



**UNIVERSIDAD DE CASTILLA - LA MANCHA**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

CIUDAD REAL

TRABAJO FIN DE GRADO EN  
INGENIERÍA ELÉCTRICA

N.º 21-2-225384

DETERMINACIÓN DEL ESPECTRO SOLAR EN  
FUNCIÓN DE COORDENADAS GEOGRÁFICAS,  
DATOS ESTACIONALES Y CONDICIONES  
AMBIENTALES.



Autor/a:  
JAIME ISASI CAMPILLO

Tutor/a:  
MAGÍN LAPUERTA AMIGO  
ÁNGEL RAMOS DIEZMA

Diciembre 2021



A mis directores del trabajo fin de grado, Magín Lapuerta Amigo y Ángel Ramos Diezma, por darme la oportunidad de realizar este proyecto, orientarme y buscar la perfección.

Al Grupo de Combustibles y Motores (GCM) de la Escuela Superior de Ingeniería Industrial de Ciudad Real-UCLM por su dedicación en este proyecto.

A mis compañeros de carrera por acompañarme durante todos estos años y hacer esta experiencia inolvidable.

A mis amigos, por ayudarme y hacer los momentos difíciles más llevaderos.

A mi familia, a mis padres y a mi hermana, por darme todo el apoyo y ser para mí un referente tanto en el ámbito personal como profesional.

A Laura, por ser mi apoyo, comprenderme y darme la fuerza y ánimo que he necesitado cada día.

¡Muy agradecido, Jaime!



## ÍNDICE GENERAL

|  |            |
|--|------------|
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>                          | <b>III</b> |
| <b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>                           | <b>VI</b>  |
| <b>NOMENCLATURA.....</b>                               | <b>VII</b> |
| <b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>                           | <b>1</b>   |
| 1.1. Justificación .....                               | 1          |
| 1.2. Objetivos .....                                   | 1          |
| 1.3. Antecedentes .....                                | 2          |
| 1.4. Viabilidad.....                                   | 2          |
| <b>2. FUNDAMENTOS DEL ESPECTRO SOLAR.....</b>          | <b>3</b>   |
| 2.1. Descripción general.....                          | 3          |
| 2.2. Distancia entre la tierra y el sol.....           | 4          |
| 2.3. Ángulo de declinación.....                        | 5          |
| 2.4. Corrección del tiempo solar .....                 | 6          |
| 2.5. Ángulo horario del sol.....                       | 7          |
| 2.6. Posición solar: Ángulo cenital y azimutal.....    | 10         |
| 2.7. Ángulo de incidencia.....                         | 12         |
| 2.8. Efecto de la trayectoria sobre la atmosfera ..... | 13         |
| 2.9. Efectos atmosféricos .....                        | 15         |
| 2.9.1. Introducción .....                              | 15         |
| 2.9.2. Atmósfera seca y sin ozono.....                 | 16         |
| 2.9.3. Ozono atmosférico .....                         | 18         |
| 2.9.4. Vapor de agua atmosférico.....                  | 21         |
| 2.9.5. Aerosoles.....                                  | 22         |
| 2.10. Efecto del albedo de la superficie .....         | 25         |
| 2.11. Efecto de la altitud y de la presión .....       | 26         |
| 2.12. Componentes radiación solar .....                | 26         |
| 2.13. Referencia ASTM .....                            | 31         |
| <b>3. ELABORACIÓN DE UN CÓDIGO DE CÁLCULO .....</b>    | <b>33</b>  |
| 3.1. Desglose general .....                            | 33         |

**E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL**

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| 3.2.       | Pantalla entrada de datos .....                       | 34        |
| 3.3.       | Cálculos .....  | 36        |
| 3.4.       | Pantalla de resultados .....                          | 37        |
| 3.5.       | Aplicaciones .....                                    | 38        |
| <b>4.</b>  | <b>CONTRASTACIÓN EXPERIMENTAL .....</b>               | <b>39</b> |
| 4.1.       | Equipo utilizado.....                                 | 39        |
| 4.2.       | Condiciones de las mediciones.....                    | 39        |
| 4.3.       | Ajuste y comparación teórica-experimental .....       | 40        |
| <b>5.</b>  | <b>ESTUDIOS PARAMÉTRICOS .....</b>                    | <b>43</b> |
| 5.1.       | Plan de ejecución.....                                | 43        |
| 5.2.       | Efecto de la hora del día .....                       | 43        |
| 5.3.       | Efecto de la profundidad óptica de los aerosoles..... | 44        |
| 5.4.       | Efecto del vapor de agua precipitable.....            | 46        |
| 5.5.       | Efecto del día del año .....                          | 47        |
| 5.6.       | Efecto de la latitud.....                             | 48        |
| 5.7.       | Efecto de la altitud.....                             | 49        |
| 5.8.       | Efecto de la inclinación de la superficie .....       | 51        |
| <b>6.</b>  | <b>CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....</b>          | <b>53</b> |
| <b>7.</b>  | <b>BIBLIOGRAFIA .....</b>                             | <b>55</b> |
|            | <b>ANEXOS .....</b>                                   | <b>57</b> |
| <b>A1.</b> | <b>MANUAL DE LA APLICACIÓN.....</b>                   | <b>57</b> |
| <b>A2.</b> | <b>CÓDIGO DE LA APLICACIÓN.....</b>                   | <b>63</b> |
| <b>A3.</b> | <b>DATOS FIJOS DE LA APLICACIÓN .....</b>             | <b>93</b> |
| <b>A4.</b> | <b>ESPECTRO SOLAR DE REFERENCIA .....</b>             | <b>99</b> |

## ÍNDICE DE FIGURAS

### 2. FUNDAMENTOS DEL ESPECTRO SOLAR

|  |    |
|--|----|
| Figura 2. 1. Transformación de la radiación solar a su paso por la atmósfera. ....   | 3  |
| Figura 2. 2. Variación de la distancia entre la tierra y el sol en función del día del año.....  | 4  |
| Figura 2. 3. Ángulo de declinación. ....   | 5  |
| Figura 2. 4. Variación del ángulo de declinación en función del día del año. ....  | 6  |
| Figura 2. 5. Diferencia entre el tiempo solar medio y el tiempo solar aparente en función del día del año.....   | 7  |
| Figura 2. 6. Variación del ángulo horario considerando distintos días del año en Ciudad Real, España.  | 8  |
| Figura 2. 7. Variación del ángulo horario considerando distintos días del año en de Gerona, España. ...  | 9  |
| Figura 2. 8. Estudio de la variación del ángulo horario con la longitud. ....  | 9  |
| Figura 2. 9. Ángulos posición solar, adaptado de [18].....   | 11 |
| Figura 2. 10. Valores de ángulos que definen la posición solar durante el día para los días 15 de marzo, 15 de junio y 15 de diciembre de 2021 en Ciudad Real, España. ....  | 11 |
| Figura 2. 11. Ángulo de incidencia. ....   | 12 |
| Figura 2. 12. Variación del ángulo de incidencia en función de la inclinación de la superficie de estudio manteniendo fijo el azimut de esta en 180 ° a las 13:00 (Hora UTC+0) para los días 15 de marzo, 15 de junio y 15 de diciembre de 2021 en Ciudad Real, España. .... | 13 |
| Figura 2. 13. Índice de masa de aire.....  | 14 |
| Figura 2. 14. Índice de masa de aire empleando la ecuación 2.16 para Ciudad real los días 15 de junio y 15 de diciembre de 2021 considerando la zona horaria UTC+0. ....   | 15 |
| Figura 2. 15. Efectos atmosféricos. ....   | 16 |
| Figura 2. 16. Eficiencia de transmisión debida a la absorción de los gases de efecto invernadero exceptuando el ozono y el vapor de agua para un índice $AM_p$ de uno y dos. ....  | 17 |
| Figura 2. 17. Eficiencia de transmisión por la dispersión que sufre la luz solar debida a los gases de efecto invernadero exceptuando el ozono y el vapor de agua para un índice $AM_p$ de uno y dos.....  | 18 |
| Figura 2. 18. Variación del espesor óptico de ozono en Ciudad Real, España, y Pekín, China, para cada día del año. ....  | 19 |
| Figura 2. 19. Índice adimensional de masa de ozono para el día 15 de junio y 15 de diciembre en Ciudad Real, España, considerando la zona horaria UTC+0. ....  | 20 |
| Figura 2. 20. Efecto del índice $AM_p$ sobre la eficiencia de la transmisión por absorción del vapor de agua atmosférico. ....   | 21 |
| Figura 2. 21. Efecto del vapor de agua precipitable sobre la eficiencia de la transmisión por absorción del vapor de agua atmosférico.....   | 22 |

## E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

Figura 2. 22. Profundidad óptica de los aerosoles para cada longitud de onda considerando los valores medios de exponente de Angstrom (AE) para cada zona. .... 24

Figura 2. 23. Representación datos ASTM E-891-87 y ASTM E-892-87 [29] [30]. .... 31

### 3. ELABORACIÓN DE UN CÓDIGO DE CÁLCULO

Figura 3. 1. Diagrama de bloques de aplicación. .... 33

Figura 3. 2. Pantalla de entrada de datos de la aplicación. .... 34

Figura 3. 3. Pantalla de entrada de datos de la aplicación para el caso en el usuario introduce la altura del lugar de estudio. .... 35

Figura 3. 4. Ejemplo de Información que se muestra al usuario al presionar el botón de info. .... 36

Figura 3. 5. Pantalla de resultados de la aplicación. .... 37

Figura 3. 6. Datos obtenidos guardados en Excel a través de la aplicación. .... 38

### 4. CONTRASTACIÓN EXPERIMENTAL

Figura 4. 1. Datos de irradiación medidos con espectrorradiómetro desde las 11:10 hasta las 19:20 del día 18 de octubre de 2021. .... 40

Figura 4. 2. Ajuste y comparación de los datos obtenidos con el espectrorradiómetro y con la aplicación para las 11:30, 14:40 y 17:00 del día 18 de octubre de 2021 ..... 42

### 5. ESTUDIOS PARAMÉTRICOS.

Figura 5. 1. Estudio paramétrico del espectro solar en función de la hora del día. .... 44

Figura 5. 2. Estudio paramétrico del espectro solar en función de la profundidad óptica de los aerosoles (*Laer*). .... 44

Figura 5. 3. Estudio paramétrico de la radiación difusa y directa en función de la profundidad óptica de los aerosoles. .... 45

Figura 5. 4. Estudio paramétrico del espectro solar en función del vapor de agua precipitable (*LH2O*). .... 46

Figura 5. 5. Estudio paramétrico de radiación difusa y directa en función del vapor de agua precipitable. .... 47

Figura 5. 6. Estudio paramétrico del espectro solar en función del día del año. .... 48

Figura 5. 7. Estudio paramétrico del espectro solar en función de la latitud geográfica. .... 49

Figura 5. 8. Estudio paramétrico del espectro solar en función de la altitud. .... 50

Figura 5. 9. Ampliación del estudio paramétrico de la figura 5.8. .... 50

Figura 5. 10. Estudio parámetro del espectro solar en función de la pendiente de la superficie. .... 51

### A1. MANUAL

Figura A1. 1. Portada de la aplicación. .... 57

Figura A1. 2. Pantalla de entrada de datos para la opción de introducir la altura. .... 58



## E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

|   |     |
|---|-----|
| Figura A1. 3. Información mostrada al usuario al presionar el botón info del bloque Fecha y Hora. ...                                 | 59  |
| Figura A1. 4. Información mostrada al usuario al presionar el botón info del bloque Localización. ....                                | 59  |
| Figura A1. 5. Información mostrada al usuario al presionar el botón info del bloque Efectos atmosféricos. ....                        | 60  |
| Figura A1. 6. Información mostrada al usuario al presionar el botón info del bloque Características de la superficie. ....            | 60  |
| Figura A1. 7. Información mostrada al usuario al presionar el botón info del bloque Presión/Altura. .                                 | 60  |
| Figura A1. 8. Pantalla de entrada de datos para la opción de la presión de la aplicación.....   | 61  |
| Figura A1. 9. Plantilla Excel con datos del espectro solar generados y guardados desde la aplicación. ....                            | 61  |
| Figura A1. 10. Pantalla de resultados de la aplicación.....   | 62  |
| <b>A3. DATOS FIJOS DE LA APLICACIÓN</b>   |     |
| Figura A3. 1. Representación radiación extraterrestre. ....   | 96  |
| Figura A3. 2. Representación coeficiente de absorción de vapor de agua atmosférico. ....  | 96  |
| Figura A3. 3. Representación coeficiente de absorción de ozono.....   | 97  |
| Figura A3. 4. Representación del coeficiente de absorción de los gases atmosféricos asumiendo que están uniformemente mezclados. .... | 97  |
| <b>A4. ESPECTRO SOLAR DE REFERENCIA.</b>  |     |
| Figura A4. 1. Representación norma ASTM-E891-87. ....   | 101 |

## ÍNDICE DE TABLAS

### 2. FUNDAMENTOS DEL ESPECTRO SOLAR

|  |    |
|--|----|
| Tabla 2. 1. Valores exponente de Angstrom para cada zona de estudio..... | 23 |
| Tabla 2. 2. Albedo de algunas superficies comunes [28]. .....            | 25 |

### 4. CONTRASTACIÓN EXPERIMENTAL

|   |    |
|---|----|
| Tabla 4. 1. Datos profundidad ópticas de los aerosoles y vapor de agua precipitable en Badajoz y Granada el día 18 de octubre de 2021. .... | 40 |
| Tabla 4. 2. Datos introducidos en la aplicación para la realización de la contrastación experimental. .                                     | 41 |

### 5. ESTUDIOS PARAMÉTRICOS.

|  |    |
|--|----|
| Tabla 5. 1. Datos base para los estudios paramétricos..... | 43 |
|--|----|

### A3. DATOS FIJOS DE LA APLICACIÓN

|  |    |
|--|----|
| Tabla A3. 1. Datos fijos de modelo. .... | 95 |
|--|----|

### A4. ESPECTRO SOLAR DE REFERENCIA

|  |     |
|--|-----|
| Tabla A4. 1. Datos norma ASTM-E891-87..... | 101 |
|--|-----|

## NOMENCLATURA

### SÍMBOLOS

|                     |   |
|---------------------|---|
| $AE$                | Exponente de Angstrom de absorción  |
| $AM$                | Masa de aire  |
| $AM_{O_3}$          | Ozono efectivo en índice AM   |
| $AM_p$              | Masa de aire corregida con la presión del lugar estudio                                 |
| $d_{ST}$            | Distancia tierra-sol en función del día del año   |
| $\overline{d_{ST}}$ | Distancia media entre la tierra y el sol  |
| $e$                 | Ángulo de elevación   |
| $g$                 | Aceleración de la gravedad  |
| $g$                 | Factor de simetría de aerosoles   |
| $h$                 | Altitud   |
| $h_o$               | Altura de máxima concentración de ozono   |
| $HA$                | Ángulo horario del sol  |
| $I_{df-aer}$        | Componente difusa de radiación ocasionada por la presencia de aerosoles en la atmósfera |
| $I_{df-ref}$        | Componente de radiación difusa reflejada por la tierra                                  |
| $I_{df-rh}$         | Componente radiación difusa ocasionada por la reflexión múltiple entre el suelo y aire  |
| $I_{df-sca-g}$      | Componente difusa de la radiación debida a la dispersión en régimen de Rayleigh         |
| $I_{df-sc}$         | Componente circunsolar de la radiación difusa   |
| $I_{df-si}$         | Componente de luz cenital de la radiación difusa  |
| $I_{dr}$            | Componente directa de la radiación en función de la longitud de onda                    |
| $I_{df}$            | Componente difusa de la radiación en función de la longitud de onda                     |
| $I_{ETR}$           | Radiación solar fuera de la atmósfera para cada longitud de onda                        |

**E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL**

|                |   |
|----------------|---|
| $I_{Total}$    | Irradiancia total para cada longitud de onda del modelo                               |
| $k_p$          | Factor de variación de la longitud de onda de los aerosoles                           |
| $K$            | Variación en la temperatura con respecto a la variación de altitud                    |
| $L_{aer}$      | Profundidad óptica de los aerosoles   |
| $Lat$          | Latitud   |
| $L_{H_2O}$     | Espesor vapor de agua precipitable  |
| $L_{O_3}$      | Concentración de ozono en la localización indicada                                    |
| $Long$         | Longitud  |
| $m_s$          | Pendiente de la superficie  |
| $n_{día}$      | Numero de día del año   |
| $p$            | Presión   |
| $p_o$          | Presión al nivel del mar: 1013.25 mbar  |
| $R_a$          | Constante de los gases ideales  |
| $t_h$          | Hora  |
| $t_m$          | Minutos   |
| $T$            | Temperatura   |
| $w$            | Albedo de dispersión simple a 400 nm de los aerosoles                                 |
| $w_s$          | Reflectancia superficial de la superficie de estudio                                  |
| $\Gamma$       | Ángulo diario   |
| $\Delta t_e$   | Corrección del tiempo solar   |
| $\alpha_{O_3}$ | Coefficiente de absorción de ozono para cada longitud de onda                         |
| $\alpha_w$     | Coefficiente de absorción de vapor de agua para cada longitud de onda                 |
| $\alpha_g$     | Coefficiente de absorción de gases uniformemente mezclados para cada longitud de onda |

**E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL**

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| $\delta$                       | Ángulo de declinación   |
| $\varepsilon_{rh}$             | Eficiencia reflectividad del cielo  |
| $\varepsilon_{trans-abs-aer}$  | Eficiencia de transmisión por absorción de aerosoles                        |
| $\varepsilon_{trans-abs-g}$    | Eficiencia de transmisión por absorción de los gases atmosféricos           |
| $\varepsilon_{trans-abs-H_2O}$ | Eficiencia de transmisión por absorción del vapor de agua atmosférico       |
| $\varepsilon_{trans-abs-O_3}$  | Eficiencia de la transmisión por absorción de ozono                         |
| $\varepsilon_{trans-ext-aer}$  | Eficiencia de transmisión por extinción de la luz causada por los aerosoles |
| $\varepsilon_{trans-sca-aer}$  | Eficiencia de transmisión por dispersión de aerosoles                       |
| $\varepsilon_{trans-sca-g}$    | Eficiencia de transmisión por dispersión en el régimen de Rayleigh          |
| $\lambda$                      | Longitud de onda  |
| $\varphi$                      | Ángulo de incidencia  |
| $\vartheta$                    | Ángulo cenital  |
| $\psi$                         | Ángulo azimutal   |
| $\psi_s$                       | Ángulo azimut de la superficie  |

**E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL**

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Justificación

En la Unión Europea se ha establecido como estrategia la transición hacia las energías renovables [1]. En España, dentro de las energías renovables se espera que la energía solar tenga un papel fundamental en dicha transición, debido a que es un país que cuenta con un gran número de horas de sol al año y no se le ha sacado el rendimiento que cabría esperar [2].

Cada vez son más las personas y empresas que apuestan por la colocación de paneles solares en sus domicilios o instalaciones para poder autoabastecer su demanda de energía eléctrica, la construcción de edificaciones que sacan el máximo partido a la energía solar para disminuir el consumo de energía eléctrica y la inversión en huertos solares para obtener una rentabilidad. Pero a la hora de instalar los paneles en muchas ocasiones no se conoce con exactitud el espectro solar que se va a tener en la localización de interés y se utilizan espectros solares de referencia que en muchas ocasiones no son del todo precisos.

En este proyecto se desarrolla una aplicación que permite obtener el espectro solar para unas condiciones de cielo despejado en tiempo real a partir de una serie de datos de entrada.

El conocimiento preciso del espectro solar puede contribuir a una adecuada selección de materiales que responde de forma óptima a cada longitud de onda, o a un diseño optimizado de la instalación, lo que puede garantizar un rendimiento máximo de esta. En este sentido, por ejemplo, se podría cuestionar la rentabilidad de determinadas tecnologías fotovoltaicas de mayor coste y mayor eficiencia pero que no son rentables en determinados emplazamientos con espectros solares característicos.

En conclusión, el estudio de espectro solar es fundamental a la hora de trabajar con la energía solar y por ello se crea la aplicación de este proyecto. En ella se puede estudiar de manera detallada el espectro solar y ver como varía en función de diferentes condiciones atmosféricas y de la localización geográfica entre otros datos.

## 1.2. Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es el estudio de la radiación solar óptica, que abarca desde las longitudes de onda de la radiación ultravioleta hasta las del infrarrojo que la atmosfera permite en mayor o menor medida que llegue a la superficie terrestre. Se quiere simular el espectro solar considerando que el cielo está despejado bajo unas condiciones atmosféricas y de localización determinadas. Para ello se ha desarrollado una aplicación utilizando la herramienta App Designer de MATLAB.

En la aplicación, el usuario introduce los datos de entrada necesarios para poder conocer el espectro solar y a partir de esos datos el código implementado en la aplicación calcula el espectro de irradiancia solar. Además, los datos de entrada y los datos calculados se pueden exportar a un archivo EXCEL para después ser estudiados de manera más detallada o comparados con otros archivos EXCEL obtenidos de la aplicación.

## E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

### 1.3. Antecedentes

No existen trabajos anteriores que busquen determinar el espectro solar en tiempo real en el Grupo de Combustibles y Motores (GCM) de la Escuela Superior de Ingeniería Industrial de Ciudad Real, España. Sin embargo, hay trabajos desarrollados que tiene relación con diferentes elementos que deben de considerarse para realizar el proyecto. Estos trabajos son:

- “Modelado de las propiedades ópticas de distintos aerosoles atmosféricos” realizado por Joaquín Díaz Lozano en 2017 [3].
- “Modelado de la reflectancia de superficies nevadas contaminadas con partículas de Hollín” realizado por Sara Rubio Moreno en 2018 [4].
- “Modelado del efecto de la distribución de tamaños de partículas sobre el oscurecimiento de superficies nevadas” realizado por Sofía González Correa en 2019 [5].
- “Revisión de métodos para el cálculo de propiedades ópticas de aglomerados de Hollín” realizado por Sofía González Correa en 2021 [6].

### 1.4. Viabilidad

Para la realización de la aplicación no es necesario adquirir ningún equipo, pero para hacer la comparación experimental es necesario utilizar un espectrorradiómetro. El sistema espectrorradiómetro que se ha utilizado fue financiado con la subvención de Adquisición de Equipamiento Científico-Técnico 2019 (ref. EQC2019-006105-P).



## 2. FUNDAMENTOS DEL ESPECTRO SOLAR

### 2.1. Descripción general

La Tierra órbita alrededor de una estrella, el sol, que es la fuente de energía que impulsa los ciclos de vida en el planeta. La fusión nuclear que se produce en el sol llena de manera continua el volumen del espacio circundante con fotones de radiación electromagnética. El espectro electromagnético del sol abarca una enorme gama de longitudes de onda de radiación, que engloban desde los rayos gamma y los rayos X, hasta las ondas ultravioletas, visibles, infrarrojas e incluso ondas de radio.

Tras varios años de estudio se ha determinado que el valor de la intensidad media de la radiación solar que llega a la parte externa de la atmósfera o la llamada constante solar es de  $1353 \text{ W/m}^2$  [7]. Pero el valor radiación extraterrestre no es un valor constante y depende del día del año. Esto es debido a la excentricidad de la órbita de la Tierra, que provoca un aumento del 3% de la intensidad de la radiación solar en el perihelio (punto en el que la Tierra está más próxima al sol) y una disminución del 3% en el afelio (punto en el que está más alejada).

La radiación extraterrestre se ve atenuada a su paso por la atmósfera debido a diferentes efectos y partículas presentes en ella. En la figura 2.1 se muestra una visión resumida de los diferentes efectos a los que se ve sometida la radiación en la atmósfera y que ocasionan que la intensidad de la radiación que acaba llegando a la superficie sea menor que la intensidad fuera de ella. Todo lo anteriormente expuesto se debe de tener en cuenta a la hora de determinar el espectro solar.

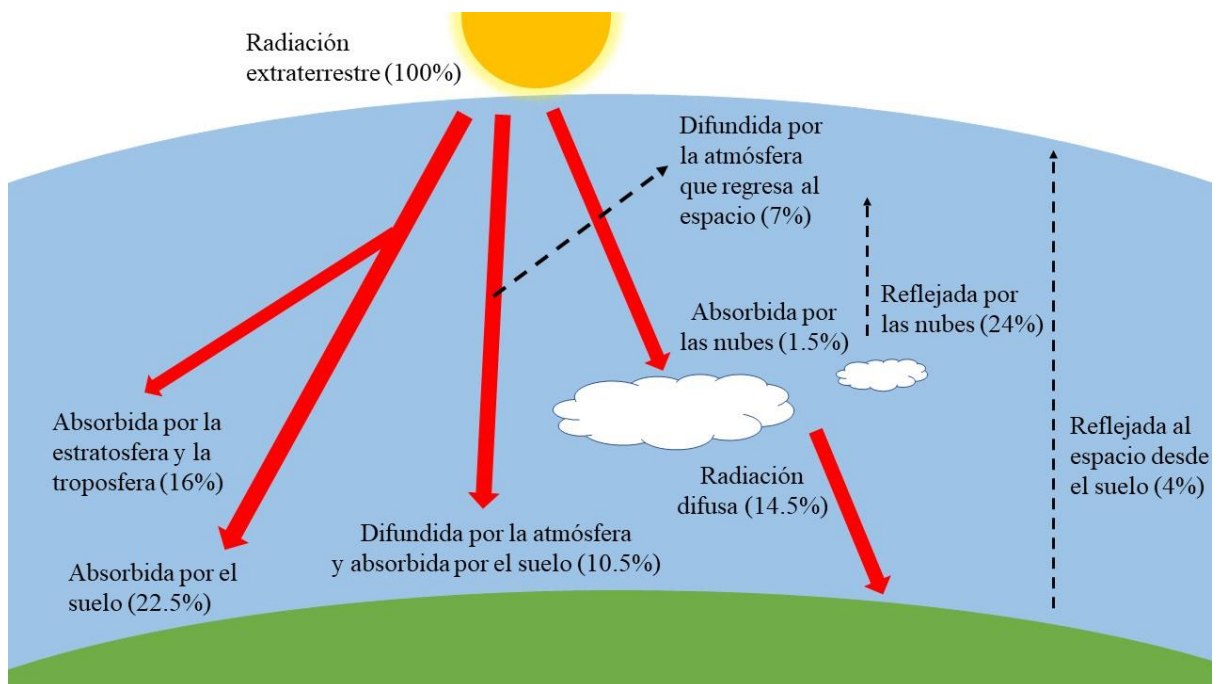


Figura 2. 1. Transformación de la radiación solar a su paso por la atmósfera.

## 2.2. Distancia entre la tierra y el sol

La variación de la distancia entre la tierra y el sol ( $d_{ST}$ ) tiene un efecto significativo a la hora de estudiar el espectro solar. Spencer enunció la ecuación (2.1) que permite cuantificar esta variación con respecto a la distancia media entre la tierra y el sol ( $\overline{d_{ST}}$ ), que tiene un valor de 149597870 km [8][9][10]:

$$d_{ST} = \frac{\overline{d_{ST}}}{(1.00011 + 0.034221 \cdot \cos(\Gamma) + 0.00128 \cdot \sin(\Gamma) + 0.000719 \cdot \cos(2\Gamma) + 0.000077 \cdot \sin(2\Gamma))} \quad (2.1)$$

donde  $\Gamma$ , es el ángulo diario que cuantifica la posición de la tierra en el plano de la eclíptica, el cual se define como el plano imaginario que contiene la órbita de la tierra alrededor del sol. En la figura 2.3 se puede ver visualmente en que consiste el plano eclíptico. Para el cálculo del ángulo diario se utiliza la ecuación (2.2) que viene expresada en grados [8]:

$$\Gamma = \frac{360}{365} \cdot (n_{día} - 1) \quad (2.2)$$

siendo  $n_{día}$  el número de día del año, el cual toma valores entre 1 para el 1 de enero y 365 para el 31 de diciembre. Además, dicho ángulo también es empleado para calcular el ángulo de declinación solar y la ecuación del tiempo.

Utilizando la ecuación (2.1) se representa en la figura 2.2 cómo varía la distancia entre la tierra y el sol en función del día del año.

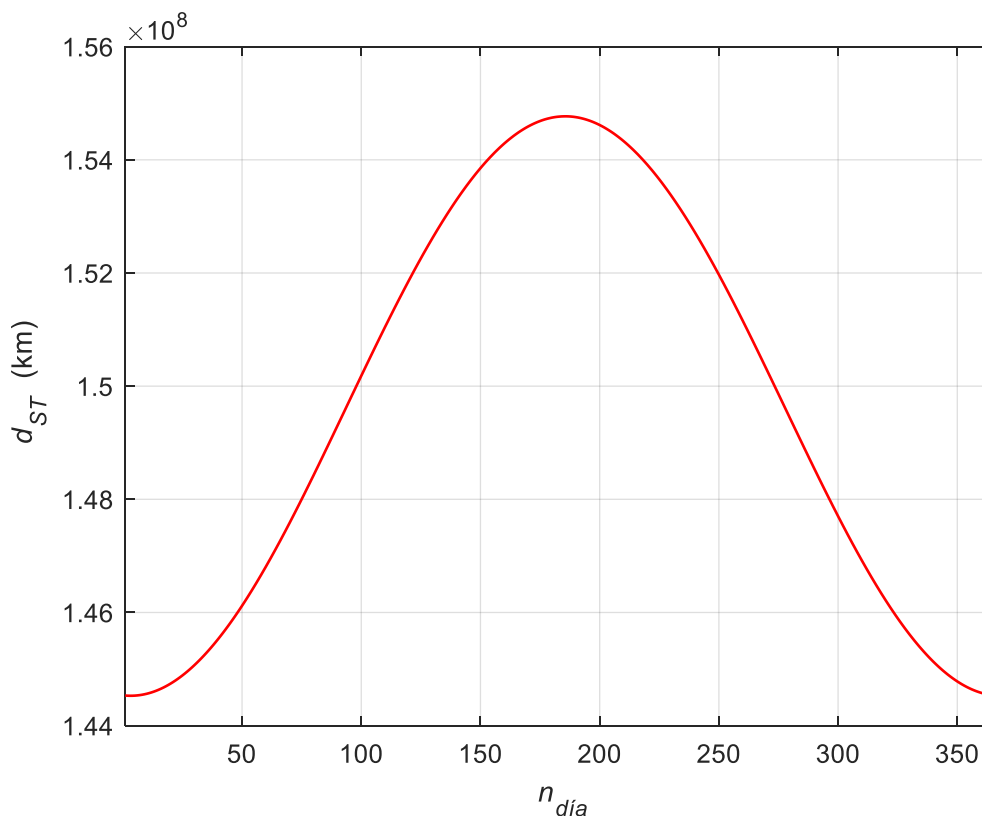


Figura 2. 2. Variación de la distancia entre la tierra y el sol en función del día del año.

### 2.3. Ángulo de declinación

En la figura 2.3 el ángulo formado entre el plano ecuatorial y el plano de la órbita de la tierra recibe el nombre de ángulo de declinación ( $\delta$ ). Este ángulo varía a medida que la tierra se desplaza a lo largo de su órbita durante el año. El ángulo de declinación ( $\delta$ ) puede tomar valores entre  $23.45^\circ$  y  $-23.45^\circ$  como se observa en la figura 2.4 y es responsable de la aparición de las estaciones. Solo en los equinoccios de primavera y otoño el ángulo de declinación vale  $0^\circ$  [11] [12].

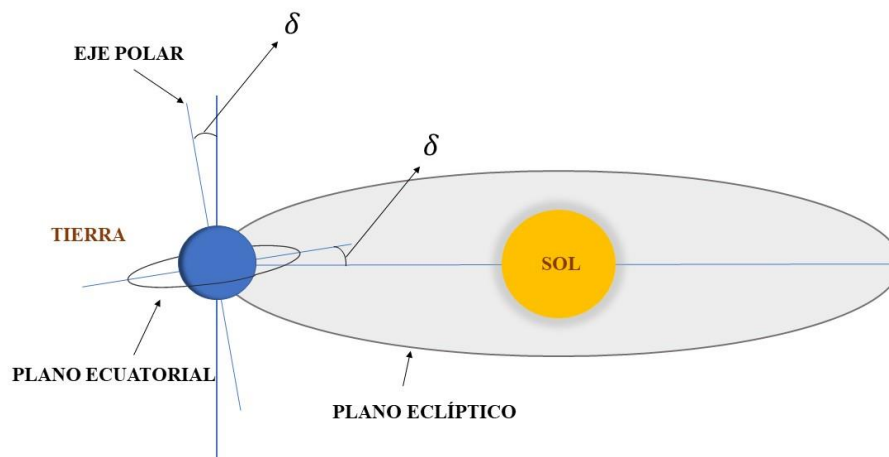


Figura 2. 3. Ángulo de declinación.

Existen varias ecuaciones empleadas en ingeniería para determinar el ángulo de declinación solar como son:

$$\delta = 23.45 \cdot \text{sen}\left(\frac{360}{365} \cdot (284 + n_{\text{día}})\right) \quad (2.3)$$

$$\delta = (0.006918 - 0.39912 \cdot \cos(\Gamma) + 0.070257 \cdot \text{sen}(\Gamma) - 0.006758 \cdot \cos(2\Gamma) + 0.000907 \cdot \text{sen}(2\Gamma) - 0.002697 \cdot \cos(3\Gamma) + 0.00148 \cdot \text{sen}(3\Gamma)) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (2.4)$$

Ambas ecuaciones vienen expresadas en grados y permiten obtener el ángulo de declinación con una precisión aceptable, pero si se comparan entre ellas se obtiene que la ecuación (2.4) tiene un margen de error menor, por ello en este proyecto se emplea la fórmula (2.4). Dicha ecuación fue enunciada por Spencer en 1971 [8] [13] y a día de hoy es utilizada por organismos con alto prestigio como es el caso del NOAA [14]. Utilizando la ecuación (2.4) se representa la evolución del ángulo de declinación a lo largo del año.

E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

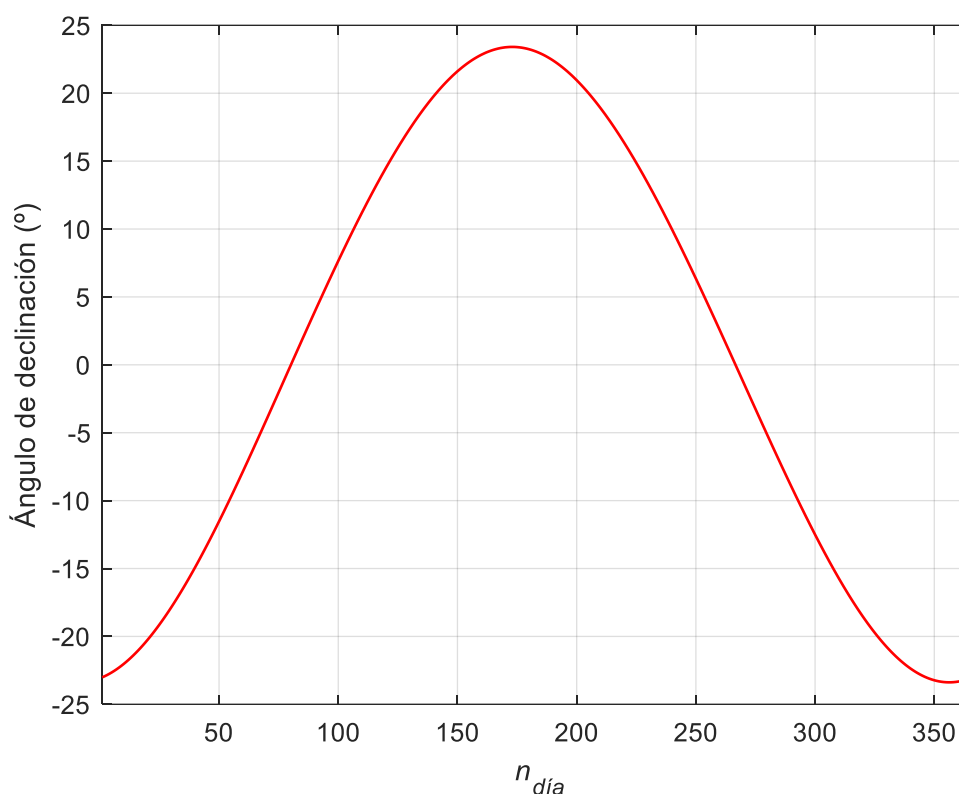


Figura 2. 4. Variación del ángulo de declinación en función del día del año.

## 2.4. Corrección del tiempo solar

El tiempo que la tierra tarda en recorrer distancias iguales a lo largo de su órbita varía durante el año, mientras que la velocidad de rotación diaria permanece constante. Debido a ello, la hora estándar local en la que el sol se encuentra en el meridiano local (medio día solar) no es constante y varía durante el año.

La corrección del tiempo solar cuantifica la diferencia entre el tiempo solar medio (medido con un reloj) y el tiempo solar aparente (medido por un reloj del sol). Dicha diferencia ( $\Delta t_e$ ) no es constante y varía a lo largo del año, para determinar su valor se utiliza la ecuación (2.5) que fue enunciada por Spencer en 1971 y viene cuantificada en minutos [8]:

$$\Delta t_e = 229.18 \cdot (0.000075 + 0.001868 \cdot \cos(\Gamma) - 0.032077 \cdot \text{sen}(\Gamma) - 0.014615 \cdot \cos(2\Gamma) - 0.04089 \cdot \text{sen}(2\Gamma)) \quad (2.5)$$

En la figura 2.5 se representa cómo varía la diferencia entre el tiempo solar medio y el solar aparente durante el año utilizando la ecuación (2.5). La máxima diferencia se produce el día 1 de noviembre cuando el tiempo solar medio está a más de 16 minutos por detrás del tiempo solar aparente y el 15 de febrero cuando el tiempo solar medio va más de 14 minutos por delante del aparente [11] [15].

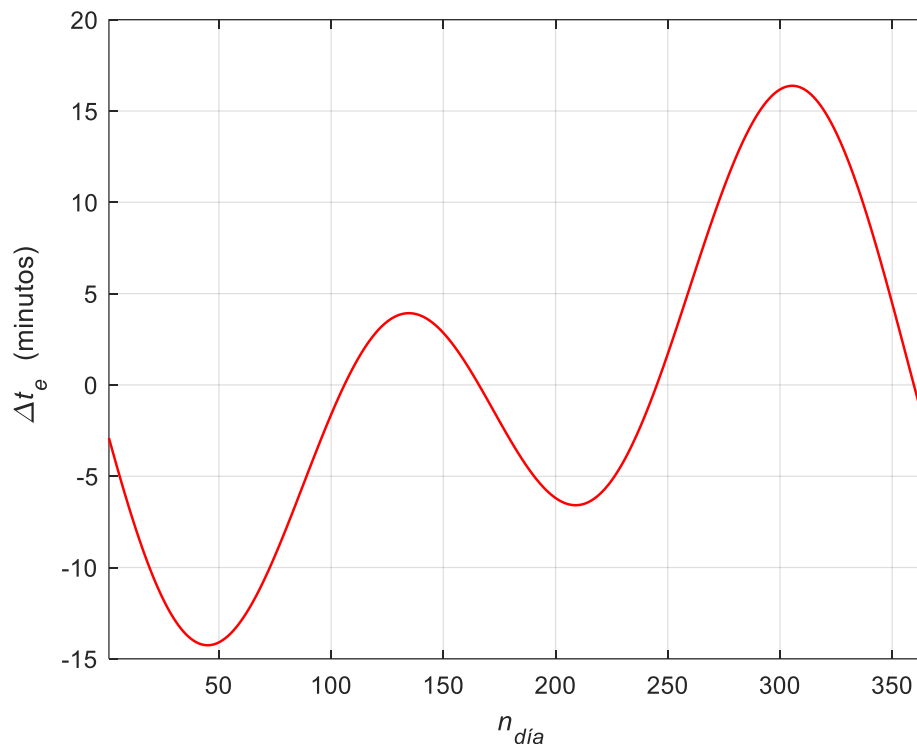


Figura 2. 5. Diferencia entre el tiempo solar medio y el tiempo solar aparente en función del día del año.

