



UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO  
FACULTAD DE CIENCIAS  
INSTITUTO DE FÍSICA Y ASTRONOMÍA

MULTIPERIODICIDAD DE SUPERCICLOS  
EN NOVAS ENANAS DEL TIPO SU UMA

POR  
ALEXANDER CONTRERAS QUIJADA

Tesis presentada al Instituto de Física y Astronomía de la  
*Universidad de Valparaíso, Chile*  
para obtener el grado de Máster en Astrofísica.

Profesor guía: Nikolaus Vogt (UV)  
Comité evaluador: Claus Tappert y Maja Vuckovic

Marzo, 2019  
Valparaíso, Chile

©2018, Alexander Contreras Quijada.

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

## Agradecimientos

*Agradezco profundamente el apoyo y confianza de mi profesor guía Dr. Nikolaus Vogt a lo largo de este trabajo de tesis, ya que sin sus consejos y conocimiento no hubiera podido concretar. Así mismo, agradecer el apoyo y cariño incondicional de mi familia, en especial el de mi madre que ha estado conmigo siempre dándome ánimo para seguir adelante en este difícil camino que es la Ciencia.*



# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Estrellas variables cataclísmicas . . . . .	1
1.2. Novas Enanas . . . . .	4
1.3. Novas enanas del tipo SU UMa . . . . .	7
<b>2. Motivación</b>	<b>9</b>
<b>3. Metodología</b>	<b>11</b>
3.1. Datos y asignación de número de ciclo E . . . . .	11
3.2. Variaciones de la periodicidad de superciclos . . . . .	13
3.2.1. Comportamiento a corto plazo . . . . .	13
3.2.2. Comportamiento a largo plazo . . . . .	15
3.2.3. Comportamiento a mediano plazo . . . . .	17
3.2.4. Sobre las variaciones sinusoidales . . . . .	18
<b>4. Resultados</b>	<b>19</b>
4.1. Superciclos promedio . . . . .	19
4.2. Superciclos a corto plazo . . . . .	25
4.3. Superciclos a largo plazo . . . . .	39
4.4. Superciclos a mediano plazo . . . . .	53
4.5. Superciclos a mediano plazo - nuevos ajustes . . . . .	67
<b>5. Comparación con la literatura y discusión</b>	<b>77</b>
5.1. Promedio de los superciclos y sus variaciones a corto plazo . . . . .	77
5.2. Cambios seculares de los superciclos . . . . .	85
5.3. Cambios de los superciclos en períodos intermedios y su posible relación con ciclos tipo solar . . . . .	86
<b>6. Conclusiones</b>	<b>93</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>95</b>
<b>7. Anexo: Tablas</b>	<b>97</b>

# Índice de cuadros

3.1.	Lista de las 26 SU UMa analizadas en el presente trabajo. Además, se incluyen las coordenadas junto con los períodos orbitales ( $P_{\text{orb}}$ ). Por otra parte, se señalan otras fuentes de la literatura con listas de supererupciones. . . . .	12
4.1.	Resultados de los ajustes lineales de mínimos cuadrados a partir del número de ciclos $E_{\text{max}}$ para 26 novas enanas del tipo SU UMa. Se señala el tiempo total de observación ( $T_{\text{obs}}$ ), número de ciclos $E$ encontrados ( $N_{\text{SC}}$ ), superciclo promedio ( $\bar{P}_{\text{SC}}$ ), dispersión de los datos ( $\sigma_l$ ), coeficiente de correlación ( $r$ ) obtenida de los ajustes y relación $\sigma_l/\bar{P}_{\text{SC}}$ . . . . .	20
4.2.	Superciclos $C$ determinados luego de un ajuste lineal de mínimos cuadrados en intervalos de superciclo constante a partir de los residuos O-C de Figura 4.6. Los superciclos están ordenados en forma creciente. Se incluyen los promedios ponderados con valores de superciclos similares, ver detalles en Tabla 7.1 en <i>Anexo: Tablas</i> . . . . .	33
4.3.	Resultados de los ajustes de mínimos cuadrados parabólicos. Se señalan los valores de $a$ que indica un aumento o disminución del superciclo a largo plazo (positivo o negativo respectivamente), $a/\Delta a$ es la significancia al cambio antes mencionado, $P_{\text{SC},0}$ señala el valor del primer superciclo, dispersión del ajuste parabólico ( $\sigma_p$ ), coeficiente de correlación del ajuste de mínimos cuadrados ( $r$ ), amplitud de la parábola $A_p[d]$ y finalmente se indica la razón entre las dispersiones lineales y parabólicas $\sigma_l/\sigma_p$ . . . . .	41
4.4.	Resultados de los ajustes de mínimos cuadrados sinusoidales. Se indican fase inicial ( $\phi$ ), semiamplitud, períodos en número de ciclos $E$ , dispersión del ajuste sinusoidal ( $\sigma_s$ ), cociente de dispersión lineal y sinusoidal ( $\sigma_l/\sigma_s$ ) y finalmente cociente de dispersión parabólica y sinusoidal ( $\sigma_p/\sigma_s$ ). . . . .	61
4.5.	Resultados de los ajustes de mínimos cuadrados sinusoidales a partir de los residuos O-C de los ajustes lineales. Se indican fase inicial ( $\phi$ ), semiamplitud, períodos en número de ciclos $E$ , dispersión del ajuste sinusoidal ( $\sigma_s$ ), período sinusoidal en días, coeficiente de correlación y cociente entre los ajustes sinusoidales. . . . .	72
4.6.	Resumen de los resultados de ajustes de mínimos cuadrados lineales entre distintos parámetros obtenidos en este capítulo. Se indican las variables independientes (X) y dependientes (Y), junto con los valores de pendiente y dispersión de los datos ( $\sigma$ ), coeficientes de correlación ( $r$ ) y figura de referencia. . . . .	75
5.1.	Comparación entre los valores típicos de superciclo del catálogo de Ritter & Kolb (2003) y la diferencia con los superciclos promedio de Tabla 4.1. . . . .	79
5.2.	Comparación de los superciclos mínimos y máximos calculados por Otulakowska-Hypka & Olech (2013) y los superciclos $C$ de este trabajo. Además, se incluye la cobertura de las observaciones utilizadas en años. . . . .	84

5.3.	Resultados reportados en la literatura para períodos cíclicos ( $P_{\text{cic}}$ ) para distintos tipos de variables cataclísmicas y su posible relación con ciclos tipo solar ( $\sim 22$ años) debido a variaciones en la componente secundaria de la binaria. Se señalan el tipo de CV, período orbital ( $P_{\text{orb}}$ ), tipo de variación, intervalo de tiempo de las observaciones, período cíclico, amplitud de la magnitud en la variación (si corresponde) y referencias utilizadas. . . . .	89
5.3.	Resultados reportados en la literatura para períodos cíclicos ( $P_{\text{cic}}$ ) para distintos tipos de variables cataclísmicas y su posible relación con ciclos tipo solar ( $\sim 22$ años) debido a variaciones en la componente secundaria de la binaria. Se señalan el tipo de CV, período orbital ( $P_{\text{orb}}$ ), tipo de variación, intervalo de tiempo de las observaciones, período cíclico, amplitud de la magnitud en la variación (si corresponde) y referencias utilizadas. . . . .	90
7.1.	Duración de superciclos promedio general ( $\bar{P}_{\text{SC}}$ , en negrita) y superciclos $C$ luego de un ajuste de mínimos cuadrados lineal. Además, se indica el tipo de superciclo $C$ (C1, C2, etc) junto con su promedio ponderado para superciclos similares dentro de sus errores (promedio, en negrita), intervalos de tiempo cubierto en días julianos (JD) y en número de ciclos $E$ , número de ciclos $E$ utilizados para el ajuste ( $N$ ), valor de superciclo y finalmente la dispersión de cada ajuste ( $\sigma$ ). . . . .	98
7.1.	Duración de superciclos promedio general ( $\bar{P}_{\text{SC}}$ , en negrita) y superciclos $C$ luego de un ajuste de mínimos cuadrados lineal. Además, se indica el tipo de superciclo $C$ (C1, C2, etc) junto con su promedio ponderado para superciclos similares dentro de sus errores (promedio, en negrita), intervalos de tiempo cubierto en días julianos (JD) y en número de ciclos $E$ , número de ciclos $E$ utilizados para el ajuste ( $N$ ), valor de superciclo y finalmente la dispersión de cada ajuste ( $\sigma$ ). . . . .	99
7.1.	Duración de superciclos promedio general ( $\bar{P}_{\text{SC}}$ , en negrita) y superciclos $C$ luego de un ajuste de mínimos cuadrados lineal. Además, se indica el tipo de superciclo $C$ (C1, C2, etc) junto con su promedio ponderado para superciclos similares dentro de sus errores (promedio, en negrita), intervalos de tiempo cubierto en días julianos (JD) y en número de ciclos $E$ , número de ciclos $E$ utilizados para el ajuste ( $N$ ), valor de superciclo y finalmente la dispersión de cada ajuste ( $\sigma$ ). . . . .	100
7.1.	Duración de superciclos promedio general ( $\bar{P}_{\text{SC}}$ , en negrita) y superciclos $C$ luego de un ajuste de mínimos cuadrados lineal. Además, se indica el tipo de superciclo $C$ (C1, C2, etc) junto con su promedio ponderado para superciclos similares dentro de sus errores (promedio, en negrita), intervalos de tiempo cubierto en días julianos (JD) y en número de ciclos $E$ , número de ciclos $E$ utilizados para el ajuste ( $N$ ), valor de superciclo y finalmente la dispersión de cada ajuste ( $\sigma$ ). . . . .	101
7.1.	Duración de superciclos promedio general ( $\bar{P}_{\text{SC}}$ , en negrita) y superciclos $C$ luego de un ajuste de mínimos cuadrados lineal. Además, se indica el tipo de superciclo $C$ (C1, C2, etc) junto con su promedio ponderado para superciclos similares dentro de sus errores (promedio, en negrita), intervalos de tiempo cubierto en días julianos (JD) y en número de ciclos $E$ , número de ciclos $E$ utilizados para el ajuste ( $N$ ), valor de superciclo y finalmente la dispersión de cada ajuste ( $\sigma$ ). . . . .	102

# Índice de figuras

1.1.	Esquema de una variable cataclísmica (CV) compuesta por una enana blanca (componente primaria) y una enana roja (componente secundaria). La transferencia de masa se realiza a través del punto de Lagrange (L1) formando un disco de acreción alrededor de la enana blanca. Luego, el chorro de material desde la componente secundaria choca contra el disco produciendo un punto caliente. En el caso de las novas enanas, se producen erupciones en sus discos de acreción que producen un aumento significativo en el brillo total del sistema. . . . .	2
1.2.	Diagrama de fase de la nova enana IY UMa. Se observa un aumento en el brillo debido al punto brillante (hotspot) junto con los eclipses producidos por la entrada y salida de la enana blanca. Curva de luz obtenida por Rolfe et al. (2001). . . . .	2
1.3.	Distribución de períodos orbitales para 1429 variables cataclísmicas del catálogo de Ritter & Kolb (2003, versión 7.2 año 2013), con bin=0.3 días. Se observa una rápida disminución en torno a las 2 horas para luego aumentar ligeramente alrededor de las 3 horas, este intervalo es llamado gap del período. . . . .	3
1.4.	Curva de luz de alrededor de 5 años y medio de la nova enana prototipo SS Cyg mostrando erupciones periódicas aproximadamente cada 50 días. Datos obtenidos desde AAVSO. . . . .	4
1.5.	Curva de luz de la nova enana prototipo U Gem cubriendo aproximadamente 4 años de observaciones, mostrando erupciones semiregulares con amplitudes de $\simeq 5$ magnitudes, aproximadamente cada 100 o 200 días. Datos obtenidos desde AAVSO. . . . .	4
1.6.	Curva de luz de alrededor de 5 años y medio de la nova enana prototipo Z Cam. Se destacan erupciones frecuentes para luego dar paso a períodos de brillo casi constante. Datos obtenidos desde AAVSO. . . . .	5
1.7.	Sección de aproximadamente 6 meses de la curva de luz de VW Hyi, una nova enana del tipo SU UMa, mostrando erupciones con amplitudes de entre 5 a 6 magnitudes. Éstas tienen diferentes formas, las más cortas y menos brillantes son llamadas erupciones normales mientras que las más anchas y brillantes son las supererupciones. Datos obtenidos desde AAVSO. . . . .	5
1.8.	Distribución de períodos orbitales para 1429 variables cataclísmicas (CVs) del catálogo de Ritter & Kolb (2003), con bin=0.5 horas, donde se destacan 735 objetos clasificados como novas enanas las tipo SU UMa (627), U Gem (85) y Z Cam (23). Notar los períodos orbitales menores a 3 h para todas las SU UMa (línea roja a trazos). Por claridad se excluyó el objeto J2044-0459 (tipo U Gem) que posee un $P_{\text{orb}}=40.32$ horas. . . . .	6
1.9.	Ciclo de una nova enana en función de la densidad superficial ( $\Sigma$ ) versus la temperatura del disco (T). La curva S fuerza al disco a seguir el ciclo $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$ . Imagen obtenida de Hellier (2001) a partir de Meyer & Meyer-Hofmeister (1981). . . . .	6

1.10. <i>Arriba</i> : Erupciones y supererupciones de la nova enana tipo SU UMa V1504 Cyg. <i>Abajo</i> : A partir del zoom se muestra el fenómeno de superhump. Figura obtenida de Osaki & Kato (2013) con datos de Kepler. . . . .	7
1.11. Evolución en el tiempo del disco de acreción durante dos superciclos modelado para el caso de VW Hyi, una estrella del tipo SU UMa. De arriba hacia abajo: (a) Curva de luz bolométrica, (b) radio exterior del disco ( $R_d$ ) en unidades de separación de la binaria $A$ , y (c) masa total del disco ( $M_{\text{disk}}$ ), normalizada por una masa crítica ( $M_{\text{crit}}$ ) sobre la cual el disco puede ser inestable. Figura obtenida de Osaki (2005). . . . .	8
2.1. Residuos O-C de un ajuste de mínimos cuadrados lineal versus número de ciclo $E$ de supererupciones de la estrella Z Cha, novana enana del tipo SU UMa, abarcando 24 años de observaciones. Las líneas sólidas son los períodos mejor ajustados en rangos de longitud de superciclo constante $C$ , que se repiten de forma periódica. Imagen obtenida de Vogt (1980). . . . .	10
3.1. Sección de alrededor de 14 meses de la curva de luz de VW Hyi, una nova enana del tipo SU UMa, en la que se muestra la asignación de número de ciclos $E$ al inicio de cada supererupción. Datos obtenidos de AAVSO. . . . .	13
3.2. <b>Arriba</b> : A partir de los datos JD versus $E$ de WX Hyi se procedió a hacer un ajuste lineal de mínimos cuadrados para determinar un período promedio de superciclo ( $\bar{P}_{\text{SC}}$ ). <b>Abajo</b> : Los residuos O-C muestran diferentes pendientes que son producto de variaciones a corto plazo en el intervalo de tiempo entre cada supererupción, dando cuenta de superciclos aproximadamente constantes. El superciclo C2 corresponde a un promedio ponderado según relación 3.2. . . . .	14
3.3. Ajuste de mínimos cuadrados parabólico de WX Hyi a partir de los residuos O-C del ajuste lineal. La gráfica muestra una variación a largo plazo de los superciclos. . . . .	16
3.4. Ajuste de mínimos cuadrados sinusoidal a partir de los residuos O-C del ajuste parabólico para WX Hyi. Este ajuste representa una variación a mediano plazo de los superciclos. . . . .	17
3.5. Nuevo ajuste de mínimos cuadrados sinusoidal, esta vez, a partir de los residuos O-C del ajuste lineal para WX Hyi. Notar las diferencias en período y semiamplitud con Figura 3.4. . . . .	18
4.1. Distribución de los promedios generales de superciclos ( $\bar{P}_{\text{SC}}$ ), bin=50 días, luego de un ajuste de mínimos cuadrados lineales de día juliano (JD) versus números de ciclos $E$ para 26 novae enanas del tipo SU UMa. Se destaca en gris los 3 casos de novae enanas del subtipo ER UMa con períodos menores a los 50 días. . . . .	21
4.2. <b>Izquierda</b> : Comparación entre el número de supererupciones encontradas ( $N_{\text{SC}}$ ) y el total de número de ciclos $E(E_{\text{max}})$ , la línea sólida señala un ajuste lineal con coeficiente de correlación $r=0.931$ y pendiente $1.16 \pm 0.09$ . <b>Derecha</b> : Períodos superciclos promedios ( $\bar{P}_{\text{SC}}$ ) versus $E_{\text{max}}$ . La línea sólida señala un ajuste lineal con una correlación $r=0.747$ que muestra una tendencia que a mayor cantidad de número de ciclos $E$ se encuentran superciclos más cortos. Ver discusión en texto. . . . .	22
4.3. Relación entre superciclo promedio ( $P_{\text{SC}}$ ) y el tiempo total de observaciones ( $T_{\text{obs}}$ ), se refiere al total en días de observaciones. Se destaca el corte que se produce en $P_{\text{SC}} \sim 250[\text{d}]$ donde se encuentra una correlación alta con $r=0.857$ para $P_{\text{SC}}$ menores a 250 días (línea sólida). No obstante, para períodos mayores no se encuentra ninguna correlación ( $r=0.397$ ). . . . .	22

