

DOI: [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v6i4.2591](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i4.2591)

## Predicción del ciclo solar 25 por el método combinado

**Lic. Diego Benitez**

[diegobenpalacios@gmail.com](mailto:diegobenpalacios@gmail.com)

<https://orcid.org/0000-0003-3400-7510>

Universidad Nacional de Asunción

San Lorenzo – Paraguay

**MSc. José Gómez**

[jmgomez@pol.una.py](mailto:jmgomez@pol.una.py)

<https://orcid.org/0000-0002-6266-2435>

Universidad Nacional de Asunción

Observatorio Astronómico Prof. Alexis Troche Boggino

Departamento de Investigación DIP, FP-UNA

San Lorenzo – Paraguay

### RESUMEN

En este trabajo se ha pronosticado el perfil del ciclo solar 25 actualmente en curso mediante el Método Combinado, con una predicción del máximo de amplitud suavizada del orden de los  $108.3 \pm 4.7$ , ligeramente inferior al ciclo precedente y con una duración promedio de la fase ascendente de  $61 \pm 12$  meses, para una duración promedio total de  $132 \pm 27$  meses. Se ha aplicado el mismo procedimiento a los tres ciclos inmediatos anteriores obteniéndose buenos resultados en la parte ascendente de los mismos.

**Palabras claves:** *manchas solares; actividad solar; ciclo solar 25.*

Correspondencia: [jmgomez@pol.una.py](mailto:jmgomez@pol.una.py)

Artículo recibido: 15 junio 2022. Aceptado para publicación: 29 junio 2022.

Conflictos de Interés: Ninguna que declarar

Todo el contenido de **Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar**, publicados en este sitio están disponibles bajo

Licencia [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) 

Como citar: Benitez, D., & Gómez, J. (2022) Predicción del ciclo solar 25 por el método combinado. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 6(4) 361-373. DOI: [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v6i4.2591](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i4.2591)

## Prediction of solar cycle 25 by the combined method

### ABSTRACT

In this paper the profile of solar cycle 25 currently in progress has been forecasting using the Combined Method, with a prediction of the smoothing maximum amplitude of the order of  $108.3 \pm 4.7$ , slightly lower than the previous cycle and with a mean duration of the ascending phase of  $61 \pm 12$  months, for a total mean duration of  $132 \pm 27$  months. The same procedure has been applied to the three immediately preceding cycles, obtaining good results in their ascending part.

**Keywords:** *sunspots; solar activity; solar cycle 25.*

## 1. INTRODUCCIÓN

La predicción de la actividad solar ha adquirido en las décadas recientes una mayor importancia para la comunidad científica debido a su gran impacto en la actividad tecnológica de la humanidad, como ser en las redes de transmisión de potencia, satélites, y en cierto aspecto en organismos vivos y el clima (Helal, & Galal, 2013). En particular, el estudio de la actividad solar es de relevancia para el planeamiento de misiones espaciales de satélites de órbita baja, ya que una actividad alta del sol puede generar una fuerza de arrastre mediante la radiación ultravioleta que afecte la órbita originalmente planeada del satélite (Hathaway et al., 1999). Por estas razones es necesario predecir el comportamiento del índice de manchas solares o número de Wolf, que depende del número de manchas observadas,  $f$ , y del número de grupos que estas forman,  $g$ , y está dada por (1).

