



EXPLORADOR SOLAR

Reporte Generación Eléctrica Fotovoltaica



fcfm

Geofísica

FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE



Ministerio de
Energía

Gobierno de Chile

Reporte

Generación fotovoltaica y datos meteorológicos

01/12/2020

1 Introducción

En este reporte se presenta información sobre el recurso solar basada en la modelación numérica de la transferencia de radiación solar en la atmósfera y en datos satelitales de alta resolución. El producto obtenido ha sido validado con observaciones, sin embargo, no debe ser considerado como definitivo antes de ser corroborado con mediciones in situ.

El modelo utilizado para la transferencia radiativa en cielo despejado es el modelo CLIRAD-SW, el cual considera las interacciones de la radiación con la atmósfera por bandas espectrales de manera independiente. El modelo utiliza datos de temperatura, humedad y aerosoles de reanálisis meteorológicos y datos climatológicos de CO₂, CH₄ y O₃.

La información para la nubosidad que se ha utilizado proviene de los satélites GOES-EAST para los años 2004 a 2016. Con esta base de datos se ha identificado la nubosidad y sus características radiativas, y a través de un modelo empírico se ha modificado el resultado obtenido para una atmósfera con cielo despejado para adaptarlo a una condición de cielo nublado.

A continuación encontrará los resultados del cálculo de la generación del sistema fotovoltaico evaluado, de acuerdo a los parámetros ingresados, el impacto de la radiación incidente y las condiciones meteorológicas en el sitio de interés. Además se muestra información sobre la radiación (global, directa y difusa) incidente en el panel de acuerdo a las características del arreglo fotovoltaico escogido, la radiación incidente en un plano horizontal y los promedios de la nubosidad, temperatura y la velocidad del viento en el sitio seleccionado.

2 Sitio

En esta sección se muestran las características topográficas del sitio escogido por el usuario.

Tabla 1: Ubicación del sitio seleccionado

| | |
|------------------|--------------|
| Nombre | Mi Sitio |
| Latitud | 30.0191 °S |
| Longitud | 71.2001 °O |
| Elevación | 211 <i>m</i> |



Figura 1: Mapas del sitio seleccionado

2.1 Sombras topográficas

Se ha utilizado una base de datos de altura del terreno de 90 [m] de resolución y se ha considerado la topografía dentro de un radio de 180 [km] desde el sitio seleccionado para obtener las sombras proyectadas por los obstáculos topográficos en el entorno del sitio. Este análisis NO considera el impacto de otro tipo de obstáculos como por ejemplo edificios, árboles, cables, etc.

Tabla 2: Frecuencia de sombras.

| Mes | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|-----|-------|------|------|-------|-------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| % | 45.83 | 48.3 | 53.0 | 54.17 | 60.04 | 62.5 | 60.66 | 55.12 | 54.14 | 50.4 | 47.04 | 45.86 |

(a) Porcentaje de tiempo con sombras cada mes en horario diurno.

| Hora | 00 | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 10 | 11 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-----|-----|
| % | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 64.02 | 24.12 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

| Hora | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| % | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 19.48 | 67.14 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 |

(b) Porcentaje del año con sombras en cada hora.

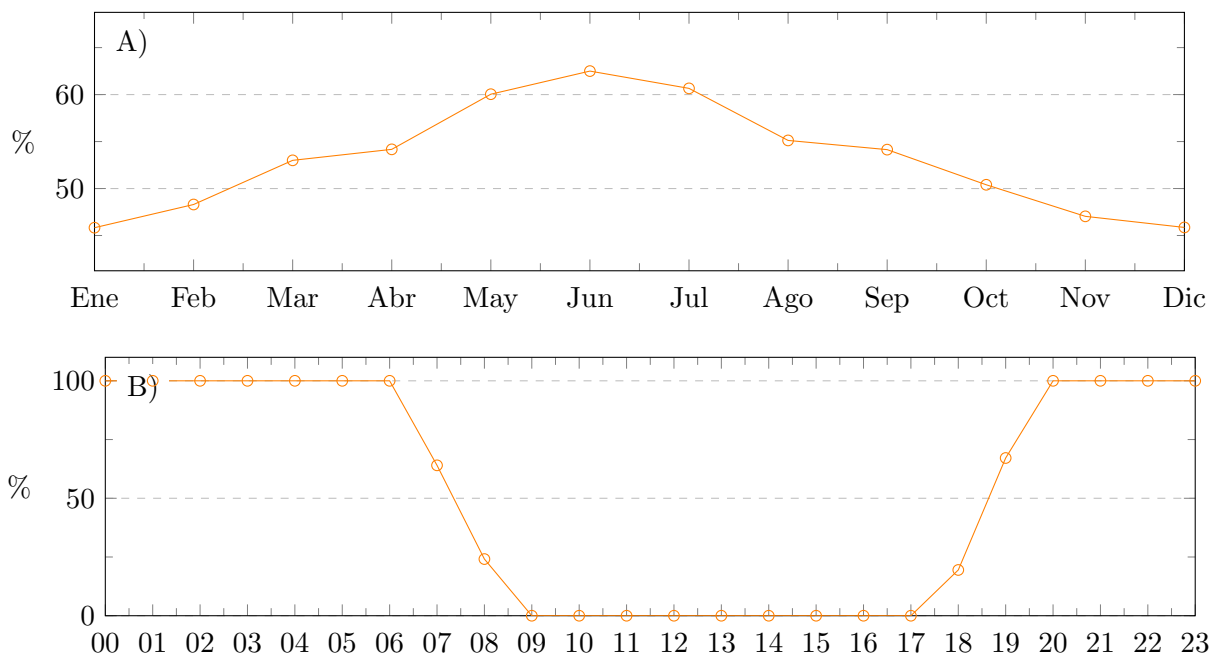


Figura 2: A) Ciclo anual de frecuencia de sombras, B) Ciclo diario de frecuencia de sombras.