4.4. <b>Arriba:</b> Comparación entre los superciclos promedios ( $\bar{P}_{SC}$ ) y sus desviaciones estándar ( $\sigma_1$ ), la línea sólida muestra un ajuste lineal para $\sigma_1 < 300[d]$ ( $r=0.623$ ) objetos con $\sigma_1$ sobre los 300[d] se señalan. <b>Abajo:</b> Superciclos promedios versus sus errores. Se señala con una línea sólida el ajuste lineal para $\Delta \bar{P}_{SC} < 4.0$ con $r=0.754$ . Se destacan nuevamente los casos de V436 Cen y EK TrA. Discusión en Sección 4.1. . . . .	23
4.5. Comparación entre el cociente $\sigma_1/\bar{P}_{SC}$ y los coeficientes de correlación $r$ obtenidos a partir de los ajustes de mínimos cuadrados lineales para determinar el promedio general de superciclos $\bar{P}_{SC}$ . Se señala en línea sólida el ajuste correspondiente para $r>0.995$ (con $r=0.781$ , para 24 casos). Objetos con $\sigma_1/\bar{P}_{SC} >1.0$ muestran una alta variabilidad respecto a $\bar{P}_{SC}$ . . . . .	24
4.6. Residuos O-C versus número de ciclos $E$ de las supererupciones luego de un ajuste lineal de mínimos cuadrados. Las líneas sólidas se refieren a los ajustes de superciclos en rangos de valor aproximadamente constante, donde los superciclos C1, C2, etc. se refieren a valores de superciclos en orden creciente. Los detalles de cada ajuste están dados en detalle en Tabla 7.1 en <i>Anexo: Tablas</i> . . . . .	26
4.7. Distribución de los números de ciclos $E$ para los 130 casos de superciclos $C$ ( $P_{SC}$ ) encontrados, con $bin=1$ . El 90 % de estos superciclos cambian sus valores después de 5 a 26 supererupciones, ver Figura 4.6, en intervalos de superciclo aproximadamente constante. . . . .	34
4.8. Relación entre el total de número de ciclos $E$ ( $E_{max}$ ) y la cantidad de superciclos $C$ (C1, C2, etc.) encontrados para cada objeto. La línea sólida señala un ajuste lineal descartando el caso de YZ Cnc, de donde se obtiene un coeficiente de correlación $r=0.816$ y una pendiente= $0.031 \pm 0.005$ . En consecuencia, se encuentra una tendencia de que a mayor cantidad de supererupciones mayor será la posibilidad de encontrar diferentes superciclos $C$ . . . . .	35
4.9. Distribución de los 130 superciclos $P_{SC}$ , con $bin=10$ días, donde el 74.6 % de las SU UMa (línea continua) presentan valores entre 80 a 320 [d] y con peak alrededor de 200 días. Por otro lado, la línea a trazos se refiere a los superciclos de las ER UMa con un peak $\sim 45$ días. . . . .	35
4.10. <b>Arriba:</b> Relación entre los valores de superciclos $C$ ( $P_{SC}$ ) y sus errores $\Delta P_{SC}$ en días. La línea sólida muestra el mejor ajuste lineal con pendiente $0.016 \pm 0.001$ y coeficiente de correlación $r=0.746$ descartando los 4 casos señalados y que poseen errores superiores a los 10 días (señalado con una línea punteada). <b>Abajo:</b> Distribución de los errores $\Delta P_{SC}$ de los superciclos $P_{SC}$ , con $bin=0.3[d]$ . Se observa un peak en 0.75 días y se determina que 121 casos (90 %) corresponden a errores menores a 5.3[d]. Ver discusión en texto. . . . .	36
4.11. Comparación entre los número de ciclos $E$ para los 130 superciclos $C$ ( $P_{SC}$ ). No se observa ninguna tendencia clara como en Figura 4.2. . . . .	37
4.12. Distribución de las 313 razones con bins=(0.001, 0.002, 0.003, 0.004) obtenidas por el cociente entre los valores de superciclos de la forma ( $R = \frac{C_i}{C_j}$ ), según expresión 4.1. Se señalan con flechas los vacíos que se repiten para cada bin y que podrían ser reales. . . . .	38
4.13. Residuos O-C vs número de ciclos $E$ de las supererupciones luego de un ajuste lineal de mínimos cuadrados. Las líneas sólidas se refieren a los ajustes de períodos parabólicos (detalles en Tabla 4.3). . . . .	42
4.14. Distribución de las amplitudes parabólicas con $bin=50[d]$ . Para 20 casos los valores son menores a los 700 días. Además, se destaca en zona gris las amplitudes poco significativas, es decir, con $(A_p/\Delta A_p)<3$ (9 casos). . . . .	51

4.15. Comparación amplitud parabólica y la dispersión de los datos luego del ajuste de mínimos cuadrados parabólico ( $\sigma_p$ ) para los 17 casos con $ A_p/\Delta A_p >3$ . La línea sólida señala el ajuste lineal con pendiente $7.48 \pm 1.05$ y coeficiente de correlación $r=0.879$ . El caso extremo corresponde a la prototipo SU UMa. . . . .	51
4.16. <b>Arriba:</b> Relación superciclo inicial $P_{SC,0}$ y su error estándar. Se señala un ajuste lineal (línea sólida) con una pendiente $0.016 \pm 0.002$ y coeficiente de correlación $r=0.845$ para los valores $\Delta P_{SC,0} < 8$ días. Ver discusión en el texto sobre los objetos destacados. <b>Abajo:</b> Relación entre los superciclos iniciales y la dispersión ( $\sigma_p$ ) luego del ajuste de mínimos cuadrados parabólicos, el ajuste lineal (en línea sólida) da una pendiente $0.21 \pm 0.08$ y un débil coeficiente de correlación $r=0.483$ , descartando a la prototipo SU UMa. . . . .	52
4.17. Relación de las desviaciones estándar lineal ( $\sigma_l$ ) y parabólico ( $\sigma_p$ ) de los ajustes de mínimos cuadrados. Se observa que los errores del ajuste parabólico disminuyen a la mitad respecto a los lineales. El ajuste lineal (línea sólida) da como resultado una pendiente $0.33 \pm 0.04$ y coeficiente de correlación $r=0.848$ , donde se incluyeron todos los datos. El valor extremo corresponde a la prototipo SU UMa. . . . .	52
4.18. Residuos O-C vs número de ciclos $E$ de las supererupciones luego de un ajuste parabólico de mínimos cuadrados. Las líneas a trazos se refieren a los ajustes de periodos sinusoidales (detalles en Tabla 4.4). . . . .	54
4.19. Distribución de los superciclos sinusoidales ( $P_{SCsin}$ ) con bin=400 días. Se observa un peak alrededor de los 9000[d]( $\sim 24.7$ años). . . . .	62
4.20. Relación de superciclo sinusoidal ( $P_{SCsin}$ ) y tiempo de observación ( $T_{obs}$ ). La línea sólida señala un ajuste lineal, descartando los casos señalados que poseen $T_{obs}$ sobre los 25000 días ( $\sim 68.5$ años), con una pendiente $0.69 \pm 0.07$ y coeficiente de correlación $r=0.898$ . Ver discusión en el texto sobre la restricción de estos resultados. . . . .	62
4.21. <b>Arriba:</b> Comparación entre los superciclos sinusoidales ( $P_{SCsin}$ ) y sus errores estándar ( $\Delta P_{SCsin}$ ). Se observa que para $\Delta P_{SCsin} < 500$ días existe una relación directa. Con lo anterior, la línea sólida señala un ajuste lineal de mínimos cuadrados (con $r=0.796$ y pendiente $0.019 \pm 0.003$ ). Los 4 casos descartados con errores más grandes pueden deberse a que no se observaron supererupciones en algunos intervalos de tiempo. <b>Abajo:</b> Distribución de los errores de los ajustes sinusoidales, con bin=50 días. Se observa un peak $\sim 175$ días y que alrededor del 90 % de los casos los errores son menores 420 días. . . . .	63
4.22. Relación entre el superciclo sinusoidal y la dispersión de datos $\sigma_s$ , la línea sólida señala un ajuste lineal con pendiente $0.0051 \pm 0.0009$ y coeficiente de correlación $r=0.758$ , donde fue descartado el caso de la prototipo SU UMa ya que tiene $\sigma_s > 130$ días. . . . .	64
4.23. Superciclo sinusoidal versus semiamplitud donde se destaca el caso extremo para la prototipo SU UMa. De esta forma, descartando este caso la línea sólida señala un ajuste lineal con pendiente $0.013 \pm 0.002$ y coeficiente de correlación $r=0.758$ . . . . .	64
4.24. Relación entre dispersión de datos sinusoidales ( $\sigma_s$ ) y las semiamplitudes ( $A_{sin}$ ) donde se encuentra una fuerte correlación $r=0.911$ y pendiente $2.29 \pm 0.21$ . El caso extremo corresponde a la prototipo SU UMa. . . . .	65
4.25. Se muestra la relación entre las 'amplitudes' parabólica y sinusoidal donde es posible notar el caso extremo de la prototipo SU UMa. Además, se observa que la mayor parte de los casos se encuentran agrupados en un 'triángulo' con cortes claros en $A_{sin} \sim 500$ días y $A_p \sim 1640$ [d], correspondientes a 1.4 y 4.5 años respectivamente. Además, todos los valores están bajo una recta (línea a trazos) de pendiente 5. . . . .	65

4.26.	Relación entre superciclo promedio ( $\bar{P}_{SC}$ ) y superciclo sinusoidal ( $P_{SCsin}$ ). Se destaca el corte alrededor de $\bar{P}_{SC}$ 250[d] donde para superciclos menores a este límite se encuentra una correlación directa ( $r=0.923$ ). . . . .	66
4.27.	Relación de las desviaciones estándar a partir de los diferentes ajustes realizados. <b>Izquierda:</b> $\sigma_l$ vs $\sigma_s$ . <b>Derecha:</b> $\sigma_p$ vs $\sigma_s$ . Las líneas sólidas señalan ajustes lineales con correlaciones $r=0.883$ y $r=0.948$ respectivamente. Cabe destacar que el valor extremo para ambas gráficas corresponde a la prototipo SU UMa. . . . .	66
4.28.	Residuos O-C vs número de ciclos $E$ de las supererupciones luego de un ajuste lineal de mínimos cuadrados. Las líneas a trazos se refieren a los ajustes de períodos sinusoidales (detalles en Tabla 4.5). . . . .	68
4.29.	Relación entre el primer y segundo ajuste sinusoidal de mínimos cuadrados, $P_{SCsin}$ y $P_{SCsin2}$ respectivamente para 16 casos. La correlación lineal indica una pendiente $1.24 \pm 0.16$ y coeficiente de correlación $r=0.899$ . De esta forma, se observa que los superciclos $P_{SCsin2}$ son mayores a $P_{SCsin}$ . . . . .	73
4.30.	Relación entre la significancia de los ajustes parabólicos ( $a/\Delta a$ ) y la razón entre los ajustes sinusoidales $P_{SCsin}$ y $P_{SCsin2}$ . Se encuentra que 9 casos poseen superciclos sinusoidales muy similares $\simeq 1$ y 6 casos con $ a/\Delta a  > 3$ presentan períodos y amplitudes más grandes ya que los nuevos ajustes sinusoidales vienen a reemplazar al anterior ajuste parabólico. . . . .	73
4.31.	Relación entre el nuevo ajuste sinusoidal con los superciclos promedio para los 16 casos. Se encuentra un resultado similar a Figura 4.26, ya que para $\bar{P}_{SC} < 250$ [d] existe una fuerte correlación ( $r=0.951$ y pendiente $106.49 \pm 14.08$ ). Sin embargo, para $\bar{P}_{SC} > 250$ [d] no existe correlación ( $r=0.026$ ). . . . .	74
5.1.	Distribución de superciclos ( $P_{SC}$ ) para 231 SU UMa obtenidos por Vogt et al. (en preparación), con bin=20d. Se destaca un peak alrededor de los 250 días correspondiente al corte obtenido en Figura 4.12 que relaciona superciclos generales promedio y los sinusoidales. Por otro lado, el 90 % de los objetos posee valores menores a los 1000[d]. Para una mejor visualización de los datos se muestran superciclos hasta los 1300 días. . . . .	78
5.2.	Distribución de superciclos ( $P_{SC}$ ) para 115 SU UMa del catálogo RK (Ritter & Kolb 2003, versión 7.2 año 2013) con un bin de 20[d]. Además, la figura muestra un peak alrededor de los 350 días y donde el 90 % de los objetos posee valores menores a los 440[d]. . . . .	80
5.3.	Valores comparativos de 25 superciclos del catálogo RK (Ritter & Kolb 2003, versión 7.2 año 2013) y los obtenidos en sección 4.1 ( $\bar{P}_{SC}$ ). El ajuste lineal mostrado con una línea sólida descarta los 4 casos señalados, donde se obtiene una pendiente de $0.87 \pm 0.06$ con un coeficiente de correlación $r=0.960$ y $\sigma=33.74$ . Para el caso de V1159 Ori fue considerado el valor medio de 49 días. . . . .	80
5.4.	Comparación entre los valores de superciclo de Vogt (1980) (indicadas con cruces rojas) y los superciclos $C$ de este trabajo (círculos azules) para los 8 casos comunes. Aunque se observan valores similares en los mismos intervalos de tiempo, en el presente trabajo se pudieron encontrar superciclos más altos. . . . .	81
5.5.	Comparación del estudio de longitudes de superciclos para estrellas SU UMa de Otulakowska-Hypka & Olech (2013) con períodos menores a 120 días con los 4 casos comunes con el presente trabajo. Dicha investigación concluye que aparentemente todas las SU UMa presentan un aumento en sus superciclos a largo plazo. . . . .	84

5.6.	Relación entre 103 períodos orbitales y períodos cíclicos para 53 objetos. Se señalan con distintos símbolos las novas enanas del tipo U Gem, Z Cam y SU UMa (con círculos y triángulos los ajustes sinusoidales $P_{SCsin}$ y $P_{SCsin2}$ respectivamente) además de las nova-like. Aparentemente, las SU UMa ( $P_{orb} < 3h$ ) presentan en promedio períodos cíclicos más largos que las otras novas enanas ( $P_{orb} > 3h$ ). Por claridad no se incluye el caso de GK Per que posee un $P_{orb}$ de 47.9[h]. . . . .	91
5.7.	Relación entre 56 períodos orbitales y períodos cíclicos para 30 novas enanas del tipo SU UMa. Se distinguen en triángulos invertido rojos los valores encontrados en la literatura (14) y en círculos y triángulos azules los superciclos de mediano plazo encontrados en este trabajo $P_{SCsin}$ y $P_{SCsin2}$ respectivamente. No se encuentra ninguna correlación entre $P_{cic}$ y $P_{orb}$ . . . . .	91

# Resumen

Los sistemas estelares binarios compuestos por una componente primaria (enana blanca) y otra secundaria (estrella de secuencia principal) que presentan transferencia de masa son las llamadas variables cataclísmicas (CV, por sus siglas en inglés). El material que proviene desde la componente secundaria, luego de llenar su lóbulo de Roche, forma un disco de acreción alrededor de la enana blanca. Dentro de las CVs se encuentran las **novas enanas** que presentan erupciones de duración y frecuencia variables en sus curvas de luz, donde se distinguen 3 clases: las tipo U Gem o SS Cyg, Z Cam y las **SU UMa**. Éstas últimas poseen períodos orbitales menores a 3 horas y presentan erupciones normales que duran pocos días y erupciones más largas (alrededor de 2 semanas) y más brillantes llamadas **supererupciones**. El período de tiempo entre cada supererupción se denomina **superciclo** (entre 120 y 600 días) y cambia de forma cuasi-periódica. Así también, se distinguen las **ER UMa** que poseen superciclos más cortos cada 20 a 40 días.