$$R = k(10g + f) \quad (1)$$

Siendo  $k$  el factor de escala que depende de la instrumentación, las condiciones atmosféricas del sitio de observación y la pericia del observador. El comportamiento de este índice puede ser calculado tanto por técnicas de regresión, así como por las técnicas llamadas precursoras entre las que se encuentra el método combinado (CM del inglés Combined Method) (Hathaway et al., 1999), el cual es utilizado en el presente trabajo. Este método utiliza el índice geomagnético interplanetario  $aa_1$  que permite una adecuada predicción de la amplitud del ciclo solar venidero (Hanslmeier et al., 1998). El CM asume que ciclos de la misma amplitud tendrán una forma similar y de esta manera predice el comportamiento del próximo ciclo solar; el CM está completamente descrito en el trabajo de Hanslmeier et al. (1998). Es uno de los tres métodos utilizados por el Centro de Análisis de Datos de la Influencia Solar (SIDC del inglés Solar Influences Data Analysis Center) de Bruselas-Bélgica, considerada como continuadora del observatorio de Zúrich y el de Locarno, donde trabajaba Rudolf Wolf (Cugnon, 1997) a quien se debe el establecimiento del índice que lleva su nombre y que está descrito por (1). A este método se puede aplicar el filtro de Kalman (KF, del inglés Kalman Filter) y un suavizado exponencial (ES, del inglés Exponential Smoothing) descrito en el trabajo de Podladchikova y Van Der Linden (2012), que permiten a su vez mejorar las predicciones realizadas por el CM.

## 2. METODOLOGÍA

Los datos necesarios como el promedio mensual del número total de manchas (monthly mean total sunspot number) y el número total de manchas suavizado mensual (13-month smoothed monthly sunspot number), desde Enero de 1749 hasta la actualidad, fueron obtenidos de la Sunspot Index and Long-term Solar Observations SILSO dependiente de la SIDC, así como el índice geomagnético  $aa$ , desde 1868 hasta 2011 de la National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA, y desde 1968 hasta la actualidad de la International Service of Geomagnetic Index ISGI. Con estos datos se procedió a hacer un promedio mensual suavizado, tanto para el número de manchas mensual, como para el índice geomagnético utilizando el 13-month running mean dado por (2) (Hathaway et al., 1999).

$$\bar{R}_n = \frac{1}{24} \sum_{-6}^{+5} R_{n+1} + \frac{1}{24} \sum_{-5}^{+6} R_{n+1} \quad (2)$$

Siendo  $\bar{R}_n$  el promedio mensual del índice de manchas solares para el mes  $n$ .

Posteriormente se graficó el promedio mensual suavizado del índice  $aa$  en función del promedio mensual del número de manchas. Se aplicó el método de Feynmann (1982) (Hanslmeier et al., 1998), y para ello se dividió el número de manchas en intervalos de 10 ( $R = [0-10, \dots, 280-290]$ ), y se ajustó una línea por los valores más bajos de  $aa$  en esos intervalos, esto representa la componente geomagnética llamada de número de manchas solares,  $aa_R$ . Obtenida esta componente, se calculó la componente interplanetaria  $aa_I$  por medio de la ecuación (3),

$$aa_I = aa - aa_R \quad (3)$$

Luego se relacionó su máximo cerca del mínimo de manchas solares para los ciclos 12 al 24, con lo que se obtuvo la gráfica del máximo de amplitud del índice de manchas solares en función del máximo  $aa_{I_{max}}$  cerca del mínimo de cada ciclo, posteriormente se ajustó una línea que indica la relación entre ambas variables para hallar el máximo estimado mediante una ecuación de regresión.

Prosiguiendo con el CM se eligieron los ciclos con un máximo  $\pm 35$  del máximo predicho, seleccionados estos, se halló el promedio mes a mes con una función de peso que asigna pesos mayores a ciclos con un máximo similar al estimado previamente, con lo que se obtuvo el perfil completo del ciclo 25. Adicionalmente, se realizó el mismo cálculo con los

datos mensuales brutos (sin suavizar), y se observó que el perfil del ciclo sufría muchas fluctuaciones por lo que los resultados fueron descartados.

