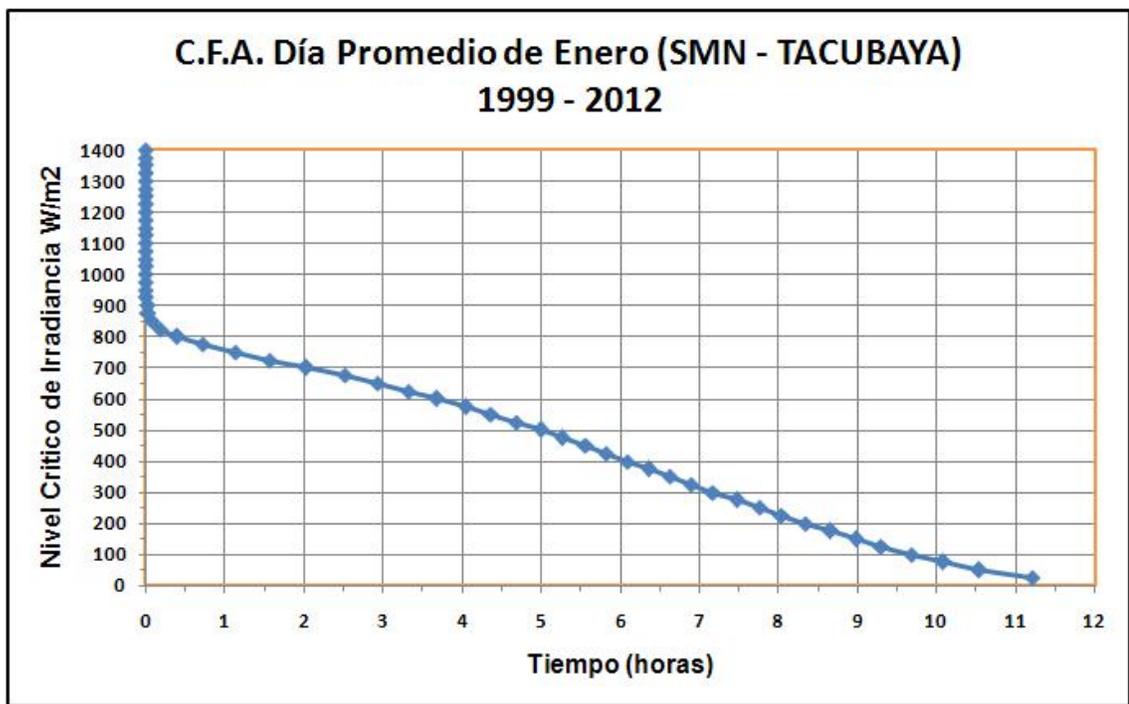


Figura 4.9: Curva de Frecuencia Acumulada representativa del mes de Enero realizada con datos de la estación meteorológica de Tacubaya

## 4.11. Energía Solar Global Disponible

De acuerdo a la teoría explicada en el capítulo 2, sabemos que al calcular el área debajo de las C.F.A se puede observar mediante integración numérica los resultados de la Energía Solar Global disponible sobre un plano horizontal, para cada nivel crítico de irradiancia. En la gráfica siguiente, se puede observar la gráfica representativa para el mes de enero de la estación Tacubaya, todas las gráficas por cada mes y de cada estación meteorológica se muestran en el anexo.

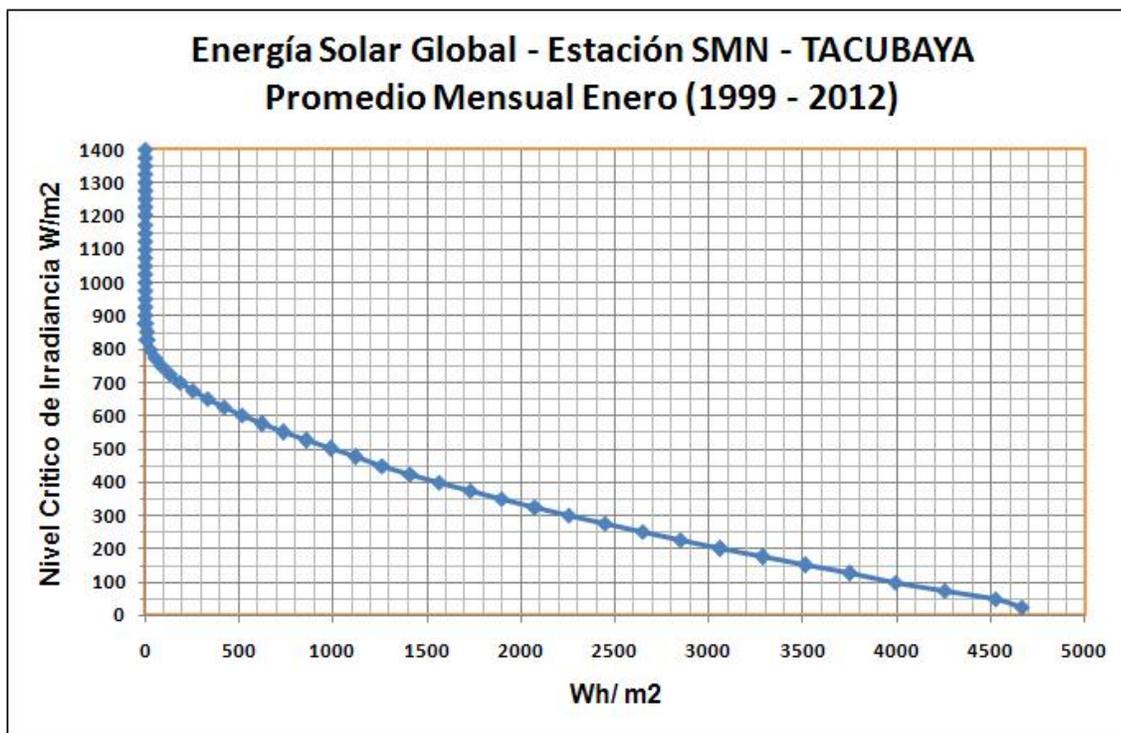


Figura 4.10: Energía Solar Global representativa del mes de Enero realizada con datos de la estación meteorológica de Tacubaya

## 4.12. Gráficas de Hora-Pico

Aprovechando los resultados que se han obtenido y enriqueciendo la información para la cual se desarrollo esta tesis es importante obtener y presentar como sería la aplicación del Recurso Solar en los Sistemas Fotovoltaicos, para esto es necesario realizar las gráficas de Hora Pico.

Para obtener el tiempo total del recurso de energía solar por unidad de área para un día promedio de cada mes, lo obtenemos al calcular el total de Energía Solar Global Disponible que es el área debajo de la curva de las C.F.A y dividiendola entre  $1000 \frac{W}{m^2}$  obtenemos por definición las Horas-Pico que un sistema fotovoltaico recibe durante un periodo de una hora. De esta manera sabemos cuanto tiempo se dispone del nivel maximo de energía recibida en un día promedio de cada mes. Las gráficas de Hora-Pico anuales para cada estación meteorológica se muestran a continuación.

### 4.12.1. Hora Pico Estación Tacubaya



Figura 4.11: Hora Pico Tacubaya

### 4.12.2. Hora Pico Estación ENCB1

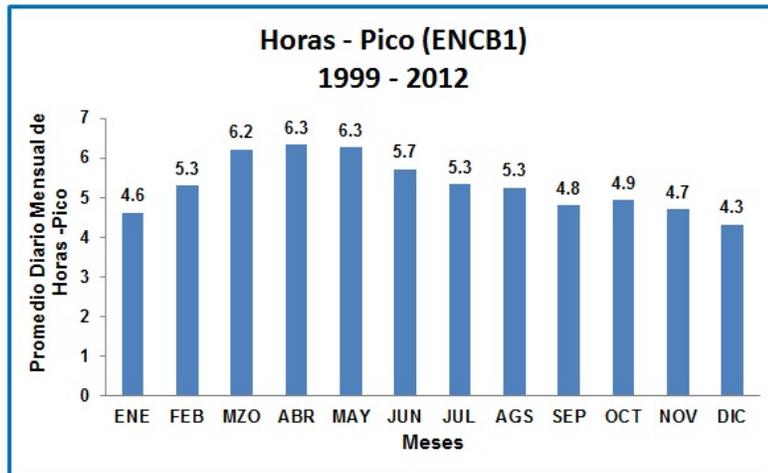


Figura 4.12: Hora Pico Tacubaya

### 4.12.3. Hora Pico Estación Tezontle



Figura 4.13: Hora Pico Tezontle

#### 4.12.4. Hora Pico Estación Ecoguardas

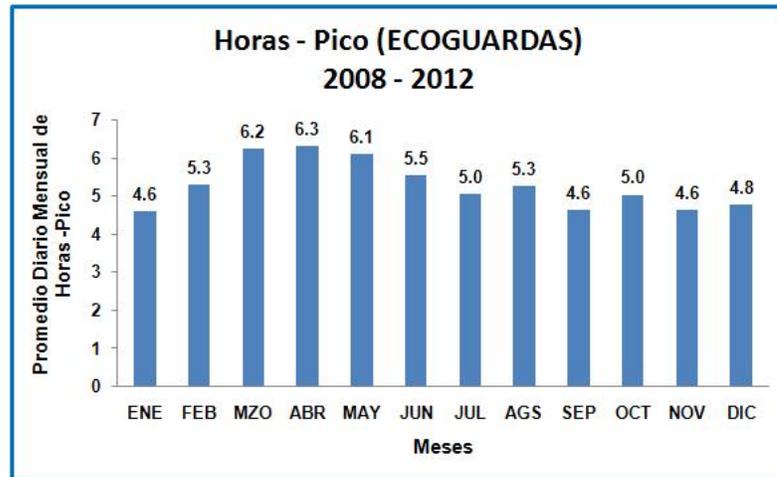


Figura 4.14: Hora Pico Ecoguardas

#### 4.12.5. Hora Pico Estación Aeropuerto

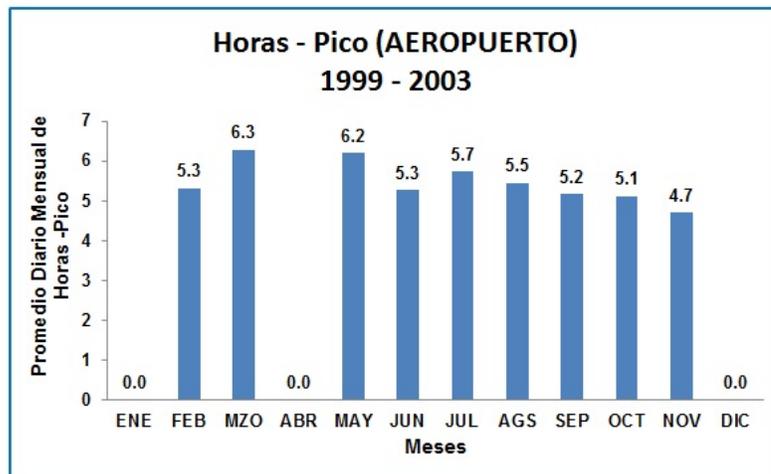


Figura 4.15: Hora Pico Ecoguardas

#### 4.12.6. Hora Pico Estación Pimentel

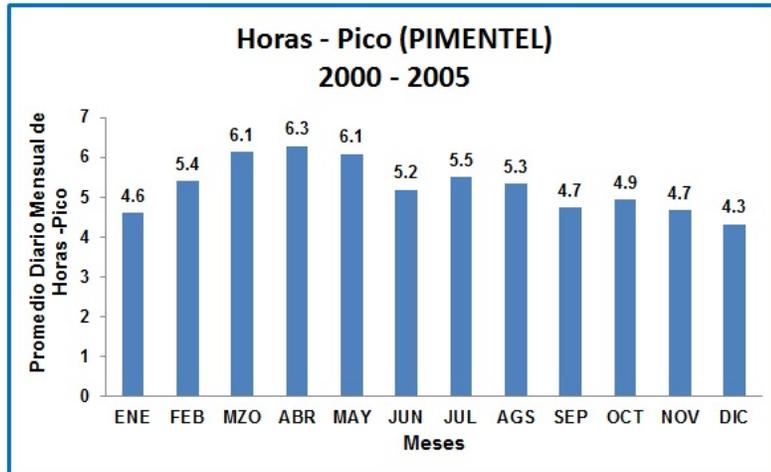


Figura 4.16: Hora Pico Pimentel

#### 4.12.7. Hora Pico Instituto de Geofísica de la UNAM

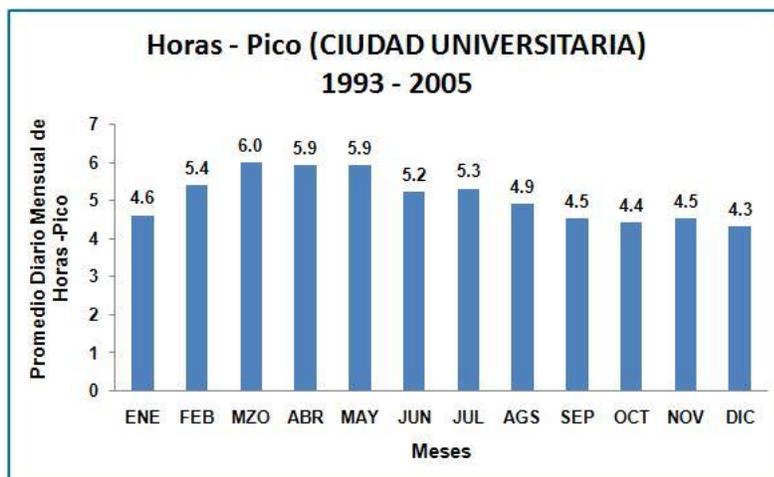


Figura 4.17: Hora Pico Instituto de Geofísica de la UNAM [19].

Las C.F.A resultantes nos muestran el número de horas que en promedio fueron divididos los niveles críticos de irradiancia, es decir, indican las horas de irradiancia directa que fueron registradas sobre un plano horizontal de cada estación.

Al comparar las C.F.A por cada mes correspondiente entre las estaciones estudiadas, notamos que entre ellas no muestran variaciones importantes que se puedan distinguir considerando los que tienen el mismo número de años registrados.

Entre otras aplicaciones las C.F.A son usadas para registrar la producción de la cantidad de energía solar que llega en un cierto campo. Haciendo un mayor número de intervalos críticos es posible obtener C.F.A con un mayor detalle. Para tecnologías de uso de instrumentos fotovoltaicos las gráficas de hora pico en el mes de abril son las que alcanzan un índice mayor de irradiancia, se observan sobre los  $800 \frac{W}{m^2}$  por poco más de 3 horas, lo que implica que un concentrador que utilice este mínimo de energía, trabajaría sobre estos niveles o sobre una irradiancia más baja durante un número más grande de horas. Por consiguiente, la concentración de la energía solar para ser obtenida al máximo necesita considerar el factor del área del equipo.

Para los cálculos que posteriormente se desarrollarán, ocuparemos el nivel promedio de energía alcanzado para un día promedio igual a  $18 \frac{MJ}{m^2}$ , durante el tiempo que opere el calentador solar de agua a través de su fabricación deberá almacenar energía para satisfacer las necesidades en las horas del día que no recibe energía solar. En los meses donde la irradiancia es menor el equipo podrá trabajar por al menos dos horas menos que un mes con irradiancia mayor aproximadamente.

## Capítulo 5

# Análisis de Viabilidad Energética Por Uso de la Energía Solar Como Medida de Mitigación del Cambio Climático

### 5.1. Sustitución de Calentadores Solares de Agua en la Ciudad de México

#### Consumo Promedio de Agua Caliente en Viviendas del Distrito Federal

De acuerdo a datos estadísticos de la Procuraduría Social del Distrito Federal y del Instituto Mexicano del Petróleo, el sector residencial en promedio esta conformado por familias de 4.5 personas, que usan agua caliente para realizar sus actividades diarias en regaderas, lavamanos, fregaderos y lavadoras. EL uso de agua caliente mezclada en porcentaje es de 0.65 y 0.35 de agua fría; lo correspondiente en la mezcla de agua en los otros usos ya mencionados es de 0.5 de agua caliente y 0.5 de agua fría. [15]:

Conforme a los datos estadísticos se considera un gasto de agua por actividad de  $9\text{ lts}/\text{min}$  y un gasto de agua caliente de un calentador de almacenamiento solar por  $2,5\text{ lts}/\text{min}$  (datos de fabricantes-CONAE) [16], [4], [12], [13].

Por lo tanto:

$$\text{Consumo de agua caliente (regaderas)} = \left(45 \frac{\text{min}}{\text{día}}\right) * \left(9 \frac{\text{lbs}}{\text{min}}\right) * (0.65) = 263.25 \frac{\text{lbs}}{\text{día}}$$

$$\text{Otros usos (lavado de manos, trastes y ropa)} = \left(30 \frac{\text{min}}{\text{día}}\right) * \left(9 \frac{\text{lbs}}{\text{min}}\right) * (0.50) = 135 \frac{\text{lbs}}{\text{día}}$$

Considerando lo anterior y sumando tenemos que:

$$\text{El consumo de agua caliente por día que tiene la vivienda} = 398.25 \frac{\text{lbs}}{\text{día}}$$

## Calor Contenido ( $Q_u$ )

El consumo de agua caliente de una vivienda promedio en el sector residencial del Distrito Federal es de 398.25 lbs/día, esto es suponiendo una familia de 4.5 personas por vivienda. Por lo tanto para saber cual es el calor contenido en un volumen de agua caliente de 398.25 lbs/día donde su temperatura fue llevada de los 15.5 °C a 50°C se tiene que [16], [4], [12], [13]:

$$Q_u = m * \rho * C_p * (t_2 - t_1) \tag{5.1}$$

Donde:

$m$  = volumen de agua = 398.25 lt/día

$C_p$  = calor específico del agua = 4.2 kJ/kg °C

$\rho$  = densidad del agua = 1 kg/lt

Sustituyendo tenemos:

$$Q_u = \left(398.25 \frac{\text{lbs}_{\text{agua}}}{\text{día}}\right) * \left(1 \frac{\text{kg}_{\text{agua}}}{\text{lbs}_{\text{agua}}}\right) * \left(4.2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{agua}} \text{ } ^\circ\text{C}}\right) * (45 - 15.5)^\circ\text{C} = 49,343.18 \frac{\text{kJ}}{\text{día}}$$

## Calor Requerido Para Calentar Agua ( $Q_{s_{GLP}}$ ) Utilizando Gas Licuado de Petróleo (GLP)

Considerando lo anterior se puede saber cuál es el calor que se debe de consumir en forma de combustible ( $Q_{s_{GLP}}$ ) para calentar un volumen de agua de 398.25 lbs/día, partiendo de agua a una temperatura ( $t_1$ ) de 15.5°C y calentarla a una temperatura ( $t_2$ ) de 45°C de la siguiente manera [16], [4], [12], [13]:

$$Q_{sGLP} = \frac{Q_u}{\eta_{boiler}} \quad (5.2)$$

Donde:

$Q_u$  = Calor contenido en un volumen de agua que varía su temperatura =  $49,343.18 \frac{kJ}{día}$

$\eta_{boiler}$  = Eficiencia promedio de los calentadores de agua a base de GN o GLP = 0.74 %

Sustituyendo tenemos:

$$Q_{sGLP} = \frac{49,343.18 \frac{kJ}{día}}{0.74} = 66,679.97 \frac{kJ}{día}$$

Dado lo anterior se puede saber cuál es el consumo en masa durante un día, un mes y un año de GLP, así también se puede saber el costo económico que cubre el uso de agua caliente en la zona residencial del Distrito Federal de la siguiente manera.

$$CQ_{sGLP} = Q_{sGLP} * \frac{1}{PC_{GLP}} \quad (5.3)$$

Considerando los siguientes términos:

- $1lt_{GLP} = 0.54kg_{GLP}$
- $1 \text{ kcal} = 4.186 \text{ kJ}$
- El poder calorífico del GLP ( $PC_{GLP}$ ) =  $6,384.8844 \frac{kcal}{lt_{GLP}} = 26,727.1261 \frac{kJ}{lt_{GLP}}$
- El precio del Gas LP en el D.F (agosto 2014) es de  $\frac{\$13.46}{kg_{GLP}}$  y  $\frac{\$7.27}{lt_{GLP}}$
- El calor que debe suministrarse en forma de combustible  $Q_{sGLP} = 66,679.97 \frac{kJ}{día}$

Sustituimos para saber cuál es el consumo de GLP y gasto económico por una vivienda promedio de la zona residencial del D.F, obteniendo lo siguiente:

$$CQ_{sGLP}(lt) = 66,679.97 \frac{kJ}{día} * \frac{lt}{26,727.1261 kJ} = 2.49 \frac{lt}{día} = 75.8 \frac{lt}{mes} = 910.11 \frac{lt}{año}$$

Convirtiendo los litros a kilogramos, tenemos que el consumo es:

$$CQ_{sGLP}(kg) = 1.3 \frac{kg}{día} = 40.9 \frac{kg}{mes} = 491.46 \frac{kg}{año}$$

Por lo tanto el costo económico es de:

$$CQ_{sGLP}(pesos) = 18.13 \frac{pesos}{día} = 551.25 \frac{pesos}{mes} = 6,615.10 \frac{pesos}{año}$$

## Calor Requerido Para Calentar Agua ( $Q_{sGN}$ ) Utilizando Gas Natural (GN)

Análogamente se puede saber cuál es el consumo o suministro de Gas Natural (GN) y gasto económico necesario para obtener agua caliente en un periodo anual en la zona residencial del D.F conforme a la siguiente manera [16], [4], [12], [13].

$$CQ_{sGN} = Q_{sGN} * \frac{1}{PC_{GN}} \quad (5.4)$$

Considerando los siguientes terminos:

- El poder calorífico del GN ( $PC_{GN}$ ) =  $37902 \frac{kJ}{m^3_{GN}}$
- El precio del Gas Natural en el D.F (agosto 2014) es de  $\frac{\$3,003}{m^3_{GN}}$
- Sabemos que el calor que se debe suministrar en forma de combustibel  $Q_{sGN} = 66,679.97 \frac{kJ}{día}$

Sustituyendo tenemos:

$$CQ_{sGN}(m^3) = 66,679.97 \frac{kJ}{día} * \frac{1m^3}{37,902kJ} = 1.75 \frac{m^3}{día} = 53.48 \frac{m^3}{mes} = 641.78 \frac{m^3}{año}$$

Por lo tanto el costo económico es de:

$$CQ_{s_{GN}}(\text{pesos}) = 5.28 \frac{\text{pesos}}{\text{día}} = 160.60 \frac{\text{pesos}}{\text{mes}} = 1,927.27 \frac{\text{pesos}}{\text{año}}$$

## Calculo Por metro Cuadrado De los Colectores Solares Requeridos Para Calentamiento de Agua

Para saber cuantos metros cuadrados de un colector solar plano (S) son requeridos para calentar un volumen de agua de 398.25 lts/día, partiendo de agua a una temperatura ( $t_1$ ) de  $15,5^\circ C$  y calentarla a una temperatura ( $t_2$ ) de  $45^\circ C$  se determina de la siguiente manera [16], [4], [12], [13]:

$$S = \frac{Q_u}{\eta_{colector} I_{prom}} \quad (5.5)$$

Considerando los siguientes terminos:

- Sabemos que el agua requerida para el D.F debe de contener  $Q_u = 49,343.18 \frac{kJ}{día}$
- La eficiencia del colector solar plano ( $\eta_{colector}$ ) = 60 %
- La radiación solar promedio en las zonas de medición durante un año es de  $18.00 \frac{Mj}{m^2 día} = 18,000 \frac{kJ}{m^2 día}$

Sustituyendo tenemos:

$$S = \frac{49,343.18 \frac{kJ}{día}}{18,000 \frac{kJ}{m^2 día} (0.60)} = 4.5m^2$$

Por lo tanto tenemos que se necesitan  $4.5m^2$  de colector solar plano para calentar el volumen de agua promedio que se ocupa de agua caliente en la zona residencial del D.F.

## 5.2. Ahorros Anuales Por Sustituir Un Calentador de GLP Por Un Calentador Solar

Para estimar cuales serían los ahorros anuales ( $AS_{GLP}$ ) por sustituir un calentador de GLP por un calentador solar se puede resolver mediante la siguiente fórmula [16], [4], [12], [13]:

$$AS_{GLP} = \frac{S * \eta_{colector} * I_{promedio}}{\eta_{sistema}} * \frac{365día}{año} \quad (5.6)$$

Considerando los siguientes términos:

- $4.5 m^2$  son los metros cuadrados de colector solar plano (S) requeridos para calentar un volumen de agua de  $398.25 \frac{lbs}{día}$  cuyo calor contenido ( $Q_u$ ) es de  $49,343.18 \frac{kJ}{día}$
- $1 kcal = 4.186 kJ$
- La radiación solar promedio por zona de medición es de  $18,210 \frac{kJ}{m^2día}$
- La eficiencia del colector solar plano ( $\eta_{colector}$ ) = 60 %
- La eficiencia promedio de los calentadores de agua a base de GN o GLP = 0.74 %
- El poder calorífico del GLP ( $PC_{GLP}$ ) =  $6,384.8844 \frac{kcal}{lt_{GLP}} = 26,727.1261 \frac{kJ}{lt_{GLP}}$
- El precio del Gas LP en el D.F (agosto 2014) es de  $\frac{\$13.46}{kg_{GLP}}$  y  $\frac{\$7.27}{lt_{GLP}}$
- El consumo de combustible usando un calentador de agua a base de GLP es de  $Q_{sGLP} = 66,679.97 \frac{kJ}{día}$

Sustituyendo, tenemos, que los ahorros anuales son:

$$AS_{GLP}(kJ) = \frac{4.5m^2 * 0.60 * 18,210 \frac{kJ}{m^2día}}{0.74} X \frac{365día}{año} = 24,057,516.64 \frac{kJ}{año}$$

$$AS_{GLP}(lt) = 24,057,516.64 \frac{kJ}{año} X \frac{1kcal}{4.186 kJ} X \frac{1lt}{6,384.8844 kcal} = 900.116 \frac{lt}{año}$$

$$AS_{GLP}(\text{pesos}) = 900.116 \frac{lt}{\text{año}} \times \frac{\$7.27}{lt} = 6,543.844 \frac{\text{pesos}}{\text{año}}$$

Se tiene un ahorro del 98 % por usar un calentador solar en vez de un calentador por medio de Gas LP.

### 5.3. Ahorros Anuales Por Sustituir Un Calentador de GN Por Un Calentador Solar

Análogamente para estimar cuales serian los ahorros anuales ( $AS_{GN}$ ) por sustituir un calentador de GN por un calentador solar, se resuelve mediante la siguiente fórmula [16], [4], [12], [13]:

$$AS_{GN} = \frac{S * \eta_{colector} * I_{promedio}}{\eta_{sistema}} * \frac{365 \text{ día}}{\text{año}} \quad (5.7)$$

Considerando los siguientes términos para Gas Natural:

- El poder calorífico del GN ( $PC_{GN}$ ) =  $37,902 \frac{kJ}{m^3_{GN}}$
- El precio del Gas Natural en el D.F (agosto 2014) es de  $\frac{\$3.003}{m^3_{GN}}$
- El consumo de combustible usando un calentador de agua a base de GN es de  $Q_{sGN} = 66,679.97 \frac{kJ}{\text{día}}$

Sustituyendo, tenemos, que los ahorros anuales son:

$$AS_{GN}(kJ) = \frac{4.5m^2 * 0.60 * 18,210 \frac{kJ}{m^2 \text{ día}}}{0.74} \times \frac{365 \text{ día}}{\text{año}} = 24,057,516.64 \frac{kJ}{\text{año}}$$

$$AS_{GN}(m^3) = 24,057,516.64 \frac{kJ}{\text{año}} \times \frac{1 m^3}{37,902 kJ} = 634.72 \frac{m^3}{\text{año}}$$

$$AS_{GN}(\text{pesos}) = 634.72 \frac{m^3}{\text{año}} \times \frac{\$3.003}{m^3} = 1,906.09 \frac{\text{pesos}}{\text{año}}$$

Por lo tanto se tiene un ahorro del 98 % por usar un calentador solar en vez de un calentador por medio de Gas Natural (GN).

#### 5.4. Recuperación De La Inversión Por Sustituir Un Calentador de GLP y GN Por Un Calentador Solar

El Retorno de la Inversión para un Sistema Residencial se puede verificar tomando el Gasto Mensual del Gas (GLP, GN) al 83.56 % dividiendolo entre el Costo de la Inversión del Calentador Solar. Por lo tanto, considerando un equipo solar de un valor promedio de \$13,000 se tiene que el retorno de la inversión se da en [16], [4], [12], [13]:

$$R.Inv_{GLP} = \frac{13,000 \text{ pesos}}{(0.98) (551.25 \frac{\text{pesos}}{\text{mes}})} = 23.8 \text{ meses} = 2.0 \text{ años}$$

$$R.Inv_{GN} = \frac{13,000 \text{ pesos}}{(0.98) (160.60 \frac{\text{pesos}}{\text{mes}})} = 81.8 \text{ meses} = 6.8 \text{ años}$$

#### 5.5. Reducción de Emisiones De $CO_2$ Por Sustitución De Calentadores Solares

Para saber cuál es la reducción de emisiones de  $CO_2$  se puede calcular siguiendo el procedimiento del IPCC [16], [4], [12], [13]:

$$RE_{GLP} = AS_{GLP} * FE_{GLP} * (PC_{GLP}) \quad (5.8)$$

Considerando los siguientes terminos:

- El poder calorífico del GLP ( $PC_{GLP}$ ) =  $0.0000460548 \frac{TJ}{Kg_{GLP}}$
- Factor de Emisión del GLP ( $FE_{GLP}$ ) =  $62.4 \frac{TONCO_2}{TJ}$

- El ahorro de consumo de GLP ( $AS_{GLP}$ ) = Consumo Anual \* Porcentaje de Ahorro =  $491.46 \frac{kg}{año} * 98\% = 486.06 \frac{kg}{año}$

Sustituyendo tenemos que la reducción anual de emisiones de  $CO_2$  por sustitución de un calentador solar en una vivienda del D.F:

$$RE_{GLP} = \left( 486.06 \frac{kg}{año} * 62.4 \frac{TONCO_2}{TJ} * 0.0000460548 \frac{TJ}{Kg_{GLP}} \right) = 1.39 \frac{TONCO_2}{año}$$

Análogamente resolviendo para las viviendas que usan Gas Natural, se tiene que:

- El poder calorífico del GN ( $PC_{GN}$ ) =  $0.000037902 \frac{TJ}{m^3_{GN}}$
- Factor de Emisión del GN ( $FE_{GLP}$ ) =  $56.1 \frac{TONCO_2}{TJ}$
- El ahorro de consumo de GLP ( $AS_{GN}$ ) = Consumo Anual \* Porcentaje de Ahorro =  $641.78 \frac{m^3}{año} * 98\% = 634.72 \frac{m^3}{año}$

Sustituyendo tenemos que la reducción en emisiones de  $CO_2$  por sustituir GN por un calentador solar es de:

$$RE_{GN} = \left( 634.72 \frac{m^3}{año} * 56.1 \frac{TONCO_2}{TJ} * 0.000037902 \frac{TJ}{m^3_{GN}} \right) = 1.34 \frac{TONCO_2}{año}$$

Por lo tanto si multiplicamos la cantidad de viviendas de la zona residencial del D.F tal que se instalen calentadores solares de agua, por ejemplo, un programa social que conste la instalación en 1 millón de viviendas, se tendría la reducción de emisiones de aproximadamente 1.4 Millones de Toneladas de  $CO_2$  en un año a la atmósfera.



## Capítulo 6

# Ahorro de Energía y Factibilidad Financiera por Uso de la Energía Solar en la Ciudad de México

### 6.1. Tipo de Vivienda en la Ciudad de México

Se analizará el potencial de ahorro de energía debido a la implantación de calentadores solares híbridos en la Ciudad México, para esto es necesario conocer el tipo de viviendas de esta zona. La característica de la vivienda que más interesa para este trabajo es el sector residencial, por lo que es importante considerar los niveles de ingreso.

Esta restricción, se debe a las características que los sistemas híbridos (Calentador Solar y Calentado GLP) poseen. Los calentadores solares requieren de un termotanque que almacene el agua que se calienta a través del colector. Los termotanques tienen una capacidad que varía entre 150 y 200 lts. Las viviendas tienen estructuras que pueden o no, sostener un peso de varios termotanques. Sin embargo, para justificar la implantación de los calentadores solares en el sector residencial se considerará el nivel de ingreso, ya que de esta forma se puede determinar la posibilidad de adquirir un sistema híbrido para calentamiento de agua, así como las características de la vivienda indispensables para la implantación de esta tecnología, como son disponibilidad de agua, instalación de boiler, material de techos, pisos, etc. [15], [3]

## 6.2. Metodologías de Análisis Financiero

Las metodologías de análisis financiero que se presentarán permiten evaluar la factibilidad, desde el punto de vista del ciudadano, de la adquisición de un calentador híbrido para calentamiento de agua.

Estas metodologías son una herramienta que permiten comparar los costos de inversión y mantenimiento, tomando en cuenta el valor del dinero en el tiempo, con el beneficio que en este caso otorga el ahorro del GLP. Los métodos que se presentan a continuación, son equivalentes, es decir, si el proyecto de inversión es analizado correctamente con cada uno de los métodos, la decisión recomendada será la misma.

Es importante señalar que las metodologías propuestas son evaluadas a precios corrientes o constantes. En el primer caso (precios corrientes) deberá tomarse en cuenta una inflación estimada anual, y la tasa de interés deberá considerar la inflación. En el segundo caso (precios constantes), no se toma en cuenta la inflación. La tasa de interés se considerará como una tasa de recuperación mínima atractiva (TREMA) que es ligeramente mayor que el costo de capital.

## 6.3. Método del Valor Anual Equivalente

Con este método, todos los ingresos y gastos que ocurren durante un periodo, son convertidos a una anualidad equivalente. Cuando dicha anualidad es positiva, entonces el proyecto es recomendable. De acuerdo con Coss la expresión matemática de este método es la siguiente [23], [8]:

$$A = -p\left(\frac{A}{p}, i\%, n\right) + \left[ \sum_{t=1}^n \frac{S_t}{(1+i)^t} \right] \left(\frac{A}{p}, i\%, n\right) + F\left(\frac{A}{F}, i\%, n\right) \quad (6.1)$$

Se define:

$$\left(\frac{A}{p}, i\%, n\right) = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} = \left(\frac{A}{F}, i\%, n\right) + i\% \quad (6.2)$$

Si se supone que los flujos netos de efectivo son iguales para todos los años, la ecuación (1) se transforma en:

$$A = S - p\left[(p - F)\left(\frac{A}{p}, i\%, n\right) + F(i\%)\right] \quad (6.3)$$

Donde:

$A$  = Anualidad Equivalente

$p$  = Inversión Inicial  
 $S_t$  = Flujo de Efectivo Neto al Año ( $t$ )  
 $F$  = Valor de Rescate  
 $n$  = Número de Años de Vida del Proyecto  
 $i$  = Tasa de Recuperación Mínima Atractiva (TREMA)

Cuando este valor es positivo en la evaluación de un proyecto individual, se considera que el proyecto es rentable. Por otro lado, cuando las alternativas a considerar tienen diferentes vidas útiles, como es el caso, (ya que el calentador solar tiene una vida útil de 20 años y el de GLP de 10 años), la metodología adquiere particular interés. Por lo tanto una opción es evaluar el proyecto a 20 años, considerando que en el año cero se realiza la inversión de un calentador solar y uno de gas y a los diez años de uso, se realiza una segunda inversión para adquirir un calentador de gas. En este caso, la inversión del segundo calentador de gas, realizada a los diez años de la primera inversión, deberá pasarse a valor presente (evaluado en el año cero). La otra opción es evaluar el proyecto a diez años y considerar un valor de rescate del calentador solar. Este valor de rescate se recomienda calcular como el valor presente (evaluado al final) de los ingresos netos que el calentador solar tiene en los periodos subsiguientes al horizonte de planeación seleccionado [23], [8].

## 6.4. Método del Valor Presente

Este es un método ampliamente utilizados en la evaluación de proyectos de inversión. Su aplicación consiste en determinar la equivalencia en el tiempo cero de los flujos de efectivo futuros que genera un proyecto y comparar esta equivalencia con el desembolso inicial. Cuando esta equivalencia es mayor que el desembolso inicial se recomienda que el proyecto sea aceptado. La fórmula matemática utilizada para este valor es la siguiente [23], [8]:

$$VPN = S_0 + \sum_{t=1}^n \frac{S_t}{(1+i)^t} \quad (6.4)$$

Donde:

$VPN$  = Valor Presente Neto  
 $S_0$  = Inversión Inicial  
 $S_t$  = Flujo de Efectivo Neto del Periodo ( $t$ )  
 $n$  = Número de Periodos de Vida del Proyecto  
 $i$  = Tasa de Recuperación Mínima Atractiva (TREMA)

En la evaluación de un proyecto individual, cuando el VPN es mayor que cero, se considera que debe realizarse la inversión. Al igual que en el caso del valor anual equivalente, deben considerarse la diferencia en las vidas útiles del calentador solar y la del GLP [23], [8].

### 6.5. Tasa Interna de Rendimiento

La tasa interna de rendimiento se define como la tasa de interés que reduce a cero el valor presente, el valor futuro o el valor anual equivalente (VAE) de una serie de flujos de efectivo, en otras palabras es la tasa  $i^*$  que satisface alguna de las siguientes ecuaciones [23], [8]:

$$\sum_{t=0}^n \frac{S_t}{(1 + i^*)^t} = 0 \tag{6.5}$$

$$\sum_{t=0}^n S_t(1 + i^*)^{n-t} = 0 \tag{6.6}$$

$$\sum_{t=0}^n S_t \left( \frac{P}{F}, i^*, t \right) \left( \frac{A}{P}, i^*, n \right) = 0 \tag{6.7}$$

En términos económicos, la Tasa Interna de Rendimiento representa el porcentaje o la tasa de interés que se gana sobre el saldo no recuperado de la inversión. Normalmente puede considerarse que si la Tasa Interna de Rendimiento es mayor que la Tasa de Recuperación Mínima Atractiva (TREMA), el proyecto debe ser aceptado [23], [8].

### 6.6. Costo de Energía Ahorrada

El costo de energía ahorrada es una metodología de análisis financiero de tipo costo beneficio, ya que muestra la relación entre el costo adicional de una tecnología eficiente (calentador híbrido) y el ahorro de energía generado por dicha tecnología. Para su evaluación se utilizan los costos anuales de inversión, operación y mantenimiento (al igual que en el método del Valor Anual Equivalente) y los ahorros anuales de energía. La expresión matemática es como se muestra a continuación [23], [8]:

$$CEA = \left( \frac{A}{P}, i\%, n \right) \cdot \frac{S_{0TE} - S_{0TC}}{E_{TC} - E_{TE}} \tag{6.8}$$

Donde:

$CEA$  = Costo de Energía Ahorrada

$S_{0TE}$  = Inversión Inicial de la Tecnología Eficiente

$S_{0TC}$  = Inversión Inicial de la Tecnología Convencional

$E_{TC}$  = Consumo de Energía para el año ( $t$ ) de la Tecnología Convencional

$E_{TE}$  = Consumo de Energía en el año ( $t$ ) de la Tecnología Eficiente

$n$  = Vida de la Tecnología

También en este caso, es necesario hacer un ajuste de la vida de la tecnología. Este ajuste es de manera equivalente al presentado en el análisis del Valor Equivalente Anual. Por esta razón, el resultado del ( $CEA$ ) sólo se presenta cuando se hace la evaluación a diez años (vida del calentador de gas) y a precios constantes.

El resultado del método de Consumo de Energía Ahorrada ( $CEA$ ) tiene unidades de  $[\frac{\text{pesos}}{\text{energía}}]$ . El resultado entonces, puede compararse con el precio de la fuente de energía. Si el ( $CEA$ ) del calentador híbrido resulta ser menor al precio unitario de GLP, entonces la recomendación es llevar a cabo la inversión. Si por el contrario el precio unitario del GLP es menor al  $CEA$  del calentador híbrido, significa que la inversión no tiene sentido en términos económicos.

## 6.7. Periodo de Recuperación de la Inversión

El Periodo de Recuperación de la Inversión se mide como la diferencia en el costo inicial de las tecnologías entre el costo anual de energía ahorrada. Las unidades para medir el ( $P.Rec$ ) están en unidades temporales (años) e indica el número de años en los cuales será recuperada la inversión inicial. Su expresión matemática es la siguiente [23], [8]:

$$P.Rec = \frac{S_{0TE} - S_{0TC}}{CE_{TC} - CE_{TE}} \quad (6.9)$$

Donde:

$P.Rec$  = Periodo de Recuperación de la Inversión

$S_{0TE}$  = Inversión Inicial de la Tecnología Eficiente

$S_{0TC}$  = Inversión Inicial de la Tecnología Convencional

$CE_{TC}$  = Consumo de Energía para el año ( $t$ ) de la Tecnología Convencional, en unidades monetarias

$CE_{TE}$  = Consumo de Energía en el año ( $t$ ) de la Tecnología Eficiente, en unidades

monetarias

### 6.7.1. Consideraciones Antes de la Evaluación

- Se está considerando un calentador de agua para uso doméstico de tipo híbrido que consta de un calentador solar (colector y termotanque) y un calentador de gas.
- Que el precio de un calentador solar en base a estudios es de \$10,000.00 y el costo de un calentador de GLP con una capacidad de 40 lts es de \$ 1599.00
- La inversión total es de \$13,000.00 considerando los gastos de instalación
- El costo de mantenimiento anual promedio del calentador a precios actuales es de \$150.00
- El tiempo de vida de un calentador solar promedio será de 20 años y el calentador de gas de 10 años de acuerdo a las estadísticas de los fabricantes.
- Se supondrán 4.5 personas en promedio por vivienda del Distrito Federal con un consumo diario de 398.25 lts/día.
- La eficiencia del calentador solar es del 60 % de acuerdo a las estadísticas de los fabricantes con un factor de uso (en su máxima capacidad) anual del 65 % (considerando los 4 meses del año donde se presenta la temporada de lluvias).
- Se considera una tasa de inflación del 4.07 %, una Tasa Interna de Rendimiento atractivo de 5.61 % para precios corrientes y de 1.4 % para precios constantes, al mes de agosto de 2014.
- El precio de GLP al mes de agosto 2014 es de  $\frac{\$13.46}{kg}$ . Para el análisis a precios constantes, estimando que el incremento anual en el precio del GLP será igual a la inflación (4.07 %). Para el caso de precios corrientes, el incremento anual se estima en 17.5 % (Secretaría de Energía).

## 6.8. Análisis y Resultados

Adicionalmente se considera para la evaluación de flujo económico a precios corrientes (ver corridas financieras en el apéndice) la compra de un nuevo calentador

después de transcurridos 10 años de uso del boiler, esto debido a que el tiempo de vida de un boiler es de 10 años aproximadamente, el precio del boiler tomado es el considerado a tiempo futuro de acuerdo a la inflación considerada. Evaluando este trabajo a 20 años se considerará un factor de recuperación del calentador de GLP igual a la mitad de su valor original al final del año 20. Evaluando a valor presente la inversión y utilizando las ecuaciones (5.3),(5.4) y (5.5) tenemos que los resultados son los siguientes:

## Evaluación a precios constantes

Tabla 6.1: Resultados de la Evaluación Financiera

<b>Factor de uso</b>	<b>VAE (pesos)</b>	<b>VPN (pesos)</b>	<b>TIR (%)</b>
65 %	4285.21	74301.69	38.67

En la evaluación a precios constantes se muestran los resultados evaluados a 20 años (tabla G.1 anexa del apéndice) y se obtuvo que los resultados de la VAE y VPN son mayores que cero lo cual de acuerdo a la teoría nos indica que el proyecto es rentable, de igual manera la Tasa Interna de Rendimiento obtenida es mayor que la Tasa de Recuperación Mínima Atractiva por lo tanto el proyecto es aceptado.

## Evaluación a precios corrientes

Tabla 6.2: Resultados de la Evaluación Financiera

<b>Factor de uso</b>	<b>VAE (pesos)</b>	<b>VPN (pesos)</b>	<b>TIR (%)</b>
65 %	13704.89	162294.42	132.66

Análogamente para la evaluación a precios corrientes, los resultados mostrados son para una duración del proyecto a 20 años (tabla H.1 anexa del apéndice) y de

igual manera se obtuvo que los resultados de la VAE y VPN son mayores que cero lo cual de acuerdo a la teoría nos indica que el proyecto es rentable y la Tasa Interna de Rendimiento obtenida resulta también mayor que la Tasa de Recuperación Mínima Atractiva por lo tanto la teoría indica que el proyecto debe ser aceptado.

## 6.9. Costo de Energía Ahorrada

Sustituyendo los datos para saber cual es el costo de la Energía Ahorrada

$S_{0TE}$  = Inversión Inicial de la Tecnología Eficiente = \$13,000.00

$S_{0TC}$  = Inversión Inicial de la Tecnología Convencional = \$1569

$E_{TC}$  = Consumo de Energía para el año ( $t$ ) de la Tecnología Convencional = 243381877.7 kJ al año

$E_{TE}$  = Consumo de Energía en el año ( $t$ ) de la Tecnología Eficiente = 240575166.4 kJ al año

$t$  = Periodo de evaluación del proyecto = 10 años

$$CEA = \frac{S_{0TE} - S_{0TC}}{E_{TC} - E_{TE}} = 0.00407274 \frac{\$}{kj} \quad (6.10)$$

El resultado obtenido debe compararse con el precio de la fuente de energía por lo tanto considerando la teoría sabemos que si el CEA del calentador híbrido resulta menor al precio del GLP implica que la inversión puede llevarse a cabo [23], [8].

## 6.10. Periodo de Recuperación de la Inversión

Sustituyendo los datos para saber cual es el Tiempo de Recuperación de la Inversión

$S_{0TE}$  = Inversión Inicial de la Tecnología Eficiente = \$13,000.00

$S_{0TC}$  = Inversión Inicial de la Tecnología Convencional = \$1,569.0

$CE_{TC}$  = Consumo de Energía para el año ( $t$ ) de la Tecnología Convencional, en unidades monetarias = \$66151.05  $\frac{\$}{año}$

$CE_{TE}$  = Consumo de Energía en el año ( $t$ ) de la Tecnología Eficiente, en unidades

monetarias = \$65438.44  $\frac{\$}{\text{año}}$

$$P.Rec = \frac{S_{0TE} - S_{0TC}}{CE_{TC} - CE_{TE}} = 1.01 \text{ años} \quad (6.11)$$

Por lo tanto tenemos que el tiempo de recuperación de la inversión, considerando solo los primeros 10 años del tiempo de vida del calentador de gas es de 1.01 años, lo cual es coherente comparando con el análisis presentado anteriormente donde se calculó que el tiempo de recuperación de la inversión a 20 años es de 2 años.



# Capítulo 7

## Conclusiones

En esta tesis se mostro la importancia de utilizar la energía solar como medida de mitigación al Cambio Climático. La implementación de Calentadores Solares de Agua (CSA) como uno de varios proyectos en los que se pueden aplicar los resultados obtenidos en esta tesis puede dar lugar a muchas ventajas ambientales, económicas y sociales para el Distrito Federal y en medida alguna para el país entero. El calentamiento solar de agua actualmente se ha estado convirtiendo en una tecnología evolutiva y confiable. El éxito de un CSA depende en mayor medida de la ubicación exacta por zona que mejor se adecue a las características del CSA. Como se dedujo en el capítulo 4 un CSA es una inversión a largo plazo que ahorrará dinero y energía durante varios años. Al igual que en otros países y otros sistemas de la Energía Renovable los CSA en la Ciudad de México podrían reducir los efectos ambientales y se estaría encaminando hacia una ciudad sustentable y moderna.