El presente trabajo presenta un estudio en detalle de superciclos para 23 novas enanas del tipo SU UMa y 3 del tipo ER UMa. Mediante datos observacionales, principalmente desde la base de datos de la American Association of Variable Star Observers (AAVSO) y supererupciones reportadas en la literatura, se pudieron obtener hasta 88 años de observaciones para cada estrella. En consecuencia, se contabilizaron la mayoría de las supererupciones para asignarles números de ciclos  $E$  y con ello poder determinar los valores de superciclos típicos. De esta forma, mediante ajustes de mínimos cuadrados lineales de los números de ciclos  $E$  versus día juliano se obtuvieron superciclos generales promedio ( $\bar{P}_{SC}$ ) de entre 42 días hasta aproximadamente 1.5 años. Sin embargo, se encuentra que los superciclos presentan 3 tipos de variaciones en distintas escalas de tiempo que van desde pocos meses hasta algunas décadas. En primer lugar, los residuos O-C muestran rangos de superciclo aproximadamente constante después de 5 o más supererupciones y que representan **variaciones a corto plazo** en intervalos de tiempo de 1 a 33 años aproximadamente. De esta forma, estos superciclos  $C$  (130 casos) muestran valores que van desde los 34 días hasta alrededor de 1.7 años, encontrándose además entre 2 a 11 superciclos  $C$  por objeto. En segundo lugar, mediante ajustes de mínimos cuadrados parabólicos a los residuos O-C lineales se encuentra que 17 casos presentan cambios seculares significativos de superciclos, aumentando su valor en 11 o disminuyéndolo en 6 casos, lo que constituye **variaciones a largo plazo**. En tercer lugar, se encontraron **variaciones a mediano plazo** en todos los casos, donde a partir de ajustes de mínimos cuadrados sinusoidales a los residuos O-C parabólicos se determinaron superciclos ( $P_{SCsin}$ ) que van desde 5.4 a aproximadamente 48.4 años. Adicionalmente, se realizaron nuevos ajustes de mínimos cuadrados sinusoidales a los residuos O-C lineales, con ello se encontraron superciclos ( $P_{SCsin2}$ ) entre los 5.5 a los 58.6 años.

Por otra parte, para los  $\bar{P}_{SC}$  se pudieron distinguir dos grupos bien definidos, separados por el valor  $\bar{P}_{SC} = 250$  días. Por lo cual, se encuentra una fuerte correlación entre este parámetro versus tiempo de observación y  $P_{SCsin}$ , para  $\bar{P}_{SC}$  menores a los 250 días. Sin embargo, para  $\bar{P}_{SC} > 250[d]$  no se encuentra ninguna correlación significativa con los parámetros ya mencionados. Así mismo, se encuentra que alrededor de un 64% de los superciclos  $C$  están bajo los 250[d].

Los valores de  $\bar{P}_{SC}$  son comparados con otros resultados reportados en la literatura. A pesar de que se encuentran similitudes también existen diferencias substanciales principalmente referentes a las variaciones seculares de los superciclos. Finalmente, se investiga una posible relación de los superciclos sinusoidales ( $P_{SCsin}$  y  $P_{SCsin2}$ ) con ciclos de tipo solar ( $\simeq 22$  años), debido a variaciones en la componente secundaria de la binaria producto de fuertes campos magnéticos que se producen en las zonas convectivas en su interior. Tales variaciones se manifiestan en cambios a largo plazo de la magnitud promedio, variaciones pequeñas del período orbital ( $P_{orb}$ ) y, en el caso de novas enanas, variaciones del valor promedio de los intervalos entre erupciones consecutivas. De esta forma, en este estudio se comparan 54 variables cataclísmicas (CVs) y un total de 103 períodos cíclicos ( $P_{cic}$ ) donde

el valor medio para CVs con  $P_{\text{orb}} > 3\text{h}$  es de  $13.1 \pm 2.6$  años. Por el contrario, para  $P_{\text{orb}} < 3\text{h}$  el valor medio aumenta de forma significativa hasta  $23.6 \pm 1.7$  años. En consecuencia, las SU UMa podrían presentar ciclos de tipo solar con períodos mucho más largos que los de otros tipos de novae enanas.



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Estrellas variables cataclísmicas

Las variables cataclísmicas (CV, por las siglas en inglés de Cataclysmic Variable) son sistemas estelares binarios con sus componentes (primaria y secundaria) ligadas gravitacionalmente alrededor de su centro de masa. La principal característica de estos sistemas es la transferencia de masa desde la componente secundaria, una estrella de secuencia principal de tipo espectral G, K o M, hacia una enana blanca (componente primaria, con una masa típica de  $0.5-0.6 M_{\odot}$  pero cubriendo el rango  $0.3-1.3M_{\odot}$ ), ver Figura 1.1. Este proceso es posible debido a que ambas estrellas poseen superficies imaginarias en las que el potencial gravitacional es constante (denominadas superficies equipotenciales), si ambas equipotenciales se combinan forman una superficie crítica llamada *Lóbulo de Roche*. De esta forma si la secundaria llena su lóbulo, el material es transferido a través del punto de Lagrange L1, que es el punto donde ambas superficies se tocan. No obstante, este material no cae directamente en la superficie de la enana blanca sino que forma un disco de acreción alrededor debido a la conservación de momento angular. En este disco debido a que los sectores más cercanos a la componente primaria giran más rápido que los están más lejos, se produce fricción que calienta el gas que posteriormente irradia energía. Debido a que el campo gravitacional proporciona energía, algo del material se mueve hacia órbitas de menor tamaño. No obstante, por conservación de momento angular otra parte del material del disco se mueve a órbitas más grandes. En consecuencia, el disco se extiende hasta hacerlo delgado permitiendo que la masa comience a caer en espiral hacia la enana blanca para ser acretado. Luego de la formación del disco, el chorro de gas proveniente de la secundaria choca con el disco produciendo un punto brillante y caliente (ver Figura 1.1), esta región de colisión emite hasta un  $\sim 30\%$  de la luz total del sistema.

Esta configuración ha sido confirmada mediante diferentes observaciones de eclipses producidos por ambas componentes, por ejemplo Rolfe et al. (2001) observaron un eclipse de la binaria IY UMa, ver Figura 1.2. El diagrama de fases de la curva de luz muestra claramente un aumento de brillo en fase  $-0.4$  hasta  $0.21$  debido al punto brillante, no obstante alrededor de fase  $-0.1$  se produce un eclipse debido al paso de la enana blanca en la línea de la visual hasta fase  $0.05$  donde emerge. Así mismo, se observa un eclipse debido al punto brillante entre las fases  $-0.05$  y  $0.1$ .

Con lo anterior, el principal (sino el único) parámetro físico que se puede obtener de estos sistemas a partir de las observaciones es el período orbital ( $P_{\text{orb}}$ ) que puede revelar la distancia entre las componentes. La distribución de los períodos orbitales conocidos para 1429 CVs, obtenidos del catálogo de Ritter & Kolb (2003, versión 7.2 año 2013), es mostrada en Figura 1.3 y es importante destacar algunas características de esta distribución. En primer lugar, el incremento del período orbital está directamente relacionado con un mayor tamaño de la binaria, así como también con la

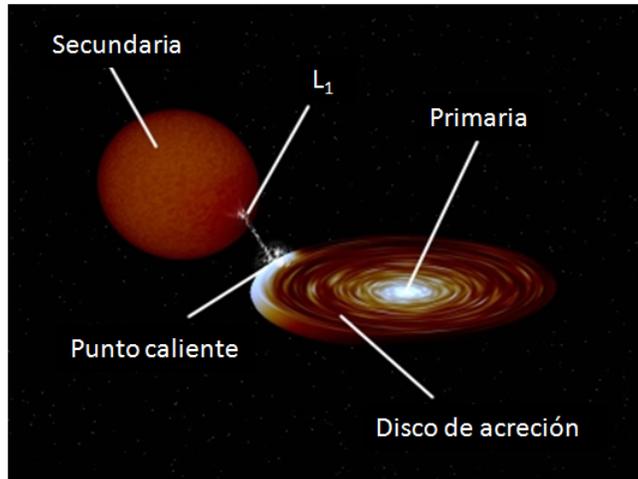


Figura 1.1: Esquema de una variable cataclísmica (CV) compuesta por una enana blanca (componente primaria) y una enana roja (componente secundaria). La transferencia de masa se realiza a través del punto de Lagrange (L1) formando un disco de acreción alrededor de la enana blanca. Luego, el chorro de material desde la componente secundaria choca contra el disco produciendo un punto caliente. En el caso de las novae enanas, se producen erupciones en sus discos de acreción que producen un aumento significativo en el brillo total del sistema.

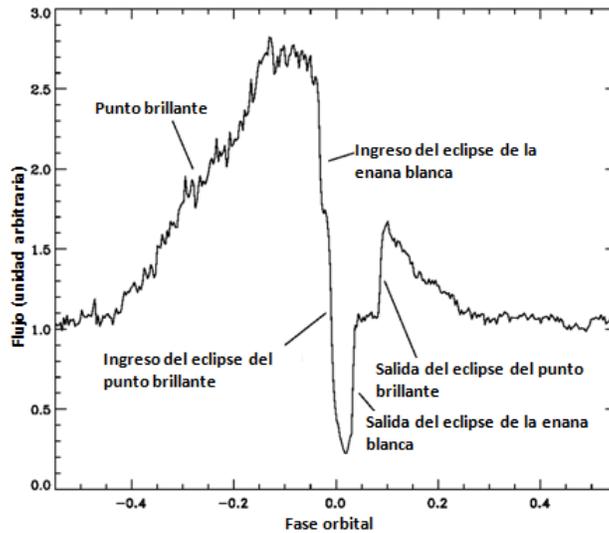


Figura 1.2: Diagrama de fase de la nova enana IY UMa. Se observa un aumento en el brillo debido al punto brillante (hotspot) junto con los eclipses producidos por la entrada y salida de la enana blanca. Curva de luz obtenida por Rolfe et al. (2001).

masa de la secundaria, ya que si el Lóbulo de Roche es más grande requerirá una estrella más masiva para llenarlo, lo anterior para  $P_{orb} \sim 12$  horas. El caso para períodos muchos mayores se explica con una estrella gigante roja como componente secundaria (menos masiva que una estrella normal pero mucho más grande). En segundo lugar, hay una disminución del número de sistemas con períodos orbitales entre 2 a 3 horas, llamado comúnmente *gap del período*, y que fue advertido inicialmente por Warner (1976). Sistemas que poseen tasas de transferencia de masa en torno a  $\dot{M} \sim 10^{-10} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$  producto de *radiación gravitacional* poseen períodos orbitales menores a 2 horas, por otro lado, tasas de transferencia mayores ( $\dot{M} \sim 10^{-9}-10^{-8} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ ) y que son características de *frenado*

*magnético* tienen  $P_{\text{orb}} > 3$  h (Hellier 2001). Ahora bien, dicho gap se debe a la transición de los dos procesos mencionados anteriormente y que produce un desequilibrio en la transferencia de masa desde la secundaria. Cuando el frenado magnético se detiene la componente secundaria se contrae, se despega de su lóbulo de Roche y por consiguiente la órbita se contrae, así como su lóbulo, a partir de esto nuevamente se produce el contacto entre la secundaria y el lóbulo hasta que finalmente se inicia la transferencia de masa mediante radiación gravitacional. Finalmente, existe una disminución drástica alrededor de los 70 minutos producto de la pérdida de masa de la estrella secundaria que la convierte en una estrella *degenerada* (como la enana blanca). Este tipo de objetos se rigen por leyes de la mecánica cuántica, al contrario de estrellas 'normales' que son soportadas por presión del gas. De esta forma, las enanas blancas aumentan su tamaño cuando la transferencia de masa disminuye. Ahora bien, si una burbuja de material de acreción se transfiere, la binaria se expande y su lóbulo de Roche se despega, no obstante la secundaria también se expande ligeramente. Luego, si nuevamente se produce el contacto, el período será más largo producto de una secundaria más grande y de esta forma el sistema evoluciona a períodos más largos.

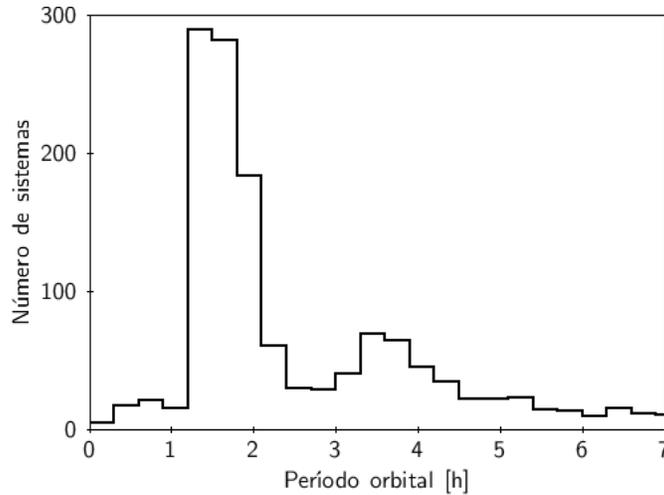


Figura 1.3: Distribución de períodos orbitales para 1429 variables cataclísmicas del catálogo de Ritter & Kolb (2003, versión 7.2 año 2013), con  $\text{bin}=0.3$  días. Se observa una rápida disminución en torno a las 2 horas para luego aumentar ligeramente alrededor de las 3 horas, este intervalo es llamado gap del período.

Respecto a la clasificación de variables cataclísmicas existen dos grandes grupos, las *magnéticas* y las *no magnéticas*. En el primer grupo los campos magnéticos de la estrella primaria juegan un rol importante ya que pueden impedir la formación, total o parcial, del disco de acreción dando como consecuencia las subtipo *polares* o *polares intermedias* respectivamente. Por el contrario, el segundo grupo, las CVs *no magnéticas* los campos magnéticos no son tan fuertes y pueden observarse distintos clases de sistemas. Las *novas clásicas*, que se presentan en ambos grupos, son estrellas donde sólo se ha observado una erupción, que aumenta de 6 hasta 19 magnitudes el brillo del sistema, si su amplitud es grande su duración será breve, por el contrario, si se presenta una amplitud más baja la erupción se puede observar por algunos años. Dicha erupción es producto del material rico en hidrógeno que se acreta en la superficie de la enana blanca y que produce una reacción termonuclear desencadenada. Por otro lado, dentro de las CVs no magnéticas, encontramos las *novas recurrentes* que al igual como las novas clásicas poseen erupciones pero éstas se repiten. Así mismo, existen las *variables nova-like* que reúne a la mayoría de las CVs no eruptivas, las cuales podrían ser pre-novas o post-novas que, a falta de observaciones, no se han detectado nuevas erupciones.

## 1.2. Novas Enanas

Adicionalmente, dentro de las CVs no magnéticas existe otra subclase que son las denominadas *novas enanas* (DN, por las siglas en inglés de Dwarf Novae) que se caracterizan por presentar erupciones en el disco de acreción de forma semiregular, no obstante su duración y frecuencia son variables, ver Figura 1.4.

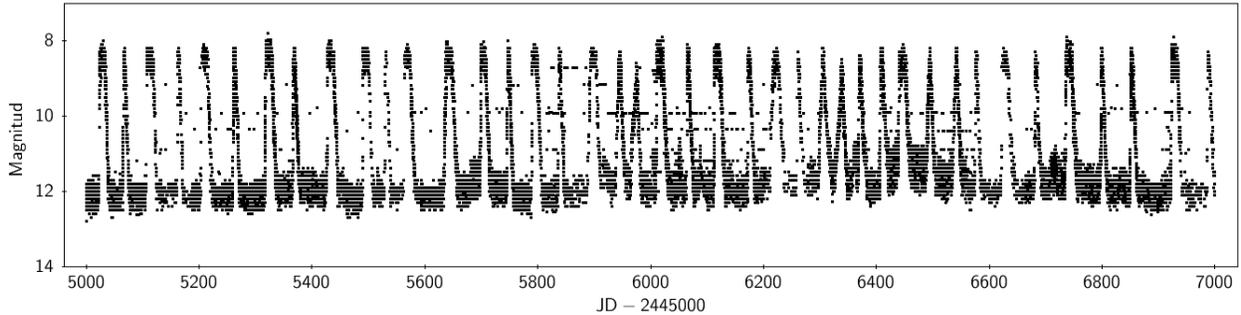


Figura 1.4: Curva de luz de alrededor de 5 años y medio de la nova enana prototipo SS Cyg mostrando erupciones periódicas aproximadamente cada 50 días. Datos obtenidos desde AAVSO.