## 2.5. Ángulo horario del sol

El ángulo horario ( $HA$ ) transforma la hora solar local en el ángulo (en grados) que el sol se desplaza a lo largo del cielo. Se utiliza para describir la rotación de la tierra alrededor de su eje y se mide entre el meridiano del observador y el meridiano cuyo plano contiene al sol. Al mediodía solar dicho ángulo vale  $0^\circ$ . Por la mañana el ángulo horario toma valores negativos y por la tarde valores positivos [15]. Para calcularlo se usa la ecuación (2.6) que viene expresada en grados [11]:

$$HA = 15 \cdot \left( t_h + \frac{t_m}{60} + \frac{\Delta t_e}{60} + \frac{\left( \text{Int} \left( \frac{Long}{15} \right) \cdot 15 - Long \right) \cdot 4}{60} + 12 \right) - 360 \quad (2.6)$$

donde:

|              |   |
|--------------|---|
| $t_h$        | Hora  |
| $t_m$        | Minutos   |
| $\Delta t_e$ | Corrección del tiempo solar   |
| Int          | Operador para tomar el número entero de la división redondeado hacia abajo. |
| Long         | Longitud del lugar del interés en grados                                    |

A la hora de calcular el ángulo horario del sol hay que destacar que la tierra gira  $15^\circ$  por hora. Por lo tanto, cada hora corresponde a un movimiento angular del sol en el cielo de  $15^\circ$ , de ahí que en la ecuación (2.6) aparezca el número 15.

### E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

A continuación, para poder comprender mejor qué expresa el ángulo horario se utiliza la ecuación (2.6) considerando en dos localizaciones distintas, que se encuentran en la zona horaria UTC+0, las veinticuatro horas de los siguientes días:

- Aquellos en los que la corrección del tiempo solar alcanza sus valores positivos y negativos máximos (14 de febrero y 1 de noviembre).
- Aquellos en los que la corrección del tiempo solar es nula (16 de abril, 15 de junio, 2 de septiembre y 26 de diciembre).

La localidad de Ciudad Real, España, cuyas coordenadas geográficas son:

- Longitud:  $-3.92726^\circ$ .
- Latitud:  $38.9861^\circ$ .

Si se representan los datos calculados se obtiene la figura 2.6.

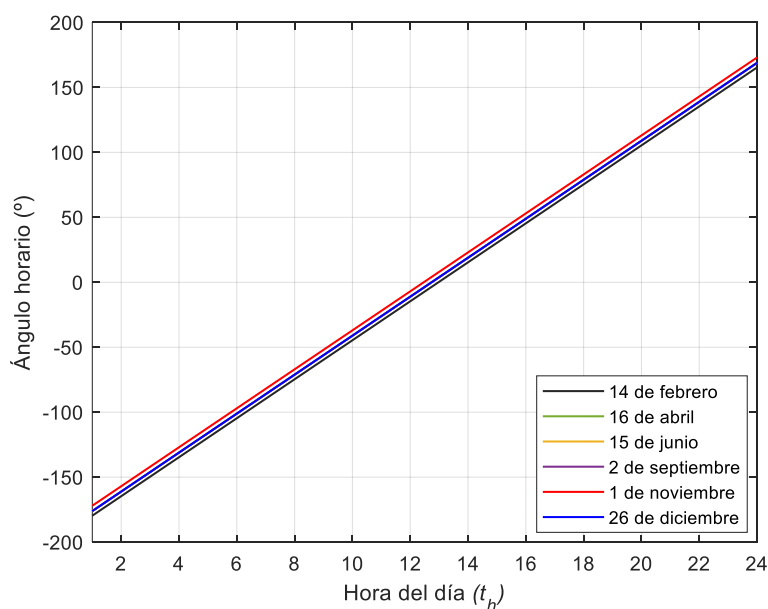


Figura 2. 6. Variación del ángulo horario considerando distintos días del año en Ciudad Real, España.

La localidad de Gerona, España, cuyas coordenadas geográficas son:

- Longitud:  $2.82493^\circ$ .
- Latitud:  $41.98311^\circ$ .

Los resultados se representan en la figura 2.7.

E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

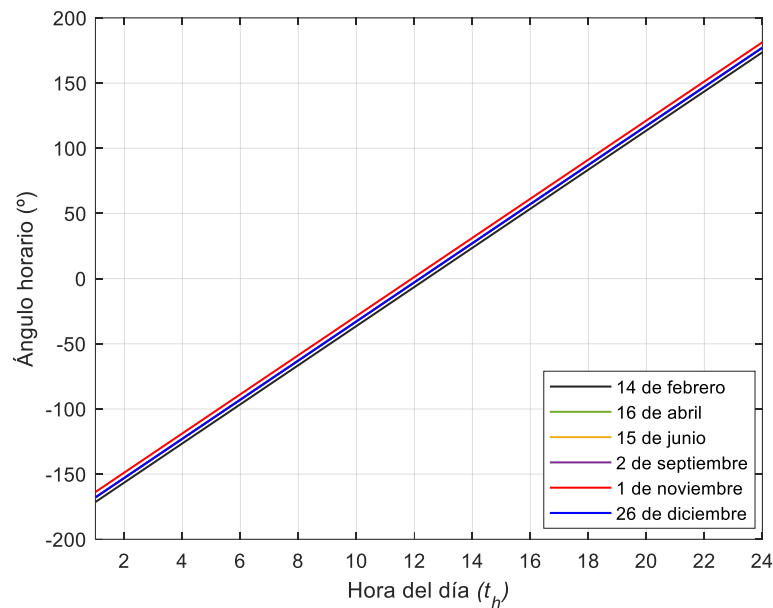


Figura 2. 7. Variación del ángulo horario considerando distintos días del año en de Gerona, España.

En las figuras 2.6 y 2.7 se observa que la máxima diferencia entre el ángulo horario en una misma localización se produce entre los días en los que la corrección del tiempo solar toma valores positivos y negativos máximos.

Para conocer si la variación de la longitud geográfica de estudio ocasiona alguna variación en el ángulo horario se representa su variación el día 15 de junio en Ciudad Real y Gerona en la figura 2.8. En dicha figura se puede observar que la variación que se produce en el ángulo horario para cada hora es de  $8.2478^\circ$  que equivale a aproximadamente a 33 minutos. Dicha diferencia explica la diferencia de hora solar que existe en ambas localizaciones que se encuentran dentro de la misma zona horaria.

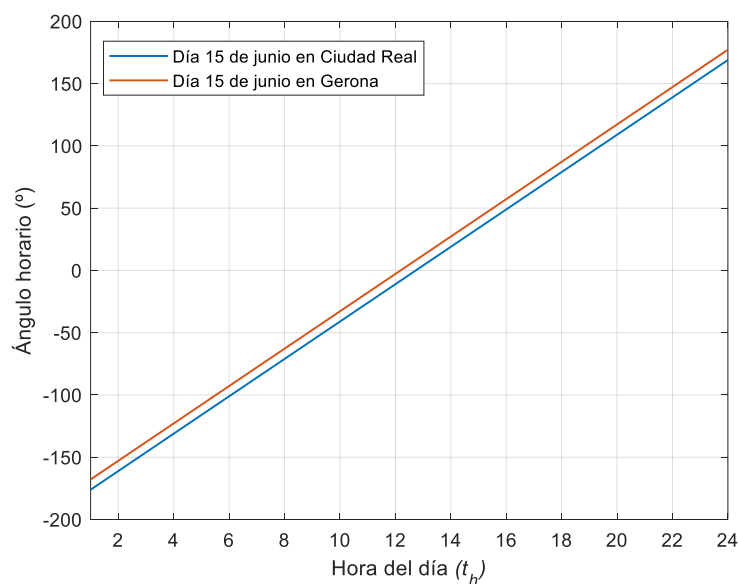


Figura 2. 8. Estudio de la variación del ángulo horario con la longitud.

## 2.6. Posición solar: Ángulo cenital y azimutal

Los parámetros que definen la posición solar son el ángulo cenital ( $\emptyset$ ) (o bien su complementario: el ángulo de elevación ( $e$ )), el ángulo azimutal ( $\psi$ ) y la hora solar local. Todos ellos afectan principalmente a la distancia que recorre la radiación solar en la atmósfera antes de llegar a la superficie [11]. En la figura 2.9 se puede visualizar los ángulos que se tienen en cuenta para definir la posición del sol.

Para poder obtener el ángulo de elevación primero se calcula el ángulo cenital. Este se define como el ángulo que se forma entre el sol y la vertical del lugar de interés, en función del tiempo, del día del año y de la latitud. Para su cálculo se emplea la ecuación (2.7) [11].

$$\emptyset = \arccos(\cos(\delta) \cdot \cos(Lat) \cdot \cos(HA) + \text{sen}(\delta) \cdot \text{sen}(Lat)) \quad (2.7)$$

donde:

|          |  |
|----------|--|
| $\delta$ | Ángulo de declinación                  |
| $Lat$    | Latitud del lugar de interés en grados |
| $HA$     | Ángulo horario del sol                 |

Este ángulo es complementario al ángulo de elevación: el primero se mide desde la vertical y en el segundo desde la horizontal [16]. Para obtener el ángulo de elevación se utiliza la ecuación (2.8).

$$e = 90 - \emptyset \quad (2.8)$$

El ángulo azimutal se define como el ángulo medido en el plano horizontal formado por el sol y la dirección norte. Puede tomar valores entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$  [9]. Si el ángulo horario ( $HA$ ) es menor que cero, es decir por la mañana, el ángulo azimutal se determina con la ecuación (2.9). [11] [17].

$$\psi = \arccos\left(\frac{\cos(Lat) \cdot \text{sen}(\delta) - \cos(\delta) \cdot \cos(HA) \cdot \text{sen}(Lat)}{\cos(e)}\right) \quad (2.9)$$

En caso contrario se emplea la ecuación (2.10).

$$\psi = 360 - \arccos\left(\frac{\cos(Lat) \cdot \text{sen}(\delta) - \cos(\delta) \cdot \cos(HA) \cdot \text{sen}(Lat)}{\cos(e)}\right) \quad (2.10)$$

En la figura 2.9 se pueden identificar los ángulos descritos.



E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

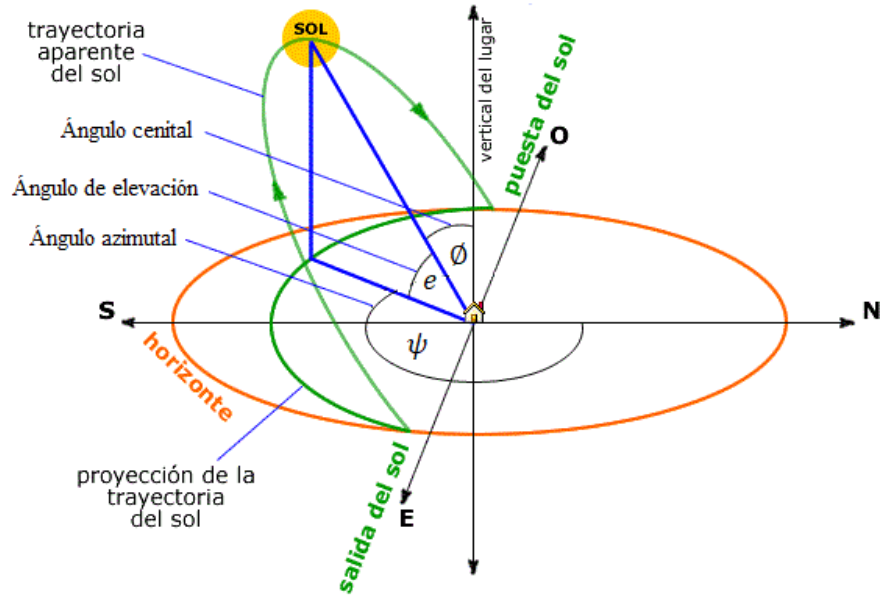


Figura 2. 9. Ángulos posición solar, adaptado de [18].

Por último, se representan en la figura 2.10 todos estos ángulos para los días 15 de marzo, 15 de junio y 15 de diciembre de 2021 en Ciudad Real para las horas en las que sol está visible en el cielo, es decir cuándo el ángulo de elevación es mayor o igual que cero grados y el ángulo cenital es menor o igual que noventa grados.

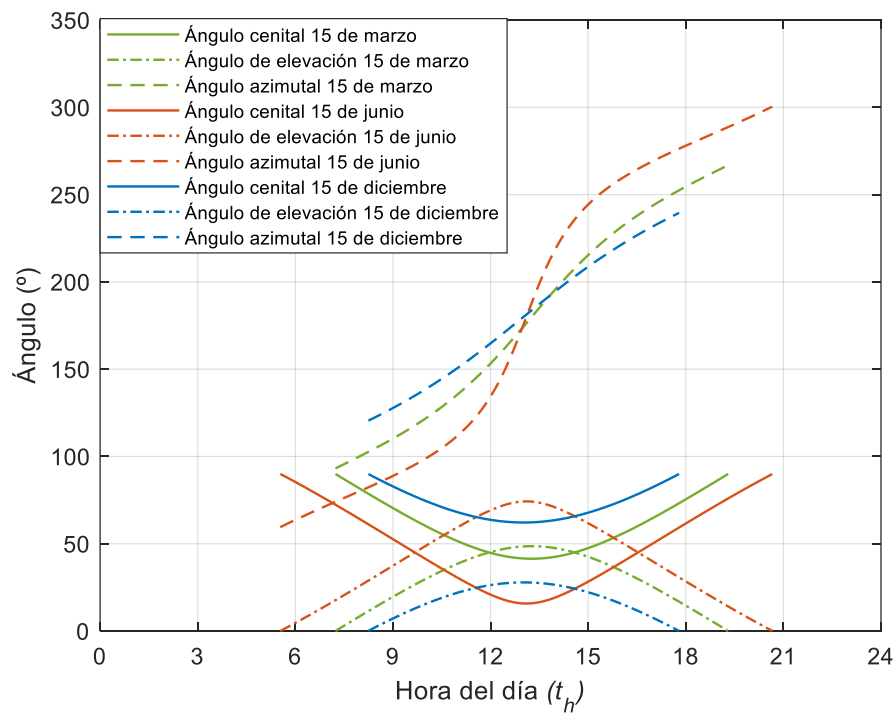


Figura 2. 10. Valores de ángulos que definen la posición solar durante el día para los días 15 de marzo, 15 de junio y 15 de diciembre de 2021 en Ciudad Real, España.

## 2.7. Ángulo de incidencia

La intensidad de la radiación solar que llega a una superficie se ve influida por el ángulo de incidencia ( $\varphi$ ) que forman los rayos procedentes del sol con dicha superficie. Este ángulo ocasiona variaciones en el tamaño del área radiada, debido a que cuando el sol se aleja del zenit la radiación solar se proyecta sobre el plano aumentando el tamaño del área radiada, manteniéndose constante el flujo de energía. Lo anteriormente descrito se puede ver en la figura 2.11 [19].

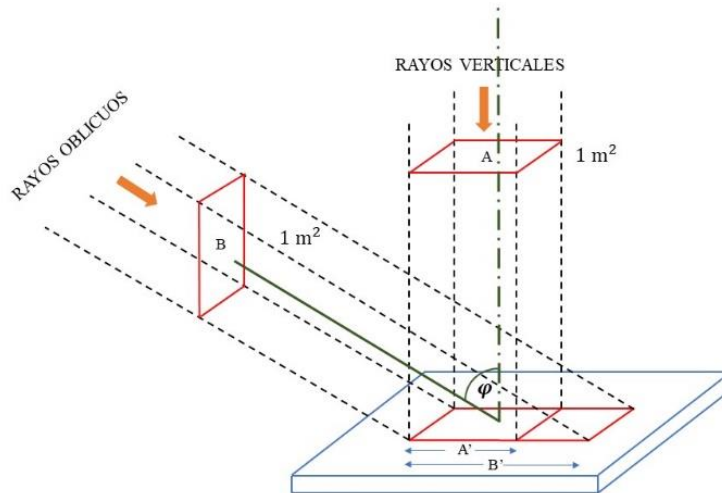


Figura 2. 11. Ángulo de incidencia.

En el caso de que la superficie sea un panel o colector solar es necesario conocer si cuenta con sistemas para seguir la trayectoria del sol:

- En el caso de no contar con ningún sistema, primero es importante definir la pendiente ( $m_s$ ) y el ángulo azimutal de la superficie ( $\psi_s$ ) de estudio. Una vez definidos los parámetros anteriores se procede a determinar el ángulo de incidencia ( $\varphi$ ) [11] para una superficie sin seguimiento solar través de la ecuación (2.11).

$$\varphi = \arccos \left( \begin{aligned} &\text{sen}(\delta) \cdot \text{sen}(Lat) \cdot \cos(m_s) - \text{sen}(\delta) \cdot \cos(Lat) \cdot \text{sen}(m_s) \cdot \cos(\psi_s) \\ &+ \cos(\delta) \cdot \cos(Lat) \cdot \cos(m_s) \cdot \cos\left(HA \cdot \frac{\pi}{180}\right) + \cos(\delta) \cdot \text{sen}(Lat) \\ &\cdot \text{sen}(m_s) \cdot \cos(\psi_s) \cdot \cos\left(HA \cdot \frac{\pi}{180}\right) + \cos(\delta) \cdot \text{sen}(m_s) \cdot \text{sen}(\psi_s) \\ &\cdot \text{sen}\left(HA \cdot \frac{\pi}{180}\right) \end{aligned} \right) \quad (2.11)$$

donde:

|          |  |
|----------|--|
| $\delta$ | Ángulo de declinación                  |
| $Lat$    | Latitud del lugar de interés en grados |
| $m_s$    | Inclinación de la superficie en grados |
| $HA$     | Ángulo horario del sol                 |
| $\psi_s$ | Ángulo azimutal de la superficie.      |

## E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

Utilizando la ecuación 2.11 se representa en la figura 2.12 como varia el ángulo de incidencia en función de la inclinación de la superficie de estudio manteniendo fijo el azimut de esta en  $180^\circ$  a las 13:00 (Hora UTC+0) para los días 15 de marzo, 15 de junio y 15 de diciembre de 2021 en Ciudad Real, España.

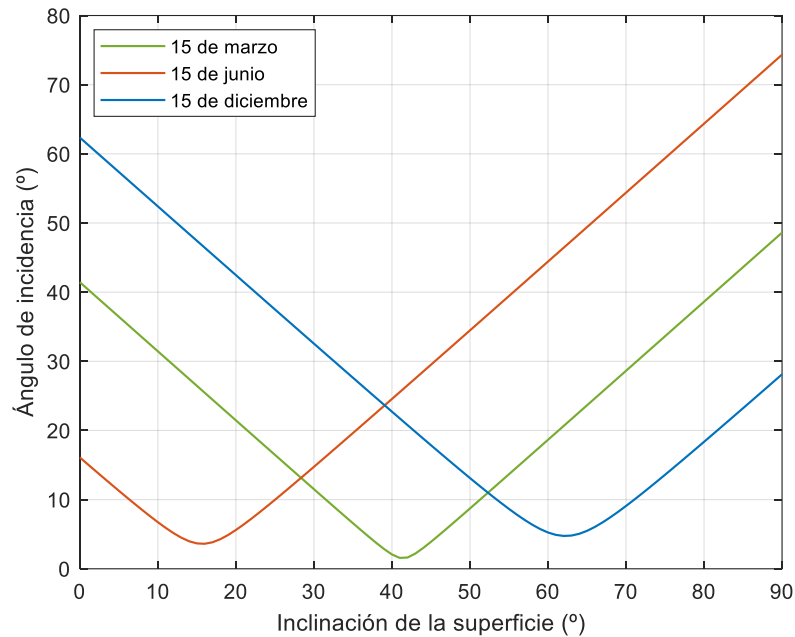


Figura 2. 12. Variación del ángulo de incidencia en función de la inclinación de la superficie de estudio manteniendo fijo el azimut de esta en  $180^\circ$  a las 13:00 (Hora UTC+0) para los días 15 de marzo, 15 de junio y 15 de diciembre de 2021 en Ciudad Real, España.

En dicha figura se puede comprobar que la inclinación óptima de la superficie de estudio que permite minimizar el ángulo de incidencia para una misma hora depende en gran medida del día del año. Esto es debido a variación de la posición solar en el cielo en función de la época del año.

- Si la superficie cuenta con dispositivos de seguimiento solar, es decir no tiene una orientación fija el ángulo de incidencia vale cero. En este caso se sincroniza la pendiente de tal forma que el ángulo de inclinación de la superficie coincide con el ángulo cenital, y su orientación azimutal coincide con el ángulo azimutal solar. [11].

$$m_s = \emptyset \quad (2.12)$$

$$\psi_s = \psi \quad (2.13)$$

## 2.8. Efecto de la trayectoria sobre la atmosfera

Para cuantificar la distancia que recorre la radiación desde que entra en la atmósfera hasta que llega a la superficie terrestre se emplea el índice  $AM$ , que es cociente entre el recorrido óptico de un rayo solar y el correspondiente a la dirección normal a la superficie terrestre ( $\emptyset = 0$ ). Con dicho parámetro se tiene

**E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL**

en cuenta la atenuación que sufre la potencia de la luz a medida que atraviesa la atmósfera y sufre los fenómenos de absorción y dispersión [11].

En la figura 2.13, se puede observar que el valor mínimo que puede tomar el índice  $AM$  es uno, como es el caso de la distancia  $L_1$  y toma un valor superior para la distancia  $L_2$  debido a que los rayos del sol recorren una mayor distancia en la atmósfera. A continuación, se muestra la manera de calcular el índice  $AM$  para la distancia  $L_2$  en la ecuación 2.14.

$$AM = \frac{L_2}{L_1} \quad (2.14)$$

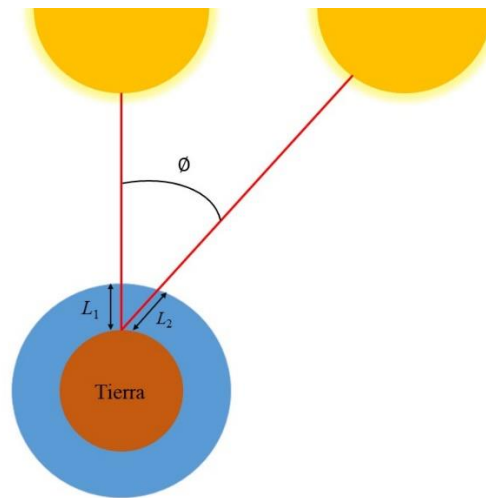


Figura 2. 13. Índice de masa de aire.

A la hora de determinar el índice  $AM$  de manera analítica existen varias fórmulas que pueden llegar a ser muy simples y poco exactas como es la ecuación (2.15) [11] y otras mucho más precisas como es el caso de la ecuación (2.16), enunciada por Kasten que permite calcular la masa de aire en función del ángulo cenital [20] y que es utilizada en este proyecto.

$$AM = \frac{1}{\cos(\vartheta)} \quad (2.15)$$

$$AM = \frac{1}{\cos(\vartheta) + 0.15 \cdot (93.885 - (\vartheta))^{-1.253}} \quad (2.16)$$

Utilizando la ecuación 2.16 se representa el índice  $AM$  en la figura 2.14 para el día 15 de junio y 15 de diciembre de 2021 en Ciudad real considerando la zona horaria UTC+0.

E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

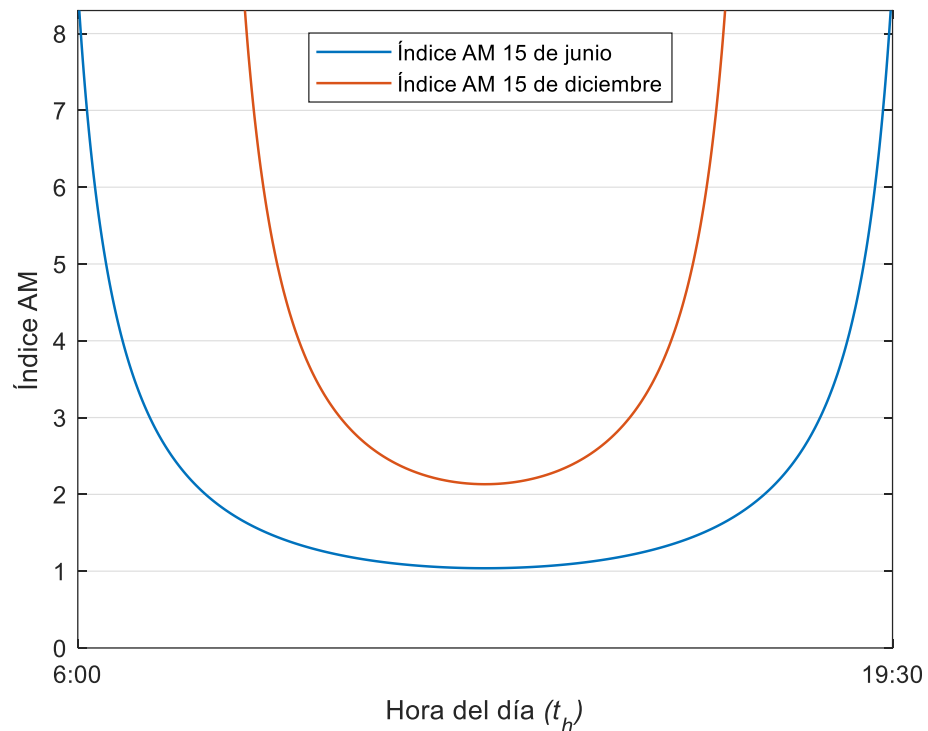


Figura 2. 14. Índice de masa de aire empleando la ecuación 2.16 para Ciudad real los días 15 de junio y 15 de diciembre de 2021 considerando la zona horaria UTC+0.

Pero la ecuación (2.16) solo es válida para la presión a nivel del mar. En muchas ocasiones los lugares de estudio del espectro solar no se encuentran al nivel del mar, por lo tanto, es necesario corregir el índice  $AM$ . La corrección de dicho índice no se hace en función de la altitud, sino en función de la presión, ya que la atenuación de la irradiación solar no depende tanto del espesor atmosférico atravesado como de la masa atmosférica atravesada, que es proporcional a la presión. El parámetro corregido se denomina índice  $AM_p$ , [11] y se determina a través de la ecuación (2.17).

$$AM_p = AM \frac{p}{p_o} \quad (2.17)$$

donde  $p$  es la presión medida en el lugar de estudio que debe introducirse en milibares, ya que para  $p_o$  se está considerando un valor de 1013.25 mbar.

## 2.9. Efectos atmosféricos

### 2.9.1. Introducción

Con lo mencionado en los anteriores apartados la presencia de la atmósfera provoca varios efectos sobre la radiación solar que llega a la superficie terrestre:

- Reducción en la potencia de la radiación solar debido a la absorción y a la dispersión que tiene lugar en la atmósfera.
- La aparición de la componente dispersa de la radiación difusa.

E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

- Cambios en la distribución espectral de la radiación causados por la mayor absorción o dispersión de algunas longitudes de onda.
- Variaciones locales de la radiación causadas por la presencia de nubes, contaminación, vapor de agua, humo...

Todos estos efectos se pueden observar de manera simplificada en la figura 2.15. Estos son causados por diferentes componentes de la atmósfera que son descritas a continuación.

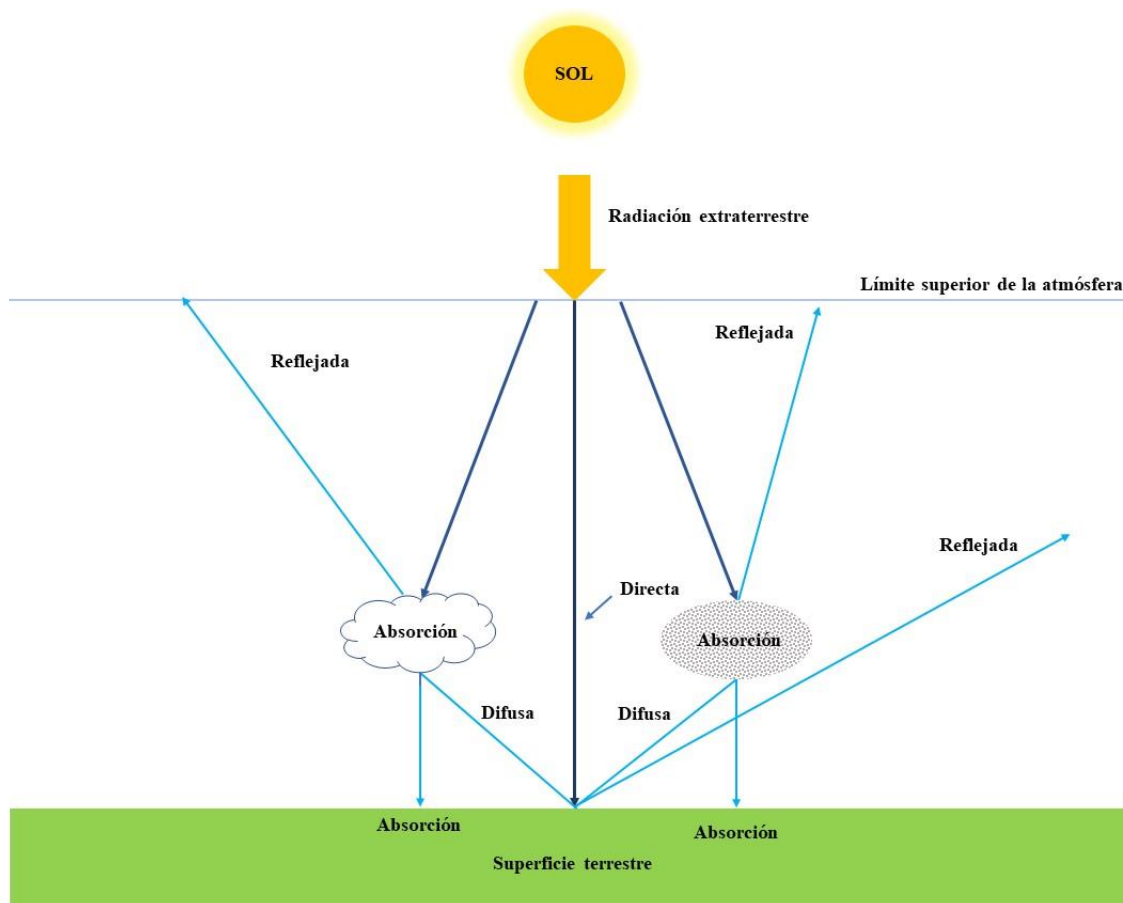


Figura 2. 15. Efectos atmosféricos.

### 2.9.2. Atmósfera seca y sin ozono

La atmósfera seca está constituida principalmente de un 78.1% de nitrógeno, un 20.9% de oxígeno y de varios tipos de oligogases como son el argón, el helio y gases de efecto invernadero. Estos últimos son los componentes de la atmósfera que absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de onda del espectro infrarrojo emitido por la superficie terrestre, la atmósfera y las nubes. Los principales gases de efecto invernadero presentes en la atmósfera son el vapor de agua, el dióxido de carbono, el óxido nitroso, el metano y el ozono. Además, en la atmósfera también hay presentes otro tipo de gases de efecto invernadero producidos por el ser humano, como es el caso de halocarbonos [21].

Para cuantificar la eficiencia de transmisión debida a la absorción de los gases de efecto invernadero para cada longitud de onda exceptuando el ozono y el vapor de agua, cuyo efecto se define en los siguientes apartados, se emplea la ecuación (2.18) [9] [10].

E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

$$\varepsilon_{trans-g-abs}(\lambda) = e^{\left( \frac{1.41 \cdot \alpha_g(\lambda) \cdot AM_p}{(1 + 118.93 \cdot \alpha_g(\lambda) \cdot AM_p)^{0.45}} \right)} \quad (2.18)$$

donde  $\alpha_g(\lambda)$  es el coeficiente de absorción de los gases atmosféricos asumiendo que están uniformemente mezclados para cada longitud de onda y  $AM_p$  corresponde al índice  $AM$  corregido por la presión.

A continuación, se representa la eficiencia de transmisión por absorción de los gases de efecto invernadero exceptuando el ozono y el vapor de agua empleado la ecuación (2.18) y utilizando dos valores para el índice  $AM_p$ . Además, también se identifican los gases que provocan dicho efecto.

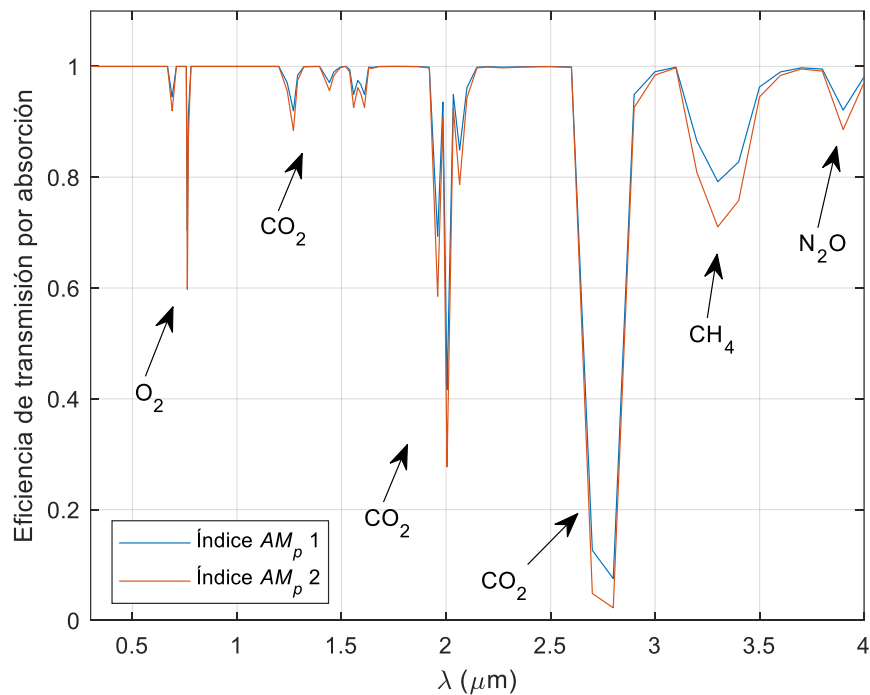


Figura 2. 16. Eficiencia de transmisión debida a la absorción de los gases de efecto invernadero exceptuando el ozono y el vapor de agua para un índice  $AM_p$  de uno y dos.

La dispersión de la luz visible o de cualquier otra radiación electromagnética ocasionada por partículas más pequeñas que la longitud de onda de la radiación que incide sobre ellas se denomina dispersión en el régimen de Rayleigh ya que, en este rango de tamaños, la utilización de la teoría de Rayleigh es suficientemente precisa [6]. Este fenómeno tiene una gran dependencia de la longitud de onda. Cuanto más pequeña es esta, mayor dispersión se produce. Para cuantificar la eficiencia de la transmisión debida a la dispersión que sufre la luz solar debida a los gases de efecto invernadero para cada longitud de onda exceptuando el ozono y el vapor de agua cuyo efecto, se define en los siguientes apartados se utiliza la ecuación (2.19) que fue enunciada por Kneizys et al. [9] [10]:

$$\varepsilon_{trans-g-sca}(\lambda) = e^{\left( \frac{AM_p}{\left( \lambda^4 \cdot \left( 115.6406 - \frac{1.335}{\lambda^2} \right) \right)} \right)} \quad (2.19)$$

**E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL**

donde  $AM_p$  es la masa de aire corregida por la presión y  $\lambda$  es la longitud de onda expresada en  $\mu\text{m}$ .

Por último, se representa la eficiencia de la dispersión que sufre la luz solar debida a los gases de efecto invernadero exceptuando el ozono y el vapor de agua. Para obtener la figura 2.17 se han supuesto dos valores del índice  $AM_p$ .

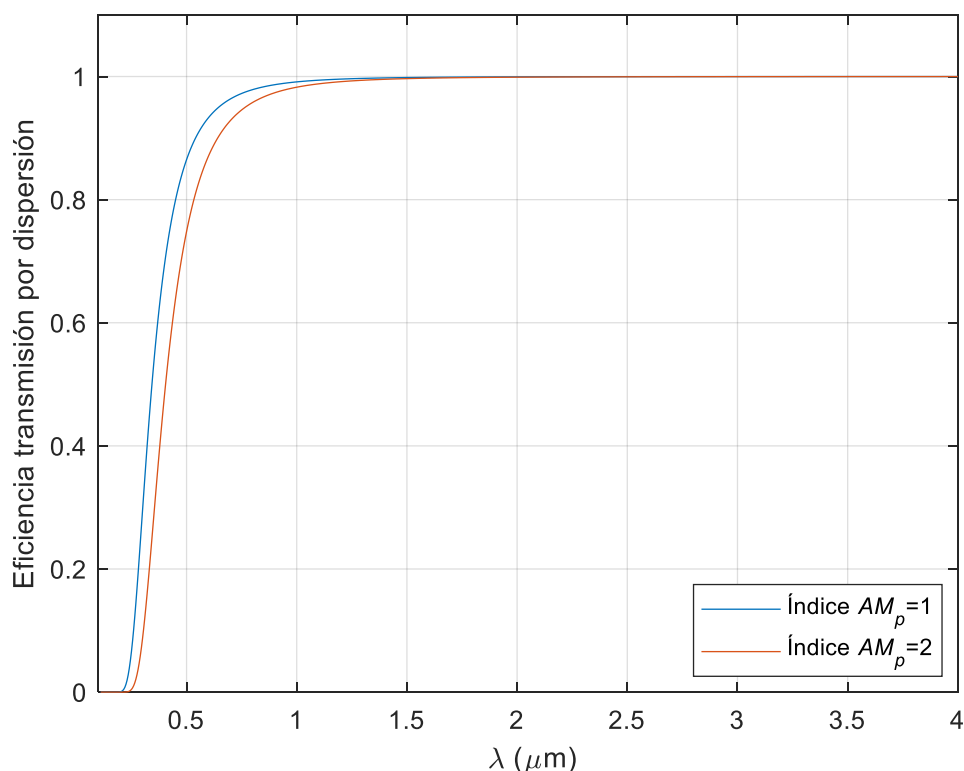


Figura 2. 17. Eficiencia de transmisión por la dispersión que sufre la luz solar debida a los gases de efecto invernadero exceptuando el ozono y el vapor de agua para un índice  $AM_p$  de uno y dos.