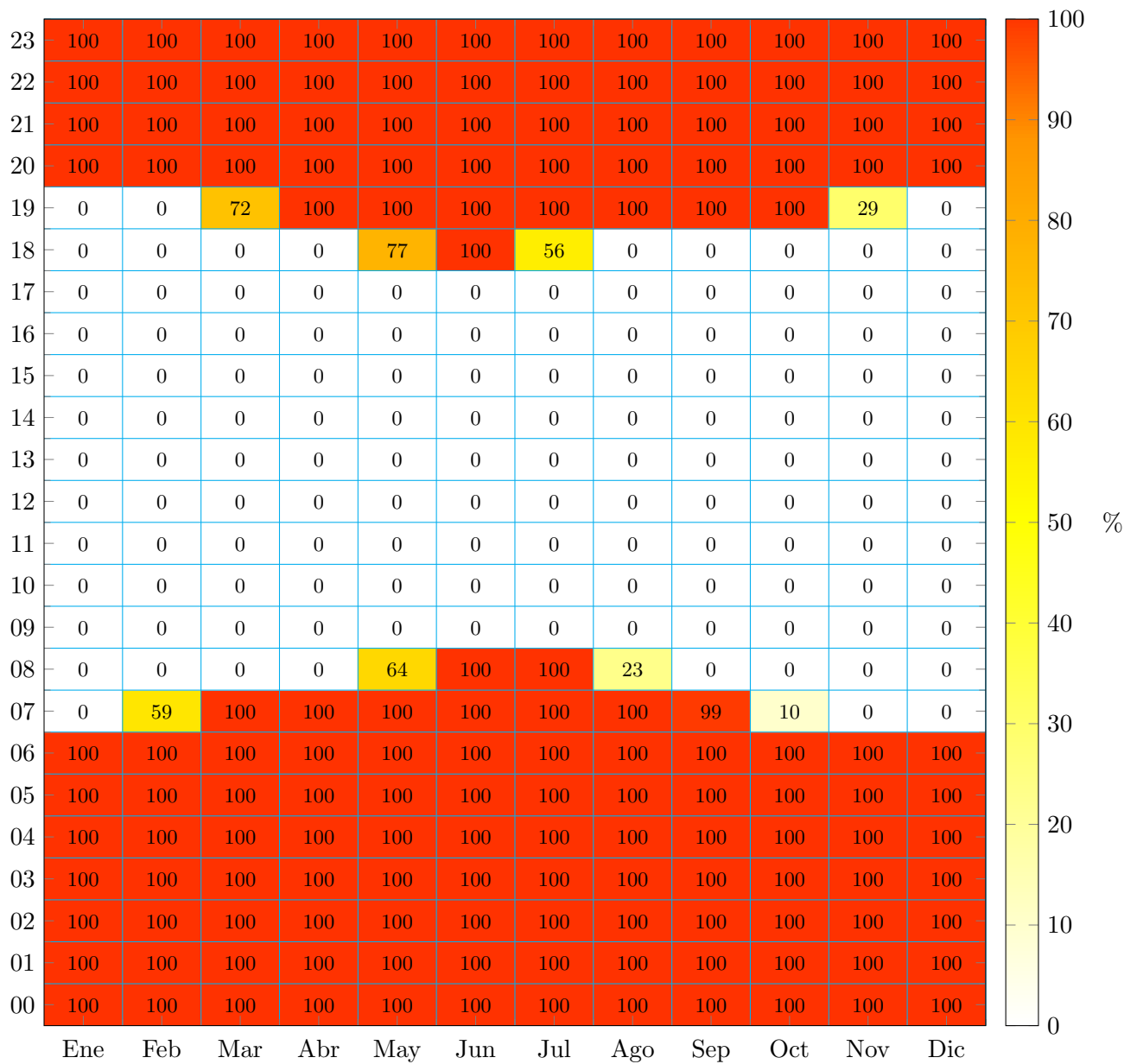


Figura 3: Porcentaje de la hora con sombras durante cada mes.

3 Generación Fotovoltaica

3.1 Características del arreglo fotovoltaico

Las características del sistema ingresadas por el usuario para la simulación de la generación fotovoltaica y los resultados se presentan en esta sección.

Tabla 3: Características del sistema fotovoltaico

| | |
|--------------------------|--------------------------|
| Configuración | Fijo Inclinado |
| Montaje | open rack cell glassback |
| Inclinación | 30° |
| Azimut | 0° |
| Coef. Temperatura | -0.45 %/°C |
| Ef. Inversor | 96.0 % |
| Pérdidas | 14 % |

3.2 Resultados de la generación eléctrica fotovoltaica

Tabla 4: Resultados de la generación fotovoltaica

| | |
|----------------------------|----------|
| Capacidad Instalada | 2.1 kW |
| Total Diario | 8.0 kWh |
| Total Anual | 3.01 MWh |
| Factor de Planta | 16.0 % |

Tabla 5: Ciclo anual de la generación fotovoltaica.

| Mes | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|
| <i>kWh</i> | 298.25 | 280.36 | 280.45 | 232.14 | 205.98 | 189.76 | 208.18 | 230.66 | 245.31 | 278.33 | 271.0 | 291.38 |

(a) Promedio de la generación total en cada mes.

Tabla 6: Ciclo diario de la generación fotovoltaica.

| Hora | 00 | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 10 | 11 |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|
| <i>kWh</i> | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.04 | 0.24 | 0.49 | 0.7 | 0.88 |
| Hora | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
| <i>kWh</i> | 1.05 | 1.16 | 1.15 | 1.03 | 0.84 | 0.51 | 0.14 | 0.01 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

(a) Promedio de la generación para cada hora.

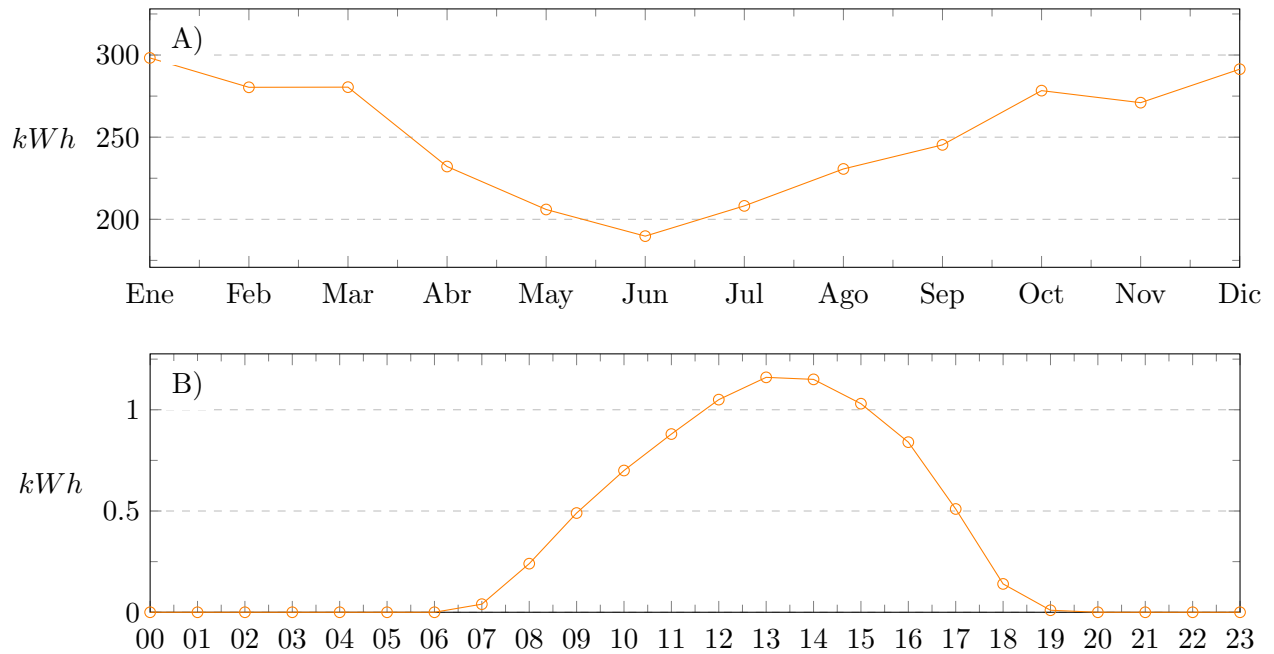


Figura 4: A) Ciclo anual de generación, B) Ciclo diario de generación

Tabla 7: Total anual de la generación para cada año en la base de datos.

| Año | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| MWh | 3.02 | 2.99 | 2.98 | 3.16 | 3.02 | 2.97 | 3.07 | 2.99 | 3.16 | 3.06 | 3.06 | 2.84 | 2.84 |

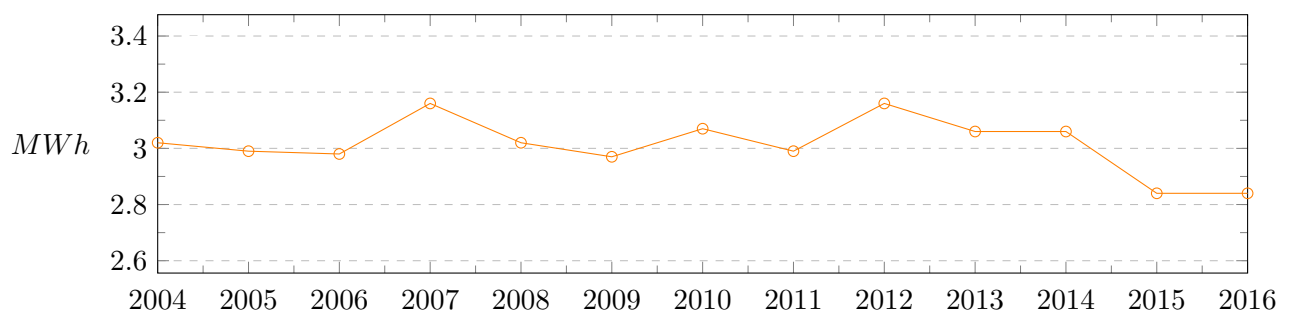


Figura 5: Variación interanual de la generación fotovoltaica.