Debido a numerosas observaciones de muchos astrónomos tanto profesionales como aficionados, se pueden distinguir diferentes clases de novas enanas clasificadas de acuerdo a las características de sus curvas de luz. Dichas clases son detalladas a continuación:

1. **Tipo U Gem o SS Cyg**, se destacan principalmente por poseer erupciones más o menos periódicas de corta duración, con amplitudes de hasta 5 magnitudes. Las Figuras 1.4 y 1.5 muestran las estrellas prototipo de esta clase.

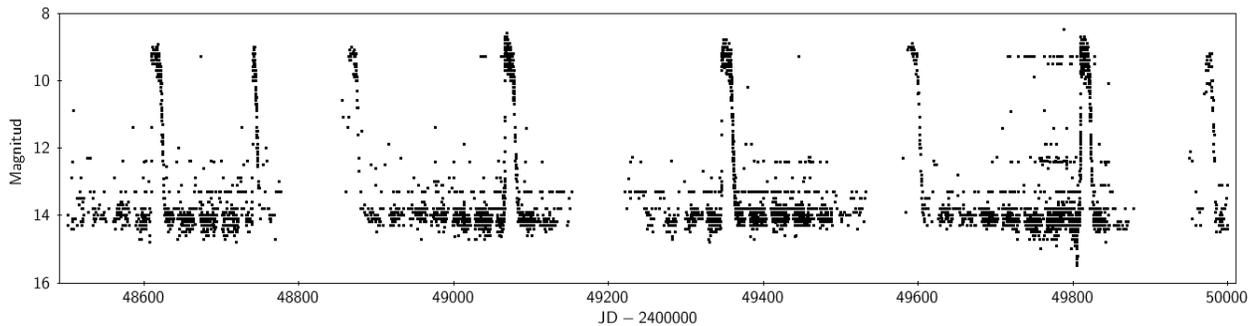


Figura 1.5: Curva de luz de la nova enana prototipo U Gem cubriendo aproximadamente 4 años de observaciones, mostrando erupciones semiregulares con amplitudes de  $\approx 5$  magnitudes, aproximadamente cada 100 o 200 días. Datos obtenidos desde AAVSO.

2. **Tipo Z Cam**, si bien presentan intervalos de tiempo con erupciones frecuentes que duran alrededor de 300 días, éstas luego son interrumpidas por períodos de brillo aproximadamente constante, denominado *standstill*, 0.7 magnitudes menos que el brillo máximo y que pueden durar desde varios días hasta algunos años, ver Figura 1.6.
3. **Tipo SU UMa**, esta clase posee erupciones normales que duran pocos días y largas supererupciones más brillantes y que se prolongan por alrededor de 10 a 14 días, ver Figura 1.7. Por otro lado, el tiempo entre cada supererupción, denominado *período de superciclo* (PSC) se caracteriza por ser semiregular, con períodos típicos de 120 a 600 días. Igualmente, de esta

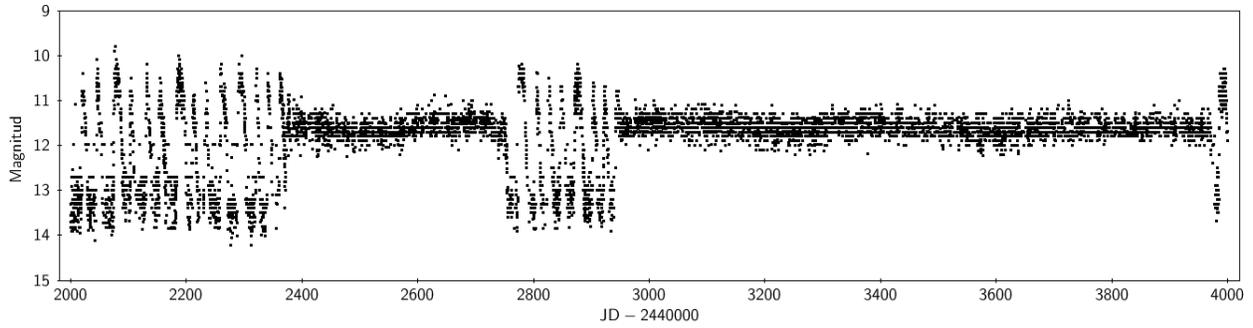


Figura 1.6: Curva de luz de alrededor de 5 años y medio de la nova enana prototipo Z Cam. Se destacan erupciones frecuentes para luego dar paso a períodos de brillo casi constante. Datos obtenidos desde AAVSO.

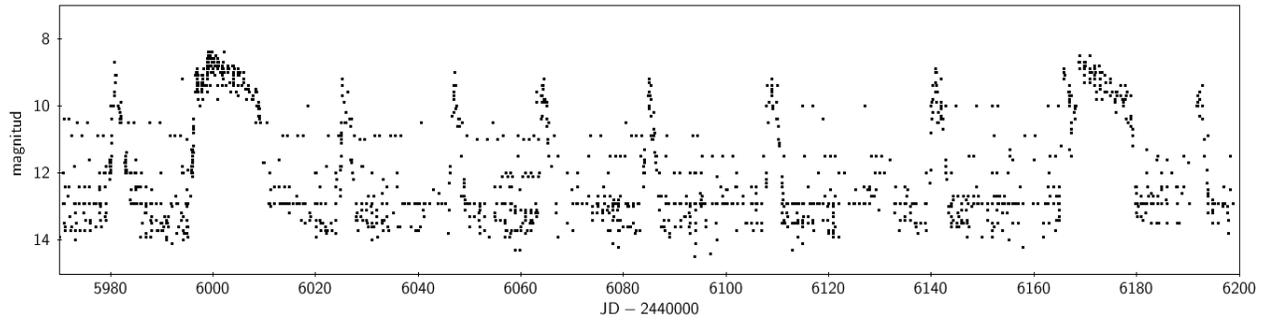


Figura 1.7: Sección de aproximadamente 6 meses de la curva de luz de VW Hyi, una nova enana del tipo SU UMA, mostrando erupciones con amplitudes de entre 5 a 6 magnitudes. Éstas tienen diferentes formas, las más cortas y menos brillantes son llamadas erupciones normales mientras que las más anchas y brillantes son las supererupciones. Datos obtenidos desde AAVSO.

última clase se pueden distinguir las llamadas estrellas *ER UMa* que poseen superciclos mucho más cortos (20 a 40 días). Cabe señalar que la clase SU UMA es el tema del presente trabajo de tesis, es por esto que en la sección 1.3 se describen en detalle sus características e importancia de estudio.

En cuanto a los períodos orbitales, los datos del catálogo de CVs por Ritter & Kolb (2003, v7.2) muestran que de 735 novas enanas 627 casos, que corresponden a aproximadamente un  $\sim 85\%$ , pertenecen a estrellas del tipo SU UMA y todas poseen un  $P_{\text{orb}} < 3\text{h}$ , ver línea roja a trazos de la Figura 1.8 que muestra además que la mayoría de los otros tipos de DNs, es decir U Gem y Z Cam, poseen períodos orbitales mayores a 3 horas.

Ahora bien, todas estas erupciones son producidas por inestabilidades en el disco de acreción debido a un aumento temporal en la tasa de transferencia de masa. Todos estos cambios pueden visualizarse como un ciclo en un gráfico de densidad superficial ( $\Sigma$ , definida como masa por unidad de área integrada a través del disco en la dirección  $z$ ) versus temperatura ( $T$ ) llamada *curva S*, ver Figura 1.9. Cuando el disco se encuentra estable se sitúa en el punto A. Éste incrementará su densidad superficial gradualmente si hay un aumento de la transferencia de masa desde la secundaria. Al aumentar la viscosidad lo hace también la temperatura del disco, moviéndose al punto B. En este punto el hidrógeno comienza a ser ionizado aumentando su temperatura considerablemente, no obstante su densidad superficial se mantiene aproximadamente constante debido a que la escala de tiempo de cambio en la viscosidad es mucho mayor al tiempo de aumento de la temperatura. En el punto C se alcanza nuevamente el equilibrio donde la luminosidad se mantiene debido a una mayor temperatura y a un aumento del flujo hacia adentro por una viscosidad más alta. Tomando

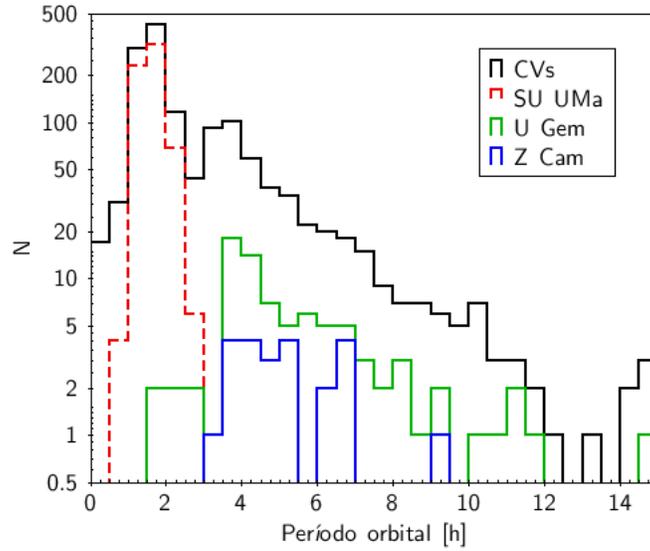


Figura 1.8: Distribución de períodos orbitales para 1429 variables cataclísmicas (CVs) del catálogo de Ritter & Kolb (2003), con bin=0.5 horas, donde se destacan 735 objetos clasificados como novae enanas las tipo SU UMa (627), U Gem (85) y Z Cam (23). Notar los períodos orbitales menores a 3 h para todas las SU UMa (línea roja a trazos). Por claridad se excluyó el objeto J2044-0459 (tipo U Gem) que posee un  $P_{orb}=40.32$  horas.

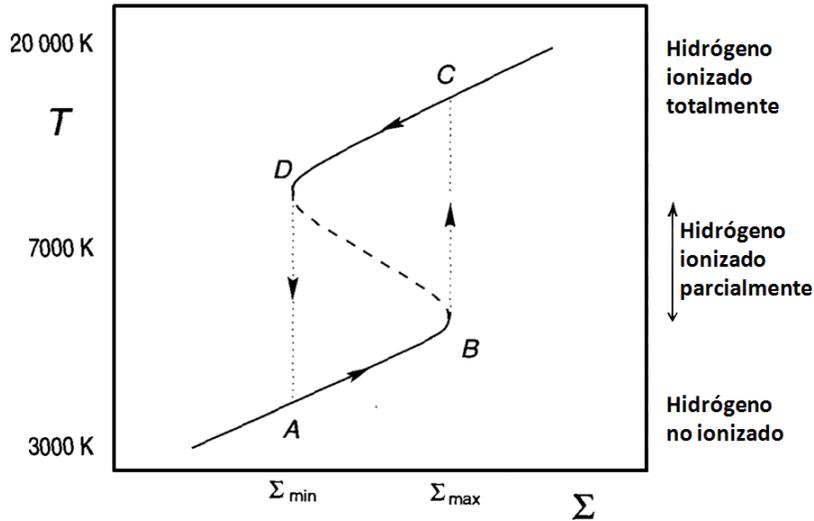


Figura 1.9: Ciclo de una nova enana en función de la densidad superficial ( $\Sigma$ ) versus la temperatura del disco ( $T$ ). La curva S fuerza al disco a seguir el ciclo  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$ . Imagen obtenida de Hellier (2001) a partir de Meyer & Meyer-Hofmeister (1981).

en cuenta que dicho flujo es mayor al proporcionado por la secundaria, la densidad superficial y la temperatura disminuyen hasta llegar al punto D. En este momento el hidrógeno está parcialmente ionizado, aumenta la opacidad (que obstruye el flujo de radiación) y el calor no puede escapar. Finalmente, la temperatura cae, se recombinan los iones, disminuye la viscosidad y el disco vuelve a un estado de inactividad. En resumen, si el hidrógeno está parcialmente ionizado y hay un aumento de la temperatura esto provoca un aumento en la opacidad, y de la viscosidad, reteniendo el calor aumentando aún más la temperatura e ionizando completamente el hidrógeno, como resultado el

disco alcanza un equilibrio pero a una temperatura mucho más alta. Sin embargo, este estado no puede sustentarse por largos períodos, de esta forma el disco debe volver a su estado original.

### 1.3. Novas enanas del tipo SU UMa

Como ya se mencionó anteriormente, una característica que destaca a las SU UMa son sus supererupciones, que son alrededor de 0.7 mag más brillantes y con una duración más larga. Se observa además que todas las supererupciones poseen un forma similar, ver por ejemplo la parte superior de la Figura 1.10. Aparentemente estas supererupciones comienzan como erupciones normales que posteriormente aumentan su brillo, para luego decaer ligeramente por varios días y declinar rápidamente como una erupción normal. Así mismo, la frecuencia a la que se presentan estas supererupciones es menor a las erupciones normales, no obstante se repiten más regularmente que éstas.

Por otro lado, Vogt (1974) y Warner (1975) descubrieron de forma independiente que durante una de sus supererupciones la estrella VW Hyi presentó una variación fotométrica con una amplitud en torno a 0.2-0.3 magnitudes y un período ligeramente más largo que el período orbital, denominada *superhump*, y que posteriormente fue observada en todas las estrellas SU UMa (ver parte inferior de Figura 1.10). Un paso importante para entender este fenómeno fue dado por Vogt (1982) quién observó desfases en las curvas de velocidades radiales de la nova enana eclipsante Z Cha, revelando la existencia de un anillo excéntrico que rodea el disco de acreción interno durante una supererupción. De esta forma, los superhumps podrían surgir de la energía potencial máxima que se libera en el punto brillante del disco formado por el choque entre el flujo de material y el anillo. Por otro lado, Whitehurst (1988) mediante simulaciones numéricas del disco de acreción de Z Cha demostró que para sistemas con una razón de masa  $q = M_2/M_1 < 0.25$ , que se espera especialmente para las SU UMa, el disco se vuelve inestable por fuerzas de marea. En consecuencia, el disco se vuelve asimétrico, elíptico y comienza a rotar lentamente, produciéndose los superhumps.

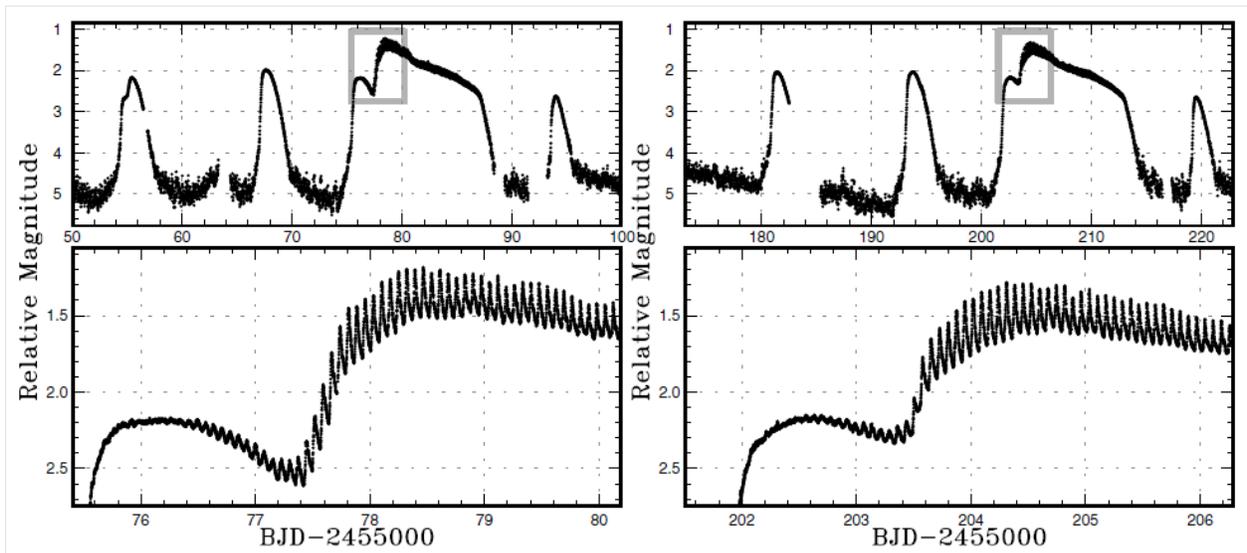


Figura 1.10: *Arriba*: Erupciones y supererupciones de la nova enana tipo SU UMa V1504 Cyg. *Abajo*: A partir del zoom se muestra el fenómeno de superhump. Figura obtenida de Osaki & Kato (2013) con datos de Kepler.