Teniendo en cuenta resultados satisfactorios previos como el de Fessant et al. (1996) y el de Gómez y Doncel, (2020) se dividió el ciclo en una fase ascendente y otra descendente, y se volvió a calcular la duración promedio para cada fase. Luego se aplicó nuevamente la función de peso y se obtuvo el perfil para las fases ascendente y descendente respectivamente. Se aplicó el KF y el ES obteniéndose los datos filtrados de cada fase del ciclo, se juntaron los cálculos, y se obtuvo el perfil completo del ciclo solar 25, tanto el pronosticado por el CM, como el filtrado, y a partir de este último se encontró el máximo esperado para el ciclo y la fecha en la que se espera que ocurra este máximo, para finalmente contrastar los resultados con resultados obtenidos por diferentes técnicas. Seguidamente, se aplicó el mismo método con los ciclos solares previos 22,23 y 24 de forma a tratar de observar el comportamiento de las predicciones.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El gráfico del promedio mensual suavizado del índice aa en función del número de manchas promedio mensual suavizado se observa en la figura 1. La ecuación de la línea base que representa la componente  $aa_R$  fue:

$$aa_R = 5.62 + 0.07R \quad (4)$$

con un coeficiente de regresión  $r = 0.945$ . En la figura 2 se observa la relación entre las 2 componentes del índice aa. La relación entre  $aa_{I_{max}}$  y  $R_{max}$  se muestra en la figura 3. Del método de Feynmann para predecir la amplitud del ciclo se obtuvo:

$$R_{max}(n) = 96.7 + 6.4aa_{I_{max}}(n) \pm 35 \quad (5)$$

con un coeficiente de regresión  $r = 0.723$ . El máximo de  $aa_I$  cerca del mínimo para el ciclo 25 resultó ser 7.17 nT, y, aplicando la ecuación (5), se obtuvo

$$R_{max}(25) = 142.7 \pm 35. \quad (6)$$

Los ciclos de amplitud similar se listan en la tabla 1 y se muestran en la figura 4. El perfil del ciclo 25 calculado por el método combinado usando estos datos suavizados se observa en la figura 5.

Figura 1. Gráfica para la obtención de la componente geomagnética de manchas solares  $aa_R$ .

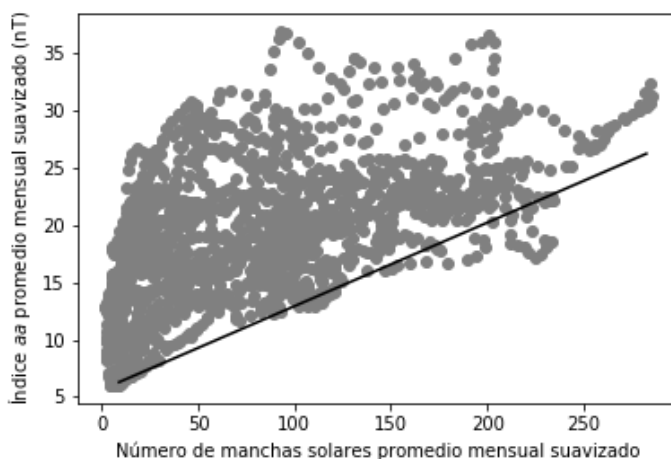


Figura 2. Las dos componentes del índice aa. La línea sólida representa la componente de número de manchas solares,  $aa_R$ , y la línea cortada representa la componente interplanetaria,  $aa_I$ , desplazada verticalmente hacia abajo en un factor de 10 para hacer notar la diferencia.