3.3 Radiación

Las siguientes tablas y gráficos muestran los promedios de la radiación global, directa y difusa incidente sobre un plano horizontal y sobre un plano orientado hacia el norte, con una inclinación igual a la latitud del sitio.

3.3.1 Insolación mensual

Tabla 8: Promedio mensual de la insolación diaria en unidades de $[kWh/m^2/día]$.

| Mes | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Directa | 5.52 | 5.35 | 4.15 | 2.89 | 2.12 | 1.88 | 2.1 | 2.59 | 3.34 | 4.32 | 4.83 | 5.4 |
| Difusa | 1.41 | 1.26 | 1.15 | 1.02 | 0.87 | 0.78 | 0.79 | 0.97 | 1.15 | 1.29 | 1.43 | 1.45 |
| Global | 6.93 | 6.61 | 5.3 | 3.91 | 2.99 | 2.66 | 2.89 | 3.56 | 4.49 | 5.61 | 6.26 | 6.85 |

(a) Radiación incidente en el plano horizontal

| Mes | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Directa | 4.78 | 5.18 | 4.66 | 3.88 | 3.3 | 3.15 | 3.37 | 3.67 | 4.01 | 4.39 | 4.33 | 4.56 |
| Difusa | 1.32 | 1.18 | 1.07 | 0.96 | 0.81 | 0.73 | 0.74 | 0.9 | 1.07 | 1.21 | 1.33 | 1.36 |
| Suelo | 0.11 | 0.11 | 0.09 | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 | 0.07 | 0.09 | 0.1 | 0.11 |
| Global | 6.21 | 6.47 | 5.82 | 4.9 | 4.16 | 3.92 | 4.16 | 4.63 | 5.15 | 5.69 | 5.76 | 6.03 |

(b) Radiación incidente en un plano con inclinación igual a la latitud del sitio.

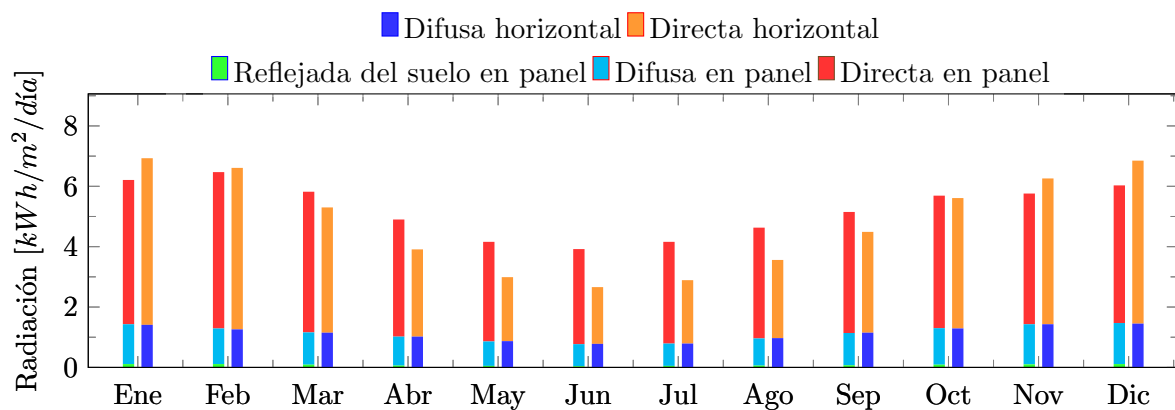


Figura 6: Promedio mensual de la insolación diaria incidente en un plano horizontal y en un plano inclinado, separada en sus componentes directa, difusa y reflejada del suelo.

3.3.2 Ciclo diario de radiación

 Tabla 9: Promedio horario de la radiación incidente en unidades de $[W/m^2]$.

| Hora | 00 | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 10 | 11 |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
| Directa | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 24.29 | 91.01 | 178.0 | 279.71 | 372.53 |
| Difusa | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 3.01 | 22.24 | 59.93 | 95.43 | 113.65 | 122.88 |
| Global | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 3.01 | 46.53 | 150.94 | 273.43 | 393.36 | 495.41 |
| Hora | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
| Directa | 468.27 | 537.36 | 535.63 | 480.73 | 385.31 | 237.22 | 94.35 | 14.86 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Difusa | 134.49 | 134.94 | 128.58 | 111.27 | 92.95 | 67.96 | 34.36 | 10.05 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Global | 602.76 | 672.3 | 664.21 | 592.0 | 478.26 | 305.18 | 128.71 | 24.91 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

(a) Radiación incidente en el plano horizontal.

| Hora | 00 | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 10 | 11 |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
| Directa | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 8.57 | 95.89 | 204.12 | 318.96 | 426.31 |
| Difusa | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 2.8 | 20.75 | 55.92 | 89.03 | 106.04 | 114.65 |
| Suelo | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.05 | 0.75 | 2.43 | 4.4 | 6.32 | 7.96 |
| Global | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 2.85 | 30.07 | 154.24 | 297.55 | 431.32 | 548.92 |
| Hora | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
| Directa | 534.11 | 610.01 | 605.55 | 538.65 | 429.84 | 256.88 | 72.31 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Difusa | 125.48 | 125.9 | 119.96 | 103.82 | 86.72 | 63.41 | 32.06 | 9.38 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Suelo | 9.69 | 10.81 | 10.68 | 9.52 | 7.69 | 4.91 | 2.07 | 0.4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Global | 669.28 | 746.72 | 736.19 | 651.99 | 524.25 | 325.2 | 106.44 | 9.78 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

(b) Radiación incidente en un plano con inclinación igual a la latitud del sitio.

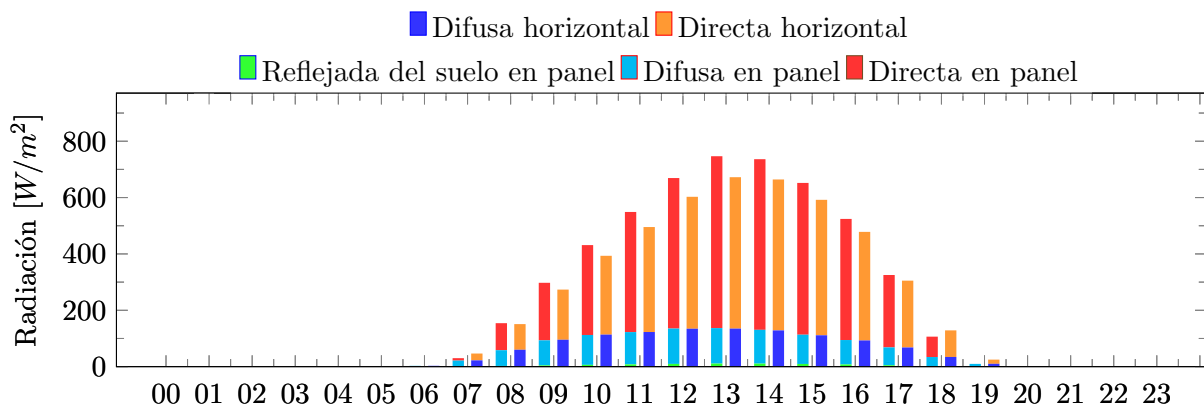


Figura 7: Promedio horario de la radiación global instantánea incidente en un plano horizontal y en un plano inclinado, separada en sus componentes directa, difusa y reflejada en el suelo.