Finalmente, en cuanto al fenómeno de las erupciones, han sido propuestos diferentes modelos que tratan de explicar como se producen las erupciones normales y supererupciones en las novas enanas SU UMa, entre ellos el que más destaca es el llamado *Modelo de inestabilidad térmica y de marea*

(TTI, por sus siglas en inglés) que toma en cuenta no tan solo las inestabilidades termales sino que también las de marea en los discos de acreción y que fue propuesto inicialmente por Osaki (1989). Este modelo considera que la transferencia de masa es constante y que las erupciones normales y supererupciones se producen por inestabilidades termales en el disco de acreción. Durante las erupciones normales la masa acretada es menor al período de inactividad y la masa en el disco gradualmente aumenta. Cuando el radio del disco alcanza un radio crítico ( $r \sim 0.46A$ , donde  $A$  es la separación de la binaria) el radio exterior del disco llega a una resonancia 3:1 entre el período de rotación del disco y el período orbital del sistema (Whitehurst 1988), de esta forma se produce una supererupción. Sin embargo, esta resonancia se produce para sistemas con razón de masa  $q < 0.25$  que corresponde a períodos orbitales  $\leq 2$  h como muestran la mayoría de estrella SU UMa. Este modelo se presenta en la Figura 1.11 donde se muestran una curva de luz y la variación del radio y la masa del disco. De esta forma, las erupciones se entienden como una variación del radio y la masa del disco. Mientras erupciones normales solo quitan poca masa del disco, las supererupciones lo vacían a gran escala.

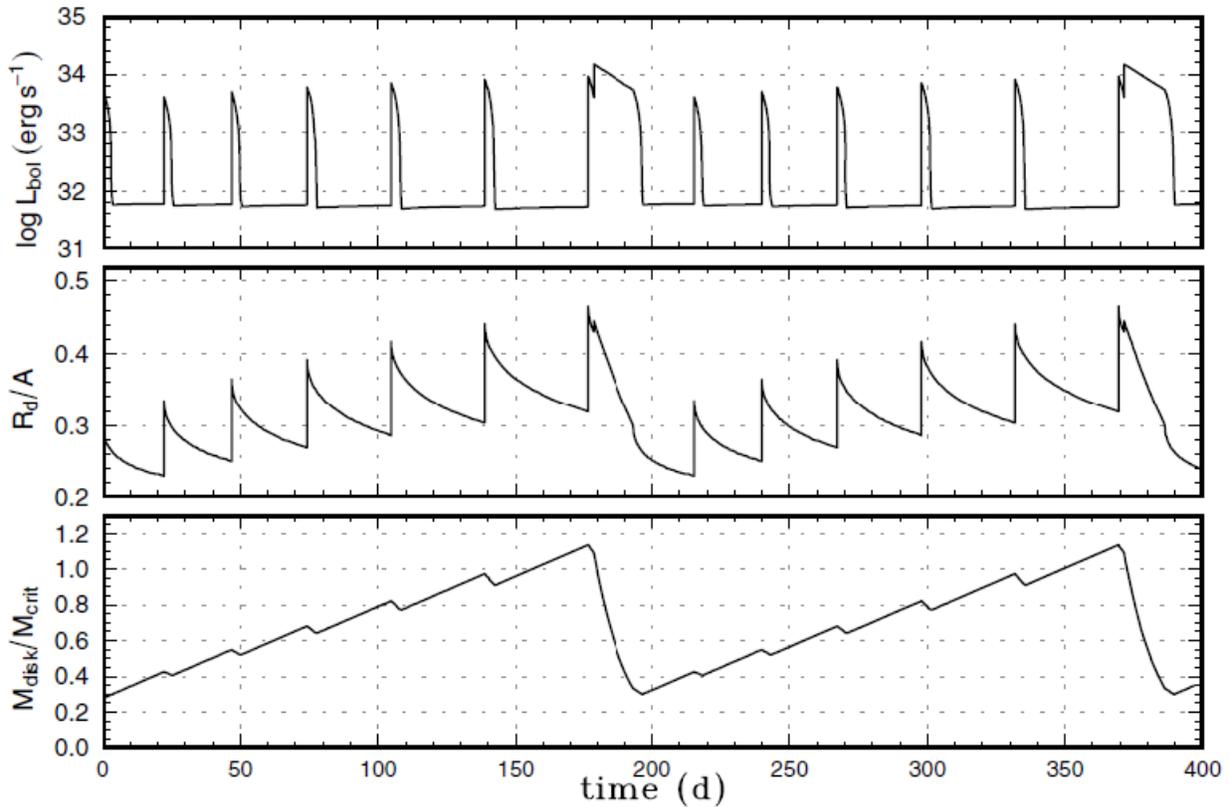


Figura 1.11: Evolución en el tiempo del disco de acreción durante dos superciclos modelado para el caso de VW Hyi, una estrella del tipo SU UMa. De arriba hacia abajo: (a) Curva de luz bolométrica, (b) radio exterior del disco ( $R_d$ ) en unidades de separación de la binaria  $A$ , y (c) masa total del disco ( $M_{\text{disk}}$ ), normalizada por una masa crítica ( $M_{\text{crit}}$ ) sobre la cual el disco puede ser inestable. Figura obtenida de Osaki (2005).

## Capítulo 2

# Motivación

Las novae enanas son un gran laboratorio natural para testear modelos durante estados estables e inestables de un disco de acreción. En consecuencia, es de vital importancia poseer observaciones de estos sistemas para entender la física que rodea la formación y evolución de discos de acreción, no tan solo en novae enanas, sino que en otros objetos de interés que van desde formación estelar hasta agujeros negros supermasivos en núcleos de galaxias activas. Sin embargo, las novae enanas presentan diferentes estados del disco en los cuales varía su temperatura, densidad superficial  $\Sigma$  y viscosidad en el mismo objeto. Además, dichas variaciones se presentan en escalas de tiempo pequeñas en comparación con los objetos antes mencionados. Observaciones de estos objetos se vienen dando hace muchas décadas por diferentes asociaciones de astrónomos amateurs y profesionales, entre ellas se destacan la sección de estrellas variables de la Sociedad Astronómica Real de Nueva Zelanda (RASNZ), la Asociación Astronómica Británica (BAA) y la Asociación Americana de Observadores de Estrellas Variables (AAVSO) que han observado de forma constante y prolongada éstos y otros objetos del cielo. En consecuencia, se posee una amplia base de datos desde las década de 1930 hasta la actualidad que contienen fechas, magnitudes máximas, anchos, amplitudes, tasas de subida y bajada de erupciones/supererupciones junto con sus tiempos de recurrencia que permiten estudiar en profundidad los cambios producidos antes, durante y después de las erupciones de novae enanas.

En novae enanas del tipo SU UMa ocurren las supererupciones con una periodicidad bastante bien marcada. Sin embargo, a mediano y largo plazo (escalas de tiempo de años hasta décadas) hay variaciones significativas en el período  $P_{SC}$ , como fue demostrado por Vogt (1980) quién midió el período de tiempo entre supererupciones consecutivas (superciclo o  $P_{SC}$ ) de 10 novae enanas, entre ellas 8 del tipo SU UMa, y como consecuencia encontró de 2 a 3 diferentes superciclos periódicos, mediante ajustes lineales en rangos de superciclo constante, que denominó ciclos (C) y ordenando sus valores en forma creciente, es decir,  $C1 < C2 < C3$ , etc. En el caso de los residuos O-C<sup>1</sup> de Z Cha por ejemplo (ver Figura 2.1) dichos ciclos se repitieron alternadamente a lo largo de 24 años, es decir una secuencia del tipo  $C2 \rightarrow C1 \rightarrow C2 \rightarrow C1$ . No obstante, dicho trabajo no abarcó el suficiente tiempo para comprobar esa secuencia a largo plazo. Además, cabe señalar que estudios de ese tipo no se han publicado desde aquella época.

A partir del estudio hecho por Vogt (1980), el presente trabajo amplía dicho estudio reuniendo alrededor de 88 años de observaciones, aumentando considerablemente la cobertura en tiempo. De esta forma, a partir de la búsqueda y conteo de supererupciones de 26 novae enanas, 23 de ellas

---

<sup>1</sup>Se refiere a la diferencia entre el tiempo observado real y el tiempo calculado, en este caso a partir de un ajuste lineal de mínimos cuadrados, para detectar cambios en el período. De esta forma, una línea horizontal significa que no hay cambios en el período, así mismo, una línea inclinada y recta en el diagrama implica un período constante. Por otro lado, una curva representa un cambio en el período, en consecuencia, una desviación a O-C más grandes significa un aumento en el período y viceversa.

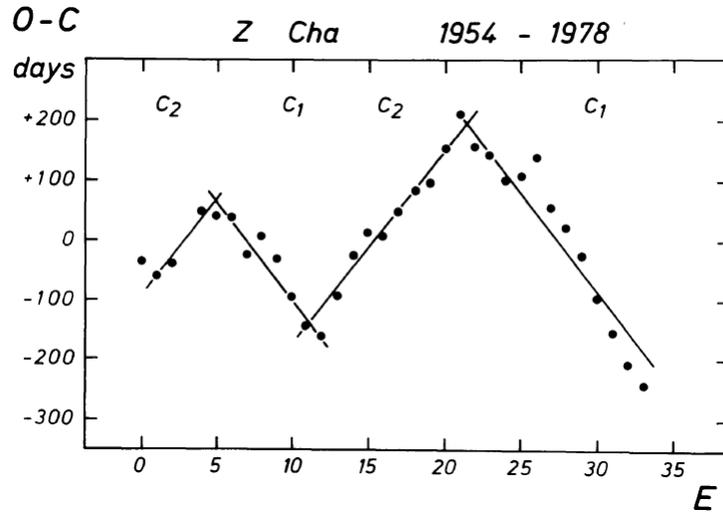


Figura 2.1: Residuos O-C de un ajuste de mínimos cuadrados lineal versus número de ciclo  $E$  de supererupciones de la estrella Z Cha, novana enana del tipo SU UMa, abarcando 24 años de observaciones. Las líneas sólidas son los períodos mejor ajustados en rangos de longitud de superciclo constante  $C$ , que se repiten de forma periódica. Imagen obtenida de Vogt (1980).

del tipo SU UMa y 3 del tipo ER UMa, se busca determinar períodos de superciclos. Lo anterior, principalmente a través de la base de datos de AAVSO y otras fuentes, con el objetivo de confirmar si las multiperiodicidades encontradas por Vogt (1980) se siguen repitiendo. Estos datos son valiosos para estudiar el fenómeno de las erupciones y ver si otro tipo de variaciones en distintas escalas de tiempo se producen.

# Capítulo 3

## Metodología

### 3.1. Datos y asignación de número de ciclo $E$

Se obtuvieron datos observacionales de 26 novas enanas del tipo SU UMa (ver Tabla 3.1), dentro de ellas 3 del tipo ER UMa, desde las bases de datos de la *American Association of Variable Star Observers* (AAVSO) disponibles en su página web<sup>2</sup>, y de diferentes publicaciones con datos de la *Royal Astronomical Society of New Zealand* (RASNZ) y de la *British Astronomical Association* (BAA) que poseen un análisis en detalle de los cambios en las curvas de luz. Estas agrupaciones poseen una amplia base de datos, mayoritariamente en la banda visual, además de una gran cobertura en el tiempo para muchos objetos. En consecuencia, se tuvo acceso (en algunos casos) a aproximadamente 88 años de observaciones.

Por lo tanto, teniendo una enorme base de datos disponible se procedió a una revisión de todas las curvas de luz, para obtener el día juliano (JD), tomando como referencia la magnitud máxima (ya que las supererupciones son más brillantes) al inicio de cada supererupción. Sin embargo, ya que el presente estudio trata sobre la periodicidad de superciclos, la variabilidad en las magnitudes no se consideró. Con lo anterior, la primera supererupción encontrada corresponde al número de ciclo  $E=0$ . Posteriormente se estimó un período de tiempo mínimo entre supererupciones consecutivas para estimar un período de superciclo válido y de esta forma asignar los restantes  $E$  en forma correlativa, ver Figura 3.1. Sin embargo, en intervalos de tiempo con pocas observaciones se consideró la duración y forma de las supererupciones como se observa en Figura 3.1, con el objetivo de descartar falsas asignaciones de  $E$  ya que algunas erupciones normales podrían encontrarse dentro del período de superciclo estimado. Así mismo, es necesario destacar que el período de superciclo cambia a lo largo del tiempo, no obstante se hizo una revisión exhaustiva para una correcta asignación de los números de ciclos  $E$ . Por otra parte, se utilizaron datos publicados por diferentes autores y que fueron usados en el trabajo de Vogt (1980). Por lo tanto, se procedió a la búsqueda de supererupciones, para incluir nuevos  $E$ , no disponibles en la base de datos de AAVSO y que en algunos casos correspondían a observaciones más antiguas (ver referencias en Tabla 3.1). Finalmente, hay que tomar en cuenta que en algunos casos por razones climáticas, o por temporadas en las que es imposible observar estos objetos, se producen algunos intervalos de tiempo con pocos datos disponibles y en consecuencia el correcto conteo de supererupciones se dificulta. Por lo tanto, se decidió que si estos intervalos excedían dos o más veces el período de tiempo promedio entre supererupciones, previos o posteriores a dichos intervalos, se asumió que uno o más supererupciones habían sucedido pero que no fueron

---

<sup>2</sup><https://www.aavso.org>. Si bien en un principio se consideraron sistemas adicionales que estaban disponibles en esta base de datos, no fue posible hacer un análisis debido principalmente a falta de datos observacionales en las curvas de luz. Estos sistemas son AK Cnc, AW Gem, FO And, HS Vir, RZ LMi (del tipo ER UMa) y V803 Cen.

Table 3.1. Lista de las 26 SU UMa analizadas en el presente trabajo. Además, se incluyen las coordenadas junto con los períodos orbitales ( $P_{\text{orb}}$ ). Por otra parte, se señalan otras fuentes de la literatura con listas de supererupciones.

Nombre	RA[J2000]	Dec[J2000]	$P_{\text{orb}}$ (d)	Referencias	Comentarios
AQ Eri	05 06 13.12	-04 08 07.3	0.060940	(1)	...
AY Lyr	18 44 26.686	+37 59 52.01	0.073700	(2)	...
CU Vel	08 58 33.03	-41 47 51.7	0.078054	(2)	...
CY UMa	10 56 57.00	+49 41 18.2	0.069570		...
EK TrA	15 14 01.47	-65 05 32.1	0.062880	(2)	...
ER UMa	09 47 11.94	+51 54 08.9	0.063660		Tipo ER UMa
FS Aur	05 47 48.36	+28 35 11.1	0.059581		Tipo ER UMa
GX Cas	00 49 01.47	+56 52 43.6	0.089000		...
IR Gem	06 47 34.68	+28 06 22.3	0.068400		...
OY Car	10 06 22.07	-70 14 04.6	0.063121	(3)	...
QZ Vir	11 38 26.82	+03 22 07.0	0.058820		...
RZ Sge	20 03 18.47	+17 02 51.9	0.068280		...
SU UMa	08 12 28.26	+62 36 22.5	0.076350	(2)	...
SW UMa	08 36 42.76	+53 28 37.9	0.056815	(4)	...
TT Boo	14 57 44.756	+40 43 40.67	0.075600		...
TU Men	04 41 40.70	-76 36 45.8	0.117200	(5)	...
TY Psc	01 25 39.35	+32 23 09.0	0.068330		...
UV Per	02 10 08.30	+57 11 20.8	0.064900	(4)	...
V436 Cen	11 14 00.05	-37 40 47.8	0.062501	(2)	...
V503 Cyg	20 27 17.41	+43 41 22.5	0.077759		...
V1159 Ori	05 28 59.57	-03 33 52.3	0.062178		Tipo ER UMa
VW Hyi	04 09 11.399	-71 17 41.58	0.074271	(2)	...
VZ Pyx	08 59 19.84	-24 28 55.4	0.073320		...
WX Hyi	02 09 50.84	-63 18 39.9	0.074813	(2)	...
YZ Cnc	08 10 56.65	+28 08 33.5	0.086800		...
Z Cha	08 07 27.75	-76 32 00.7	0.074499	(2)	...