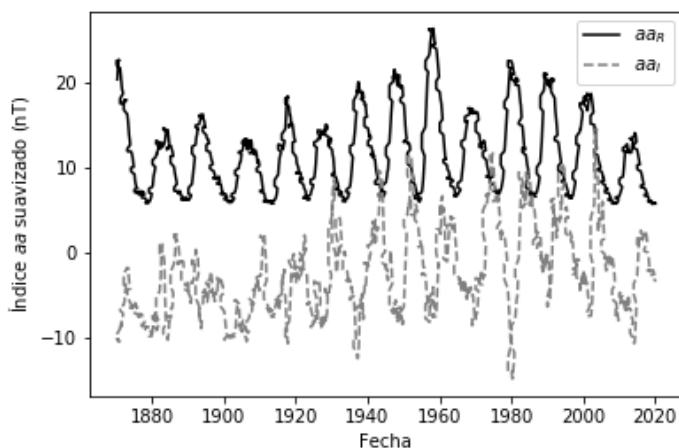
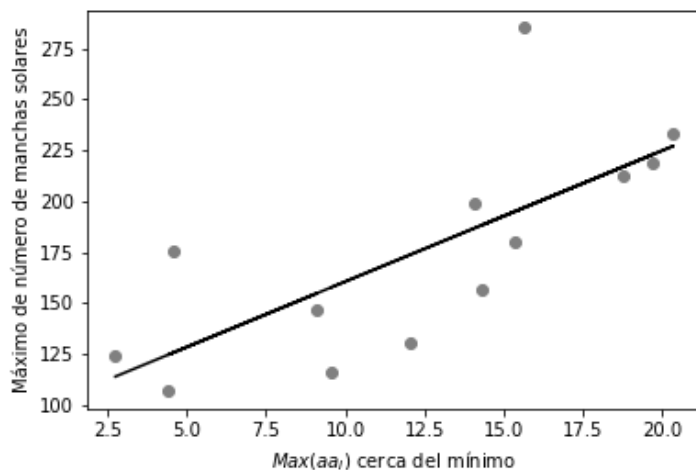


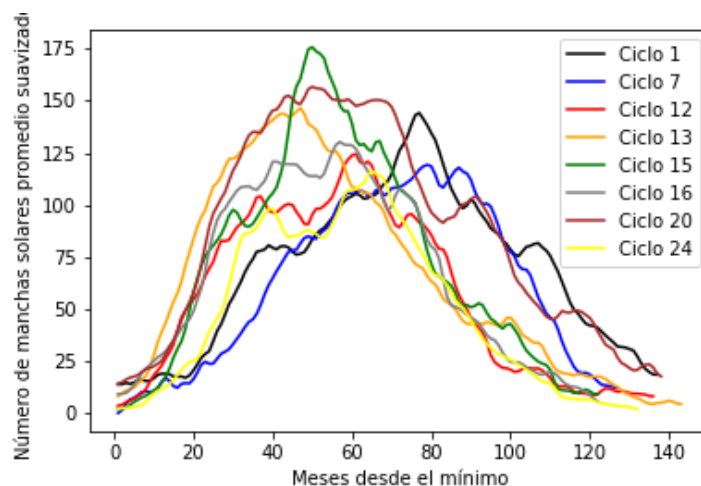
Figura 3. Método de Feynmann para los ciclos solares 12-24. La amplitud máxima del ciclo es proporcional al máximo de  $aa_I$  cerca del mínimo que lo precede. Esta relación se muestra con la línea sólida.



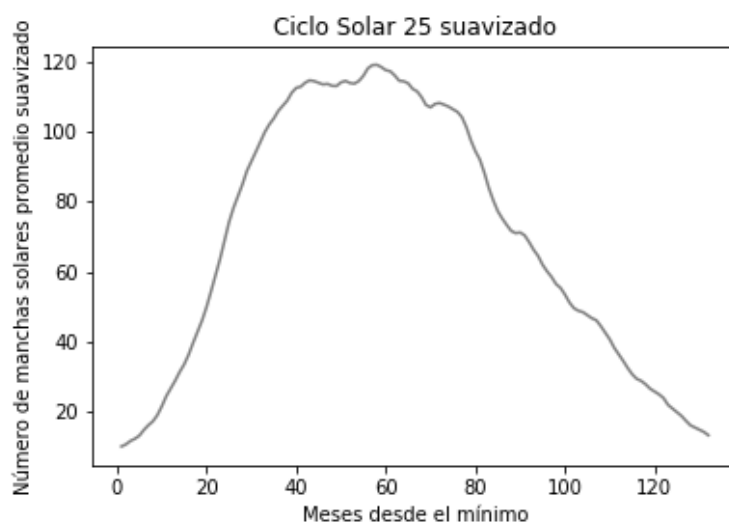
**Tabla 1.** Ciclos elegidos para la predicción del Ciclo Solar 25.