3.3.3 Variabilidad año a año

 Tabla 10: Promedio anual de la insolación diaria en unidades de $[kWh/m^2/día]$.

| Año | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Directa | 3.65 | 3.62 | 3.71 | 3.97 | 3.8 | 3.71 | 3.77 | 3.61 | 4.01 | 3.75 | 3.81 | 3.32 | 3.36 |
| Difusa | 1.16 | 1.17 | 1.12 | 1.07 | 1.1 | 1.11 | 1.09 | 1.15 | 1.08 | 1.1 | 1.11 | 1.22 | 1.23 |
| Global | 4.81 | 4.79 | 4.83 | 5.04 | 4.9 | 4.82 | 4.86 | 4.76 | 5.09 | 4.85 | 4.92 | 4.54 | 4.59 |

(a) Radiación incidente en el plano horizontal.

| Año | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Directa | 4.08 | 4.01 | 4.06 | 4.41 | 4.15 | 4.05 | 4.24 | 4.04 | 4.41 | 4.22 | 4.21 | 3.72 | 3.71 |
| Difusa | 1.08 | 1.09 | 1.05 | 1.0 | 1.02 | 1.04 | 1.02 | 1.07 | 1.01 | 1.03 | 1.03 | 1.14 | 1.15 |
| Suelo | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.07 | 0.07 |
| Global | 5.24 | 5.18 | 5.19 | 5.49 | 5.25 | 5.17 | 5.34 | 5.19 | 5.5 | 5.33 | 5.32 | 4.93 | 4.93 |

(b) Radiación incidente en un plano con inclinación igual a la latitud del sitio.

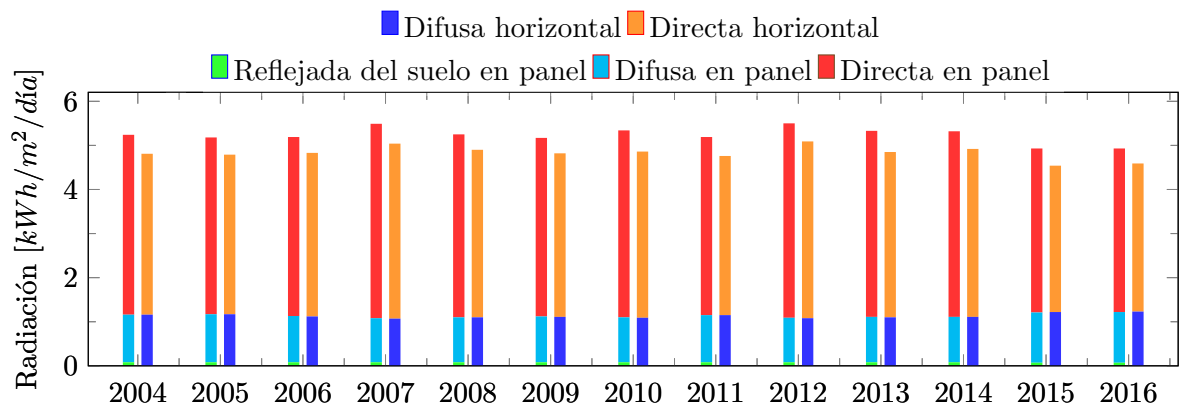


Figura 8: Promedio anual de la insolación diaria incidente en un plano horizontal y en un plano inclinado para cada año de simulación.

3.3.4 Ciclo diario-anual

Los siguientes gráficos muestran el ciclo diario y el ciclo anual de la radiación solar incidente. El eje horizontal indica la hora del día (UTC-4) y el eje vertical indica el mes del año. La escala de colores indica el valor medio de la radiación instantánea incidente en el panel en $[W/m^2]$ para cada hora y mes.

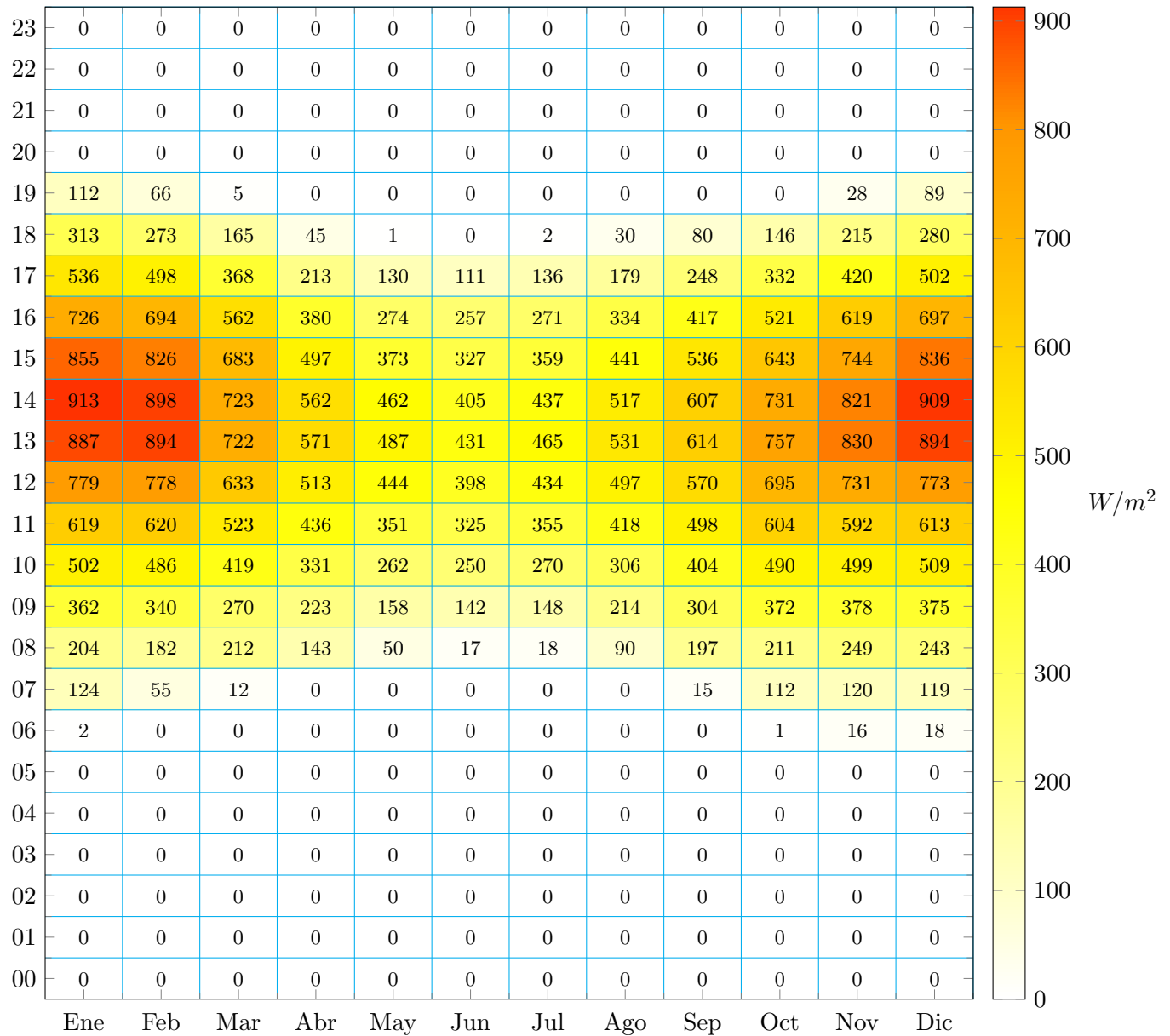


Figura 9: Promedio de la radiación global horizontal para cada hora y mes.