Note. — Los períodos orbitales fueron obtenidos de Ritter & Kolb (2003, v7.2 del 2013).

Referencias con listados de supererupciones:

- (1) Bateson (1982)
- (2) Vogt (1980) y referencias allí dentro
- (3) Bateson (1983)
- (4) Isles (1975)
- (5) Bateson (1979)

observadas.

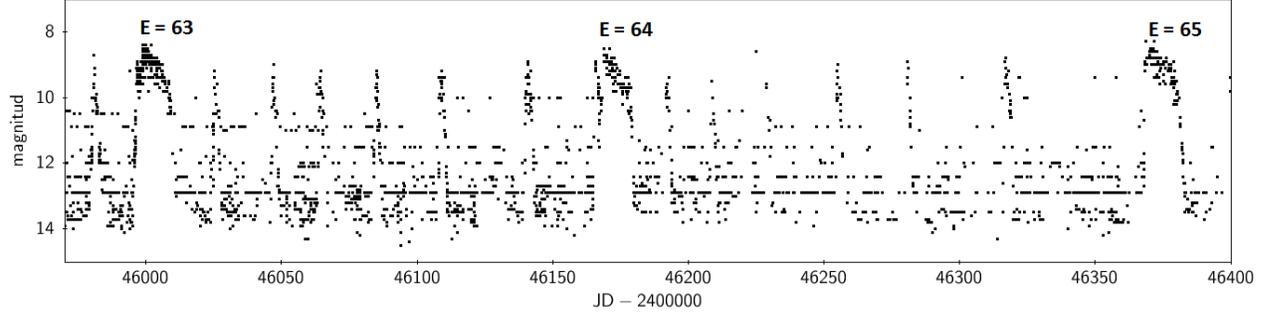


Figura 3.1: Sección de alrededor de 14 meses de la curva de luz de VW Hyi, una nova enana del tipo SU UMa, en la que se muestra la asignación de número de ciclos E al inicio de cada supererupción. Datos obtenidos de AAVSO.

## 3.2. Variaciones de la periodicidad de superciclos

Como ya se mencionó, durante el proceso de conteo de supererupciones fue posible notar que el período de tiempo entre cada supererupción presenta diferentes variaciones. Por consiguiente, se procedió a analizar las periodicidades de los superciclos para entender variaciones en distintas escalas de tiempo. Si bien los resultados obtenidos se presentan en el siguiente capítulo el procedimiento llevado a cabo se detalla a continuación, en el cual se ha utilizado como ejemplo el caso de WX Hyi.

### 3.2.1. Comportamiento a corto plazo

A partir de las gráficas JD vs E, (ver arriba en Figura 3.2), se realizó un ajuste lineal de mínimos cuadrados<sup>3</sup> para obtener el *período promedio general de superciclo* ( $\bar{P}_{SC}$ ). Lo anterior, mediante la siguiente expresión:

$$T = T_0 + \bar{P}_{SC} * E \quad (3.1)$$

<sup>3</sup>Si se tiene una recta de la forma  $Y = m * X + b$ , los valores de la pendiente (m) e intercepto (b) son calculados mediante las siguientes expresiones:

$$m = \frac{N \sum_{i=1}^N X_i Y_i - \sum_{i=1}^N X_i \sum_{i=1}^N Y_i}{N \sum_{i=1}^N X_i X_i - \sum_{i=1}^N X_i X_i}; \quad b = \frac{\sum_{i=1}^N X_i X_i \sum_{i=1}^N Y_i - \sum_{i=1}^N X_i \sum_{i=1}^N X_i Y_i}{N \sum_{i=1}^N X_i X_i - \sum_{i=1}^N X_i X_i}$$

Y sus errores vienen dados por:

$$\Delta m = \sqrt{\frac{N}{N \sum_{i=1}^N X_i X_i - \sum_{i=1}^N X_i \sum_{i=1}^N X_i} \chi^2(b, m)}; \quad \Delta b = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N X_i X_i}{N \sum_{i=1}^N X_i X_i - \sum_{i=1}^N X_i \sum_{i=1}^N X_i} \chi^2(b, m)}$$

donde N corresponde al número de datos, b al intercepto, m a la pendiente y  $\chi^2(b, m) = \sum_{i=1}^N (Y_i - m X_i - b)^2$

donde:

- $T$ , corresponde al tiempo en días julianos (JD) al inicio de la supererupción, en general, en el brillo máximo.
- $T_0$ , es el tiempo en JD que corresponde a la primera supererupción observada ( $E=0$ ).
- $\bar{P}_{SC}$ , período de tiempo promedio entre cada supererupción dado en días.
- $E$ , es el número de ciclo.

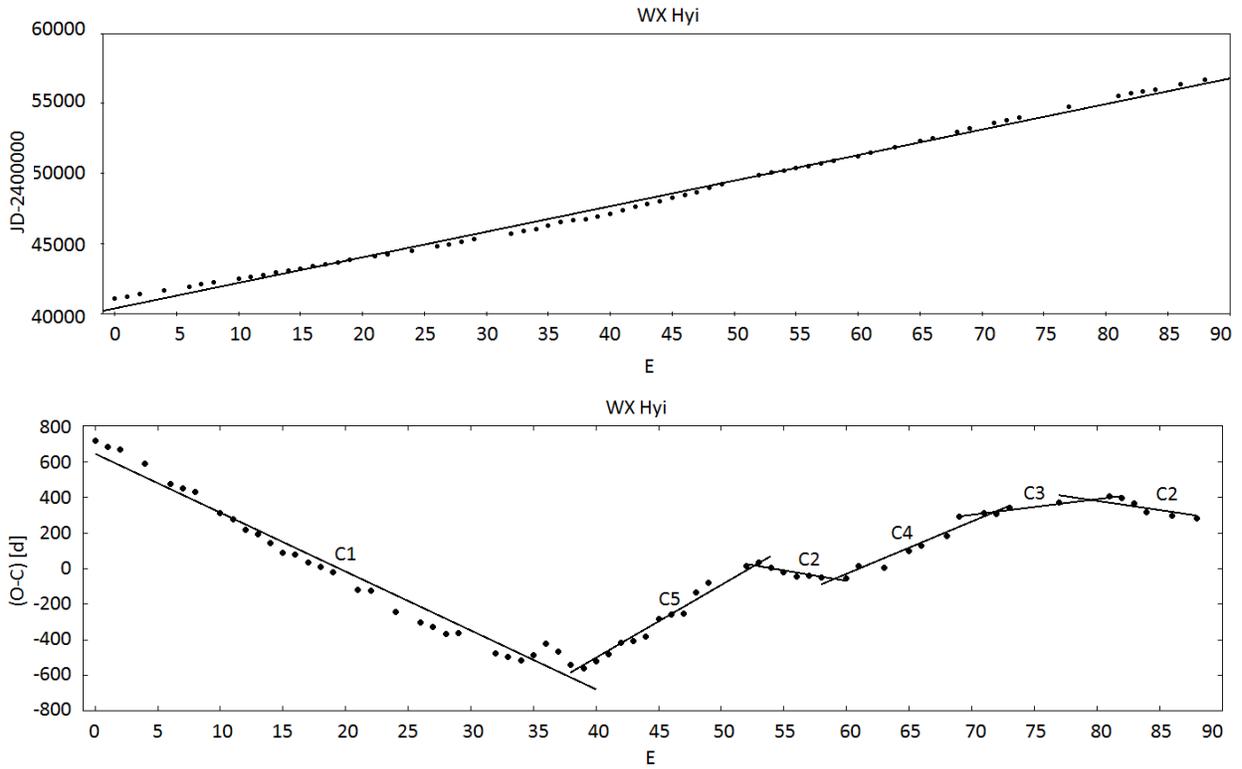


Figura 3.2: **Arriba:** A partir de los datos JD versus  $E$  de WX Hyi se procedió a hacer un ajuste lineal de mínimos cuadrados para determinar un período promedio de superciclo ( $\bar{P}_{SC}$ ). **Abajo:** Los residuos O-C muestran diferentes pendientes que son producto de variaciones a corto plazo en el intervalo de tiempo entre cada supererupción, dando cuenta de superciclos aproximadamente constantes. El superciclo C2 corresponde a un promedio ponderado según relación 3.2.

Así mismo, los residuos O-C de la relación 3.1 muestran que en algunos intervalos de tiempo existen pendiente que posteriormente pueden cambiar de sentido, dando cuenta de un cambio en el período de tiempo entre las supererupciones. Lo anterior ya había sido observado por Vogt (1980) y que denominó como *Ciclos*, ver Capítulo 2 de este trabajo. Teniendo en cuenta esto, se realizaron ajustes de mínimos cuadrados lineales en estos intervalos, que incluyen al menos 5 supererupciones abarcando de esta forma aproximadamente un año de observaciones, y con los extremos traslapados (ver Figura 3.2, abajo). En consecuencia, todos estos diferentes superciclos fueron ordenados como C1, C2, C3 y así sucesivamente empezando desde el período más corto. Por otra parte, si algunos de estos nuevos ciclos tenían valores similares (dentro de los errores estándar,  $\pm 1\sigma$ ) se asumió que correspondían al mismo período y por lo tanto se hizo un promedio ponderado usando:

$$\bar{C} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{C_i}{\Delta C_i^2}}{\sum_{i=1}^N \Delta C_i^2} \quad (3.2)$$

y su error viene dado por:

$$\Delta \bar{C} = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \Delta C_i^2}} \quad (3.3)$$

donde:

- $\bar{C}$  es el promedio ponderado de ciclos con valores similares.
- $C_i$  es el valor del superciclo encontrado mediante el ajuste de mínimos cuadrados en las diferentes pendientes del diagrama O-C.
- $\Delta C_i$  es el error estándar (o desviación estándar)<sup>4</sup> de  $C_i$  luego del ajuste lineal.

Los diferentes ajustes son mostrados para el caso de WX Hyi con una línea sólida en la parte inferior de la Figura 3.2, donde se muestra además que el ciclo C2 se 'repite' dos veces en los intervalos E=52-60 y E=77-88, en este caso se hizo un promedio ponderado mediante la relación 3.2 y se obtuvo un superciclo de  $171.4 \pm 2.0$  [d] en contraste con el período promedio de superciclo de WX Hyi que es  $\bar{P}_{SC} = 182.4 \pm 1.7$  [d].

### 3.2.2. Comportamiento a largo plazo

A partir de los residuos O-C de los ajustes lineales, se observa que los superciclos en algunos casos muestran una variación a largo plazo, lo cual representa una disminución o aumento del período luego de varias décadas de observaciones. Con lo anterior, se procedió a realizar un ajuste parabólico de mínimos cuadrados según la siguiente expresión:

$$T = T_0 + P_{SC,0} * E + a * E^2 \quad (3.4)$$

donde:

- T, corresponde al tiempo en días julianos (JD) al inicio de la supererupción, en general, en el brillo máximo.
- $T_0$ , es el tiempo en JD que corresponde a la primera supererupción observada (E=0).
- $P_{SC,0}$ , es el período inicial del superciclo en días.
- E, corresponde al número de ciclo.
- $a$ , es el parámetro que especifica la concavidad de la parábola. Si  $a > 0$  la parábola es cóncava hacia arriba, por el contrario, si  $a < 0$  la concavidad es hacia abajo.

---

<sup>4</sup>Se utiliza la misma expresión de  $\Delta m$

El ajuste es mostrado nuevamente para el caso de WX Hyi con una línea sólida en la Figura 3.3, donde se obtiene que el  $P_{SC,0}$  inicial es de  $139.03 \pm 3.17$  [d], en contraste con el  $\bar{P}_{SC}$  que es  $182.4 \pm 1.7$  [d], alrededor de 43 días mayor. En consecuencia, el aumento en los valores de O-C luego de  $E=40$  representa un claro aumento en el valor de los superciclos.

Por otro lado, es posible observar una 'amplitud' de la parábola, este valor representa cuanto aumentan o disminuyen los superciclos a lo largo de varias décadas. Para el caso de WX Hyi fue determinado usando la diferencia en días entre los valores de O-C en  $E=0$  y  $E$  en el ápice de la parábola ( $E \simeq 45$ ), ver Figura 3.3, así mismo su error absoluto se utilizó la relación  $\sqrt{2} \Delta T_0$ , donde  $\Delta T_0$  es el error estándar en el cálculo de  $T_0$  luego del ajuste parabólico. En consecuencia, se obtuvo un 'amplitud' parabólica  $A_p = 927.4 \pm 84.9$  [d].

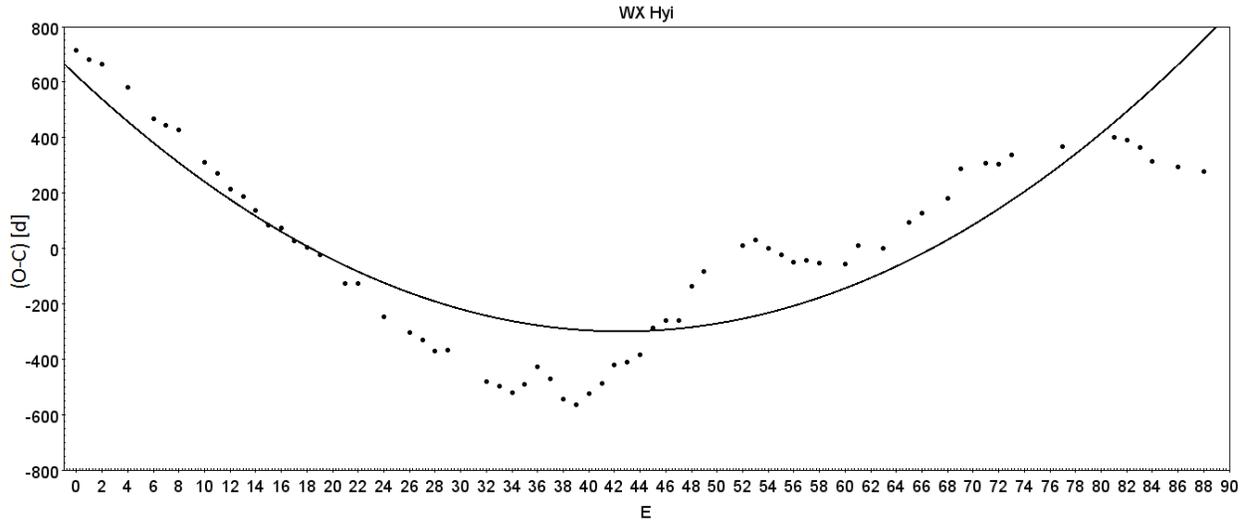


Figura 3.3: Ajuste de mínimos cuadrados parabólico de WX Hyi a partir de los residuos O-C del ajuste lineal. La gráfica muestra una variación a largo plazo de los superciclos.

### 3.2.3. Comportamiento a mediano plazo

Posteriormente, se procedió a analizar los residuos O-C de los ajustes parabólicos los cuales muestran una variación de tipo sinusoidal y que corresponden a variaciones a mediano plazo en los superciclos. A partir de esto se realizó un ajuste sinusoidal de la forma:

$$O - C = A * \sin \frac{2\pi * (E - \phi)}{\varepsilon} \quad (3.5)$$

donde:

- O-C, corresponde a los residuos (desviación estándar) de los ajustes parabólicos.
- A, es la semiamplitud en días.
- E, corresponde al número de ciclo.
- $\phi$ , es la fase inicial (fase de la función seno en la época E=0).
- $\varepsilon$ , es el superciclo dado en número de ciclos E.

El ajuste sinusoidal en el caso de WX Hyi se muestra en la Figura 3.4 con una línea a trazos. Lo anterior, arrojó una semiamplitud de  $211.36 \pm 14.61[d]$  y un superciclo de  $\varepsilon=60.74 \pm 1.67[E]$ . Para transformar este período a días se utiliza la siguiente expresión:

$$P_{SCsin} = \bar{P}_{SC} * \varepsilon \quad (3.6)$$

donde:

- $P_{SCsin}$ , corresponde al superciclo de mediano plazo, obtenido del ajuste sinusoidal.
- $\bar{P}_{SC}$ , período de tiempo promedio entre cada supererupción dado en días, obtenido del ajuste lineal.
- $\varepsilon$ , es el superciclo dado en número de ciclos E.

A partir de las relaciones 3.5 y 3.6, se pudo obtener un  $P_{SCsin}$  de aproximadamente  $11079 \pm 304.61[d]$  ( $\sim 30.4$  años) y una semiamplitud de  $211.4 \pm 14.6[d]$ .