**2.9.3. Ozono atmosférico**

Aunque el ozono se encuentra en todas las capas de la atmósfera, su concentración aumenta en una franja muy pequeña que se localiza entre 10 y 40 km de altura de la superficie, [22], alcanzando su máxima concentración a 22 km de altura [11].

La presencia del ozono provoca la absorción de la radiación ultravioleta de onda media del sol. Este fenómeno es fundamental para la salud de los seres vivos, pero provoca la atenuación de la radiación que acaba llegando a la superficie.

El espesor de la capa de ozono en la atmósfera no es constante y depende de la latitud y de la longitud del lugar. Para poder estudiar el espectro solar es fundamental cuantificar dicho espesor. Van Heuklon [23] desarrolló una aproximación que permite estimar el espesor óptico de la columna de ozono total en centímetros ( $L_{O_3}$ ). Dicho espesor se determina suponiendo que todo el ozono estuviera concentrado en la superficie de la localización terrestre indicada.



### E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

Dicho modelo estipula:

- Para el hemisferio norte (latitud > 0):

Si la longitud es mayor o igual que cero (hemisferio oriental):

$$L_{O_3} = 0.001 \cdot (235 + (150 + 40 \cdot \text{sen}(0.017218(n_{\text{día}} - 30)) + 20 \cdot \text{sen}(0.05256 \cdot (Long + 20)) \cdot ((\text{sen}(0.02234 \cdot Lat))^2)) \quad (2.20)$$

Si la longitud es menor que cero (hemisferio occidental):

$$L_{O_3} = 0.001 \cdot (235 + (150 + 40 \cdot \text{sen}(0.017218 \cdot (n_{\text{día}} - 30)) + 20 \cdot \text{sen}(0.017218 \cdot (n_{\text{día}})) \cdot ((\text{sen}(0.02234 \cdot Lat))^2)) \quad (2.21)$$

- Para el hemisferio sur (tanto occidental como oriental):

$$L_{O_3} = 0.001 \cdot (235 + (100 + 30 \cdot \text{sen}(0.017218(n_{\text{día}} + 152.625)) + 20 \cdot \text{sen}(0.03491 \cdot (Long - 75)) \cdot ((\text{sen}(0.02618 \cdot Lat))^2)) \quad (2.22)$$

donde  $n_{\text{día}}$  es el número de día del año,  $Lat$  es la latitud de lugar de estudio y  $Long$  es longitud de sitio de estudio. En esta ecuación se tienen en cuenta dichos parámetros debido a que la mayor parte del ozono que se localiza en la estratosfera se produce en el ecuador donde la intensidad de la radiación solar es mayor, y de aquí a través del viento el transportado hacia latitudes mayores.

Utilizando las ecuaciones (2.20) y (2.21), se simula la variación del espesor de ozono en Ciudad Real, España, y Pekín, China, para cada día del año en la figura 2.18, en ella se puede ver que la variación no es muy significativa, pero es necesaria tenerla en cuenta para poder obtener un espectro solar más exacto.

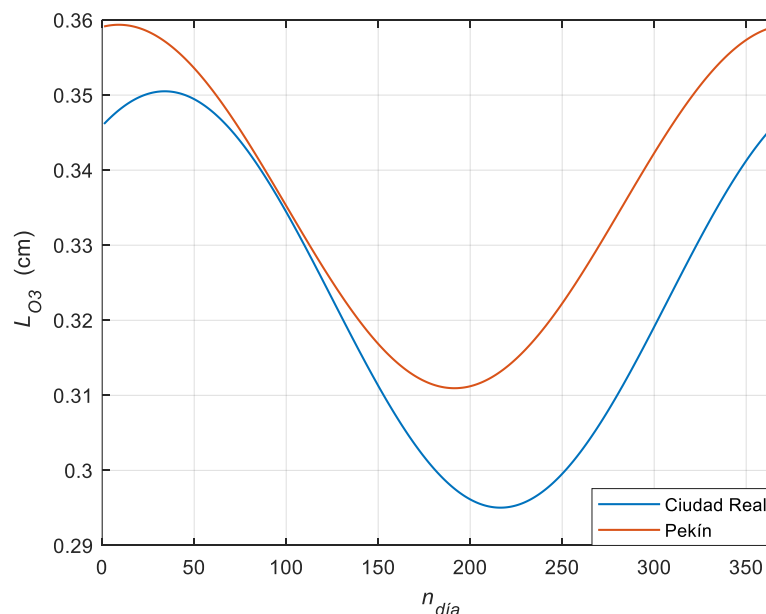


Figura 2. 18. Variación del espesor óptico de ozono en Ciudad Real, España, y Pekín, China, para cada día del año.

**E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL**

Para considerar el ozono efectivo en la masa de aire que recorre la radiación desde que entra en la atmósfera hasta que llegue a la superficie de la tierra se define el índice adimensional de masa de ozono ( $AM_{O_3}$ ). Para calcular dicho parámetro se utiliza la ecuación (2.23) [9].

$$AM_{O_3} = \frac{1 + \frac{h_o}{6370}}{\left( (\cos(\phi))^2 + 2 \cdot \left( \frac{h_o}{6370} \right) \right)^{0.5}} \quad (2.23)$$

En la ecuación (2.23)  $h_o$  toma un valor de 22 km que corresponde con la altura de máxima concentración de ozono.

Empleando la ecuación (2.23), se representa en la figura 2.19 el índice adimensional de masa de ozono para el día 15 de junio y 15 de diciembre en Ciudad Real considerando la zona horaria UTC+0.

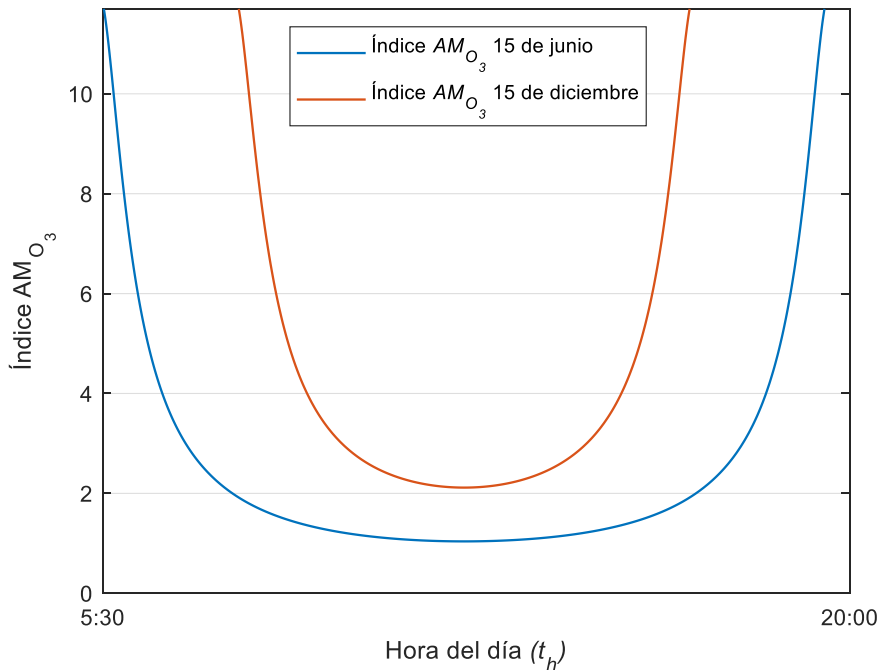


Figura 2. 19. Índice adimensional de masa de ozono para el día 15 de junio y 15 de diciembre en Ciudad Real, España, considerando la zona horaria UTC+0.

Por último, se introduce en la ecuación (2.24) la eficiencia de transmisión por absorción de ozono en la atmósfera en función de la longitud de onda [9] [10] que permite aproximar el efecto de ozono sobre la radiación solar antes de llegar a la superficie terrestre. Para poder estimar dicho parámetro primero debe conocerse  $L_{O_3}$  y  $AM_{y_{O_3}}$ , además del coeficiente de absorción de ozono para cada longitud de onda ( $\alpha_{O_3}$ ) que es definido en el apartado 3.

$$\varepsilon_{trans-abs-O_3}(\lambda) = e^{(-\alpha_{O_3}(\lambda) \cdot AM_{O_3} \cdot L_{O_3})} \quad (2.24)$$

### 2.9.4. Vapor de agua atmosférico

El contenido de agua en la atmósfera es muy reducido y se localiza mayoritariamente en la troposfera que es la capa más cercana a la superficie terrestre. Su presencia es mayoritariamente en forma de vapor de agua cuya concentración relativa con respecto a la de aire seco se denomina humedad. Aunque la humedad no sea tan visible, está presente siempre en la atmósfera y su distribución no es uniforme.

Las moléculas de vapor de agua tienen la propiedad de absorber una parte de la radiación solar, evitando que llegue a la superficie. Esta propiedad se da en longitudes de onda corta como es el caso de la radiación ultravioleta o en también en longitudes de onda muy larga [24].

Es de vital importancia determinar el espesor total de todo el agua ( $L_{H_2O}$ ) que se encuentra en la atmósfera en la localización de estudio para cuantificar su efecto y poder determinar el espectro solar. La ecuación (2.25) cuantifica la eficiencia de la transmisión por absorción del vapor de agua atmosférico en función de la longitud de onda [9] [10].

$$\varepsilon_{trans-H_2O-abs}(\lambda) = e^{\left( \frac{0.2385 \cdot \alpha_w(\lambda) \cdot L_{H_2O} \cdot AM_p}{(1 + 20.07 \cdot \alpha_w(\lambda) \cdot L_{H_2O} \cdot AM_p)^{0.45}} \right)} \quad (2.25)$$

donde  $\alpha_w(\lambda)$  corresponde al coeficiente de absorción de agua para cada longitud de onda y  $L_{H_2O}$  es el vapor de agua precipitable medido en centímetros. Ambos parámetros se definen en el apartado 3.

Utilizando la ecuación (2.25), se representa en la figura 2.20 el efecto del índice  $AM_p$  sobre la eficiencia de la transmisión del vapor de agua atmosférico. En dicha figura se considera:  $L_{H_2O}=1.42$  cm (dicho valor se extrae de la norma ASTM-E-892-87 [30]) y el índice  $AM_p$  toma valores de 1 y 2.

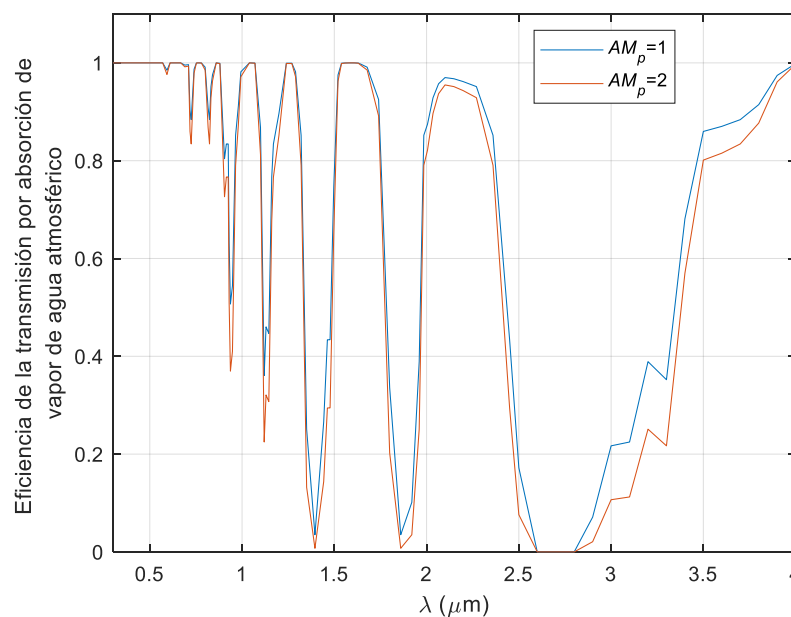


Figura 2. 20. Efecto del índice  $AM_p$  sobre la eficiencia de la transmisión por absorción del vapor de agua atmosférico.

## E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

Para conocer también el efecto de  $L_{H_2O}$  en la ecuación (2.25), se representa la figura 2.21. En ella se considera un índice  $AM_p$  estándar de 1.5 y el  $L_{H_2O}$  toma valores de 0.5 cm y 1.42 cm.

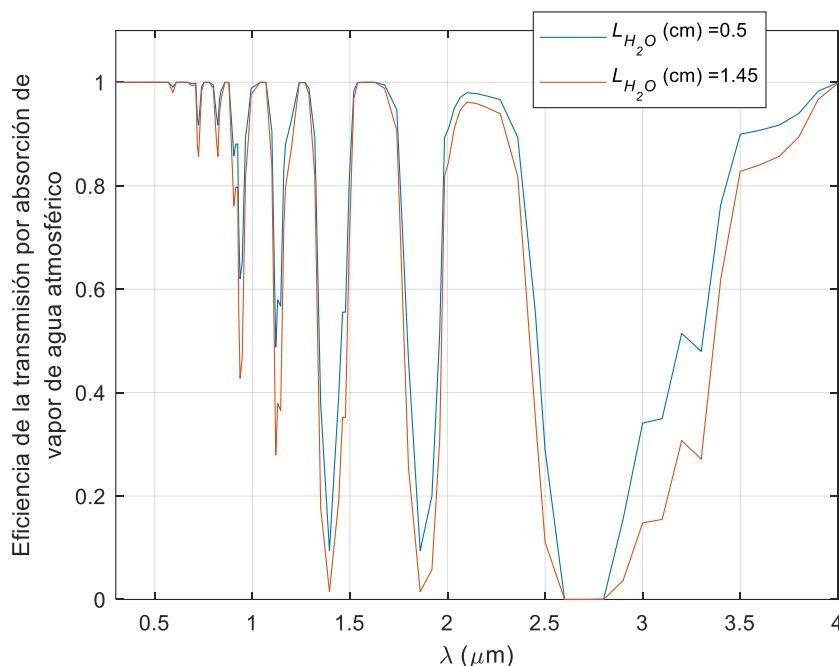


Figura 2. 21. Efecto del vapor de agua precipitable sobre la eficiencia de la transmisión por absorción del vapor de agua atmosférico.

De la figura 2.20 y 2.21 se deduce que a medida que crece el índice  $AM_p$  y el vapor de agua precipitable ( $L_{H_2O}$ ) la eficiencia de la transmisión por absorción del vapor de agua atmosférico tiende a disminuir.

### 2.9.5. Aerosoles

Los aerosoles son partículas sólidas o líquidas que se encuentran suspendidas en la atmósfera. Se pueden clasificar en dos grupos en función de su origen [11]:

- Naturales: polvo natural, polen, cenizas volcánicas, etc.
- Antropogénicos: Su aparición se debe a la actividad humana. Algunos ejemplos son: humo de chimeneas, partículas generadas en procesos industriales, etc.

Para medir la dispersión y absorción causada por la presencia de los aerosoles en la atmósfera en una columna vertical se define la profundidad óptica de los aerosoles, denotada por el parámetro  $L_{aer}$  (usualmente denominado como AOD en inglés) [25], que debe conocerse para una longitud de onda 0.5  $\mu\text{m}$ . Dicho parámetro no puede tomar valores negativos:

- Para valores de  $L_{aer}$  menores que uno, se transmite más del 36.8% de luz incidente (objeto ópticamente delgado).
- Para valores mayores que uno la luz se transmite menos del 36.8% (objeto ópticamente denso).

### E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

Se puede hacer uso de diferentes páginas web que proporcionan datos en tiempo real para determinar el valor de  $L_{aer}$  en la localización y el momento de estudio. La más fiable es Aeronet [26] ya que cuenta con la participación de la NASA.

Antes de definir y explicar los efectos que ocasionan la presencia de los aerosoles en la atmósfera, es necesario definir dos parámetros:

- Profundidad óptica de los aerosoles para cada longitud de onda [9]. Se aplica el exponente de Angstrom, que expresa la variación de una propiedad óptica,  $P$ , con la longitud de onda, expresado en la ecuación (2.26) [27].

$$\frac{P(\lambda_1)}{P(\lambda_2)} = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^{-AE} \quad (2.26)$$

Aplicando la ecuación (2.26) para el caso de la longitud óptica de los aerosoles, se obtiene la ecuación (2.27).

$$L_{aer}(\lambda) = L_{aer}(0.5) \cdot \left(\frac{\lambda}{0.5}\right)^{-AE} \quad (2.27)$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda expresada en  $\mu\text{m}$  y  $AE$  es el exponente de Angstrom de absorción, el cual puede tomar distintos valores en función de los aerosoles presentes en cada zona de estudio [27] como se puede observar en la tabla 2.1.

|         |                   |
|---------|-------------------|
| Urbanos | $1.5 < AE < 2.5$  |
| Rurales | $1 < AE < 1.5$    |
| Mineros | $-0.1 < AE < 0.5$ |
| Marinos | $0.2 < AE < 0.5$  |

Tabla 2. 1. Valores del exponente de Angstrom para cada zona de estudio.

Utilizando la ecuación (2.27) y suponiendo un valor de  $L_{aer}$  de 0.05 para 0.5  $\mu\text{m}$ , se representa la profundidad óptica de los aerosoles para cada longitud de onda considerando los valores medios del exponente de Angstrom ( $AE$ ) para cada tipo de zona en la figura 2.22.

E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

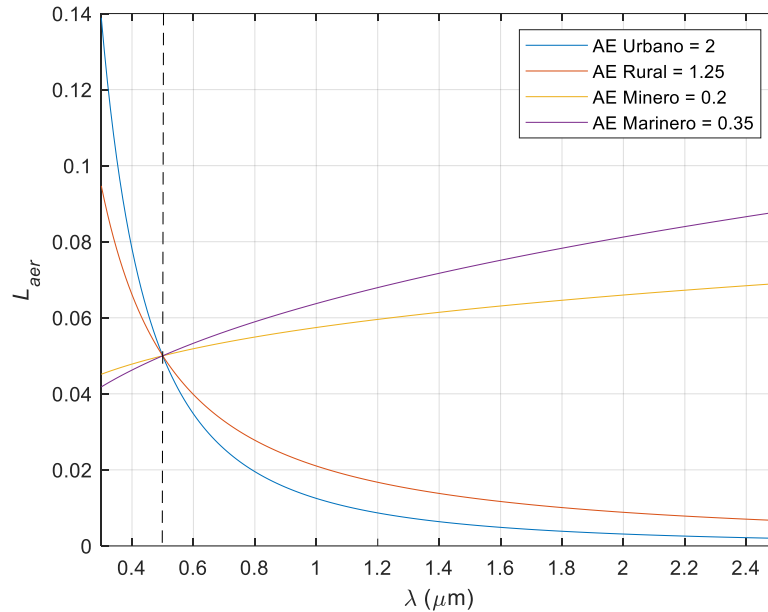


Figura 2. 22. Profundidad óptica de los aerosoles para cada longitud de onda considerando los valores medios de exponente de Angstrom (AE) para cada zona.

- Eficiencia de transmisión debida a la extinción de la luz causada por los aerosoles, que es proporcional al espesor de la zona atravesada para cada longitud de onda [9]. Este parámetro se basa en la Ley de Beer-Lambert expresada en la ecuación (2.28), que considera la atenuación de la luz en un medio en función de la longitud de onda [27].

$$I_{trans} = I_0 \cdot e^{(-\alpha \cdot x)} \quad (2.28)$$

donde en esta ecuación,  $\alpha$  es el coeficiente de atenuación y  $x$  el espesor que atraviesa la luz en el medio.

Utilizando parte de la ecuación (2.28), se define la fórmula (2.29).

$$\varepsilon_{trans-ext-aer}(\lambda) = \frac{I_{trans}}{I_0} = e^{(-L_{aer}(\lambda) \cdot AM)} \quad (2.29)$$

La pérdida de eficiencia de transmisión se puede deber a la absorción y dispersión ocasionada en la atmósfera por los aerosoles:

- Eficiencia de transmisión debida a la absorción de parte de la radiación por los aerosoles [9] [10], que es determina con la ecuación (2.30).

$$\varepsilon_{trans-abs-aer}(\lambda) = e^{-(1-w(\lambda)) \cdot L_{aer}(\lambda) \cdot AM} \quad (2.30)$$

Donde:

|           |   |
|-----------|---|
| $w$       | Albedo de dispersión simple, definido en el apartado 2.10 |
| $L_{aer}$ | Transmitancia de los aerosoles                            |
| $AM$      | Índice de masa de aire                                    |

**E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL**

- Eficiencia de dispersión de la radiación causada por los aerosoles. La dispersión de luz causada por los aerosoles contribuye además a la componente difusa de la radiación [9] [10], cuyo efecto se calcula con la ecuación (2.31).

$$\varepsilon_{trans-sca-aer}(\lambda) = e^{(-w(\lambda) \cdot L_{aer}(\lambda) \cdot AM)} \tag{2.31}$$

Por último, para tener en cuenta el efecto del albedo de dispersión simple de los aerosoles a la hora de determinar el espectro solar se utiliza la siguiente expresión 2.32 [9].

$$w(\lambda) = k_g \cdot e^{\left(-k_p \cdot \left(\ln\left(\frac{\lambda}{0.4}\right)\right)^2\right)} \tag{2.32}$$

En la ecuación (2.32) el parámetro  $k_g$  denota el albedo de dispersión simple de los aerosoles a una longitud de onda de  $0.4 \mu\text{m}$  y  $k_p$  es el factor de variación de la longitud de onda. Para el modelo utilizando toman valores de 0.945 y 0.095 respectivamente.

**2.10. Efecto del albedo de la superficie**

El albedo se define como el porcentaje de radiación que una superficie refleja con respecto a la radiación total que incide sobre ella. Varía en función de la cubierta terrestre, es decir, es función del color, la humedad, el contenido en minerales, materia orgánica y del estado de la superficie. También depende de la cobertura nubosa, de la inclinación de los rayos solares, partículas en el aire, etc. Este disminuye cuando aumenta el contenido de humedad, materia orgánica y rugosidad de la superficie. Las superficies con tonalidades claras poseen un albedo mayor que las oscuras [28].

A continuación, se muestran el albedo de algunas superficies comunes:

| Superficie                     | Albedo % |
|--------------------------------|----------|
| Nieve fresca                   | 80-85    |
| Arena                          | 20-40    |
| Pasto                          | 20-25    |
| Suelo seco                     | 15-25    |
| Barro húmedo                   | 5        |
| Nube delgada                   | 25-30    |
| Nube gruesa                    | 70-80    |
| Tierra y atmósfera global      | 30       |
| Agua (sol cerca del horizonte) | 50-80    |
| Agua (sol cerca del cenit)     | 3-5      |

Tabla 2. 2. Albedo de algunas superficies comunes [28].

## E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

### 2.11. Efecto de la altitud y de la presión

A medida que aumenta la altitud y la presión disminuye, el espesor físico de la atmósfera que la radiación solar atraviesa se reduce.

Para establecer una relación entre la altitud y la presión se considera que el aire se comporta como un gas ideal. Se pueden tener en cuenta dos hipótesis en cuanto al perfil térmico de la columna de aire [22]:

- Columna isoterma [27]:  $T = \text{cte}$

$$p(h) = p(h = 0) e^{-\frac{gh}{R_a T}} \quad (2.33)$$

- Columna triangular [27]:  $dT = K dh$

$$p(h) = p(h = 0) \left( \frac{T}{T(h = 0)} \right)^{-\frac{g}{R_a K}} \quad (2.34)$$

La hipótesis de columna triangular es más exacta que la de columna isoterma, por lo tanto, es conveniente usarla para establecer la relación entre la altitud y la presión.

### 2.12. Componentes radiación solar

La intensidad de la radiación que llega a la superficie terrestre se divide en dos componentes:

- Componente directa  $\left( \frac{W}{m^2 \cdot \mu m} \right)$ : Constituida por la intensidad de radiación solar que llega a la superficie sin interactuar con ningún elemento presente en la atmósfera, es decir no sufre absorción ni dispersión. Para poder determinar su valor para cada longitud de onda y poder obtener el espectro solar se utiliza la ecuación (2.35) que permite calcular la componente directa para unas condiciones de cielo despejado. Dicha ecuación forma parte del modelo expuesto por R. Bird y C. Riordan [9] [10].

$$I_{dr}(\lambda) = I_{ETR}(\lambda) \cdot \frac{\overline{d_{ST}}}{d_{ST}} \cdot \varepsilon_{trans-sca-g}(\lambda) \cdot \varepsilon_{trans-abs-o_3}(\lambda) \cdot \varepsilon_{trans-abs-g}(\lambda) \cdot \varepsilon_{trans-abs-H_2O}(\lambda) \cdot \varepsilon_{trans-ext-aer}(\lambda) \cdot \cos(\varphi) \quad (2.35)$$

donde:

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| $I_{ETR}$                     | Radiación procedente del sol que llega a la parte externa de la atmósfera. |
| $\overline{d_{ST}}$           | Distancia media entre la tierra y el sol                                   |
| $d_{ST}$                      | Corrección de la distancia entre la tierra y el sol                        |
| $\varepsilon_{trans-sca-g}$   | Eficiencia de transmisión por dispersión en el régimen de Rayleigh         |
| $\varepsilon_{trans-abs-o_3}$ | Eficiencia de transmisión por absorción de ozono                           |



E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| $\varepsilon_{trans-abs-g}$    | Eficiencia de transmisión por absorción de gases atmosféricos        |
| $\varepsilon_{trans-abs-H_2O}$ | Eficiencia de transmisión por absorción de vapor de agua atmosférico |
| $\varepsilon_{trans-ext-aer}$  | Eficiencia de transmisión por extinción de los aerosoles             |
| $\varphi$                      | Ángulo de incidencia   |

- Componente difusa  $\left(\frac{W}{m^2 \cdot \mu m}\right)$ : Aquella que alcanza la superficie tras haber sufrido múltiples desviaciones en su trayectoria al pasar por la atmósfera o después de ser reflejada en varias direcciones por las superficies sobre las que incide. Para su determinación se considera independiente la dispersión en el régimen de Rayleigh y la ocasionada por los aerosoles. El cálculo de dicha componente es mucho más tedioso y complejo que la determinación de la componente directa. En este proyecto la componente difusa solo se calcula para unas condiciones de cielo despejado.

Para su estudio, primero se determina la radiación difusa sobre una superficie horizontal que se divide en tres componentes: Componente de dispersión de los aerosoles ( $I_{df-aer}$ ), componente ocasionada por la reflexión múltiple entre el suelo y el aire ( $I_{df-rh}$ ) y la componente de dispersión en el régimen de Rayleigh ( $I_{df-g-sca}$ ). Para el cálculo de la radiación difusa ( $I_{df}$ ) sobre una superficie horizontal se utiliza la ecuación (2.36) que viene expresada en  $\left(\frac{W}{m^2 \cdot \mu m}\right)$  [9] [10].

$$I_{df-h}(\lambda) = I_{df-aer}(\lambda) + I_{df-g-sca}(\lambda) + I_{df-rh}(\lambda) \quad (2.36)$$

Antes de definir como se calculan cada uno de los parámetros de la ecuación (2.26) se determinan los parámetros  $F_{sp}$  y  $F_s$  que establecen la dispersión de los aerosoles hacia abajo y total en función del ángulo cenital [9] ya que son necesarios para los cálculos posteriores.

$$k_1 = \log(1 - g) \quad (2.37)$$

Siendo  $g$  el factor de asimetría de los aerosoles.

$$k_2 = k_1 \cdot (1.459 + k_1 \cdot (0.1591 + k_1 \cdot 0.4129)) \quad (2.38)$$

$$k_3 = k_1 \cdot (0.0783 + k_1 \cdot (-0.3824 - k_1 \cdot 0.5874)) \quad (2.39)$$

$$F_{sp} = 1 - 0.5 \cdot e^{\left(\frac{k_2 + \frac{k_3}{1.8}}{1.8}\right)} \quad (2.40)$$

E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

$$F_s = 1 - 0.5 \cdot e^{((k_2+k_3 \cdot \cos(\delta)) \cdot \cos(\delta))} \quad (2.41)$$

Una vez definidos dichos parámetros se proceden a determinar las tres componentes de la radiación difusa sobre una superficie horizontal:

- Componente difusa de radiación ocasionada por la presencia de aerosoles en la atmósfera [9] [10]. La ecuación (2.42) viene expresada en  $\left(\frac{W}{m^2 \cdot \mu m}\right)$ .

$$I_{df-aer}(\lambda) = I_{ETR} \cdot \cos(\delta) \cdot \varepsilon_{trans-abs-O_3} \cdot \varepsilon_{trans-abs-H_2O}(\lambda) \cdot \varepsilon_{trans-abs-g}(\lambda) \quad (2.42)$$

$$\cdot \varepsilon_{trans-abs-aer}(\lambda) \cdot \varepsilon_{trans-sca-g}(\lambda)^{1.5} \cdot$$

$$(1 - \varepsilon_{trans-sca-aer}(\lambda))(F_s) \cdot \frac{\overline{d_{ST}}}{d_{ST}}$$

En la ecuación (2.42) los parámetros  $\varepsilon_{trans-abs-O_3}$ ,  $\varepsilon_{trans-abs-H_2O}$ ,  $\varepsilon_{trans-abs-g}$ ,  $\varepsilon_{trans-abs-aer}$ ,  $\varepsilon_{trans-sca-g}$  y  $\varepsilon_{trans-sca-aer}$  se evalúan para un índice de masa de aire de 1.8 y exponente de 1.5 es un factor de corrección experimental obtenido por R.Bird y C.Riordan [10], donde:

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| $I_{ETR}$                      | Radiación procedente del sol que llega a la parte externa de la atmósfera. |
| $\delta$                       | Ángulo de declinación  |
| $\varepsilon_{trans-abs-O_3}$  | Eficiencia de transmisión por absorción de ozono                           |
| $\varepsilon_{trans-abs-g}$    | Eficiencia de transmisión por absorción de gases atmosféricos              |
| $\varepsilon_{trans-abs-H_2O}$ | Eficiencia de transmisión por absorción de vapor de agua atmosférico       |
| $\varepsilon_{trans-abs-aer}$  | Eficiencia de transmisión por absorción de los aerosoles                   |
| $\varepsilon_{trans-sca-g}$    | Eficiencia de transmisión por dispersión en el régimen de Rayleigh         |
| $\varepsilon_{trans-sca-aer}$  | Eficiencia de transmisión por dispersión de los aerosoles                  |
| $\overline{d_{ST}}$            | Distancia media entre la tierra y el sol                                   |
| $d_{ST}$                       | Corrección de la distancia entre la tierra y el sol                        |

- Componente difusa de la radiación debida a la dispersión de los gases de la atmósfera seca [9] [10], expresada en  $\left(\frac{W}{m^2 \cdot \mu m}\right)$ .

$$I_{df-g-sca}(\lambda) = I_{ETR} \cdot \cos(\delta) \cdot \varepsilon_{trans-abs-O_3}(\lambda) \cdot \varepsilon_{trans-abs-H_2O}(\lambda) \quad (2.43)$$

$$\cdot \varepsilon_{trans-abs-g}(\lambda) \cdot \varepsilon_{trans-abs-aer}(\lambda) \cdot (1 - \varepsilon_{trans-sca-g}(\lambda))^{0.95}$$

$$\cdot 0.5 \cdot \frac{\overline{d_{ST}}}{d_{ST}}$$

### E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

En la ecuación (2.43) los parámetros  $\varepsilon_{trans-abs-0_3}$ ,  $\varepsilon_{trans-abs-H_2O}$ ,  $\varepsilon_{trans-abs-g}$ ,  $\varepsilon_{trans-abs-aer}$  y  $\varepsilon_{trans-sca-g}$  se evalúan para un índice de masa de aire de 1.8 y el exponente de 0.95 es un factor de corrección experimental obtenido por R.Bird y C.Riordan [10].

- Componente radiación difusa ocasionada por la reflexión múltiple entre el suelo y aire expresada en  $\left(\frac{W}{m^2 \cdot \mu m}\right)$  [9] [10]:

$$I_{df-rh}(\lambda) = \frac{(I_{dr}(\lambda) \cdot \cos(\delta) + I_{df-aer} + I_{df-g-sca}(\lambda)) \cdot w_s \cdot \varepsilon_{rh}(\lambda)}{1 - w_s \cdot \varepsilon_{rh}(\lambda)} \quad (2.44)$$

donde  $\varepsilon_{rh}$  denota la eficiencia de la reflectividad del cielo y se calcula con la ecuación (2.45).

$$\varepsilon_{rh}(\lambda) = \varepsilon_{trans-abs-g}(\lambda) \cdot \varepsilon_{trans-abs-H_2O}(\lambda) \cdot \varepsilon_{trans-abs-aer}(\lambda) \cdot [0.5 \cdot (1 - \varepsilon_{trans-sca-g}(\lambda)) + (1 - F_{sp}) \cdot \varepsilon_{trans-sca-g}(\lambda) \cdot (1 - \varepsilon_{trans-sca-aer}(\lambda))] \quad (2.45)$$

En la ecuación (2.45) los parámetros  $\varepsilon_{trans-abs-g}$ ,  $\varepsilon_{trans-abs-H_2O}$ ,  $\varepsilon_{trans-abs-aer}$ ,  $\varepsilon_{trans-sca-g}$  y  $\varepsilon_{trans-sca-aer}$  se evalúan para una índice de masa de aire de 1.8.

R.Bird y C.Riordan detectaron que utilizando las ecuaciones (2.42), (2.43), (2.44) y (2.45) se tiende a sobreestimar la componente difusa en la región ultravioleta y visible del espectro solar. Para evitar dicha sobreestimación se realiza la siguiente corrección  $\left(\frac{W}{m^2 \cdot \mu m}\right)$  [10]:

Si la longitud de onda es menor o igual que 0.45  $\mu m$ :

$$I_{df-h}(\lambda) = (I_{df-g-sca} + I_{df-aer} + I_{df-rh}) \cdot (\lambda + 0.55)^{1.8} \quad (2.46)$$

En caso contrario:

$$I_{df-h}(\lambda) = (I_{df-g-sca} + I_{df-aer} + I_{df-rh}) \quad (2.47)$$

Una vez que se ha determinado la radiación difusa sobre una superficie horizontal se procede a calcular dicha componente sobre una superficie inclinada utilizando la ecuación (2.48). Como se puede observar esta también se divide en tres componentes: Componente reflejada isotrópicamente por el suelo ( $I_{df-ref}$ ), componente circunsolar ( $I_{df-sc}$ ) y la componente de luz cenital ( $I_{df-si}$ ). Para el cálculo de las tres componentes se emplea la componente directa de la radiación y los parámetros utilizados para determinar la componente difusa sobre una superficie horizontal.

$$I_{df}(\lambda) = I_{df-ref}(\lambda) + I_{df-sc}(\lambda) + I_{df-si}(\lambda) \quad (2.48)$$

A continuación, se detalla cómo se obtiene cada parámetro de la ecuación (2.48):

**E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL**

- Componente de radiación difusa reflejada isotrópicamente por el suelo expresada en  $\left(\frac{W}{m^2 \cdot \mu m}\right)$ , calculada con la fórmula (2.49) [9] [10]:

$$I_{df-ref}(\lambda) = \frac{(I_{dr} \cdot \cos(\delta) + I_{df}(\lambda)) \cdot w_s \cdot (1 - \cos(m_s))}{2} \quad (2.49)$$

El parámetro  $w_s$  denota el albedo de la superficie de estudio y se define en el apartado 3.1.

- Componente circunsolar de la radiación difusa  $\left(\frac{W}{m^2 \cdot \mu m}\right)$ , es aquella que procede exclusivamente del sol, se obtenida a través de la ecuación (2.50), teniendo en cuenta los parámetros definidos con anterioridad [9][10].

$$I_{df-sc}(\lambda) = \frac{I_{df}(\lambda) \cdot \left(\frac{I_{dr}(\lambda)}{I_{ETR}(\lambda)}\right) \cdot \cos(\varphi)}{\cos(\delta)} \quad (2.50)$$

- Componente de luz cenital de la radiación difusa calculada con la ecuación (2.51) y expresada en  $\left(\frac{W}{m^2 \cdot \mu m}\right)$  [9] [10].

$$I_{df-si}(\lambda) = 0.5 \cdot I_{df}(\lambda) \cdot \left(1 - \left(\frac{I_{dr}(\lambda)}{I_{ETR}(\lambda)}\right)\right) \cdot (1 + \cos(m_s)) \quad (2.51)$$

donde:

|           |  |
|-----------|--|
| $I_{df}$  | Componente radiación difusa sobre una superficie horizontal                |
| $\delta$  | Ángulo de declinación  |
| $I_{dr}$  | Componente radiación directa   |
| $m_s$     | Pendiente de la superficie de estudio                                      |
| $I_{ETR}$ | Radiación procedente del sol que llega a la parte externa de la atmósfera. |

Cabe destacar que en el caso de que la pendiente de la superficie de estudio ( $m_s$ ) sea cero la radiación difusa sobre una superficie horizontal calculada con la ecuación (2.36) coincide con la radiación difusa sobre una superficie inclinada determinada con la ecuación (2.48).

Una vez que se ha determinado la componente directa y difusa de la radiación solar para unas condiciones de cielo despejado se consigue precisar la irradiación total para cada longitud de onda que incide en el lugar de interés y con ello se determina el espectro solar para cielo despejado a través de la ecuación (2.52) [9] [10].

$$I_{Total}(\lambda) = I_{dr}(\lambda) + I_{df}(\lambda) \quad (2.52)$$

## E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

### 2.13. Referencia ASTM

ASTM internacional, es la sociedad americana para pruebas y materiales. Se dedica al desarrollo de normas con vigencia a nivel mundial. Esta sociedad crea también normas en ámbito de la energía solar que permiten obtener espectros solares de referencia bajo unas condiciones estándar.

Algunas de las normas ASTM en el ámbito solar que se tienen en cuenta son:

- ASTM E-891-87 [29]: Incluye tablas con datos de la irradiación directa normal terrestres. En esta norma se emplea el índice AM 1.5.
- ASTM E-892-87 [30]: Define un espectro solar de la radiación que llega a la superficie terrestre para un índice AM 1.5 y una superficie inclinada de 37 grados.
- ATSM G173-03 [31]: Tablas estándar para irradiaciones espectrales solares de referencia: Directa normal y hemisférica en superficie inclinada de 37 grados con índice AM 1.5. Dichas tablas pueden ser utilizadas en aplicaciones terrestres que requieran conocer la irradiancia espectral de referencia o la irradiancia espectral normal directa.

En todas las normas nombradas anteriores, se enuncian espectros solares bajo condiciones estándar favorables.

Por ejemplo, si se representan los datos de las normas ASTM E-891-87 Y ASTM E-892-87, se obtiene los espectros representados en la figura 2.23.