Ciclo solar	Máximo del ciclo
1	144.1
7	119.2
12	124.4
13	146.5
15	175.7
16	130.2
20	156.6
24	116.4

**Figura 4.** Ciclos elegidos suavizados con amplitud  $\pm 35$  del máximo estimado para el ciclo 25.



**Figura 5.** Perfil suavizado del Ciclo Solar 25.



Al aplicar la separación del ciclo en una fase ascendente y otra descendente, se calculó la duración promedio de ambas, siendo de  $61 \pm 12$  y  $71 \pm 15$  meses respectivamente, para una duración total de  $132 \pm 27$  meses para el ciclo 25.

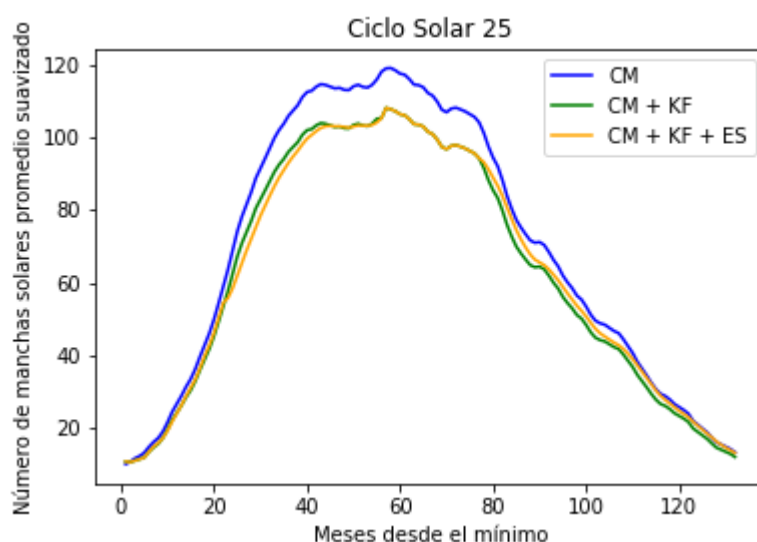
Ya teniendo el perfil de las partes del ciclo 25, se aplicó el KF con la elección del valor suavizado de la SIDC de noviembre del 2019 como punto de partida en la fase ascendente  $\hat{R}_{00} = 2.0375$  con  $\sigma^2_{00} = 0$  y el valor correspondiente a las predicciones del CM de este trabajo para junio del 2024 como punto de partida en la fase descendente  $\hat{R}_{00} = 116.2$  con  $\sigma^2_{00} = 0$ . Los demás valores requeridos por el KF en esta etapa se indican en la siguiente tabla.

**Tabla 2.** Valores utilizados en el KF para los primeros seis meses de la fase ascendente R (SIDC) a partir de diciembre del 2019 y R (CM+KF+SM) a partir de julio del 2024.

Número de meses	1	2	3	4	5	6
R (SIDC)	1.8	2.2	2.7	3.0	3.6	5.6
R (CM+KF+SM)	107.03	107.42	107.54	107.36	106.86	106.33

Una vez obtenidas las salidas del filtro de Kalman, se aplicó el ES y uniendo las dos fases se obtuvo el perfil completo del ciclo solar 25 mostrado en la figura 6. Con una estimación final del máximo de  $108.3 \pm 4.7$ , a darse en octubre de 2024, 59 meses después del mínimo asumido en noviembre de 2019 al momento de realización del presente trabajo.