Económicamente los ciudadanos ahorrarían poco más del 80% del dinero que se tenía destinado para el pago del combustible por lo tanto las familias pueden invertir los ahorros en otras necesidades del hogar. La amortización en las tablas de flujo son comprendidas de 10 a 20 años y se aplica de la misma manera donde existen hogares de ingreso alto y en hogares de ingreso bajo la demanda térmica se apega al confort de las diferentes clases sociales. Las familias de varias regiones del país se beneficiarían por el continuo de agua caliente y la reducción de los problemas externos asociados a la contaminación atmosférica por la combustión de madera y almacenamiento de la misma.

Si un proyecto de Energía Renovable en específico por Energía Solar se aplicara se tendría un beneficio adicional en los hogares participantes, ya que evadirían un

gasto imprevisto resultante de los aumentos en el precio de los combustibles.

Desde una perspectiva social o de Gobierno, el uso de CSA reduciría la dependencia del GLP y GN. Para esto es importante impulsar medidas financieras que ayuden a la adquisición de CSA, puesto que el problema más grande es el gasto inicial que debe hacer el consumidor, por lo tanto estas medidas económicas deben ser parte de una política fiscal más importante y amplia en las políticas gubernamentales.

Como se mencionó la división a través de los años hecha por cada mes puede ser realizada cada semana o cada 10 días durante todo el año para una mejor apreciación de las C.F.A en el tiempo más preciso para la obtención de la Energía Solar.

El análisis financiero presentado en este trabajo muestra que la inversión en un calentador solar es rentable si se cumple que el calentador solar sea utilizado al menos el 65 % del año y el calentador de gas 35 %, con una Tasa Interna de Rendimiento Atractivo del 5.61 % para precios corrientes y de 1.4 % para precios constantes, una vida del calentador solar de 20 años y una vida del calentador de gas de 10 años y un precio del gas de  $13.46 \frac{\text{pesos}}{\text{Kg}}$ .

Las posibles consideraciones en la corrida financiera en donde no sería rentable la adopción de un calentador solar junto con uno de gas se debería al aumento en 0.5 % en la TREMA o la disminución del 5 % en el factor de uso del calentador, así como la fluctuación considerable en el precio del gas indicarían que ya no es rentable desde el punto de vista financiero.

El ahorro de energía anual por la implementación de calentadores solares en el sector residencial en la Ciudad de México es de los resultados obtenidos 2.35 PJ al año (en un millón de viviendas del DF) (correspondiente a 217.86  $MTonCO_2$  al año) lo cual representa el 8.07 % del consumo de energía total en el sector de alumbrado público de la República Mexicana. La mitigación de Gases de Efecto Invernadero comprende la reducción de  $1.38 \frac{TONCO_2}{\text{año}}$  por vivienda.

Como se ha venido explicando pudiesen cumplirse todas las consideraciones expuestas en esta tesis, sin embargo sigue latente el problema de la disponibilidad de capital por parte de las familias para invertir en un calentador solar. El salario mínimo vigente es de \$64.76 pesos diarios y un calentador necesita una inversión de 16 salarios mínimos mensuales. Por consiguiente, es difícil que una familia con ingresos entre 20 salarios mínimos pueda hacer una inversión tan alta. Por eso es

necesario crear políticas públicas que ayuden a obtener financiamientos al alcance de los ciudadanos que permitan desarrollar un programa masivo de implementación de calentadores solares.

Algunas maneras para que la Ciudad de México opte por el uso de la Energía limpia y trascender hacia una Ciudad moderna que contribuya a mitigar los efectos de Cambio Climático es incluir un programa de esta índole en el Mercado de Bonos de Carbono del Protocolo de Kyoto y de esta manera serían los fabricantes quienes absorban el gasto de los equipos, recuperando la inversión con la venta de estos bonos por reducción de Tonelas de  $CO_2$ . Como incentivo fiscal podría no cobrarse el I.V.A a los consumidores y se podrían promover incentivos para los usuarios que instalen calentadores solares en su vivienda.

Para desarrollar con mayor detalle y llevar una continuidad de esta investigación es necesario considerar pruebas experimentales de los colectores solares en las zonas de medición de la energía. Promover y realizar investigación con estudios estructurales por tipos de viviendas, edificios, deportivos, almacenes, hoteles, etc para considerar la aprobación y factibilidad de un programa social.

Es importante desarrollar estudios de análisis termodinámico de los calentadores solares de GLP que permitan reconocer el mejoramiento necesario para aumentar la eficiencia de estos equipos. Promover normas de eficiencia energética para calentadores de uso doméstico en la fabricación de estos equipos ya que podría haber mayor aislamiento para tener una menor pérdida de energía [23].

Sabemos que el Cambio Climático tiene su origen en diversos procesos económicos y sociales que determinan la evolución de las principales fuentes de emisiones tales como la quema de combustibles fósiles, el cambio de uso de suelo, la deforestación y los desechos sólidos; por medio de diversos canales de transmisión, productos significativos sobre el conjunto de las actividades económicas que se desarrollan en el Distrito Federal.

Utilizar la Energía Solar como un método de mitigación del Cambio Climático podría decirse que representaría una restricción adicional al crecimiento económico, por otro lado estudios realizados en la referencia [5] muestran que el Cambio Climático podría acarrear costos enormes que no se distribuirían de manera uniforme entre las delegaciones, sino que tendría peores impactos sobre las delegaciones con menor desarrollo y en particular sobre la población con menores recursos.

Basándonos en los análisis económico sobre el Cambio Climático, desde la óptica de la política pública y de la sociedad en general, es de suma importancia el lograr identificar opciones y alternativas para construir y desarrollar políticas públicas que vinculen estrategias de desarrollo sostenible y así proteger para las generaciones futuras los recursos naturales y ecosistemas más allá de su valor económico.

# Apéndice A

## Gráficas de la Estación Tacubaya

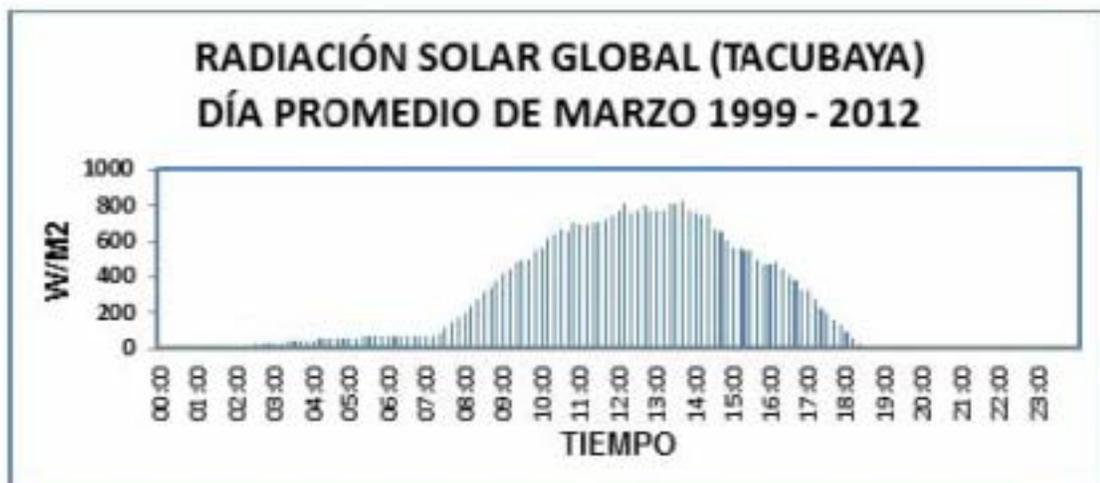
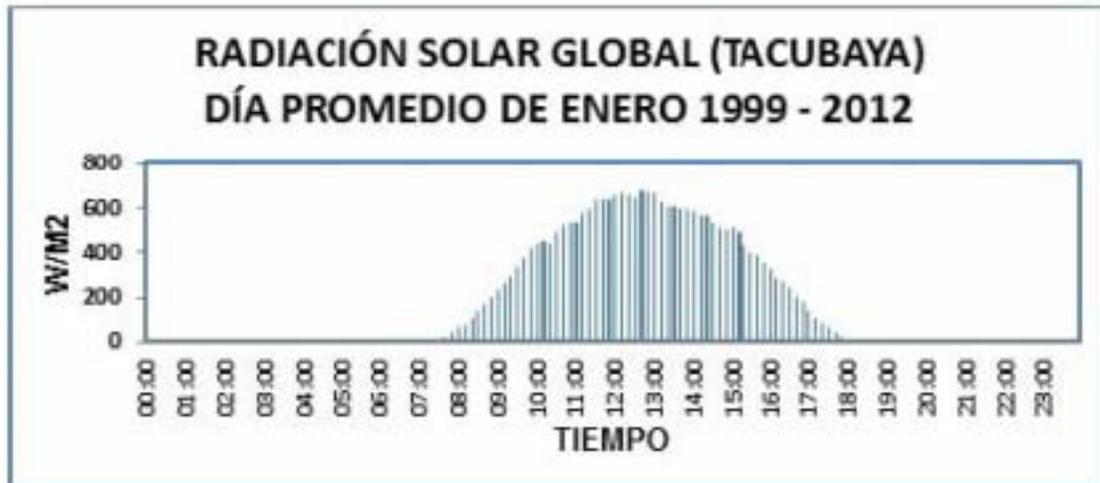


Figura A.1:

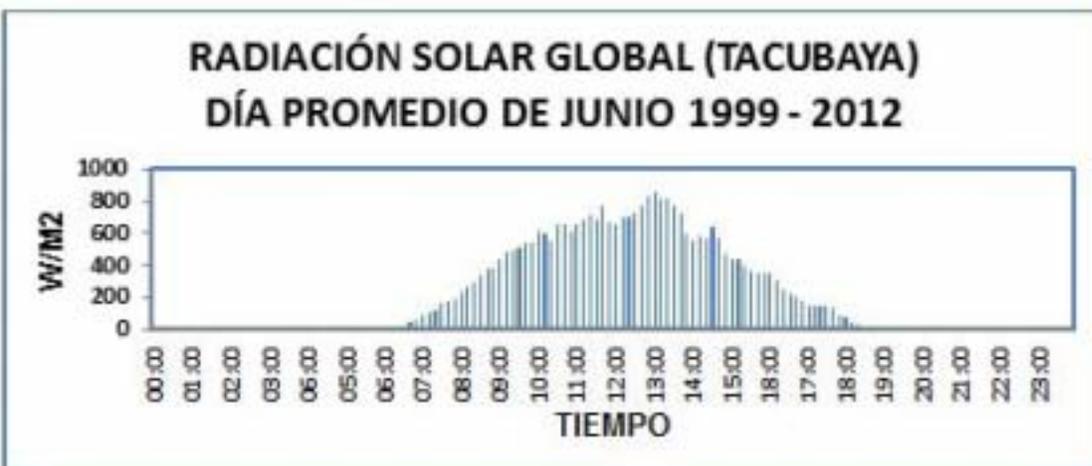
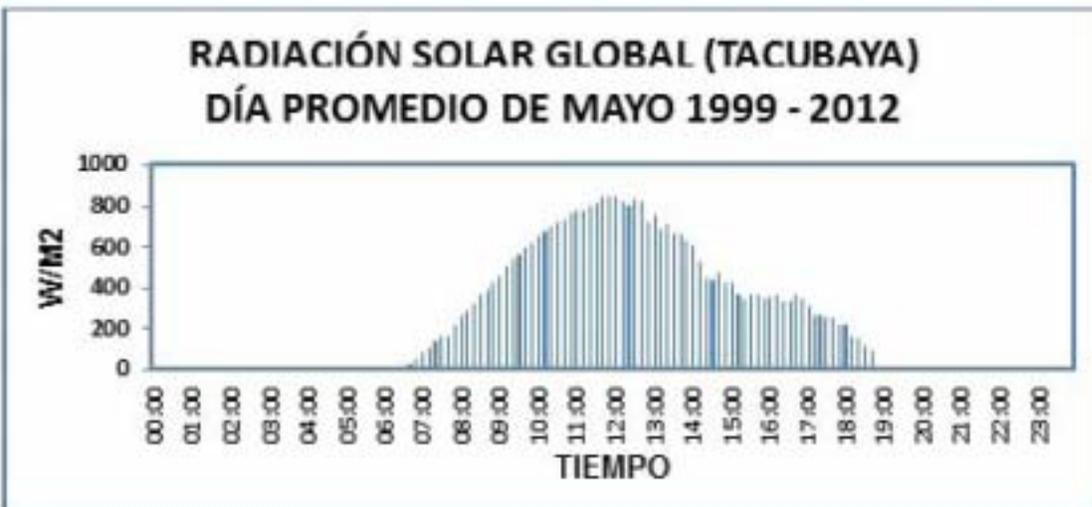
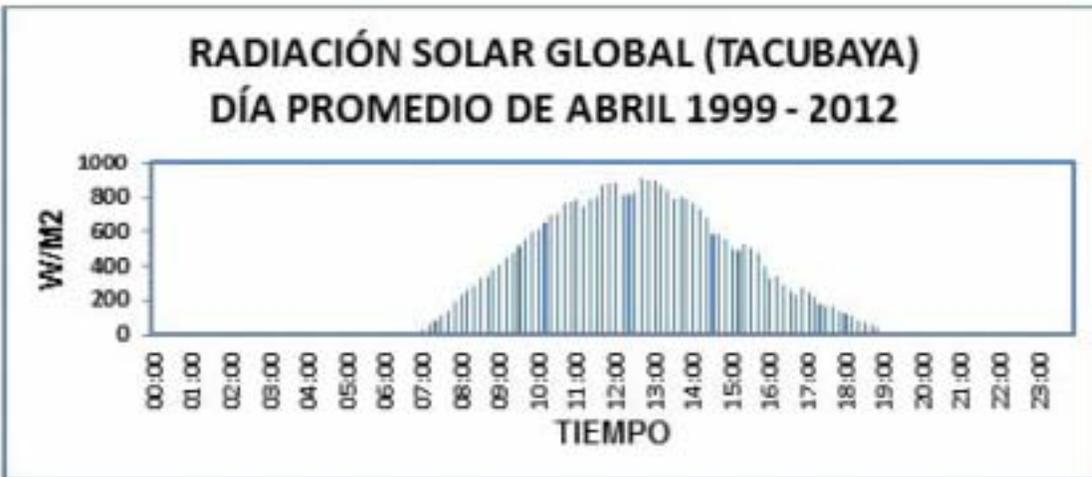


Figura A.2:

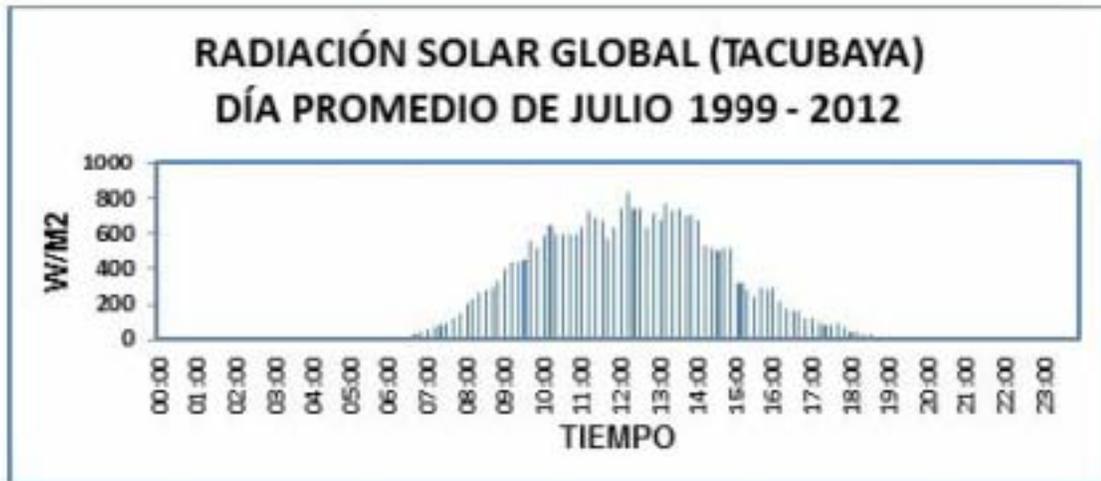


Figura A.3:

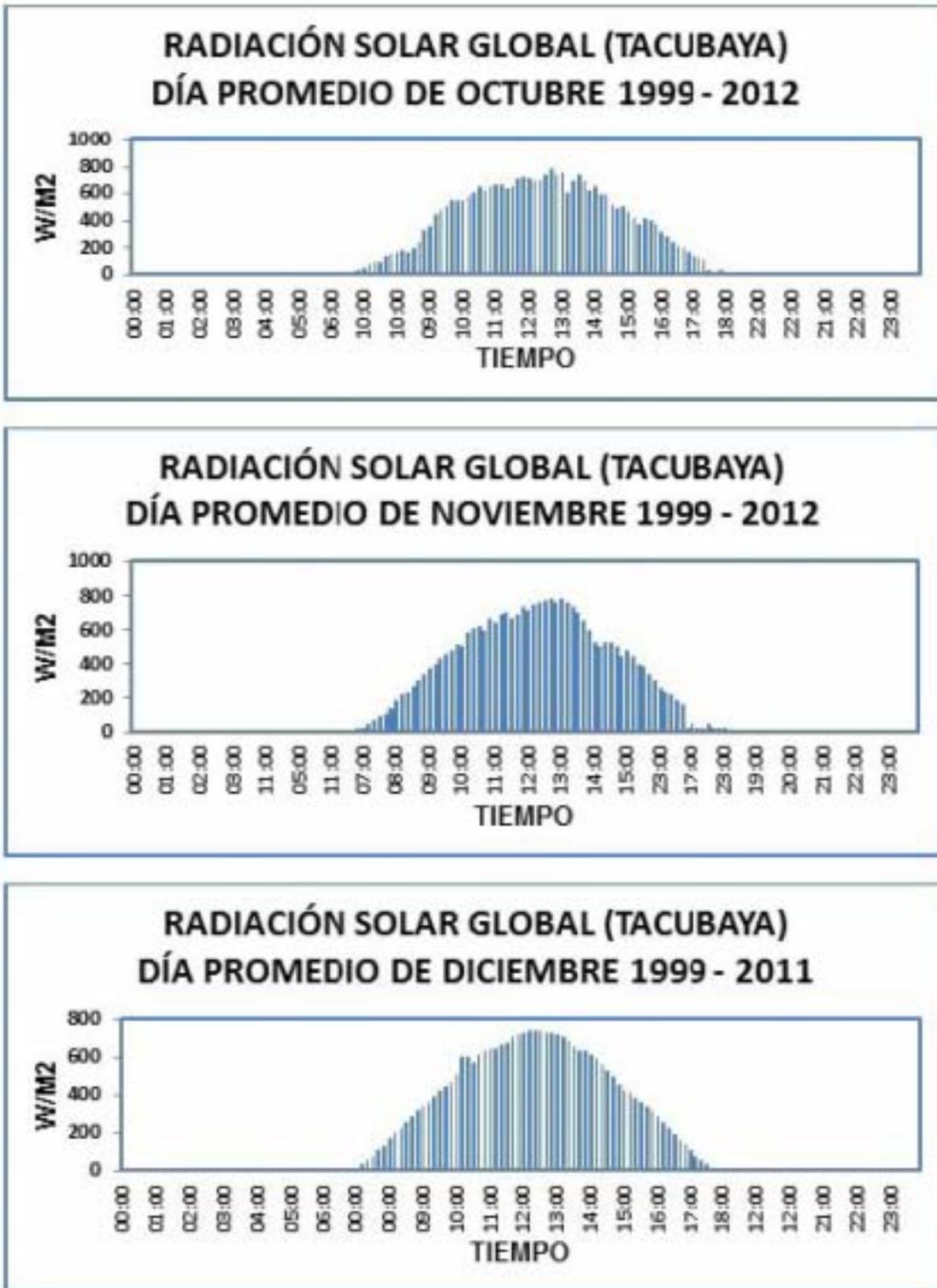


Figura A.4:

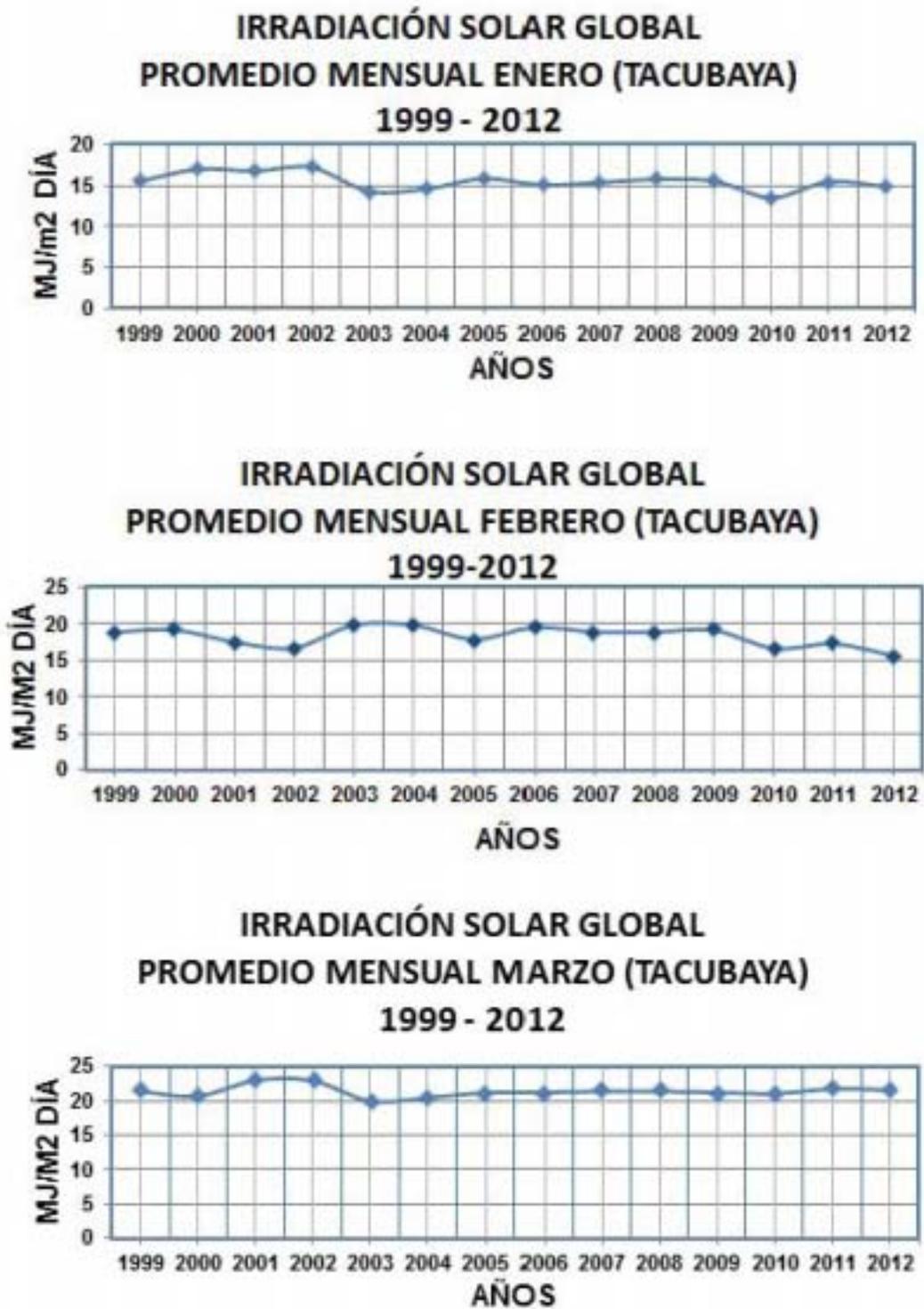


Figura A.5:



Figura A.6:

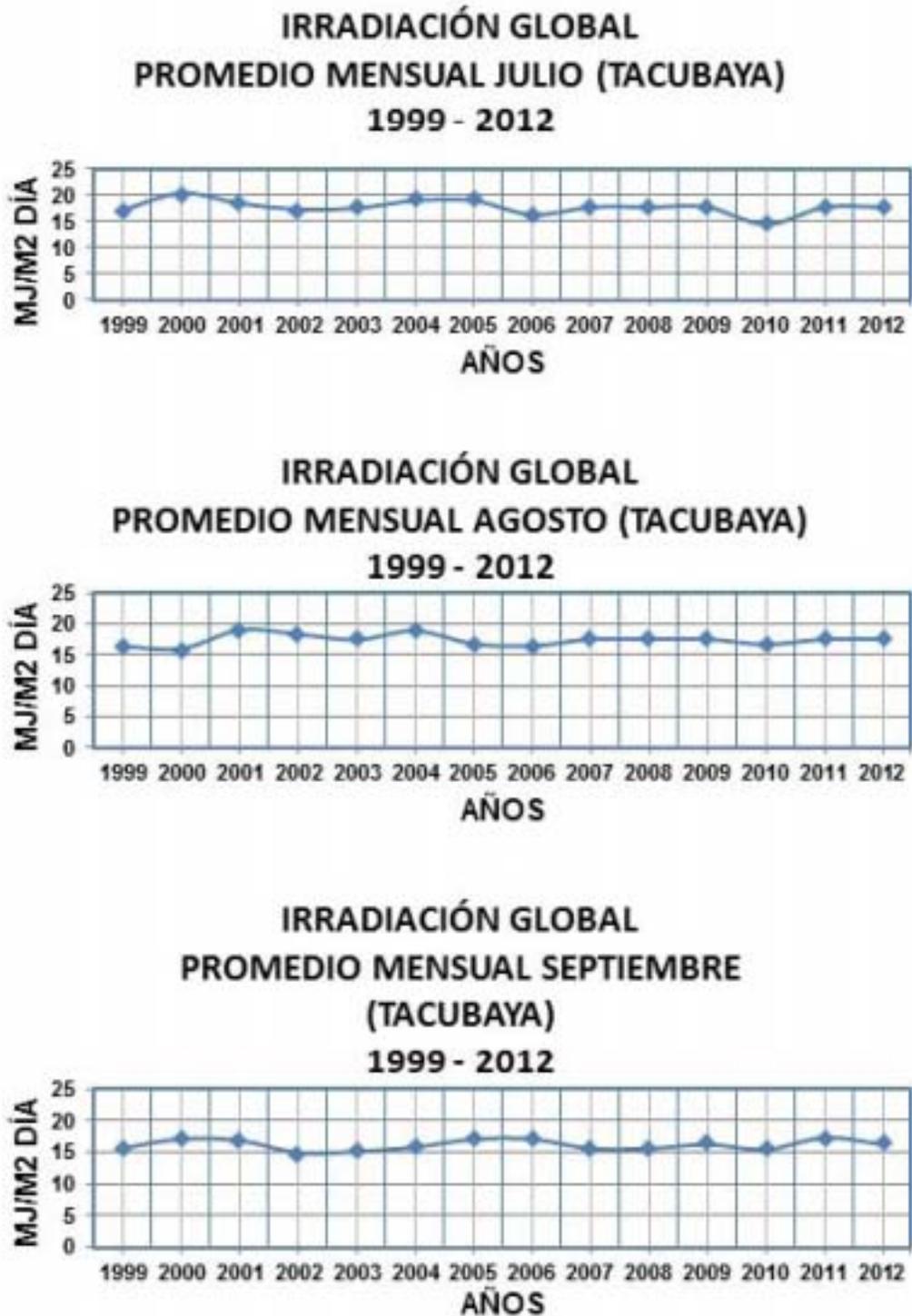
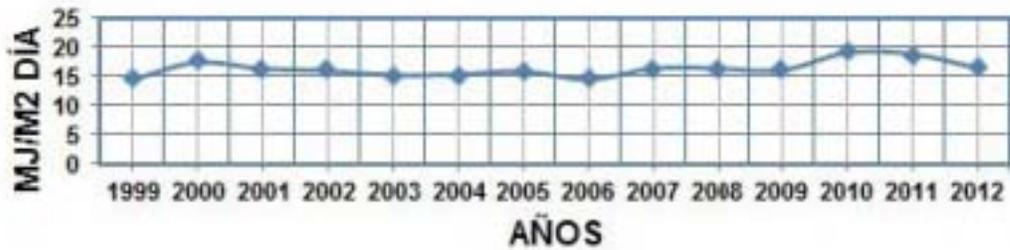
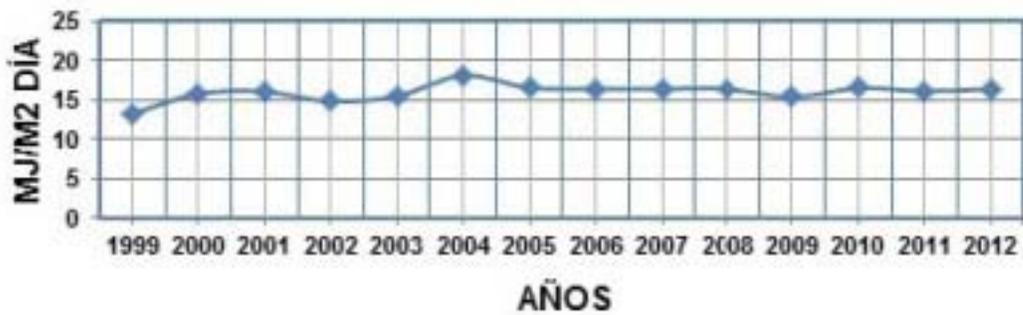


Figura A.7:

**IRRADIACIÓN GLOBAL  
PROMEDIO MENSUAL OCTUBRE (TACUBAYA)  
1999 - 2012**



**IRRADIACIÓN GLOBAL  
PROMEDIO MENSUAL NOVIEMBRE (TACUBAYA)  
1999 - 2012**



**IRRADIACIÓN GLOBAL  
PROMEDIO MENSUAL DICIEMBRE (TACUBAYA)  
1999 - 2012**

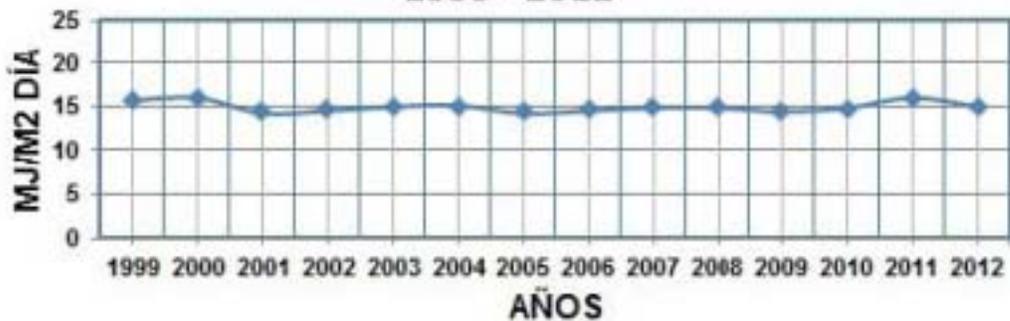


Figura A.8:

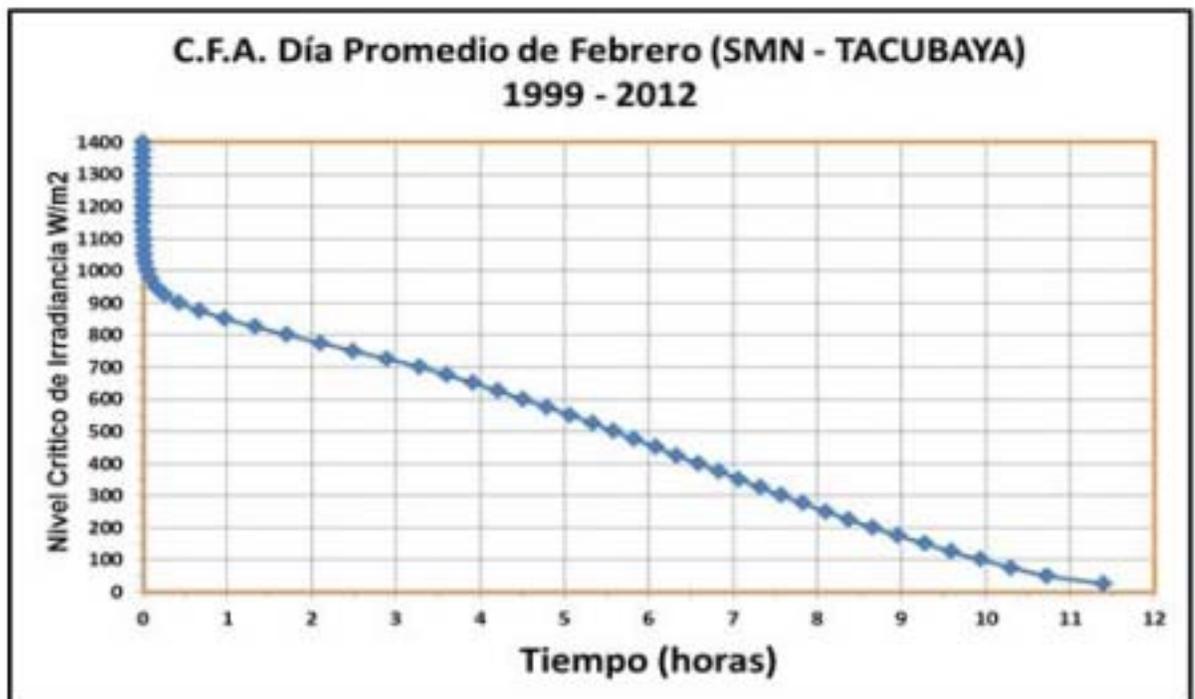
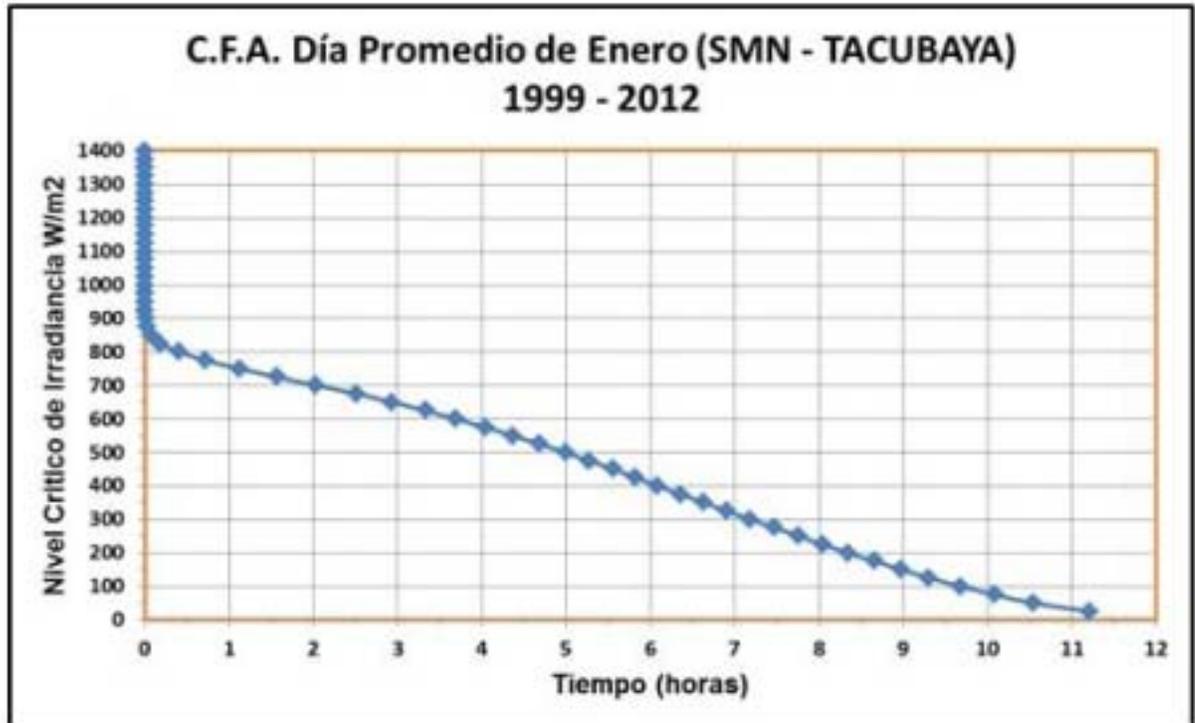


Figura A.9:

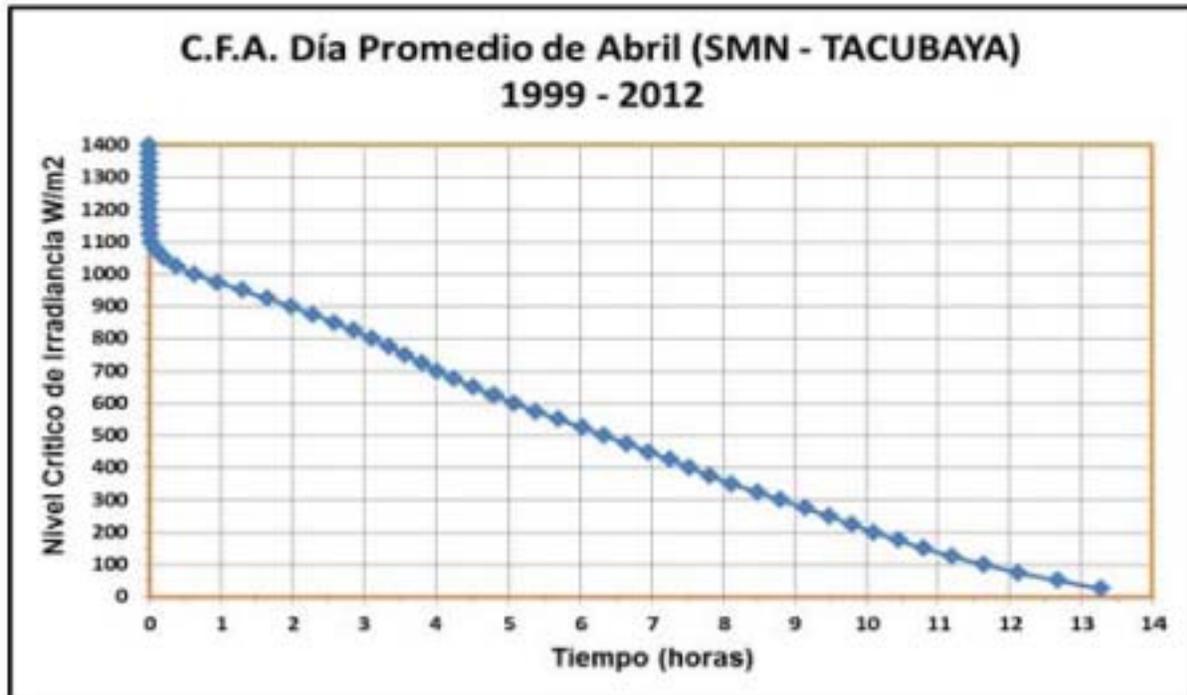
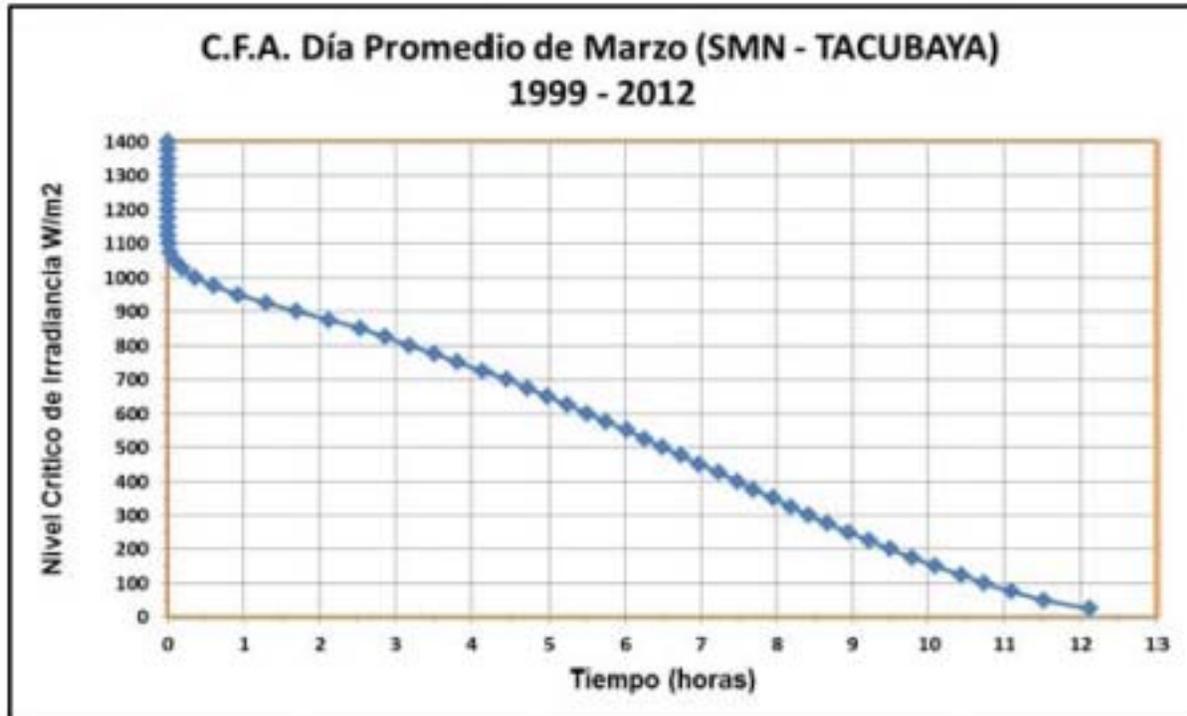


Figura A.10:

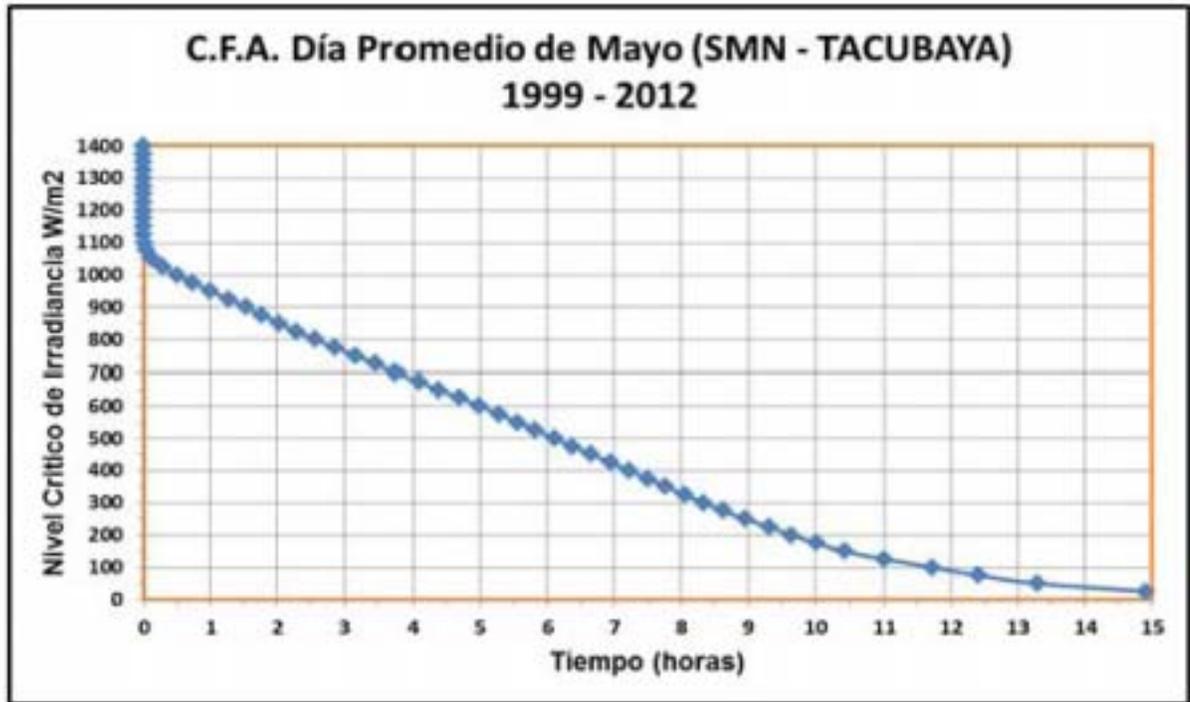


Figura A.11:

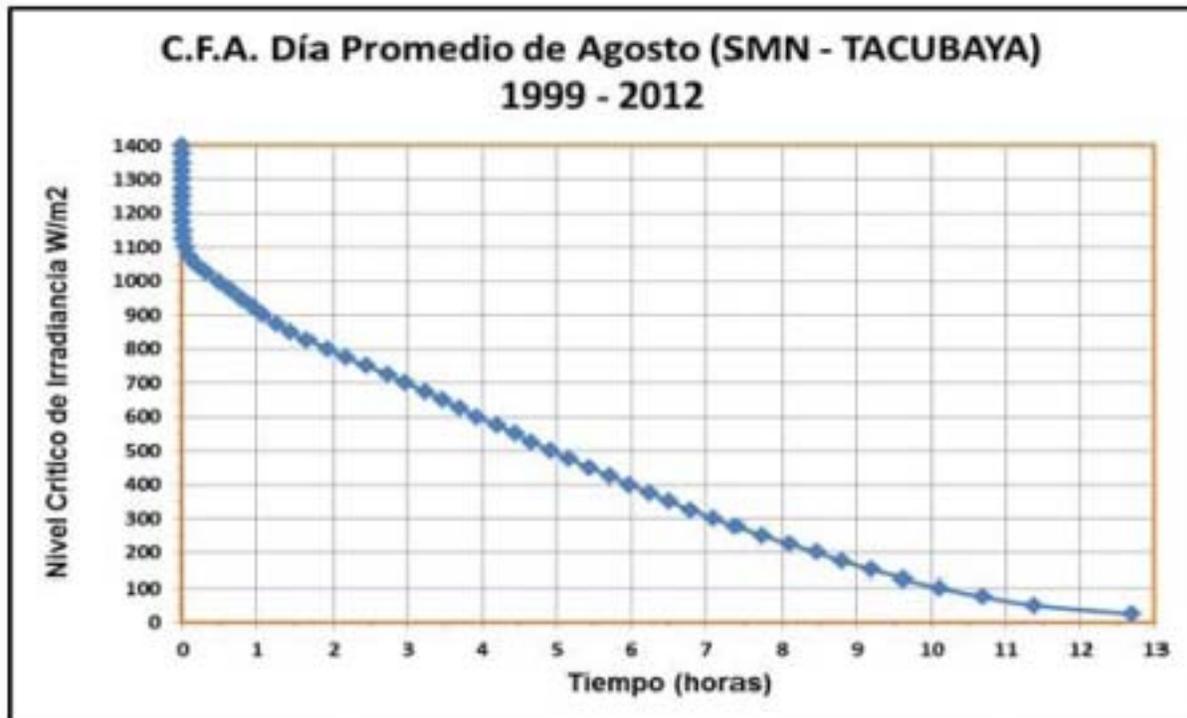


Figura A.12:

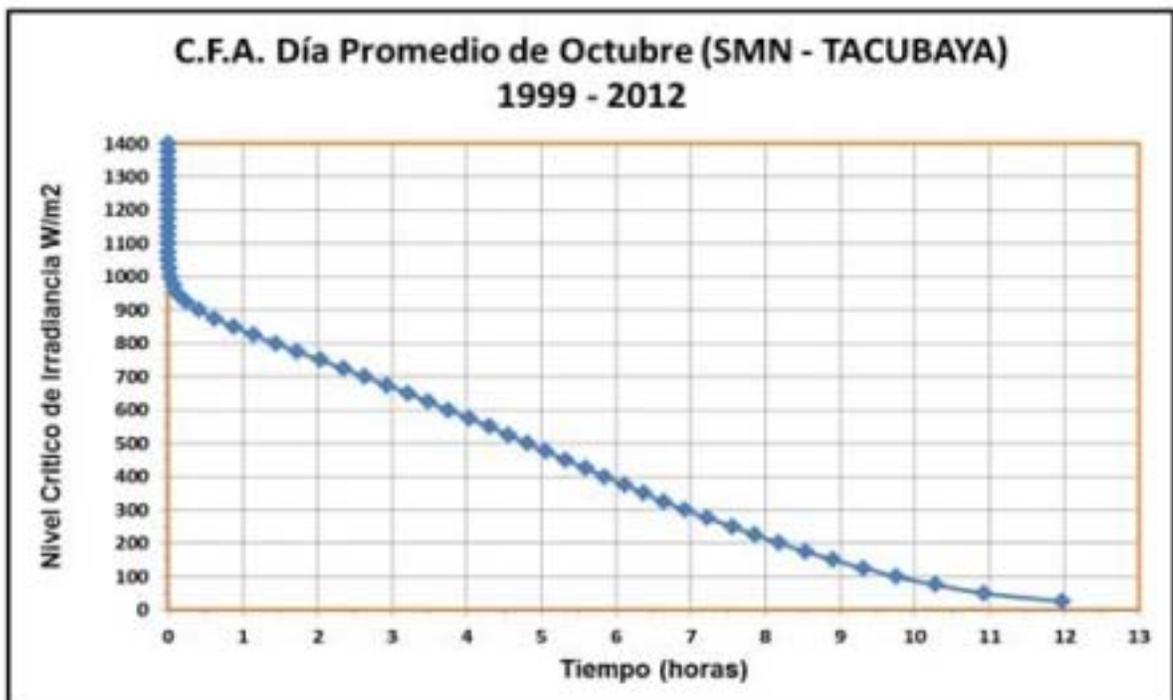
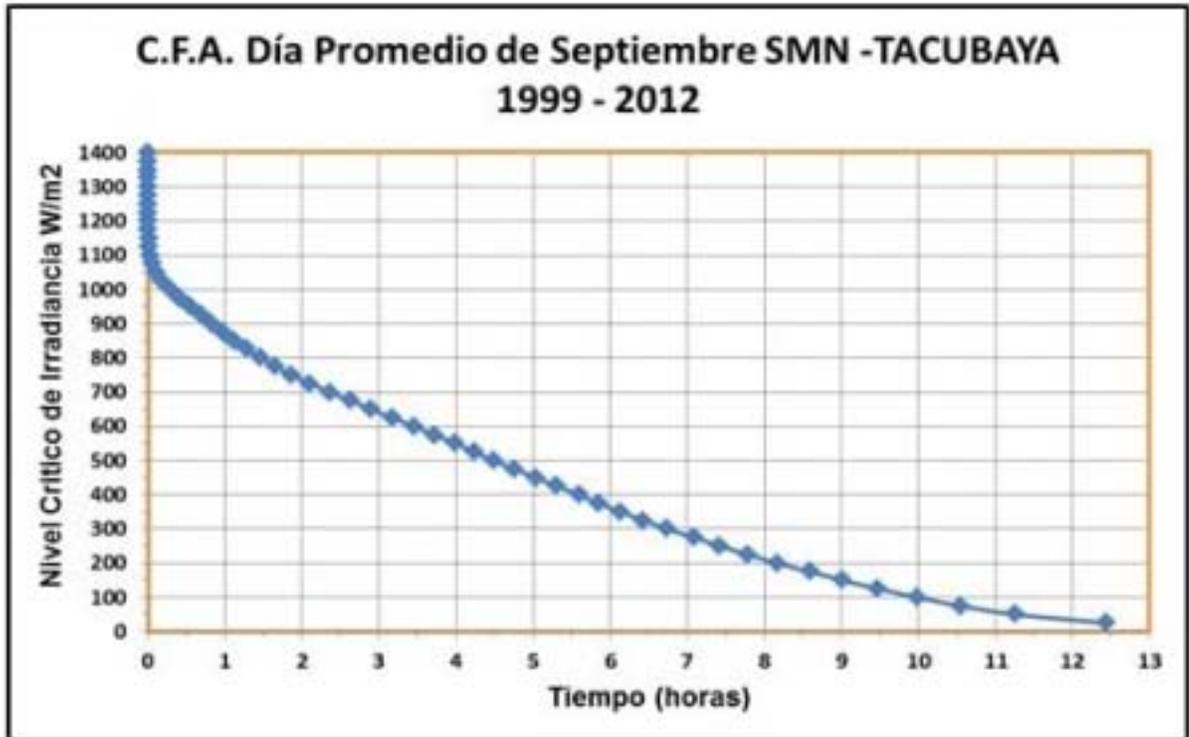


Figura A.13:

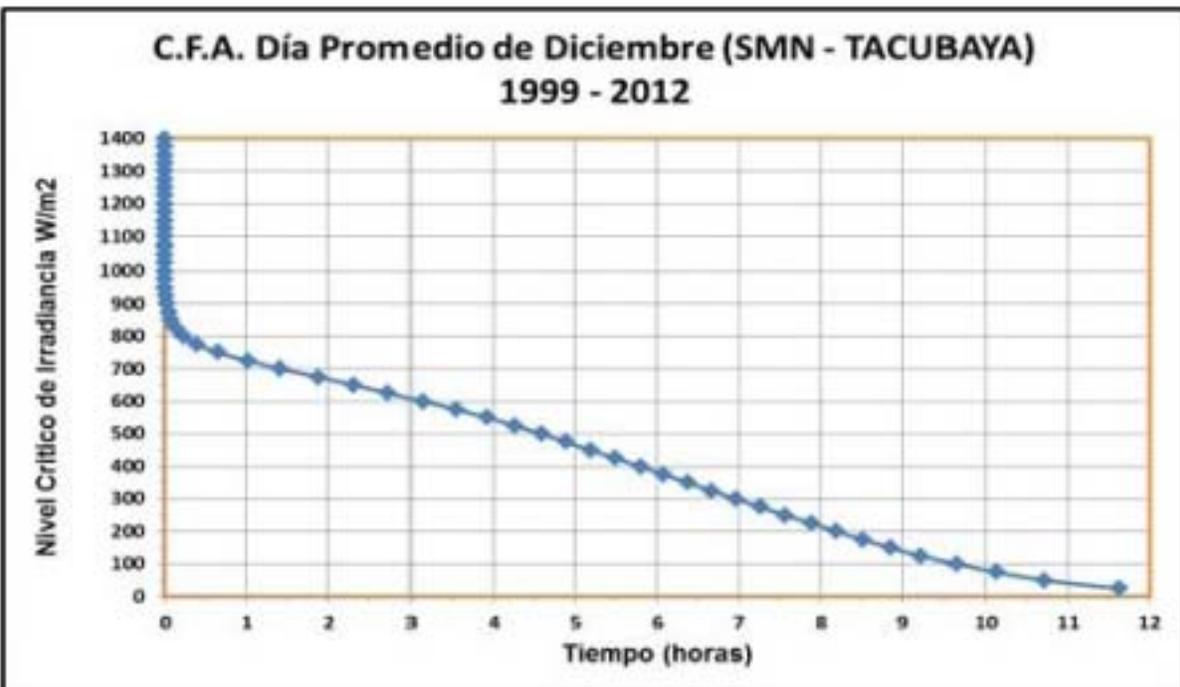
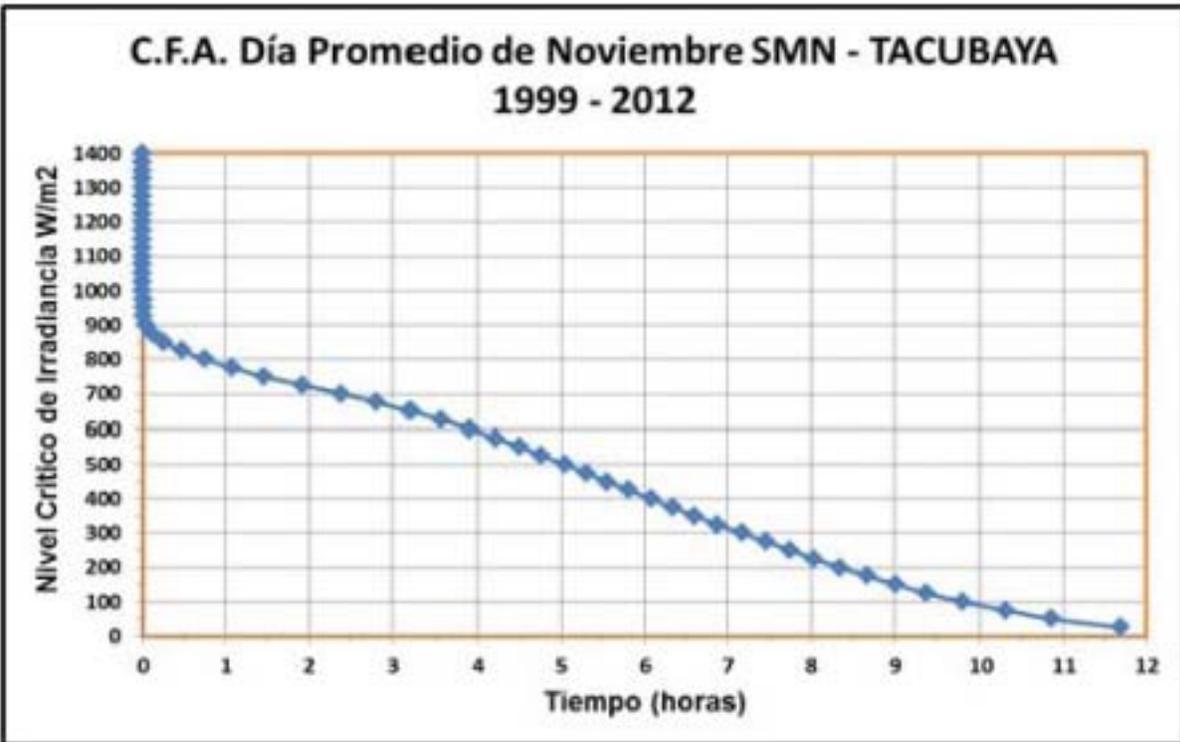


Figura A.14:

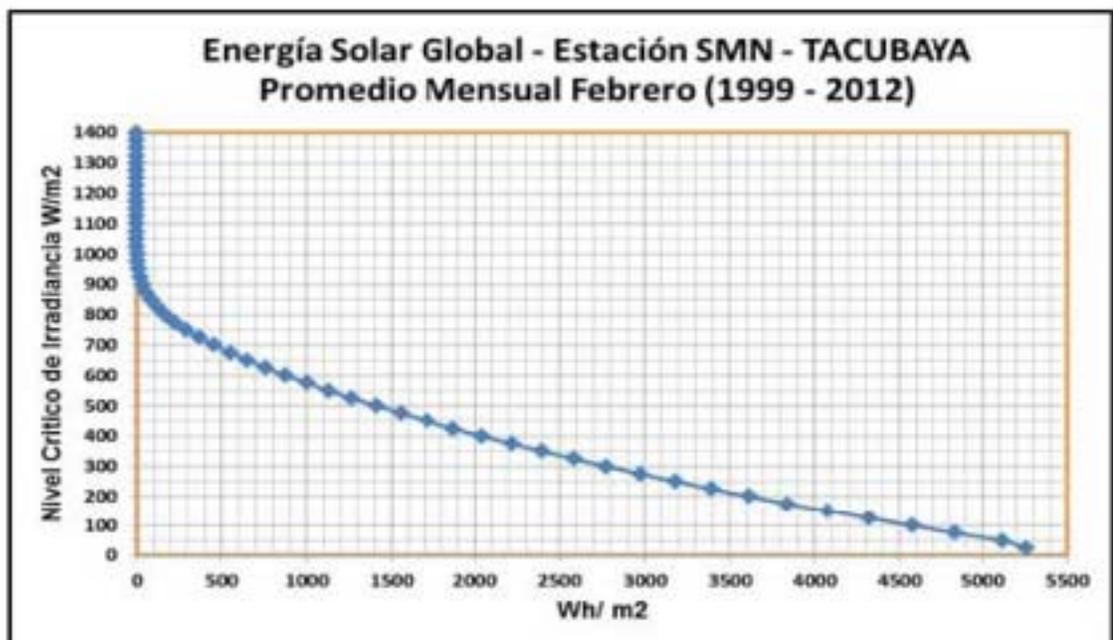
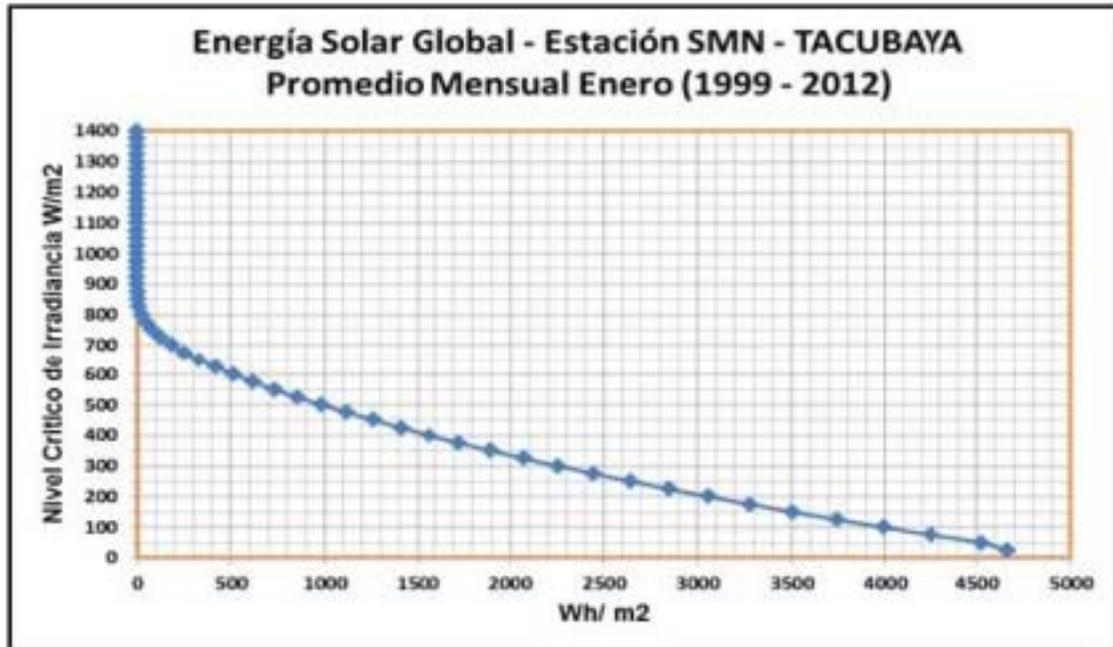


Figura A.15:

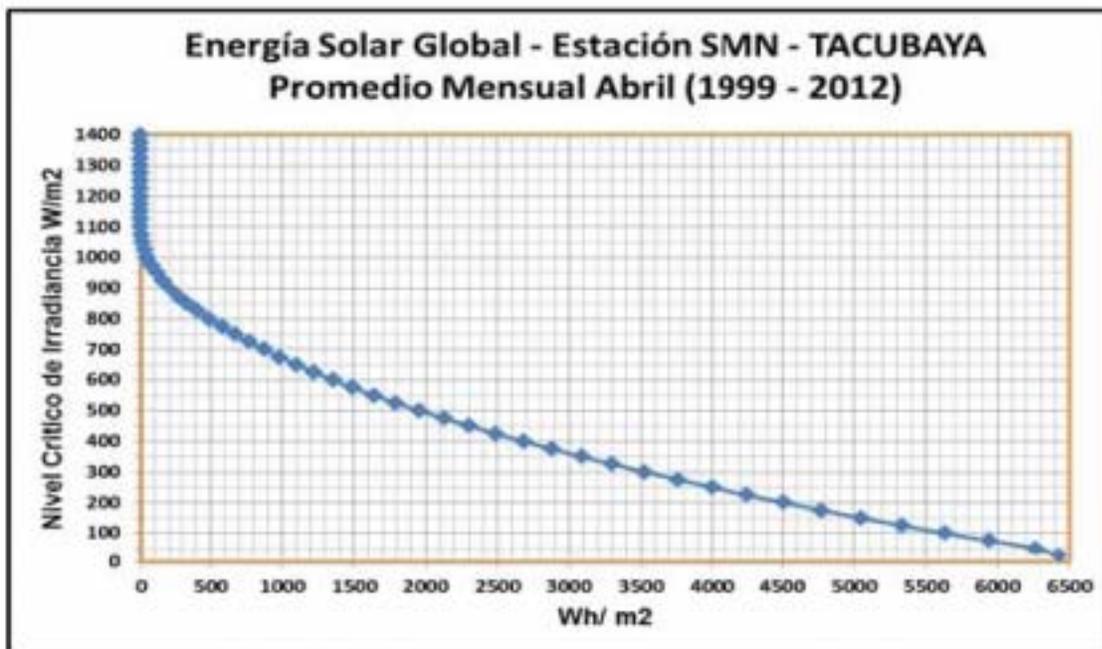
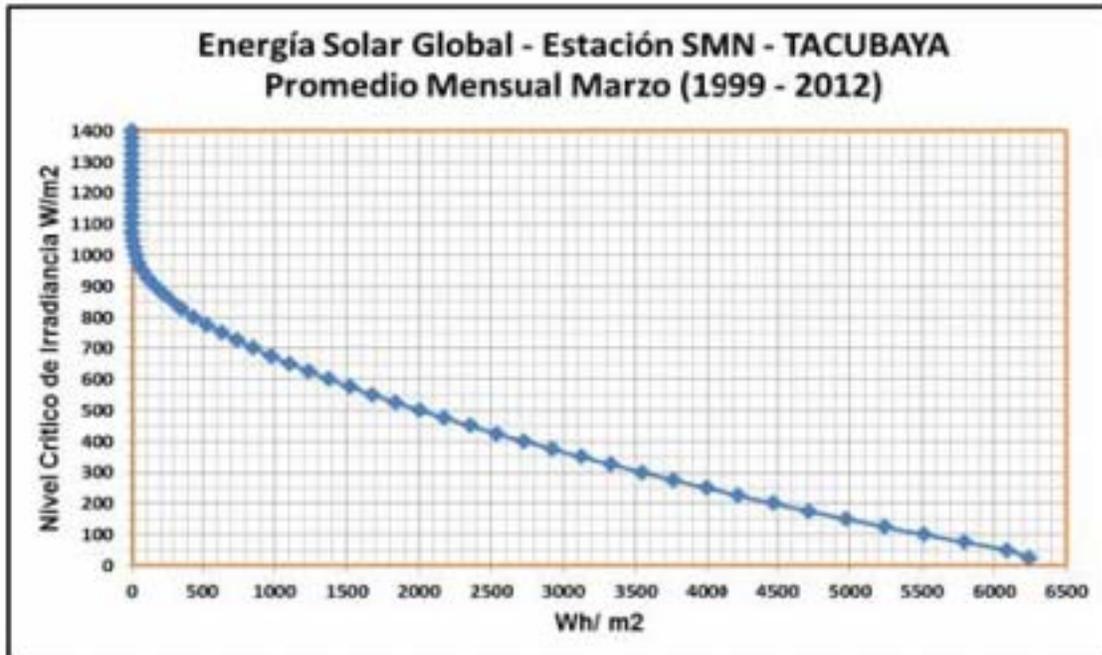


Figura A.16:

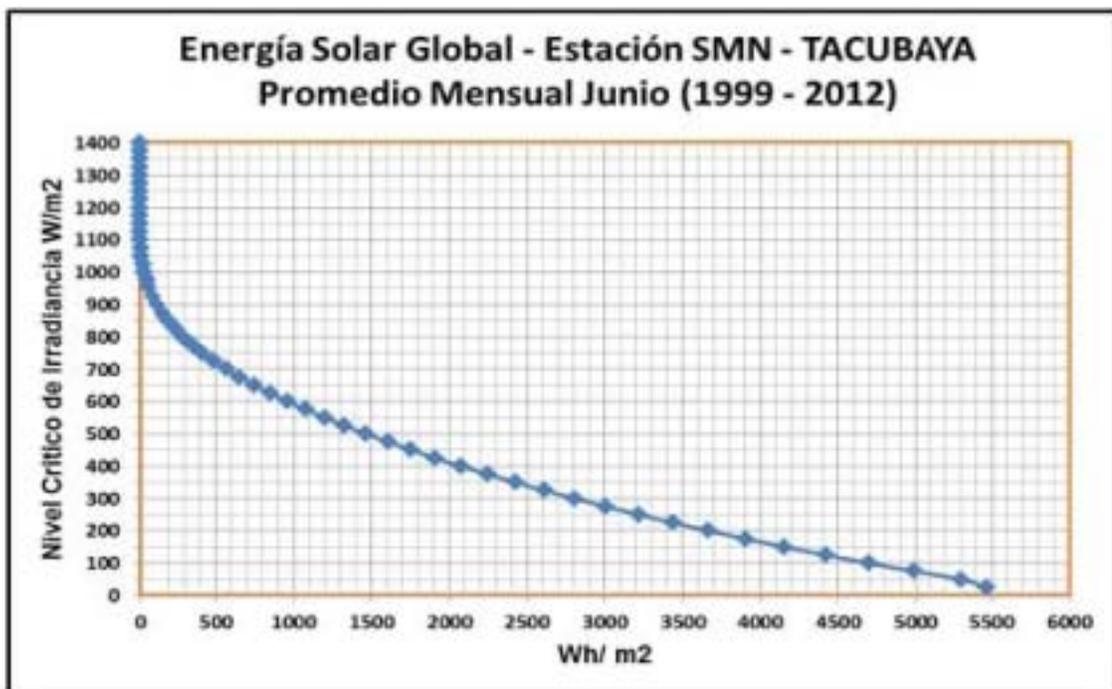
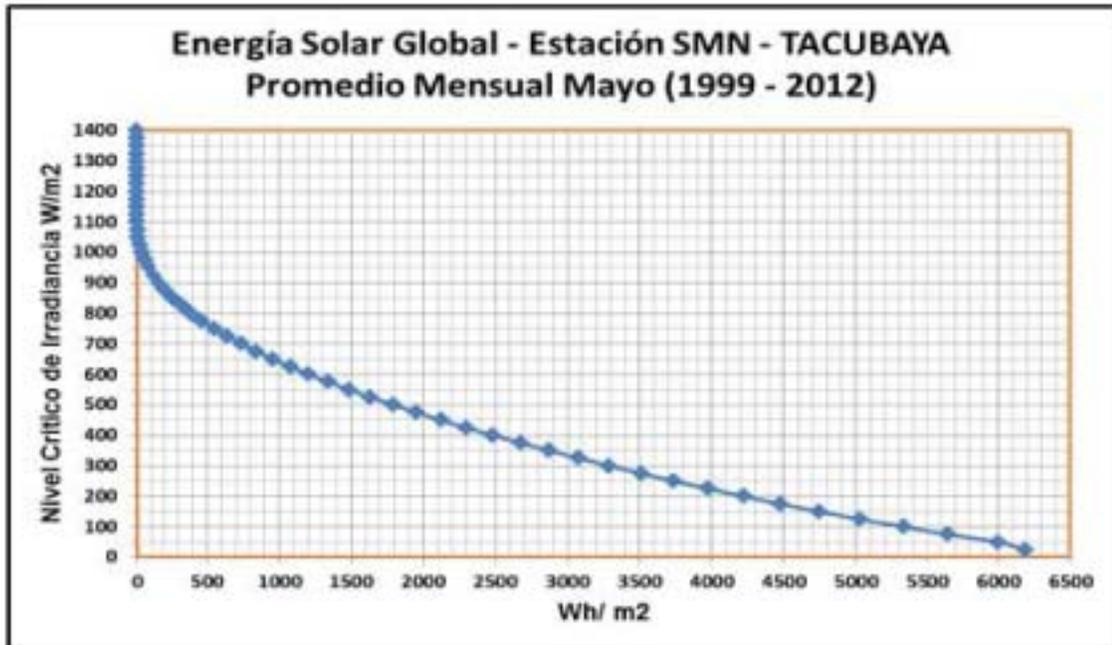


Figura A.17:

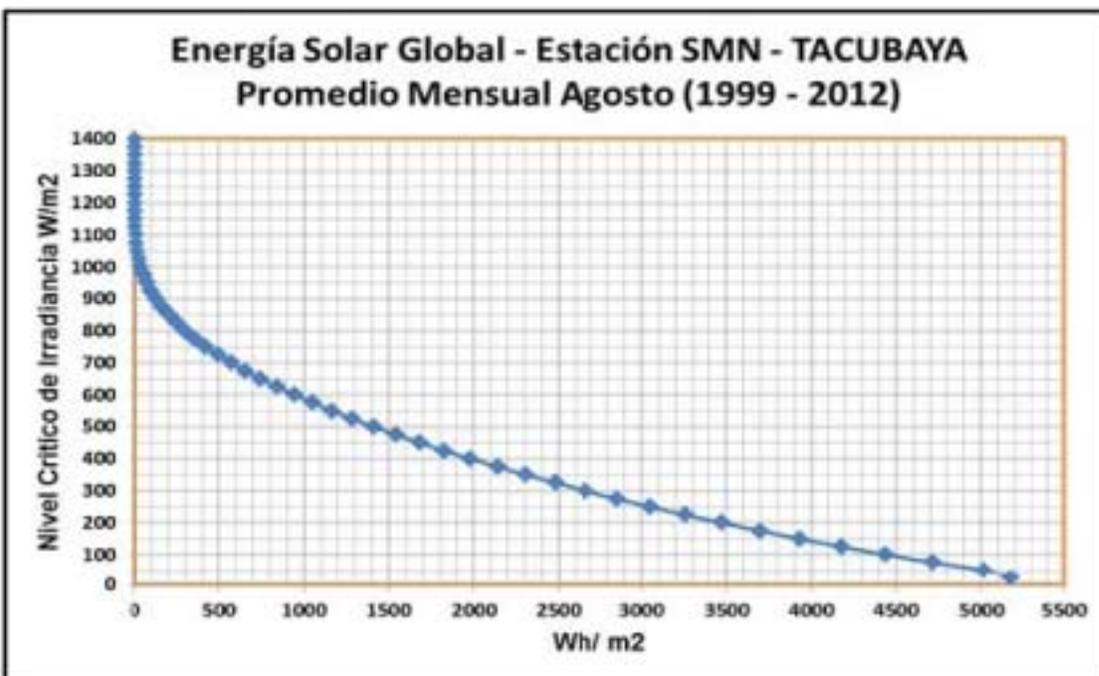
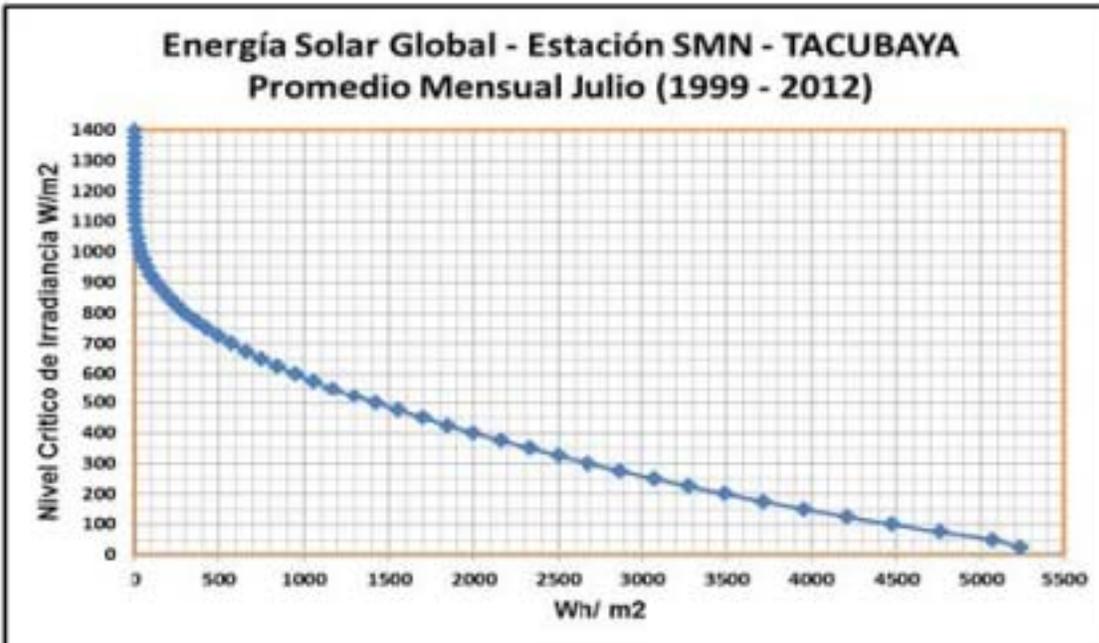


Figura A.18:

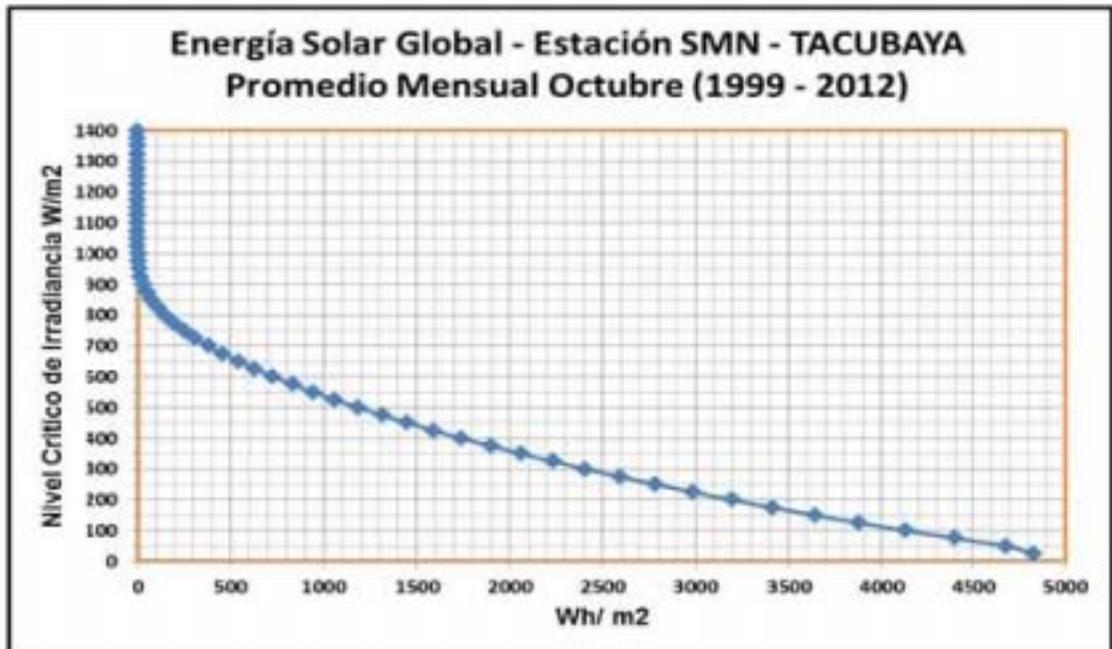
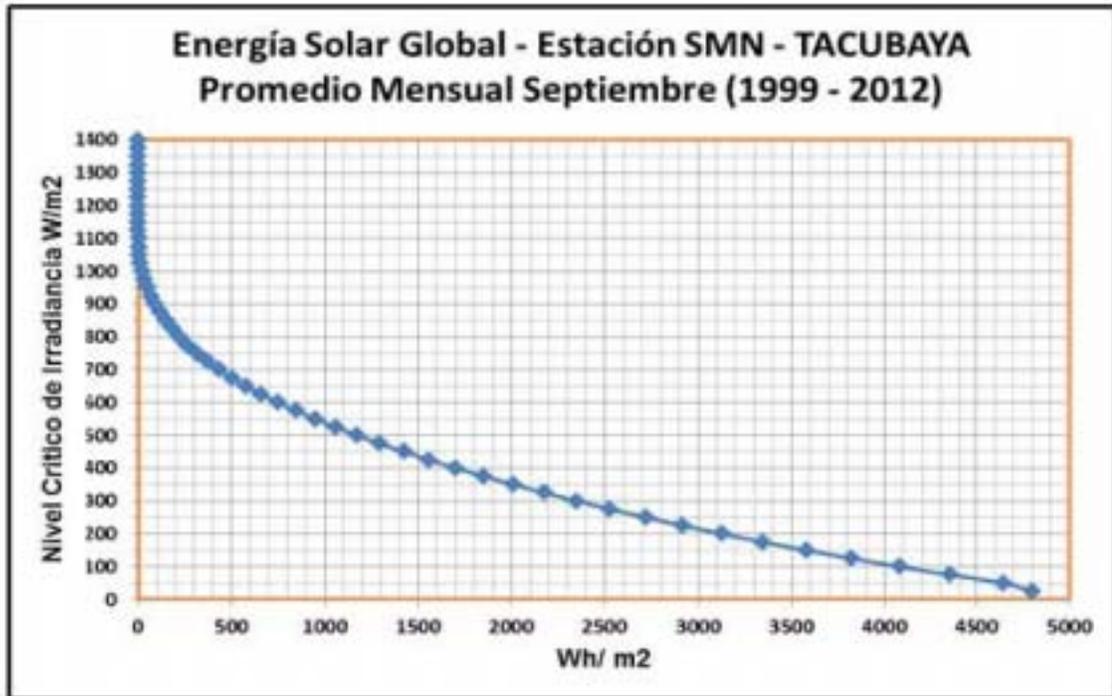


Figura A.19:

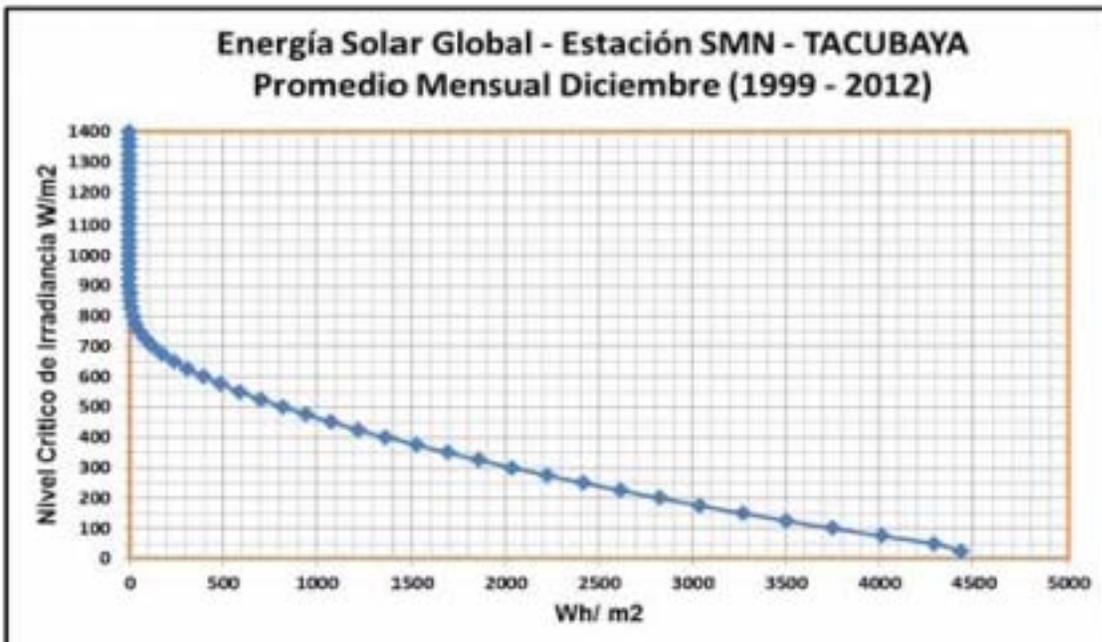
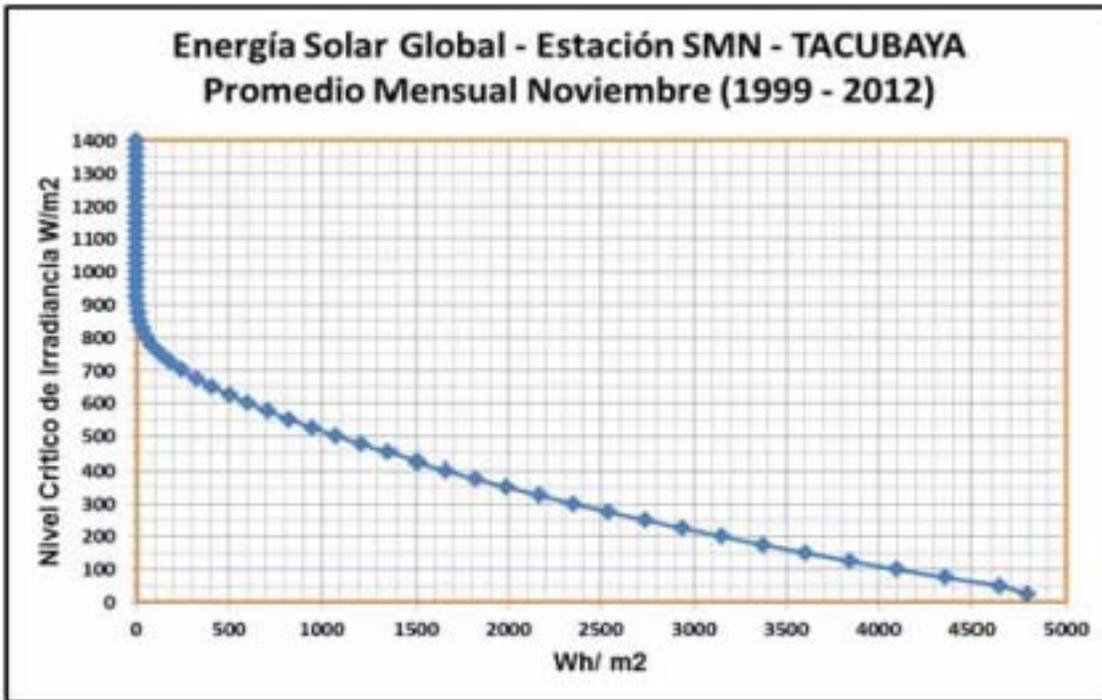


Figura A.20:



## Apéndice B

### Gráficas de la Estación Escuela Nacional de Ciencias Biológicas 1 (ENCB1)

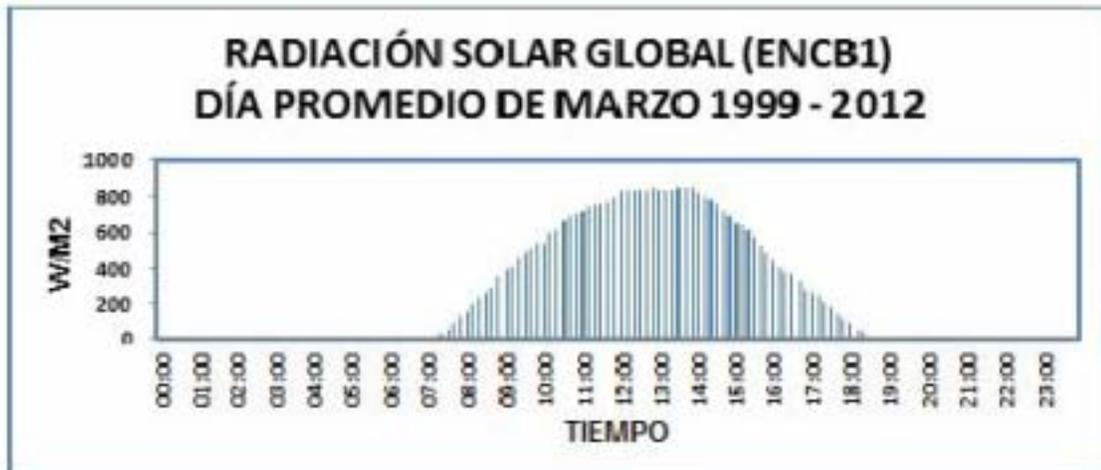
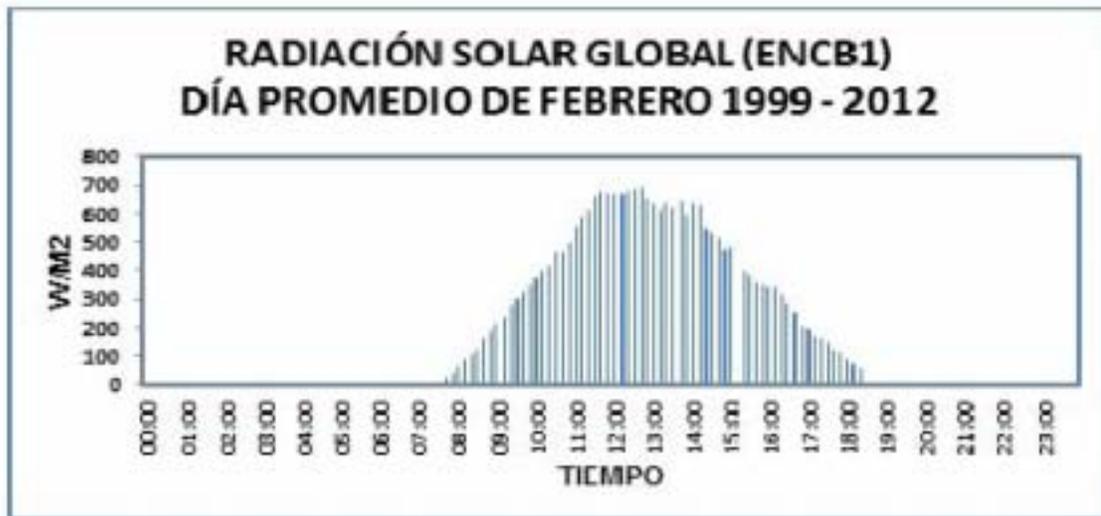
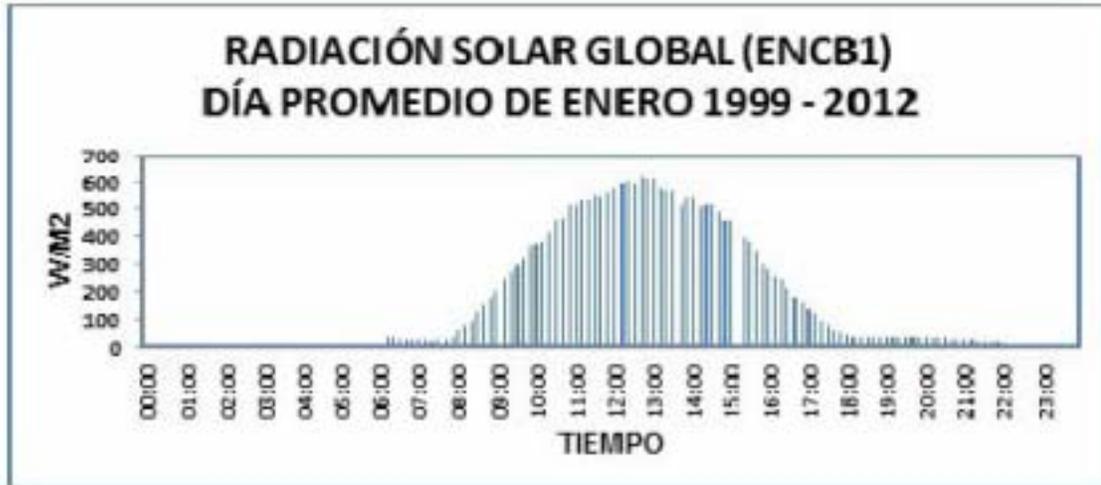


Figura B.1:



Figura B.2:

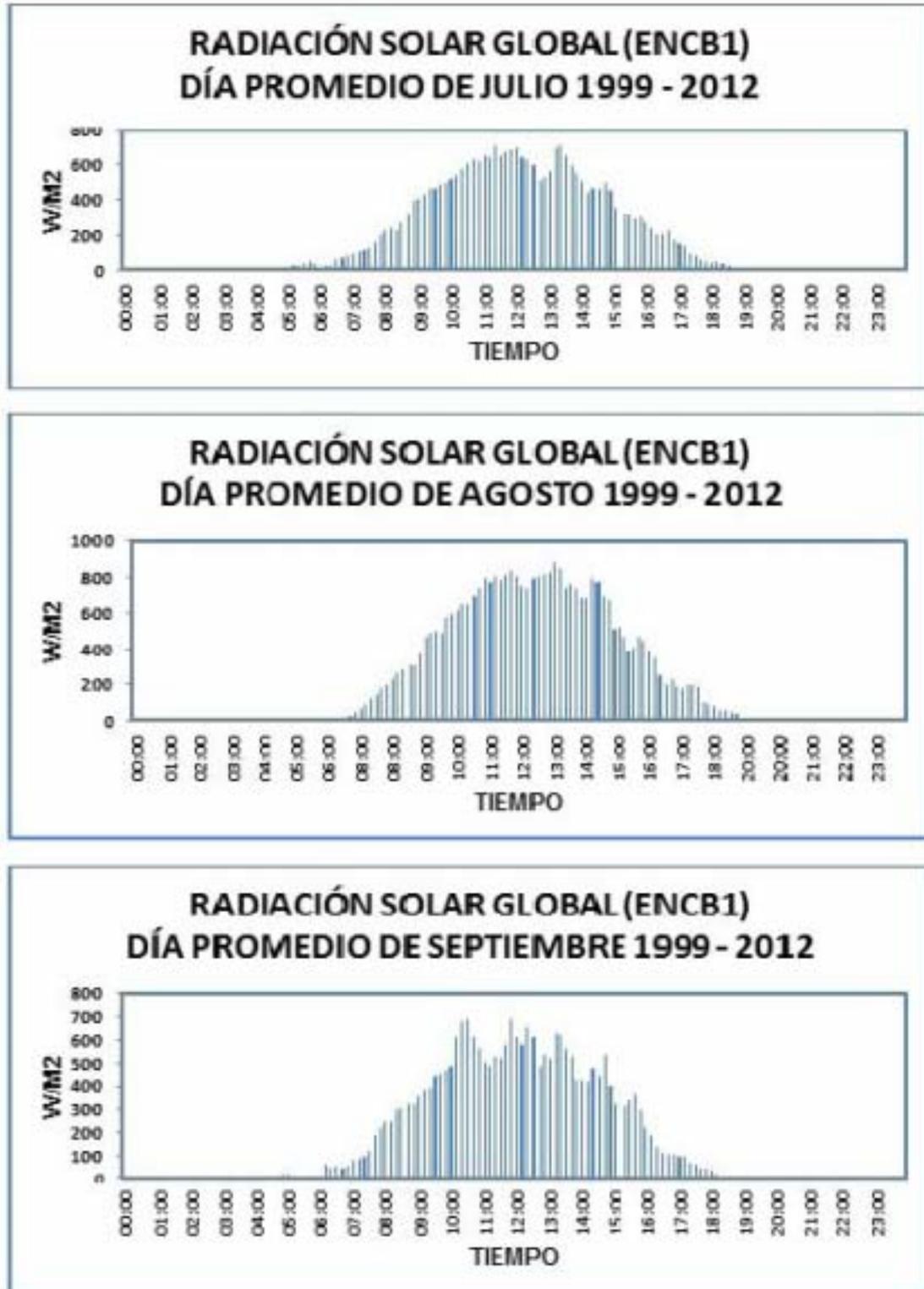


Figura B.3:

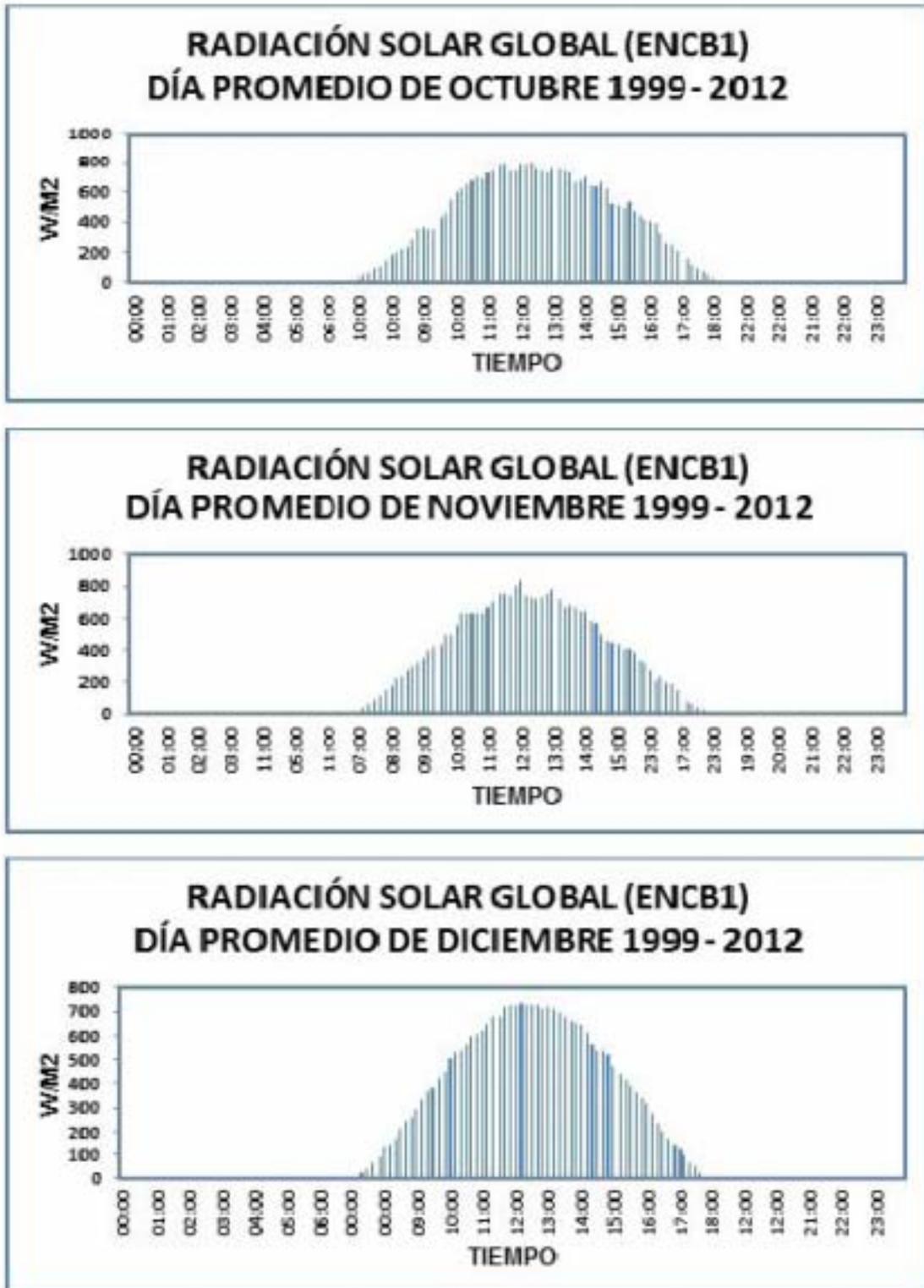


Figura B.4:

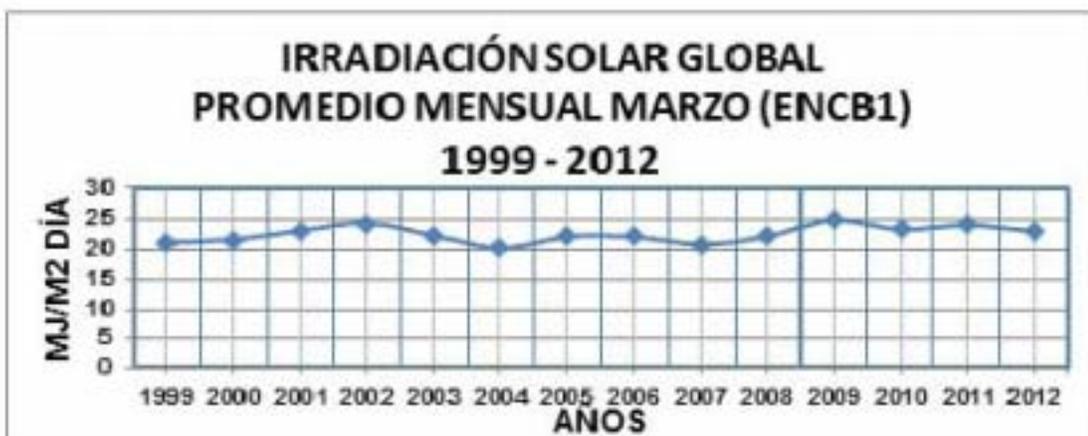


Figura B.5:

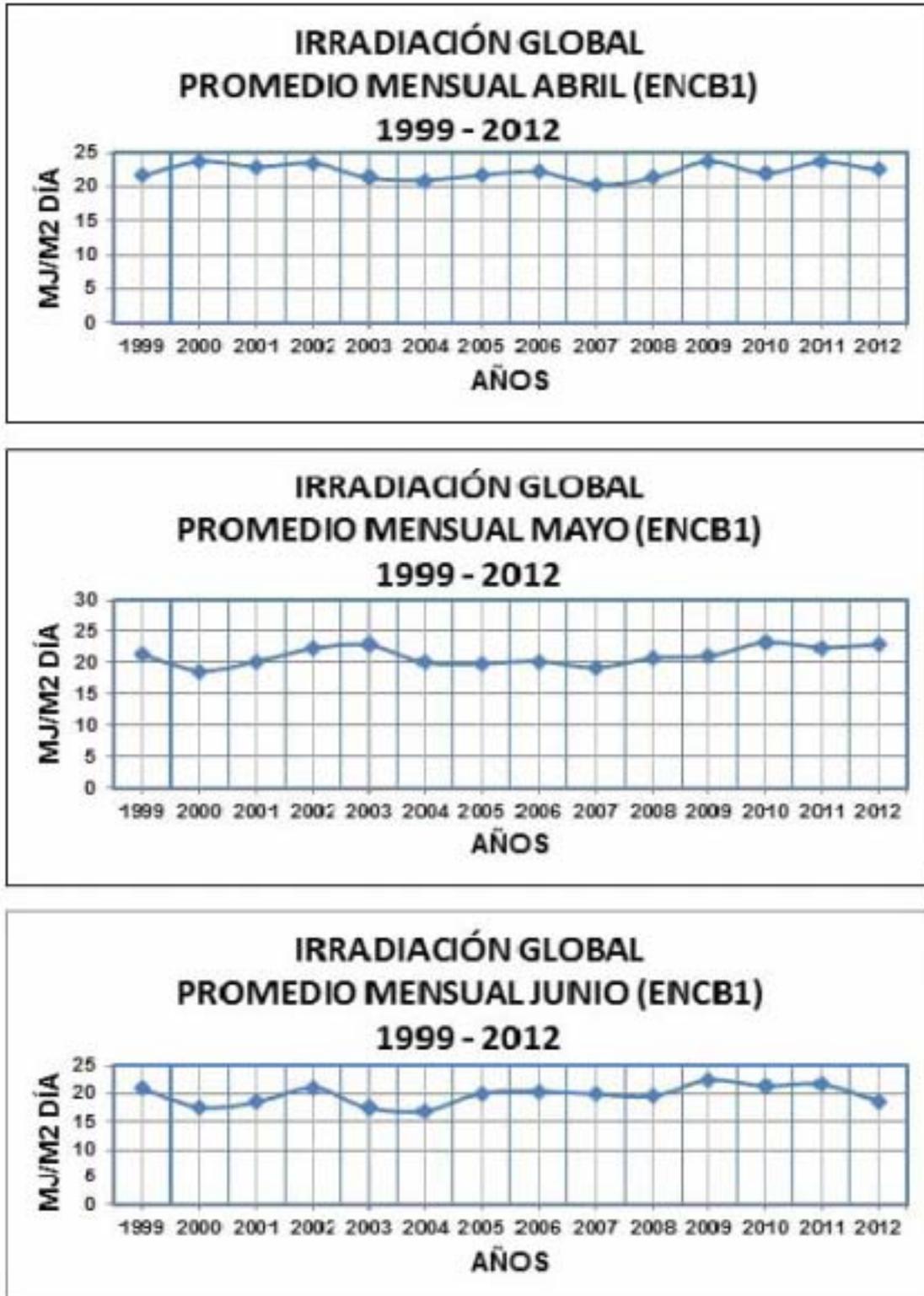


Figura B.6:

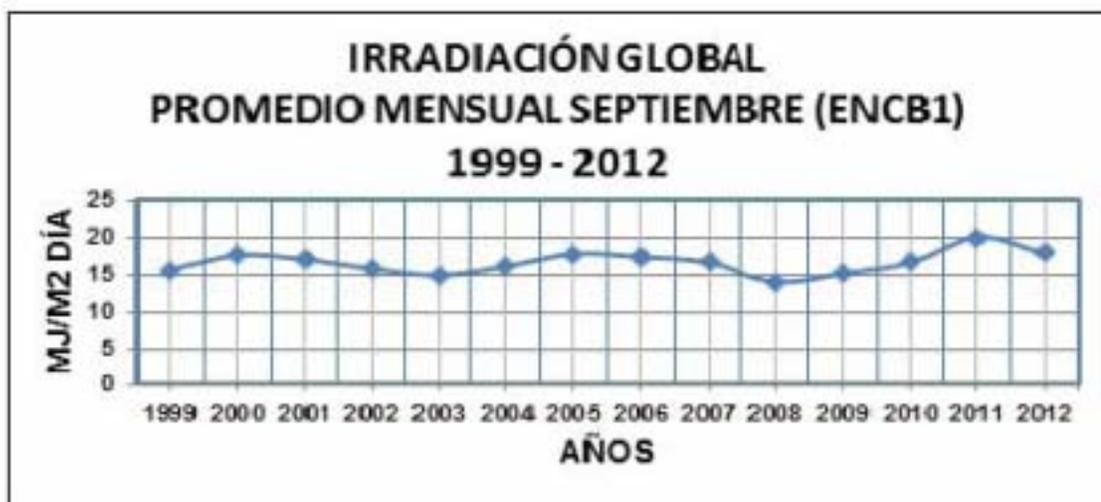


Figura B.7:

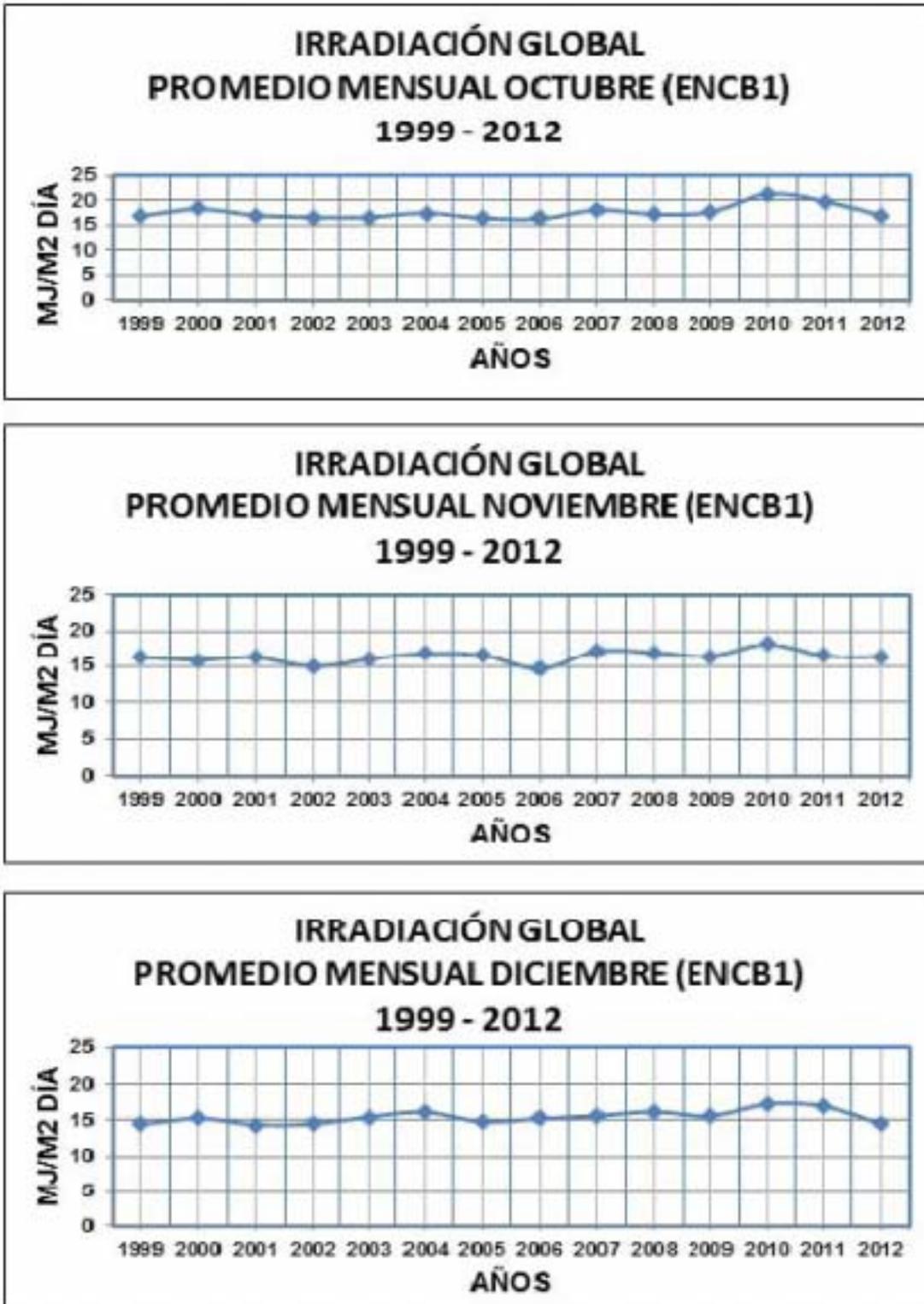


Figura B.8:

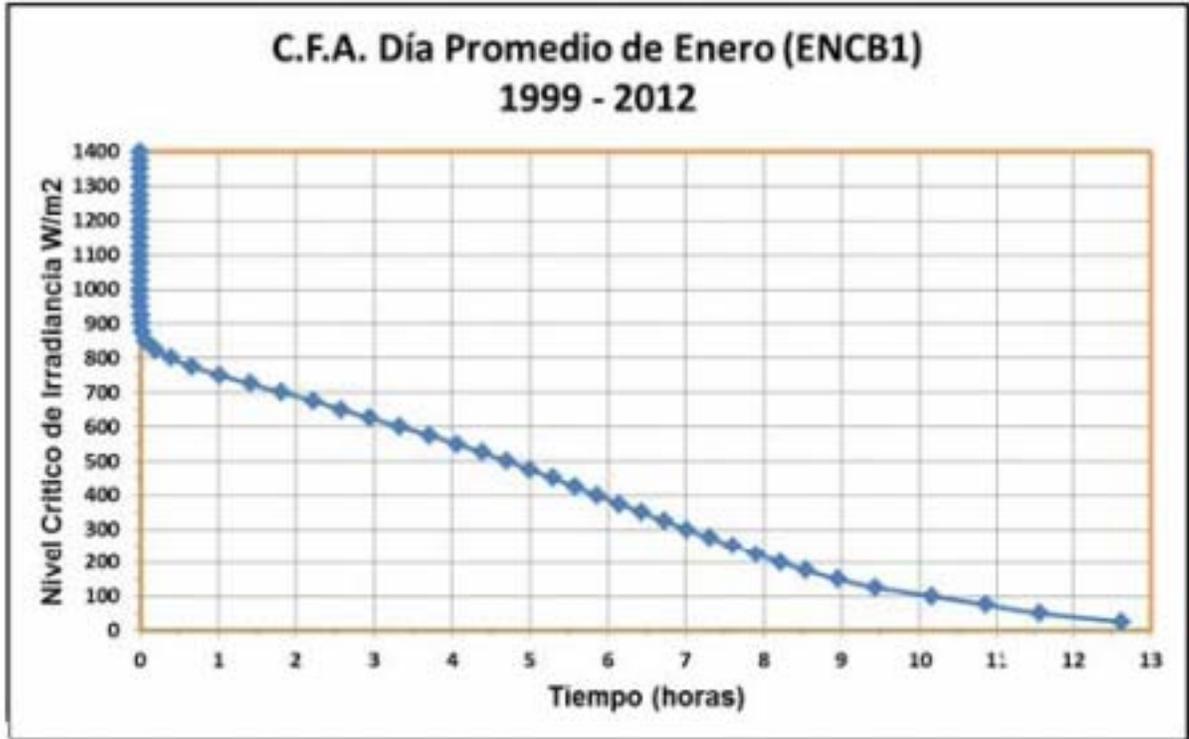


Figura B.9:

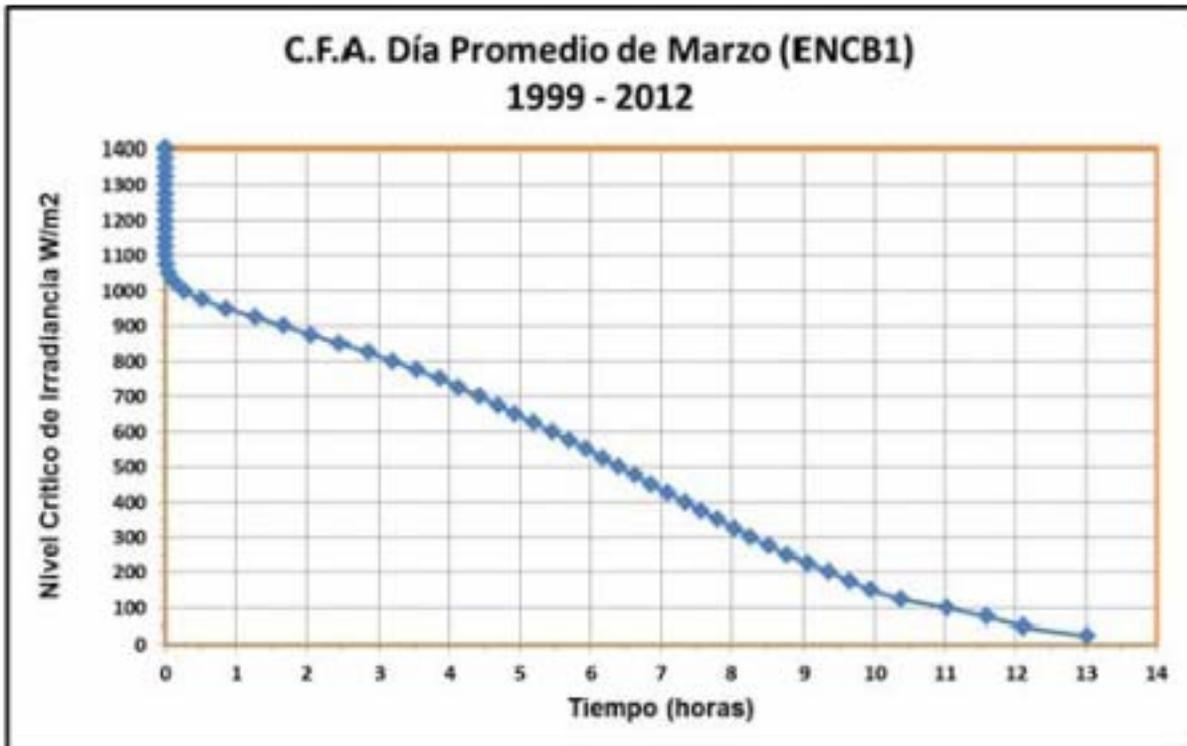


Figura B.10:



Figura B.11:

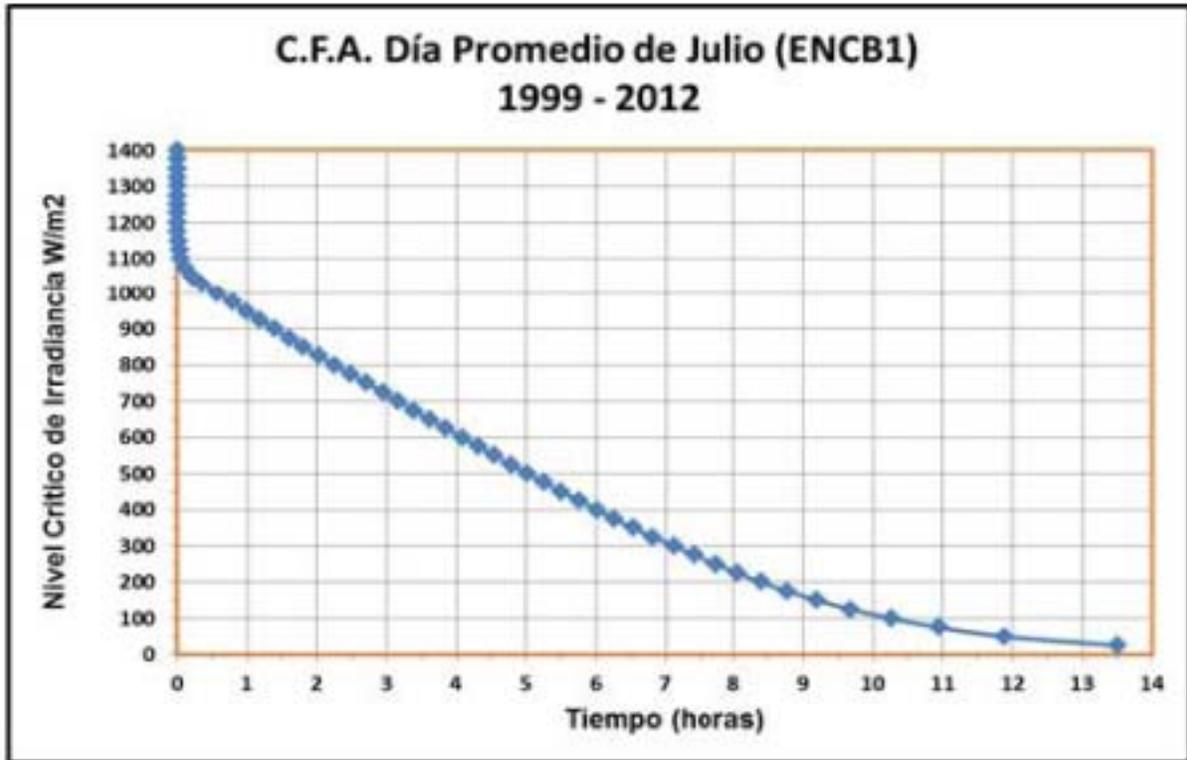


Figura B.12:

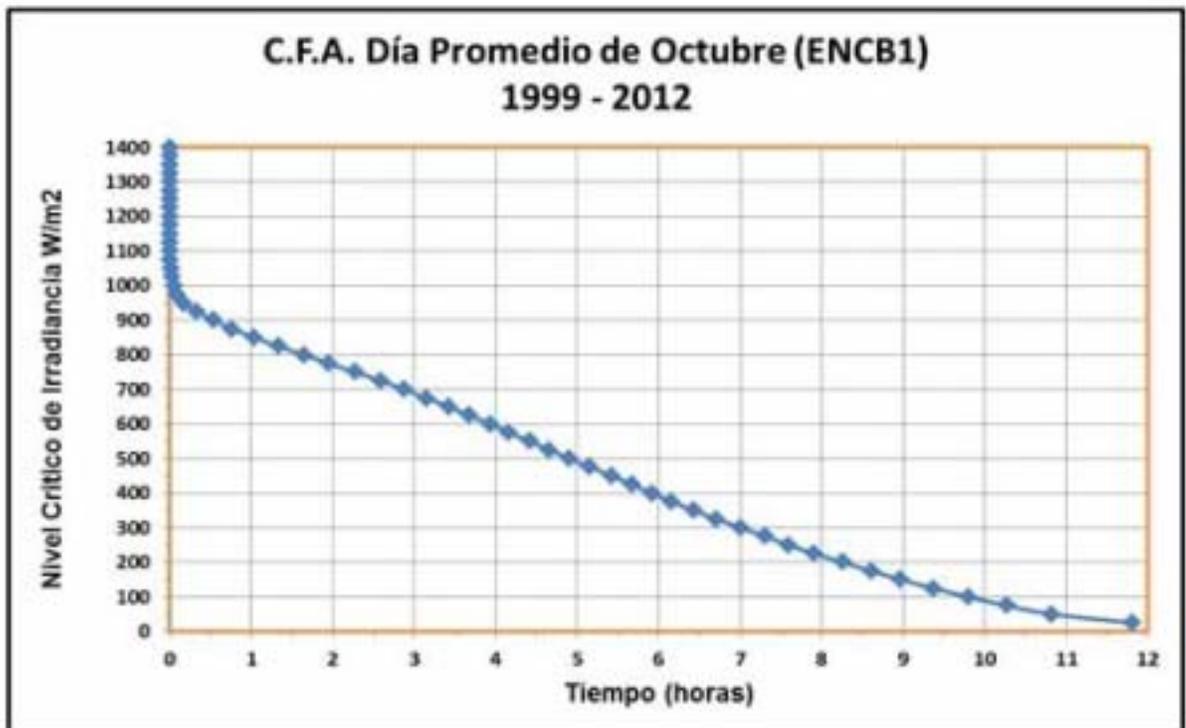


Figura B.13:

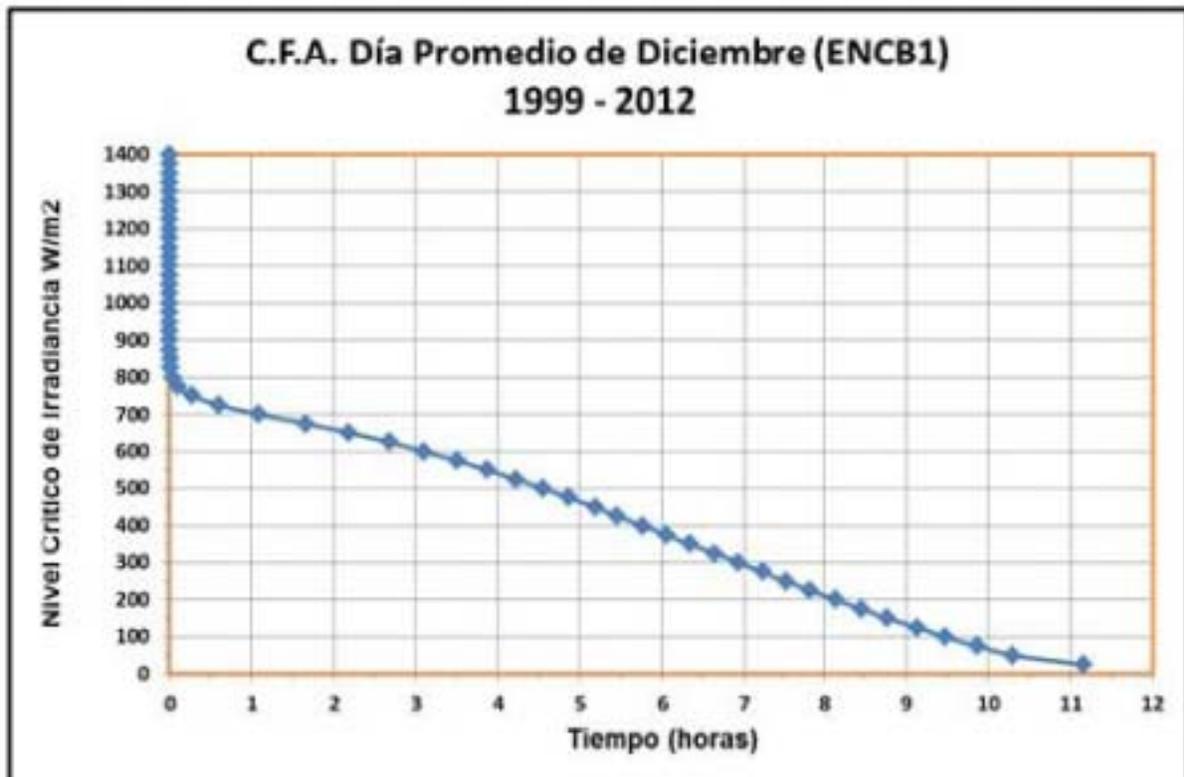
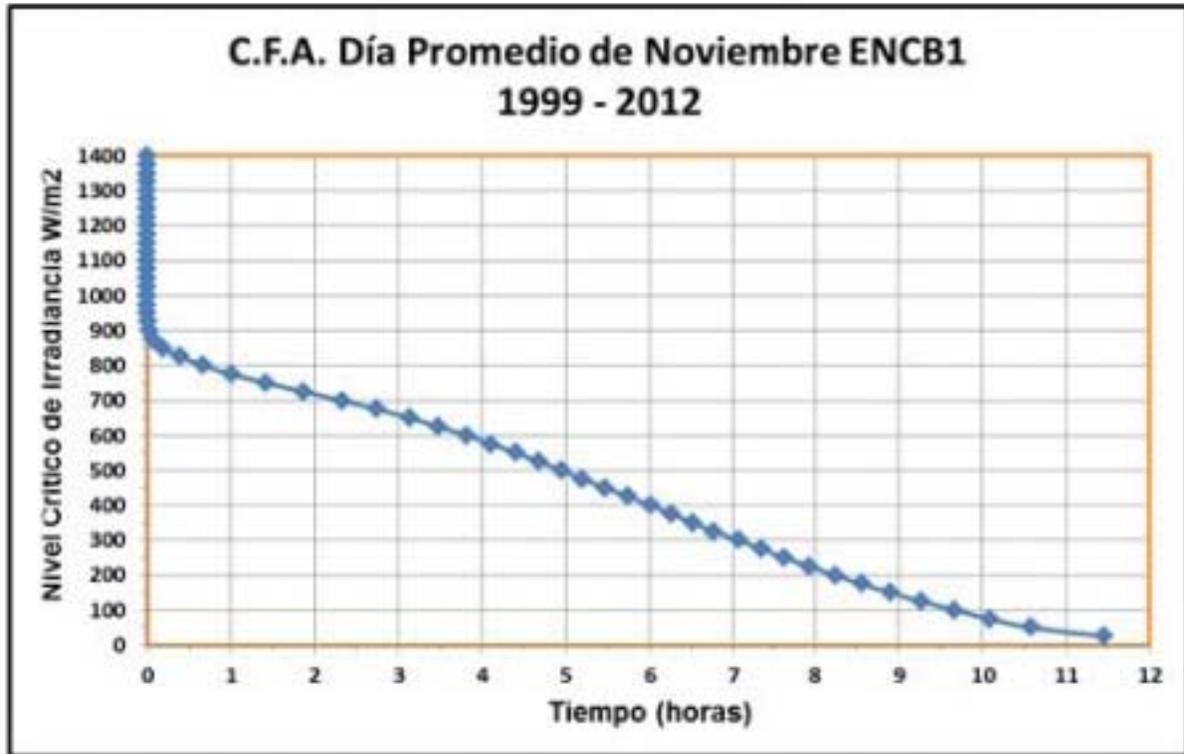


Figura B.14:

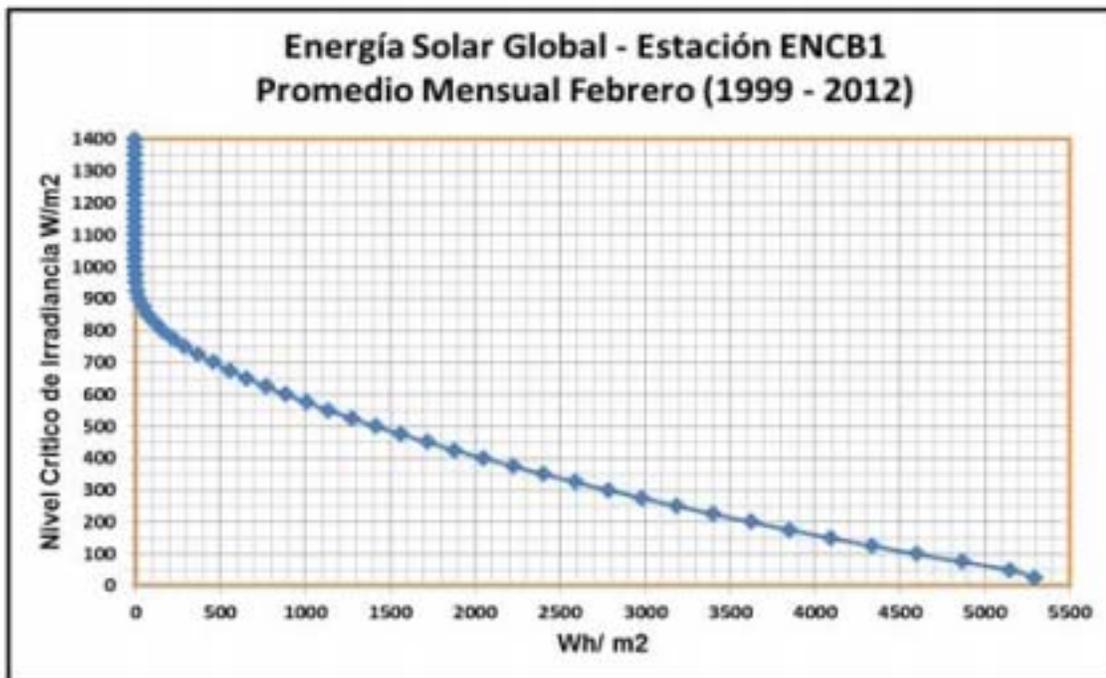
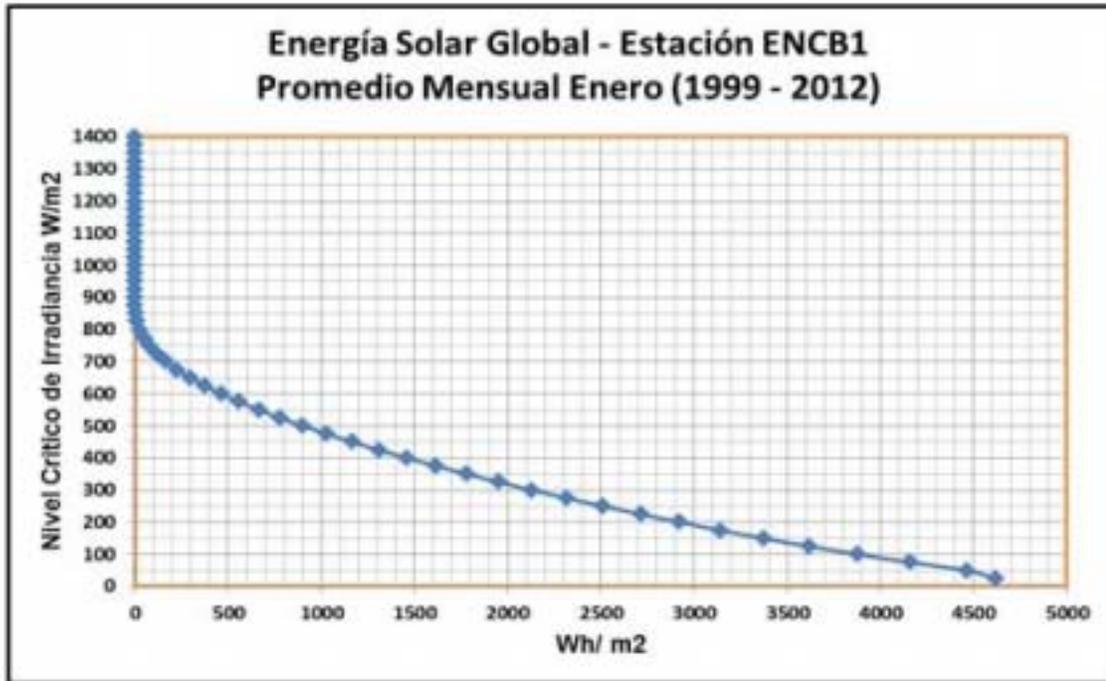


Figura B.15:

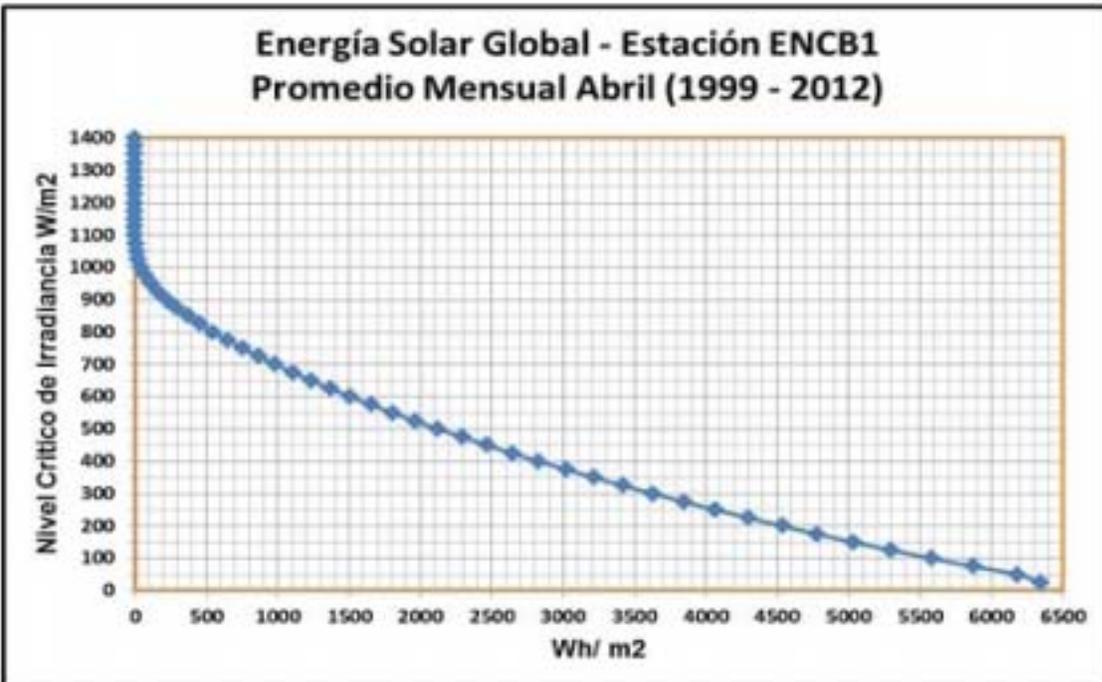
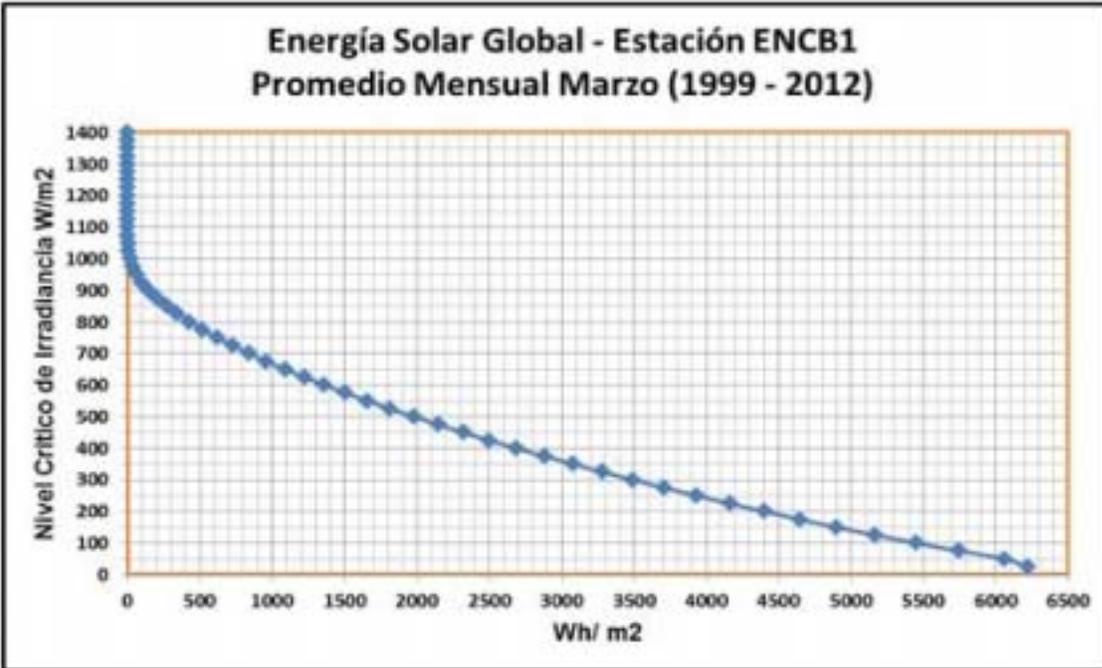


Figura B.16:

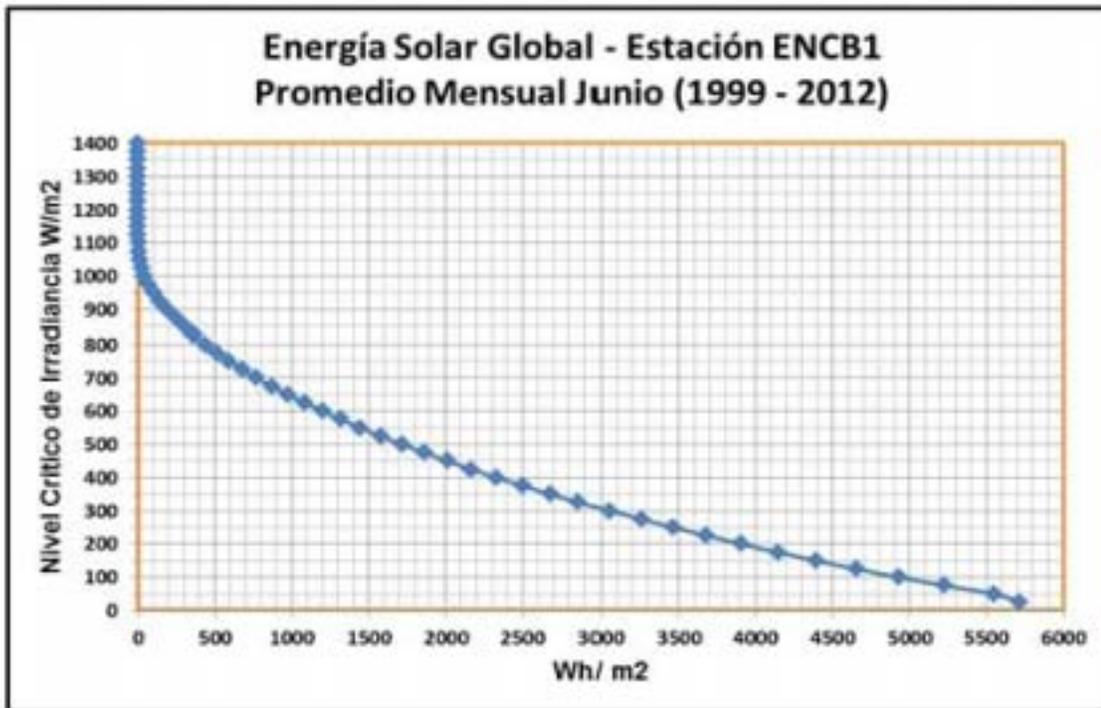
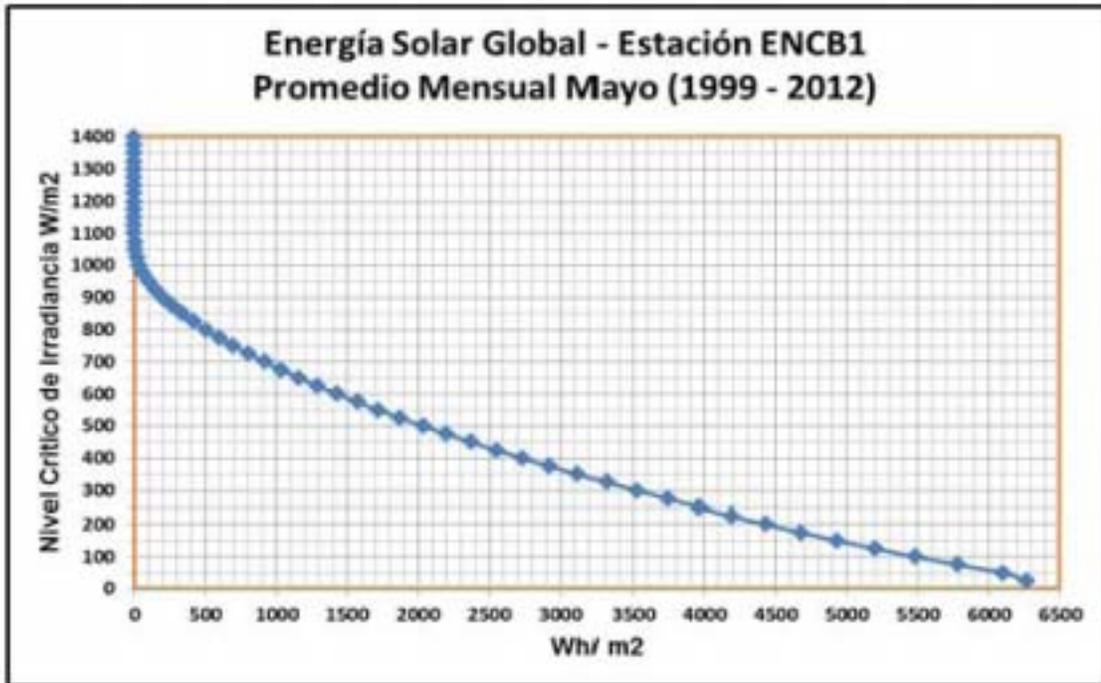


Figura B.17:

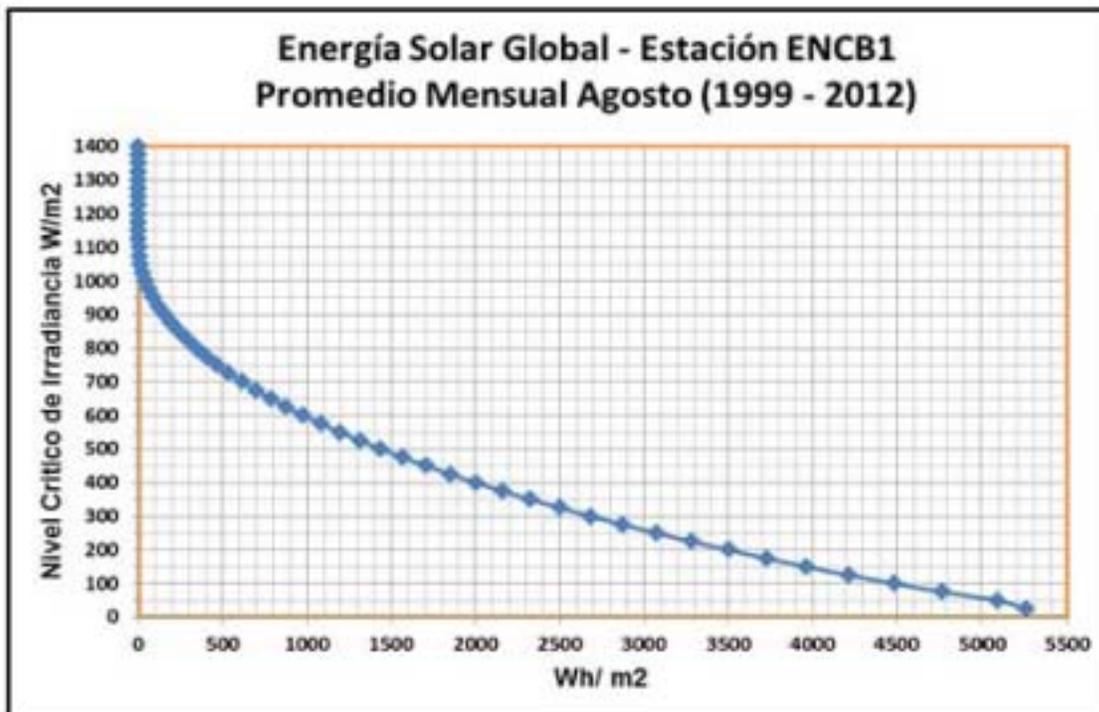
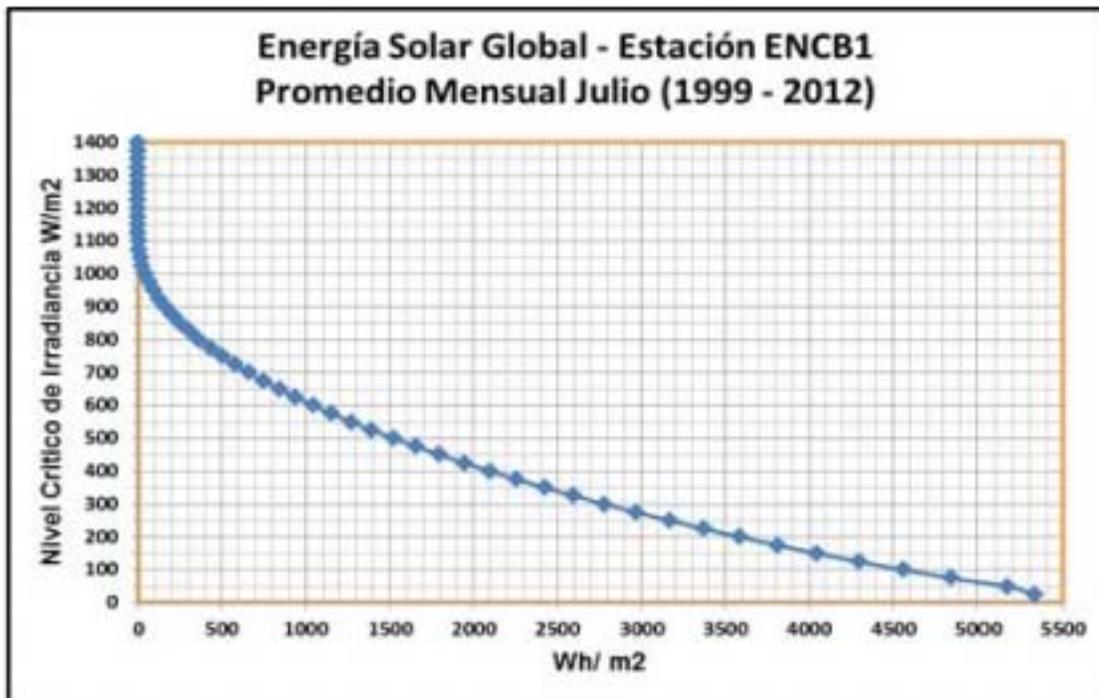


Figura B.18:

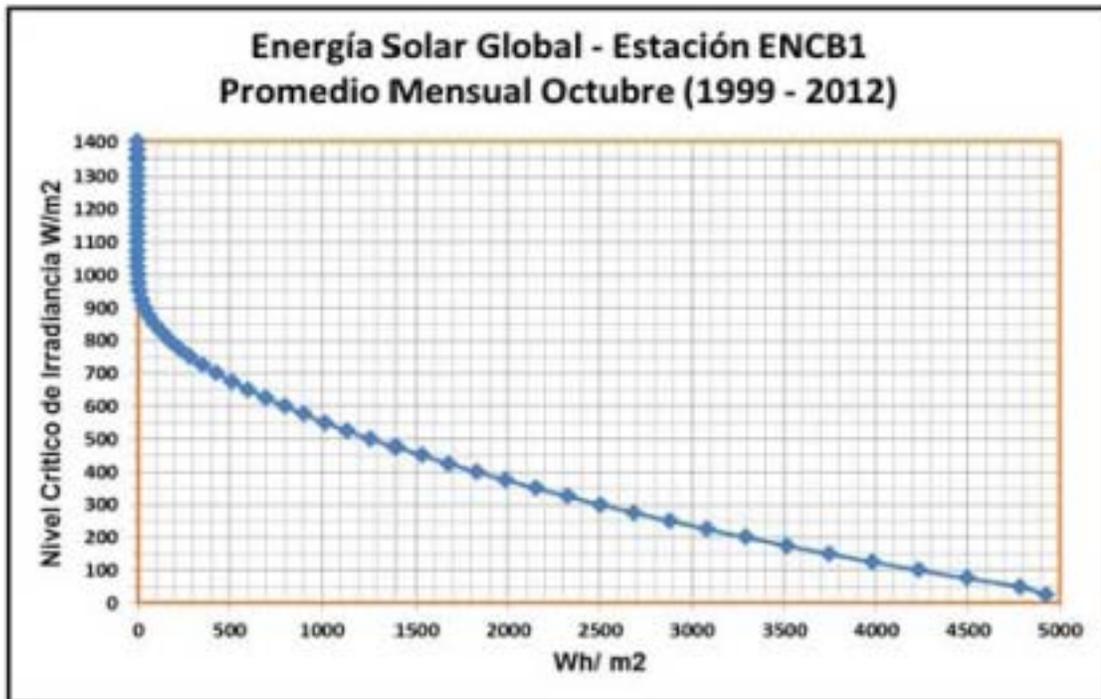
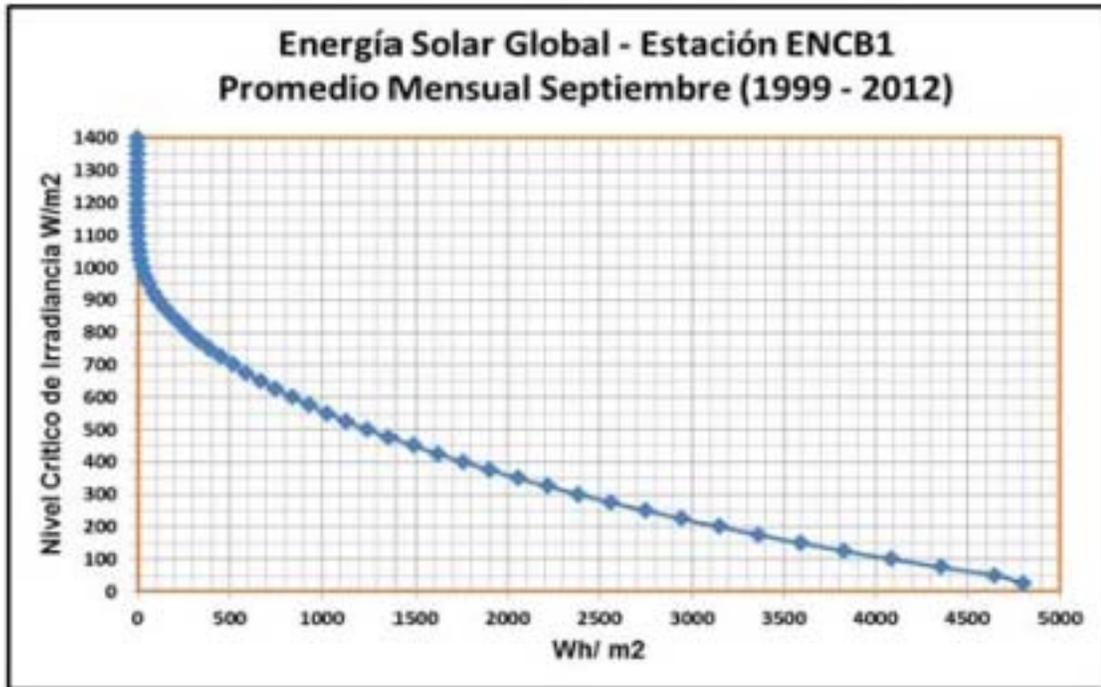


Figura B.19:

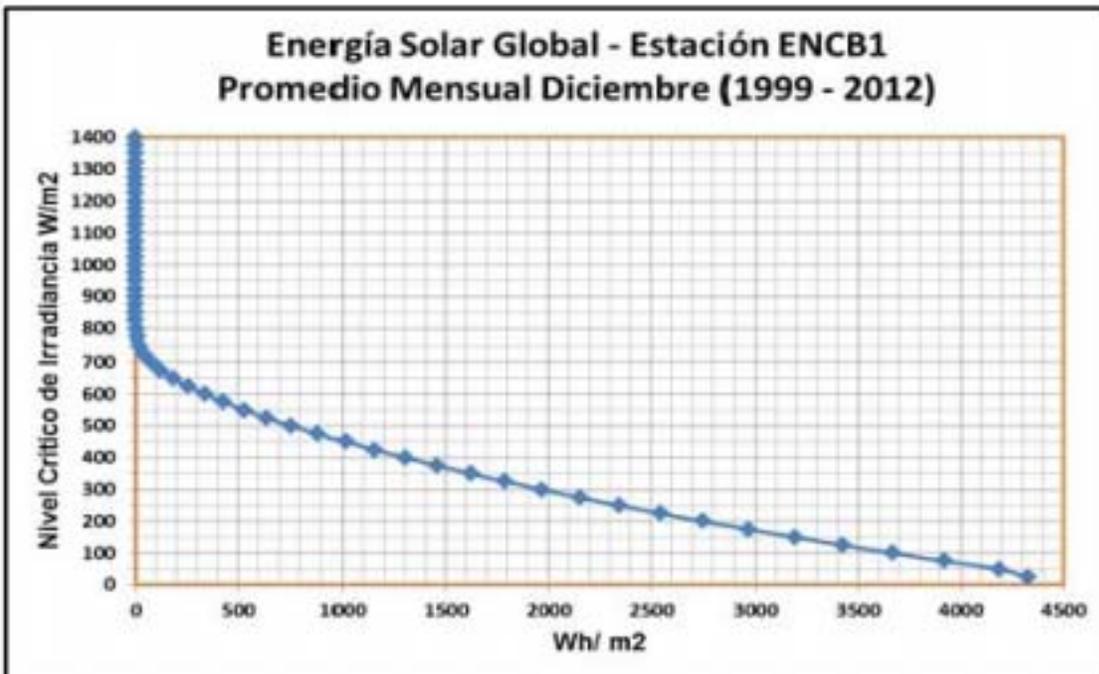
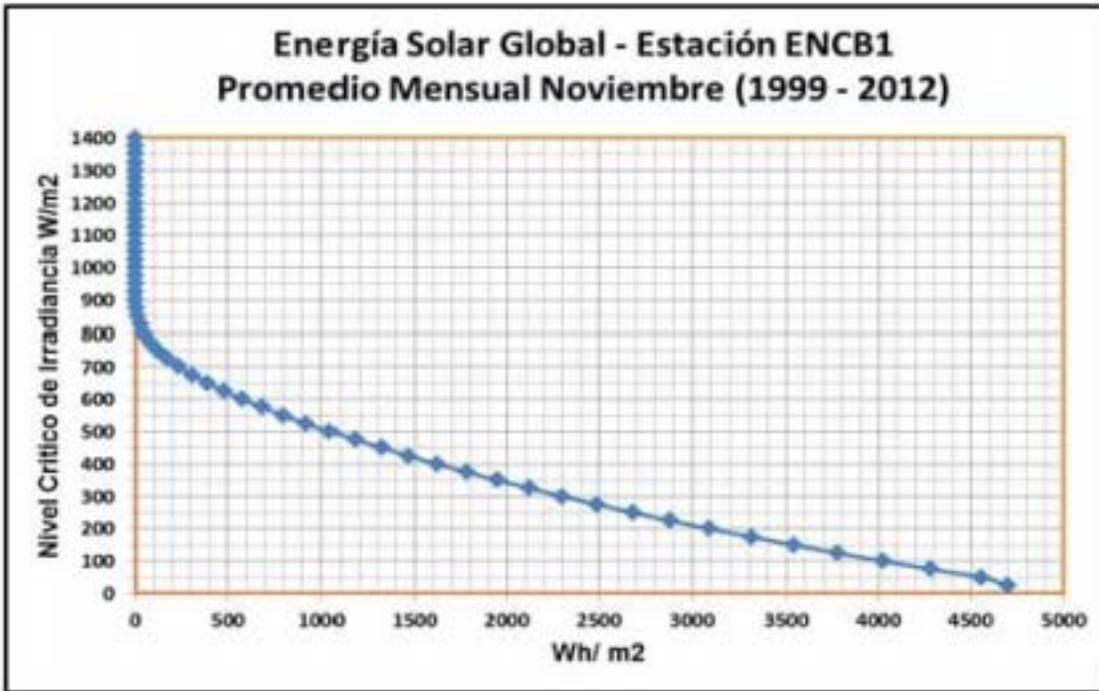


Figura B.20:



## Apéndice C

### Gráficas de la Estación Tezontle



Figura C.1:



Figura C.2:



Figura C.3:

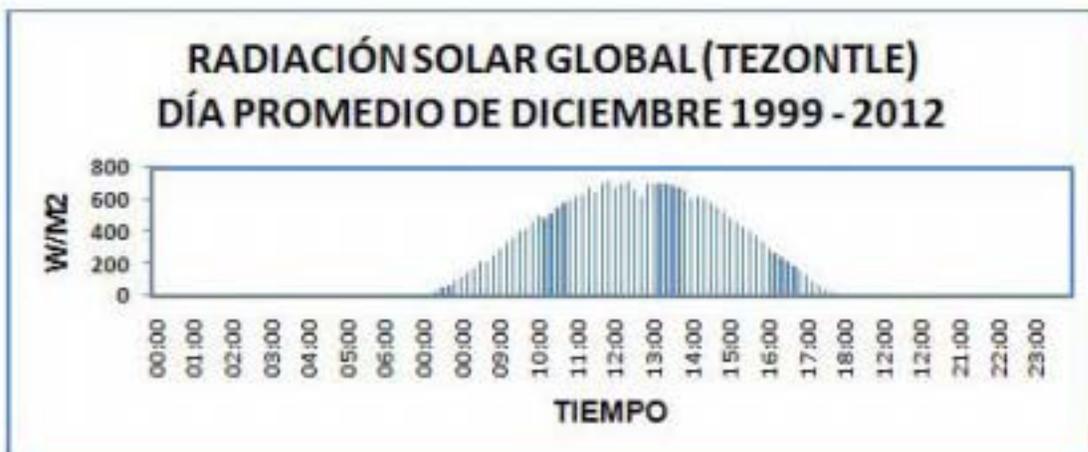


Figura C.4:

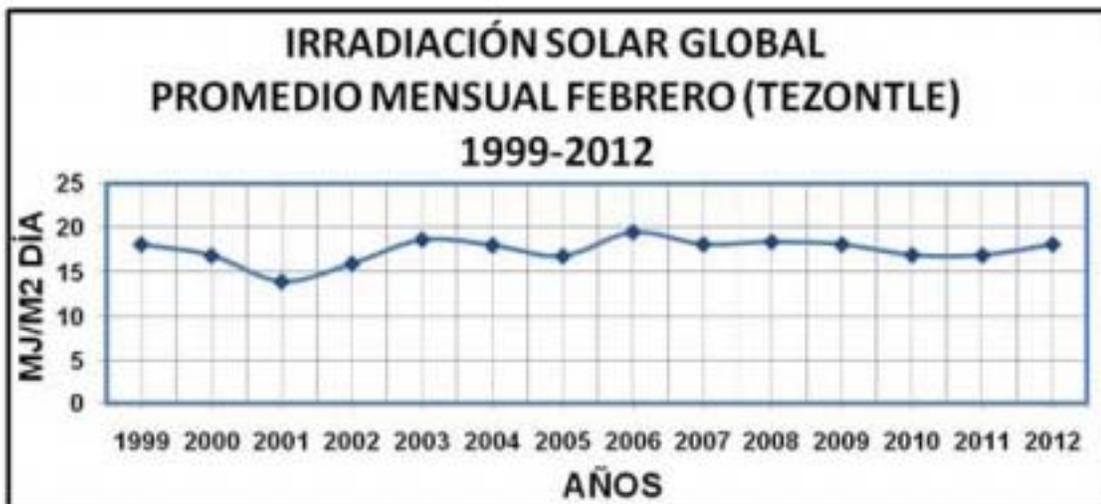
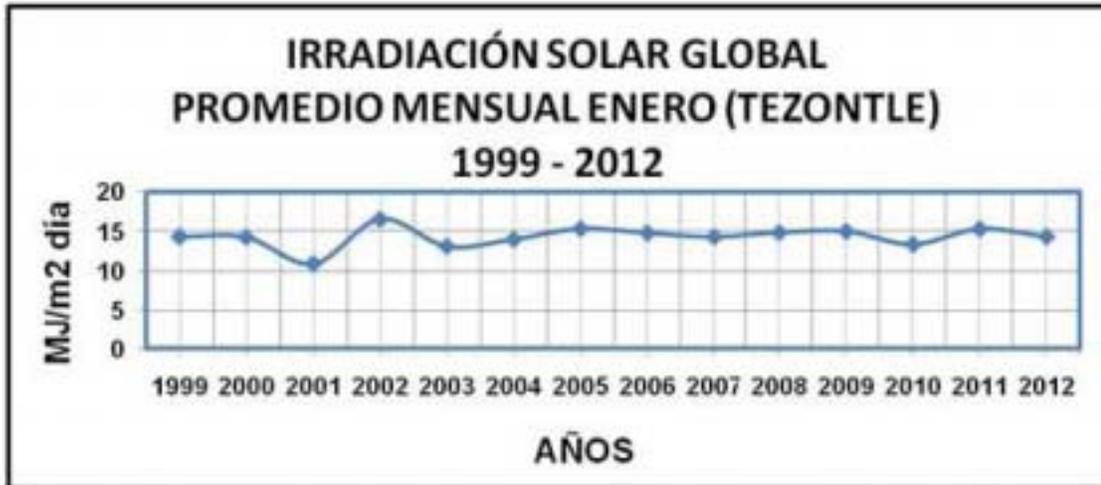


Figura C.5:

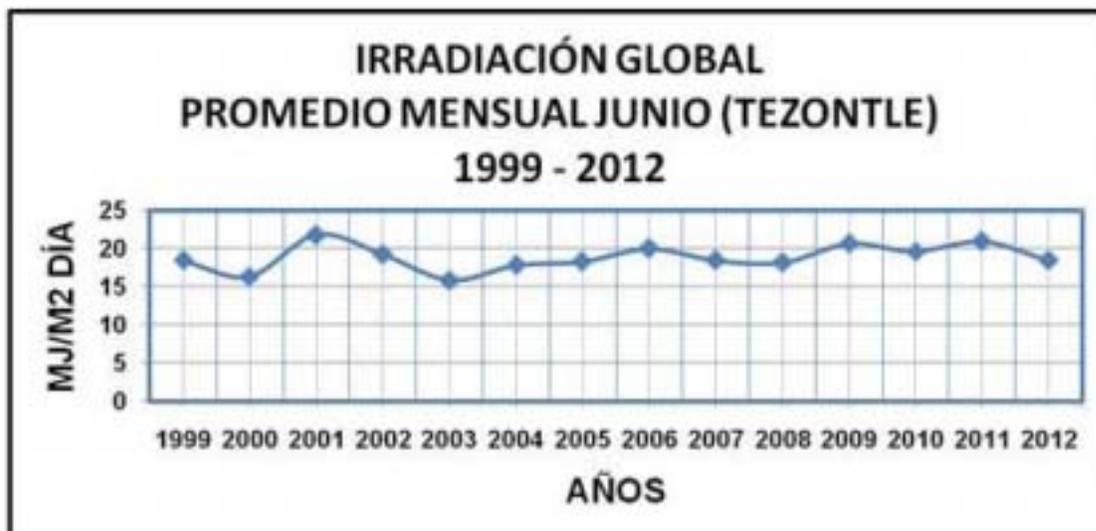
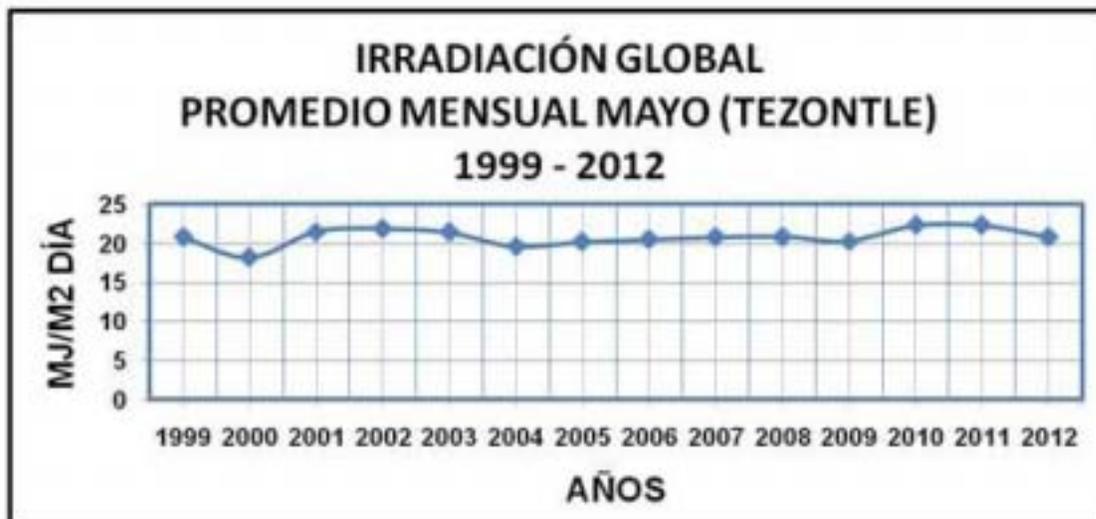
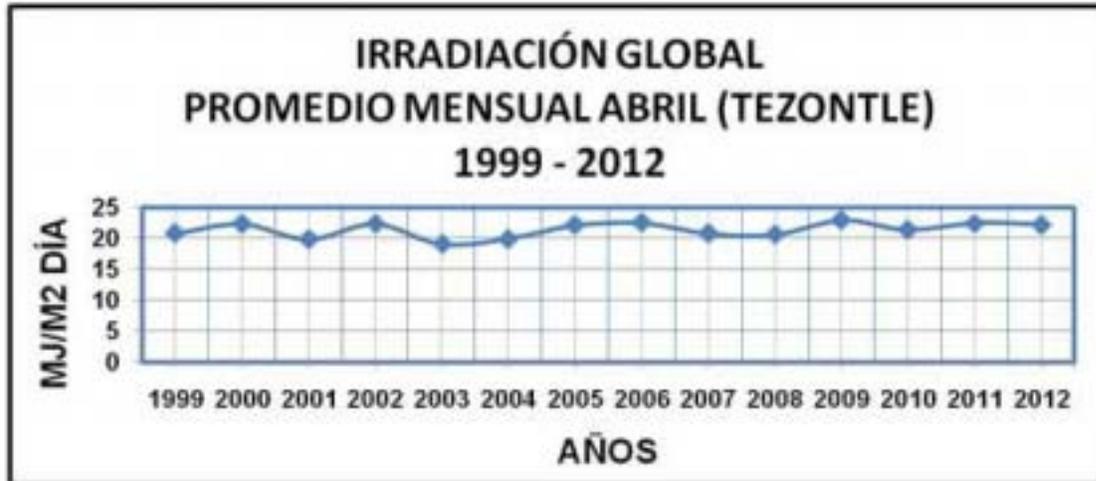


Figura C.6:

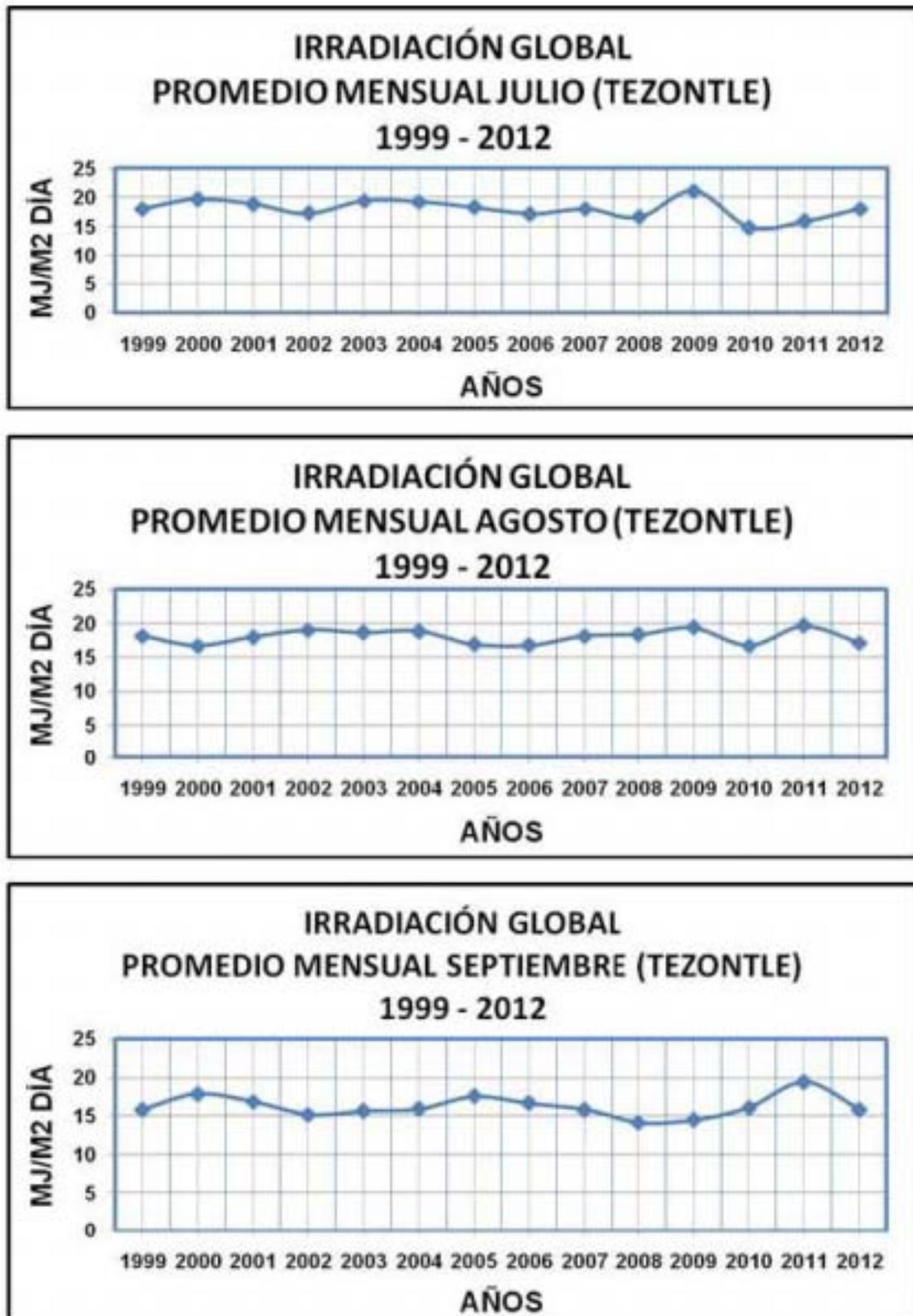


Figura C.7:

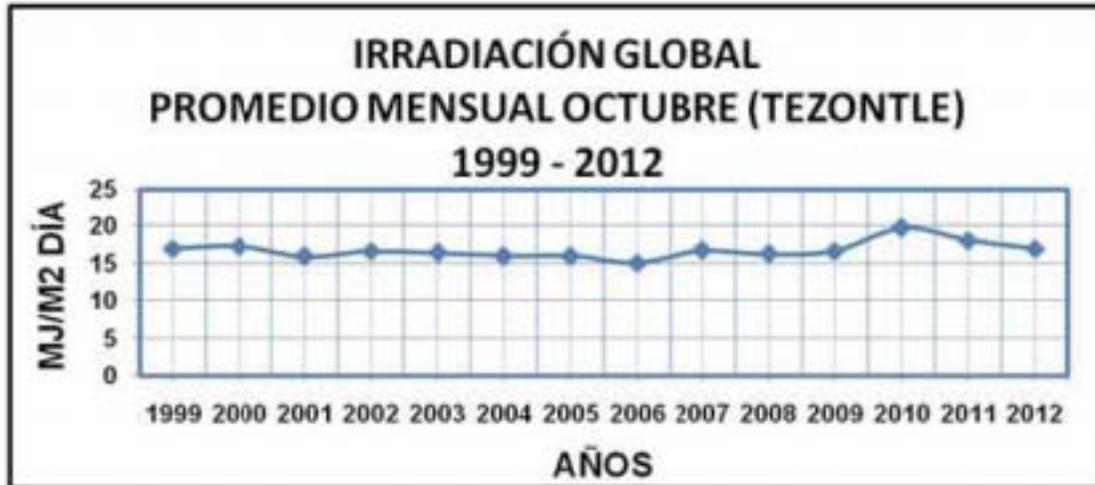


Figura C.8:





Figura C.10:



Figura C.11:



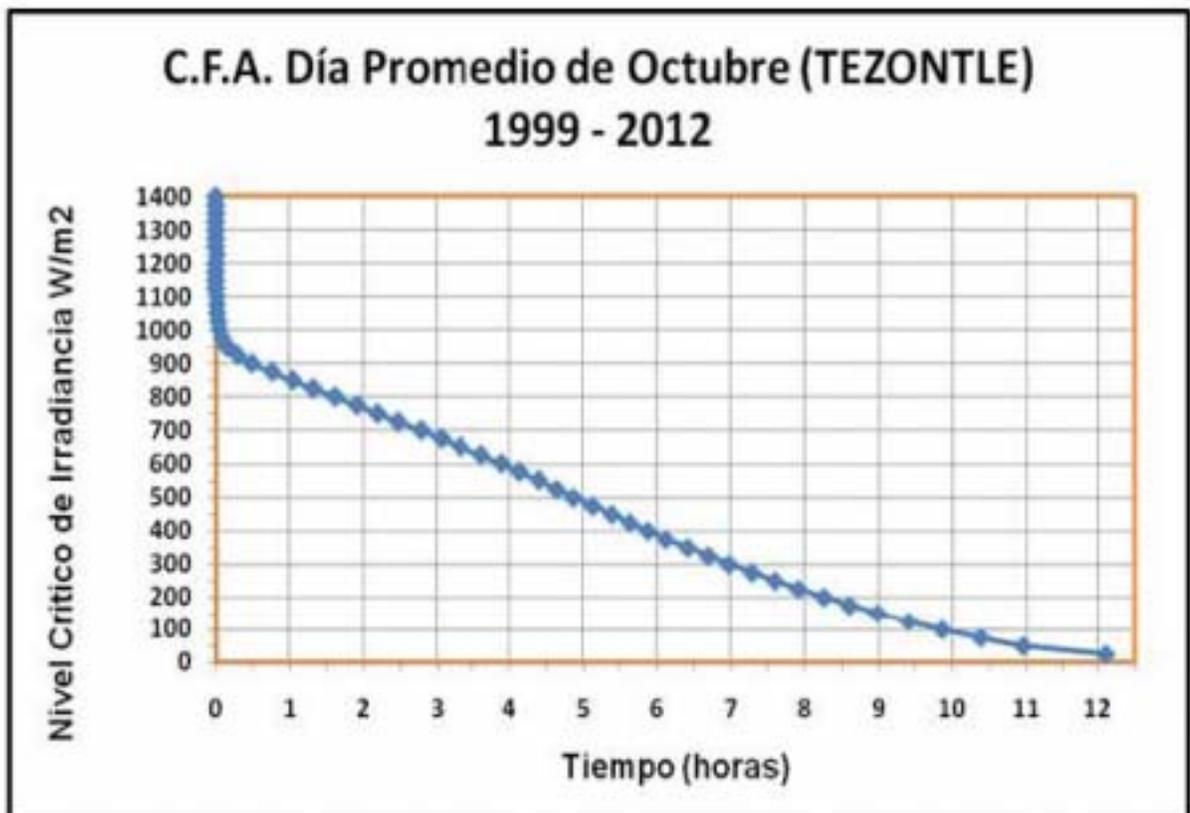


Figura C.13:



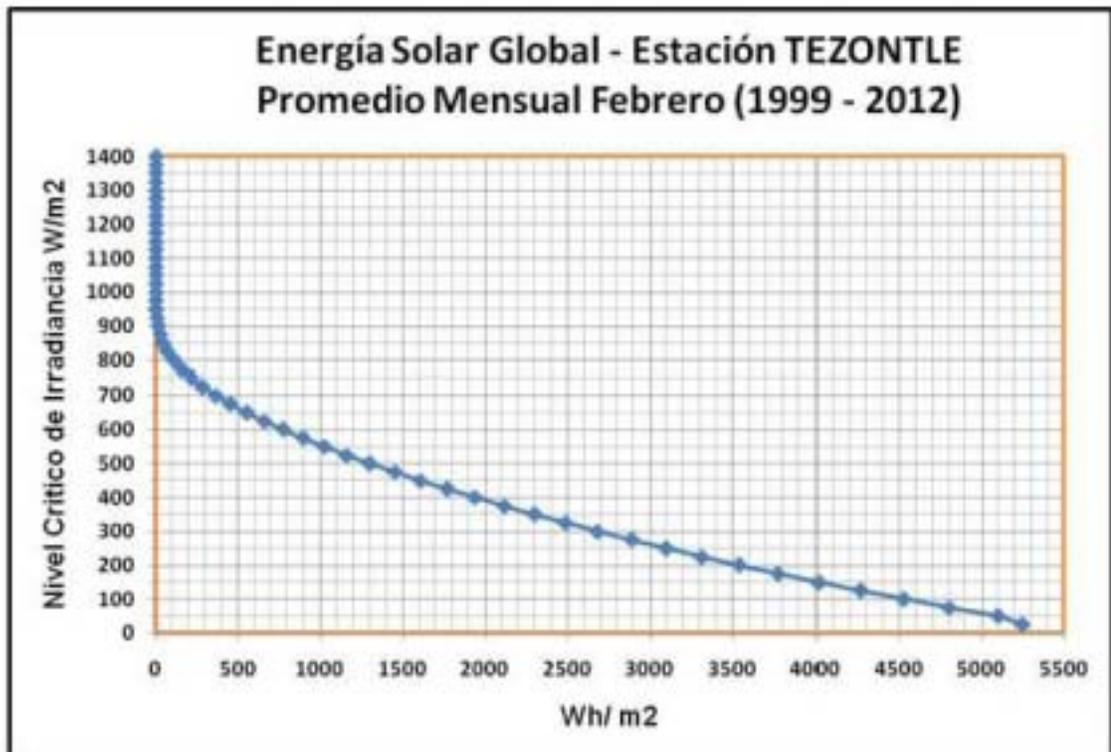
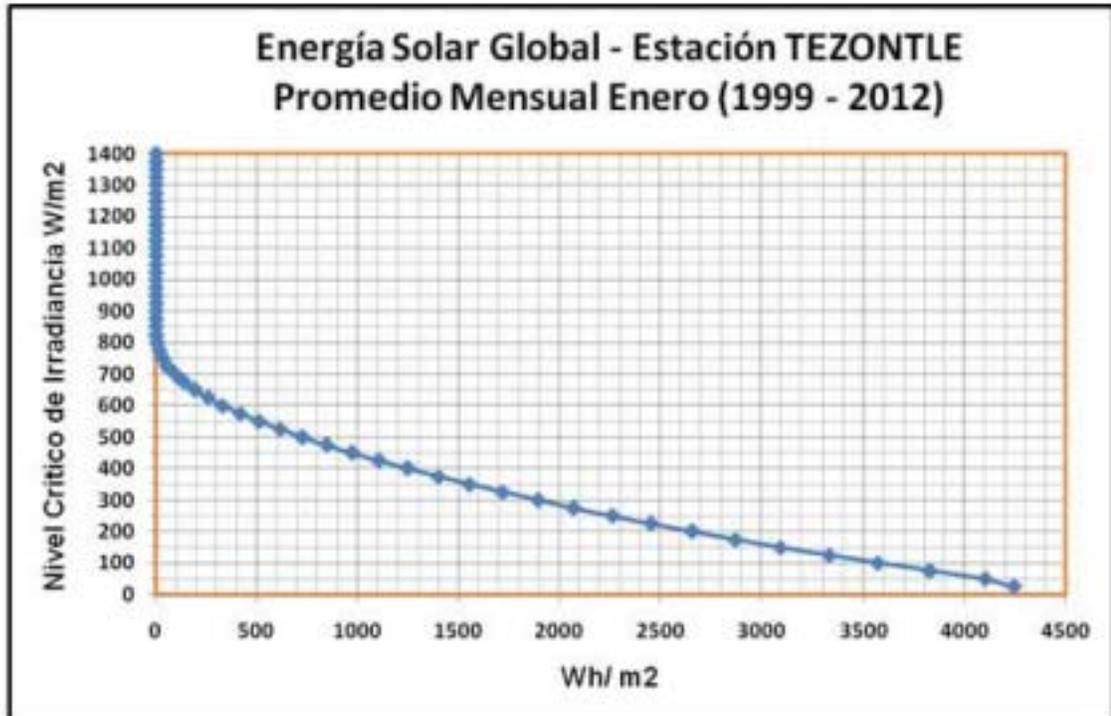


Figura C.15:

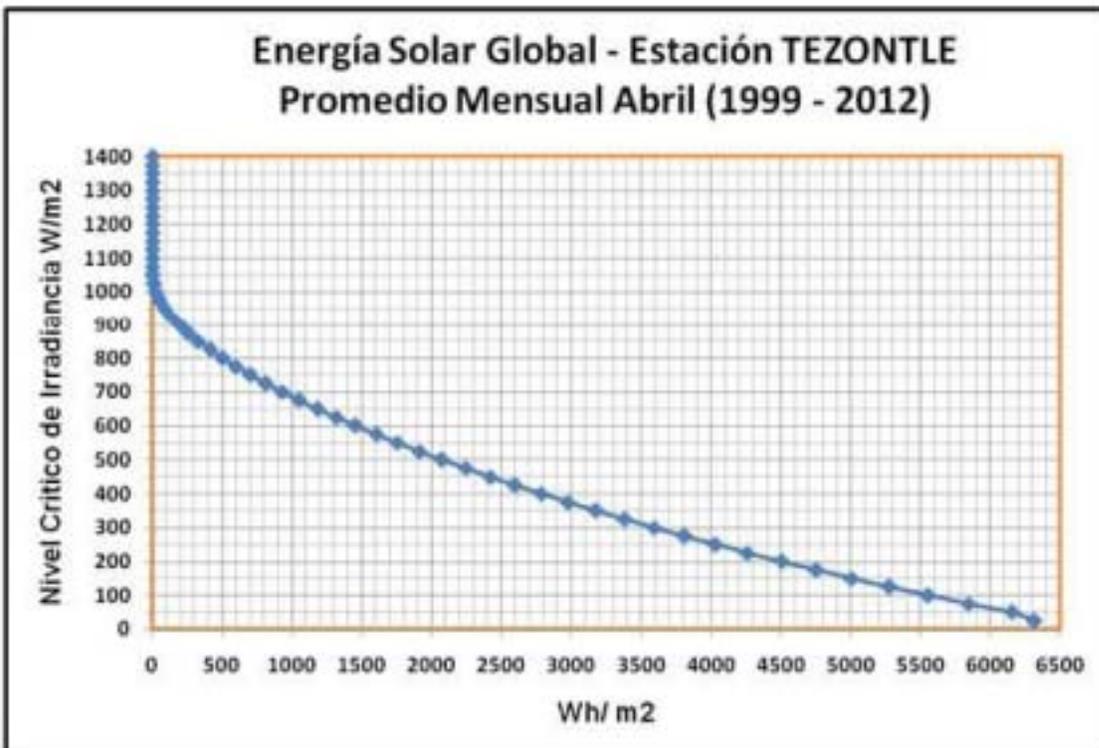
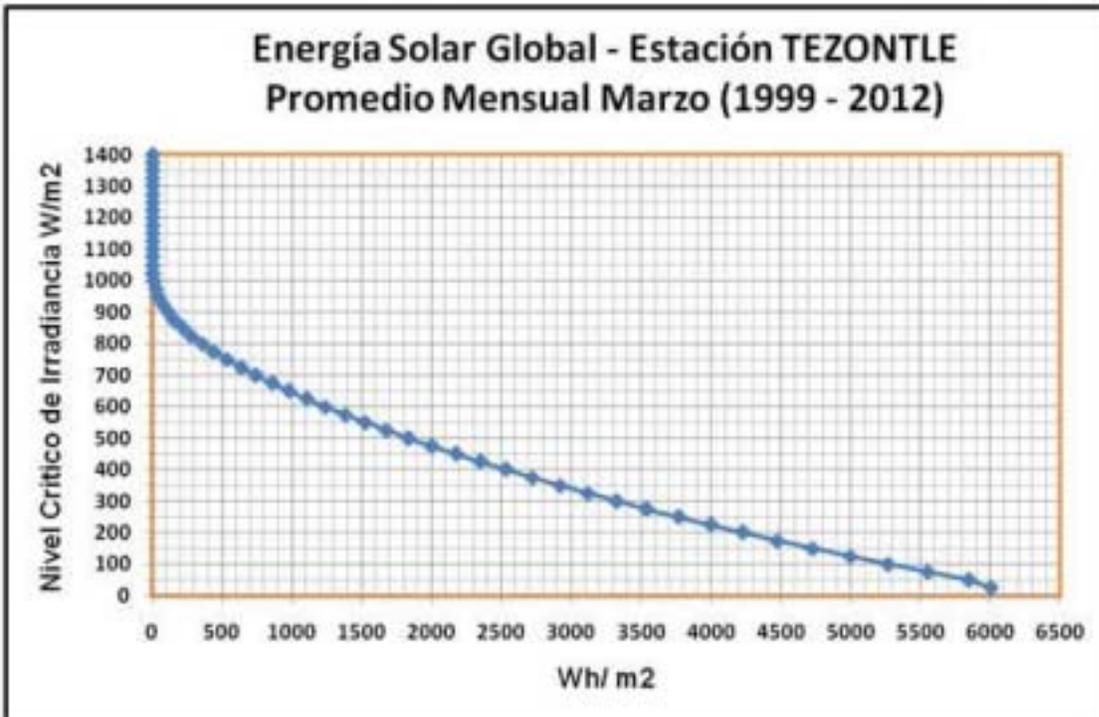


Figura C.16:

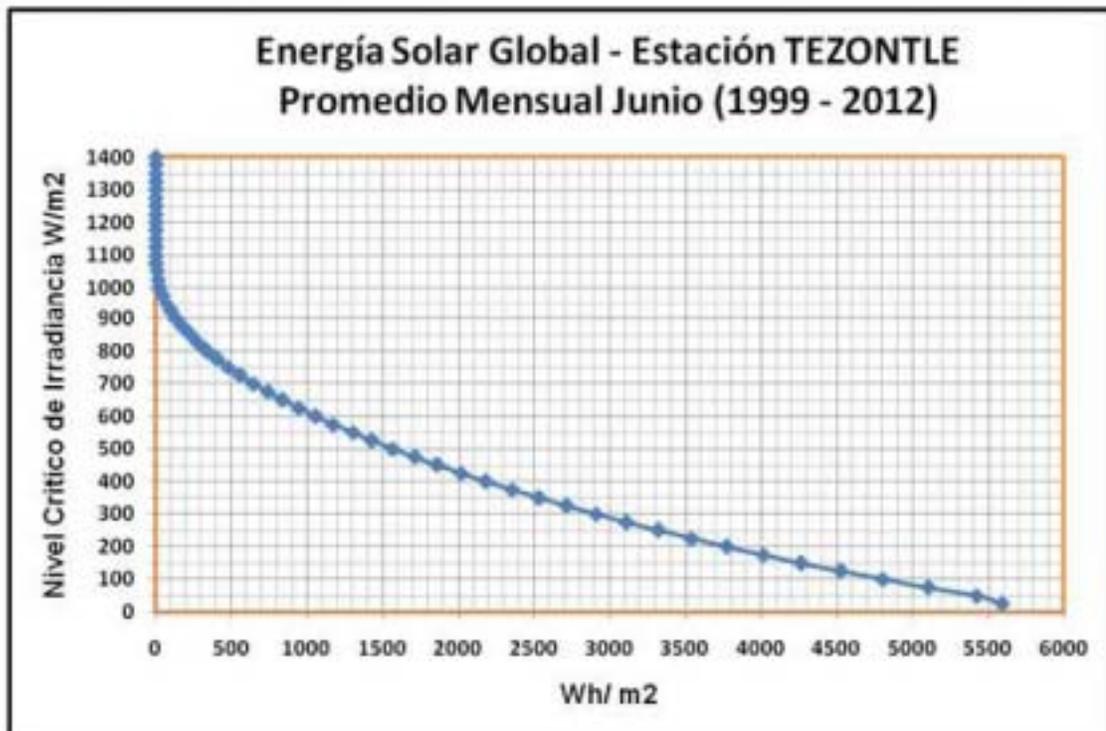
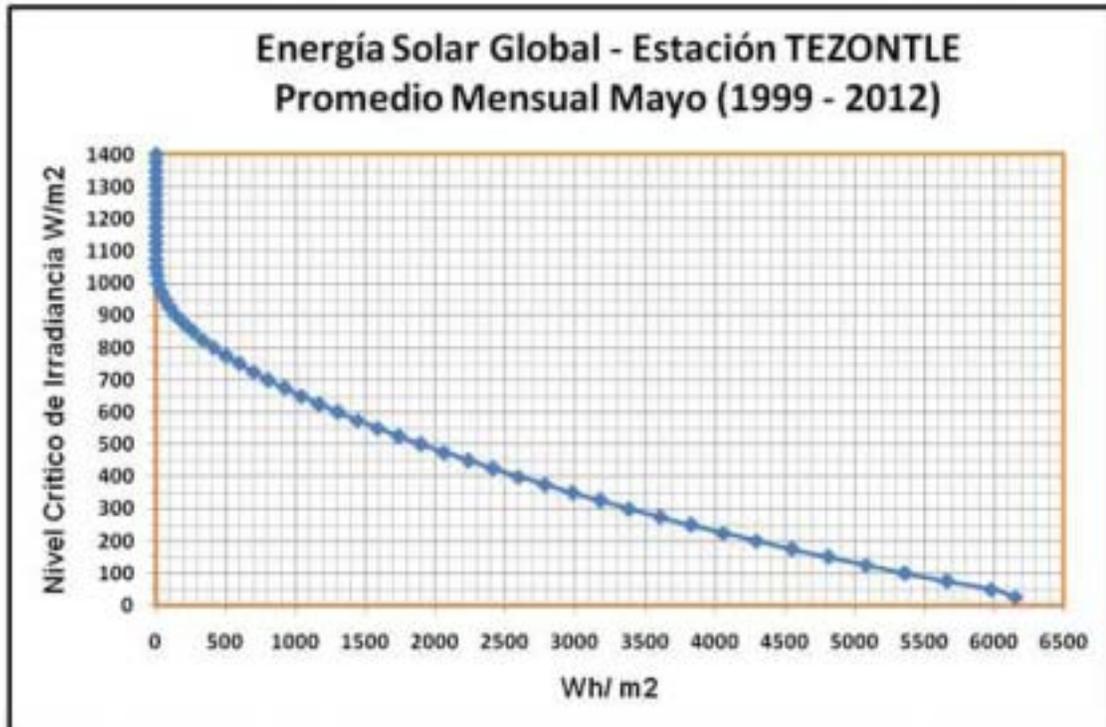