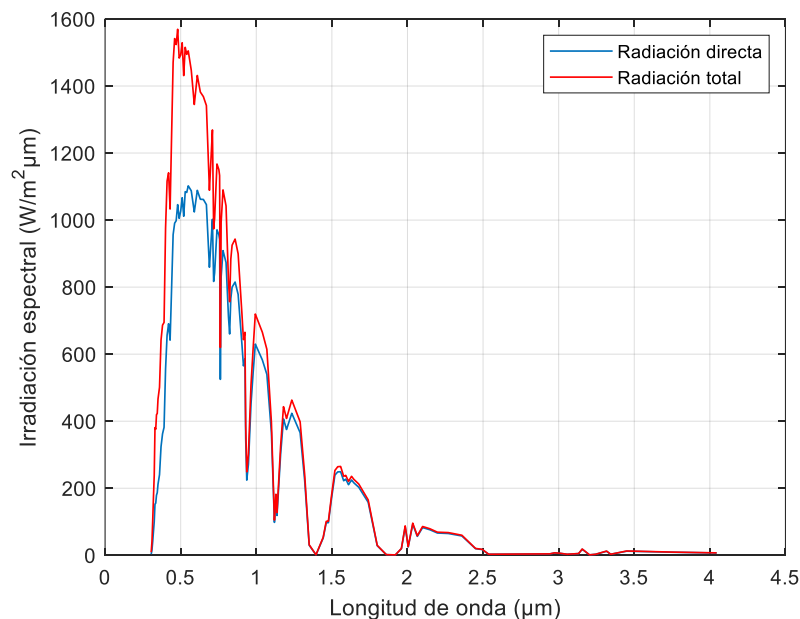


Figura 2. 23. Representación datos ASTM E-891-87 y ASTM E-892-87 [29] [30].

En otras condiciones, ASTM internacional no proporciona ningún espectro solar de referencia. Esto conlleva la necesidad del desarrollo de una herramienta que permita conocer el espectro solar en tiempo real bajo diferentes condiciones.

**E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL**

### 3. ELABORACIÓN DE UN CÓDIGO DE CÁLCULO

#### 3.1. Desglose general

Como se ha comentado y justificado con anterioridad el objetivo de este proyecto es la creación de una aplicación que permita obtener el espectro solar bajo unas condiciones de cielo despejado a través de unos elementos de entrada. Para la realización de dicha aplicación se emplea la herramienta App Designer de MATLAB.

App Designer es un entorno de desarrollo interactivo que permite crear aplicaciones con un carácter profesional. Cuenta con una gran variedad de componentes que pueden ser utilizadas a la hora de desarrollar nuevos softwares.

La aplicación creada en este proyecto se denomina Solar GCM, ella a través de diferentes pantallas el usuario introducirá los datos necesarios para poder obtener el espectro solar bajo unas condiciones de cielo despejado, el cual se mostrará de manera gráfica y, además los datos calculados podrán ser exportados a Microsoft Excel para su posterior uso por parte del usuario.

Para mostrar el funcionamiento del software creado y de las diferentes posibilidades que proporciona al usuario se define el diagrama de bloques en la figura 3.1. En dicho diagrama se pueden observar las pantallas y alternativas que el usuario se encuentra a la hora de obtener el espectro solar.

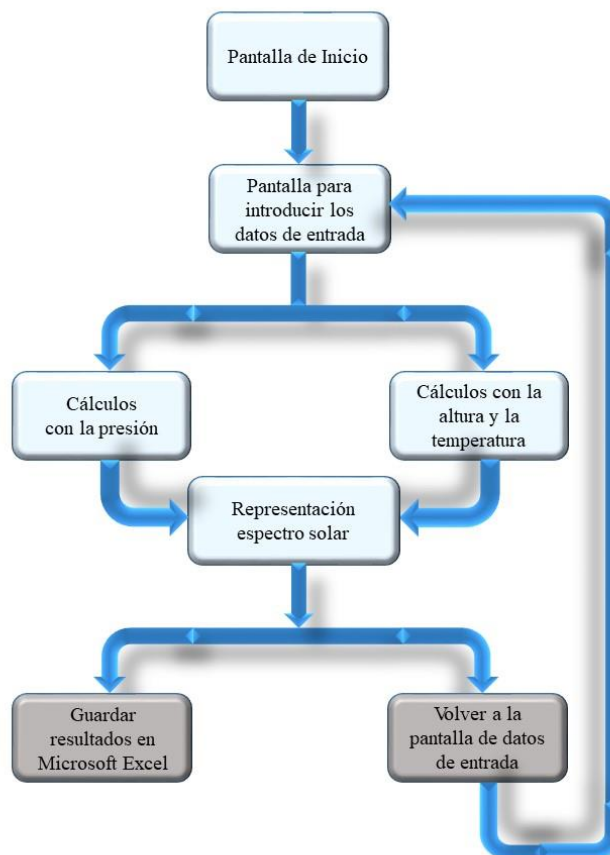
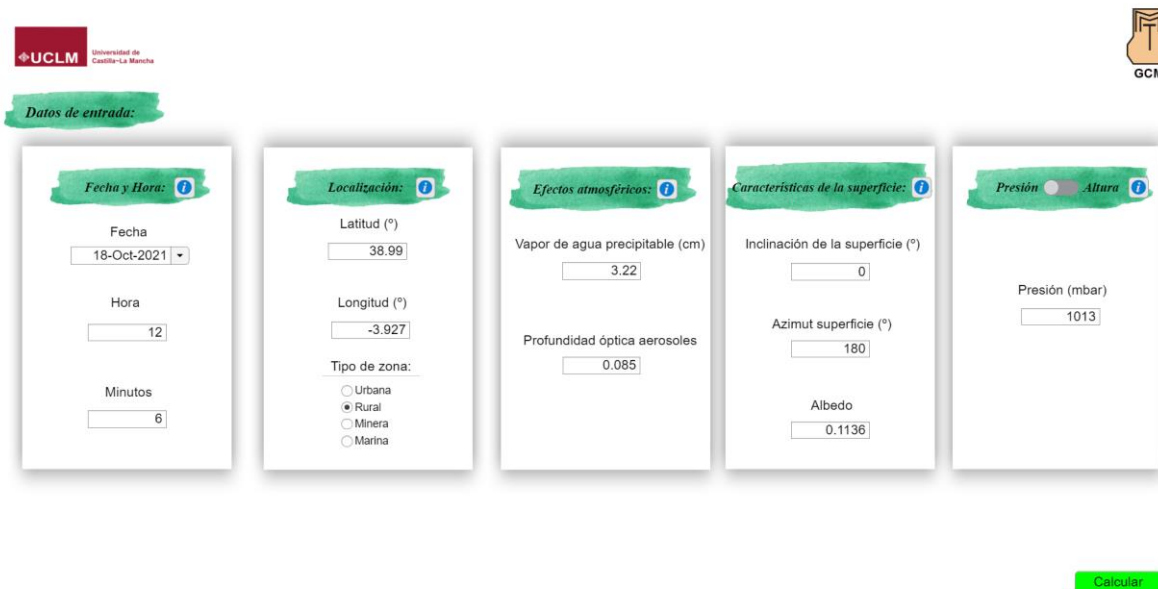


Figura 3. 1. Diagrama de bloques de aplicación.

## E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

### 3.2. Pantalla entrada de datos

La entrada de datos viene agrupada en 5 bloques, cada uno de ellos cuenta con un botón de información que muestra al usuario una guía para saber que debe introducir en cada casilla de entrada, en la figura 3.2 se puede ver lo anteriormente descrito.



**Datos de entrada:**

**Fecha y Hora:** Fecha: 18-Oct-2021; Hora: 12; Minutos: 6

**Localización:** Latitud (°): 38.99; Longitud (°): -3.927; Tipo de zona:  Urbana,  Rural,  Minera,  Marina

**Efectos atmosféricos:** Vapor de agua precipitable (cm): 3.22; Profundidad óptica aerosoles: 0.085

**Características de la superficie:** Inclinação de la superficie (°): 0; Azimut superficie (°): 180; Albedo: 0.1136

**Presión / Altura:** Presión (mbar): 1013

Calcular

Figura 3. 2. Pantalla de entrada de datos de la aplicación.

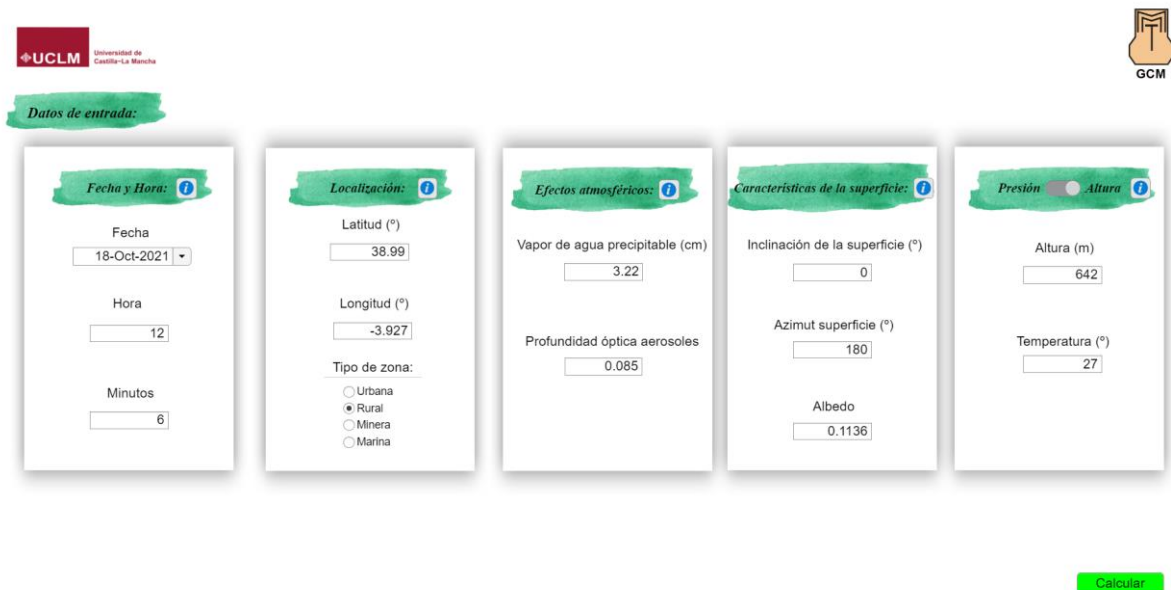
A continuación, se desglosan las entradas que forman parte de cada bloque:

- Fecha y hora:
  - Fecha para llevar a cabo los cálculos.
  - Hora y minutos: En la aplicación se debe indicar la hora UTC de la localización de interés.
- Localización:
  - Latitud del lugar en grados: El valor es positivo para el hemisferio norte y negativo para el hemisferio sur.
  - Longitud del lugar en grados: Toma valores positivos para el hemisferio oriental y negativos para el hemisferio occidental.
  - Tipo de zona: La elección de una zona u otra determina el exponente de Angstrom ( $AE$ ) que se considera en la aplicación.
    - Zona rural ( $AE=1.25$ ).
    - Zona urbana ( $AE=2$ ).
    - Zona marinera ( $AE=0.35$ ).
    - Zona minera ( $AE=0.2$ ).
- Efectos atmosféricos:
  - Profundidad óptica de los aerosoles denotada por  $L_{aer}$ :
    - Para cielos despejados  $L_{aer}$  toma valores entre 0.01 y 0.55.
    - El valor de  $L_{aer}$  es elevado en las siguientes condiciones:
      - Presencia de humo.
      - Gran concentración de partículas en la atmósfera.



### E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

- Vapor de agua precipitable (cm) denotado por  $L_{H_2O}$ : Es el espesor de la columna de agua formada por la condensación de vapor de agua en una columna vertical que va desde el suelo hasta la parte superior de la atmósfera. Suele tomar valores entre 0.3 y 6 cm.
  - Características de la superficie:
    - Inclinación de la superficie (°): Se introduce el grado de inclinación en grados con respecto a la horizontal. En el caso de que la superficie de estudio cuente con dispositivos de seguimiento solar el valor introducido debe ser negativo.
    - Azimut de una superficie de inclinación fija(°): Corresponde al parámetro *Azim* (Orientación sur: *Azim* =180 °, Orientación este *Azim* = 90 °, ...).
    - Albedo (Reflectancia superficial) ( $w_s$ ): Es necesario indicar el albedo de los alrededores de la superficie de estudio, es decir, si se quiere obtener el espectro solar de unos paneles que están rodeados por campos de suelo seco el albedo vale 0.2. Utilizado para simular el efecto de la componente difusa de la radiación.
- Presión/Altura: Ambas opciones acaban dando el mismo resultado, pero permiten que el usuario pueda elegir la forma de cuantificar la altitud a la que se encuentre. Es decir, si el usuario no conoce la presión porque no cuenta con un barómetro y está en una zona rural sin conectividad a internet, puede introducir la altura a la que se encuentra y la temperatura para que la aplicación calcule la presión. La presión debe introducirse en milibares, la altura en metros y la temperatura en grados centígrados. En la figura 3.3 se muestra la pantalla de entrada de datos para el caso en el que se ha elegido la opción de introducir la temperatura.



**Datos de entrada:**

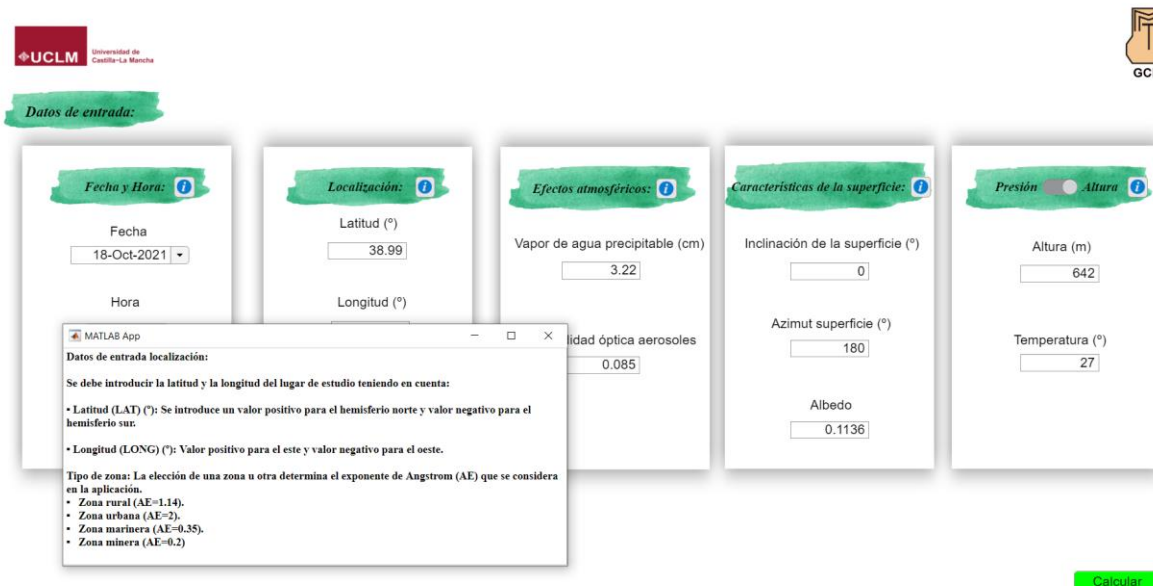
| Fecha y Hora                                 | Localización  | Efectos atmosféricos   | Características de la superficie  | Presión / Altura   |
|--|---|--|---|--|
| Fecha: 18-Oct-2021<br>Hora: 12<br>Minutos: 6 | Latitud (°): 38.99<br>Longitud (°): -3.927<br>Tipo de zona:<br><input type="radio"/> Urbana<br><input checked="" type="radio"/> Rural<br><input type="radio"/> Minera<br><input type="radio"/> Marina | Vapor de agua precipitable (cm): 3.22<br>Profundidad óptica aerosoles: 0.085 | Inclinación de la superficie (°): 0<br>Azimut superficie (°): 180<br>Albedo: 0.1136 | Presión: <input type="checkbox"/><br>Altura: <input checked="" type="checkbox"/><br>Altura (m): 642<br>Temperatura (°): 27 |

**Calcular**

Figura 3. 3. Pantalla de entrada de datos de la aplicación para el caso en el usuario introduce la altura del lugar de estudio.

A continuación, en la figura 3.4 se muestra un ejemplo de la información que el usuario puede visualizar al presionar un botón de información.

## E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL



**Datos de entrada:**

- Fecha y Hora:** Fecha: 18-Oct-2021, Hora: [ ]
- Localización:** Latitud (°): 38.99, Longitud (°): [ ]
- Efectos atmosféricos:** Vapor de agua precipitable (cm): 3.22, Cantidad óptica aerosoles: 0.085
- Características de la superficie:** Inclinación de la superficie (°): 0, Azimut superficie (°): 180, Albedo: 0.1136
- Presión y Altura:** Presión: [ ], Altura (m): 642, Temperatura (°): 27

**Calcular**

**MATLAB App**

Datos de entrada localización:

Se debe introducir la latitud y la longitud del lugar de estudio teniendo en cuenta:

- Latitud (LAT) (°): Se introduce un valor positivo para el hemisferio norte y valor negativo para el hemisferio sur.
- Longitud (LONG) (°): Valor positivo para el este y valor negativo para el oeste.

Tipo de zona: La elección de una zona u otra determina el exponente de Angstrom (AE) que se considera en la aplicación.

- Zona rural (AE=1.14).
- Zona urbana (AE=2).
- Zona marítima (AE=0.35).
- Zona minera (AE=0.2).

Figura 3. 4. Ejemplo de Información que se muestra al usuario al presionar el botón de info.

### 3.3. Cálculos

Una vez que el usuario ha introducido todos los datos de entrada necesarios y pulsa el botón ‘Calcular’, la aplicación devuelve el espectro solar para unas condiciones de cielo despejado teniendo en cuenta todos los parámetros y efectos que se han definido en el apartado 2. Pero para obtener dicha información hacen falta una serie de datos fijos además de todos los cálculos necesarios para poder simular de manera correcta los fenómenos atmosféricos que sufre la radiación solar hasta llegar a la superficie terrestre.

El modelo implementado cuenta con varios datos fijos que sirven de base para los posteriores cálculos [9] [10]:

- Longitud de onda ( $\lambda$ ): El espectro solar y todos los parámetros calculados van desde la longitud de onda de  $0.3 \mu\text{m}$  hasta  $4 \mu\text{m}$  con un paso de  $0.05 \mu\text{m}$ .
- Radiación solar en la parte externa de la atmósfera para cada longitud de onda ( $I_{ETR}$ )
- Coeficiente de absorción de vapor de agua en función de la longitud de onda ( $\alpha_w$ ).
- Coeficiente de absorción de Ozono en función de la longitud de onda ( $\alpha_{O_3}$ ).
- Coeficiente de absorción de gases uniformemente mezclados en función de la longitud de onda ( $\alpha_g$ ).
- Factor de asimetría de aerosoles en zona rurales ( $g$ ). El valor recomendado es de 0.65.
- Factores de albedo de dispersión simple de los aerosoles:
  - $k$ : cuyo valor es de 0.095.
  - $k_g$ : cuyo valor es de 0.945.

Los valores de  $I_{ETR}$ ,  $\alpha_w$ ,  $\alpha_{O_3}$ ,  $\alpha_g$  para cada longitud de onda se pueden consultar en las tablas y las gráficas del Anexo 3.

### 3.4. Pantalla de resultados

Tras realizar los cálculos teniendo en cuenta los datos de entrada introducidos por el usuario, la aplicación devuelve los siguientes resultados de manera gráfica como se puede ver en la figura 3.5 [9] [10]:

- Componente directa de la radiación en función de la longitud de onda  $\left(\frac{W}{m^2 \cdot \mu m}\right)$ .
- Componente difusa de la radiación en función de la longitud de onda  $\left(\frac{W}{m^2 \cdot \mu m}\right)$ . Es la suma de la dispersión y el reflejo del suelo en una superficie.
- Irradiancia total para cada longitud de onda del modelo  $\left(\frac{W}{m^2 \cdot \mu m}\right)$ .

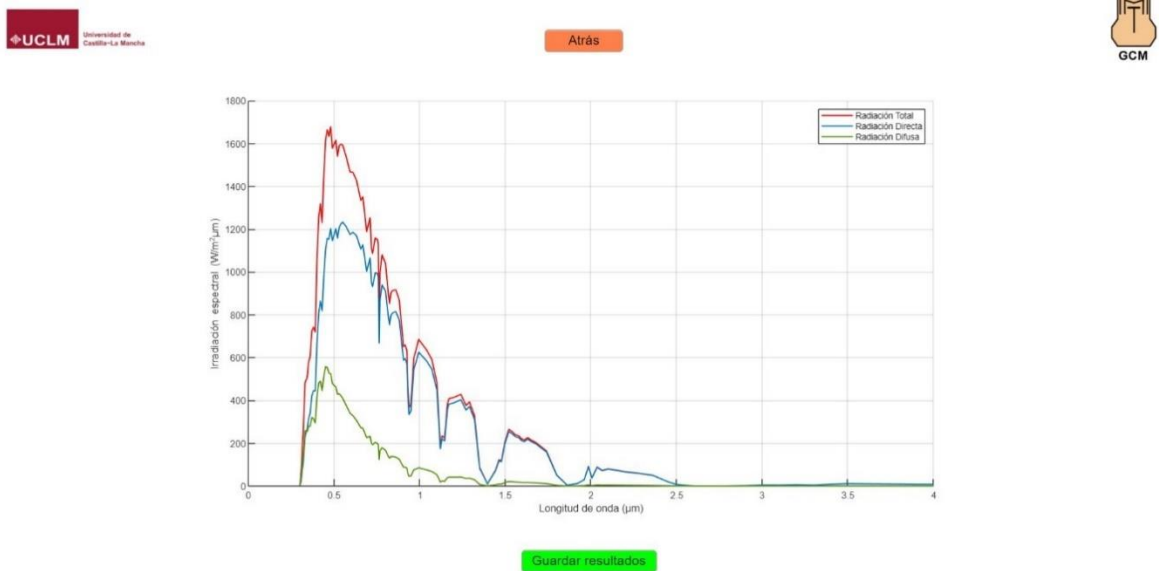
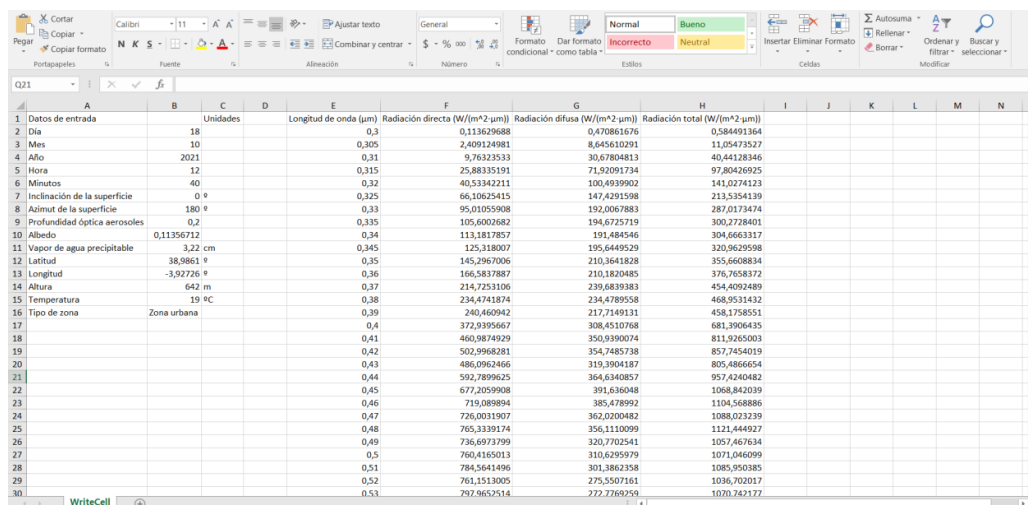


Figura 3. 5. Pantalla de resultados de la aplicación.

Tanto los datos de entrada como los resultados que se han obtenido se pueden guardar en una hoja de Excel pulsando el botón de guardar resultados, así el usuario puede conocer de manera más detallada los resultados obtenidos conociendo las condiciones de entrada y los puede comparar con otros resultados bajo otras condiciones de entrada. En la figura 3.6 se puede observar cómo se guardan los datos en Excel.

## E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL



|    | A                            | B           | C        | D | E                     | F  | G   | H  | I | J | K | L | M | N |
|----|------------------------------|-------------|----------|---|-----------------------|--|---|--|---|---|---|---|---|---|
| 1  | Datos de entrada             |             | Unidades |   | Longitud de onda (µm) | Radiación directa (W/(m <sup>2</sup> ·µm)) | Radiación difusa (W/(m <sup>2</sup> ·µm)) | Radiación total (W/(m <sup>2</sup> ·µm)) |   |   |   |   |   |   |
| 2  | Día                          | 18          |          |   | 0,3                   | 0,113629688                                | 0,470861676                               | 0,584491364                              |   |   |   |   |   |   |
| 3  | Mes                          | 10          |          |   | 0,305                 | 2,409124981                                | 8,645610291                               | 11,05473527                              |   |   |   |   |   |   |
| 4  | Año                          | 2021        |          |   | 0,31                  | 9,76323533                                 | 30,67804813                               | 40,44128346                              |   |   |   |   |   |   |
| 5  | Hora                         | 12          |          |   | 0,315                 | 25,88335191                                | 71,92091734                               | 97,80426925                              |   |   |   |   |   |   |
| 6  | Minutos                      | 40          |          |   | 0,32                  | 40,53342211                                | 100,4939982                               | 141,0274223                              |   |   |   |   |   |   |
| 7  | Inclinación de la superficie | 0 °         |          |   | 0,325                 | 66,10625415                                | 147,4281598                               | 213,5354139                              |   |   |   |   |   |   |
| 8  | Azimut de la superficie      | 180 °       |          |   | 0,33                  | 95,01055908                                | 192,0067883                               | 287,0173474                              |   |   |   |   |   |   |
| 9  | Profundidad óptica aerosoles | 0,2         |          |   | 0,335                 | 105,6002682                                | 194,6725719                               | 300,2728401                              |   |   |   |   |   |   |
| 10 | Albedo                       | 0,11356712  |          |   | 0,34                  | 113,1817857                                | 191,484546                                | 304,6663317                              |   |   |   |   |   |   |
| 11 | Vapor de agua precipitable   | 3,22 cm     |          |   | 0,345                 | 125,318007                                 | 195,6449529                               | 320,9629598                              |   |   |   |   |   |   |
| 12 | Latitud                      | 38,9861 °   |          |   | 0,35                  | 145,2967006                                | 210,3641828                               | 355,6608834                              |   |   |   |   |   |   |
| 13 | Longitud                     | -3,92726 °  |          |   | 0,36                  | 166,5837887                                | 210,1820485                               | 376,7658372                              |   |   |   |   |   |   |
| 14 | Altura                       | 642 m       |          |   | 0,37                  | 214,7253106                                | 239,6839383                               | 454,4092489                              |   |   |   |   |   |   |
| 15 | Temperatura                  | 19 °C       |          |   | 0,38                  | 234,4741874                                | 234,4789558                               | 468,9531432                              |   |   |   |   |   |   |
| 16 | Tipo de zona                 | Zona urbana |          |   | 0,39                  | 240,460942                                 | 217,7189131                               | 458,1798551                              |   |   |   |   |   |   |
| 17 |                              |             |          |   | 0,4                   | 372,9395667                                | 308,4510768                               | 681,3906435                              |   |   |   |   |   |   |
| 18 |                              |             |          |   | 0,41                  | 460,9874929                                | 350,9390074                               | 811,9265003                              |   |   |   |   |   |   |
| 19 |                              |             |          |   | 0,42                  | 502,9968281                                | 354,7485738                               | 857,7454019                              |   |   |   |   |   |   |
| 20 |                              |             |          |   | 0,43                  | 486,0962466                                | 319,3904187                               | 805,4866654                              |   |   |   |   |   |   |
| 21 |                              |             |          |   | 0,44                  | 592,7899625                                | 364,6340857                               | 957,4240482                              |   |   |   |   |   |   |
| 22 |                              |             |          |   | 0,45                  | 677,2059908                                | 391,6350448                               | 1068,841039                              |   |   |   |   |   |   |
| 23 |                              |             |          |   | 0,46                  | 719,089894                                 | 385,478992                                | 1104,568886                              |   |   |   |   |   |   |
| 24 |                              |             |          |   | 0,47                  | 726,0031907                                | 362,0200482                               | 1088,023239                              |   |   |   |   |   |   |
| 25 |                              |             |          |   | 0,48                  | 765,3339174                                | 356,1110099                               | 1121,444927                              |   |   |   |   |   |   |
| 26 |                              |             |          |   | 0,49                  | 736,6973799                                | 320,7702541                               | 1057,467634                              |   |   |   |   |   |   |
| 27 |                              |             |          |   | 0,5                   | 766,4165013                                | 310,629979                                | 1077,046599                              |   |   |   |   |   |   |
| 28 |                              |             |          |   | 0,51                  | 784,5641496                                | 301,3862358                               | 1085,950385                              |   |   |   |   |   |   |
| 29 |                              |             |          |   | 0,52                  | 761,1513005                                | 275,5507161                               | 1036,702017                              |   |   |   |   |   |   |
| 30 |                              |             |          |   | 0,53                  | 797,9652514                                | 272,7769259                               | 1070,742177                              |   |   |   |   |   |   |

Figura 3. 6. Datos obtenidos guardados en Excel a través de la aplicación.

### 3.5. Aplicaciones

Dentro del ámbito de la energía solar este proyecto puede tener varias aplicaciones:

- Estudios de viabilidad: A la hora de instalar paneles de manera particular o impulsar la creación de una central solar es fundamental conocer si la localización de interés tiene las condiciones adecuadas de radiación solar para poder sacar el máximo partido a la instalación. Utilizando el modelo implementado se puede conocer el espectro solar en tiempo real y por lo tanto realizar estudios de viabilidad de la zona.
- Investigación y comparación de eficiencias de células solares: Para la determinación de la eficiencia de una célula solar normalmente se emplea un espectro solar de referencia ASTM, esto permite obtener un valor aproximado bajo unas condiciones estándar. Con este proyecto se puede calcular el espectro solar a tiempo real, por lo tanto, se puede determinar el valor de la eficiencia de manera más exacta y bajo unas condiciones que puede elegir el usuario.
- Construcción de viviendas eficientes: En la actualidad, muchas de las casas que se construyen intentan aprovechar al máximo la energía solar con el fin de reducir el impacto ambiental y disminuir la factura de la luz. Con el uso de la aplicación se podría estudiar la localización de la vivienda y las posibles alternativas para sacar mayor provecho a la radiación solar [29].
- Cocinas solares: Otra forma de aprovechar la energía solar es usándola para cocinar. Con la aplicación se puede estudiar cuando y bajo qué condiciones se puede sacar mayor rendimiento a la energía del sol para poder cocinar y así no utilizar electricidad, fuego o gas natural.
- Hornos solares para fundir metales: En la actualidad ya que se han instalado hornos solares que a través de la concentración de la radiación solar son capaces de generar altísimas temperaturas, pero es un sector al cual se le puede sacar más rendimiento. A través de la aplicación se pueden estudiar multitud de localizaciones y encontrar las más óptimas para instalar dichos hornos [30].
- Agricultura: La actividad principal realizada por todos los vegetales es la fotosíntesis que es el proceso en el cual la energía de la luz solar se convierte en energía química en forma de azúcares. Dentro de la agricultura la radiación solar es vital para cubrir las necesidades fisiológicas de los cultivos. Cada cultivo tiene un fotoperiodo determinado que es el conjunto de procesos mediante los cuales los vegetales regulan sus funciones fisiológicas empleando alternativamente periodos de luz y oscuridad. La floración y otros procesos de desarrollo vegetativo como la germinación de frutos y semillas se regulan en función de las horas de radiación solar recibidas [31].

## 4. CONTRASTACIÓN EXPERIMENTAL

### 4.1. Equipo utilizado

Para realizar la contrastación experimental y realizar los experimentos en cuestión se ha empleado un espectrorradiómetro diseñado, montado por Antares Instrumentación SL utilizando tecnologías y equipos Avantes. Sus principales características son:

- Cuenta con un sistema de 6 espectrorradiómetros individuales, que permiten la medición simultánea de la radiación e irradiancia para las longitudes de onda comprendidas desde 0.250  $\mu\text{m}$  hasta 2.500  $\mu\text{m}$ .
- Para la región UV-Visible (0.200-1.100  $\mu\text{m}$ ), posee un espectrorradiómetro AvaSpec ULS2048CL-EVO con una resolución de 2.17 nm para el rango de 0.350-1  $\mu\text{m}$  con una sensibilidad de 218.000 cuentas  $\mu\text{W}^{-1}$  por ms de integración y una relación señal/ruido de 335:1.
- En la región comprendida entre 0.900 y 1.700  $\mu\text{m}$ , cuenta con un espectrorradiómetro AvaSpec-NIR512 1,7-HSCEVO con 7,0 nm de resolución y una sensibilidad de 2.500.000 recuentos  $\mu\text{W}^{-1}$  por ms de integración y una relación señal/ruido de 1900:1.
- Entre 1.700 y 2.500  $\mu\text{m}$  se utiliza un espectrorradiómetro AvaSpec-NIR512-2.5-HSC-EVO, con 5,7 nm de resolución y una sensibilidad de 480.000 recuentos  $\mu\text{W}^{-1}$  por ms de integración y una relación señal/ruido de 1900:1.
- El equipo posee dos correctores de coseno con un área activa de 8 mm de cuarzo (CC-UV/VIS/NIR-8MM). Son difusores ópticos que se acoplan a fibras ópticas de 8 m de longitud y espectrómetros para recoger la señal de un campo de visión de 180°.
- El sistema puede transferir datos a un ordenador a través de conexiones USB y ethernet utilizando el software Avasotf 8.0.

### 4.2. Condiciones de las mediciones

Las mediciones utilizadas para realizar la contrastación experimental se toman el día 18 de octubre de 2021 en la azotea del edificio politécnico situado en Ciudad Real, España. Las condiciones atmosféricas, ambientales eran las siguientes:

- Las mediciones se realizan desde las 11:10 hasta las 19:20.
- El día cuenta con 7.8 horas de sol.
- La temperatura mínima del día es de 10 °C y la temperatura máxima se sitúa en 21 °C.
- Cielo despejado durante la mayor parte de las horas de sol.

A continuación, en la figura 4.1 se muestran los datos de irradiación medidos durante el día y se señalan las horas para las cuales se realiza el ajuste y la comparación entre los datos obtenidos por el espectrorradiómetro y los simulados con la aplicación Solar GCM.

E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

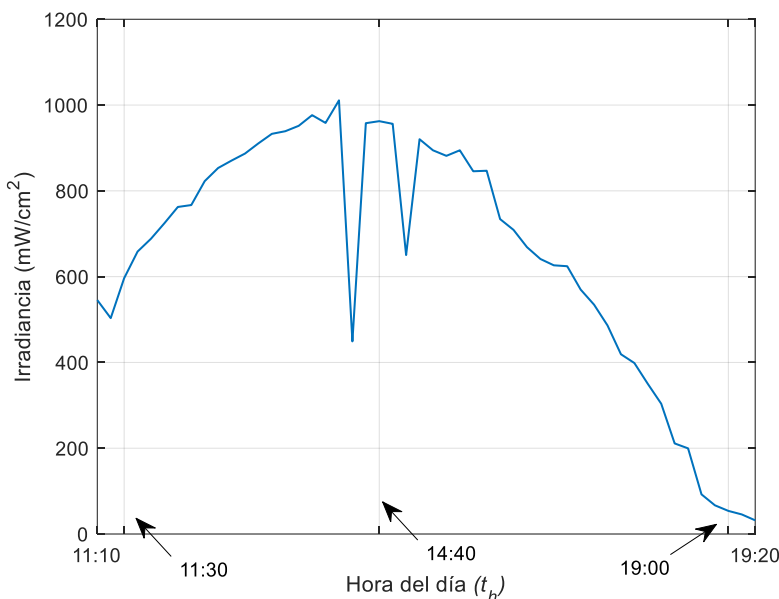


Figura 4. 1. Datos de irradiación medidos con espectrorradiómetro desde las 11:10 hasta las 19:20 del día 18 de octubre de 2021.

### 4.3. Ajuste y comparación teórica-experimental

Se procede a comparar los datos del espectro solar que se han obtenido con el espectrorradiómetro y los que se obtienen con la aplicación para tres horas concretas: 11:30, 14:40 y 17:00.

Los datos que se introducen para las tres horas en la aplicación vienen desglosados en la tabla 4.2, en ella se puede observar que los datos se agrupan en: datos exactos y datos ajustados. Esto se debe a que la profundidad óptica de los aerosoles y el vapor de agua precipitable no se conoce con exactitud en Ciudad Real debido a que Aeronet [26] no cuenta con un central de medición en la localización de interés. Por ello, para poder determinarlos de la manera más exacta posible se toman los datos que Aeronet proporciona en Badajoz y Granada que se muestran en la tabla 4.1 y se realiza un estudio para determinar los valores de dichos parámetros que mejor ajustan el espectro solar en Ciudad Real para las tres horas de comparación.

|                |   | 11:30 | 14:40 | 17:00 |
|----------------|---|-------|-------|-------|
| <b>Badajoz</b> | Profundidad óptica de los aerosoles ( $L_{aer}$ ) | 0.05  | 0.3   | 0.38  |
|                | Vapor de agua precipitable ( $L_{H_2O}$ ) (cm)    | 3.25  | 3.28  | 3.48  |
| <b>Granada</b> | Profundidad óptica de los aerosoles ( $L_{aer}$ ) | 0.06  | 0.07  | 0.25  |
|                | Vapor de agua precipitable ( $L_{H_2O}$ ) (cm)    | 2.95  | 3.23  | 2.85  |

Tabla 4. 1. Datos profundidad ópticas de los aerosoles y vapor de agua precipitable en Badajoz y Granada el día 18 de octubre de 2021.

E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

|                        |   | 11:30   | 14:40  | 17:00  |
|------------------------|---|---------|--------|--------|
| <b>Datos exactos</b>   | Hora  | 9:30    | 12:40  | 15:00  |
|                        | Latitud (°)                                       | 38.9861 |        |        |
|                        | Longitud (°)                                      | -3.9273 |        |        |
|                        | Inclinación de la superficie (°)                  | 0       |        |        |
|                        | Altitud (m)                                       | 642     |        |        |
|                        | Temperatura (°C)                                  | 13      | 19     | 17     |
|                        | Albedo  | 0.1698  | 0.1136 | 0.1046 |
| <b>Datos ajustados</b> | Profundidad óptica de los aerosoles ( $L_{aer}$ ) | 0.03    | 0.085  | 0.28   |
|                        | Vapor de agua precipitable ( $L_{H_2O}$ ) (cm)    | 3.42    | 3.22   | 3.98   |

Tabla 4. 2. Datos introducidos en la aplicación para la realización de la contrastación experimental.