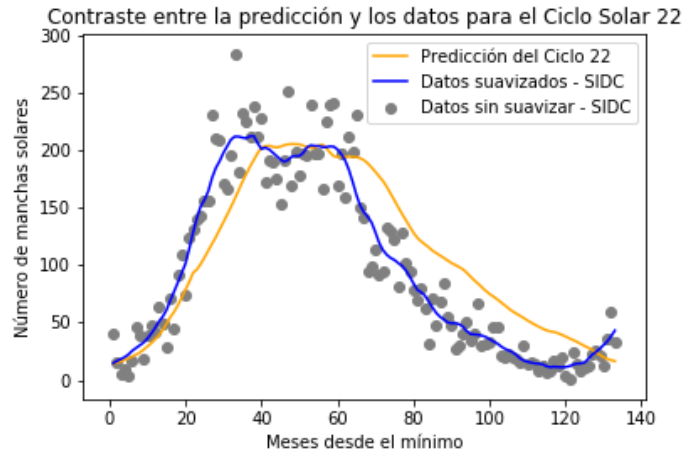
**Figura 6.** Predicción del perfil del Ciclo Solar 25 usando el método combinado (CM), y aplicando a las predicciones tanto el filtro de Kalman (CM + KF) como el suavizado exponencial (CM + KF + ES).



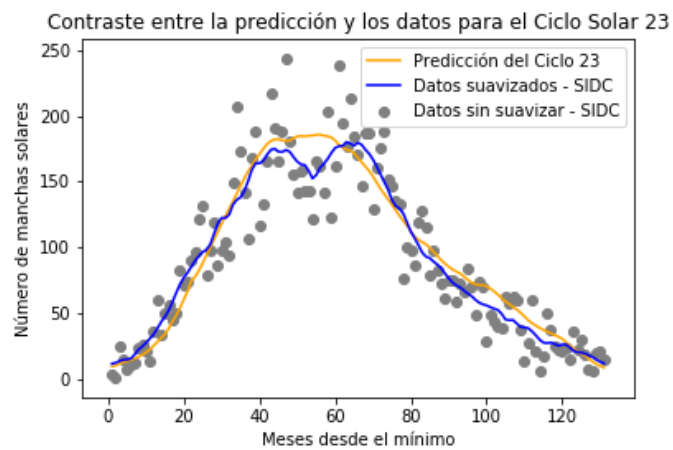


La misma técnica se empleó con los ciclos 22–24, y se comparó con la forma, amplitud y duración observada de cada ciclo, esto se muestra en las figuras 7 al 9.

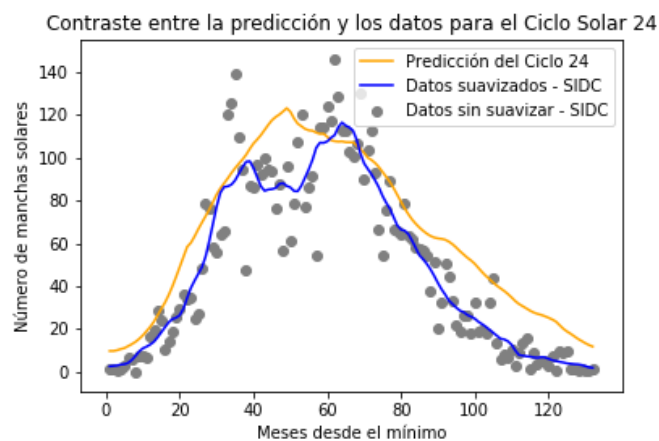
**Figura 7.** *Ciclo Solar 22. El máximo para este ciclo, según la SIDC, fue de 215.5.*



**Figura 8.** *Ciclo Solar 23. El máximo para este ciclo, según la SIDC, fue de 180.3.*



**Figura 9.** *Ciclo Solar 24. El máximo para este ciclo, según la SIDC, fue de 116.14.*



De la comparación de las predicciones por la técnica aquí aplicada con la evolución de los tres ciclos inmediatos anteriores se encontró un error absoluto promedio de orden de los  $28.60 \pm 19.29$ ,  $8.76 \pm 6.01$  y  $15.64 \pm 8.92$  para los ciclos 22, 23 y 24 respectivamente. Estos errores se ven principalmente en la fase descendente de cada ciclo estudiado.