Figura C.17:

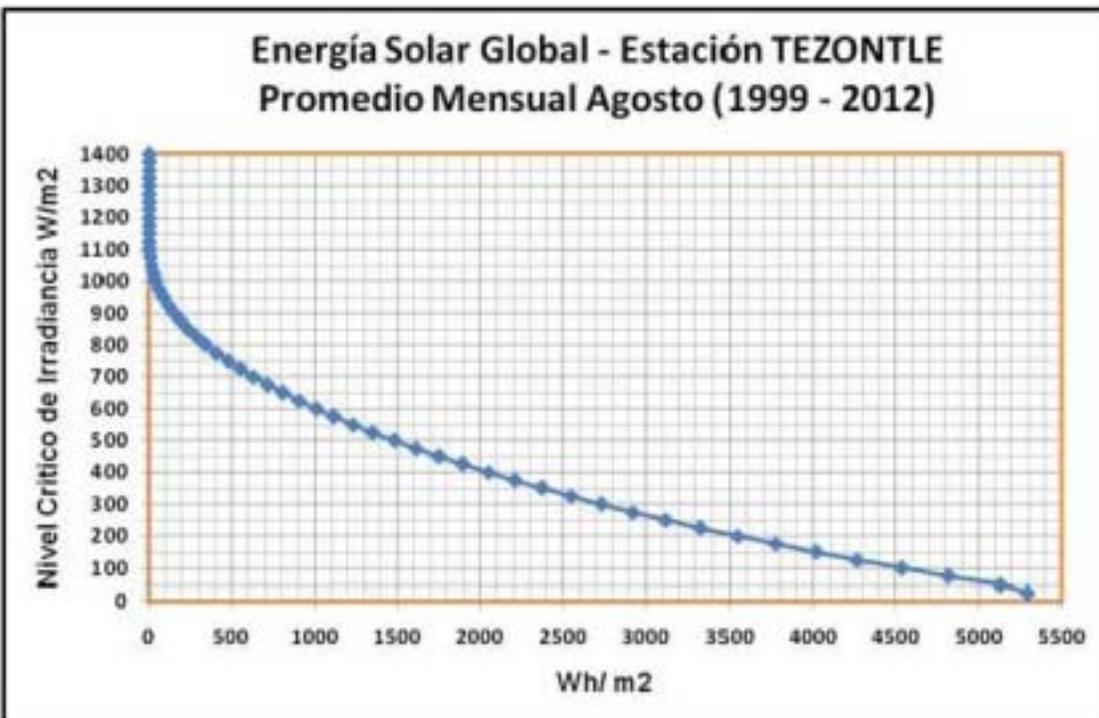
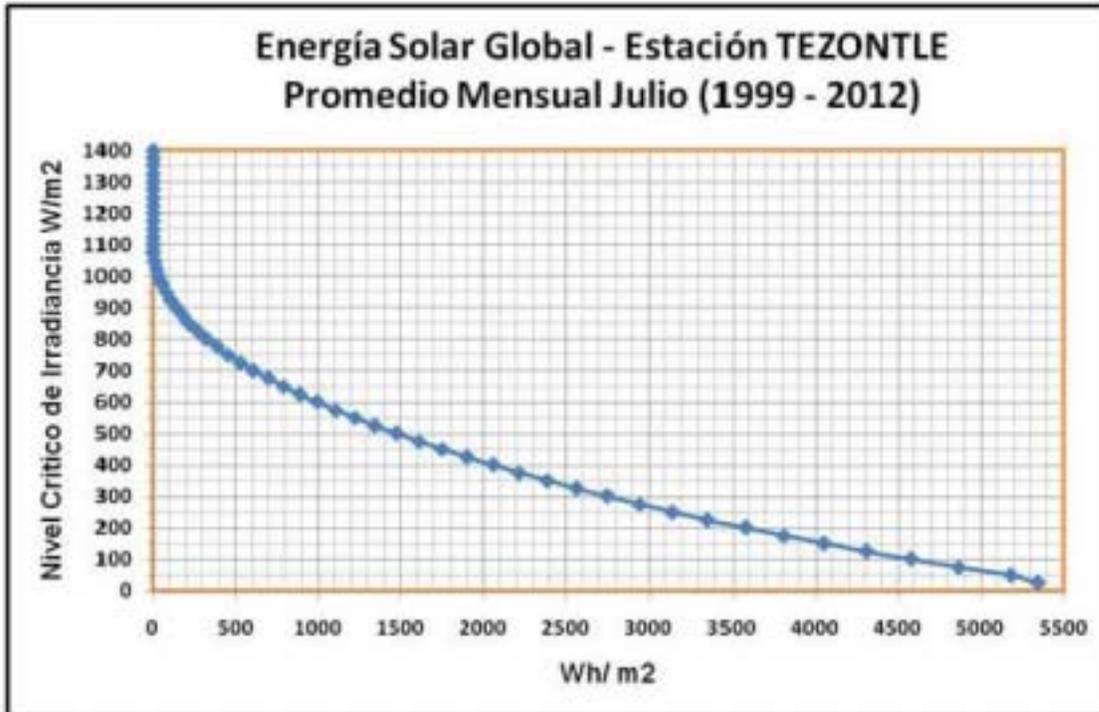


Figura C.18:

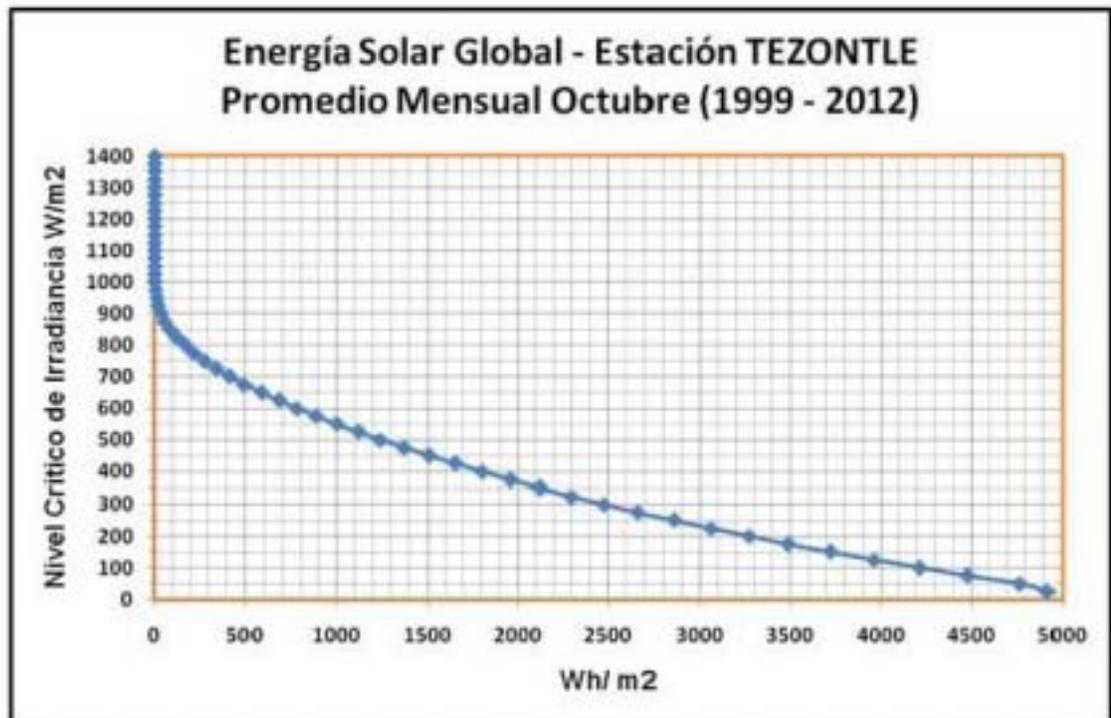
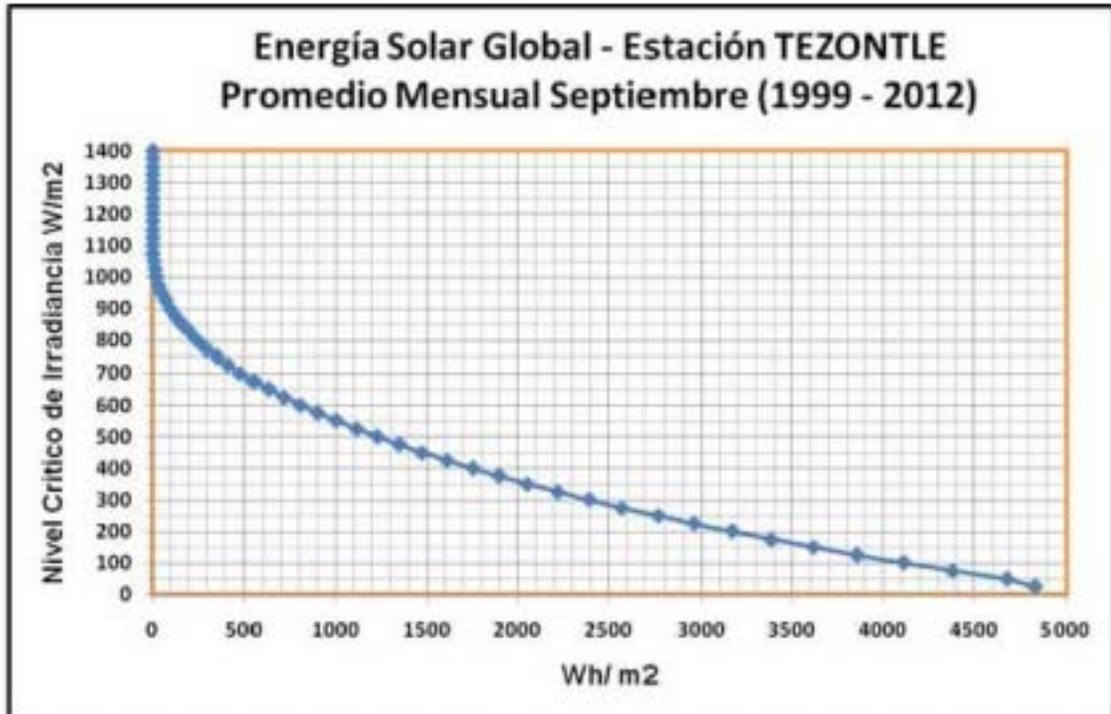


Figura C.19:

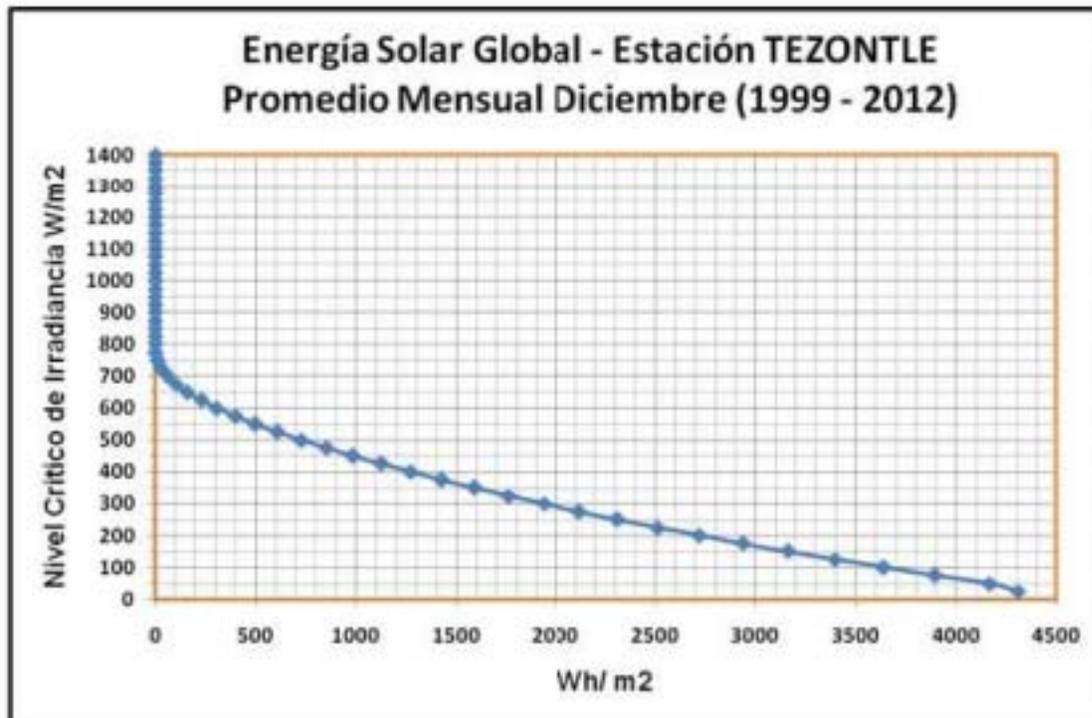
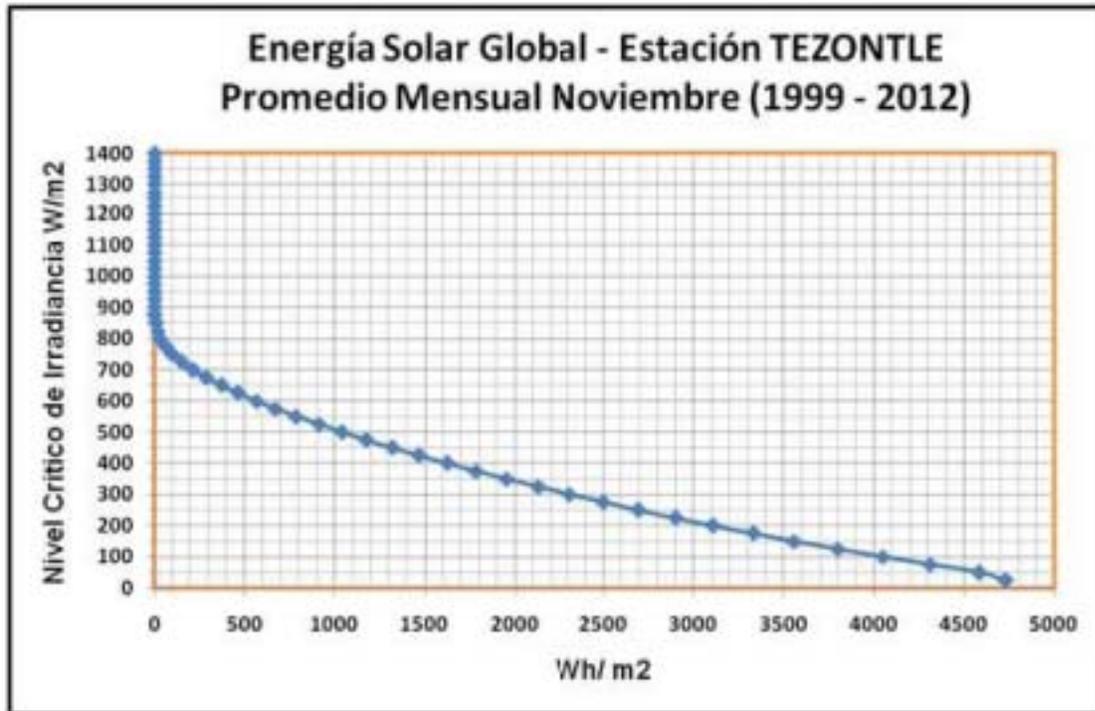


Figura C.20:



## Apéndice D

### Gráficas de la Estación Ecoguardas

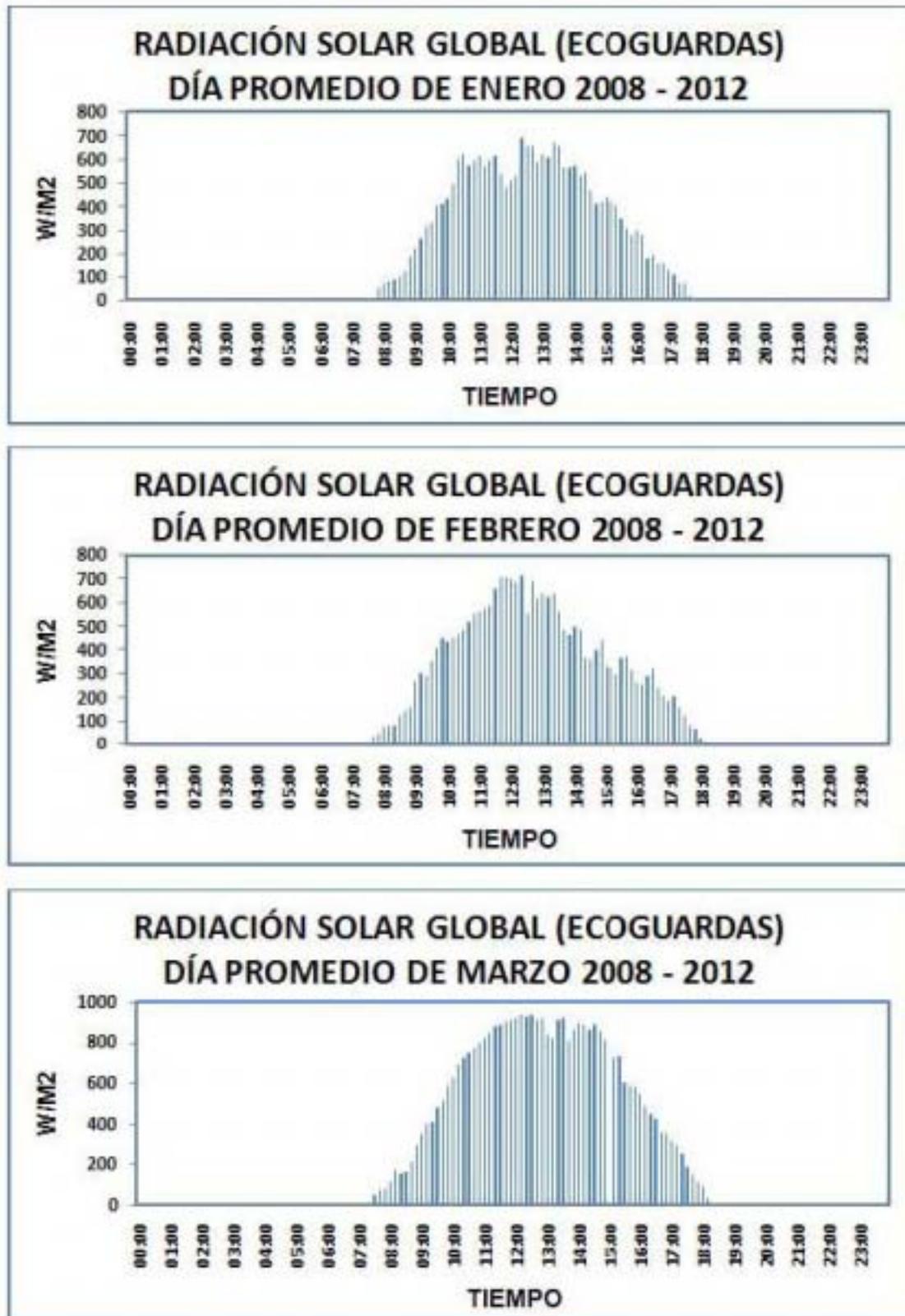


Figura D.1:



Figura D.2:

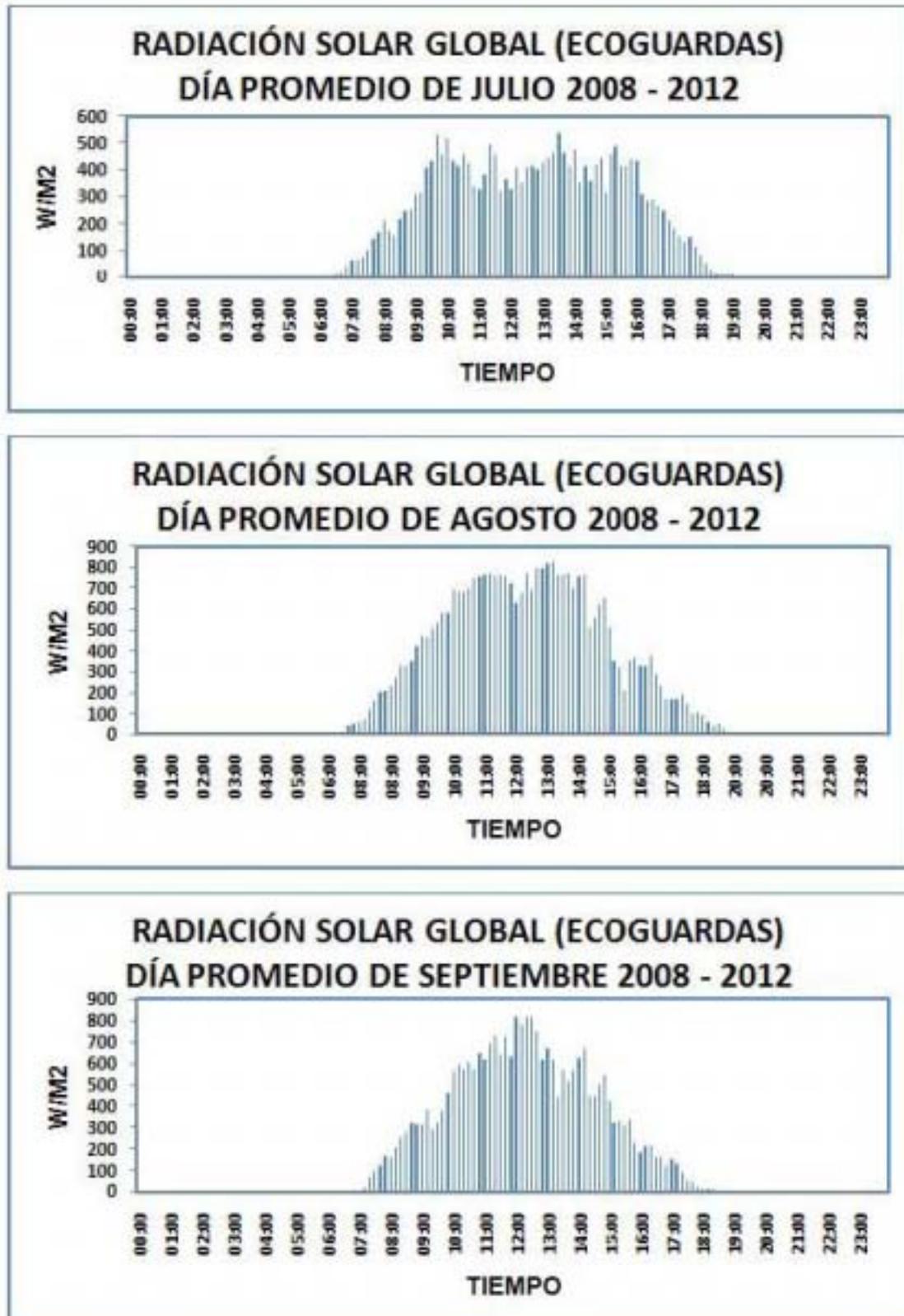


Figura D.3:

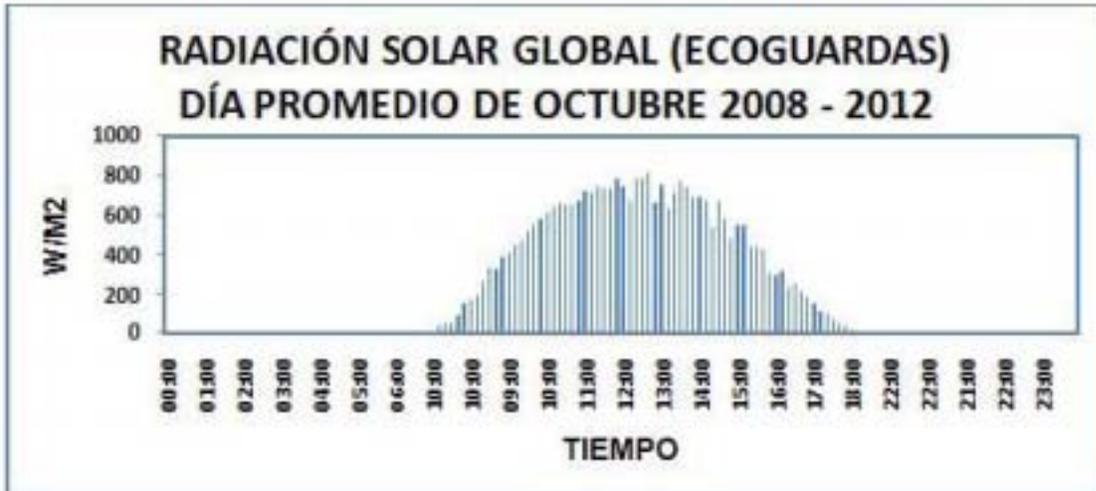


Figura D.4:

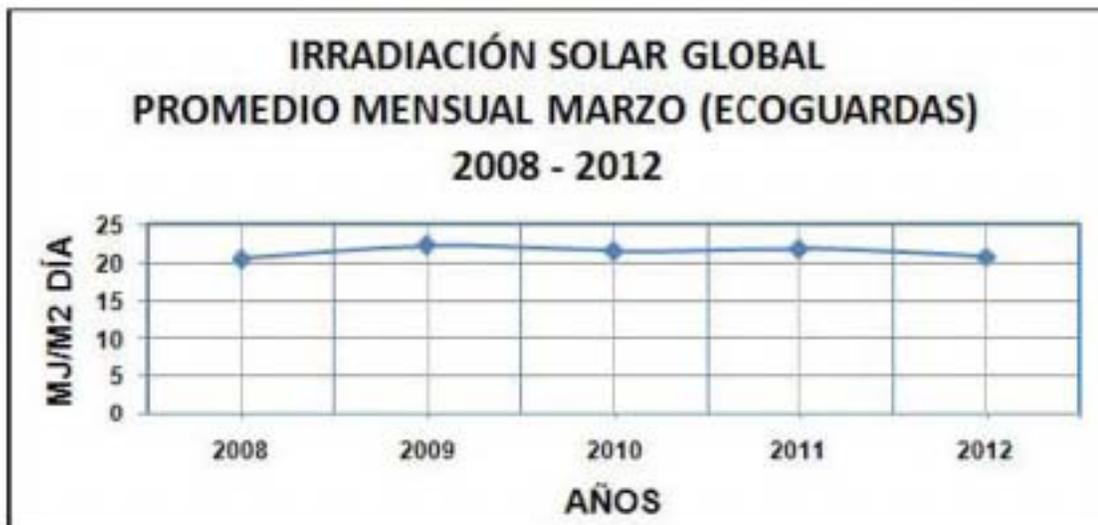
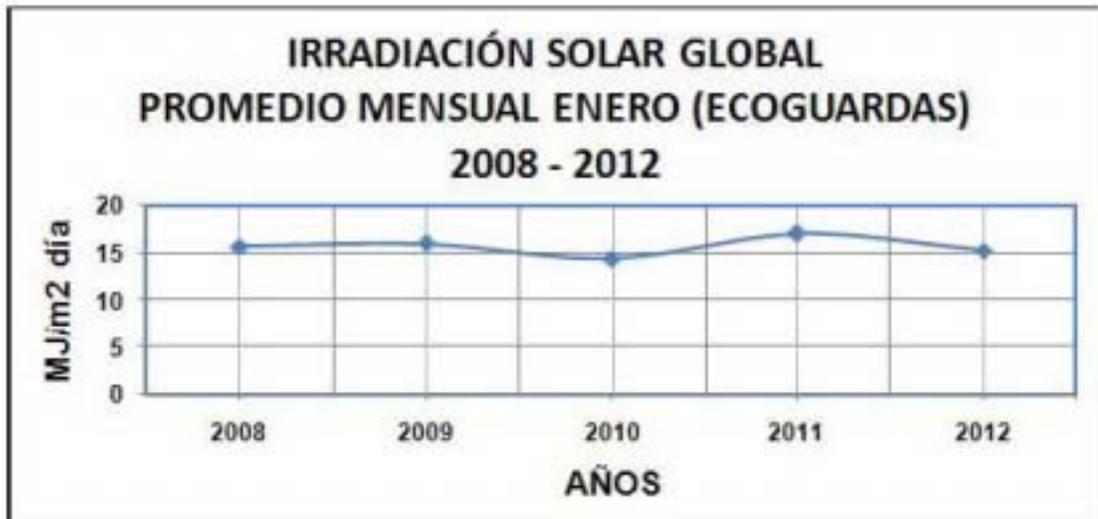


Figura D.5:

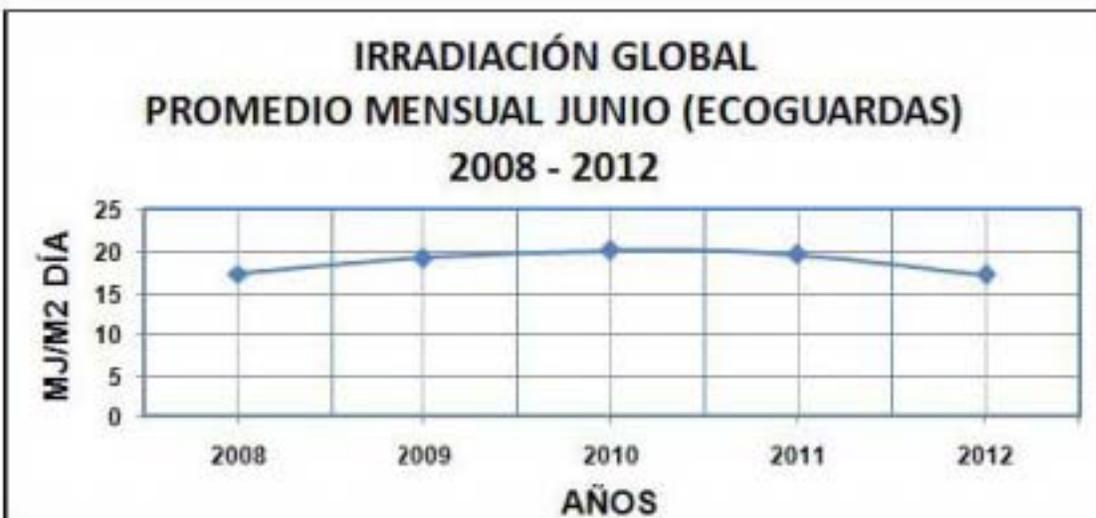
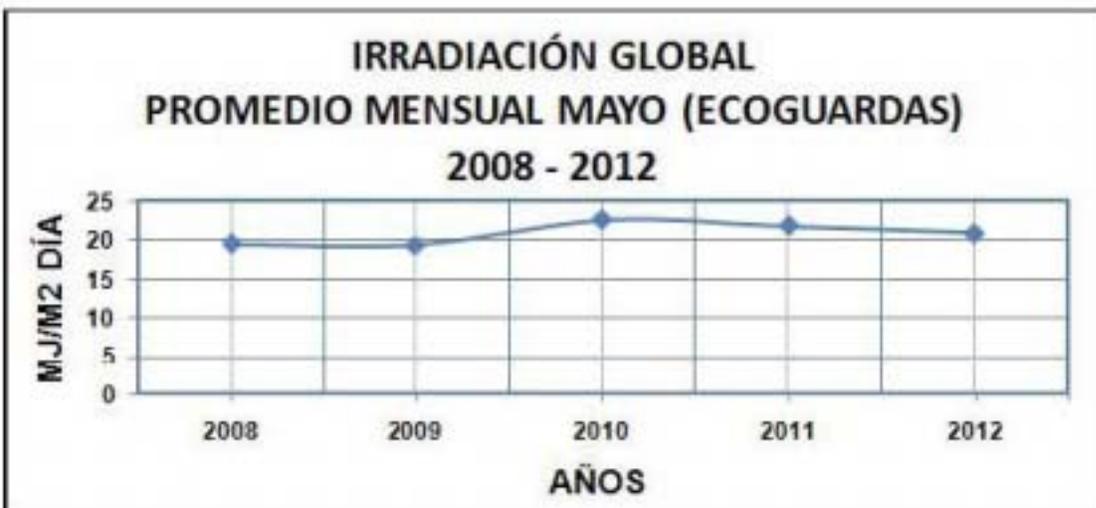


Figura D.6:

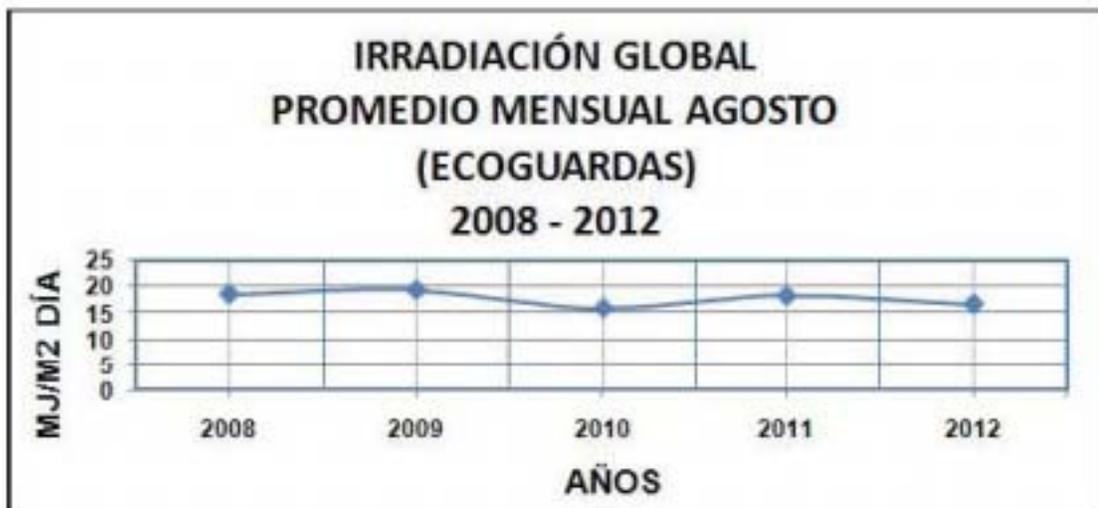
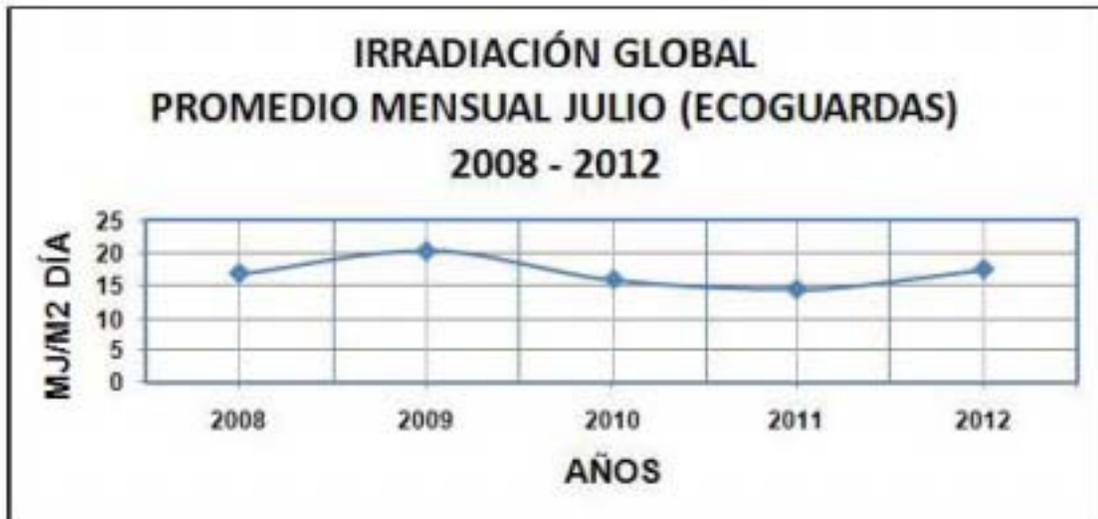


Figura D.7:



Figura D.8:



Figura D.9:



Figura D.10:



Figura D.11:

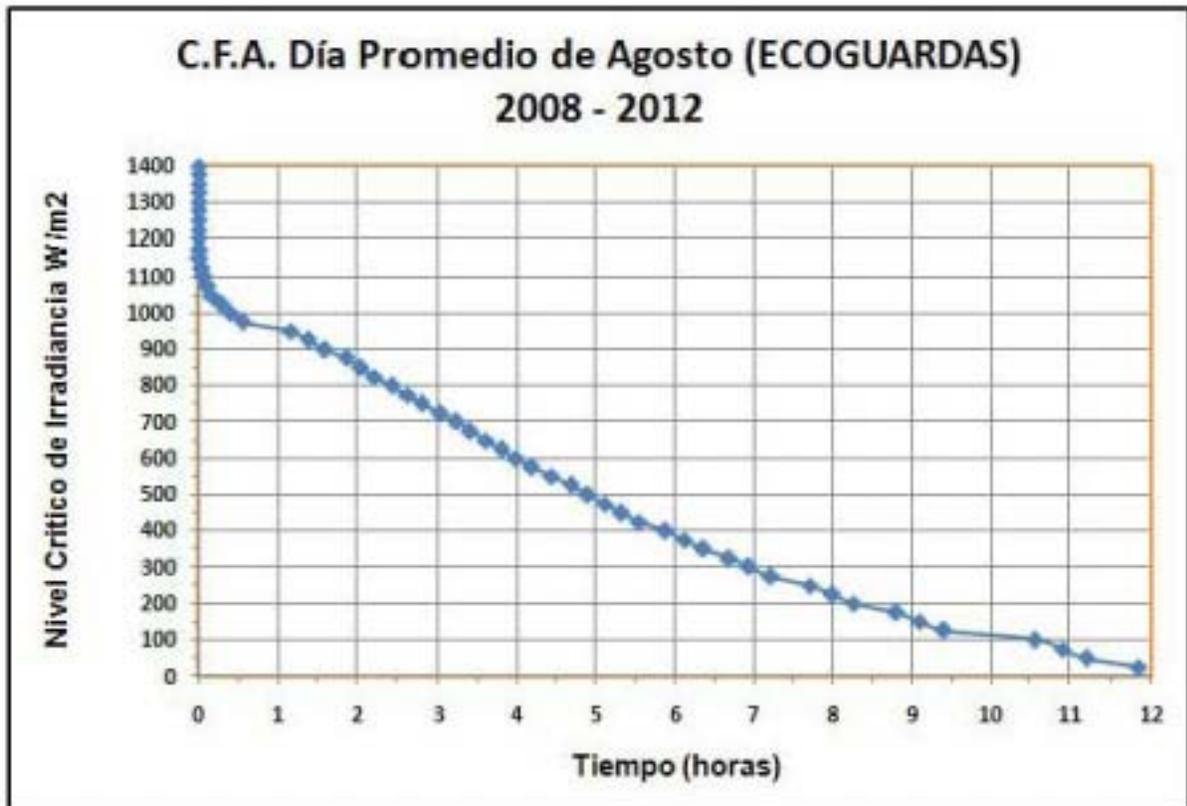


Figura D.12:



Figura D.13:



Figura D.14:

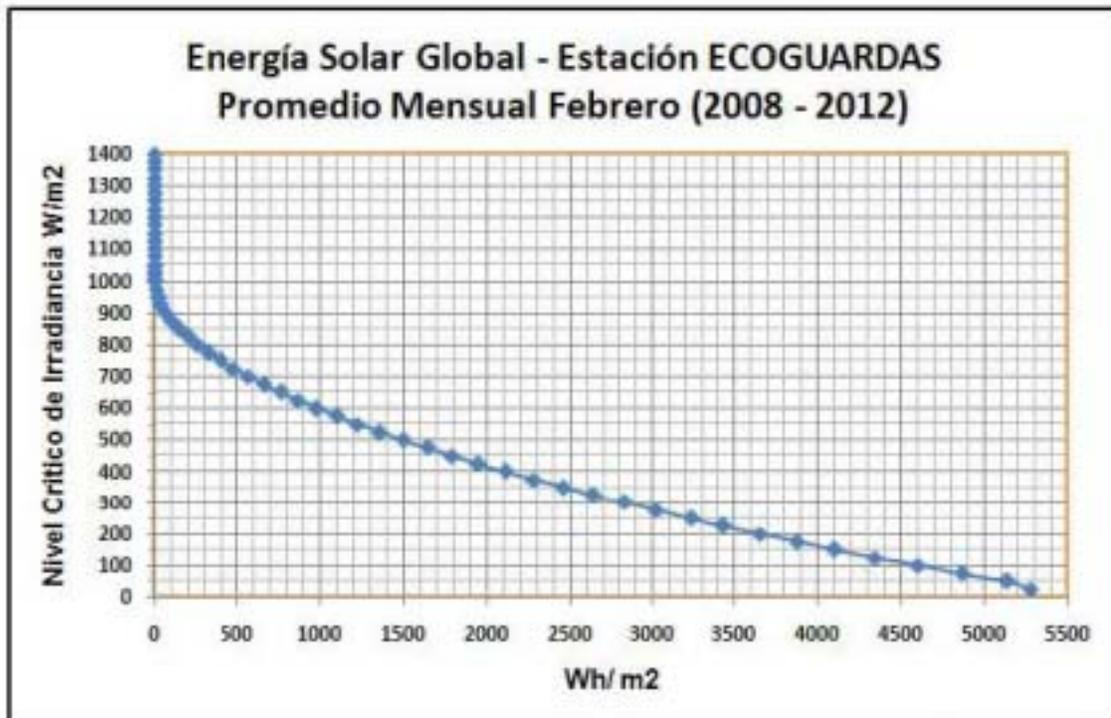
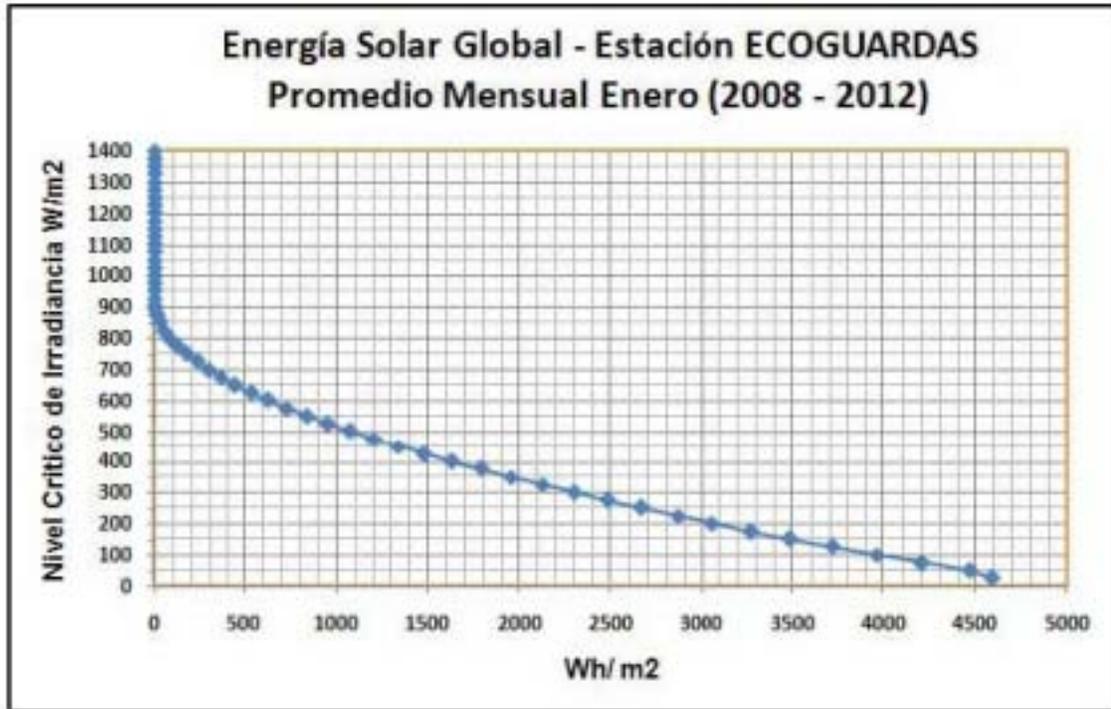


Figura D.15:

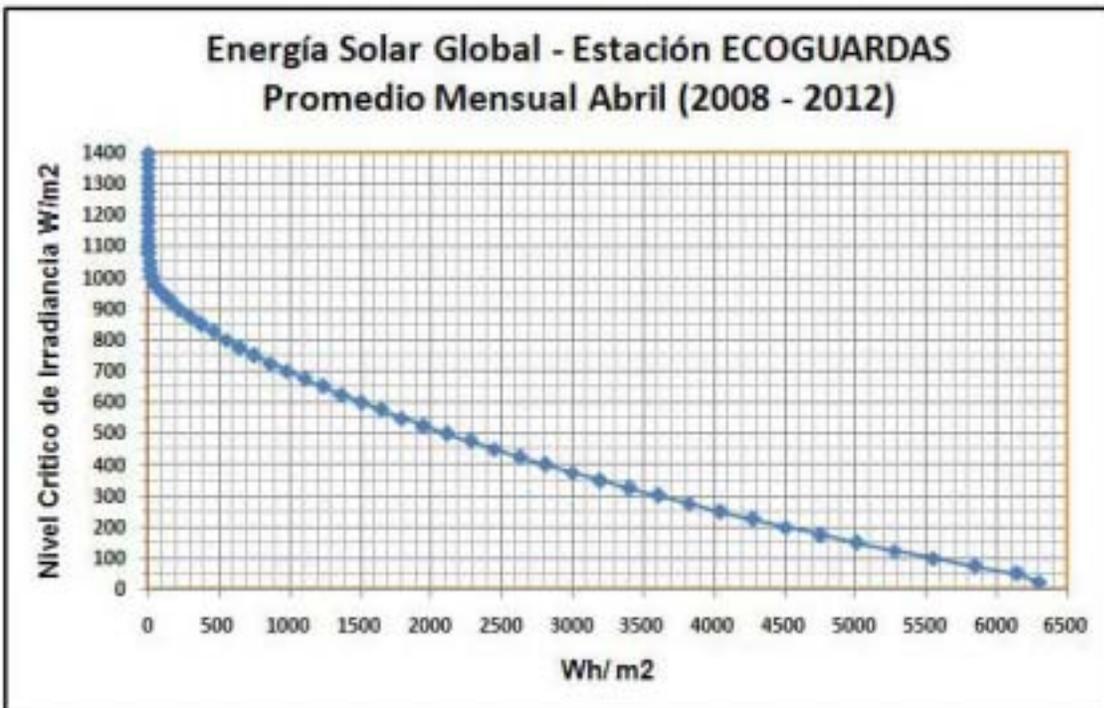
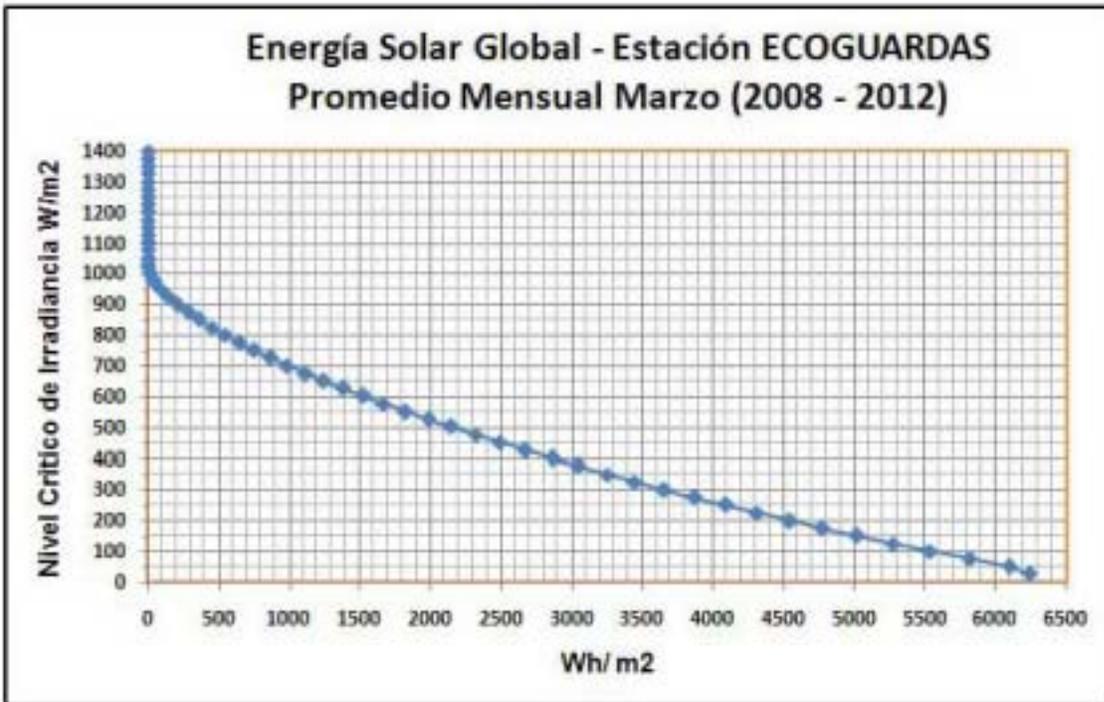