En la figura 4.1 se representan los espectros obtenidos al introducir los datos de la tabla 4.2 en la aplicación Solar GCM y los espectros medidos con el espectro radiómetro. Si se observa dicha figura se puede comprobar:

- A las 11:30 el espectro obtenido experimentalmente y el espectro simulado son muy parecidos. La diferencia más significativa entre ambos se localiza para las longitudes de onda comprendidas entre  $0.95 \mu\text{m}$  y  $1.12 \mu\text{m}$ , dicha diferencia es provocada por el vapor de agua atmosférico.
- Para los 14:40 los espectros representados muestran las mismas características que en el caso anterior, con la salvedad que la diferencia encontrada en ambos espectros entre  $0.95 \mu\text{m}$  y  $1.12 \mu\text{m}$  es menor.
- En la última gráfica es donde más diferencias se encuentran entre ambos espectros y es debido a que a la hora de la medición la profundidad óptica de los aerosoles y el vapor de agua precipitable crecieron debido a la presencia de cirros en el cielo (nubes blancas casi transparentes que aparecen a grandes altitudes de la atmósfera) y la aplicación Solar GCM está diseñada para la determinación del espectro solar bajo unas condiciones de cielo despejado.

E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

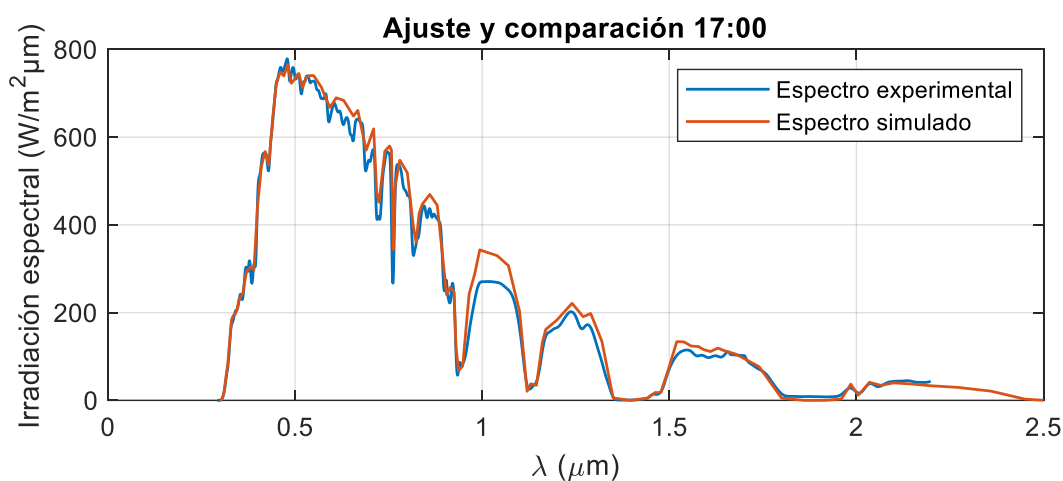
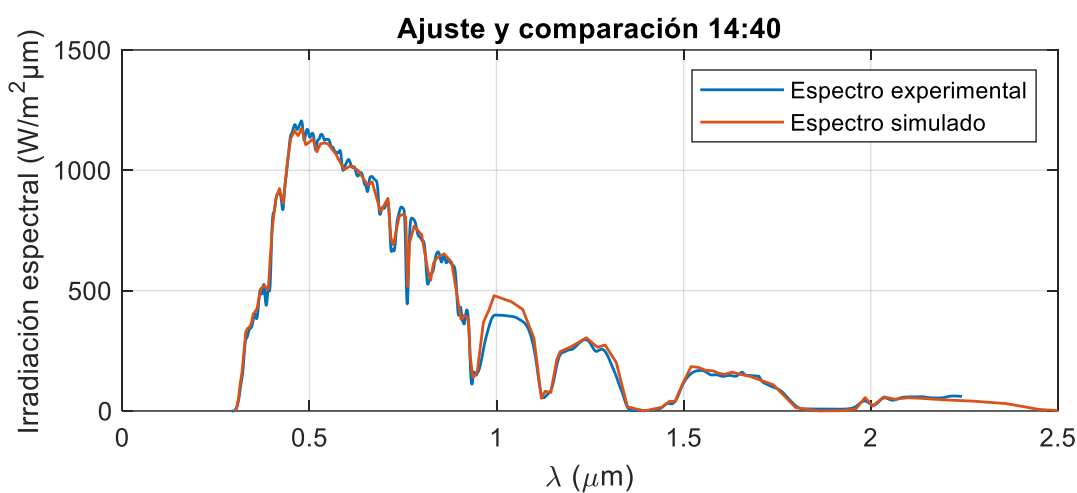
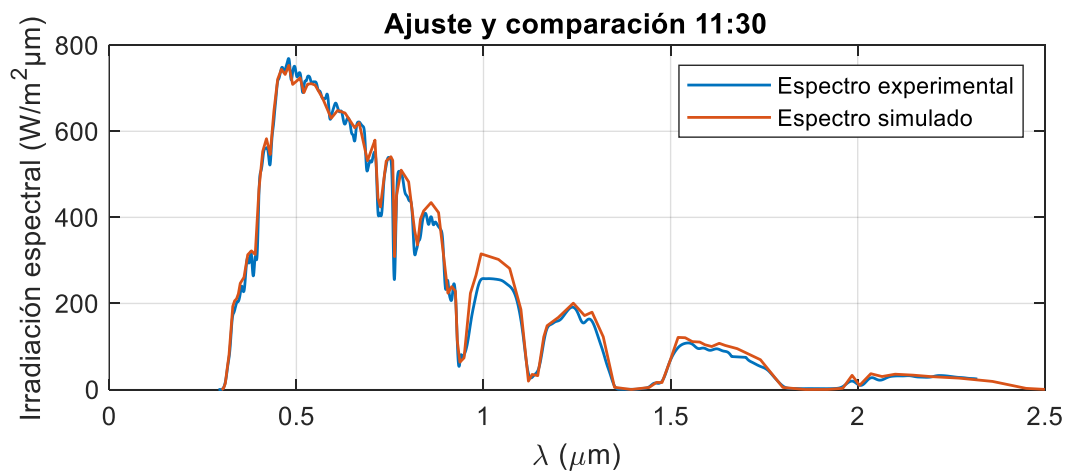


Figura 4. 2. Ajuste y comparación de los datos obtenidos con el espectrorradiómetro y con la aplicación para las 11:30, 14:40 y 17:00 del día 18 de octubre de 2021



## 5. ESTUDIOS PARAMÉTRICOS

### 5.1. Plan de ejecución

Utilizando la aplicación desarrollada se realizan siete estudios paramétricos tomando como base los datos de entrada que se muestran en la tabla 5.1.

|                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| Hora                                | 14:40   |
| Día                                 | 18 de octubre de 2021, que corresponde con el día 291 del año |
| Inclinación de la superficie (°)    | 0   |
| Azimut de la superficie (°)         | 180   |
| Profundidad óptica de los aerosoles | 0.085   |
| Albedo de la superficie de estudio  | 0.1136  |
| Vapor de agua precipitable (cm)     | 3.22  |
| Latitud (°)                         | 38.9861   |
| Longitud (°)                        | -3.9272   |
| Altitud (m)                         | 642   |
| Temperatura (°C)                    | 19  |

Tabla 5. 1. Datos base para los estudios paramétricos.

En cada estudio paramétrico se varía uno de los términos anteriores de la tabla 5.1 para conocer su efecto sobre el espectro solar manteniendo el valor del resto de las entradas constantes.

### 5.2. Efecto de la hora del día

A la hora de calcular el espectro solar la hora del día afecta al ángulo horario del sol, al ángulo cenital, al ángulo azimutal, al ángulo de incidencia y al índice  $AM_p$ . Todo ello provoca la consiguiente variación de la radiación solar antes de llegar a la superficie terrestre.

Para conocer el efecto de la hora del día sobre el espectro solar se realizan cinco simulaciones considerando horas distintas. Los datos obtenidos se representan en la figura 5.1, en la cual se puede observar:

- La máxima intensidad de la radiación solar se da para las 14:40 y las 16:00, es decir para las horas centrales de la tarde en las que el sol alcanza su punto más alto en el cielo lo que provoca que disminuya el tamaño del área radiada por la radiación solar y la distancia que recorre la radiación desde que entra en la atmósfera hasta que llega a la superficie terrestre.
- La mínima intensidad de la radiación solar se da para las 11:30 y las 17:00, que corresponden con las primeras y últimas horas simuladas. Esto es debido a que la distancia que recorre la radiación solar en la atmósfera y el tamaño de área abarcada por la radiación es mayor.
- Por último, para las 12:30 se obtiene un espectro entre las mínimas y máximas intensidades de radiación solar. Dicha hora corresponde con el momento del día de transición entre la mañana y la tarde en el que el sol tiende a aumentar su altura en el cielo.

E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

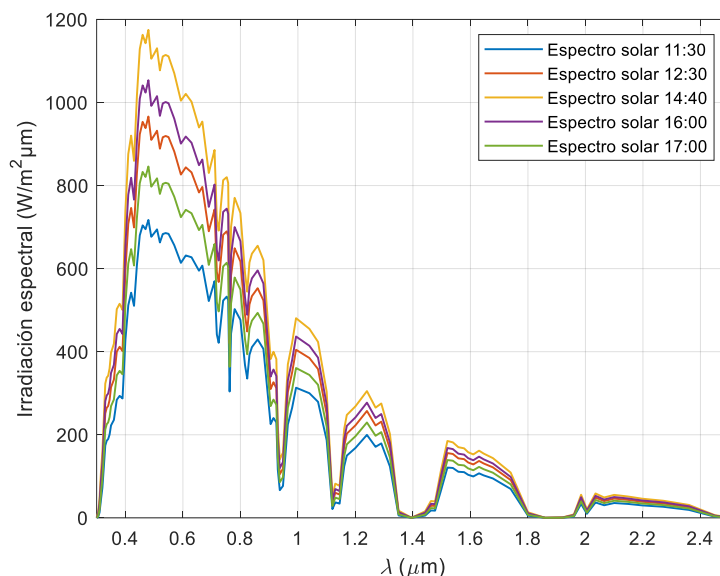


Figura 5. 1. Estudio paramétrico del espectro solar en función de la hora del día.

### 5.3. Efecto de la profundidad óptica de los aerosoles

La profundidad óptica de los aerosoles ( $L_{aer}$ ) permite medir la dispersión y absorción causada por la presencia de los aerosoles en la atmósfera en una columna vertical. En la figura 5.2 se ha realizado un estudio paramétrico considerando valores de  $L_{aer}$  para unas condiciones de cielo despejado. En dicha figura se puede comprobar que a medida que crece el valor de  $L_{aer}$  la intensidad de la radiación solar que llega a la superficie terrestre disminuye debido a que aumenta la absorción y dispersión que sufre la radiación solar durante su paso por la atmósfera al haber mayor presencia de aerosoles. Además, se observa que la región que se ve más afectada con la variación de la profundidad óptica de los aerosoles es la comprendida entre las longitudes de onda de 0.42 y 0.6676 μm que corresponde con la región del visible de los colores azul, cian, verde, amarillo, anaranjado y rojo.

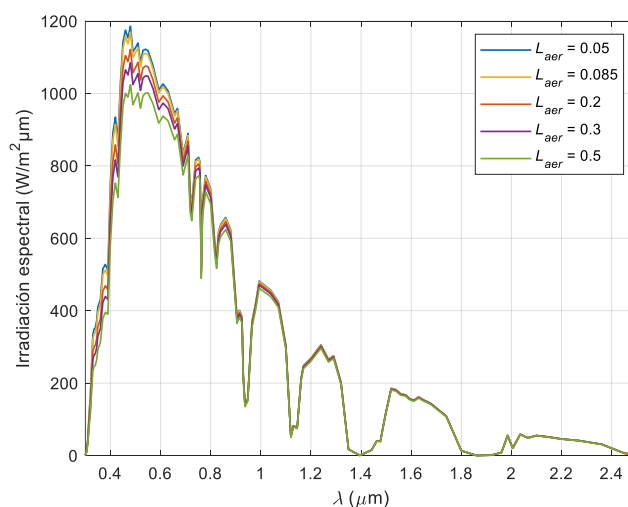


Figura 5. 2. Estudio paramétrico del espectro solar en función de la profundidad óptica de los aerosoles ( $L_{aer}$ ).

E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

Como se ha comentado, cuando crece el valor del  $L_{aer}$  se produce el aumento de la dispersión que sufre la radiación solar a su paso por la atmósfera lo que provoca que aumente la intensidad de la radiación difusa que llega a la superficie terrestre en detrimento de la radiación directa. Dicho efecto se puede comprobar en la figura 5.3.

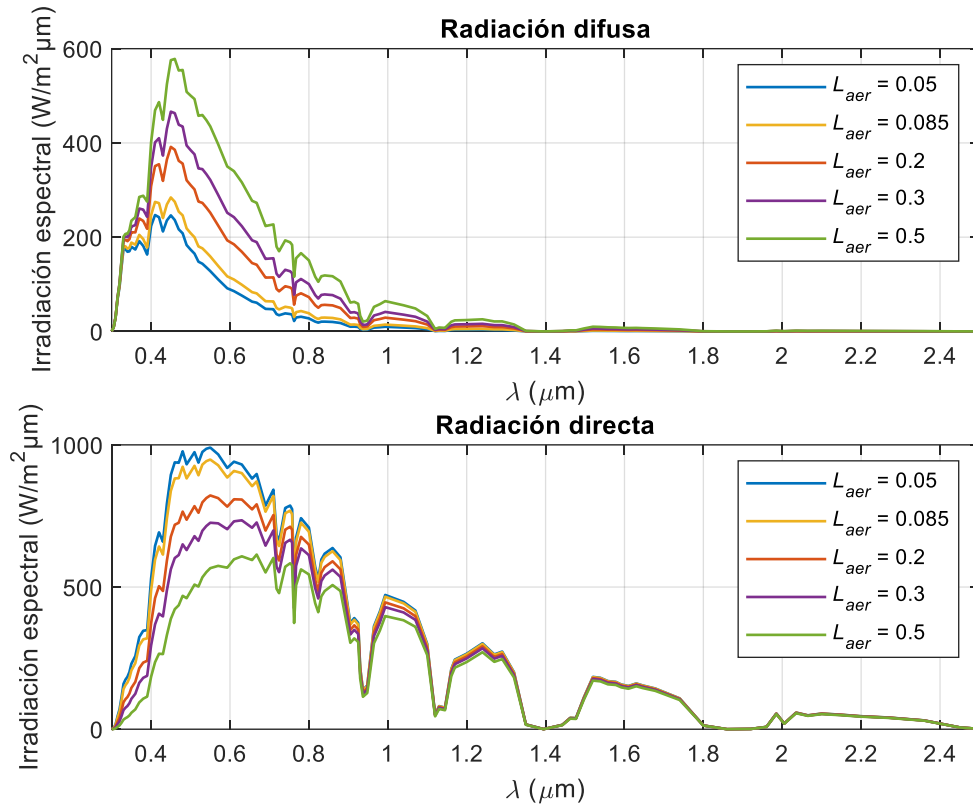


Figura 5. 3. Estudio paramétrico de la radiación difusa y directa en función de la profundidad óptica de los aerosoles.

### 5.4. Efecto del vapor de agua precipitable

El vapor de agua precipitable ( $L_{H_2O}$ ) denota el espesor de la columna de agua formada por la condensación del vapor de agua en una columna vertical que va desde el suelo hasta la parte superior de la atmósfera. Las moléculas de vapor de agua tienen la propiedad de absorber una parte de la radiación solar, evitando que llegue a la superficie. Para conocer más en profundidad el efecto que provoca sobre el espectro solar se realizan varias simulaciones y los datos de los espectros solares que se obtienen se representan en la figura 5.4. En ella se puede comprobar a partir de  $0.58 \mu\text{m}$ , a medida que aumenta el valor de  $L_{H_2O}$  también aumenta el efecto de la absorción del agua, cómo se demostró en la figura 2.21.

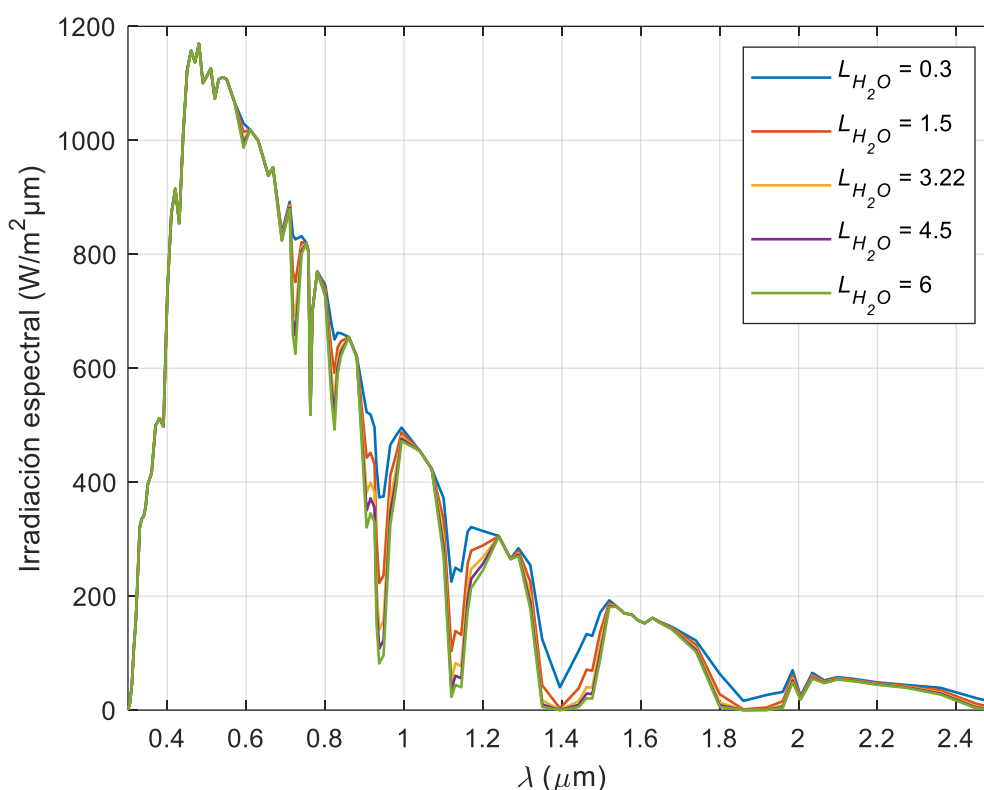


Figura 5. 4. Estudio paramétrico del espectro solar en función del vapor de agua precipitable ( $L_{H_2O}$ ).

A continuación, en la figura 5.5 se representa la componente difusa y directa de cada espectro solar simulado para conocer más detalladamente como les afecta la variación del vapor de agua precipitable. La radiación directa sufre cambios significativos a partir de  $0.71 \mu\text{m}$  ocasionados por el aumento de la absorción que sufre a su paso por la atmósfera. La radiación difusa sufre pequeños cambios por el aumento de la absorción causados por la disminución de: la intensidad de la componente directa y la intensidad de la componente de radiación difusa ocasionada por la reflexión múltiple entre el suelo. Por lo tanto, las diferencias entre los espectros representados en la figura 5.4 se deben principalmente al efecto que tiene el aumento del vapor de agua precipitable sobre la radiación directa.

E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

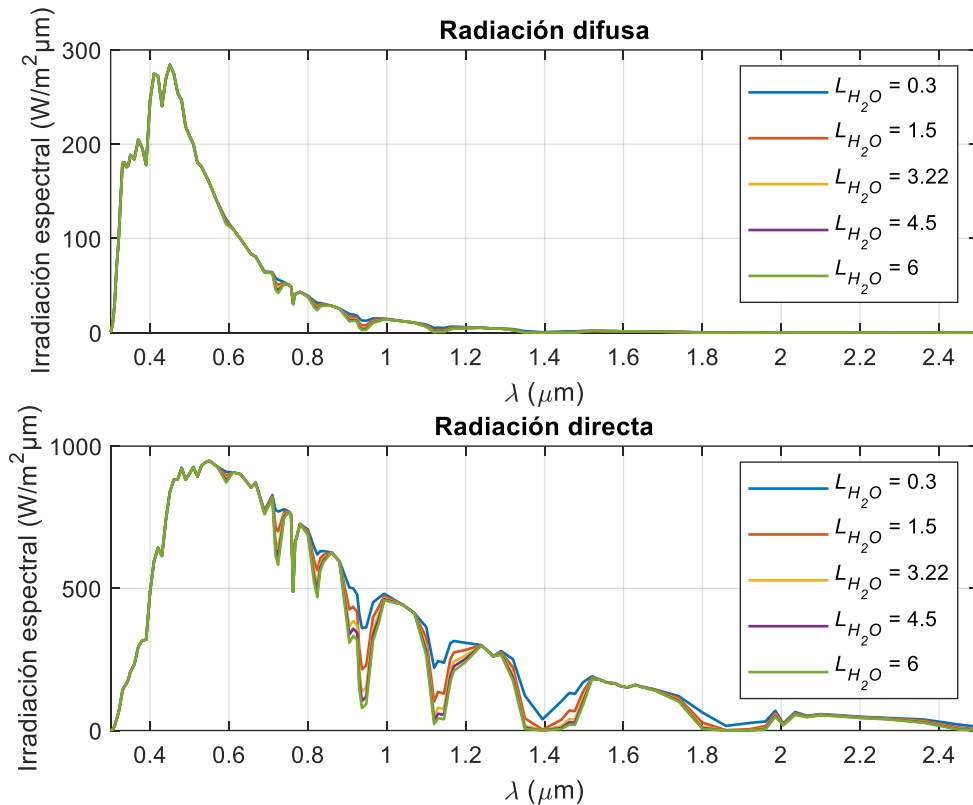


Figura 5. 5. Estudio paramétrico de radiación difusa y directa en función del vapor de agua precipitable.

### 5.5. Efecto del día del año

El día del año es muy determinante a la hora de conocer la distancia entre tierra-sol, el ángulo de declinación de la tierra que explica la existencia de las estaciones, el ángulo horario del sol, la posición solar en el cielo, el ángulo de incidencia, el índice de masa de aire y los efectos atmosféricos que sufre la radiación solar a su paso por la atmósfera. Para conocer su efecto sobre el espectro solar, se realizan varias simulaciones considerando distintos días representativos de cada estación. Los datos obtenidos se representan en la figura 5.6. De los datos obtenidos en Ciudad Real se observa:

- A principios del invierno llega la mínima radiación solar, momento en el que ángulo de declinación toma sus valores más negativos, lo que provoca el aumento del índice *AM* y el área radiada por la radiación solar en el hemisferio norte. De ahí que las temperaturas durante diciembre y enero sean reducidas en España.
- A finales del invierno el espectro solar toma valores próximos pero superiores al espectro solar que se obtiene a mediados del otoño. Esto se debe a que la declinación es menor en otoño que a finales del invierno lo que provoca que la radiación solar atraviese un espesor de atmósfera mayor en otoño que a finales del invierno en el hemisferio norte.
- Por último, los valores máximos de radiación solar que llegan a la superficie terrestre se localizan en el final de la primavera y durante el verano. Momento en que el ángulo de declinación toma sus valores positivos más altos. Todo ello provoca que la radiación atraviese un espesor de atmósfera menor y sufra menos dispersión y absorción que en otras épocas del año.

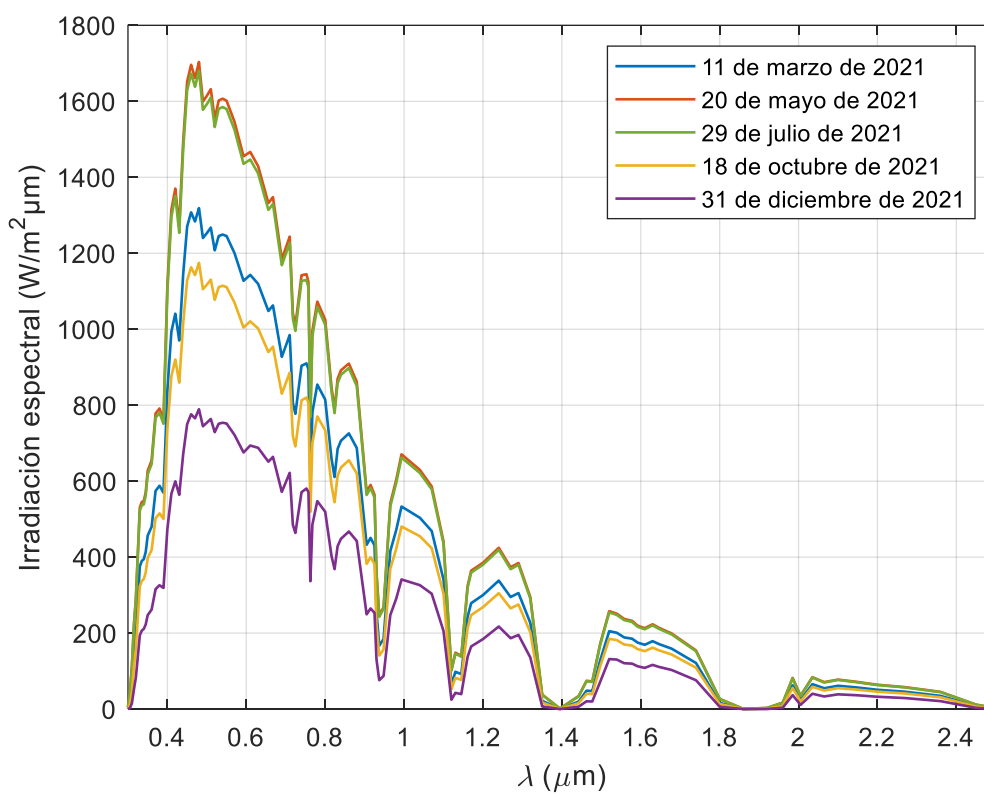


Figura 5. 6. Estudio paramétrico del espectro solar en función del día del año.

## 5.6. Efecto de la latitud

La latitud provoca la aparición de las cinco grandes franjas climáticas de la tierra y tiene un efecto muy determinante sobre el espectro solar. Dicho fenómeno se puede comprobar en la figura 5.7, en la cual se deja constante la longitud, cuyo valor es de  $-3.92726^\circ$ , y se varía la latitud. En dicha gráfica se observa que, para el día de 18 de octubre de 2021 de todas las localizaciones simuladas, la máxima intensidad de radiación solar que llega a la superficie terrestre es para una latitud de  $0^\circ$ , que corresponde con la parte del océano Atlántico que baña Costa de Marfil. El resultado obtenido es coherente, debido a que esa zona cuenta con un clima tropical en el que las temperaturas son elevadas durante todo el año.

El segundo espectro solar representado con el color naranja corresponde a la zona del océano atlántico próxima a Sudáfrica donde el clima es mediterráneo suave. Para el día representado dicha zona se encuentra en primavera, aunque las temperaturas tienden a ser elevadas.

Las latitudes de  $38.9861^\circ$  y  $-60^\circ$  cuentan con un espectro solar muy parecido. La primera localización corresponde a Ciudad Real, España, y la segunda corresponde a la zona del océano Atlántico situada entre Sudáfrica y la Antártida. En ambas localizaciones el clima tiende a ser parecido.

Por último, la mínima intensidad de la radiación solar en la figura 5.7 se produce para una latitud de  $60^\circ$ . Dicha localización corresponde a la zona cercana a la costa de Escocia donde el clima tiende a ser el más frío de todas las localizaciones representadas.

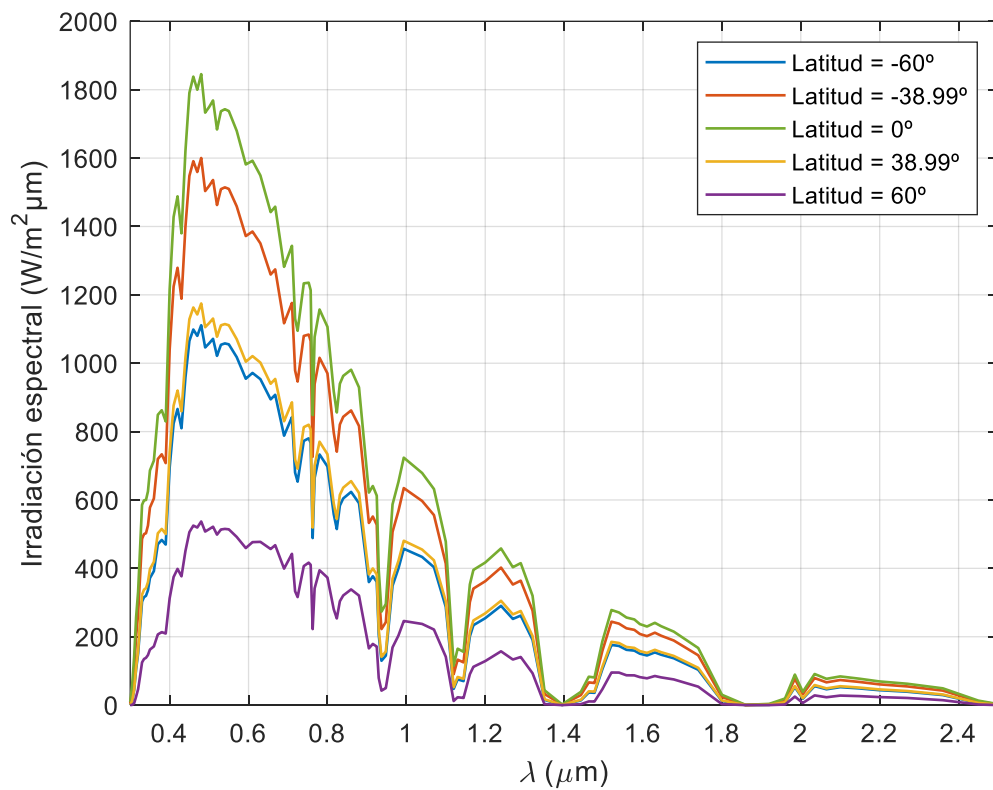


Figura 5. 7. Estudio paramétrico del espectro solar en función de la latitud geográfica.

### 5.7. Efecto de la altitud

A medida que aumenta la altitud sobre el nivel del mar menor es el espesor de atmósfera que atraviesa la radiación solar antes de llegar a la superficie terrestre, lo que minimiza la atenuación que sufre la radiación solar a causa de los efectos atmosféricos detallados en el apartado 2. Por lo tanto, la intensidad de la radiación solar que llega a la superficie terrestre aumenta. Para corroborar dicho efecto se representan en la figura 5.8 varios espectros solares para varias altitudes distintas. En dicha gráfica se puede observar que el efecto que ocasiona la variación de la altitud sobre el espectro solar es muy pequeño, pero esto tiene una justificación. Esa variación tan reducida se debe a que solo se ha variado la altitud y se ha dejado constante otros parámetros de entrada que están muy relacionados con la variación de la altitud como son la profundidad óptica de los aerosoles, el vapor de agua precipitable. A medida que aumenta la altitud la profundidad óptica de los aerosoles y el vapor de agua precipitable disminuye debido a que el espesor de la atmósfera que atraviesa la radiación es menor, pero al no tenerse en cuenta dicho fenómeno el efecto de la altitud no se distingue en la figura 5.8. Para poder ver mejor el efecto que provoca la variación de la altitud sobre el espectro solar en la figura 5.9 se hace zoom a los espectros solares de la figura 5.8 para las longitudes de onda comprendidas entre 0.315  $\mu\text{m}$  y 0.89  $\mu\text{m}$ . En la figura 5.9 se observa que las máximas diferencias entre unos espectros y otros se localizan para las longitudes de onda comprendidas entre 0.33  $\mu\text{m}$  y 0.7625  $\mu\text{m}$  que corresponden con parte de la región ultravioleta y la región del visible del espectro solar. Además, la máxima radiación solar que llega a la superficie de la tierra se produce para la máxima altitud simulada y como cabe de esperar la mínima intensidad se produce para la mínima altitud simulada.

E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

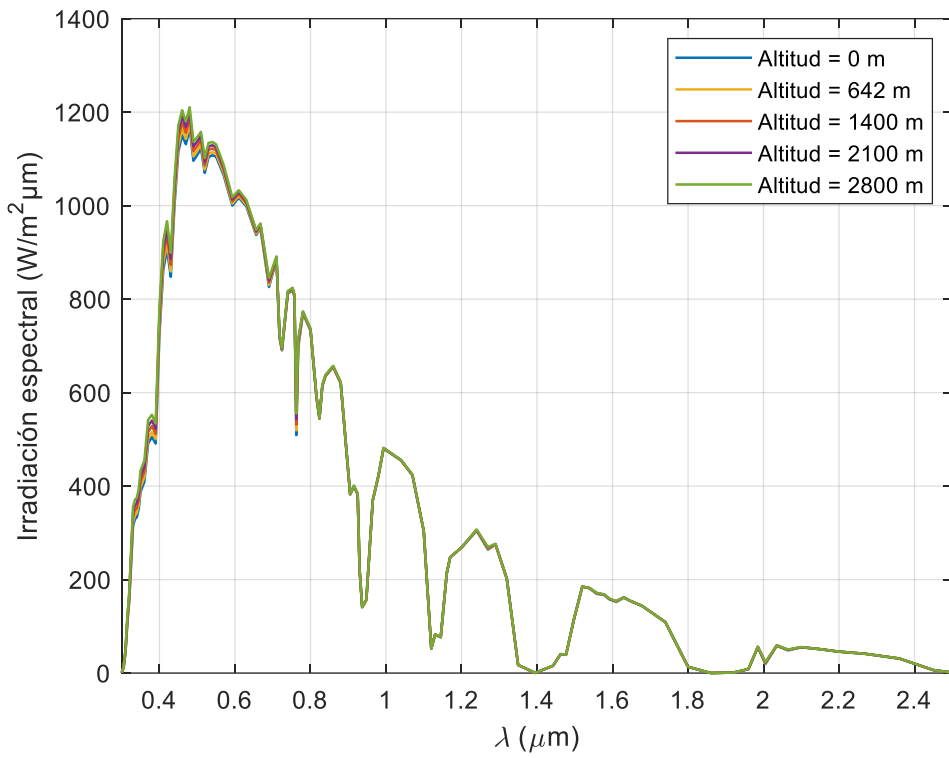


Figura 5. 8. Estudio paramétrico del espectro solar en función de la altitud.

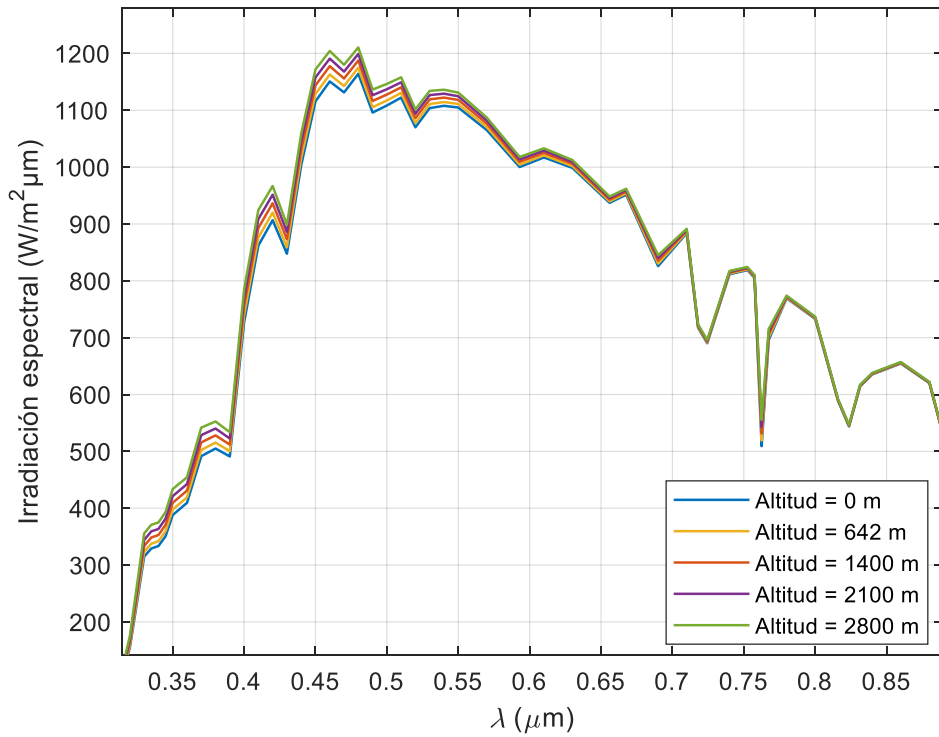


Figura 5. 9. Ampliación del estudio paramétrico de la figura 5.8.



## 5.8. Efecto de la inclinación de la superficie

La intensidad de la radiación solar que llega a una superficie se ve determinada por el ángulo de incidencia que forman los rayos procedentes del sol con dicha superficie. Por lo tanto, es fundamental optimizar la pendiente de la superficie de estudio para recibir la máxima intensidad de radiación solar posible.

La aplicación Solar GCM permite conocer la inclinación más óptima en un momento determinado de una superficie, es decir el software implementado puede usarse como base para la programación de un sistema de seguimiento solar en tiempo real de paneles. Utilizando esta posibilidad que da la aplicación se realizan cinco simulaciones considerando distintas inclinaciones de la superficie de estudio. Representando los datos se obtiene la figura 5.10 en la cual se deduce que de todas las inclinaciones que se han simulado la más óptima en Ciudad Real, España, a las 14:40 del día 18 de octubre es de 50° y que la peor inclinación para ese instante es la de cero grados. El valor de inclinación óptima no permanece constante durante el día, por lo tanto, el valor obtenido no tiene por qué coincidir con el que se obtendría a otra hora distinta. Además, para aprovechar al máximo la radiación solar que incide sobre una superficie es necesario, además de tener una inclinación óptima, contar un azimut adecuado.

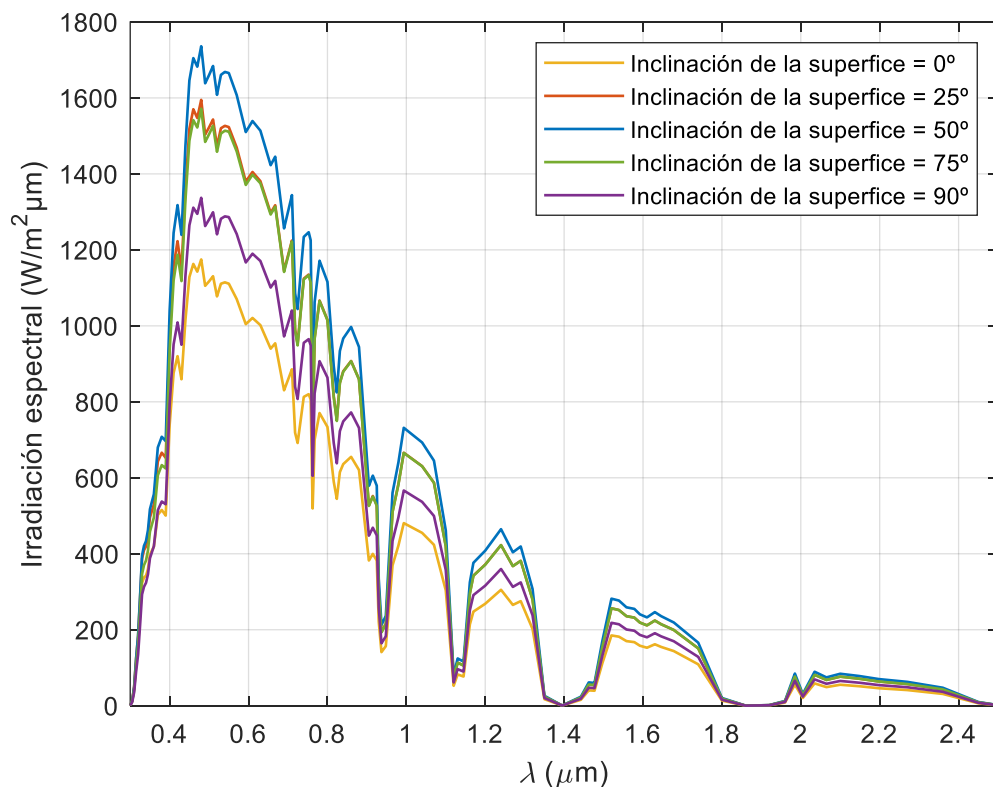


Figura 5. 10. Estudio parámetro del espectro solar en función de la pendiente de la superficie.