La predicción realizada en este trabajo encaja bien dentro de las predicciones realizadas para el ciclo 25, que van desde las que sugieren una tendencia en la disminución de la actividad solar con un máximo de amplitud en un rango que varía desde los 14,31% y hasta un 51% de disminución en relación al ciclo 24, también otros trabajos sugieren un aumento del orden del 16 al 45% en relación al ciclo 24, y otros predicen un máximo similar al ciclo anterior de hasta un 10% de diferencia (aquí también existe una concordancia razonable), e inclusive existen predicciones de un máximo muy superior del orden de los  $228,8 \pm 40,5$ . Se ha encontrado un valor del máximo de 115,1 con una fase ascendente de 4,84 años con una duración de 11,06 años según el modelo TMPL (Two-parameter Modified Logistic Prediction) y un valor del máximo de 101.8 con una fase ascendente de 4,66 años con una duración de 10,79 años según el modelo TMPL-E (Two-parameter Modified Logistic Prediction-extension) (Wu & Qin, 2021) que muestran buena concordancia con los  $108.3 \pm 4.7$  de amplitud y 5,08 años de duración de la fase ascendente (61 meses) y una duración total de 11 años calculados en este trabajo.

En la tabla 3 se muestra los valores pronosticados por diversos autores utilizando diferentes métodos desde las que predicen un aumento significativo en relación al ciclo anterior hasta aquellas que predicen una disminución moderada.

**Tabla 3.** Máximos del ciclo solar 25 calculados por diferentes métodos.

R <sub>Max</sub>	Métodos	Autores
233	Relación entre la duración los llamados eventos de <i>terminación</i> de un ciclo precedente y el máximo del ciclo venidero.	Susanta et al. (2019)
181	Regla de Waldmeier y la regla de longitud a la siguiente amplitud.	Ivanov (2022)
145,3	Modelo bimodal, con máximo en octubre del 2024.	Lu et al. (2022)
138,26	Efecto Waldmeier y la razón de cambio del campo magnético polar.	Kumar et al. (2022)

133	Relación entre el campo magnético polar solar (PMF del inglés Solar Polar Magnetic Field) y del campo magnético heliosférico (HMF del inglés Heliosferic Magnetic Field).	Susanta et al. (2019)
118,2	Días sin manchas cerca del mínimo.	Cameron et al. (2016)
110,58 (95% $R_{Max\_24}$ )	Modelo de transporte de flujo advectivo (AFT del inglés Advective Flux Transport) mediante el estudio del transporte de flujo superficial y con ello la amplitud del campo magnético polar del sol durante el mínimo.	Upton & Hathaway (2018)

Se aprecia una importante dispersión en los resultados obtenidos por otros autores aplicando diferentes técnicas para la predicción del valor suavizado del máximo del ciclo solar 25. Los resultados obtenidos en el presente trabajo se ajustan a las predicciones de cambios moderados en relación al ciclo inmediato anterior y requieren estudios adicionales para ajustar los valores promedios de duración calculados, como ser el aumento gradual de duración sugerido en el trabajo de Richards y Rogers, (2019).

#### 4. CONCLUSIÓN

Se ha aplicado el CM junto con el KF y el ES para predecir el comportamiento del ciclo de manchas solares 25. Se ha obtenido un máximo suavizado de amplitud de  $108.3 \pm 4.7$ , que muestra buena concordancia con resultados obtenidos por otras técnicas, al menos en aquellos trabajos que sugieren cambios moderados en relación al ciclo anterior. El perfil calculado del presente ciclo solar muestra una fase ascendente del orden de los 5,08 años (61 meses) de promedio de duración y un ciclo de duración promedio total de 11 años (132 meses) con lo que presenta características similares al ciclo precedente con un máximo suavizado ligeramente inferior y que estaría alcanzando el máximo en octubre del 2024 y finalizando el ciclo en el 2030 tomando como referencia los valores promedios calculados. El método muestra una buena correspondencia con los valores observados en ciclos inmediatos anteriores sobretodo en la parte ascendente de cada ciclo estudiado.

#### 5. LISTA DE REFERENCIAS

Helal, R., & Galal, AA. (2013). An early prediction of the maximum amplitude of the solar cycle 25. Solar activity and its magnetic origin. *Journal of Advanced Research (EG)*, 4:275-278.