Figura D.16:

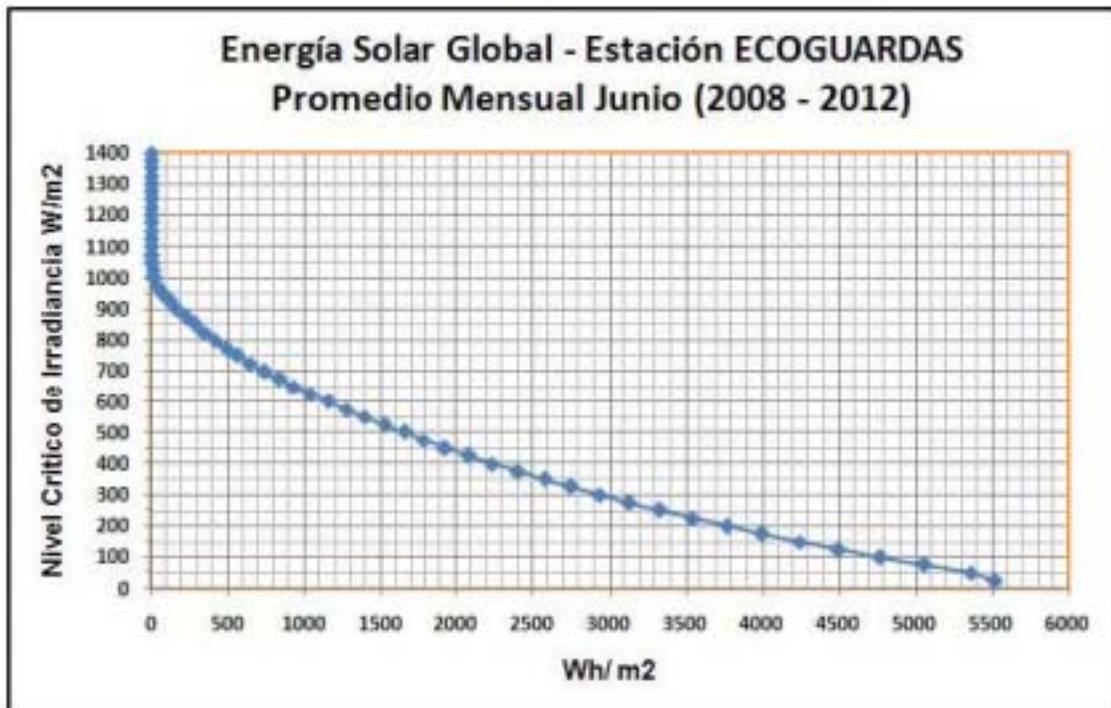
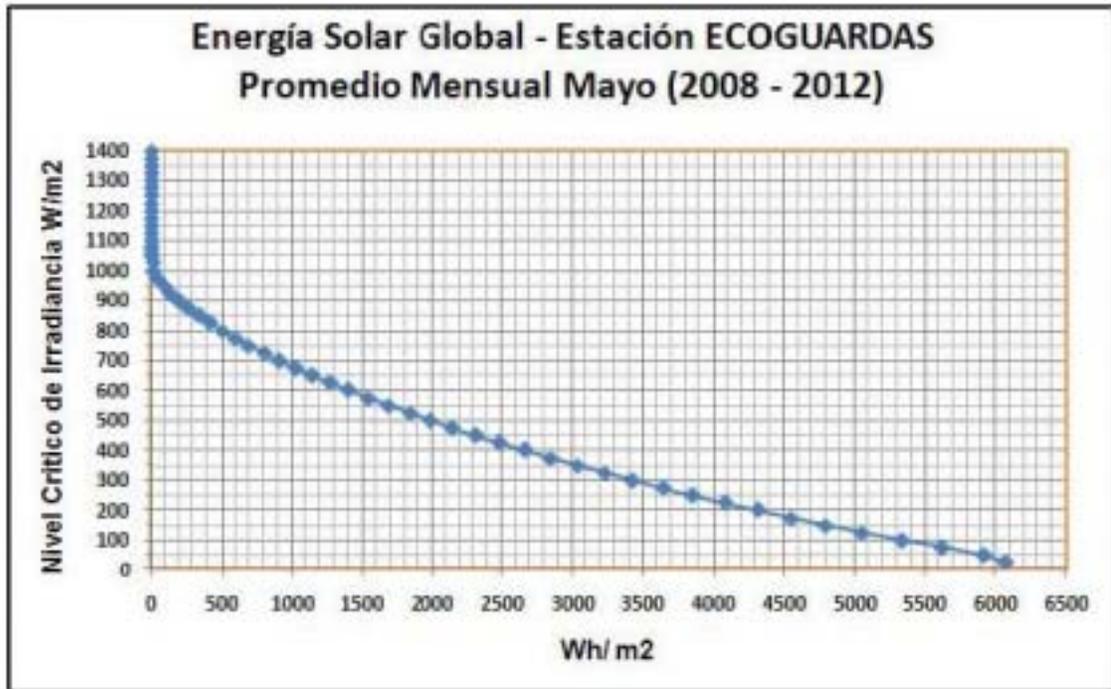


Figura D.17:

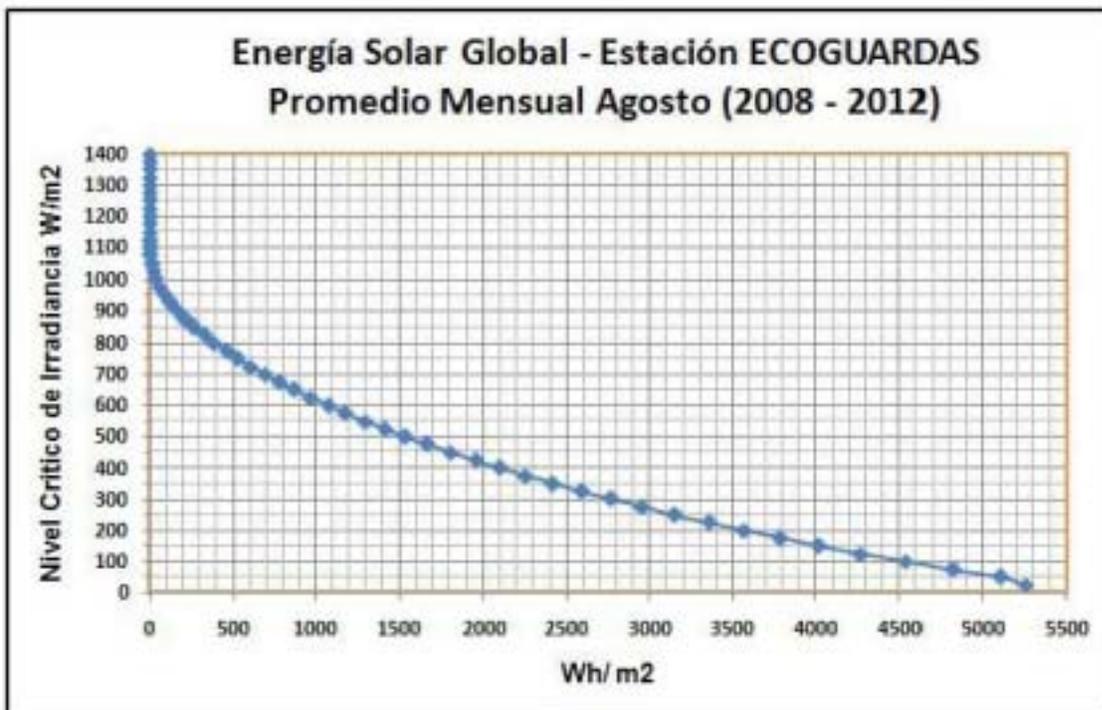
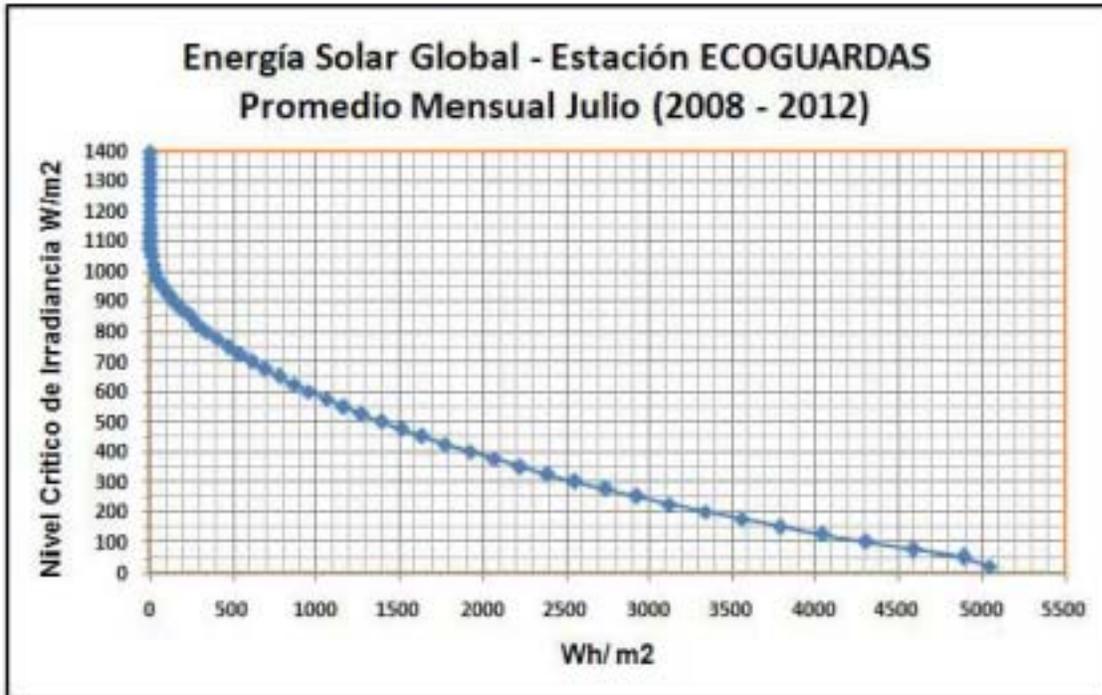


Figura D.18:

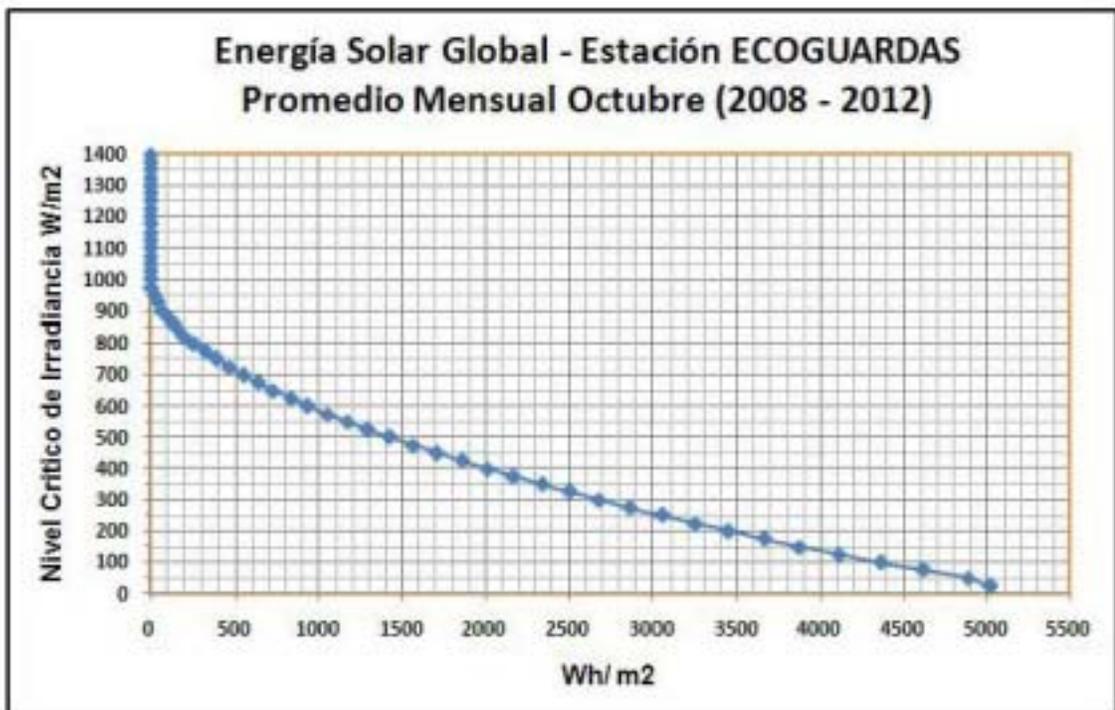
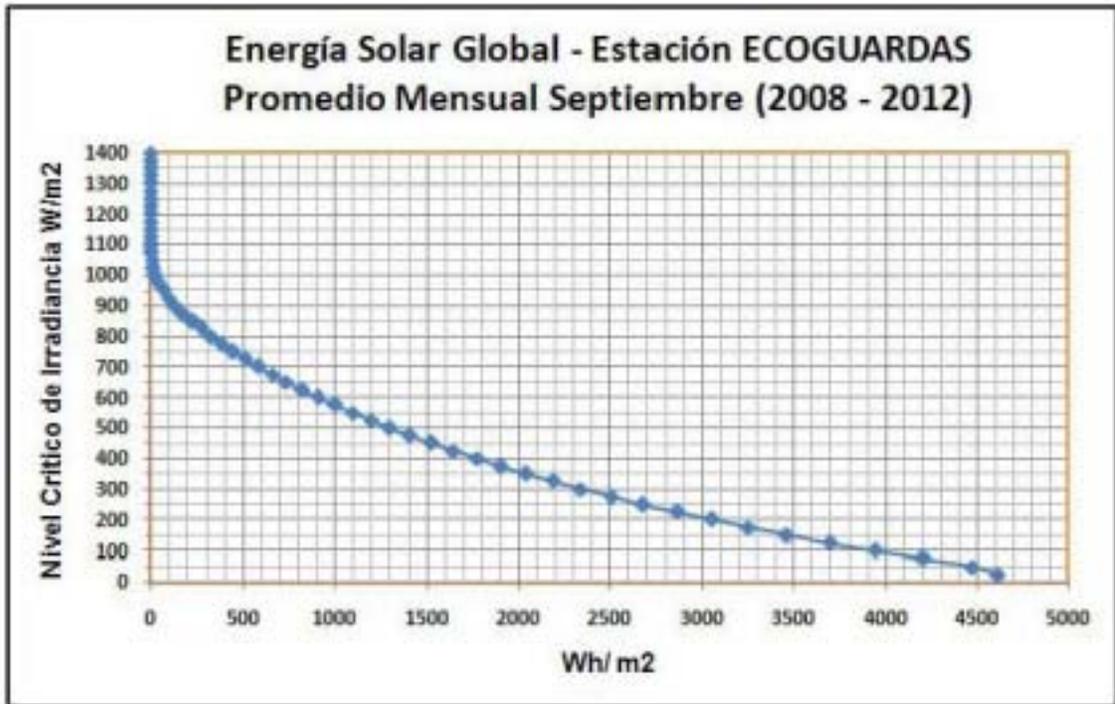


Figura D.19:

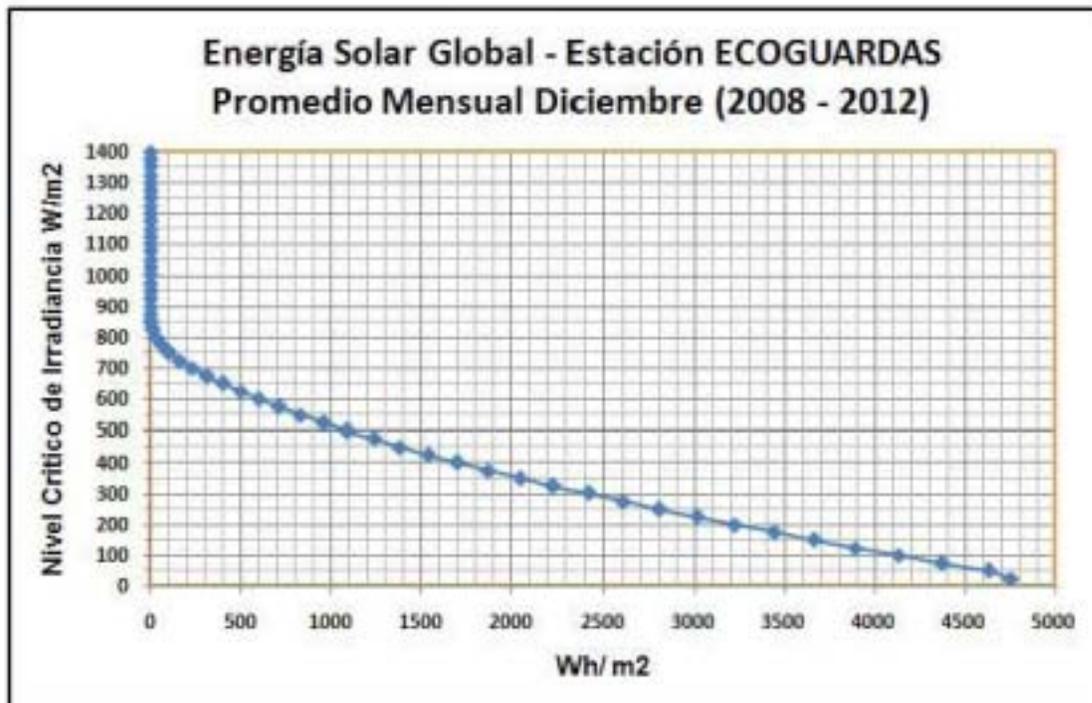
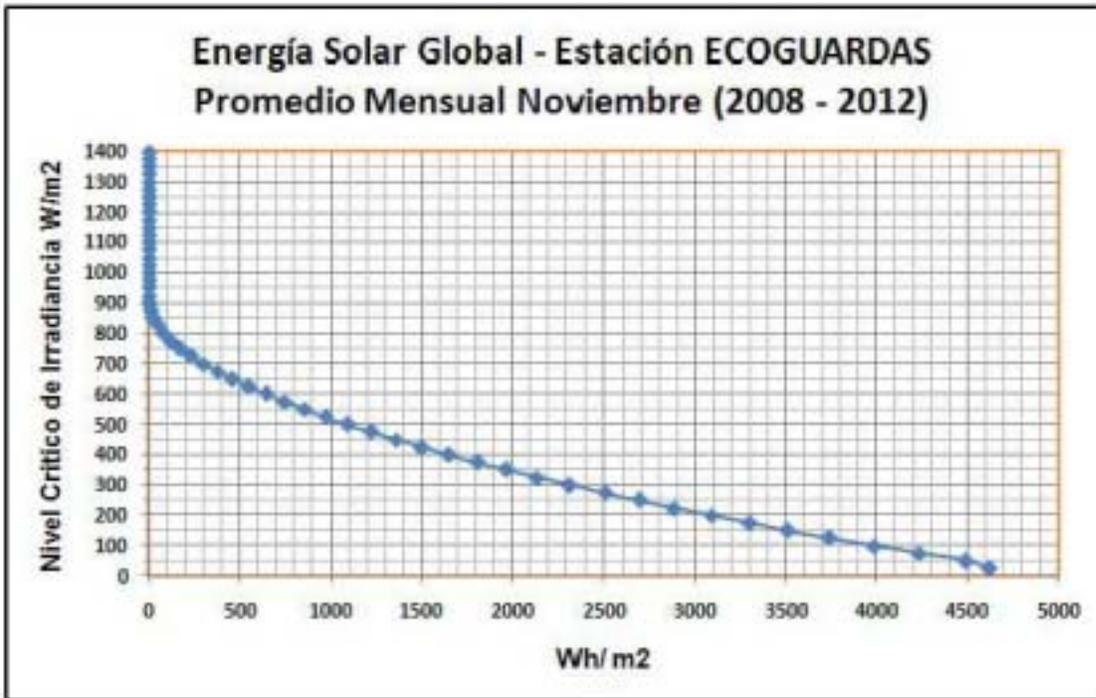


Figura D.20:



## Apéndice E

### Gráficas de la Estación Pimentel



Figura E.1:



Figura E.2:



Figura E.3:



Figura E.4:

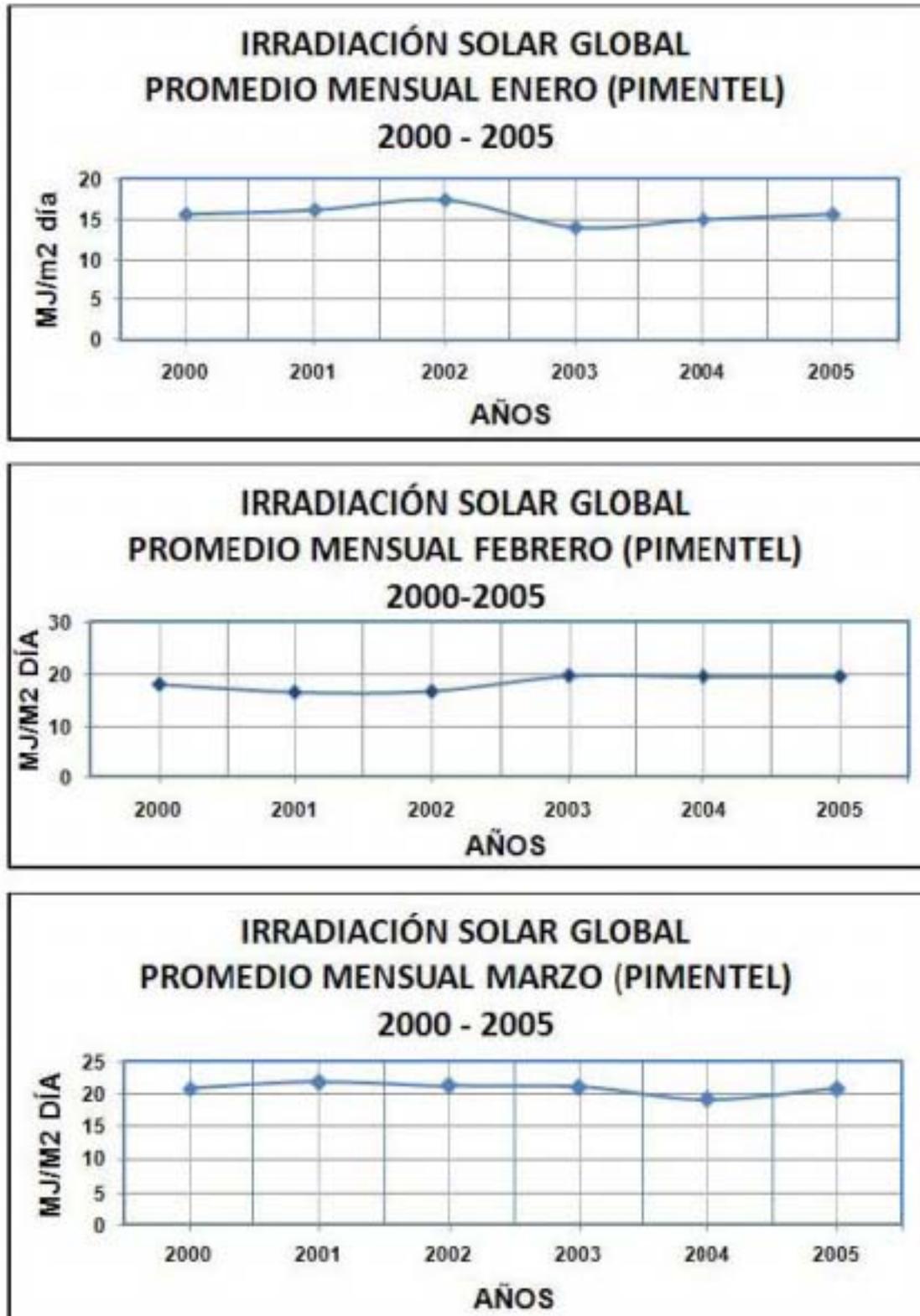


Figura E.5:

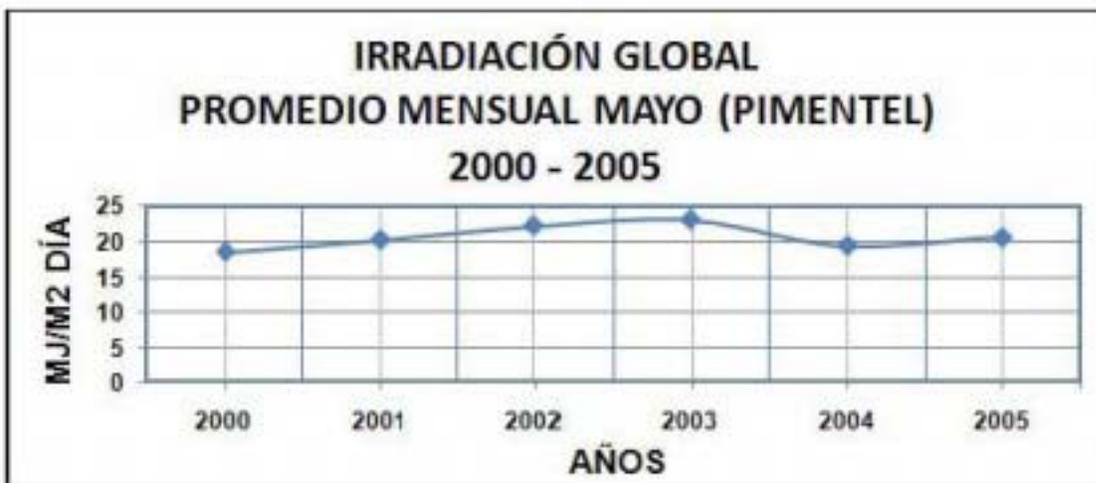


Figura E.6:

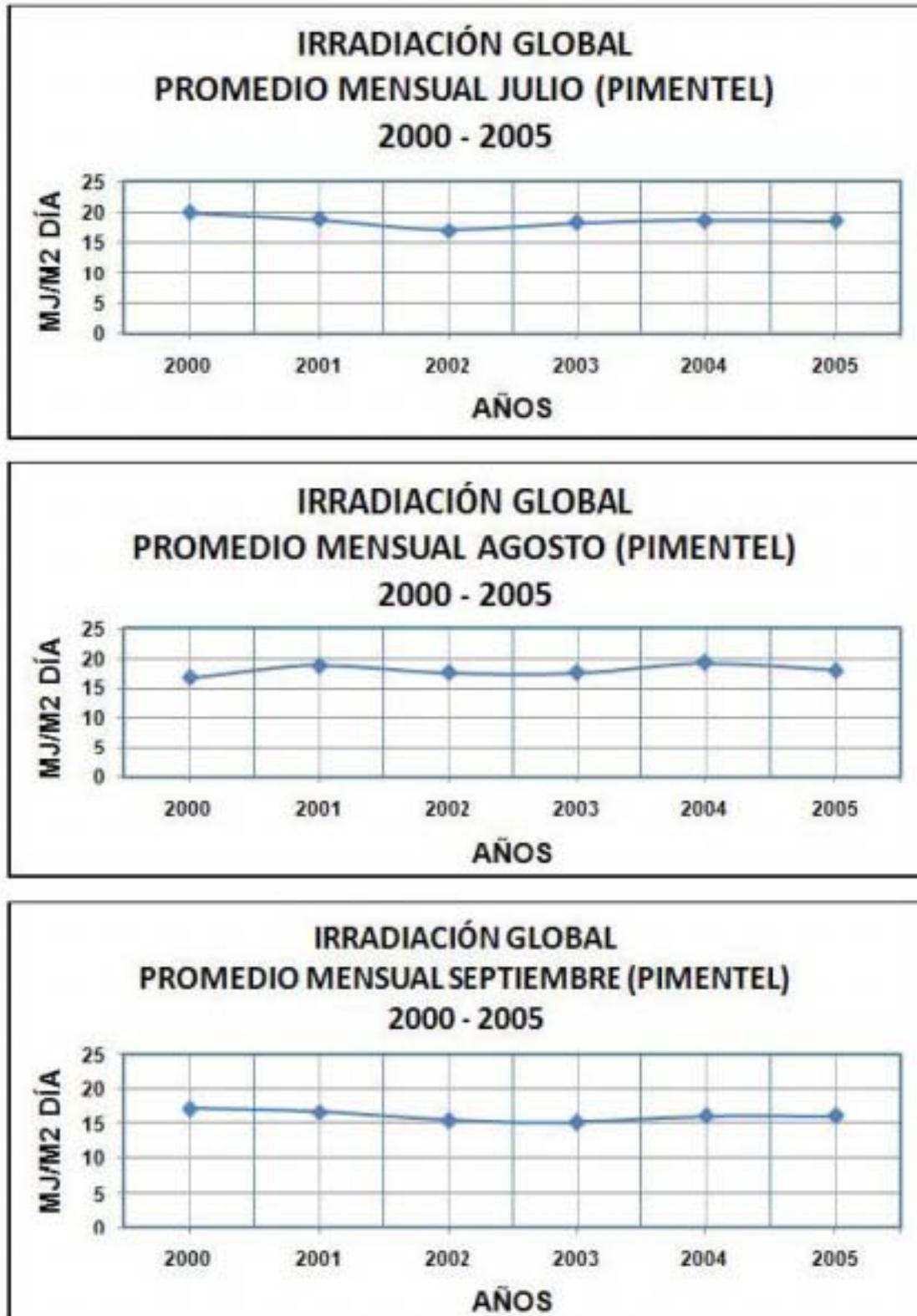


Figura E.7:



Figura E.8:

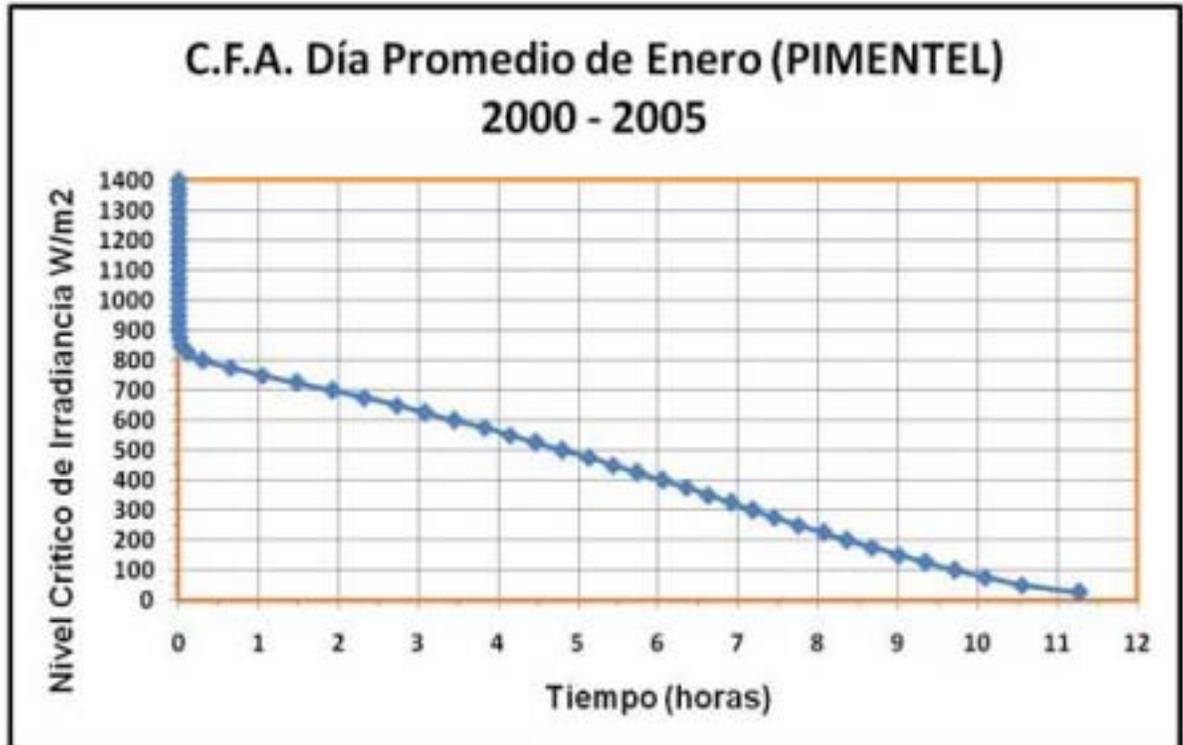


Figura E.9:

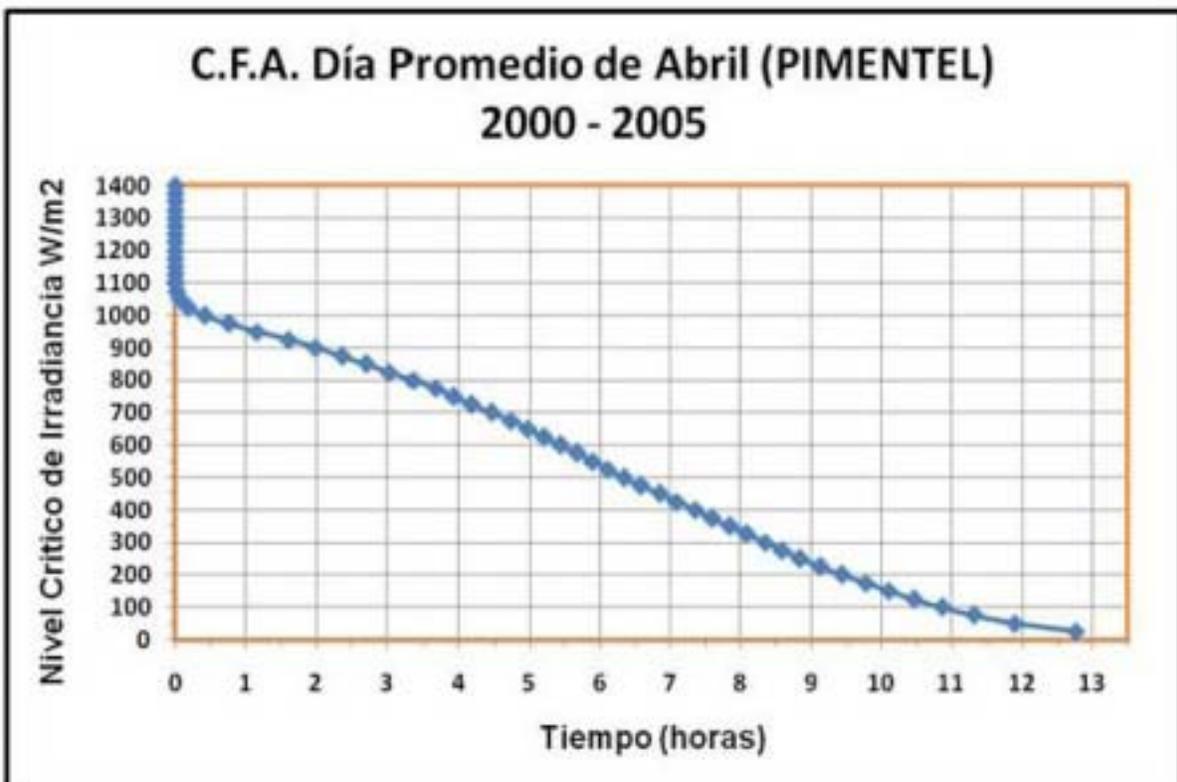
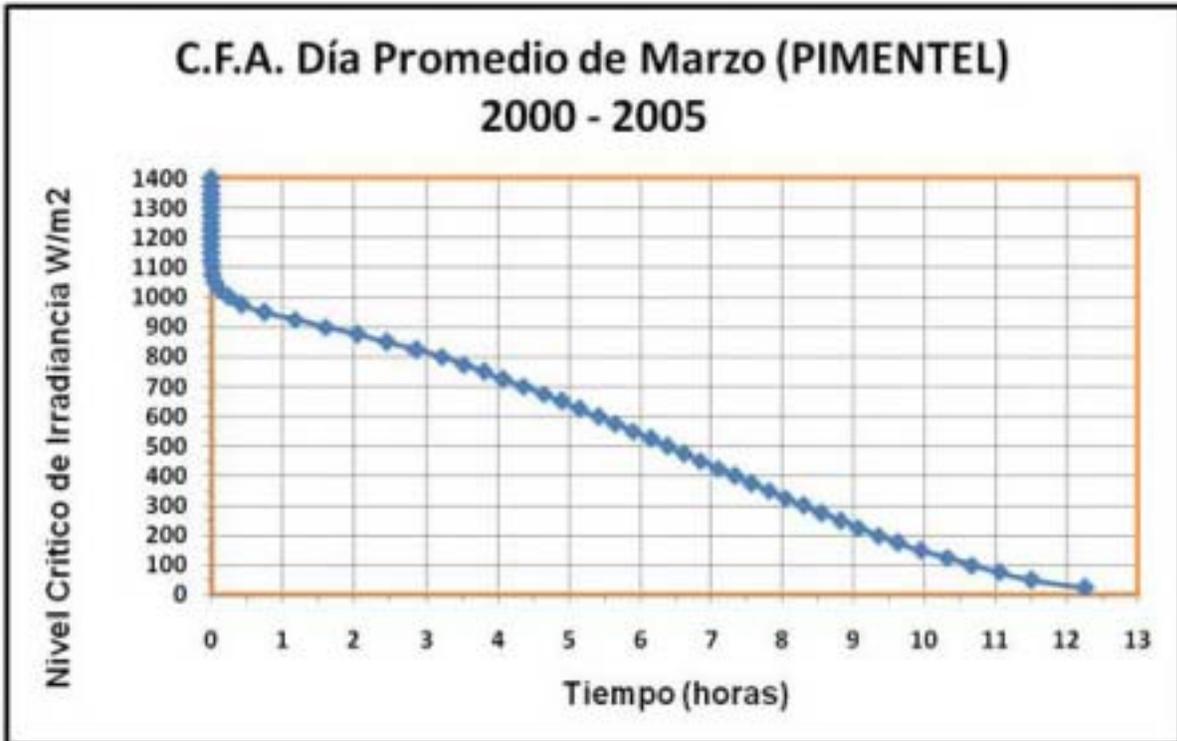


Figura E.10:

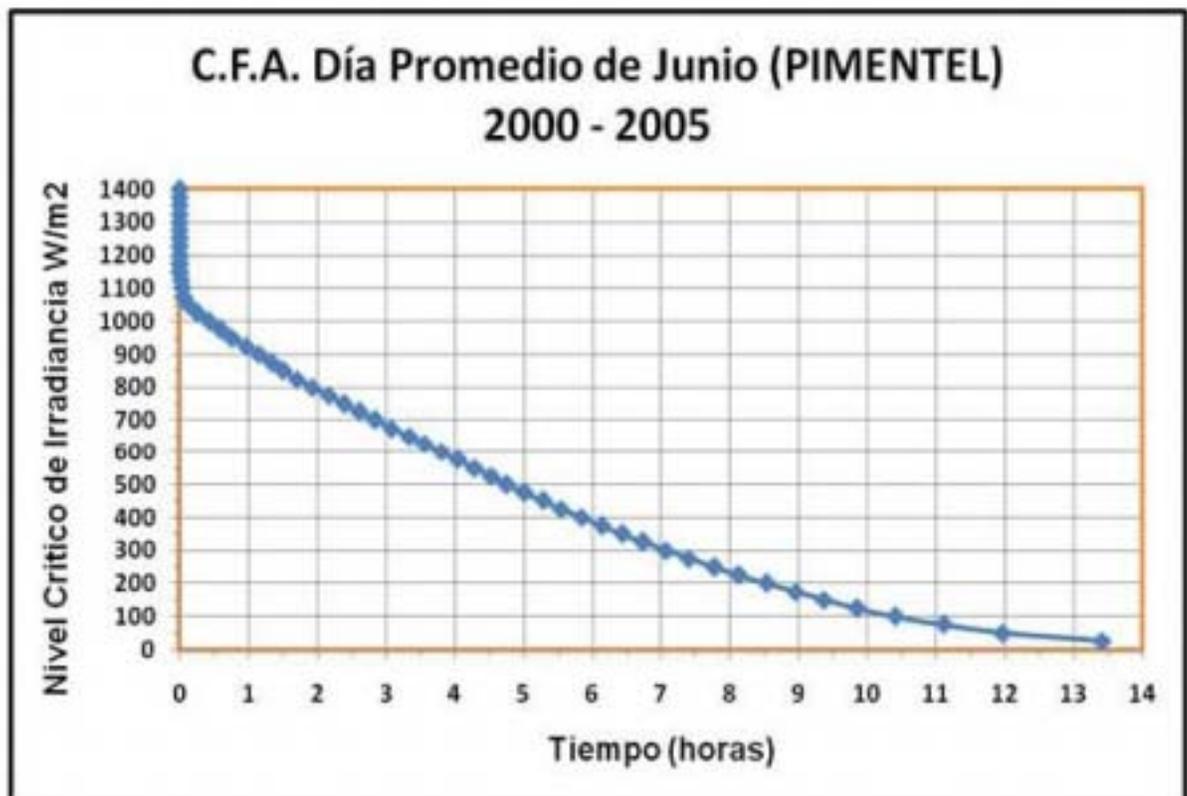


Figura E.11:

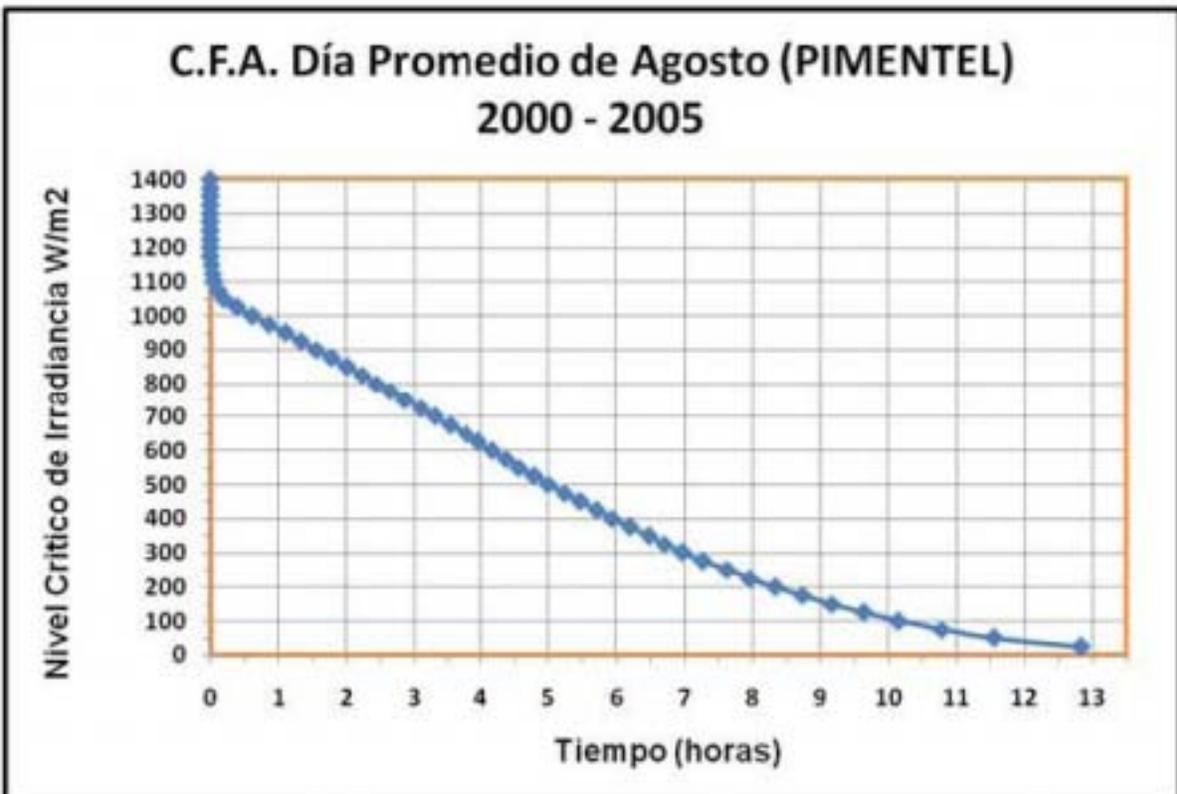
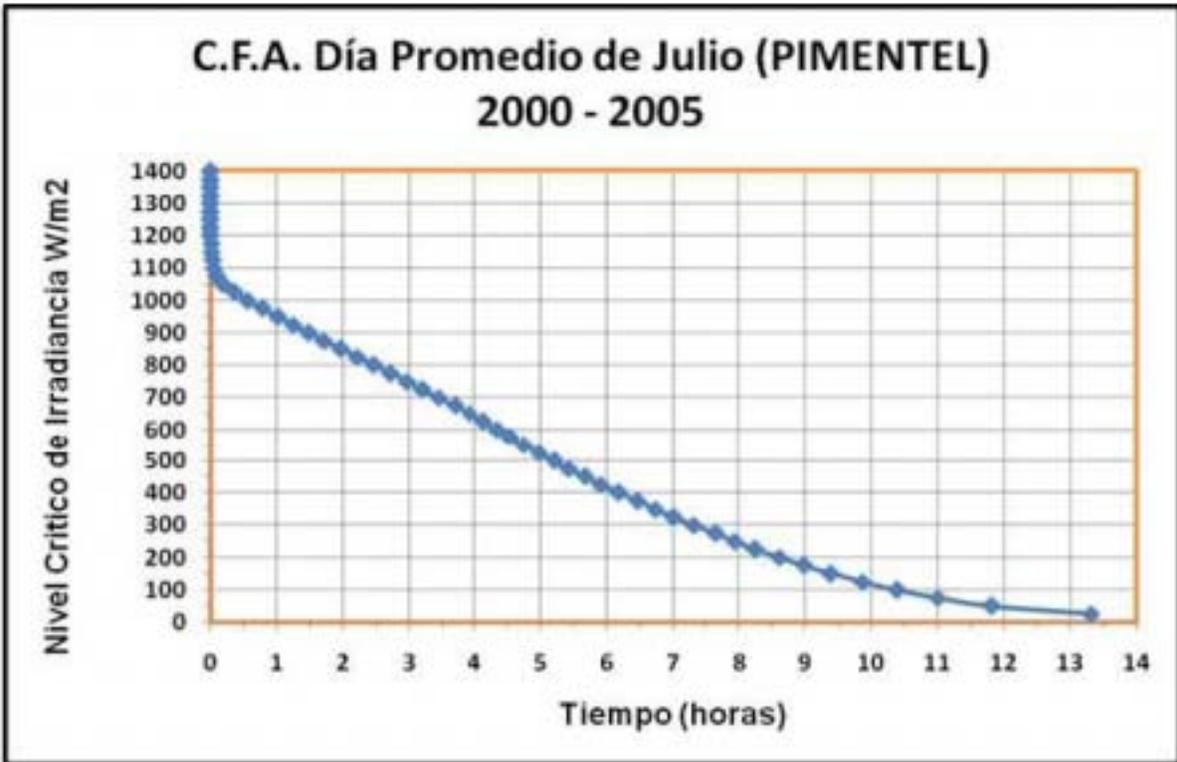
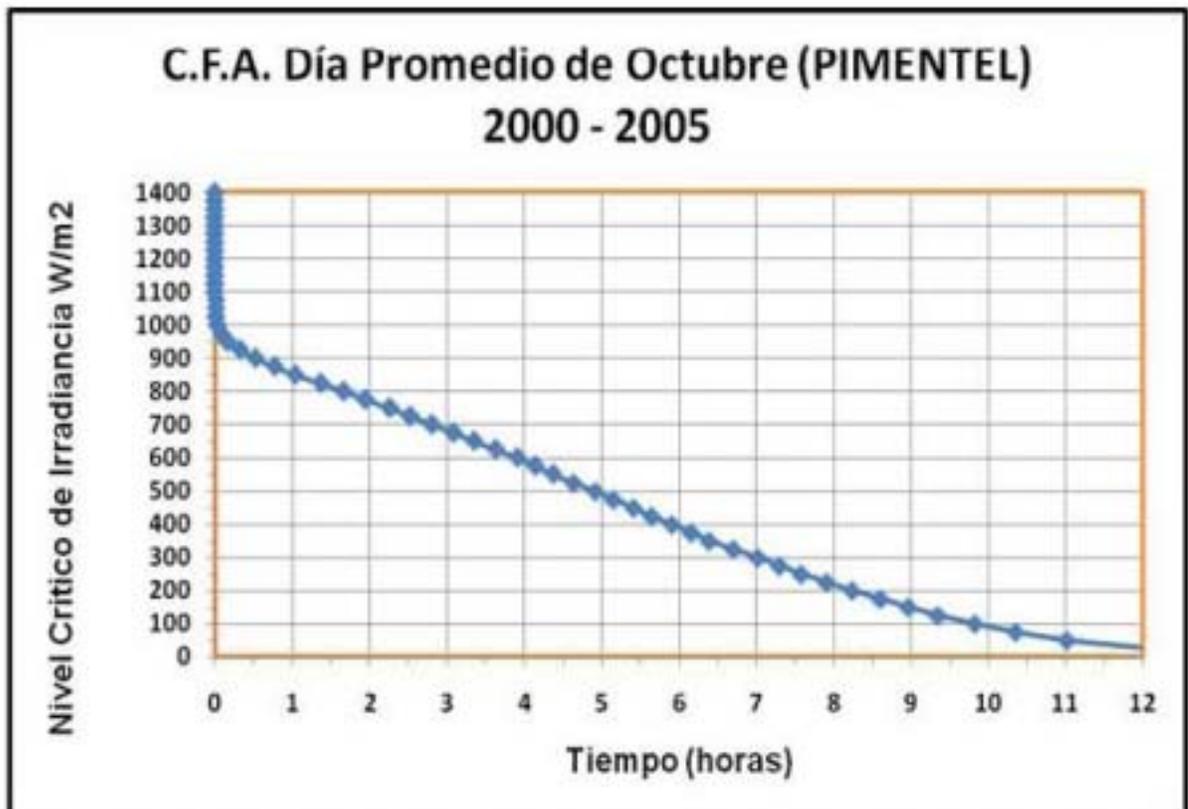
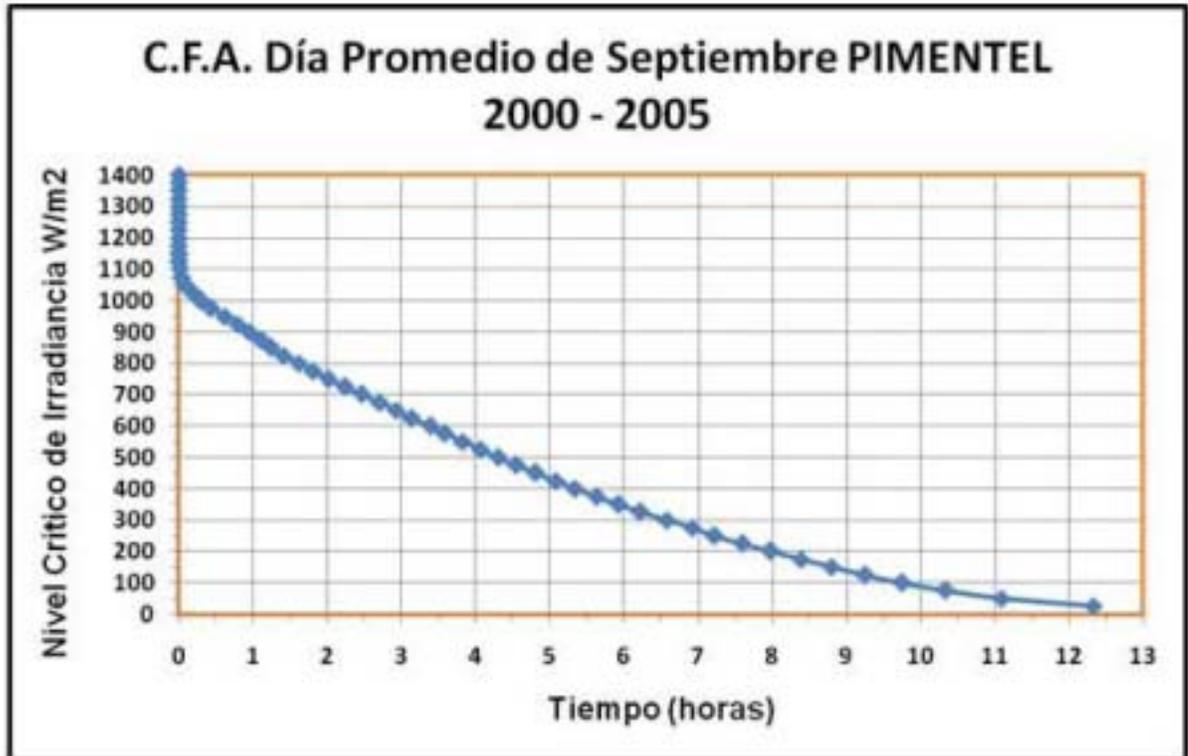
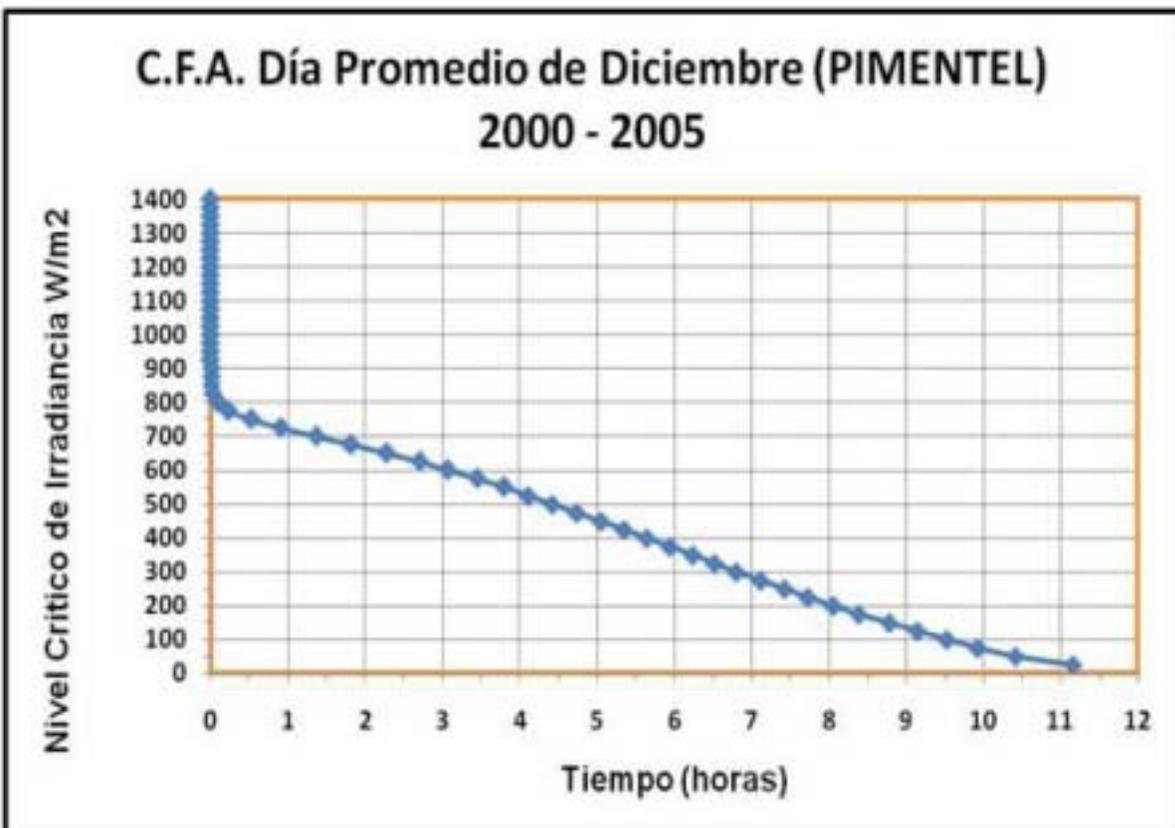


Figura E.12:





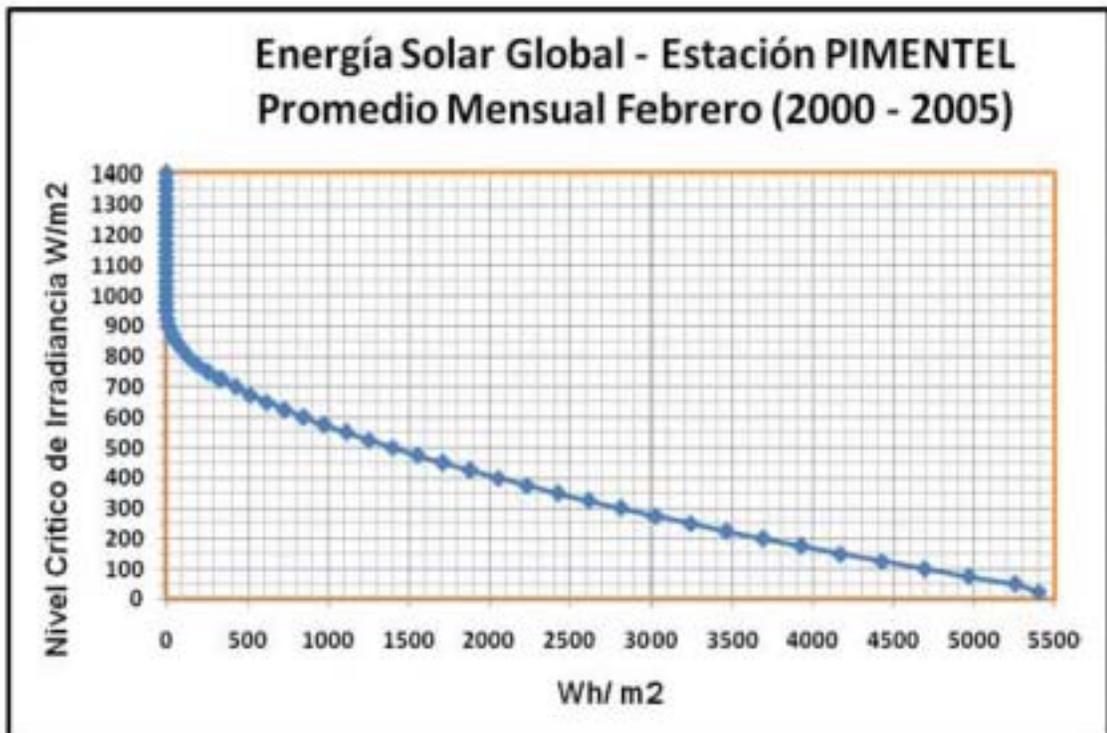
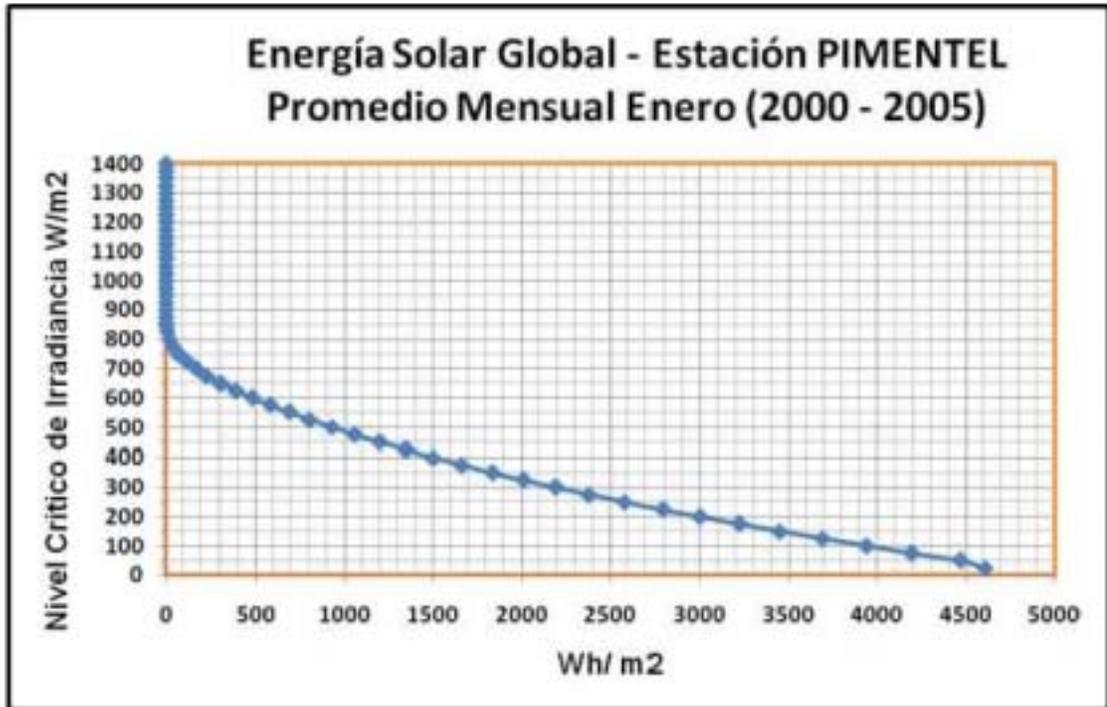


Figura E.15:

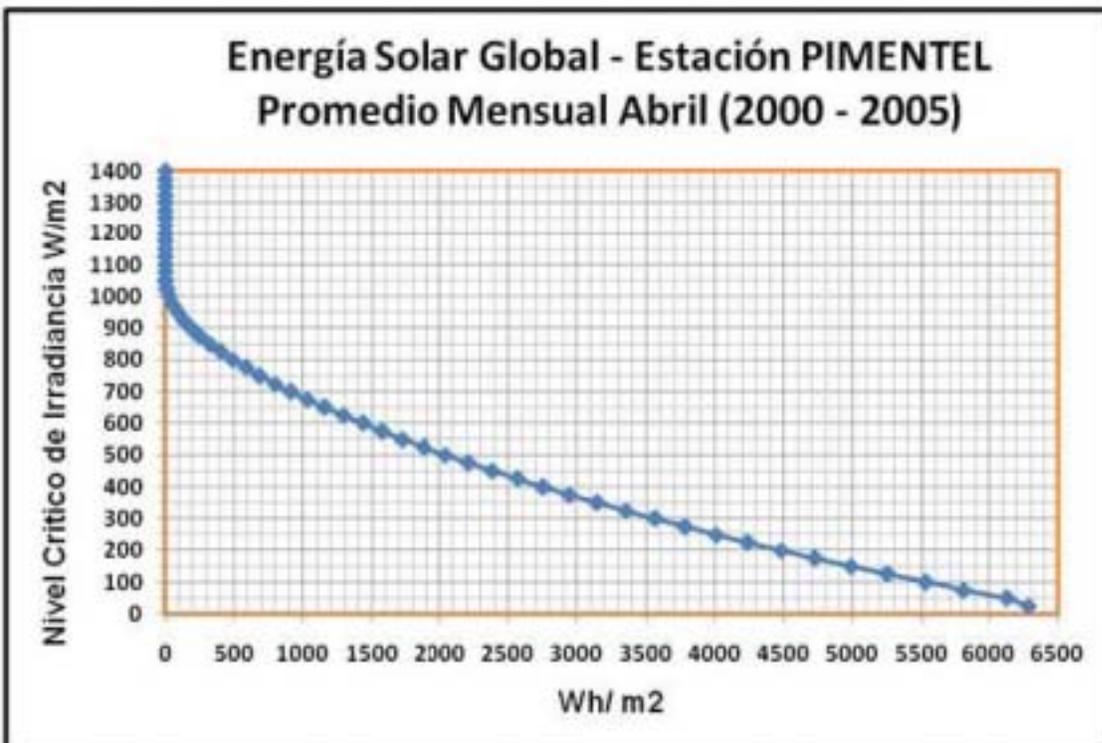
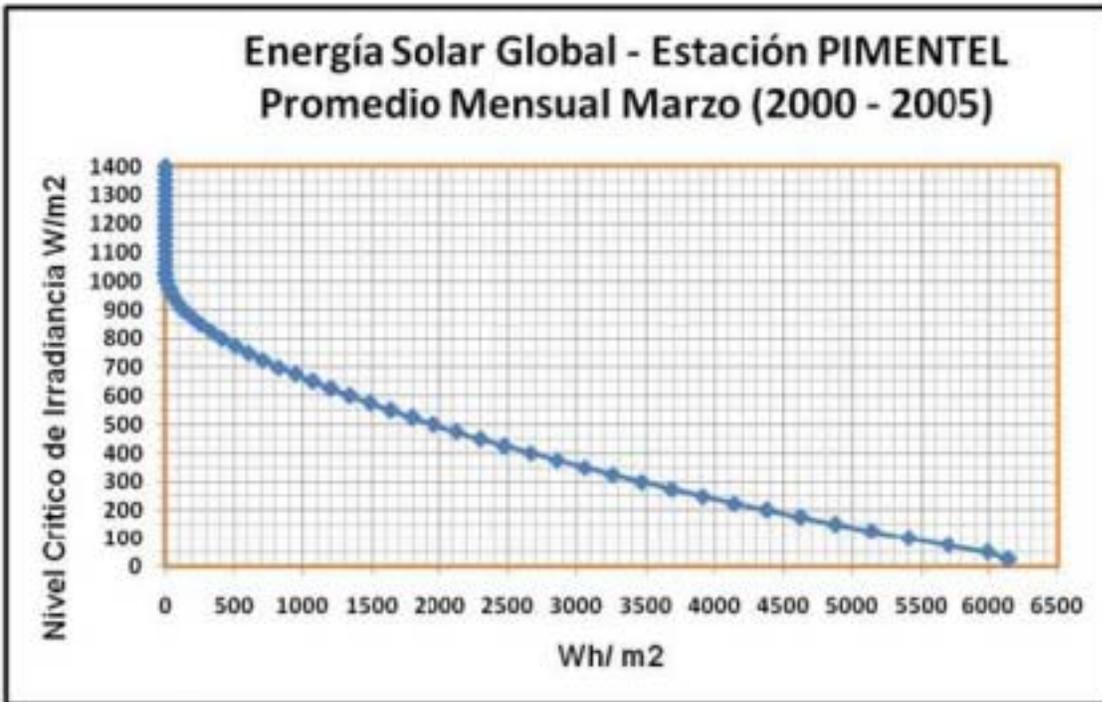


Figura E.16:

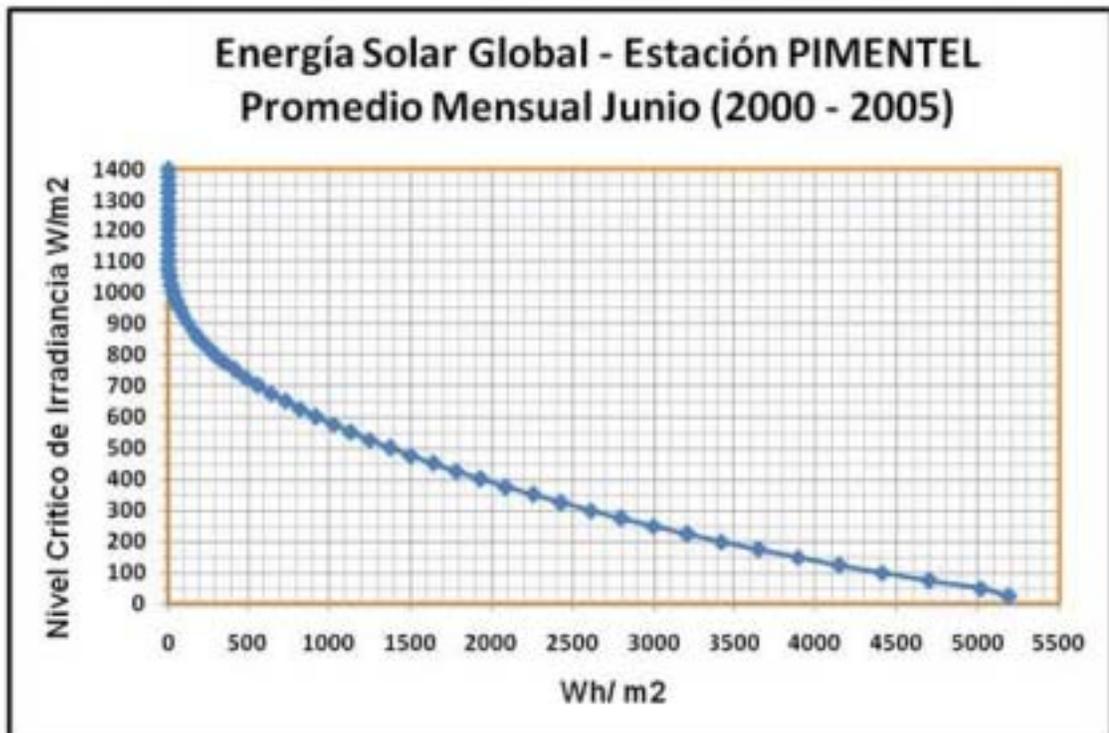
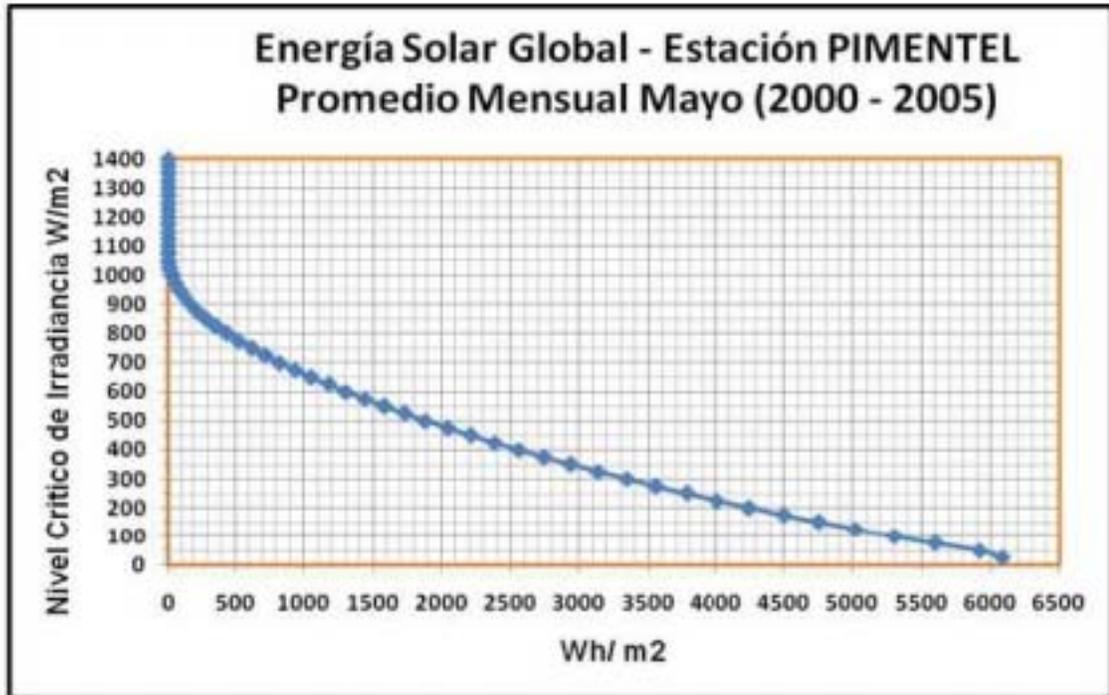


Figura E.17:

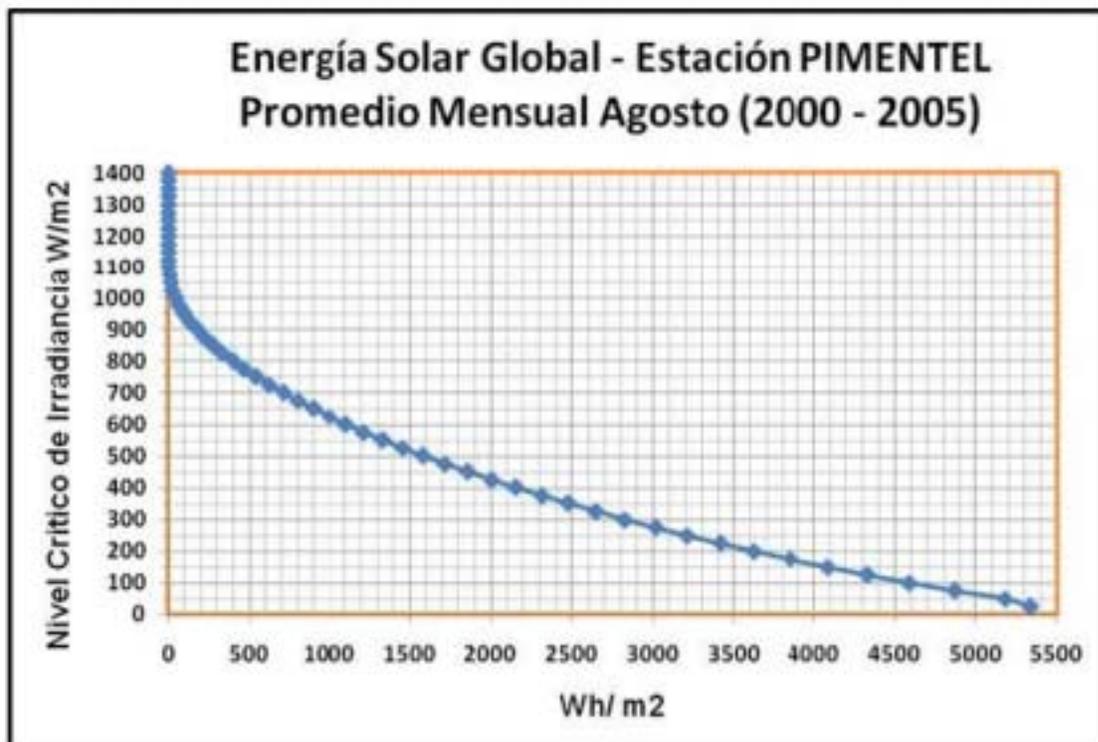
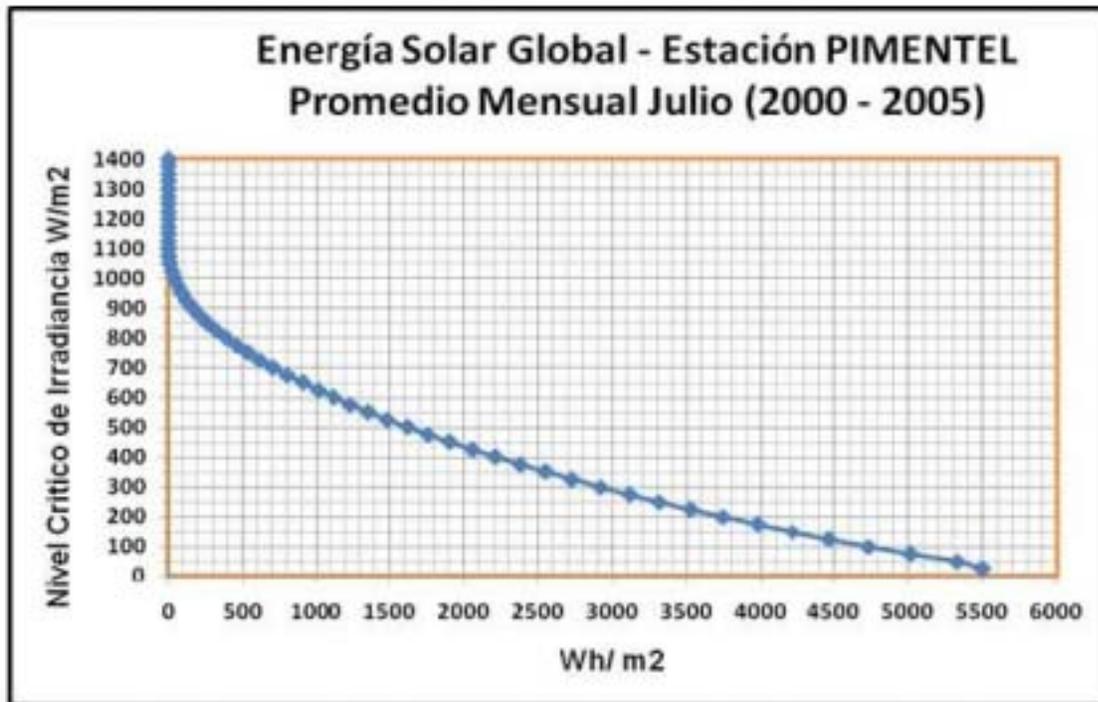


Figura E.18:

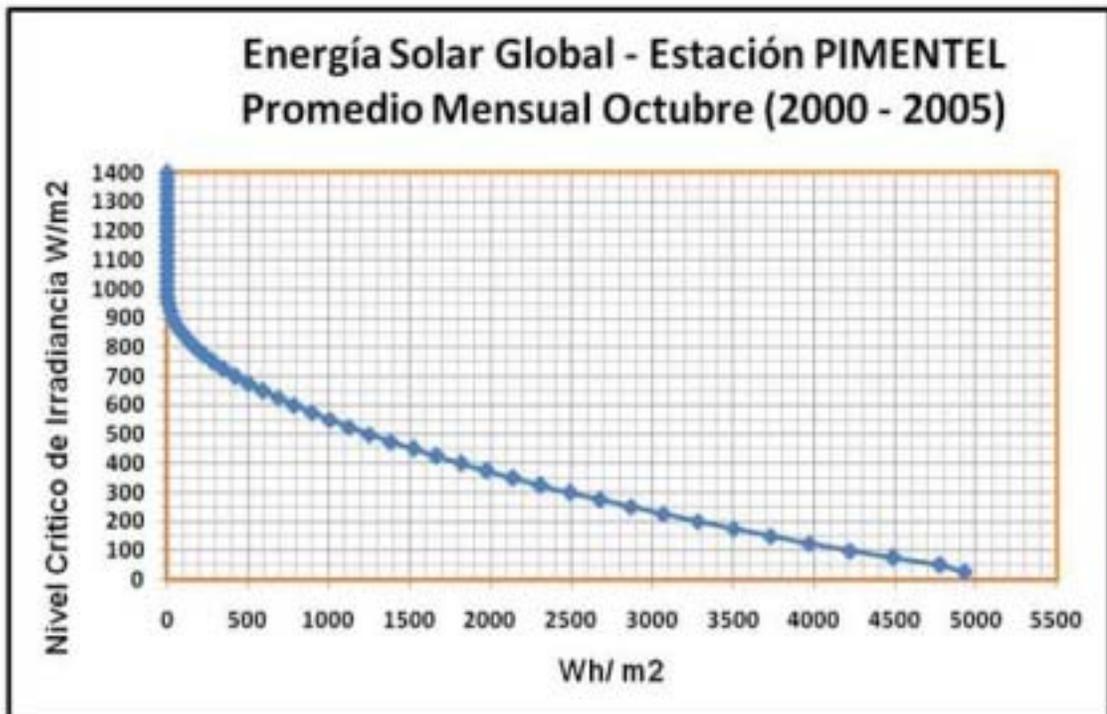
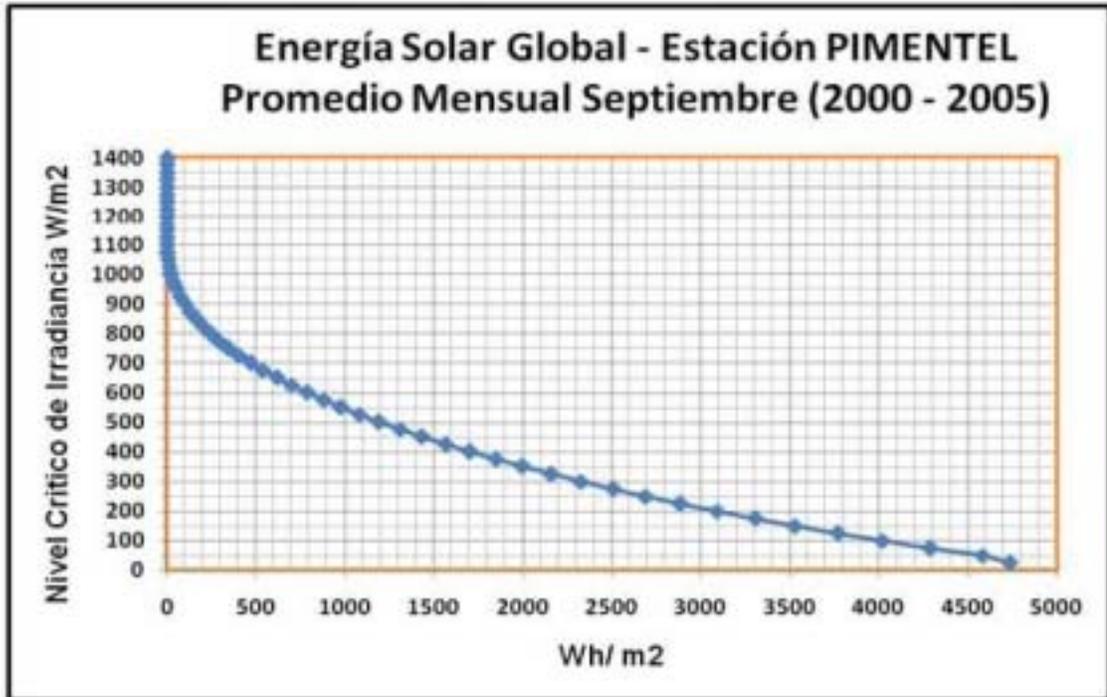


Figura E.19:

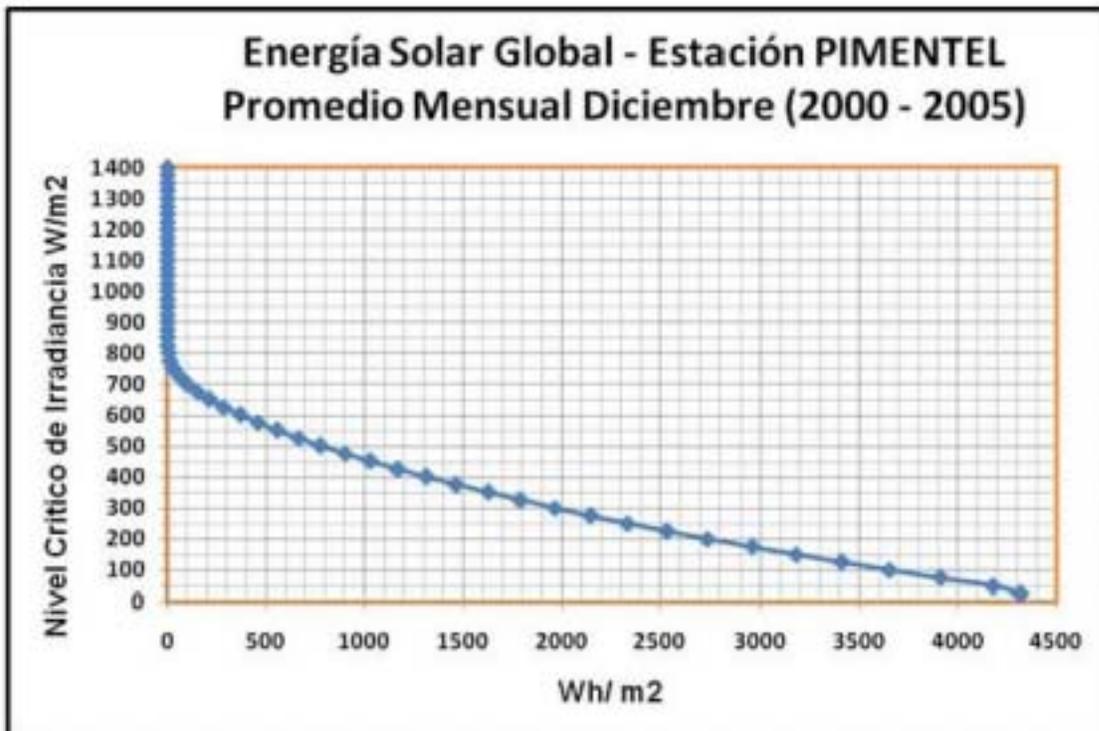
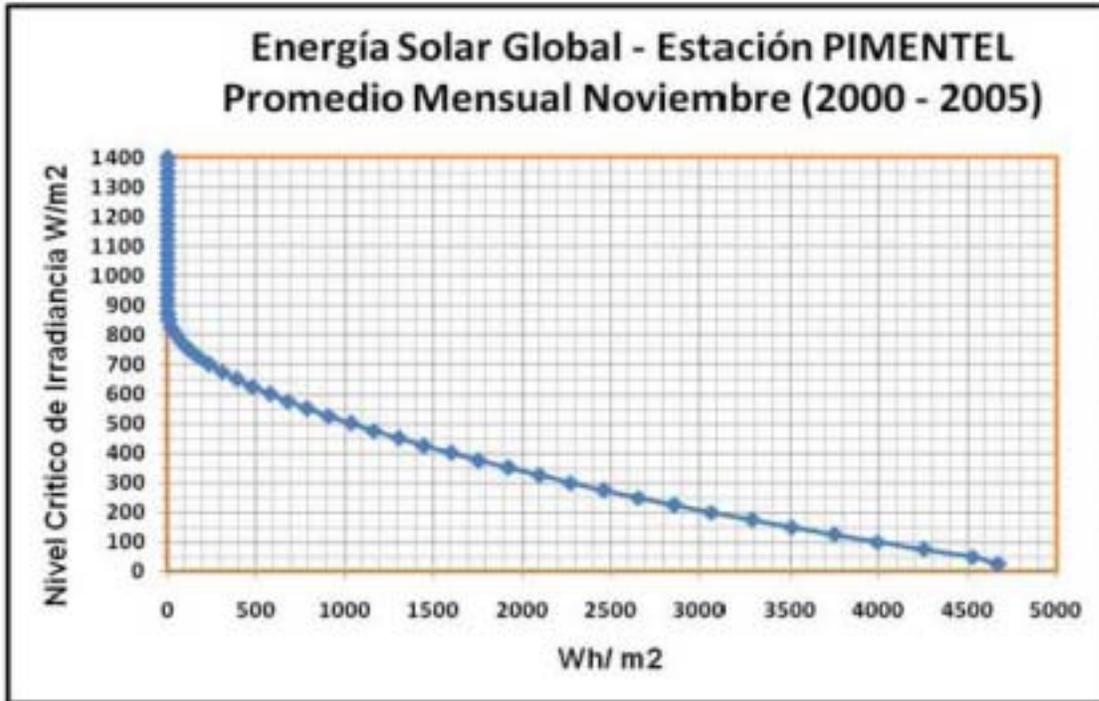


Figura E.20:



## Apéndice F

### Corrida Financiera Precios Constantes



## Apéndice G

### Corrida Financiera Precios Corrientes

Calculadores Solares  
 Agosto de 2013  
 Precios Corrientes

$\beta$	4	0.00404050	$\delta$	4	350	Inflación	4.87%	RECORO	5104.0040	
$\gamma$	4	0.00404050	$\epsilon$	4	30	Costo Gas (1)	13.40	RECORO	-150	
Valor de Rescate	$P$	31.85750404	TRM(A)	1.4	5.80%	TR	1 * 4	131.60%	Sena Gas	17.50
Inversión	$g$	-13000								
Tiempo de Flujo de Efectivo Neto	$N$	20								

RESERVA	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	
CONECTOR	10000	10529.1	11096.2	11707.3	12366.4	13075.5	13838.6	14659.7	15543.8	16485.9	17491.0	18564.1	19710.2	20934.3	22241.4	23637.5	25129.6	26723.7	28426.8	30245.9	32186.0	34254.1	36457.2
AGU	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P	-13000	12450.90	12941.80	13472.70	14043.60	14654.50	15305.40	15996.30	16727.20	17508.10	18339.00	19220.90	20154.80	21141.70	22181.60	23275.50	24423.40	25625.30	26881.20	28192.10	29558.00	30979.90	32457.80
I																							
RECORO																							
SALE		-13.40	-15.815	-18.230	-20.645	-23.060	-25.475	-27.890	-30.305	-32.720	-35.135	-37.550	-39.965	-42.380	-44.795	-47.210	-49.625	-52.040	-54.455	-56.870	-59.285	-61.700	-64.115
RECORO		1104.96037	1195.994	1297.028	1408.062	1529.096	1660.130	1801.164	1952.198	2113.232	2284.266	2465.300	2656.334	2857.368	3068.402	3289.436	3520.470	3761.504	4012.538	4273.572	4544.606	4825.640	5116.674
RECORO		-150	-150.305	-150.610	-150.915	-151.220	-151.525	-151.830	-152.135	-152.440	-152.745	-153.050	-153.355	-153.660	-153.965	-154.270	-154.575	-154.880	-155.185	-155.490	-155.795	-156.100	-156.405
FLUJO	-13000	11041.655	12450.491	13959.327	15568.163	17277.000	19085.836	20994.672	22903.508	24812.344	26721.180	28630.016	30538.852	32447.688	34356.524	36265.360	38174.196	40083.032	41991.868	43900.704	45809.540	47718.376	49627.212
VPV		162294.40																					
		171264.818																					

VAE= 13704.899

VAE= 13704.899

Factor de Uso	
VPV	162294.4000
VAE	13704.89919
TR *	131.60%

Costo Gas	2.104
Costo Agua	5.105
Costo Electricidad	211.3980000

Figura G.1:

# Bibliografía

- [1] R. Cadenas. A. Lentz., R. Almanza. Curvas de frecuencia acumulada para un concentrador solar de canal parabólico con orientación norte-sur en el noroeste de México. *FI-UNAM, Vol. X. Num 2. 159-166, ISSN 1405-7743.*, 2009.
- [2] C. Aransibia A. Muhlia., C. Estrada. Visión a largo plazo sobre la utilización de las energías renovables en México. *Centro de Investigación en Energía*, 2005.
- [3] Rafael Almanza. Energía y cambio climático: Energías renovables. *Serie Docencia, Instituto de Ingeniería, UNAM.*, 2008.
- [4] V. Estrada Cajigal Ramírez R. Almanza. Irradiaciones global, directa y difusa en superficies horizontales e inclinadas, así como irradiación directa normal, en la república mexicana. *Serie de Investigación y Desarrollo, Instituto de Ingeniería, UNAM.*, 2005.
- [5] Francisco Estrada Benjamín Martínez. Economía del cambio climático en la ciudad de México. *Centro Virtual de Cambio Climático*, 1, 2010.
- [6] C. Gay. C. Conde., O. Sánchez. Evaluación de escenarios de clima actual y de cambio climático futuro para México. *Centro de Ciencias de la Atmósfera. pp. 9-26*, 2000.
- [7] Sergio Reyes Coca. Introducción a la meteorología. *UABC*, 1, 2002.
- [8] COSS. Evaluación de proyectos de inversión. *LIMUSA.*, 1994.
- [9] Secretaría del Medio Ambiente. Inventario de emisiones de contaminantes criterio de la ZMVM. *Gobierno del Distrito Federal.*, 2010.
- [10] Secretaría del Medio Ambiente. Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero y carbón negro de la ZMVM 2010. *Gobierno del Distrito Federal.*, 2010.

- [11] E. Luyando. E. Jauregui. Global radiation attenuation by air pollution and its effects on the thermal climate in Mexico City. *International Journal of Climatology, Int.J. Climatol.*19:683-694, 1999.
- [12] Grupo Intergubernamental De Expertos Sobre el Cambio Climático. Introducción a los modelos climáticos simples utilizados en el segundo informe de evaluación del IPCC. *Documento Técnico II del IPCC*, 1997.
- [13] L. Sánchez. H. Catalán. Prospectiva del consumo de energía y su impacto en las emisiones de gases de efecto invernadero (gei). el caso de México. *Facultad de Economía, UNAM.*, 2009.
- [14] M. Valdes. I. Galindo, S. Castro. Satellite derived solar irradiance over México. *Atmósfera*, 1, 1991.
- [15] Compiladora P. Osnaya. J. Martínez., A. Fernández. Cambio climático: Una visión desde México. *Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología.*, 2004.
- [16] D. Morillon. Jorge A., Rosas F. El calentamiento de agua con energía solar en México, su estado actual y metodología para estimar el potencial de ahorro de energía y mitigación de emisiones de CO<sub>2</sub>. *División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, Área de Sistemas Energéticos, UNAM*, 2010.
- [17] B. Ortega. M. Caballero., S. Lozano. Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: Una perspectiva desde las ciencias de la Tierra. *Instituto de Geofísica, Instituto de Geología, UNAM, Revista Digital Universitaria. vol 8, no 10, issn:1067-6079*, 2007.
- [18] P. Cruz.H. M. Guillén. M. Reducción de las emisiones de carbono y la energía renovable. *Instituto de Investigaciones Eléctricas, Procesos Térmicos.*, 2008.
- [19] D. Riveros. M. Valdes, H. Estévez. Energía solar disponible. *Sección de Radiación Solar, Instituto de Geofísica de la UNAM*, 1, 2011.
- [20] D.F y ZMVM México. [es.wikipedia.org/wiki/méxico/d.f](http://es.wikipedia.org/wiki/méxico/d.f). *DF*, 1, 2014.
- [21] Intergovernmental Panel on Climate Change. Special report renewable energy sources. *Summary for Policymakers*, 1, 2011.
- [22] Claudia Sheinbaum Pardo. Estrategia local de acción climática de la ciudad de México. *Secretaría del Medio Ambiente.*, 2006.

- 
- [23] C. Sheinbaum. Potencial de ahorro de energía y factibilidad financiera de la implementación de calentadores solares híbridos en el área metropolitana de la ciudad de México. *Instituto de Ingeniería de la UNAM.*, 1996.
- [24] R.E.H. Sims. Renewable energy: A response to climate change. Elsevier, solar energy. *Centre for Energy, College of Sciences, Massey University.*, 2004.
- [25] D. Chapman. Thomas E., Jon Erickson. Solar power and climate change policy in developing countries. *Department of Agricultural, Resources and Managerial Economics, Cornell University, Ithaca, NY, USA*, 1996.