**E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL**

## 6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

### 6.1. Conclusiones

Tras haber estudiado en detalle el espectro solar y desarrollado la aplicación Solar GCM se extraen las siguientes conclusiones.

- Durante las primeras horas de la mañana y las últimas de la tarde, en las que el sol está visible en el cielo, la intensidad de la radiación solar que llega a la superficie terrestre es menor que para las horas centrales del día debido a que el ángulo de elevación del sol es menor durante esas horas lo que provoca que la radiación atraviese un mayor espesor atmosférico para alcanzar la superficie y se vea más atenuada a causa del aumento de la absorción y dispersión que sufre.
- La profundidad óptica de los aerosoles tiene un efecto muy considerable sobre el espectro solar. A medida que crece su valor debido al aumento de polvo, humo, cenizas... en la atmósfera, se produce un aumento de la absorción y de la dispersión de la radiación solar.
- El aumento del vapor de agua atmosférico incrementa la absorción que sufre la componente directa de la radiación solar a su paso por la atmósfera, pero prácticamente no provoca ninguna variación sobre la componente difusa.
- Así mismo se ha llegado a la conclusión de que un mayor volumen de contaminación en la atmósfera conduce a un aumento de la intensidad de la componente difusa de la radiación solar a causa del crecimiento de la dispersión que sufre la radiación solar a su paso por la atmósfera.
- A mayor altitud sobre el nivel del mar la intensidad de la radiación solar que incide sobre la superficie terrestre aumenta debido a que el recorrido de esta en la atmósfera se reduce. Para unas mismas condiciones el aumento de la altitud también causa variaciones sobre los efectos atmosféricos que no se han considerado en este estudio. Si se hubiesen considerado el efecto del aumento de la altitud sobre la radiación solar previsiblemente sería más considerable.
- Las zonas costeras tienen una menor variación térmica anual que las zonas del interior. Esto se debe al poder amortiguador térmico del agua del mar que absorbe la radiación solar y libera la energía térmica recibida del sol más lentamente.
- Es fundamental contar con una inclinación y azimut de la superficie óptimos para poder aprovechar al máximo la energía de la radiación solar incidente. De ahí la importancia de instalar al menos seguidores de la trayectoria del sol en un eje cuando se coloquen paneles solares.

### 6.2. Trabajos futuros

En este apartado se muestran trabajos que pueden desarrollarse con el fin de estudiar más a fondo el espectro solar y mejorar la aplicación Solar GCM:

- Aumentar la exactitud de la aplicación que se ha propuesto en este trabajo. Para ello, se debe revisar y comparar la exactitud de las fórmulas utilizadas en otros modelos con algunas ecuaciones de este proyecto tales como la fórmula que permite calcular el índice  $AM_p$ , las ecuaciones que permiten simular los efectos atmosféricos haciendo énfasis en el vapor de agua atmosférico y las ecuaciones utilizadas para calcular las componentes de radiación solar.
- Añadir la posibilidad de determinar el espectro solar bajo unas condiciones de cielo cubierto. Para ello se deben estudiar nuevos modelos e introducir modificaciones en la aplicación Solar GCM para que el usuario tenga la opción de acceder a las dos formas de cálculo del espectro solar implementadas.
- Incrementar la precisión de la aplicación ampliando a más longitudes de onda de onda intermedias los datos de radiación extraterrestre, absorción de ozono, absorción de vapor de agua y absorción

## E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

de gases uniformemente mezclados. En este proyecto se cuanta con dichos datos desde  $0.3 \mu\text{m}$  hasta  $4 \mu\text{m}$  con un paso de  $0.05 \mu\text{m}$ , el objetivo es disminuir el paso por debajo de  $0.05 \mu\text{m}$  y así aumentar el número de datos.

- Determinar la densidad de flujo de fotones por intervalo de longitud de onda a partir del espectro simulado con la aplicación Solar GCM. Cuando un fotón de la radiación solar incide sobre la superficie de un material provoca que un electrón de dicho material promocione desde la banda de valencia hacia la banda de conducción creando un par electrón-hueco, si la energía del fotón incidente es igual o superior a la energía de la banda prohibida del material. Todo lo mencionado con anterioridad es lo que ocurre en las células solares cuando incide sobre ellas la radiación solar. Por ello, a través de la introducción del cálculo de la densidad de flujo de fotones en la aplicación creada en este proyecto se puede estudiar más afondo la eficiencia de las células solares en función de la densidad de flujo de fotones que inciden sobre ellas.
- Integrar la aplicación Solar GCM en otro modelo ya existente (Optipar) que calcula las propiedades ópticas de partículas atmosféricas y el de la deposición de éstas sobre superficies nevadas. La integración de ambas aplicaciones tendrá beneficios en las dos direcciones: Los espectros solares simulados con la aplicación SolarGCM evitarán recurrir a espectros estandarizados, y por su parte, Optipar puede facilitar valores espectrales del albedo de las superficies y de los espectros de absorción y dispersión de las partículas, evitando así tener que utilizar exponentes de Angstrom.

Por último, se muestran otros trabajos que pueden ser de utilidad para otros proyectos que pueden ser abordados por otros grupos de investigación (distintos al Grupo de Combustibles y Motores):

- Estudio de los materiales más eficientes para fabricar células solares en función de la localización.
- Análisis de la producción agrícola en función diferentes condiciones atmosféricas, ambientales y de localización.
- Análisis del impacto de la radiación solar sobre la salud de las personas. Para ello se debe estudiar el espectro solar al que se ven sometidos las personas del estudio y hacer una valoración del efecto que ha tenido sobre su estado de salud.
- Evaluación del impacto que provoca el cambio climático sobre la fauna y la flora de la tierra.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Parlamento Europeo (2021). La política energética: principales generales. <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/es/sheet/68/la-politica-energetica-principios-generales>.
- [2] Red eléctrica de España (2019). Red eléctrica y la integración de renovables. [https://www.ree.es/sites/default/files/11\\_PUBLICACIONES/Documentos/Transicion\\_Energetica.pdf](https://www.ree.es/sites/default/files/11_PUBLICACIONES/Documentos/Transicion_Energetica.pdf)
- [3] Díaz J. (2017). Modelado de las propiedades ópticas de distintos aerosoles atmosféricos. Proyecto Fin de Carrera, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad de Castilla-La Mancha.
- [4] Rubio S. (2018). Modelado de la reflectancia de superficies nevadas contaminadas con partículas de hollín. Proyecto Fin de Máster, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad de Castilla-La Mancha.
- [5] González S. (2019). Modelado del efecto de la distribución de tamaños de partículas sobre el oscurecimiento de superficies nevadas. Proyecto Fin de Carrera, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad de Castilla-La Mancha.
- [6] González S. (2021). Revisión de métodos para el cálculo de las propiedades ópticas de aglomerados de hollín. Proyecto Fin de Máster, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad de Castilla-La Mancha.
- [7] Honsberg, C., Bowden, S. (s.f). Radiación solar fuera de la atmósfera terrestre. Pveducation. <https://www.pveducation.org/es/fotovoltaica/2-propiedades-de-la-luz-del-sol/radiaci%C3%B3n-solar-fuera-de-la-atm%C3%B3sfera-terrestre>
- [8] Spencer, J.W. (1971). Representación en serie de Fourier de la posición del sol.
- [9] Bird, R., Riordan, C. (1984) Simple Solar Spectral Model for Direct and Diffuse Irradiance on Horizontal and Tilted Planes at the Earth's Surface for Cloudless Atmospheres.
- [10] Bird, R., Riordan, C. (1985) Simple Solar Spectral Model for Direct and Diffuse Irradiance on Horizontal and Tilted Planes at the Earth's Surface for Cloudless Atmospheres.
- [11] Myers, R.D. (s.f). Practical modeling for renewable energy applications. Abbas Ghassemi.
- [12] Honsberg, C., Bowden, S. (s.f). Ángulo de inclinación. Pveducation. <https://www.pveducation.org/es/fotovoltaica/2-propiedades-de-la-luz-del-sol/angulo-de-declinaci%C3%B3n>
- [13] Duffie, J.A. y W.A. Beckman. (1974). Solar Energy Thermal Processes. Wiley Interscience, Hoboken, NJ.
- [14] NOAA- National Oceanic and Atmospheric Administration. EE.UU. <https://www.noaa.gov/>
- [15] Franco, G.A. (2016). La ecuación del tiempo. <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/celeste/tiempo/tiempo.html>
- [16] Honsberg, C., Bowden, S. (s.f). El ángulo de elevación. Pveducation. <https://www.pveducation.org/es/fotovoltaica/2-propiedades-de-la-luz-del-sol/el-%C3%A1ngulo-de-elevaci%C3%B3n>
- [17] Franco, G.A. (2016). Posición del Sol en el Sistema de Referencia Local. <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/celeste/sol/sol.html>
- [18] Universidad de Jaén (s.f.) Posición del sol, coordenadas solares. [http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home\\_main\\_frame/02\\_radiacion/01\\_basico/2\\_radiacion\\_07.htm](http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/02_radiacion/01_basico/2_radiacion_07.htm)
- [19] Instituto de Tecnología Educativas, Ministerio de Educación, Gobierno de España (s.f). Efecto del ángulo de incidencia de los rayos solares.

E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

[https://fjferre.webs.ull.es/Apuntes3/Leccion02/11\\_efecto\\_del\\_angulo\\_de\\_incidencia\\_de\\_los\\_rayos\\_solares\\_sobre\\_la\\_irradiancia.html](https://fjferre.webs.ull.es/Apuntes3/Leccion02/11_efecto_del_angulo_de_incidencia_de_los_rayos_solares_sobre_la_irradiancia.html)

- [20] Kasten, F. (1966). A New Table and Approximate Formula for Relative Optical Air mass.
- [21] IDEAM- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2007). Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático.  
<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climatico.pdf>
- [22] Organización mundial de las naciones unidas (16 de septiembre de 2020). Día mundial de la preservación de la capa de Ozono. <https://www.un.org/es/observances/ozone-day/science>
- [23] Van Heuklon, T.K. (1979). Estimación del ozono atmosférico para modelos de radiación solar. Solar Energy, Vol.22, pp 63-68.
- [24] [17] Arroyo, M.A. (2007). El agua en la atmósfera.  
<https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/index.php/ediciones-antecedentes/77-vol-58-num-3-julio-septiembre-2007/agua/117-el-agua-en-la-atmosfera>
- [25] SERVIR (2009). Aerosol Optical Depth.  
[https://www.servir.net/haiti-earthquake-2010/69-smog-blog-help-files/386-aerosol-optical-depth-\(aod\).html](https://www.servir.net/haiti-earthquake-2010/69-smog-blog-help-files/386-aerosol-optical-depth-(aod).html)
- [26] AERONET- Aerosol Robotic Network  
[https://aeronet.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/draw\\_map\\_display\\_aod\\_v3](https://aeronet.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/draw_map_display_aod_v3)
- [27] Lapuerta, M. (s.f). Efectos de la altitud.
- [28] IDEAM- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (s.f). La radiación solar y su paso por la atmósfera. <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/la-radiacion-solar-y-su-paso-por-la-atmosfera>
- [29] ASTM designation: E-891-87. Tables for Terrestrial Direct Normal Solar Spectral Irradiance Tables for Air Mass 1.5 (1999).
- [30] ASTM designation: E-892-87. Tables for Terrestrial Solar Spectral Irradiance at Air Mass 1.5 for a 37-Deg Tilted Surface (1999).
- [31] ASTM designation: G173-03. Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface. (2020).
- [32] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Gobierno de España. (s.f). Energía y desarrollo sostenible, Certificación energética.  
<https://energia.gob.es/desarrollo/EficienciaEnergetica/CertificacionEnergetica/Paginas/certificacion.aspx>
- [33] Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y energéticas, Ministerio de Ciencia e Innovación, Gobierno de España. (s.f). Hornos solares.  
<https://www.psa.es/es/instalaciones/horno.php>
- [34] Stirbet A., Lazár D., Guo Y. (2019). Photosynthesis: basics, history and modelling.  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7489092/>



## ANEXOS

### A1. MANUAL DE LA APLICACIÓN

La primera pantalla que se encuentra al usuario es la portada (figura A1.1). En ella se muestra una breve descripción de lo que es capaz de hacer el software implementado, la información del autor de la aplicación y de los directores del proyecto. A través del botón ‘Comenzar’ el usuario puede acceder a la siguiente pantalla.



Figura A1. 1. Portada de la aplicación.

Una vez que el usuario pulsa el botón ‘Comenzar’ se muestra la pantalla de entrada de datos (figura A1.2 y figura A1.8). Los datos de entrada que el usuario debe de introducir en la aplicación vienen agrupados en cinco bloques:

- Primer bloque: Fecha y hora.
  - Fecha: El usuario debe de introducir la fecha para la cual quiere simular el espectro solar.
  - Hora y minutos: Se debe de introducir la hora UTC (Tiempo universal coordinado) correspondiente a la zona horaria a la que pertenece la localización de interés. Por ejemplo, para el caso de España, en el horario de verano se encuentra en la zona UTC+2 debido a ello el usuario debe de introducir la hora real que le correspondería a España, es decir UTC+0 (resta dos horas al tiempo que marca su reloj). Por otro lado, en el horario de invierno España se encuentra en la zona UTC+1, por ello en este caso el usuario cuando introduce la hora en la aplicación debe de restar una hora al tiempo que indica su reloj para pasar dicha hora a la zona UTC+0.
- Segundo bloque: Localización:
  - Latitud del lugar en grados: El valor introducido es positivo para el hemisferio norte y negativo para el hemisferio sur.
  - Longitud del lugar en grados: Se introducen valores positivos para el hemisferio oriental y negativos para el hemisferio occidental.
  - Tipo de zona: el usuario debe elegir el tipo de zona en la que quiere realizar el estudio:

### E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

- Zona rural
- Zona urbana
- Zona marinera
- Zona minera
- Tercer bloque: Efectos atmosféricos.
  - Profundidad óptica de los aerosoles: Dicho parámetro permite al usuario simular el efecto de las nubes, humo, contaminación, polvo en suspensión... El valor que debe introducirse para unas condiciones de cielo despejado debe de ser menor que 0.55. En el caso de que el valor introducido sea superior a ese valor quiere decir que el cielo no está despejado y conforme mayor sea el valor introducido la aplicación interpreta que el cielo está más cubierto.
  - Vapor de agua precipitable: Segundo de los elementos de entrada que permite cuantificar el efecto del cielo cubierto, humedad... Suele tomar valores entre 0.3 y 6 cm.
- Cuarto bloque: Características de la superficie.
  - Inclinación de la superficie (°): El usuario debe de introducir el grado de inclinación en grados de la superficie de estudio con respecto a la horizontal. En el caso de que la superficie cuente con dispositivos de seguimiento solar el valor introducido debe ser negativo.
  - Azimut de una superficie de inclinación fija(°): Se introduce el valor en función de la orientación de la superficie de estudio (Orientación sur:  $Azim=180^\circ$ , Orientación este:  $Azim=90^\circ \dots$ ).
  - Albedo: Se debe de indicar el albedo de los alrededores de la superficie de estudio, es decir, si se quiere obtener el espectro solar de unos paneles que están rodeados por campos de suelo seco el albedo vale 0.2. Utilizado para simular el efecto del cielo nublado y la componente difusa de la radiación
- Presión/Altura: Ambas opciones acaban dando el mismo resultado, pero permiten que el usuario pueda elegir la forma de cuantificar la altitud a la que se encuentre. Es decir, si el usuario no conoce la presión porque no cuenta con un barómetro y está en una zona rural sin conectividad a internet, puede introducir la altura a la que se encuentra y la temperatura para que la aplicación calcule la presión. La presión debe introducirse en milibares, la altura en metros y la temperatura en grados centígrados. En la figura A1.2 se puede observar la pantalla de entrada de datos si el usuario escoge la opción de la altura.

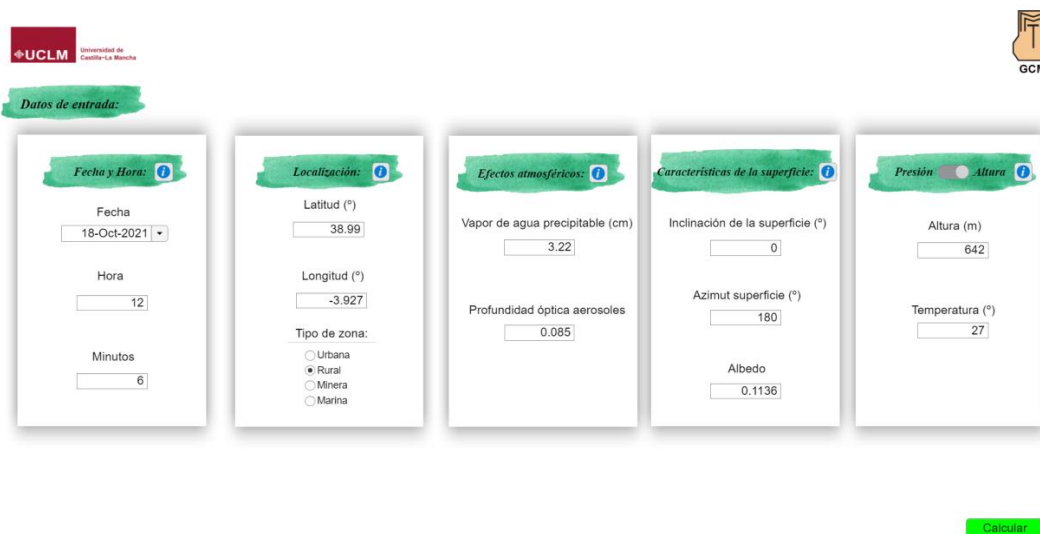


Figura A1. 2. Pantalla de entrada de datos para la opción de introducir la altura.



### E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

Además, cada bloque cuenta con un botón de información que el usuario puede pulsar para obtener una breve descripción y orientación de cada elemento de entrada del bloque. En la figura A1.3, figura A1.4, figura A1.5, figura A1.6, figura A1.7 se muestra lo que aparece al pulsar cada uno de los botones de información.

#### Datos de entrada fecha y hora:

Se debe de introducir la hora UTC (Tiempo universal coordinado) correspondiente a la zona horaria a la que pertenece la localización de interés. Por ejemplo, para el caso de España, en el horario de verano se encuentra en la zona UTC+2 debido a ello el usuario debe de introducir la hora real que le correspondería a España, es decir UTC+0 (resta dos horas al tiempo que marca su reloj). Por otro lado, en el horario de invierno España se encuentra en la zona UTC+1, por ello en este caso el usuario cuando introduce la hora en la aplicación debe de restar una hora al tiempo que indica su reloj para pasar dicha hora a la zona UTC+0.

Figura A1. 3. Información mostrada al usuario al presionar el botón info del bloque Fecha y Hora.

#### Datos de entrada localización:

Se debe introducir la latitud y la longitud del lugar de estudio teniendo en cuenta:

- **Latitud (LAT) (°):** Se introduce un valor positivo para el hemisferio norte y valor negativo para el hemisferio sur.
- **Longitud (LONG) (°):** Valor positivo para el este y valor negativo para el oeste.

**Tipo de zona:** La elección de una zona u otra determina el exponente de Angstrom (AE) que se considera en la aplicación.

- **Zona rural (AE=1.14).**
- **Zona urbana (AE=2).**
- **Zona marinera (AE=0.35).**
- **Zona minera (AE=0.2)**

Figura A1. 4. Información mostrada al usuario al presionar el botón info del bloque Localización.

## E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

### Datos de entrada efectos atmosféricos:

- **Profundidad óptica aerosoles (Laer)(AOD):**
  - Para cielos despejados  $\epsilon$  (0.01,0.55).
  - Valor de AOD altos para días nublados, presencia de humo y gran concentración de partículas.
- **Vapor de agua precipitable (cm):** Espesor de la columna de agua (con una sección de 1 cm<sup>2</sup>) formada por la condensación de vapor de agua en una columna vertical que va desde el suelo hasta la parte superior de la atmósfera (Unidades: cm o g/cm<sup>2</sup>). Suele tomar valores entre 0.3 y 6 cm.

Figura A1. 5. Información mostrada al usuario al presionar el botón info del bloque Efectos atmosféricos.

### Características de la superficie de interes:

- **Inclinación de la superficie:** Se debe introducir un número menor que cero en el caso de que la superficie cuente con dispositivos de seguimiento solar.
- **Azimut de una superficie de inclinación fija:** Azim (°) (Sur=180, este=90...)
- **Albedo (Reflectancia superficial):** No afecta a la radiación directa. Se emplea para simular la componente difusa de la radiación.

Figura A1. 6. Información mostrada al usuario al presionar el botón info del bloque Características de la superficie.

### ▪ Opción Presión:

**Presión (mbar):** Tiene en cuenta la altitud a la que nos encontramos. Debe introducirse en mbar.

### ▪ Opción Altura:

**Altura (m):** Otra alternativa en el caso de que no se tenga la presión. Debe de introducirse en metros.

**Temperatura (°C):** necesaria para poder calcular la presión a través de la altitud.

Figura A1. 7. Información mostrada al usuario al presionar el botón info del bloque Presión/Altura.

Una vez que el usuario introduce los datos para los cuales quiere simular el espectro solar debe pulsar el botón 'Calcular' para que la aplicación haga todos los cálculos necesarios y muestre los resultados en la siguiente pantalla.

E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

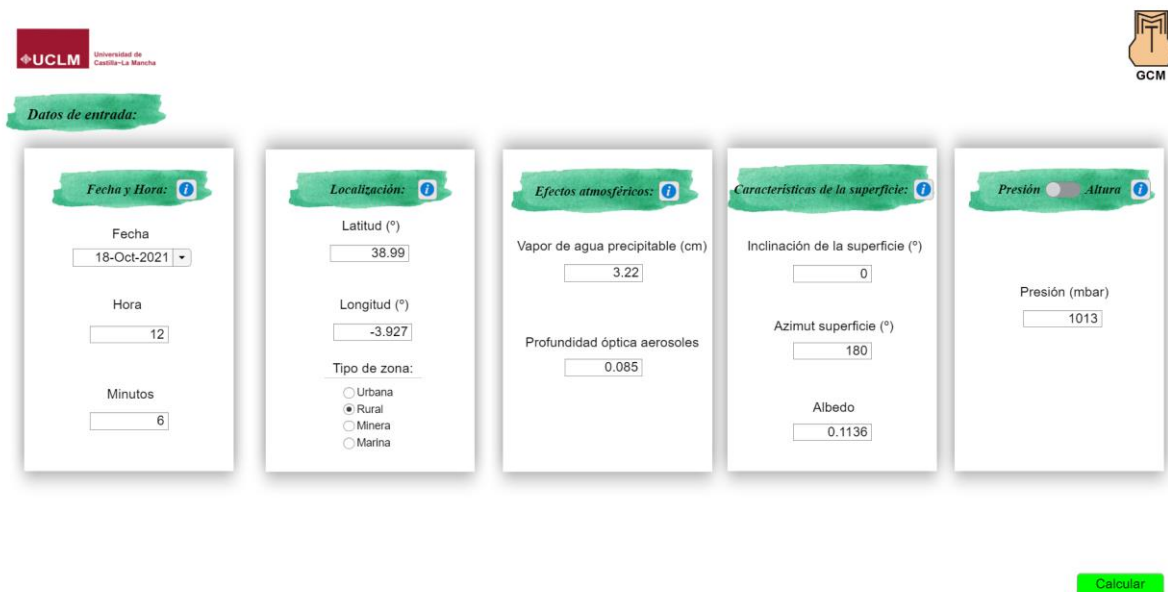
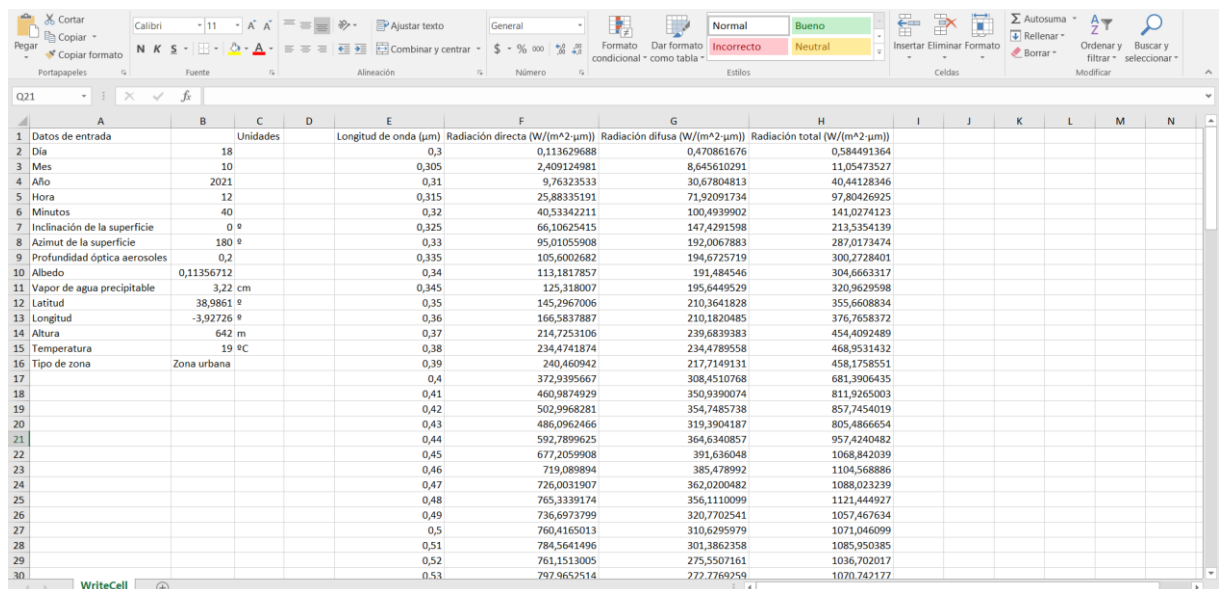


Figura A1. 8. Pantalla de entrada de datos para lo opción de la presión de la aplicación.

Una que se ha ejecutado la opción de calcular la aplicación muestra la pantalla de resultados (Figura A1.10). En ella, el usuario puede hacer lo siguiente:

- Visualizar los datos que se han obtenido de manera gráfica y además al pulsar sobre la gráfica el usuario puede conocer de manera más exacta datos determinados.
- Guardar los resultados obtenidos: Pulsando el botón ‘Guardar resultados’ el usuario puede guardar los datos de entrada y los datos que se han obtenido en un archivo Excel (Figura A1.9)



|    | A                            | B           | C        | D | E                     | F                             | G                            | H                           | I | J | K | L | M | N |
|----|------------------------------|-------------|----------|---|-----------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------|---|---|---|---|---|---|
| 1  | Datos de entrada             |             | Unidades |   | Longitud de onda (µm) | Radiación directa (W/(m²·µm)) | Radiación difusa (W/(m²·µm)) | Radiación total (W/(m²·µm)) |   |   |   |   |   |   |
| 2  | Día                          | 18          |          |   | 0,3                   | 0,113629688                   | 0,470861676                  | 0,584491364                 |   |   |   |   |   |   |
| 3  | Mes                          | 10          |          |   | 0,305                 | 2,409124981                   | 8,645610291                  | 11,05473527                 |   |   |   |   |   |   |
| 4  | Año                          | 2021        |          |   | 0,31                  | 9,76323533                    | 30,67804813                  | 40,44128346                 |   |   |   |   |   |   |
| 5  | Hora                         | 12          |          |   | 0,315                 | 25,8835191                    | 71,92091734                  | 97,80426925                 |   |   |   |   |   |   |
| 6  | Minutos                      | 40          |          |   | 0,32                  | 40,53342211                   | 100,4939902                  | 141,0274123                 |   |   |   |   |   |   |
| 7  | Inclinación de la superficie | 0 °         |          |   | 0,325                 | 66,10625415                   | 147,4291598                  | 213,5354139                 |   |   |   |   |   |   |
| 8  | Azimut de la superficie      | 180 °       |          |   | 0,33                  | 95,0105908                    | 192,0067883                  | 287,0173474                 |   |   |   |   |   |   |
| 9  | Profundidad óptica aerosoles | 0,2         |          |   | 0,335                 | 105,6002682                   | 194,6725719                  | 300,2728401                 |   |   |   |   |   |   |
| 10 | Albedo                       | 0,11356712  |          |   | 0,34                  | 113,1817857                   | 191,484546                   | 304,6663317                 |   |   |   |   |   |   |
| 11 | Vapor de agua precipitable   | 3,22 cm     |          |   | 0,345                 | 125,318007                    | 195,6449529                  | 320,9629598                 |   |   |   |   |   |   |
| 12 | Latitud                      | 38,9861 °   |          |   | 0,35                  | 145,2967006                   | 210,3641828                  | 355,6608834                 |   |   |   |   |   |   |
| 13 | Longitud                     | -3,92726 °  |          |   | 0,36                  | 166,5837887                   | 210,1820485                  | 376,7658372                 |   |   |   |   |   |   |
| 14 | Altura                       | 642 m       |          |   | 0,37                  | 214,7253106                   | 239,6839383                  | 454,4092489                 |   |   |   |   |   |   |
| 15 | Temperatura                  | 19 °C       |          |   | 0,38                  | 234,4741874                   | 234,4789558                  | 468,9531432                 |   |   |   |   |   |   |
| 16 | Tipo de zona                 | Zona urbana |          |   | 0,39                  | 240,460942                    | 217,7149131                  | 458,1758551                 |   |   |   |   |   |   |
| 17 |                              |             |          |   | 0,4                   | 372,9369667                   | 308,4510768                  | 681,3906435                 |   |   |   |   |   |   |
| 18 |                              |             |          |   | 0,41                  | 460,9874929                   | 350,9390074                  | 811,9265003                 |   |   |   |   |   |   |
| 19 |                              |             |          |   | 0,42                  | 502,9968281                   | 354,7485738                  | 857,7454019                 |   |   |   |   |   |   |
| 20 |                              |             |          |   | 0,43                  | 486,0962466                   | 319,3904187                  | 805,4866654                 |   |   |   |   |   |   |
| 21 |                              |             |          |   | 0,44                  | 592,7899625                   | 364,6340857                  | 957,4240482                 |   |   |   |   |   |   |
| 22 |                              |             |          |   | 0,45                  | 677,2059908                   | 391,636048                   | 1068,842039                 |   |   |   |   |   |   |
| 23 |                              |             |          |   | 0,46                  | 719,089894                    | 385,478992                   | 1104,568886                 |   |   |   |   |   |   |
| 24 |                              |             |          |   | 0,47                  | 726,0031907                   | 362,0200482                  | 1088,023239                 |   |   |   |   |   |   |
| 25 |                              |             |          |   | 0,48                  | 765,3339174                   | 356,1110099                  | 1121,444927                 |   |   |   |   |   |   |
| 26 |                              |             |          |   | 0,49                  | 736,6973799                   | 320,7702541                  | 1057,467634                 |   |   |   |   |   |   |
| 27 |                              |             |          |   | 0,5                   | 760,4165013                   | 310,6295979                  | 1071,046099                 |   |   |   |   |   |   |
| 28 |                              |             |          |   | 0,51                  | 784,5641496                   | 301,3862358                  | 1085,950385                 |   |   |   |   |   |   |
| 29 |                              |             |          |   | 0,52                  | 761,1513005                   | 275,5507161                  | 1036,702017                 |   |   |   |   |   |   |
| 30 |                              |             |          |   | 0,53                  | 797,9652514                   | 272,7769259                  | 1070,742177                 |   |   |   |   |   |   |

Figura A1. 9. Plantilla Excel con datos del espectro solar generados y guardados desde la aplicación.

E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

- Volver atrás: Pulsando el botón ‘Atrás’ el usuario puede volver a la pantalla de entrada de datos y cambiar cualquiera de las entradas para volver a calcular el espectro solar.



Atrás

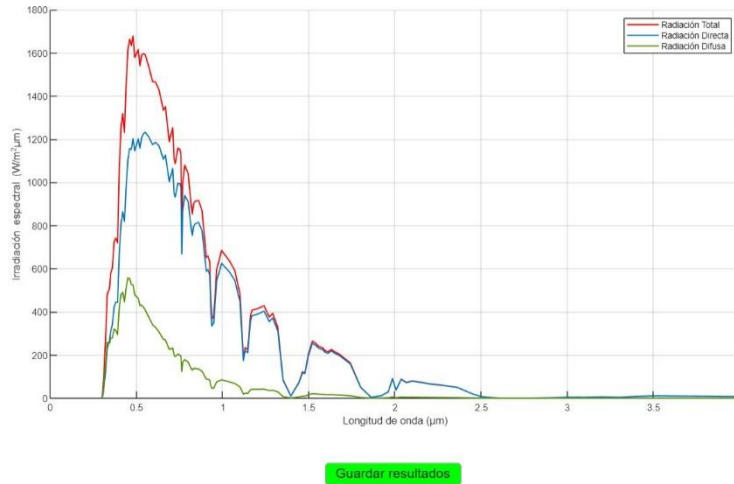


Figura A1. 10. Pantalla de resultados de la aplicación.