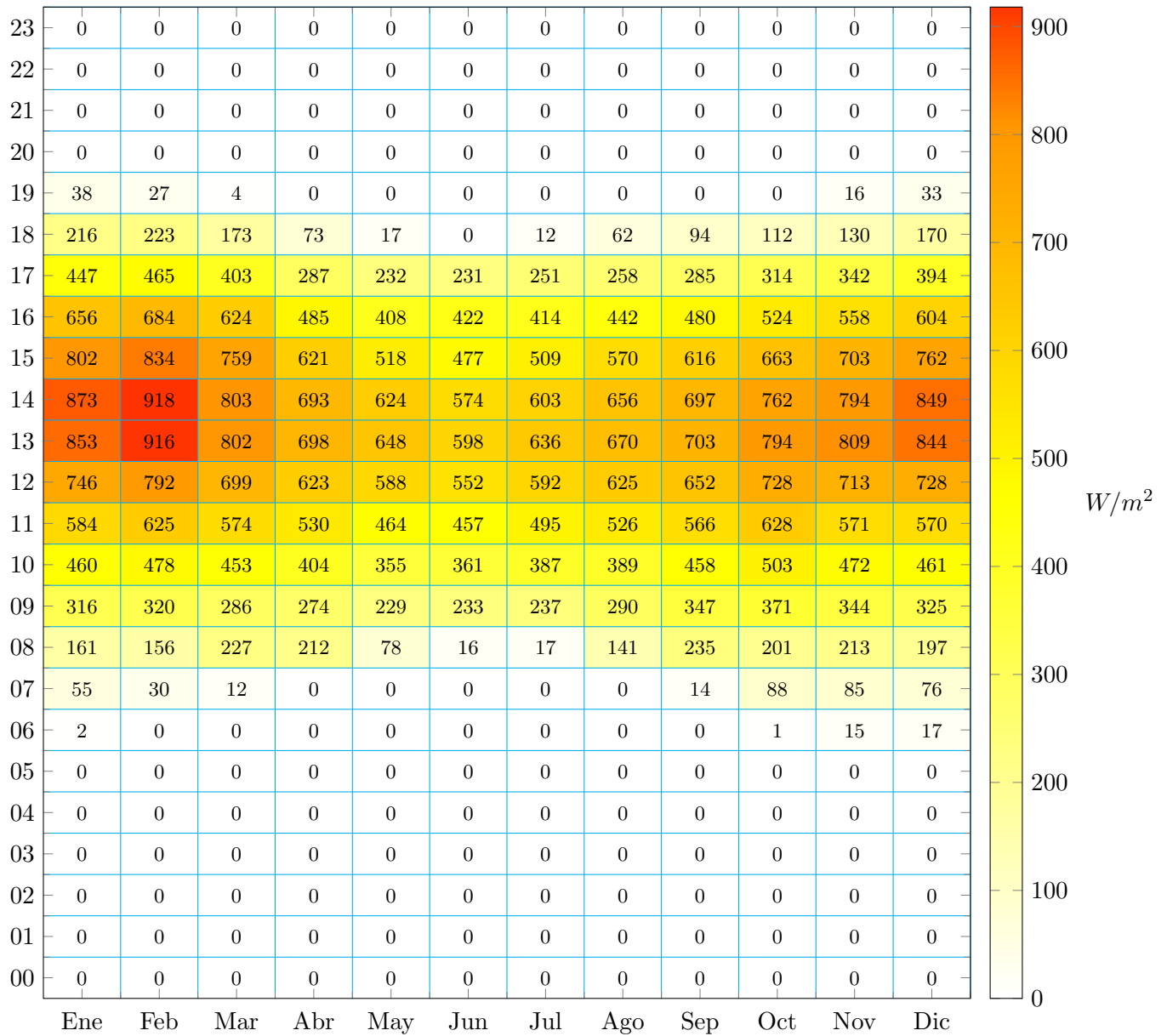


Figura 10: Promedio de la radiación global incidente en un plano con inclinación igual a la latitud del sitio, para cada hora y mes.

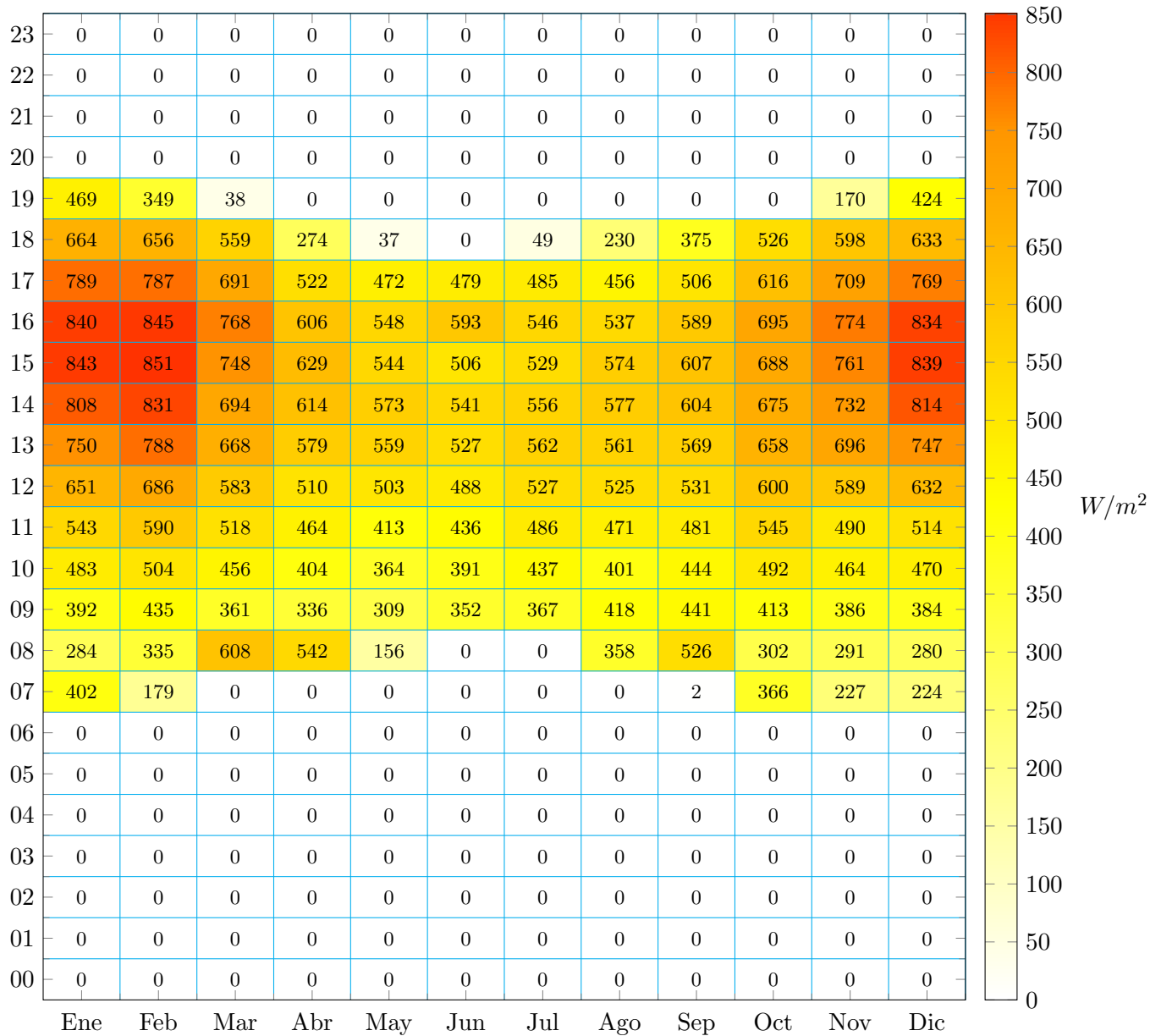


Figura 11: Promedio de la radiación directa normal para cada hora y mes.

3.4 Nubosidad

La nubosidad es la componente atmosférica que remueve mayor cantidad de radiación incidente. A partir de imágenes del satélite geostacionado GOES, se ha calculado la frecuencia de nubosidad para cada hora y mes. Debido a que para la mayor parte del país se utilizan las imágenes del canal visible en la detección de nubosidad, el dato solo está disponible para las horas diurnas.

Tabla 11: Frecuencia de la nubosidad diurna.

| Mes | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| % | 15.76 | 12.83 | 13.46 | 15.59 | 14.89 | 13.32 | 13.53 | 15.76 | 16.54 | 17.25 | 19.79 | 18.53 |

(a) Porcentaje del mes con nubosidad diurna

| Hora | 00 | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 10 | 11 |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| % | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.42 | 15.24 | 27.87 | 52.23 | 51.33 | 48.52 |

| Hora | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| % | 42.66 | 35.67 | 31.39 | 27.17 | 20.32 | 15.22 | 6.68 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

(b) Porcentaje de la hora con nubosidad. Los ceros corresponden a horas donde no hay datos de nubosidad.