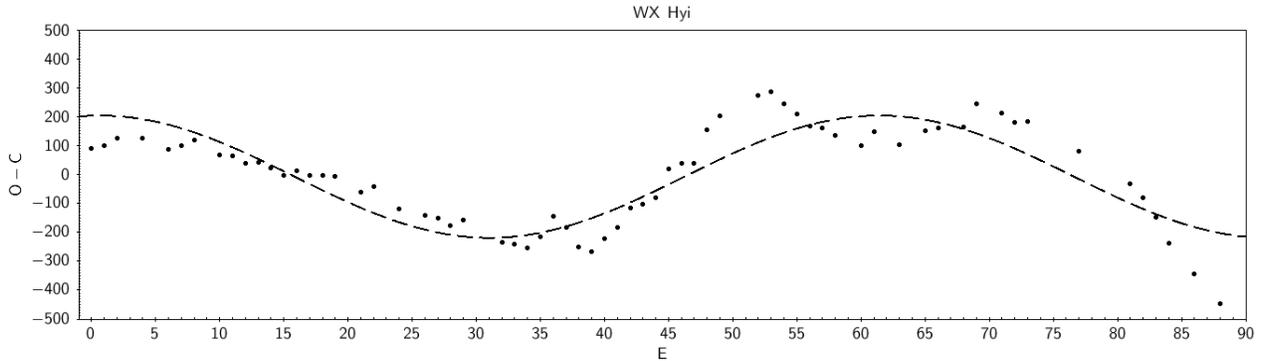


Figura 3.4: Ajuste de mínimos cuadrados sinusoidal a partir de los residuos O-C del ajuste parabólico para WX Hyi. Este ajuste representa una variación a mediano plazo de los superciclos.

### 3.2.4. Sobre las variaciones sinusoidales

Es necesario recalcar que es posible que los residuos O-C de los ajustes parabólicos presenten variaciones sinusoidales que podrían no ser reales. Por ejemplo, en Figura 3.3 se observa que los residuos oscilan cuasiperiódicamente sobre y bajo el ajuste parabólico, presentando una variación sinusoidal, ver Figura 3.4. En consecuencia, se realizó un nuevo ajuste sinusoidal de mínimos cuadrados utilizando esta vez los residuos O-C del ajuste lineal (ver línea sólida en Figura 3.5), para evitar posibles oscilaciones artificiales. De forma análoga, acorde a las relaciones 3.5 y 3.6 se pudo obtener un nuevo período sinusoidal ( $P_{SCsin2}$ ) para WX Hyi, de  $14289.2 \pm 392.2$  [d] ( $\sim 39.1$  años) y una semiamplitud más alta de  $454.8 \pm 18.5$ [d] ya que este ajuste reemplaza a la parábola. El período  $P_{SCsin2}$  representa un aumento de alrededor de un 28 % respecto a  $P_{SCsin}$  y donde la nueva semiamplitud es más del doble al cálculo anterior. Por eso, en el subcapítulo 4.5 se presentará adicionalmente una comparación entre los períodos sinusoidales  $P_{SCsin}$  y  $P_{SCsin2}$ .

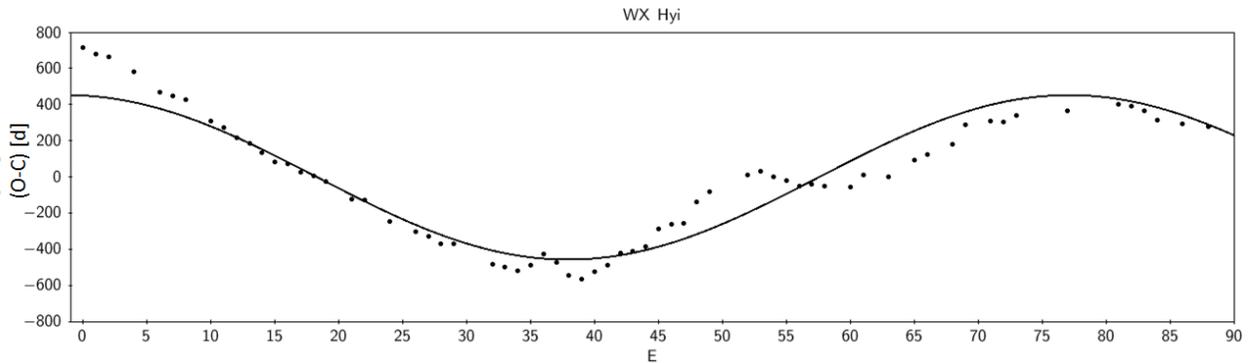


Figura 3.5: Nuevo ajuste de mínimos cuadrados sinusoidal, esta vez, a partir de los residuos O-C del ajuste lineal para WX Hyi. Notar las diferencias en período y semiamplitud con Figura 3.4.

# Capítulo 4

## Resultados

Como consecuencia del conteo del número de ciclos  $E$  se encuentra que los superciclos varían a lo largo del tiempo. Las gráficas de los residuos O-C de los ajustes lineales muestran que las SU UMa presentan simultáneamente distintos tipos de periodicidades en diferentes escalas de tiempo, las que van desde algunos meses hasta décadas. A partir de esto, este trabajo utiliza por primera vez distintos tipos de ajustes de mínimos cuadrados (lineales, parabólicos y sinusoidales) para determinar la multiperiodicidad de los superciclos utilizando una base de datos extensa y estudiando la mayor cantidad de objetos hasta la fecha. Los resultados y detalle son presentados a continuación.

### 4.1. Superciclos promedio

Mediante los ajustes de mínimos cuadrados lineales<sup>5</sup> entre los números de ciclos  $E$  y día juliano (JD) de las supererupciones se pudieron determinar los períodos de tiempo promedio entre supererupciones consecutivas de 26 novas enanas del tipo SU UMa. En consecuencia, la Tabla 4.1 muestra los resultados de estos ajustes, junto con otros valores de interés. Dicho lo anterior, se obtuvieron los promedios generales de superciclos ( $\bar{P}_{SC}$ ) para 23 SU UMa que oscilan entre los  $88.34 \pm 0.088[d]$  para el caso de V503 Cyg hasta los  $531.1 \pm 7.4[d]$  para EK TrA. Para los 3 casos restantes, es decir las subtipo ER UMa que poseen superciclos más cortos, se encontraron  $\bar{P}_{SC}$  entre  $42.17 \pm 0.70[d]$  para FS Aur hasta  $49.29 \pm 0.086[d]$  para la estrella prototipo ER UMa. A su vez el promedio de los superciclos de las SU UMa fue de  $274.95[d]$  con una desviación estándar  $\sigma=117.2[d]$ , revelando un amplio rango de variación de los períodos. No obstante, la distribución de los superciclos (ver Figura 4.1) muestra un peak en torno a los 200 días debido a los sistemas VW Hyi, WX Hyi, TY Psc y TU Men con superciclos en el rango  $\sim 182-190$  días. Así también se puede destacar a los sistemas tipo ER UMa con  $\bar{P}_{SC}$  menores a los 100[d].

A partir de los datos mostrados en Tabla 4.1 se puede notar que FS Aur posee la menor cantidad de días observados  $T_{obs}$ <sup>7</sup> que corresponde a aproximadamente  $\sim 10.4$  años, por otro lado la prototipo SU UMa y UV Per poseen un mayor tiempo de observación de supererupciones con  $\sim 87.7$  y  $\sim 88.2$  años respectivamente, y donde el promedio de tiempo de observación para toda la muestra fue alrededor de  $\sim 45.8$  años. Por otro lado, si se comparan el número de supererupciones encontradas ( $N_{SC}$ ) en las curvas de luz versus  $E_{max}$ , ver izquierda de Figura 4.2, se obtiene un coeficiente de correlación<sup>6</sup>  $r=0.931$  y pendiente  $1.16 \pm 0.09$ . Así mismo, la suposición de que en algunos casos una o más supererupciones habían ocurrido pero no habían sido observadas, ver sección 3.1, se

<sup>5</sup>Las gráficas de los residuos O-C se muestran en Sección 4.2.

<sup>7</sup> $T_{obs}$ , se refiere a la diferencia en días entre el último número de ciclo  $E_{max}$  y  $E=0$ .

<sup>6</sup>Es el llamado coeficiente de correlación de Pearson y que es una medida lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas. Se calcula mediante la siguiente expresión:

Table 4.1. Resultados de los ajustes lineales de mínimos cuadrados a partir del número de ciclos  $E_{\max}$  para 26 novae enanas del tipo SU UMa. Se señala el tiempo total de observación ( $T_{\text{obs}}$ ), número de ciclos  $E$  encontrados ( $N_{\text{SC}}$ ), superciclo promedio ( $\bar{P}_{\text{SC}}$ ), dispersión de los datos ( $\sigma_l$ ), coeficiente de correlación ( $r$ ) obtenida de los ajustes y relación  $\sigma_l/\bar{P}_{\text{SC}}$ .

Nombre	$T_{\text{obs}}[\text{d}]$	$N_{\text{SC}}$	$E_{\max}$	$\bar{P}_{\text{SC}}[\text{d}]$	$\sigma_l[\text{d}]$	$r$	$\sigma_l/\bar{P}_{\text{SC}}$
AQ Eri	14271	30	49	<b>291.9 ± 2.8</b>	218.7	0.998733	0.749
AY Lyr	30912	116	150	<b>206.0 ± 0.2</b>	104.2	0.999930	0.506
CU Vel	22268	44	59	<b>366.0 ± 1.6</b>	185.6	0.999575	0.507
CY UMa	9361	23	27	<b>331.5 ± 3.3</b>	128.1	0.998944	0.386
EK TrA	20477	25	38	<b>531.1 ± 7.4</b>	383.0	0.997746	0.721
ER UMa*	8778	145	178	<b>49.29 ± 0.086</b>	54.7	0.999780	1.110
FS Aur*	3787	41	91	<b>42.17 ± 0.70</b>	113.6	0.994596	2.694
GX Cas	7841	22	23	<b>341.1 ± 1.8</b>	58.3	0.999718	0.171
IR Gem	15703	48	108	<b>147.7 ± 0.7</b>	131.9	0.999516	0.893
OY Car	19128	51	61	<b>311.1 ± 1.8</b>	230.6	0.999148	0.741
QZ Vir	10638	22	26	<b>410.5 ± 3.8</b>	147.3	0.999137	0.359
RZ Sge	13729	36	49	<b>281.5 ± 1.3</b>	112.3	0.999630	0.399
SU UMa	31993	112	124	<b>230.2 ± 2.0</b>	848.9	0.995694	3.688
SW UMa	18043	24	40	<b>460.2 ± 2.5</b>	137.7	0.999677	0.299
TT Boo	15084	47	56	<b>268.1 ± 0.6</b>	73.0	0.999875	0.272
TU Men	19365	83	100	<b>190.4 ± 0.5</b>	136.6	0.999715	0.717
TY Psc	16753	58	88	<b>189.0 ± 0.5</b>	95.7	0.999804	0.506
UV Per	32183	44	78	<b>413.5 ± 1.7</b>	253.0	0.999630	0.612
V436 Cen	20113	24	46	<b>426.5 ± 9.8</b>	555.1	0.994260	1.302
V503 Cyg	10915	77	124	<b>88.34 ± 0.088</b>	25.6	0.999964	0.290
V1159 Ori*	7646	104	166	<b>45.72 ± 0.043</b>	20.8	0.999954	0.455
VW Hyi	22683	125	125	<b>181.7 ± 0.2</b>	83.6	0.999921	0.460
VZ Pyx	6952	34	52	<b>128.4 ± 1.0</b>	94.4	0.998951	0.735
WX Hyi	15618	66	88	<b>182.4 ± 1.7</b>	348.1	0.997077	1.908
YZ Cnc	17460	100	147	<b>117.8 ± 1.0</b>	390.9	0.996608	3.318
Z Cha	22491	88	96	<b>228.9 ± 1.4</b>	370.3	0.998295	1.618

Note. —  
 (\*) Tipo ER UMa.

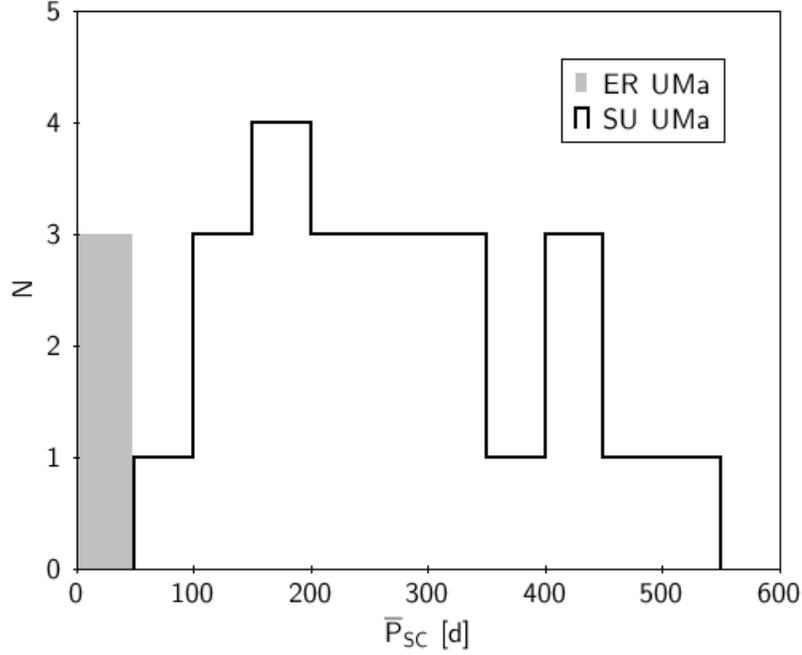


Figura 4.1: Distribución de los promedios generales de superciclos ( $\bar{P}_{SC}$ ), bin=50 días, luego de un ajuste de mínimos cuadrados lineales de día juliano (JD) versus números de ciclos  $E$  para 26 novae enanas del tipo SU UMa. Se destaca en gris los 3 casos de novae enanas del subtipo ER UMa con períodos menores a los 50 días.

confirma. Como resultado, 1589 supererupciones fueron observadas ( $N_{SC}$ ) de un total de 2205 ( $E_{max}$ ), correspondiente a un 72.1 %.

Por otra parte, si se compara el promedio general de los superciclos con el total de ciclos  $E$  ( $E_{max}$ ) se observa que hay una tendencia de que a mayor número de ciclos  $E$  los  $\bar{P}_{SC}$  disminuyen, ver derecha Figura 4.2, donde se muestra un ajuste lineal (línea sólida) con una anticorrelación

$$r = \frac{N \sum_{i=1}^N X_i Y_i - \sum_{i=1}^N X_i \sum_{i=1}^N Y_i}{\sqrt{N \sum_{i=1}^N X_i^2 - \left( \sum_{i=1}^N X_i \right)^2} \sqrt{N \sum_{i=1}^N Y_i^2 - \left( \sum_{i=1}^N Y_i \right)^2}}$$

donde  $N$  corresponde al número de datos y  $X$  e  $Y$  corresponden a las variables aleatorias. El valor del índice  $r$  se encuentra dentro del intervalo  $[-1,1]$ , de esta forma si  $r = 1$  o  $r = -1$ , corresponde a una correlación positiva o negativa perfecta, respectivamente, implicando una relación directa entre las variables. Por otro lado, si  $r = 0$  no existe relación lineal. Si se encuentra dentro de los intervalos  $0 < r < 1$  o  $-1 < r < 0$ , existe una correlación positiva o negativa, respectivamente.

Además, el error del ajuste lineal  $\sigma_l$  (o también conocido como raíz del error cuadrático medio), viene dado por:

$$\sigma_l = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - Y_i)^2}{N}}$$

donde  $N$  corresponde al número de datos,  $Y_i$  a la variable dependiente e  $\hat{Y}_i$  a la variable calculada por el modelo.