- Hathaway, D., Wilson, R., & Reichmann, E. (1999). A synthesis of solar cycle prediction techniques. *Amplitude of Solar Cycle 25. Space Physics (USA)*, 104(A10): 22,375 - 22,388
- Hathaway, D. & Wilson, R. (2006). Geomagnetic activities indicates a large amplitude for sunspot cycle amplitude. *Geophysical Research Letters*, 33(18):1-3.
- Hanslmeier, A., Denkmayr, K. & Weiss, P. (1998). Longterm prediction of solar activity using the combine method. *Solar Physics*, 184(6pp).
- SIDC-SILSO. World Data Center- Sunspot Index and Long-term Solar Observations, Royal Observatory of Belgium, on-line Sunspot Number catalogue: <http://sidc.be/silso/datafiles>.
- Cugnon, P. (1997). Le sunspot Index Data Center World Data Center C1 for Sunspot Index, *Ciel et Terre*, 113(2): 67-71.
- Podladchikova, T., & Van Der Linden, R. (2012). Kalman filter technique for improving medium term predictions of the sunspot number, *Solar Physics*, 397-416.
- NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce, on-line Geomagnetic Index Catalogue: <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/indices/aastar.html>
- ISGI. International Service of Geomagnetic Indices, on-line Geomagnetic Indices catalogue: [http://isgi.unistra.fr/isgi\\_refservice.php](http://isgi.unistra.fr/isgi_refservice.php).
- Fessant, F., Pierret C. & Lantos, P. (1996). Comparison of neural network and Mac Nish and Lincoln methods for the predictions of smoothed sunspot index. *Solar Physics*, 168: 423-433.
- Gómez, J. & Doncel, F. (2020). Predicción completa del Ciclo Solar 24 mediante el Método Combinado. *Reportes Científicos de la FACEN*, 11(1):3-9.
- Wu, S. & Qin, G. (2021). Predicting Sunspot Numbers for Solar Cycles 25 and 26. ArXiv preprint [Arxiv:2102.06001](https://arxiv.org/abs/2102.06001) [astro-ph.SR].
- McIntosh, S. et al. (2020). Overlapping Magnetic Activity Cycles and the Sunspot Number: Forecasting Sunspot Cycle 25 Amplitude. *Solar Physics*, 295:163. <https://doi.org/10.1007/s11207-020-01723-y>.
- Susanta, K., Janardhan, P., & Ananthakrishnan, S. (2019). Another Mini Solar Maximum in the offing: A Prediction for the Amplitude of Solar Cycle 25. ArXiv preprint [Arxiv:1910.03841v1](https://arxiv.org/abs/1910.03841v1) [astro-ph.SR].

- Upton, L. & Hathaway, D. (2018) An updated Solar Cycle 25 prediction with AFT: The Modern Minimum. *Geophysical Research Letters*, 45:8091-8095.73. <http://doi.org/10.1029/2018GL078387>.
- Cameron, R., Jiang, J. & Schüssler, M. (2016). Solar Cycle 25: Another moderate cycle? *The Astronomical Journal Letter*, 823: L22(2) (5pp).
- Richards, T. & Rogers, L. (2019). Long-term variability in the length of the solar cycle. *The astronomical society of the pacific*, 121:797-809.
- Ivanov, V. G. (2022). Solar cycle 25 prediction using length-to-amplitude relations. arXiv preprint arXiv:2203.02028.
- Kumar, P., Biswas, A., & Karak, B. B. (2022). Physical link of the polar field build-up with the Waldmeier effect broadens the scope of early solar cycle prediction: Cycle 25 is likely to be stronger than Cycle 24. arXiv preprint arXiv:2203.11494.
- Lu, J. Y., Xiong, Y. T., Zhao, K., Wang, M., Li, J. Y., Peng, G. S., & Sun, M. (2022). A Novel Bimodal Forecasting Model for Solar Cycle 25. *The Astrophysical Journal*, 924(2), 59.