## A2. CÓDIGO DE LA APLICACIÓN

```
classdef Aplicacion_Solar_GCM < matlab.apps.AppBase

% Properties that correspond to app components
properties (Access = public)
    UIFigure matlab.ui.Figure
    Image10 matlab.ui.control.Image
    Image3_4 matlab.ui.control.Image
    Image3_9 matlab.ui.control.Image
    Image3_8 matlab.ui.control.Image
    Image3_7 matlab.ui.control.Image
    Image3_6 matlab.ui.control.Image
    Image7_6 matlab.ui.control.Image
    Image7_5 matlab.ui.control.Image
    Image7_4 matlab.ui.control.Image
    Image7_3 matlab.ui.control.Image
    Image7_2 matlab.ui.control.Image
    Image7 matlab.ui.control.Image
    InclinacindelasuperficieEditField_2Label matlab.ui.control.Label
    InclinacindelasuperficieEditField matlab.ui.control.NumericEditField
    DatosdeentradaLabel matlab.ui.control.Label
    AzimutsuperficieLabel matlab.ui.control.Label
    AzimutsuperficieEditField matlab.ui.control.NumericEditField
    ProfundidadpticaaerosolesEditFieldLabel matlab.ui.control.Label
    ProfundidadpticaaerosolesEditField matlab.ui.control.NumericEditField
    AlbedoEditFieldLabel matlab.ui.control.Label
    AlbedoEditField matlab.ui.control.NumericEditField
    VapordeaguaprecipitablecmEditFieldLabel matlab.ui.control.Label
    VapordeaguaprecipitablecmEditField matlab.ui.control.NumericEditField
    LatitudLabel matlab.ui.control.Label
    LatitudEditField matlab.ui.control.NumericEditField
    LongitudLabel matlab.ui.control.Label
    LongitudEditField matlab.ui.control.NumericEditField
    Switch matlab.ui.control.Switch
    PresinmbarLabel matlab.ui.control.Label
    PresionEditField matlab.ui.control.NumericEditField
    AlturamEditFieldLabel matlab.ui.control.Label
    AlturamEditField matlab.ui.control.NumericEditField
    Calcular matlab.ui.control.Button
    comenzar matlab.ui.control.Button
    Atras matlab.ui.control.Button
    Trabajofindegrado matlab.ui.control.Label
    Tutores matlab.ui.control.Label
    Autor matlab.ui.control.Label
    TemperaturaEditFieldLabel matlab.ui.control.Label
    TemperaturaEditField matlab.ui.control.NumericEditField
    Guardar matlab.ui.control.Button
    Image matlab.ui.control.Image
end
```

E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

```
Image2 matlab.ui.control.Image
Titulo matlab.ui.control.Label
MinutosEditFieldLabel matlab.ui.control.Label
MinutosEditField matlab.ui.control.NumericEditField
HoraEditFieldLabel matlab.ui.control.Label
HoraEditField matlab.ui.control.NumericEditField
FechaLabel matlab.ui.control.Label
Fecha matlab.ui.control.DatePicker
FechayHoraLabel matlab.ui.control.Label
LocalizacinLabel matlab.ui.control.Label
EfectosatmosfricosLabel matlab.ui.control.Label
CaractersticasdelaSuperficieLabel matlab.ui.control.Label
Informacion2 matlab.ui.control.Button
Informacion3 matlab.ui.control.Button
Informacion4 matlab.ui.control.Button
Informacion5 matlab.ui.control.Button
Informacion matlab.ui.control.Button
TipodezonaButtonGroup matlab.ui.container.ButtonGroup
UrbanaButton matlab.ui.control.RadioButton
RuralButton matlab.ui.control.RadioButton
MineraButton matlab.ui.control.RadioButton
MarinaButton matlab.ui.control.RadioButton
SolarGCMLabel matlab.ui.control.Label
UIAxes matlab.ui.control.UIAxes
end
```

```
properties (Access = public)
Long_ond % Longitud de onda
Directa %Radiación directa
Difusa %Radiación difusa
R_total %Radiación total
alp
end
```

```
% Callbacks that handle component events
methods (Access = private)
```

```
% Value changed function: Switch
function SwitchValueChanged(app, event)
%Elección Presión/Altura-Temperatura
value = app.Switch.Value;
p1='Presión';
tf = strcmp(value,p1);
if(tf==1)
app.PresionEditField.Visible='on';
app.AlturamEditField.Visible='off';
app.AlturamEditFieldLabel.Visible='off';
```

E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

```

app.PresinmbarLabel.Visible='on';
app.TemperaturaEditField.Visible='off';
app.TemperaturaEditFieldLabel.Visible='off';
else
app.PresionEditField.Visible='off';
app.PresinmbarLabel.Visible='off';
app.AlturamEditField.Visible='on';
app.AlturamEditFieldLabel.Visible='on';
app.TemperaturaEditField.Visible='on';
app.TemperaturaEditFieldLabel.Visible='on';
end
end

% Button pushed function: Calcular
function CalcularButtonPushed(app, event)
h = waitbar(0, 'Cargando...');
value = app.Switch.Value;
p1= 'Presión';
tf = strcmp(value,p1);
if(tf==1)
Presion=app.PresionEditField.Value;
else
Altura=app.AlturamEditField.Value;
Temperatura=app.TemperaturaEditField.Value;
K=(Temperatura+55)/(Altura-11000);
Temperatura_nm=Temperatura+K*Altura;
Presion=1013.25*(((Temperatura_nm+273)+((-55-
Temperatura_nm)/11000)*Altura)/(Temperatura_nm+273))^((-9.81/287)*(11000/(-55-
Temperatura_nm)));
end
Fech=app.Fecha.Value;
alo=year(Fech);
mes=month(Fech);
dias=day(Fech);
Nday=0;
%Se estudia si el año es bisiesto:
if(mod(alo,4)==0 && mod(alo,100)==0 && mod(alo,400)==0 || mod(alo,4)==0 &&
mod(alo,100)~=0)
%El año es bisiesto
for i=1:mes-1
if(i==1 || i==3 || i==5 || i==7 || i==8 || i== 10 || i==12)
Nday=Nday+31;
end
if(i==2)
Nday=Nday+29;
end
if(i==4 || i==6 || i== 9 || i==11)
Nday=Nday+30;
end
end

```

E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

```

end
Nday=Nday+dias;
else
%Año no bisiesto
for i=1:mes-1
if(i==1 || i==3 || i==5 || i==7 || i==8 || i== 10 || i==12)
Nday=Nday+31;
end
if(i==2)
Nday=Nday+28;
end
if(i==4 || i==6 || i== 9 || i==11)
Nday=Nday+30;
end
end
Nday=Nday+dias;
end
Incl_superficie=app.InclinacindelassuperficieEditField.Value;
Hora=app.HoraEditField.Value;
Minutos=app.MinutosEditField.Value;
Azim=app.AzimutsuperficieEditField.Value;
AOD=app.ProfundidadpticaaerosolesEditField.Value;
Alpha=app.alp;
Albedo=app.AlbedoEditField.Value;
Precip_H2O=app.VapordeaguaprecipitablecmEditField.Value;
LAT=app.LatitudEditField.Value;
LONG=app.LongitudEditField.Value;
waitbar(0.1)
%-----Datos de salida-----%
%-----%
%Ozono (O3):
%Para el hemisferio norte:
if(LAT>0)
if(LONG>0 || LONG==0)
O3=0.001*(235+(150+40*sind(0.017218*(Nday-
30))+20*sind(0.05256*(LONG+20))*(sind(0.02234*LAT))^2));
else
O3=0.001*(235+(150+40*sind(0.017218*Nday-
30))+20*sind(0.017218*(Nday))*(sind(0.02234*LAT))^2);
end
end
if(LAT<0 || LAT==0)
O3=0.001*(235+(100+30*sind(0.017218*(Nday+152.625))+20*sind(0.03491*(LONG-
75))*(sind(0.02618*LAT))^2));
end
end
%Declinacion:
x=(180/pi)*((2*pi/365)*(Nday-1));
Declinacion=(0.006918-0.399912*cosd(x)+0.070257*sind(x)-
0.006758*cosd(2*x)+0.000907*sind(2*x)-
0.002697*cosd(3*x)+0.00148*sind(3*x))*(180/pi);

```



E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

```

%Eqtime:
Eqtime=229.18*(0.000075+0.001868*cosd(x)-0.032077*sind(x)-0.014615*cosd(2*x)-
0.040849*sind(2*x));
%Radvec de corrección para la distancia tierra-sol:
Radvec=1.00011+0.03421*cosd(x)+0.00128*sind(x)+0.000719*cosd(2*x)+0.000077*sind(2*x);
%Ángulo horario:
Ang_horario=(15*(Hora+Minutos/60+Eqtime/60+((floor(LONG/15)*15-LONG)*4)/60+12)-360);
%Ángulo cenital en grados(z):
Ang_cenital=acosd(cosd(Declinacion)*cosd(LAT)*cosd((Ang_horario))+sind(Declinacion)*sind(LAT));
%Acimut_solar:
Acimut_solar1=acosd((cosd(LAT)*sind(Declinacion)-cosd(Ang_horario)*sind(LAT)*cosd(Declinacion))/(cosd(90-Ang_cenital)));
if(Ang_horario<0)
Acimut_solar=Acimut_solar1;
else
Acimut_solar=Acimut_solar1;
end
%Ózono efectivo en AM:
AMOZ=(1+22/6370)/((cosd(Ang_cenital)^2+2*(22/6370))^(0.5));
%Pendiente:
if(Incl_superficie<0)
Pendiente=Ang_cenital;
else
Pendiente=Incl_superficie;
end
%Surf Azim:
if(Incl_superficie>0||Incl_superficie==0)
Acimut_superficie=(Azim-180);
else
Acimut_superficie=(Acimut_solar);
end
%AOI:
if (Incl_superficie<0)
AOI=0;
else
AOI=acosd(sind(Declinacion)*sind(LAT)*cosd(Pendiente)-sind(Declinacion)*cosd(LAT)*sind(Pendiente)*cosd(Acimut_superficie)+cosd(Declinacion)*cosd(LAT)*cosd(Pendiente)*cos(Ang_horario_rad*(pi/180))+cosd(Declinacion)*sind(LAT)*sind(Pendiente)*cosd(Acimut_superficie)*cos(Ang_horario_rad*(pi/180))+cosd(Declinacion)*sind(Pendiente)*sind(Acimut_superficie)*sin(Ang_horario_rad*(pi/180)));
end
%ASYM:
ASYM=0.65;
%Omeg:
Omeg=0.945;

```

E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

```

%OmegP:
OmegP=0.095;
%Indice AM:
AM=(1)/(cosd(Ang_cenital)+0.15*(93.885-Ang_cenital)^(-1.253));
%Indice AMP:
AMP=AM*(Presion)/(1013);
%-----
alg=log(1-ASYM);
afs=alg*(1.459+alg*(0.1591+alg*0.4129));
bfs=alg*(0.0783+alg*(-0.3824-alg*0.5874));
FSP=1-0.5*exp(((afs+bfs/1.8))/(1.8));
%-----
waitbar(0.3);
%-----
%Datos fijos del modelo:
%Longitud de onda en micrómetros:
um=xlsread('Datosfijosmodelo','A2:A123');
%ETR:Radiación solar en la parte externa de la atmósfera:
ETR=xlsread('Datosfijosmodelo','B2:B123');
%Coeficiente de absorción de vapor de agua:
Water_abs=xlsread('Datosfijosmodelo','C2:C123');
%Coeficiente de absorción de Ozono:
O3_abs=xlsread('Datosfijosmodelo','D2:D123');
%Coeficiente de absorción de gases uniformemente mezclados:
Uni_abs=xlsread('Datosfijosmodelo','E2:E123');
%-----
%-----Datos para la computación-----
OMEGL=zeros(1,length(um));
TR=zeros(1,length(um));
TOZ=zeros(1,length(um));
TUGA=zeros(1,length(um));
TH20=zeros(1,length(um));
DELA=zeros(1,length(um));
TA=zeros(1,length(um));
taa=zeros(1,length(um));
tas=zeros(1,length(um));
dray=zeros(1,length(um));
daer=zeros(1,length(um));
trp=zeros(1,length(um));
twp=zeros(1,length(um));
tup=zeros(1,length(um));
tasp=zeros(1,length(um));
taap=zeros(1,length(um));
rhoa=zeros(1,length(um));
Direct=zeros(1,length(um));
drgd=zeros(1,length(um));
Hz_dif=zeros(1,length(um));
ref=zeros(1,length(um));
difsc=zeros(1,length(um));
difsi=zeros(1,length(um));

```

E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

```

Diffuse=zeros(1,length(um));
Total=zeros(1,length(um));
waitbar(0.5)
for i=1:length(um)
OMEGL(i)=Omeg*exp(-OmegP*(log(um(i)/0.4))^2);
%Transmisión Rayleigh en función de la longitud de onda:
TR(i)=exp(-AMP/((um(i))^4*(115.6406-(1.335/(um(i)^2)))));
%Trnsmisión de Ozono en función de la longitud de onda:
TOZ(i)=exp(-O3_abs(i)*AMOZ*O3);
%Transmisión de gases uniformemente mezclados en función de la longitud de
%onda:
TUGA(i)=exp((-1.41*Uni_abs(i)*AMP)/((1+118.93*Uni_abs(i)*AMP)^0.45));
%Transmisión de vapor de agua en función de la longitud de onda:
TH20(i)=exp((0.2385*Water_abs(i)*Precip_H20*AM)/((1+20.07*Water_abs(i)*Precip0
*AM)^0.45);
%DELA:
DELA(i)=AOD*((um(i)/0.5)^(-Alpha));
%Transimsión aerosoles en función de la longitud de onda:
TA(i)=exp(-DELA(i)*AM);
%taa:
taa(i)=exp(-(1-OMEGL(i))*DELA(i)*AM);
%tas:
tas(i)=exp(-OMEGL(i)*DELA(i)*AM);
%dray:
dray(i)=ETR(i)*cosd(Ang_cenital)*TOZ(i)*TH20(i)*TUGA(i)*taa(i)*(1-
TR(i)^0.95)*0.5*Radvec;
%daer:
daer(i)=ETR(i)*cosd(Ang_cenital)*TOZ(i)*TH20(i)*TUGA(i)*taa(i)*(TR(i)^1.5)*(1-
tas(i))*(1-0.5*exp((afs+bfs*cosd(Ang_cenital))*cosd(Ang_cenital)))*Radvec;
%trp:
trp(i)=exp((-1.8)/((um(i)^4)*(115.6406-((1.335)/(um(i)^2)))));
%twp:
twp(i)=exp((-
0.2385*Water_abs(i)*Precip_H20*1.8)/((1+20.07*Water_abs(i)*Precip_H20*1.8)^0.4
5));
%tup:
tup(i)=exp((-1.41*Uni_abs(i)*1.8)/((1+118.93*Uni_abs(i)*1.8)^0.45));
%tasp:
tasp(i)=exp(-OMEGL(i)*DELA(i)*1.8);
%taap:
taap(i)=exp(-(1-OMEGL(i))*DELA(i)*1.8);
%rhoa:
rhoa(i)=tup(i)*twp(i)*taap(i)*(0.5*(1-trp(i))+(1-FSP)*trp(i)*(1-tasp(i)));
%-----
---
%-----Resultados-----
---
%Radiación directa:
Direct(i)=ETR(i)*Radvec*TR(i)*TOZ(i)*TUGA(i)*TH20(i)*TA(i)*cosd(AOI);

```

E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

```

%drgd:
drgd(i)=(((Direct(i)*cosd(Ang_cenital)+(dray(i)+daer(i)))*Albedo*rhoa(i))/(1-
Albedo*rhoa(i)));
%Hz Dif:
if(um(i)<0.45||um(i)==0.45)
Hz_dif(i)=(dray(i)+daer(i)+drgd(i))*((um(i)+0.55)^1.8);
else
Hz_dif(i)=(dray(i)+daer(i)+drgd(i));
end
%ref:
ref(i)=((Direct(i)*cosd(Ang_cenital)+Hz_dif(i))*Albedo*(1-
cosd(Pendiente)))/(2);
%difsc:
difsc(i)=(Hz_dif(i)*(Direct(i)/ETR(i))*cosd(AOI))/(cosd(Ang_cenital));
%difsi:
difsi(i)=0.5*Hz_dif(i)*(1-(Direct(i)/ETR(i)))*(1+cosd(Pendiente));
%Radiación difusa:
Diffuse(i)=ref(i)+difsc(i)+difsi(i);
%Total:
Total(i)=Direct(i)+Diffuse(i);
end
waitbar(0.8)
%Se actua sobre cada elemento del panel frontal:
app.Calcular.Visible='on';
app.Switch.Visible='off';
app.PresionEditField.Visible='off';
app.PresinmbarLabel.Visible='off';
app.LongitudEditField.Visible='off';
app.LongitudLabel.Visible='off';
app.LatitudEditField.Visible='off';
app.LatitudLabel.Visible='off';
app.VapordeaguaprecipitablecmEditField.Visible='off';
app.VapordeaguaprecipitablecmEditFieldLabel.Visible='off';
app.AlbedoEditField.Visible='off';
app.AlbedoEditFieldLabel.Visible='off';
app.ProfundidadpticaaerosolesEditField.Visible='off';
app.ProfundidadpticaaerosolesEditFieldLabel.Visible='off';
app.AzimutsuperficieEditField.Visible='off';
app.AzimutsuperficieLabel.Visible='off';
app.MinutosEditField.Visible='off';
app.MinutosEditFieldLabel.Visible='off';
app.HoraEditField.Visible='off';
app.HoraEditFieldLabel.Visible='off';
app.DatosdeentradaLabel.Visible='off';
app.InclinacindelasuperficieEditField.Visible='off';
app.InclinacindelasuperficieEditField_2Label.Visible='off';
app.UIAxes.Visible='on';
app.Calcular.Visible='off';
app.AlturamEditField.Visible='off';
app.AlturamEditFieldLabel.Visible='off';

```

E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

```

app.TemperaturaEditField.Visible='off';
app.TemperaturaEditFieldLabel.Visible='off';
app.Fecha.Visible='off';
app.FechaLabel.Visible='off';
app.Informacion.Visible='off';
app.Informacion2.Visible='off';
app.Informacion3.Visible='off';
app.Informacion4.Visible='off';
app.Informacion5.Visible='off';
app.CaractersticasdelaSuperficieLabel.Visible='off';
app.EfectosAtmosfericosLabel.Visible='off';
app.LocalizacionLabel.Visible='off';
app.FechaYHoraLabel.Visible='off';
app.Atras.Visible='on';
app.Guardar.Visible='on';
app.comenzar.Visible='off';
app.Image7.Visible='off';
app.Image7_2.Visible='off';
app.Image7_3.Visible='off';
app.Image7_4.Visible='off';
app.Image7_5.Visible='off';
app.Image7_6.Visible='off';
app.Image3_4.Visible='off';
app.Image3_6.Visible='off';
app.Image3_7.Visible='off';
app.Image3_8.Visible='off';
app.Image3_9.Visible='off';
app.TipoDeZonaButtonGroup.Visible='off';
%Se representan los resultados y se muestra el botón 'Atrás':
plot(app.UIAxes,um,Total,um,Direct,um,Diffuse,'Linewidth',1.2)
legend(app.UIAxes,'Radiación Total','Radiación Directa','Radiación Difusa')
app.Atras.Visible='on';
%Se almacenan datos en variables para su posterior utilización:
app.Long_ond=um;
app.Directa=Direct.';
app.Difusa=Diffuse.';
app.R_total=Total.';
waitbar(1)
close(h)
end

% Button pushed function: comenzar
function comenzarButtonPushed(app, event)
%Se actúa sobre cada elemento del panel frontal:
app.Calcular.Visible='on';
app.Switch.Visible='on';
app.LongitudEditField.Visible='on';
app.LongitudLabel.Visible='on';
app.LatitudEditField.Visible='on';

```

E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

```
app.LatitudLabel.Visible='on';
app.VapordeaguaprecipitablecmEditField.Visible='on';
app.VapordeaguaprecipitablecmEditFieldLabel.Visible='on';
app.AlbedoEditField.Visible='on';
app.AlbedoEditFieldLabel.Visible='on';
app.ProfundidadpticaaerosolesEditField.Visible='on';
app.ProfundidadpticaaerosolesEditFieldLabel.Visible='on';
app.AzimutsuperficieEditField.Visible='on';
app.AzimutsuperficieLabel.Visible='on';
app.MinutosEditField.Visible='on';
app.MinutosEditFieldLabel.Visible='on';
app.HoraEditField.Visible='on';
app.HoraEditFieldLabel.Visible='on';
app.DatosdeentradaLabel.Visible='on';
app.InclinacindelasuperficieEditField.Visible='on';
app.InclinacindelasuperficieEditField_2Label.Visible='on';
app.comenzar.Visible='on';
app.Fecha.Visible='on';
app.FechaLabel.Visible='on';
app.Informacion.Visible='on';
app.Informacion2.Visible='on';
app.Informacion3.Visible='on';
app.Informacion4.Visible='on';
app.Informacion5.Visible='on';
app.CaractersticadelasuperficieLabel.Visible='on';
app.EfectosatmosfricosLabel.Visible='on';
app.LocalizacinLabel.Visible='on';
app.FechayHoraLabel.Visible='on';
app.TipodezonaButtonGroup.Visible='on';
app.Trabajofindegrado.Visible='off';
app.Tutores.Visible='off';
app.Autor.Visible='off';
app.comenzar.Visible='off';
app.Guardar.Visible='off';
app.Titulo.Visible='off';
app.SolarGCMLLabel.Visible='off';
app.Image7.Visible='on';
app.Image7_2.Visible='on';
app.Image7_3.Visible='on';
app.Image7_4.Visible='on';
app.Image7_5.Visible='on';
app.Image7_6.Visible='on';
app.Image3_4.Visible='on';
app.Image3_6.Visible='on';
app.Image3_7.Visible='on';
app.Image3_8.Visible='on';
app.Image3_9.Visible='on';
app.Image10.Visible='off';
app.alp=1.14;
valt1=strlength(app.Switch.Value);
```

E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

```
if(valt1==7)
app.AlturamEditField.Visible='off';
app.AlturamEditFieldLabel.Visible='off';
app.PresionEditField.Visible='on';
app.PresinmbarLabel.Visible='on';
app.TemperaturaEditField.Visible='off';
app.TemperaturaEditFieldLabel.Visible='off';
else
app.AlturamEditField.Visible='on';
app.AlturamEditFieldLabel.Visible='on';
app.PresionEditField.Visible='off';
app.PresinmbarLabel.Visible='off';
app.TemperaturaEditField.Visible='on';
app.TemperaturaEditFieldLabel.Visible='on';
end
end

% Button pushed function: Atras
function AtrasButtonPushed(app, event)
%Se actua sobre cada elemento del panel frontal:
app.Calcular.Visible='on';
app.Switch.Visible='on';
app.LongitudEditField.Visible='on';
app.LongitudLabel.Visible='on';
app.LatitudEditField.Visible='on';
app.LatitudLabel.Visible='on';
app.VapordeaguaprecipitablecmEditField.Visible='on';
app.VapordeaguaprecipitablecmEditFieldLabel.Visible='on';
app.AlbedoEditField.Visible='on';
app.AlbedoEditFieldLabel.Visible='on';
app.ProfundidadpticaaerosolesEditField.Visible='on';
app.ProfundidadpticaaerosolesEditFieldLabel.Visible='on';
app.AzimutsuperficieEditField.Visible='on';
app.AzimutsuperficieLabel.Visible='on';
app.MinutosEditField.Visible='on';
app.MinutosEditFieldLabel.Visible='on';
app.HoraEditField.Visible='on';
app.HoraEditFieldLabel.Visible='on';
app.DatosdeentradaLabel.Visible='on';
app.InclinacindelasuperficieEditField.Visible='on';
app.InclinacindelasuperficieEditField_2Label.Visible='on';
app.Fecha.Visible='on';
app.FechaLabel.Visible='on';
app.Informacion.Visible='on';
app.Informacion2.Visible='on';
app.Informacion3.Visible='on';
app.Informacion4.Visible='on';
app.Informacion5.Visible='on';
app.CaractersticasdelauperficieLabel.Visible='on';
```

E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

```
app.EfectosatmosfricosLabel.Visible='on';
app.LocalizacinLabel.Visible='on';
app.FechayHoraLabel.Visible='on';
app.TipodezonaButtonGroup.Visible='on';
app.comenzar.Visible='off';
app.UIAxes.Visible='off';
app.Atras.Visible='off';
app.Guardar.Visible='off';
cla(app.UIAxes)
legend(app.UIAxes,"off")
app.Image7.Visible='on';
app.Image7_2.Visible='on';
app.Image7_3.Visible='on';
app.Image7_4.Visible='on';
app.Image7_5.Visible='on';
app.Image7_6.Visible='on';
app.Image3_4.Visible='on';
app.Image3_6.Visible='on';
app.Image3_7.Visible='on';
app.Image3_8.Visible='on';
app.Image3_9.Visible='on';
valt=strlength(app.Switch.Value);
if(valt==7)
app.AlturamEditField.Visible='off';
app.AlturamEditFieldLabel.Visible='off';
app.PresionEditField.Visible='on';
app.PresinmbarLabel.Visible='on';
app.TemperaturaEditField.Visible='off';
app.TemperaturaEditFieldLabel.Visible='off';
else
app.AlturamEditField.Visible='on';
app.AlturamEditFieldLabel.Visible='on';
app.PresionEditField.Visible='off';
app.PresinmbarLabel.Visible='off';
app.TemperaturaEditField.Visible='on';
app.TemperaturaEditFieldLabel.Visible='on';
end
end

% Button pushed function: Guardar
function GuardarButtonPushed(app, event)
%Se pide el archivo para guardar los datos:
archivo=uiinputfile('*.xlsx','Introduzca el nombre del archivo');
%Primero se comprueba que todo va correctamente:
if isequal(archivo,0)
return
else
%Se escribe en el Excel:
Incl_superficie=app.InclinacindelasuperficieEditField.Value;
```



E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

```

Hora=app.HoraEditField.Value;
Minutos=app.MinutosEditField.Value;
Azim=app.AzimutsuperficieEditField.Value;
AOD=app.ProfundidadpticaaerosolesEditField.Value;
Albedo=app.AlbedoEditField.Value;
Precip_H2O=app.VapordeaguaprecipitablecmEditField.Value;
LAT=app.LatitudEditField.Value;
LONG=app.LongitudEditField.Value;
Fech=app.Fecha.Value;
alo=year(Fech);
mes=month(Fech);
dias=day(Fech);
value = app.Switch.Value;
p1='Presión';
tf = strcmp(value,p1);
if(app.alp==1.14)
trr='Zona rural';
elseif(app.alp==2)
trr='Zona urbana';
elseif(app.alp==0.2)
trr='Zona minera';
else
trr='Zona marinera';
end
if(tf==1)
Presion=app.PresionEditField.Value;
LR={'Datos de entrada';'Día';'Mes';'Año';'Hora';'Minutos';'Inclinación de la
superficie';'Azimut de la superficie';'Profundidad óptica
aerosoles';'Albedo';'Vapor de agua
precipitable';'Latitud';'Longitud';'Presión'};
Datos_ep=[dias;mes;alo;Hora;Minutos;Incl_superficie;Azim;AOD;Albedo;Precip_H2O
;LAT;LONG;Presion];
Unidades={'Unidades';'';'';'';'';'';'°';'°';'';'';'cm';'°';'°';'mbar';''};
zona={'Tipo de zona'};
TP=table(Datos_ep);
TPP=table2cell(TP);
filename = archivo;
writecell(LR,filename,'Sheet','WriteCell','Range','A1')
writecell(TPP,filename,'Sheet','WriteCell','Range','B2')
writecell(Unidades,filename,'Sheet','WriteCell','Range','C1:C15')
writecell(zona,filename,'Sheet','WriteCell','Range','A15')
writematrix(trr,filename,'Sheet','WriteCell','Range','B15')
else
Altura=app.AlturamEditField.Value;
Temperatura=app.TemperaturaEditField.Value;
LR={'Datos de entrada';'Día';'Mes';'Año';'Hora';'Minutos';'Inclinación de la
superficie';'Azimut de la superficie';'Profundidad óptica
aerosoles';'Albedo';'Vapor de agua
precipitable';'Latitud';'Longitud';'Altura';'Temperatura'};

```



E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

```
appinformacion1;
end

% Selection changed function: TipodezonaButtonGroup
function TipodezonaButtonGroupSelectionChanged(app, event)
%Determinación del exponente de Angstrom en función de la zona
%de estudio elegida
%selectedButton = app.TipodezonaButtonGroup.SelectedObject;
comenzarButtonPushed(app, event)
V1=app.MarinaButton.Value;
V2=app.MineraButton.Value;
V3=app.RuralButton.Value;
V4=app.UrbanaButton.Value;
if(V1==1)
AE=0.35;
end
if(V2==1)
AE=0.2;
end
if(V3==1)
AE=1.25;
end
if(V4==1)
AE=2;
end
app.alp=AE;
end
end

% Component initialization
methods (Access = private)

% Create UIFigure and components
function createComponents(app)

% Create UIFigure and hide until all components are created
app.UIFigure = uifigure('Visible', 'off');
app.UIFigure.Color = [1 1 1];
app.UIFigure.Position = [100 100 1505 775];
app.UIFigure.Name = 'MATLAB App';
app.UIFigure.WindowState = 'maximized';

% Create Image10
app.Image10 = uiimage(app.UIFigure);
app.Image10.ScaleMethod = 'stretch';
```

E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

```
app.Image10.Position = [-1 1 1568 818];  
app.Image10.ImageSource = 'Financiacion-placas-solares-para-autoconsumo.jpg';
```

```
% Create Image3_4
```

```
app.Image3_4 = uiimage(app.UIFigure);  
app.Image3_4.ScaleMethod = 'stretch';  
app.Image3_4.Visible = 'off';  
app.Image3_4.HorizontalAlignment = 'right';  
app.Image3_4.Position = [1210 153 302 473];  
app.Image3_4.ImageSource = 'SeekPng.com_black-border-png_274447.png';
```

```
% Create Image3_9
```

```
app.Image3_9 = uiimage(app.UIFigure);  
app.Image3_9.ScaleMethod = 'stretch';  
app.Image3_9.Visible = 'off';  
app.Image3_9.HorizontalAlignment = 'right';  
app.Image3_9.Position = [922 153 302 473];  
app.Image3_9.ImageSource = 'SeekPng.com_black-border-png_274447.png';
```

```
% Create Image3_8
```

```
app.Image3_8 = uiimage(app.UIFigure);  
app.Image3_8.ScaleMethod = 'stretch';  
app.Image3_8.Visible = 'off';  
app.Image3_8.HorizontalAlignment = 'right';  
app.Image3_8.Position = [637 152 302 473];  
app.Image3_8.ImageSource = 'SeekPng.com_black-border-png_274447.png';
```

```
% Create Image3_7
```

```
app.Image3_7 = uiimage(app.UIFigure);  
app.Image3_7.ScaleMethod = 'stretch';  
app.Image3_7.Visible = 'off';  
app.Image3_7.HorizontalAlignment = 'right';  
app.Image3_7.Position = [336 152 302 473];  
app.Image3_7.ImageSource = 'SeekPng.com_black-border-png_274447.png';
```

```
% Create Image3_6
```

```
app.Image3_6 = uiimage(app.UIFigure);  
app.Image3_6.ScaleMethod = 'stretch';  
app.Image3_6.Visible = 'off';  
app.Image3_6.HorizontalAlignment = 'right';  
app.Image3_6.Position = [30 153 302 473];  
app.Image3_6.ImageSource = 'SeekPng.com_black-border-png_274447.png';
```

```
% Create Image7_6
```

```
app.Image7_6 = uiimage(app.UIFigure);
```

## E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

```
app.Image7_6.Visible = 'off';
app.Image7_6.Position = [25 604 204 71];
app.Image7_6.ImageSource = 'pngegg (1).png';

% Create Image7_5
app.Image7_5 = uiimage(app.UIFigure);
app.Image7_5.Visible = 'off';
app.Image7_5.Position = [1246 505 237 71];
app.Image7_5.ImageSource = 'pngegg (1).png';

% Create Image7_4
app.Image7_4 = uiimage(app.UIFigure);
app.Image7_4.Visible = 'off';
app.Image7_4.Position = [940 507 263 71];
app.Image7_4.ImageSource = 'pngegg (1).png';

% Create Image7_3
app.Image7_3 = uiimage(app.UIFigure);
app.Image7_3.Visible = 'off';
app.Image7_3.Position = [666 505 238 71];
app.Image7_3.ImageSource = 'pngegg (1).png';

% Create Image7_2
app.Image7_2 = uiimage(app.UIFigure);
app.Image7_2.Visible = 'off';
app.Image7_2.Position = [383 507 208 71];
app.Image7_2.ImageSource = 'pngegg (1).png';

% Create Image7
app.Image7 = uiimage(app.UIFigure);
app.Image7.Visible = 'off';
app.Image7.Position = [83 507 204 71];
app.Image7.ImageSource = 'pngegg (1).png';

% Create InclinacindelasuperficieEditField_2Label
app.InclinacindelasuperficieEditField_2Label = uilabel(app.UIFigure);
app.InclinacindelasuperficieEditField_2Label.HorizontalAlignment = 'right';
app.InclinacindelasuperficieEditField_2Label.FontSize = 17;
app.InclinacindelasuperficieEditField_2Label.Visible = 'off';
app.InclinacindelasuperficieEditField_2Label.Position = [958 459 229 22];
app.InclinacindelasuperficieEditField_2Label.Text = 'Inclinación de la
superficie (°)';
```

## E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

### % Create InclinaCinDelasuperficieEditField

```
app.InclinaCinDelasuperficieEditField = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');  
app.InclinaCinDelasuperficieEditField.Tag = 'Incl_superficie';  
app.InclinaCinDelasuperficieEditField.FontSize = 17;  
app.InclinaCinDelasuperficieEditField.Visible = 'off';  
app.InclinaCinDelasuperficieEditField.Position = [1023 424 100 22];
```

### % Create DatosdeEntradaLabel

```
app.DatosdeEntradaLabel = uilabel(app.UIFigure);  
app.DatosdeEntradaLabel.FontName = 'Times New Roman';  
app.DatosdeEntradaLabel.FontSize = 19;  
app.DatosdeEntradaLabel.FontWeight = 'bold';  
app.DatosdeEntradaLabel.FontAngle = 'italic';  
app.DatosdeEntradaLabel.Visible = 'off';  
app.DatosdeEntradaLabel.Position = [52 627 145 23];  
app.DatosdeEntradaLabel.Text = 'Datos de entrada:';
```

### % Create AzimutsuperficieLabel

```
app.AzimutsuperficieLabel = uilabel(app.UIFigure);  
app.AzimutsuperficieLabel.HorizontalAlignment = 'right';  
app.AzimutsuperficieLabel.FontSize = 17;  
app.AzimutsuperficieLabel.Visible = 'off';  
app.AzimutsuperficieLabel.Position = [1001 357 144 22];  
app.AzimutsuperficieLabel.Text = 'Azimut superficie (°)';
```

### % Create AzimutsuperficieEditField

```
app.AzimutsuperficieEditField = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');  
app.AzimutsuperficieEditField.Tag = 'Azim';  
app.AzimutsuperficieEditField.FontSize = 17;  
app.AzimutsuperficieEditField.Visible = 'off';  
app.AzimutsuperficieEditField.Position = [1023 326 100 22];  
app.AzimutsuperficieEditField.Value = 180;
```

### % Create ProfundidadpticaaerosolesEditFieldLabel

```
app.ProfundidadpticaaerosolesEditFieldLabel = uilabel(app.UIFigure);  
app.ProfundidadpticaaerosolesEditFieldLabel.Tag = 'AOD';  
app.ProfundidadpticaaerosolesEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';  
app.ProfundidadpticaaerosolesEditFieldLabel.FontSize = 17;  
app.ProfundidadpticaaerosolesEditFieldLabel.Visible = 'off';  
app.ProfundidadpticaaerosolesEditFieldLabel.Position = [676 336 228 22];  
app.ProfundidadpticaaerosolesEditFieldLabel.Text = 'Profundidad óptica  
aerosoles';
```

### % Create ProfundidadpticaaerosolesEditField

```
app.ProfundidadpticaaerosolesEditField = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');
```

## E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

```
app.ProfundidadpticaaerosolesEditField.Limits = [0 Inf];  
app.ProfundidadpticaaerosolesEditField.Tag = 'Azim';  
app.ProfundidadpticaaerosolesEditField.FontSize = 17;  
app.ProfundidadpticaaerosolesEditField.Visible = 'off';  
app.ProfundidadpticaaerosolesEditField.Position = [734 305 98 22];  
app.ProfundidadpticaaerosolesEditField.Value = 0.085;
```

### % Create AlbedoEditFieldLabel

```
app.AlbedoEditFieldLabel = uilabel(app.UIFigure);  
app.AlbedoEditFieldLabel.Tag = 'Alpha';  
app.AlbedoEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';  
app.AlbedoEditFieldLabel.FontSize = 17;  
app.AlbedoEditFieldLabel.Visible = 'off';  
app.AlbedoEditFieldLabel.Position = [1043 254 59 22];  
app.AlbedoEditFieldLabel.Text = 'Albedo';
```

### % Create AlbedoEditField

```
app.AlbedoEditField = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');  
app.AlbedoEditField.Limits = [0 Inf];  
app.AlbedoEditField.Tag = 'Albedo';  
app.AlbedoEditField.FontSize = 17;  
app.AlbedoEditField.Visible = 'off';  
app.AlbedoEditField.Position = [1023 223 100 22];  
app.AlbedoEditField.Value = 0.11356712;
```

### % Create VapordeaguaprecipitablecmEditFieldLabel

```
app.VapordeaguaprecipitablecmEditFieldLabel = uilabel(app.UIFigure);  
app.VapordeaguaprecipitablecmEditFieldLabel.Tag = 'AOD';  
app.VapordeaguaprecipitablecmEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';  
app.VapordeaguaprecipitablecmEditFieldLabel.FontSize = 17;  
app.VapordeaguaprecipitablecmEditFieldLabel.Visible = 'off';  
app.VapordeaguaprecipitablecmEditFieldLabel.Position = [666 459 248 22];  
app.VapordeaguaprecipitablecmEditFieldLabel.Text = 'Vapor de agua precipitable  
(cm)';
```

### % Create VapordeaguaprecipitablecmEditField

```
app.VapordeaguaprecipitablecmEditField = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');  
app.VapordeaguaprecipitablecmEditField.Limits = [0 Inf];  
app.VapordeaguaprecipitablecmEditField.Tag = 'Precip_H20';  
app.VapordeaguaprecipitablecmEditField.FontSize = 17;  
app.VapordeaguaprecipitablecmEditField.Visible = 'off';  
app.VapordeaguaprecipitablecmEditField.Position = [733 425 100 22];  
app.VapordeaguaprecipitablecmEditField.Value = 3.22;
```

E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

**% Create LatitudLabel**

```
app.LatitudLabel = uilabel(app.UIFigure);
app.LatitudLabel.Tag = 'AOD';
app.LatitudLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.LatitudLabel.FontSize = 17;
app.LatitudLabel.Visible = 'off';
app.LatitudLabel.Position = [446 484 79 22];
app.LatitudLabel.Text = 'Latitud (°)';
```

**% Create LatitudEditField**

```
app.LatitudEditField = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');
app.LatitudEditField.Tag = 'Nday';
app.LatitudEditField.FontSize = 17;
app.LatitudEditField.Visible = 'off';
app.LatitudEditField.Position = [436 450 100 22];
app.LatitudEditField.Value = 38.9861;
```

**% Create LongitudLabel**

```
app.LongitudLabel = uilabel(app.UIFigure);
app.LongitudLabel.Tag = 'AOD';
app.LongitudLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.LongitudLabel.FontSize = 17;
app.LongitudLabel.Visible = 'off';
app.LongitudLabel.Position = [443 384 93 22];
app.LongitudLabel.Text = 'Longitud (°)';
```

**% Create LongitudEditField**

```
app.LongitudEditField = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');
app.LongitudEditField.Tag = 'Nday';
app.LongitudEditField.FontSize = 17;
app.LongitudEditField.Visible = 'off';
app.LongitudEditField.Position = [440 350 100 22];
app.LongitudEditField.Value = -3.92726;
```

**% Create Switch**

```
app.Switch = uiswitch(app.UIFigure, 'slider');
app.Switch.Items = {'Presión', 'Altura'};
app.Switch.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app, @SwitchValueChanged,
true);
app.Switch.Tag = 'Presion\Altura';
app.Switch.Visible = 'off';
app.Switch.FontName = 'Times New Roman';
app.Switch.FontSize = 17;
app.Switch.FontWeight = 'bold';
app.Switch.FontAngle = 'italic';
app.Switch.Position = [1343 532 45 20];
```



## E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

```
app.Switch.Value = 'Presión';
```

### % Create PresinmbarLabel

```
app.PresinmbarLabel = uilabel(app.UIFigure);  
app.PresinmbarLabel.Tag = 'AOD';  
app.PresinmbarLabel.HorizontalAlignment = 'right';  
app.PresinmbarLabel.FontSize = 17;  
app.PresinmbarLabel.Visible = 'off';  
app.PresinmbarLabel.Position = [1306 400 118 22];  
app.PresinmbarLabel.Text = 'Presión (mbar)';
```

### % Create PresionEditField

```
app.PresionEditField = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');  
app.PresionEditField.Limits = [0 Inf];  
app.PresionEditField.Tag = 'Presion';  
app.PresionEditField.FontSize = 17;  
app.PresionEditField.Visible = 'off';  
app.PresionEditField.Position = [1315 367 100 22];  
app.PresionEditField.Value = 1013.25;
```

### % Create AlturamEditFieldLabel

```
app.AlturamEditFieldLabel = uilabel(app.UIFigure);  
app.AlturamEditFieldLabel.Tag = 'AOD';  
app.AlturamEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';  
app.AlturamEditFieldLabel.FontSize = 17;  
app.AlturamEditFieldLabel.Visible = 'off';  
app.AlturamEditFieldLabel.Position = [1325 455 80 22];  
app.AlturamEditFieldLabel.Text = 'Altura (m)';
```

### % Create AlturamEditField

```
app.AlturamEditField = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');  
app.AlturamEditField.Tag = 'Altura';  
app.AlturamEditField.FontSize = 17;  
app.AlturamEditField.Visible = 'off';  
app.AlturamEditField.Position = [1315 421 100 22];  
app.AlturamEditField.Value = 642;
```

### % Create Calcular

```
app.Calcular = uibutton(app.UIFigure, 'push');  
app.Calcular.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app, @CalcularButtonPushed,  
true);  
app.Calcular.Tag = 'Calcular';  
app.Calcular.BackgroundColor = [0 1 0];  
app.Calcular.FontSize = 17;  
app.Calcular.Visible = 'off';
```

## E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

```
app.Calcular.Position = [1383 26 111 29];  
app.Calcular.Text = 'Calcular';
```

### % Create comenzar

```
app.comenzar = uibutton(app.UIFigure, 'push');  
app.comenzar.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app, @comenzarButtonPushed,  
true);  
app.comenzar.Tag = 'Comenzar';  
app.comenzar.BackgroundColor = [0.1843 0.9294 0.1843];  
app.comenzar.FontSize = 17;  
app.comenzar.Position = [732 26 112 29];  
app.comenzar.Text = 'Comenzar';
```

### % Create Atras

```
app.Atras = uibutton(app.UIFigure, 'push');  
app.Atras.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app, @AtrasButtonPushed, true);  
app.Atras.BackgroundColor = [1 0.502 0.2902];  
app.Atras.FontSize = 17;  
app.Atras.Visible = 'off';  
app.Atras.Position = [726 691 100 29];  
app.Atras.Text = 'Atrás';
```

### % Create Trabajofindegrado

```
app.Trabajofindegrado = uilabel(app.UIFigure);  
app.Trabajofindegrado.FontName = 'Times New Roman';  
app.Trabajofindegrado.FontSize = 22;  
app.Trabajofindegrado.FontWeight = 'bold';  
app.Trabajofindegrado.Position = [688 552 201 28];  
app.Trabajofindegrado.Text = 'Trabajo fin de grado';
```