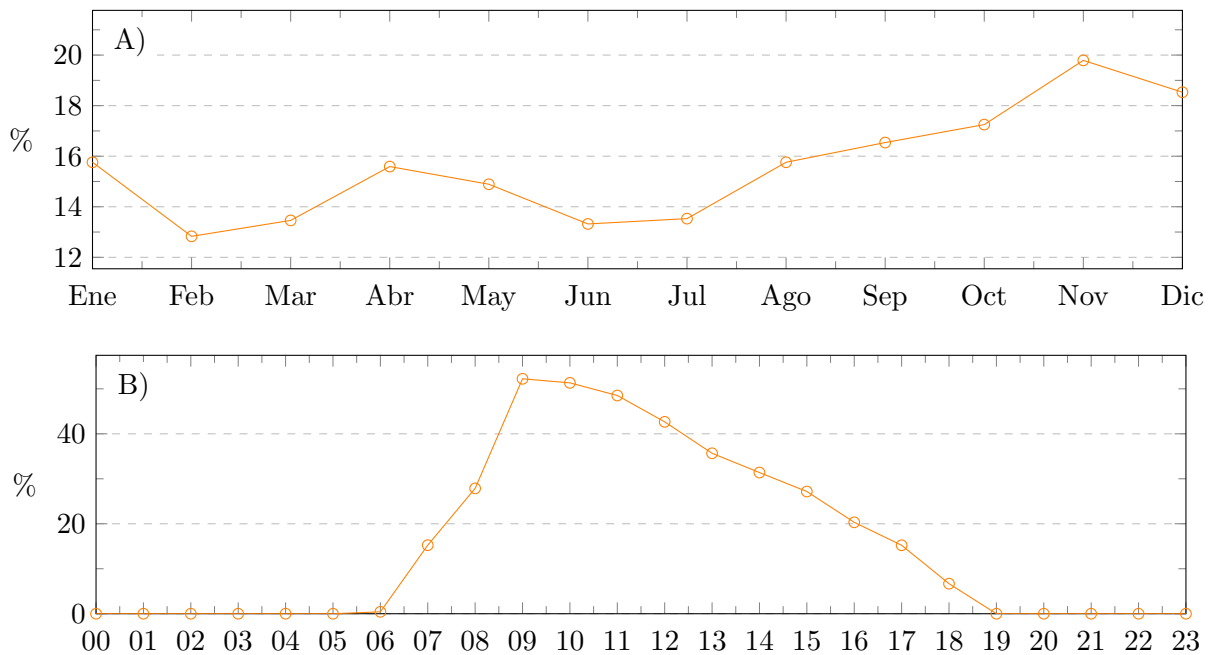


Figura 12: A) Ciclo anual de frecuencia de nubosidad diurna, B) Ciclo diario de frecuencia de nubosidad.

Tabla 12: Variación interanual del porcentaje de nubosidad.

| Año | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 |
|-----|-------|-------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| % | 16.27 | 16.38 | 15.7 | 13.57 | 15.0 | 15.57 | 14.11 | 15.55 | 13.49 | 15.43 | 15.34 | 18.56 | 18.02 |

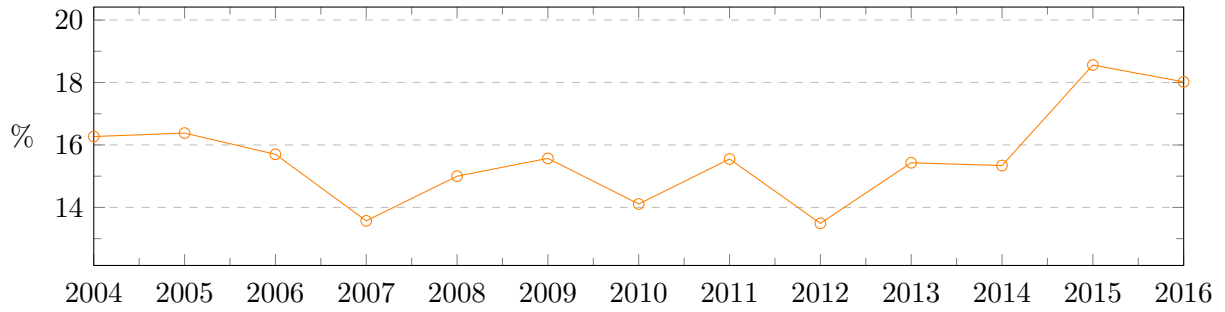


Figura 13: Variación interanual del porcentaje de nubes.

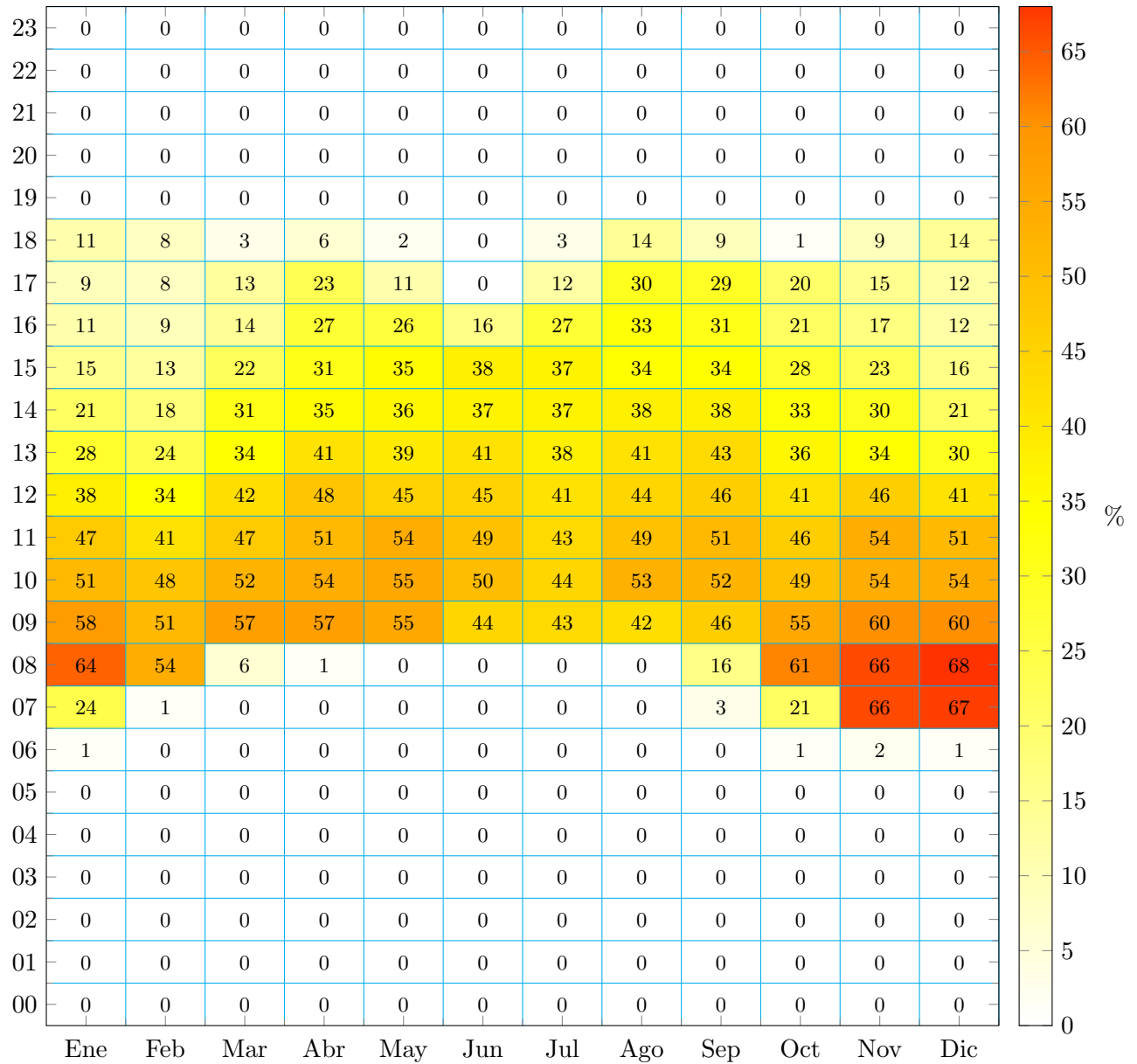


Figura 14: Porcentaje de tiempo con nubes para cada hora y mes.

3.5 Temperatura

La temperatura ambiental afecta la eficiencia de las celdas fotovoltaicas. Las estimaciones de temperatura que se muestran en este capítulo están basadas en los resultados del Explorador Eólico, los cuales se basan en las simulaciones hechas con el modelo meteorológico WRF a 1[km] de resolución para el año 2010.

Tabla 13: Temperatura media.

| Mes | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|-----|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| °C | 18.47 | 18.45 | 17.77 | 16.4 | 15.95 | 15.12 | 13.88 | 13.53 | 14.55 | 14.95 | 16.38 | 17.14 |

(a) Temperatura promedio mensual.

| Hora | 00 | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 10 | 11 |
|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| °C | 14.0 | 13.44 | 12.88 | 12.44 | 12.03 | 11.68 | 11.34 | 11.71 | 12.75 | 14.37 | 16.31 | 18.49 |

| Hora | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| °C | 19.74 | 20.86 | 21.65 | 21.71 | 21.09 | 20.16 | 18.93 | 17.67 | 16.55 | 15.65 | 14.94 | 14.48 |

(b) Temperatura promedio para cada hora.

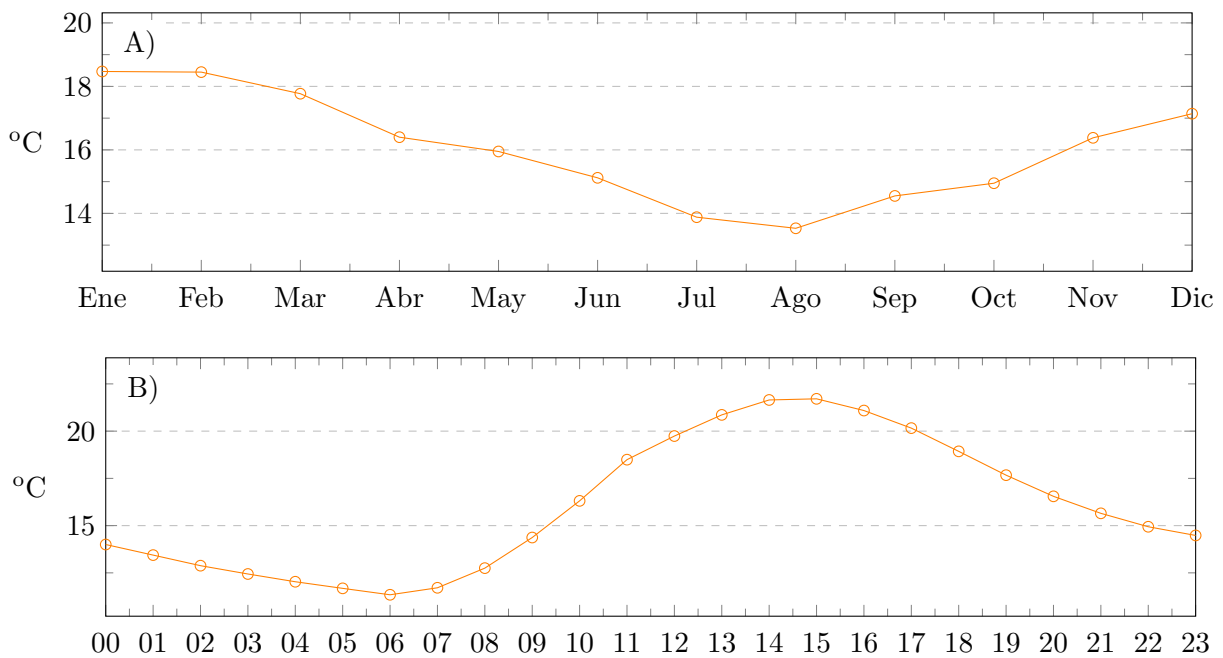


Figura 15: A) Ciclo diario de la temperatura media, B) Ciclo anual de la temperatura media.

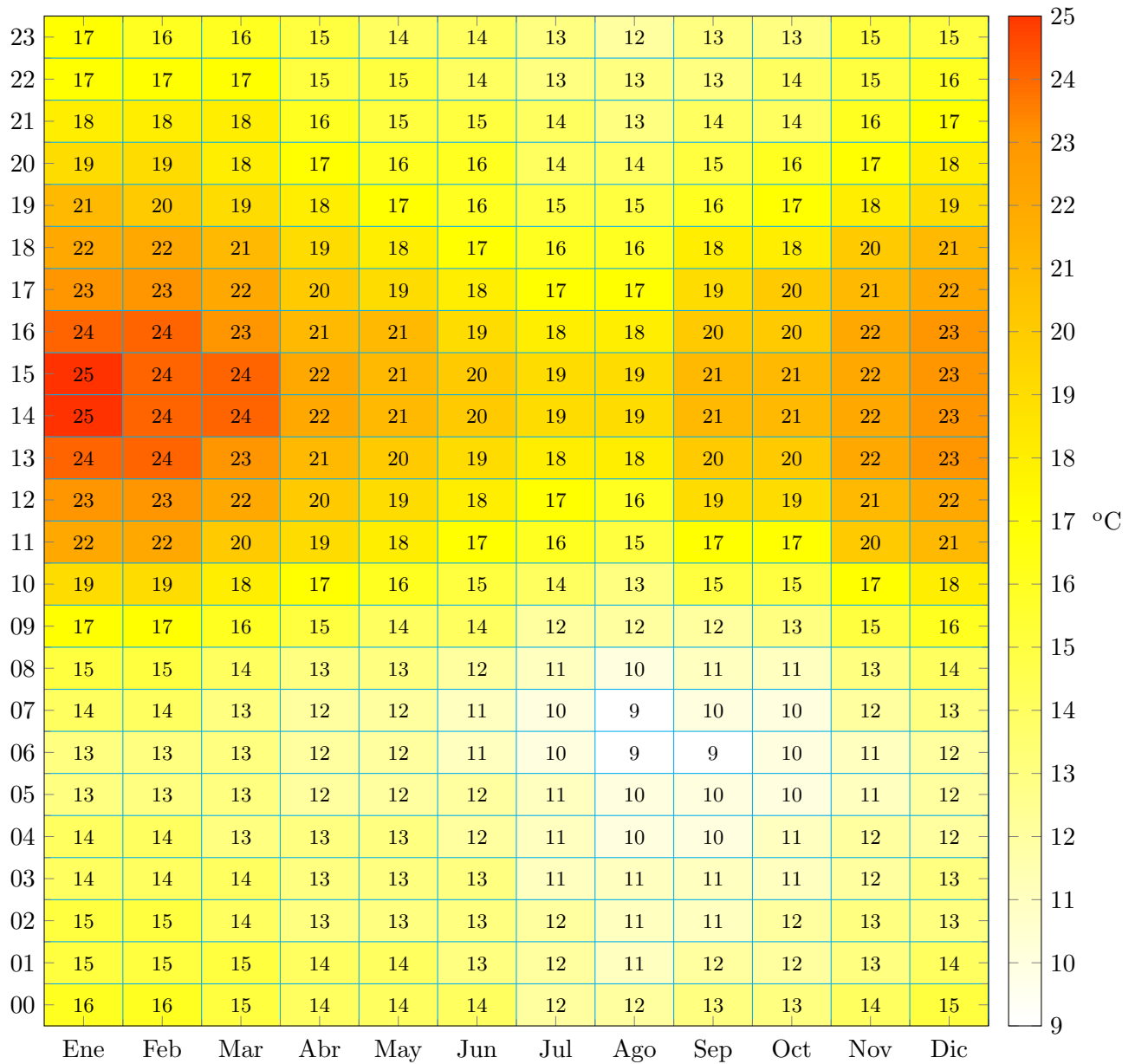


Figura 16: Promedio de la temperatura para cada mes y hora.