### % Create Tutores

```
app.Tutores = uilabel(app.UIFigure);  
app.Tutores.BackgroundColor = [0.651 0.651 0.651];  
app.Tutores.HorizontalAlignment = 'center';  
app.Tutores.WordWrap = 'on';  
app.Tutores.FontName = 'Times New Roman';  
app.Tutores.FontSize = 22;  
app.Tutores.FontWeight = 'bold';  
app.Tutores.FontColor = [0.7098 0.0392 0];  
app.Tutores.Position = [228 200 232 179];  
app.Tutores.Text = {'Tutores: '; 'Magín Lapuerta Amigo'; 'Ángel Ramos  
Diezma'};
```

### % Create Autor

```
app.Autor = uilabel(app.UIFigure);
```

## E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

```
app.Autor.BackgroundColor = [0.651 0.651 0.651];
app.Autor.HorizontalAlignment = 'center';
app.Autor.WordWrap = 'on';
app.Autor.FontName = 'Times New Roman';
app.Autor.FontSize = 22;
app.Autor.FontWeight = 'bold';
app.Autor.FontColor = [0.7098 0.0392 0.1608];
app.Autor.Position = [1101 259 264 51];
app.Autor.Text = 'Autor: Jaime Isasi campillo';

% Create TemperaturaEditFieldLabel
app.TemperaturaEditFieldLabel = uilabel(app.UIFigure);
app.TemperaturaEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.TemperaturaEditFieldLabel.FontSize = 17;
app.TemperaturaEditFieldLabel.Visible = 'off';
app.TemperaturaEditFieldLabel.Position = [1302 336 123 22];
app.TemperaturaEditFieldLabel.Text = 'Temperatura (°)';

% Create TemperaturaEditField
app.TemperaturaEditField = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');
app.TemperaturaEditField.Tag = 'Temperatura';
app.TemperaturaEditField.FontSize = 17;
app.TemperaturaEditField.Visible = 'off';
app.TemperaturaEditField.Position = [1315 308 100 22];
app.TemperaturaEditField.Value = 27;

% Create Guardar
app.Guardar = uibutton(app.UIFigure, 'push');
app.Guardar.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app, @GuardarButtonPushed,
true);
app.Guardar.BackgroundColor = [0 1 0];
app.Guardar.FontSize = 17;
app.Guardar.Visible = 'off';
app.Guardar.Position = [696 26 173 29];
app.Guardar.Text = 'Guardar resultados';

% Create Image
app.Image = uiimage(app.UIFigure);
app.Image.Position = [12 669 230 101];
app.Image.ImageSource = 'UCLM-Logo.png';

% Create Image2
app.Image2 = uiimage(app.UIFigure);
app.Image2.Position = [1438 679 81 91];
app.Image2.ImageSource = 'logo_blanco_letras-removebg-preview.png';
```

E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

```
% Create Titulo
app.Titulo = uilabel(app.UIFigure);
app.Titulo.FontName = 'Times New Roman';
app.Titulo.FontSize = 22;
app.Titulo.FontWeight = 'bold';
app.Titulo.Position = [346 484 891 28];
app.Titulo.Text = 'Determinación del espectro solar en función de coordenadas
geográficas y datos estacionales';

% Create MinutosEditFieldLabel
app.MinutosEditFieldLabel = uilabel(app.UIFigure);
app.MinutosEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.MinutosEditFieldLabel.FontSize = 17;
app.MinutosEditFieldLabel.Visible = 'off';
app.MinutosEditFieldLabel.Position = [148 271 65 22];
app.MinutosEditFieldLabel.Text = 'Minutos';

% Create MinutosEditField
app.MinutosEditField = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');
app.MinutosEditField.Limits = [0 59];
app.MinutosEditField.Tag = 'Minutos';
app.MinutosEditField.FontSize = 17;
app.MinutosEditField.Visible = 'off';
app.MinutosEditField.Position = [131 237 100 22];
app.MinutosEditField.Value = 6;

% Create HoraEditFieldLabel
app.HoraEditFieldLabel = uilabel(app.UIFigure);
app.HoraEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.HoraEditFieldLabel.FontSize = 17;
app.HoraEditFieldLabel.Visible = 'off';
app.HoraEditFieldLabel.Position = [155 384 43 22];
app.HoraEditFieldLabel.Text = 'Hora';

% Create HoraEditField
app.HoraEditField = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');
app.HoraEditField.Limits = [0 23];
app.HoraEditField.Tag = 'Hora';
app.HoraEditField.FontSize = 17;
app.HoraEditField.Visible = 'off';
app.HoraEditField.Position = [131 347 100 22];
app.HoraEditField.Value = 12;
```

E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

**% Create FechaLabel**

```
app.FechaLabel = uilabel(app.UIFigure);  
app.FechaLabel.HorizontalAlignment = 'right';  
app.FechaLabel.FontSize = 17;  
app.FechaLabel.Visible = 'off';  
app.FechaLabel.Position = [154 474 53 22];  
app.FechaLabel.Text = 'Fecha';
```

**% Create Fecha**

```
app.Fecha = uidepicker(app.UIFigure);  
app.Fecha.FontSize = 17;  
app.Fecha.Visible = 'off';  
app.Fecha.Position = [110 444 150 23];  
app.Fecha.Value = datetime([2021 10 18]);
```

**% Create FechayHoraLabel**

```
app.FechayHoraLabel = uilabel(app.UIFigure);  
app.FechayHoraLabel.FontName = 'Times New Roman';  
app.FechayHoraLabel.FontSize = 17;  
app.FechayHoraLabel.FontWeight = 'bold';  
app.FechayHoraLabel.FontAngle = 'italic';  
app.FechayHoraLabel.Visible = 'off';  
app.FechayHoraLabel.Position = [127 531 108 22];  
app.FechayHoraLabel.Text = 'Fecha y Hora:';
```

**% Create LocalizacinLabel**

```
app.LocalizacinLabel = uilabel(app.UIFigure);  
app.LocalizacinLabel.FontName = 'Times New Roman';  
app.LocalizacinLabel.FontSize = 17;  
app.LocalizacinLabel.FontWeight = 'bold';  
app.LocalizacinLabel.FontAngle = 'italic';  
app.LocalizacinLabel.Visible = 'off';  
app.LocalizacinLabel.Position = [436 531 101 22];  
app.LocalizacinLabel.Text = 'Localización:';
```

**% Create EfectosatmosfricosLabel**

```
app.EfectosatmosfricosLabel = uilabel(app.UIFigure);  
app.EfectosatmosfricosLabel.FontName = 'Times New Roman';  
app.EfectosatmosfricosLabel.FontSize = 17;  
app.EfectosatmosfricosLabel.FontWeight = 'bold';  
app.EfectosatmosfricosLabel.FontAngle = 'italic';  
app.EfectosatmosfricosLabel.Visible = 'off';  
app.EfectosatmosfricosLabel.Position = [696 528 174 24];  
app.EfectosatmosfricosLabel.Text = 'Efectos atmosféricos:';
```

E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

**% Create CaractersticasdelaSuperficieLabel**

```
app.CaractersticasdelaSuperficieLabel = uilabel(app.UIFigure);
app.CaractersticasdelaSuperficieLabel.FontName = 'Times New Roman';
app.CaractersticasdelaSuperficieLabel.FontSize = 17;
app.CaractersticasdelaSuperficieLabel.FontWeight = 'bold';
app.CaractersticasdelaSuperficieLabel.FontAngle = 'italic';
app.CaractersticasdelaSuperficieLabel.Visible = 'off';
app.CaractersticasdelaSuperficieLabel.Position = [948 531 229 22];
app.CaractersticasdelaSuperficieLabel.Text = 'Características de la
superficie:';
```

**% Create Informacion2**

```
app.Informacion2 = uibutton(app.UIFigure, 'push');
app.Informacion2.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app,
@Informacion2ButtonPushed, true);
app.Informacion2.Icon = 'kisspng-clip-art-information-desktop-wallpaper-
portable-ne-floral-swirly-bird-bottom-corner-clip-art-vector-
5bee45573760c2.5552453615423419752269.png';
app.Informacion2.IconAlignment = 'center';
app.Informacion2.BackgroundColor = [0.902 0.902 0.902];
app.Informacion2.FontSize = 14;
app.Informacion2.FontAngle = 'italic';
app.Informacion2.Visible = 'off';
app.Informacion2.Position = [853 527 26 26];
app.Informacion2.Text = '';
```

**% Create Informacion3**

```
app.Informacion3 = uibutton(app.UIFigure, 'push');
app.Informacion3.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app,
@Informacion3ButtonPushed, true);
app.Informacion3.Icon = 'kisspng-clip-art-information-desktop-wallpaper-
portable-ne-floral-swirly-bird-bottom-corner-clip-art-vector-
5bee45573760c2.5552453615423419752269.png';
app.Informacion3.IconAlignment = 'center';
app.Informacion3.BackgroundColor = [0.902 0.902 0.902];
app.Informacion3.FontSize = 14;
app.Informacion3.FontAngle = 'italic';
app.Informacion3.Visible = 'off';
app.Informacion3.Position = [1176 529 26 26];
app.Informacion3.Text = '';
```

**% Create Informacion4**

```
app.Informacion4 = uibutton(app.UIFigure, 'push');
app.Informacion4.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app,
@Informacion4ButtonPushed, true);
```

## E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

```
app.Informacion4.Icon = 'kisspng-clip-art-information-desktop-wallpaper-  
portable-ne-floral-swirly-bird-bottom-corner-clip-art-vector-  
5bee45573760c2.5552453615423419752269.png';  
app.Informacion4.IconAlignment = 'center';  
app.Informacion4.BackgroundColor = [0.902 0.902 0.902];  
app.Informacion4.FontSize = 14;  
app.Informacion4.FontAngle = 'italic';  
app.Informacion4.Visible = 'off';  
app.Informacion4.Position = [1451 529 26 26];  
app.Informacion4.Text = '';
```

### % Create Informacion5

```
app.Informacion5 = uibutton(app.UIFigure, 'push');  
app.Informacion5.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app,  
@Informacion5ButtonPushed, true);  
app.Informacion5.Icon = 'kisspng-clip-art-information-desktop-wallpaper-  
portable-ne-floral-swirly-bird-bottom-corner-clip-art-vector-  
5bee45573760c2.5552453615423419752269.png';  
app.Informacion5.IconAlignment = 'center';  
app.Informacion5.BackgroundColor = [0.902 0.902 0.902];  
app.Informacion5.FontSize = 14;  
app.Informacion5.FontAngle = 'italic';  
app.Informacion5.Visible = 'off';  
app.Informacion5.Position = [241 529 26 26];  
app.Informacion5.Text = '';
```

### % Create Informacion

```
app.Informacion = uibutton(app.UIFigure, 'push');  
app.Informacion.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app,  
@InformacionButtonPushed, true);  
app.Informacion.Icon = 'kisspng-clip-art-information-desktop-wallpaper-  
portable-ne-floral-swirly-bird-bottom-corner-clip-art-vector-  
5bee45573760c2.5552453615423419752269.png';  
app.Informacion.IconAlignment = 'center';  
app.Informacion.BackgroundColor = [0.902 0.902 0.902];  
app.Informacion.FontSize = 14;  
app.Informacion.FontAngle = 'italic';  
app.Informacion.Visible = 'off';  
app.Informacion.Position = [547 529 25 26];  
app.Informacion.Text = '';
```

### % Create TipodezonaButtonGroup

```
app.TipodezonaButtonGroup = uibuttongroup(app.UIFigure);  
app.TipodezonaButtonGroup.SelectionChangedFcn = createCallbackFcn(app,  
@TipodezonaButtonGroupSelectionChanged, true);  
app.TipodezonaButtonGroup.BorderType = 'none';  
app.TipodezonaButtonGroup.TitlePosition = 'centertop';
```

## E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

```
app.TipodezonaButtonGroup.Title = 'Tipo de zona:';
app.TipodezonaButtonGroup.Visible = 'off';
app.TipodezonaButtonGroup.BackgroundColor = [1 1 1];
app.TipodezonaButtonGroup.FontSize = 17;
app.TipodezonaButtonGroup.Position = [429 208 123 119];

% Create UrbanaButton
app.UrbanaButton = uiradiobutton(app.TipodezonaButtonGroup);
app.UrbanaButton.Text = 'Urbana';
app.UrbanaButton.FontSize = 14;
app.UrbanaButton.Position = [25 66 68 22];

% Create RuralButton
app.RuralButton = uiradiobutton(app.TipodezonaButtonGroup);
app.RuralButton.Text = 'Rural';
app.RuralButton.WordWrap = 'on';
app.RuralButton.FontSize = 14;
app.RuralButton.Position = [25 45 65 22];
app.RuralButton.Value = true;

% Create MineraButton
app.MineraButton = uiradiobutton(app.TipodezonaButtonGroup);
app.MineraButton.Text = 'Minera';
app.MineraButton.FontSize = 14;
app.MineraButton.Position = [25 24 65 22];

% Create MarinaButton
app.MarinaButton = uiradiobutton(app.TipodezonaButtonGroup);
app.MarinaButton.Text = 'Marina';
app.MarinaButton.FontSize = 14;
app.MarinaButton.Position = [25 2 65 22];

% Create SolarGCMLabel
app.SolarGCMLabel = uilabel(app.UIFigure);
app.SolarGCMLabel.FontName = 'Times New Roman';
app.SolarGCMLabel.FontSize = 42;
app.SolarGCMLabel.FontWeight = 'bold';
app.SolarGCMLabel.Position = [682 649 216 53];
app.SolarGCMLabel.Text = 'Solar GCM';

% Create UIAxes
app.UIAxes = uiaxes(app.UIFigure);
xlabel(app.UIAxes, 'Longitud de onda ( $\mu\text{m}$ )')
ylabel(app.UIAxes, 'Irradiación espectral ( $\text{W}/\text{m}^{\{2\}}\mu\text{m}$ )')
zlabel(app.UIAxes, 'Z')
```



### E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

```
app.UIAxes.Toolbar.Visible = 'off';
app.UIAxes.PlotBoxAspectRatio = [1.78065630397237 1 1];
app.UIAxes.XGrid = 'on';
app.UIAxes.YGrid = 'on';
app.UIAxes.ColorOrder = [1 0 0;0 0.4471 0.7412;0.3216 0.5608 0.0039;0.4941
0.1843 0.5569;0.4667 0.6745 0.1882;0.302 0.7451 0.9333;0.6353 0.0784 0.1843];
app.UIAxes.Visible = 'off';
app.UIAxes.Position = [93 101 1384 535];

% Show the figure after all components are created
app.UIFigure.Visible = 'on';
    end
end

% App creation and deletion
methods (Access = public)

    % Construct app
    function app = Aplicacion_Solar_GCM

        % Create UIFigure and components
        createComponents(app)

        % Register the app with App Designer
        registerApp(app, app.UIFigure)

        if nargin == 0
            clear app
        end
    end

    % Code that executes before app deletion
    function delete(app)

        % Delete UIFigure when app is deleted
        delete(app.UIFigure)
    end
end
end
```

**E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL**

### A3. DATOS FIJOS DE LA APLICACIÓN

Se muestran los datos fijos empleados en el desarrollo de la aplicación para cada longitud de onda [9] [10]:

| $\lambda$ ( $\mu\text{m}$ ) | $I_{ETR} \left( \frac{W}{\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}} \right)$ | $\alpha_w(\lambda)$ | $\alpha_{O_3}(\lambda)$ | $\alpha_g(\lambda)$ |
|-----------------------------|---|---------------------|-------------------------|---------------------|
| 0,300                       | 535,9   | 0                   | 10                      | 0                   |
| 0,305                       | 558,3   | 0                   | 4,8                     | 0                   |
| 0,310                       | 622   | 0                   | 2,7                     | 0                   |
| 0,315                       | 692,7   | 0                   | 1,35                    | 0                   |
| 0,320                       | 715,1   | 0                   | 0,8                     | 0                   |
| 0,325                       | 832,9   | 0                   | 0,38                    | 0                   |
| 0,330                       | 961,9   | 0                   | 0,16                    | 0                   |
| 0,335                       | 931,9   | 0                   | 0,075                   | 0                   |
| 0,340                       | 900,6   | 0                   | 0,04                    | 0                   |
| 0,345                       | 911,3   | 0                   | 0,019                   | 0                   |
| 0,350                       | 975,5   | 0                   | 0,007                   | 0                   |
| 0,360                       | 975,9   | 0                   | 0                       | 0                   |
| 0,370                       | 1119,9  | 0                   | 0                       | 0                   |
| 0,380                       | 1103,8  | 0                   | 0                       | 0                   |
| 0,390                       | 1033,8  | 0                   | 0                       | 0                   |
| 0,400                       | 1479,1  | 0                   | 0                       | 0                   |
| 0,410                       | 1701,3  | 0                   | 0                       | 0                   |
| 0,420                       | 1740,4  | 0                   | 0                       | 0                   |
| 0,430                       | 1587,2  | 0                   | 0                       | 0                   |
| 0,440                       | 1837  | 0                   | 0                       | 0                   |
| 0,450                       | 2005  | 0                   | 0,003                   | 0                   |
| 0,460                       | 2043  | 0                   | 0,006                   | 0                   |
| 0,470                       | 1987  | 0                   | 0,009                   | 0                   |
| 0,480                       | 2027  | 0                   | 0,014                   | 0                   |
| 0,490                       | 1896  | 0                   | 0,021                   | 0                   |
| 0,500                       | 1909  | 0                   | 0,03                    | 0                   |
| 0,510                       | 1927  | 0                   | 0,04                    | 0                   |
| 0,520                       | 1831  | 0                   | 0,048                   | 0                   |
| 0,530                       | 1891  | 0                   | 0,063                   | 0                   |
| 0,540                       | 1898  | 0                   | 0,075                   | 0                   |
| 0,550                       | 1892  | 0                   | 0,085                   | 0                   |
| 0,570                       | 1840  | 0                   | 0,12                    | 0                   |
| 0,593                       | 1768  | 0,075               | 0,119                   | 0                   |
| 0,610                       | 1728  | 0                   | 0,12                    | 0                   |
| 0,630                       | 1658  | 0                   | 0,09                    | 0                   |
| 0,656                       | 1524  | 0                   | 0,065                   | 0                   |
| 0,668                       | 1531  | 0                   | 0,051                   | 0                   |
| 0,690                       | 1420  | 0,016               | 0,028                   | 0,15                |
| 0,710                       | 1399  | 0,0125              | 0,018                   | 0                   |
| 0,718                       | 1374  | 1,8                 | 0,015                   | 0                   |
| 0,724                       | 1373  | 2,5                 | 0,012                   | 0                   |
| 0,740                       | 1298  | 0,061               | 0,01                    | 0                   |
| 0,753                       | 1269  | 0,0008              | 0,008                   | 0                   |

**E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL**

|       |       |         |       |         |
|-------|-------|---------|-------|---------|
| 0,758 | 1245  | 0,0001  | 0,007 | 0       |
| 0,763 | 1223  | 0,00001 | 0,006 | 4       |
| 0,768 | 1205  | 0,00001 | 0,005 | 0,35    |
| 0,780 | 1183  | 0,0006  | 0     | 0       |
| 0,800 | 1148  | 0,036   | 0     | 0       |
| 0,816 | 1091  | 1,6     | 0     | 0       |
| 0,824 | 1062  | 2,5     | 0     | 0       |
| 0,832 | 1038  | 0,5     | 0     | 0       |
| 0,840 | 1022  | 0,155   | 0     | 0       |
| 0,860 | 998,7 | 0,00001 | 0     | 0       |
| 0,880 | 947,2 | 0,0026  | 0     | 0       |
| 0,905 | 893,2 | 7       | 0     | 0       |
| 0,915 | 868,2 | 5       | 0     | 0       |
| 0,925 | 829,7 | 5       | 0     | 0       |
| 0,930 | 830,3 | 27      | 0     | 0       |
| 0,937 | 814   | 55      | 0     | 0       |
| 0,948 | 786,9 | 45      | 0     | 0       |
| 0,965 | 768,3 | 4       | 0     | 0       |
| 0,980 | 767   | 1,48    | 0     | 0       |
| 0,994 | 757,6 | 0,1     | 0     | 0       |
| 1,040 | 688,1 | 0,00001 | 0     | 0       |
| 1,070 | 640,7 | 0,001   | 0     | 0       |
| 1,100 | 606,2 | 3,2     | 0     | 0       |
| 1,120 | 585,9 | 115     | 0     | 0       |
| 1,130 | 570,2 | 70      | 0     | 0       |
| 1,145 | 564,1 | 75      | 0     | 0       |
| 1,161 | 544,2 | 10      | 0     | 0       |
| 1,170 | 533,4 | 5       | 0     | 0       |
| 1,200 | 501,6 | 2       | 0     | 0       |
| 1,240 | 477,5 | 0,002   | 0     | 0,05    |
| 1,270 | 442,7 | 0,002   | 0     | 0,3     |
| 1,290 | 440   | 0,1     | 0     | 0,02    |
| 1,320 | 416,8 | 4       | 0     | 0,0002  |
| 1,350 | 391,4 | 200     | 0     | 0,00011 |
| 1,395 | 358,9 | 1000    | 0     | 0,00001 |
| 1,443 | 327,5 | 185     | 0     | 0,05    |
| 1,463 | 317,5 | 80      | 0     | 0,011   |
| 1,477 | 307,3 | 80      | 0     | 0,005   |
| 1,497 | 300,4 | 12      | 0     | 0,0006  |
| 1,520 | 292,8 | 0,16    | 0     | 0       |
| 1,539 | 275,5 | 0,002   | 0     | 0,005   |
| 1,558 | 272,1 | 0,0005  | 0     | 0,13    |
| 1,578 | 259,3 | 0,0001  | 0     | 0,04    |
| 1,592 | 246,9 | 0,00001 | 0     | 0,06    |
| 1,610 | 244   | 0,0001  | 0     | 0,13    |
| 1,630 | 243,5 | 0,001   | 0     | 0,001   |
| 1,646 | 234,8 | 0,01    | 0     | 0,0014  |
| 1,678 | 220,5 | 0,036   | 0     | 0,0001  |
| 1,740 | 190,8 | 1,1     | 0     | 0,00001 |

E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

|       |       |        |   |         |
|-------|-------|--------|---|---------|
| 1,800 | 171,1 | 130    | 0 | 0,00001 |
| 1,860 | 144,5 | 1000   | 0 | 0,0001  |
| 1,920 | 135,7 | 500    | 0 | 0,001   |
| 1,960 | 123   | 100    | 0 | 4,3     |
| 1,985 | 123,8 | 4      | 0 | 0,2     |
| 2,005 | 113   | 2,9    | 0 | 21      |
| 2,035 | 108,5 | 1      | 0 | 0,13    |
| 2,065 | 97,5  | 0,4    | 0 | 1       |
| 2,100 | 92,4  | 0,22   | 0 | 0,08    |
| 2,148 | 82,4  | 0,25   | 0 | 0,001   |
| 2,198 | 74,6  | 0,33   | 0 | 0,00038 |
| 2,270 | 68,3  | 0,5    | 0 | 0,001   |
| 2,360 | 63,8  | 4      | 0 | 0,0005  |
| 2,450 | 49,5  | 80     | 0 | 0,00015 |
| 2,500 | 48,5  | 310    | 0 | 0,00014 |
| 2,600 | 38,6  | 15000  | 0 | 0,00066 |
| 2,700 | 36,6  | 22000  | 0 | 100     |
| 2,800 | 32    | 8000   | 0 | 150     |
| 2,900 | 28,1  | 650    | 0 | 0,13    |
| 3,000 | 24,8  | 240    | 0 | 0,0095  |
| 3,100 | 22,1  | 230    | 0 | 0,001   |
| 3,200 | 19,6  | 100    | 0 | 0,8     |
| 3,300 | 17,5  | 120    | 0 | 1,9     |
| 3,400 | 15,7  | 19,5   | 0 | 1,3     |
| 3,500 | 14,1  | 3,6    | 0 | 0,075   |
| 3,600 | 12,7  | 3,1    | 0 | 0,01    |
| 3,700 | 11,5  | 2,5    | 0 | 0,00195 |
| 3,800 | 10,4  | 1,4    | 0 | 0,004   |
| 3,900 | 9,5   | 0,17   | 0 | 0,29    |
| 4,000 | 8,6   | 0,0045 | 0 | 0,025   |

Tabla A3. 1. Datos fijos de modelo.

A continuación, se representan cada uno de los parámetros de la tabla A3.1:

- Radiación extraterrestre:

E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

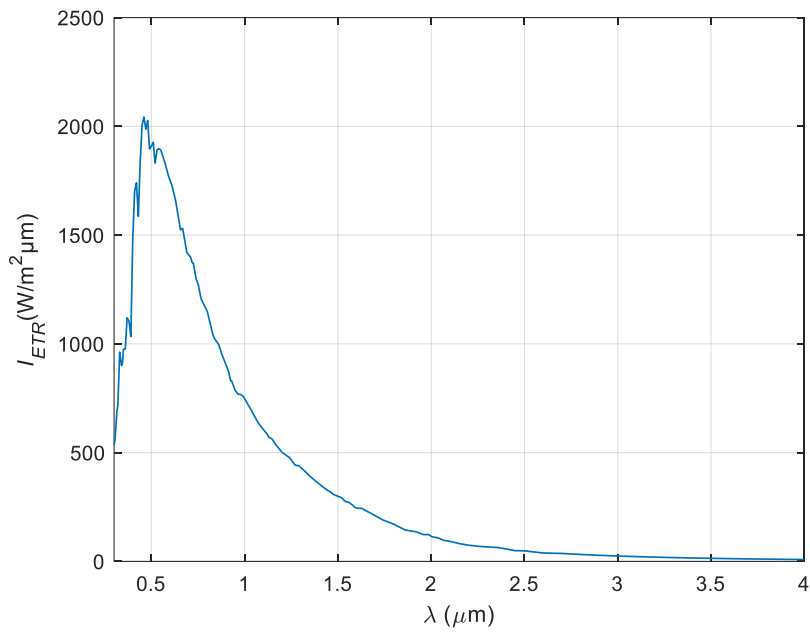


Figura A3. 1. Representación radiación extraterrestre.

- Coeficiente de absorción de vapor de agua atmosférico:

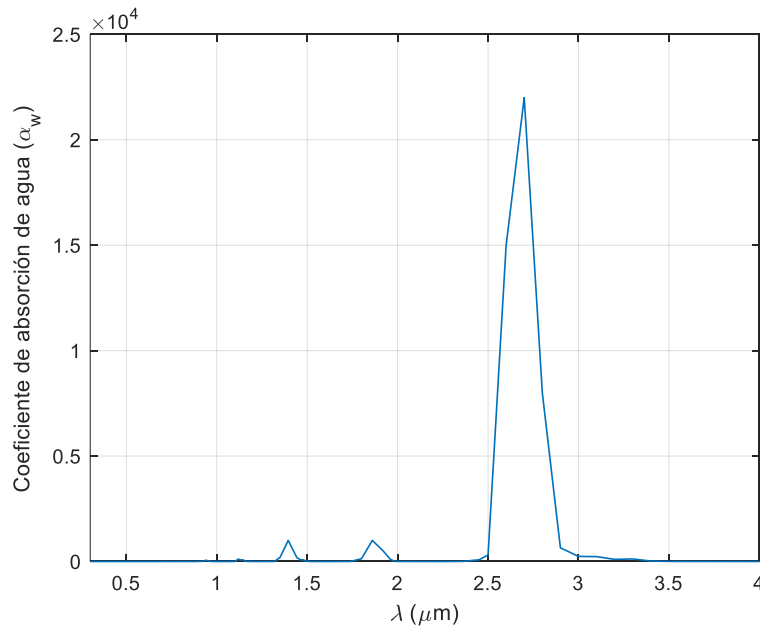


Figura A3. 2. Representación coeficiente de absorción de vapor de agua atmosférico.

E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

- Coeficiente de absorción de ozono:

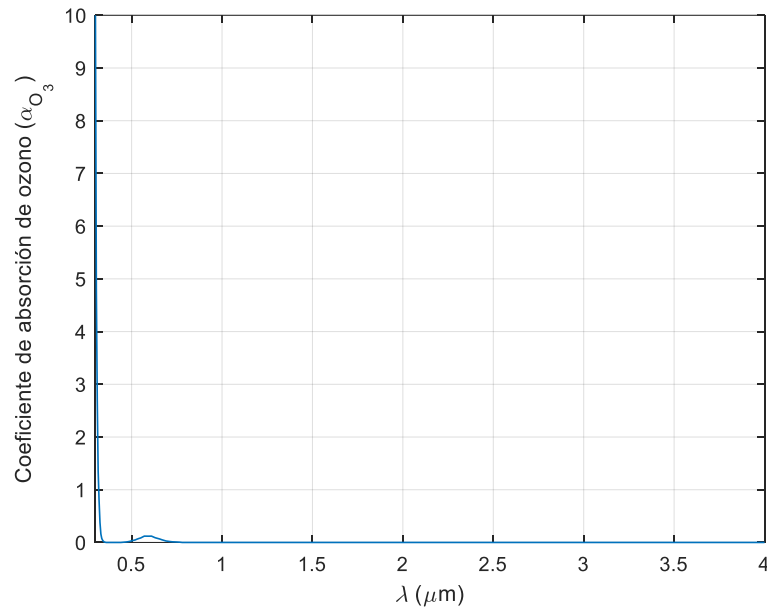


Figura A3. 3. Representación coeficiente de absorción de ozono.

- Coeficiente de absorción de los gases atmosféricos asumiendo que están uniformemente mezclados.

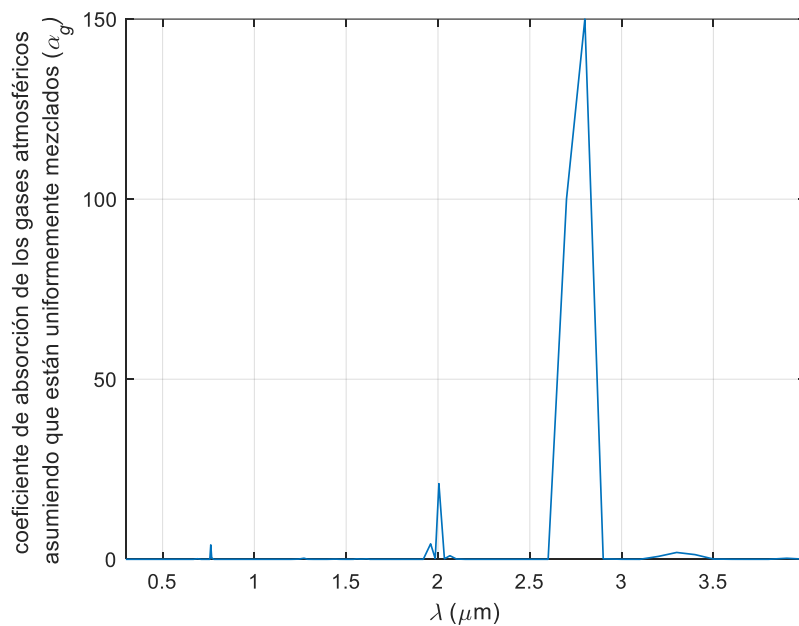


Figura A3. 4. Representación del coeficiente de absorción de los gases atmosféricos asumiendo que están uniformemente mezclados.

**E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL**



## A4. ESPECTRO SOLAR DE REFERENCIA

Se muestra el espectro de referencia de la norma ASTM-E-892-87 [30]:

| $\lambda$ ( $\mu\text{m}$ ) | $I_{dr}(\lambda) \left( \frac{W}{\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}} \right)$ | $I_{Total}(\lambda) \left( \frac{W}{\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}} \right)$ |
|-----------------------------|---|--|
| 0,305                       | 3,4   | 9,2  |
| 0,310                       | 15,6  | 40,8   |
| 0,315                       | 41,1  | 103,9  |
| 0,320                       | 71,2  | 174,4  |
| 0,325                       | 100,2   | 237,9  |
| 0,330                       | 152,4   | 381,0  |
| 0,335                       | 155,6   | 376,0  |
| 0,340                       | 179,4   | 419,5  |
| 0,345                       | 186,7   | 423,0  |
| 0,350                       | 212,0   | 466,2  |
| 0,360                       | 240,5   | 501,4  |
| 0,370                       | 324,0   | 642,1  |
| 0,380                       | 362,4   | 686,7  |
| 0,390                       | 381,7   | 694,6  |
| 0,400                       | 556,0   | 976,4  |
| 0,410                       | 656,3   | 1116,2   |
| 0,420                       | 690,8   | 1141,1   |
| 0,430                       | 641,9   | 1033,0   |
| 0,440                       | 798,5   | 1254,8   |
| 0,450                       | 956,6   | 1470,7   |
| 0,460                       | 990,8   | 1541,6   |
| 0,470                       | 998,0   | 1523,7   |
| 0,480                       | 1046,1  | 1569,3   |
| 0,490                       | 1005,1  | 1483,4   |
| 0,500                       | 1026,7  | 1492,6   |
| 0,510                       | 1066,7  | 1529,0   |
| 0,520                       | 1011,5  | 1431,1   |
| 0,530                       | 1084,9  | 1515,4   |
| 0,540                       | 1082,4  | 1494,5   |
| 0,550                       | 1102,2  | 1504,9   |
| 0,570                       | 1087,4  | 1447,1   |
| 0,590                       | 1024,3  | 1344,9   |
| 0,610                       | 1088,8  | 1431,5   |
| 0,630                       | 1062,1  | 1382,1   |
| 0,650                       | 1061,7  | 1368,4   |
| 0,670                       | 1046,2  | 1341,8   |
| 0,690                       | 859,2   | 1089,0   |
| 0,710                       | 1002,4  | 1269,0   |
| 0,718                       | 816,9   | 973,7  |
| 0,724                       | 842,8   | 1005,4   |
| 0,740                       | 971,0   | 1167,3   |
| 0,753                       | 956,3   | 1150,6   |
| 0,758                       | 942,2   | 1132,9   |
| 0,763                       | 524,8   | 619,8  |

E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

|       |       |        |
|-------|-------|--------|
| 0,768 | 830,7 | 993,3  |
| 0,780 | 908,9 | 1090,1 |
| 0,800 | 873,4 | 1042,4 |
| 0,816 | 712,0 | 818,4  |
| 0,824 | 660,2 | 756,5  |
| 0,832 | 765,5 | 883,2  |
| 0,840 | 799,8 | 925,1  |
| 0,860 | 815,2 | 943,4  |
| 0,880 | 778,3 | 899,4  |
| 0,905 | 630,4 | 721,4  |
| 0,915 | 565,2 | 643,3  |
| 0,925 | 586,4 | 665,3  |
| 0,930 | 348,1 | 389,0  |
| 0,937 | 224,2 | 248,9  |
| 0,948 | 271,4 | 302,2  |
| 0,965 | 451,2 | 507,7  |
| 0,980 | 549,7 | 623,0  |
| 0,994 | 630,1 | 719,7  |
| 1,040 | 582,9 | 665,5  |
| 1,070 | 539,7 | 614,4  |
| 1,100 | 366,2 | 397,6  |
| 1,120 | 98,1  | 105,0  |
| 1,130 | 169,5 | 182,2  |
| 1,130 | 169,5 | 182,2  |
| 1,137 | 118,7 | 127,4  |
| 1,161 | 301,9 | 326,7  |
| 1,180 | 406,8 | 443,3  |
| 1,200 | 375,2 | 408,2  |
| 1,235 | 423,6 | 463,1  |
| 1,290 | 365,7 | 398,1  |
| 1,320 | 223,4 | 241,1  |
| 1,350 | 30,1  | 31,3   |
| 1,395 | 1,4   | 1,5    |
| 1,443 | 51,6  | 53,7   |
| 1,463 | 97,0  | 101,3  |
| 1,477 | 97,3  | 101,7  |
| 1,497 | 167,1 | 175,5  |
| 1,520 | 239,3 | 253,1  |
| 1,539 | 248,8 | 264,3  |
| 1,558 | 249,3 | 265,0  |
| 1,578 | 222,3 | 235,7  |
| 1,592 | 227,3 | 238,4  |
| 1,610 | 210,5 | 220,4  |
| 1,630 | 224,7 | 235,6  |
| 1,646 | 215,9 | 226,3  |
| 1,678 | 202,8 | 212,5  |
| 1,740 | 158,2 | 165,3  |
| 1,800 | 28,6  | 29,6   |
| 1,860 | 1,8   | 1,9    |

E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES – CIUDAD REAL

|       |      |      |
|-------|------|------|
| 1,920 | 1,1  | 1,2  |
| 1,960 | 19,7 | 20,4 |
| 1,985 | 84,9 | 87,8 |
| 2,005 | 25,0 | 25,8 |
| 2,035 | 92,5 | 95,9 |
| 2,065 | 56,3 | 58,2 |
| 2,100 | 82,7 | 85,9 |
| 2,148 | 76,2 | 79,2 |
| 2,198 | 66,4 | 68,9 |
| 2,270 | 65,0 | 67,7 |
| 2,360 | 57,6 | 59,8 |
| 2,450 | 19,8 | 20,4 |
| 2,494 | 17,0 | 17,8 |
| 2,537 | 3,0  | 3,1  |
| 2,941 | 4,0  | 4,2  |
| 2,973 | 7,0  | 7,3  |
| 3,005 | 6,0  | 6,3  |
| 3,056 | 3,0  | 3,1  |
| 3,132 | 5,0  | 5,2  |
| 3,156 | 18,0 | 18,7 |
| 3,204 | 1,2  | 1,3  |
| 3,245 | 3,0  | 3,1  |
| 3,317 | 12,0 | 12,6 |
| 3,344 | 3,0  | 3,1  |
| 3,450 | 12,2 | 12,8 |
| 3,573 | 11,0 | 11,5 |
| 3,765 | 9,0  | 9,4  |
| 4,045 | 6,9  | 7,2  |

Tabla A4. 1. Datos norma ASTM-E891-87.

A continuación, se representa:

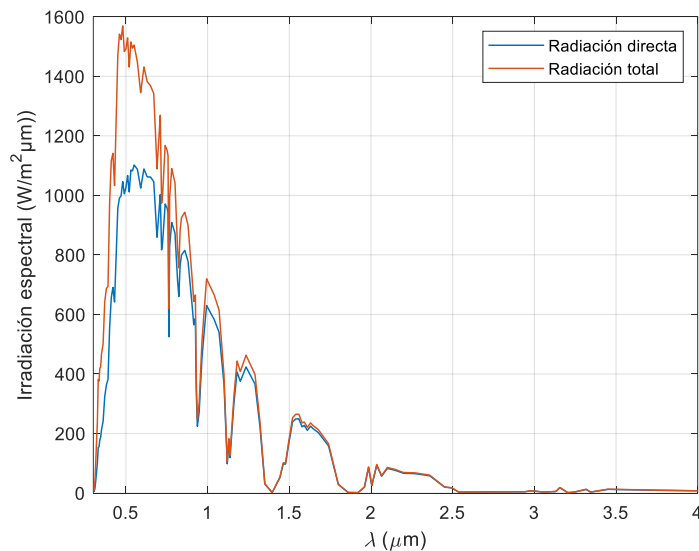


Figura A4. 1. Representación norma ASTM-E891-87.