3.6 Viento

La velocidad del viento interviene en el enfriamiento de las celdas fotovoltaicas, y por lo tanto en su eficiencia, además puede afectar la integridad del montaje de los paneles. Las estimaciones de viento aquí presentadas corresponden a los resultados del Explorador Eólico para una altura de 5.5 metros, calculados con el modelo WRF a 1 [km] de resolución para el año 2010.

Tabla 14: Velocidad del viento a 5,5[m].

| Mes | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|------------|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|-----|------|
| <i>m/s</i> | 2.17 | 2.07 | 1.83 | 1.74 | 1.62 | 1.6 | 1.63 | 1.64 | 1.89 | 1.97 | 2.2 | 2.24 |

(a) Promedio mensual de la magnitud del viento.

| Hora | 00 | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 10 | 11 |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| <i>m/s</i> | 1.32 | 1.37 | 1.45 | 1.43 | 1.42 | 1.42 | 1.25 | 1.29 | 1.33 | 1.41 | 1.79 | 2.51 |

| Hora | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
|------------|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|-----|------|
| <i>m/s</i> | 2.97 | 3.29 | 3.46 | 3.46 | 3.26 | 2.9 | 1.94 | 1.25 | 1.16 | 1.25 | 1.2 | 1.01 |

(b) Promedio de la magnitud del viento para cada hora.

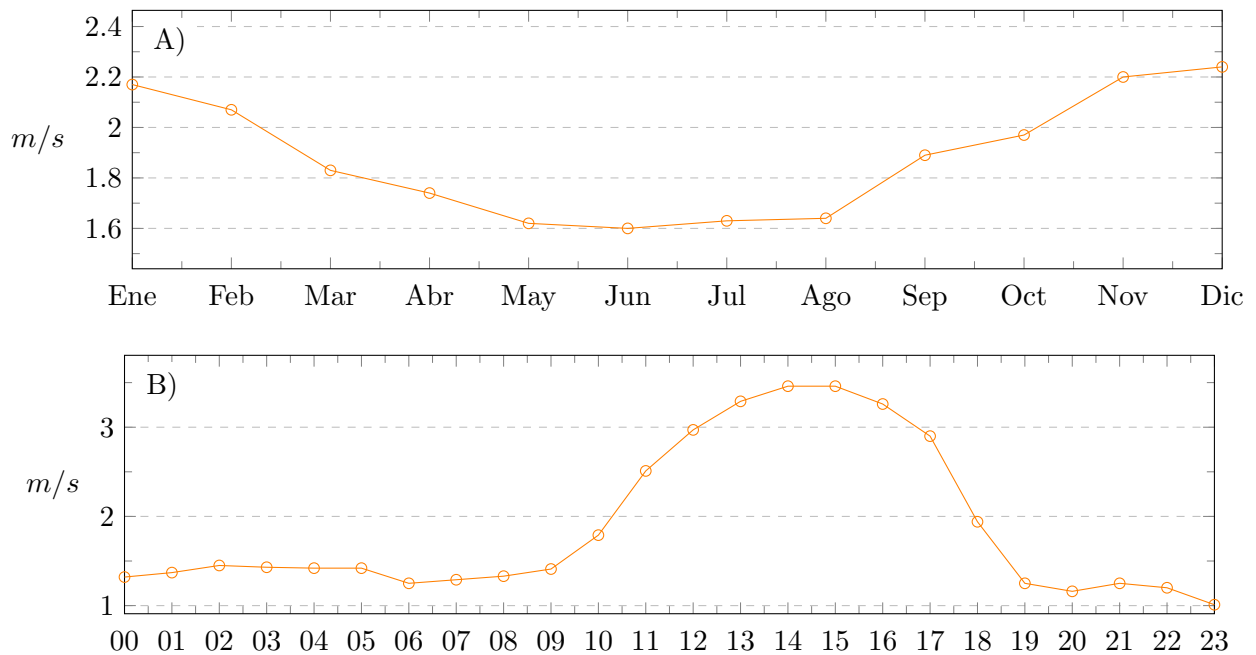


Figura 17: A) Ciclo diario de la magnitud del viento, B) Ciclo anual de la magnitud del viento.

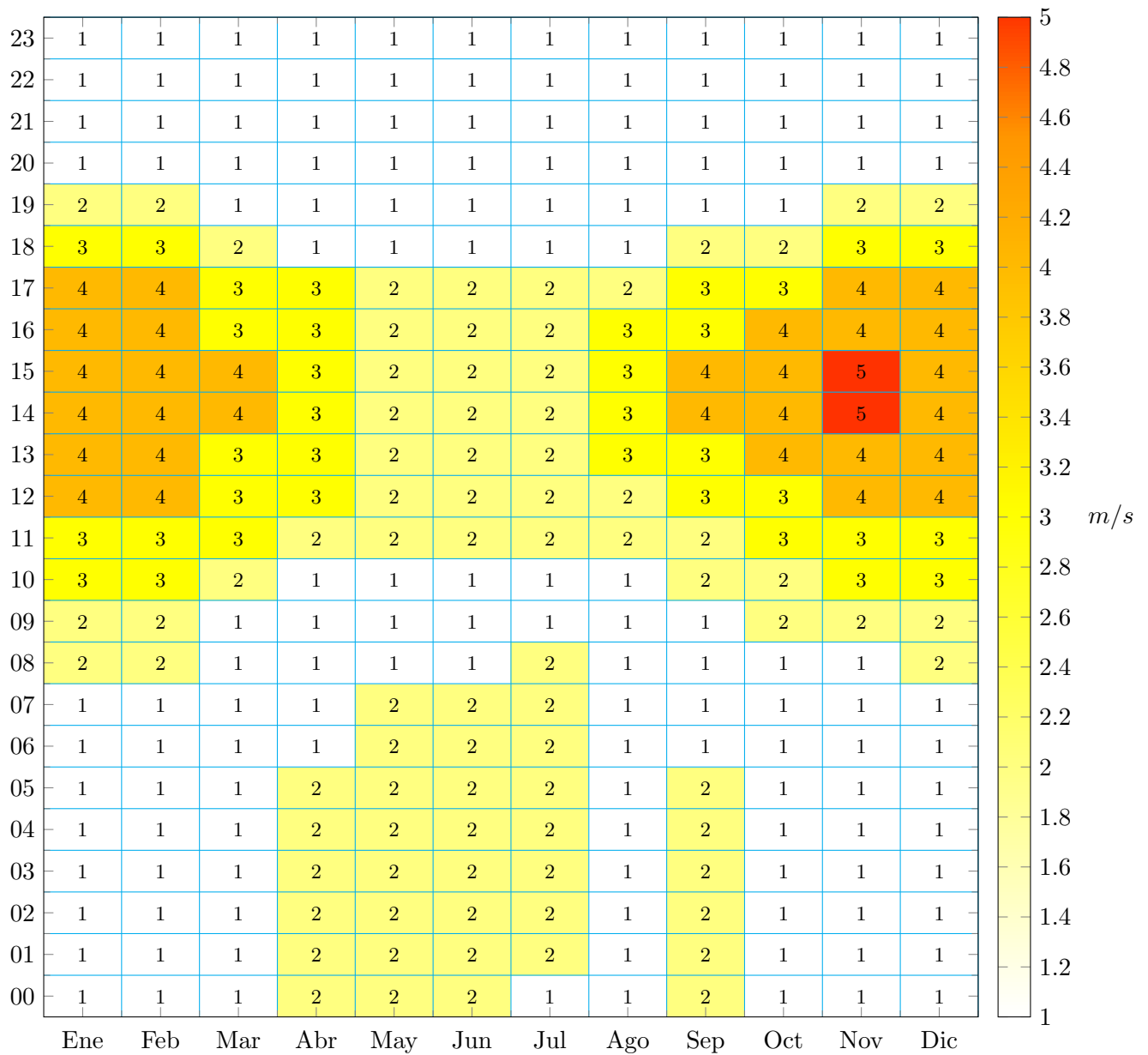


Figura 18: Promedio de la magnitud del viento para cada mes y hora.