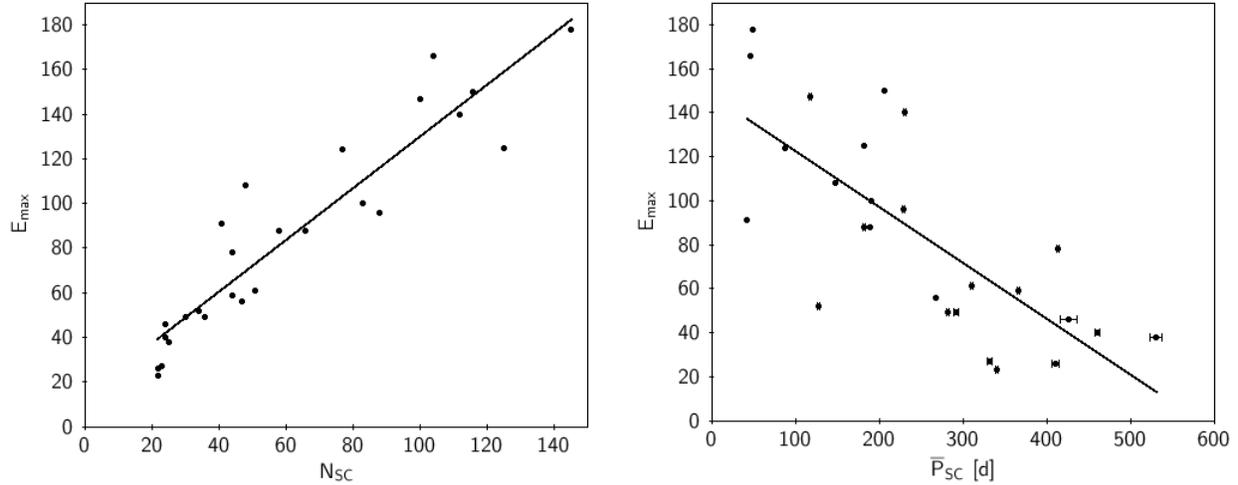


Figura 4.2: **Izquierda:** Comparación entre el número de supererupciones encontradas ( $N_{SC}$ ) y el total de número de ciclos  $E(E_{\max})$ , la línea sólida señala un ajuste lineal con coeficiente de correlación  $r=0.931$  y pendiente  $1.16 \pm 0.09$ . **Derecha:** Períodos superciclos promedios ( $\bar{P}_{SC}$ ) versus  $E_{\max}$ . La línea sólida señala un ajuste lineal con una correlación  $r=0.747$  que muestra una tendencia que a mayor cantidad de número de ciclos  $E$  se encuentran superciclos más cortos. Ver discusión en texto.

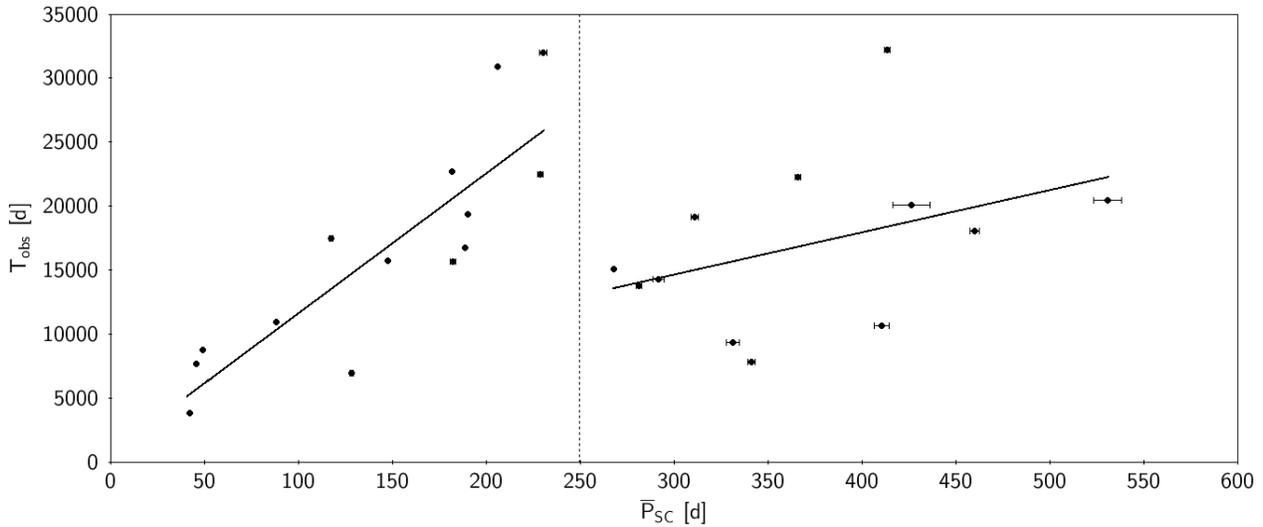


Figura 4.3: Relación entre superciclo promedio ( $P_{SC}$ ) y el tiempo total de observaciones ( $T_{obs}$ ), se refiere al total en días de observaciones. Se destaca el corte que se produce en  $P_{SC} \sim 250$ [d] donde se encuentra una correlación alta con  $r=0.857$  para  $P_{SC}$  menores a 250 días (línea sólida). No obstante, para períodos mayores no se encuentra ninguna correlación ( $r=0.397$ ).

$r=-0.747$  y pendiente  $-0.25 \pm 0.05$ . No obstante, esto sería producto de una base de datos extensa, como en el caso de este trabajo, en la cuál es más probable encontrar una mayor cantidad de supererupciones y, por lo tanto, superciclos más cortos. Por otra parte, si se compara los  $\bar{P}_{SC}$  y el tiempo de observación ( $T_{obs}$ ), ver Figura 4.3, se encuentra que existe un corte en torno a los 250 días que divide la muestra en dos grupos bien definidos. De modo que, existe una fuerte correlación para  $\bar{P}_{SC}$  menores a 250[d], donde el ajuste lineal señala un  $r=0.857$  con una pendiente  $109.39 \pm 18.98$ . Por el contrario, para superciclos sobre los 250 días la correlación es débil  $r=0.397$ , con pendiente  $33.03 \pm 24.12$ . Sin embargo, estas correlaciones están restringidas a la amplitud de la base de datos

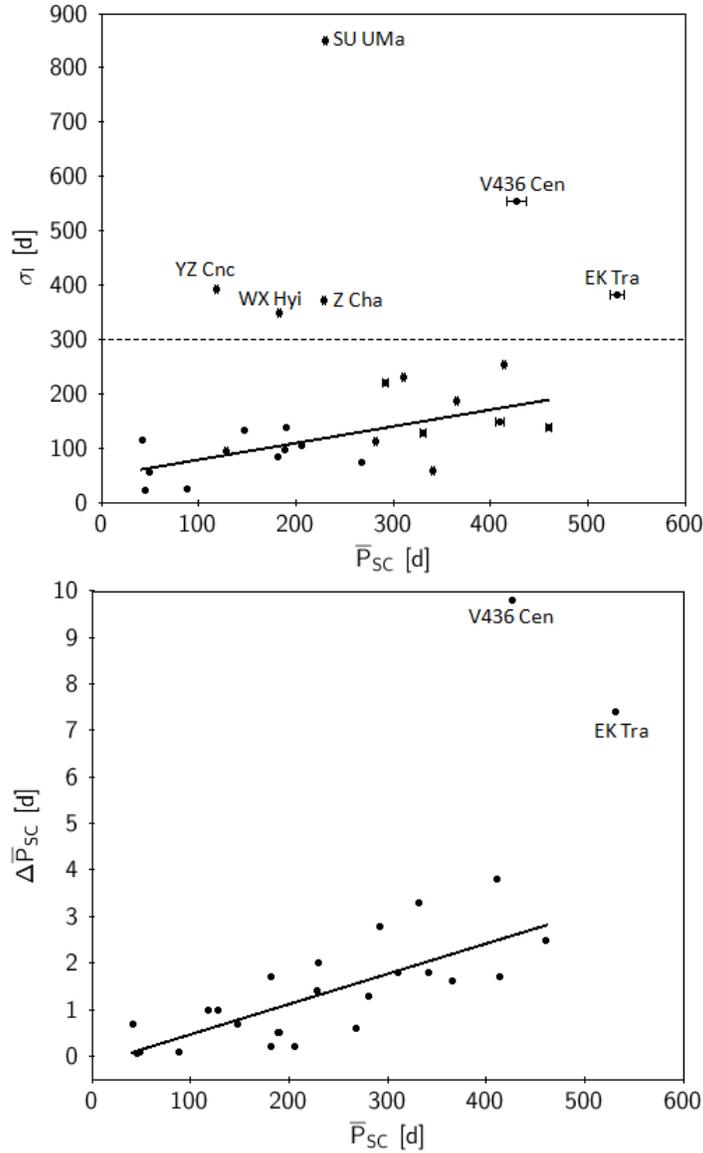


Figura 4.4: **Arriba:** Comparación entre los superciclos promedios ( $\bar{P}_{SC}$ ) y sus desviaciones estándar ( $\sigma_1$ ), la línea sólida muestra un ajuste lineal para  $\sigma_1 < 300$ [d] ( $r=0.623$ ) objetos con  $\sigma_1$  sobre los 300[d] se señalan. **Abajo:** Superciclos promedios versus sus errores. Se señala con una línea sólida el ajuste lineal para  $\Delta \bar{P}_{SC} < 4.0$  con  $r=0.754$ . Se destacan nuevamente los casos de V436 Cen y EK Tra. Discusión en Sección 4.1.

que se posea ya que será posible encontrar  $\bar{P}_{SC}$  más cortos, en este caso inferiores a los 250 días para una gran cantidad de observaciones. Por lo tanto, este tipo de resultado podría estar ligado a un parámetro ( $T_{obs}$ ) que no depende directamente del sistema que se está observando ya que no es un parámetro físico.

En relación con los superciclos promedio y la desviación estándar ( $\sigma_1$ ), ver arriba de Figura 4.4, se observa una leve tendencia para  $\sigma_1 < 300$  días, donde la línea sólida es un ajuste lineal que arroja una correlación  $r=0.623$  y pendiente  $0.31 \pm 0.09$ . Sin embargo, si se considera toda la muestra la correlación disminuye a 0.287. De esta forma, para los 6 casos excluidos WX Hyi, Z Cha, EK Tra, YZ Cnc, V436 Cen y la prototipo SU UMa, que son señalados en la gráfica, poseen un  $\sigma_1$  superior a 300 días debido a una alta variabilidad en sus superciclos a través del tiempo. De la misma forma,

si comparamos los  $\bar{P}_{SC}$  con sus errores relativos ( $\Delta\bar{P}_{SC}$ ), ver gráfica inferior de Figura 4.4, donde la línea sólida señala un ajuste lineal con  $r=0.754$  y pendiente  $0.0065 \pm 0.0012$  para valores de  $\Delta\bar{P}_{SC} < 4$  días. Los dos puntos no incluidos corresponden nuevamente a V436 Cen y EK TrA, estos casos son los que poseen mayor incertidumbre en sus superciclos promedio ya que estos sistemas se encuentran dentro de los tres  $\bar{P}_{SC}$  más altos (junto con SW UMa). Además, se encontraron pocas supererupciones para estos dos casos, es decir, 24 para V436 Cen de un total de 46 y 25 de 38 para EK TrA, y en consecuencia sus superciclos tienen menor precisión.

Finalmente, a partir de los ajustes de mínimos cuadrados lineales para determinar los  $\bar{P}_{SC}$  se obtienen sus coeficientes de correlación  $r$ , de esta forma se observa que 19 casos poseen coeficientes sobre el promedio de la muestra ( $\bar{r}=0.998688$ ). En consecuencia, en general hubo un correcto cálculo de los promedios generales de superciclo. Por otra parte, si se compara los cocientes  $\sigma_1/\bar{P}_{SC}$ , ver última columna de Tabla 4.1 se encuentra que solamente los casos de V436 Cen y FS Aur poseen  $r < 0.9955$ . La Figura 4.5 muestra una ajuste lineal de lo anterior con  $r = -0.893$  que contiene los 24 casos restantes. Además,  $\sigma_1/\bar{P}_{SC}$  sobre 1.0 señalan una alta variabilidad con respecto a su superciclo promedio, donde el caso más extremo corresponde a la prototipo SU UMa.

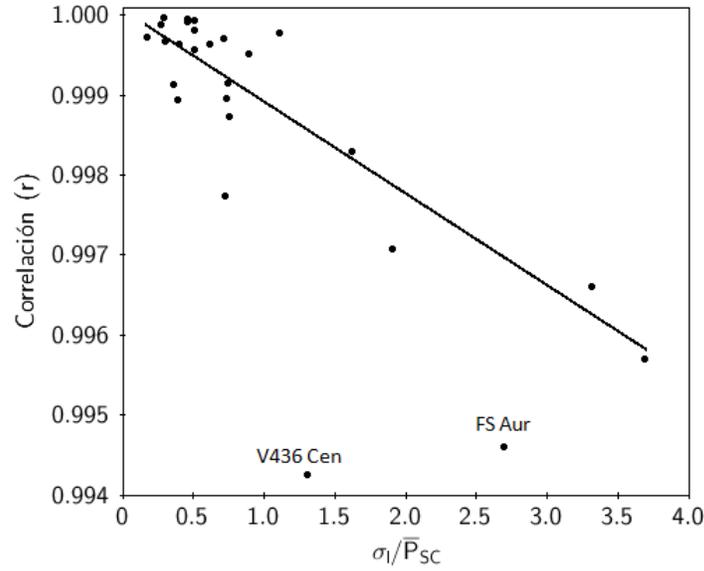


Figura 4.5: Comparación entre el cociente  $\sigma_1/\bar{P}_{SC}$  y los coeficientes de correlación  $r$  obtenidos a partir de los ajustes de mínimos cuadrados lineales para determinar el promedio general de superciclos  $\bar{P}_{SC}$ . Se señala en línea sólida el ajuste correspondiente para  $r > 0.995$  (con  $r=0.781$ , para 24 casos). Objetos con  $\sigma_1/\bar{P}_{SC} > 1.0$  muestran una alta variabilidad respecto a  $\bar{P}_{SC}$ .

## 4.2. Superciclos a corto plazo

Las gráficas de los residuos O-C de los ajustes lineales, ver Figura 4.6, muestran que después de 5 o más supererupciones<sup>8</sup> los superciclos presentan una tendencia a un aumento o disminución en algunos intervalos de tiempo que van desde alrededor de 1 a 33 años. En consecuencia, los ajustes lineales de mínimos cuadrados (líneas sólidas) en estos tramos dieron como resultado entre 2 a 11 diferentes valores de superciclos por objeto. Éstos son señalados como C1, C2, etc donde el número indica valores de superciclos en orden creciente. La Tabla 4.2<sup>9</sup> muestra un resumen de los 130 superciclos  $C$  encontrados en los 26 sistemas analizados. Estos superciclos  $C$  para las ER UMa van desde los  $34.34 \pm 0.24$ [d] para FS Aur hasta los  $59.25 \pm 0.77$ [d] de la prototipo ER UMa, con un valor medio de 48.04 días. Por su parte, para las SU UMa los superciclos  $C$  varían entre los  $83.0 \pm 0.4$ [d] para V503 Cyg hasta los  $616.0 \pm 5.1$ [d] de EK TrA y un valor medio de 251.7 días. De esta forma, los superciclos  $C$  muestran valores que oscilan alrededor de sus  $\bar{P}_{SC}$  encontrados desde el ajuste lineal, es decir, el valor cero en las gráficas O-C. Por otro lado, si se comparan los valores extremos de los superciclos  $C$  se encuentran diferencias significativas con sus superciclos promedios ( $\bar{P}_{SC}$ ). Por ejemplo, para las novae enanas tipo SU UMa, el valor de superciclo C1 (superciclo más corto) con la mayor variación inferior fue para la estrella prototipo SU UMa con un superciclo  $C$  35.9% menor a su promedio. Así mismo, el superciclo  $C_{max}$  (superciclo más largo) con la mayor variación superior fue para YZ Cnc con un 52.0% sobre su promedio. De igual manera, para las tipo ER UMa, FS Aur posee las mayores variaciones inferiores y superiores con respecto a su  $\bar{P}_{SC}$  con valores de 18.6% y 26.1% respectivamente. De esta forma, se encuentra que las variaciones de los superciclos  $C$  oscilan (en promedio) entre -12.8% y +19.2% alrededor de los promedios generales de superciclos ( $\bar{P}_{SC}$ ).

Por otro lado, si bien algunos superciclos  $C$  vuelven a aparecer después de un tiempo, éstos no tienden a repetirse de forma cíclica exceptuando el caso de GX Cas, es decir C3-C2-C3-C2 (ver Figura 4.6). Sin embargo, se pudo encontrar que en varios casos existen algunos tramos que se repiten en forma secuencial, por ejemplo para RZ Sge (C2-C1-C2), la prototipo SU UMa (C2-C1-C2), SW UMa (C1-C3-C1), TT Boo (C3-C2-C3-C2), TU Men (C5-C2-C5), UV Per (C5-C3-C5), V503 Cyg (C1?-C2-C4-C1-C2-C4), VW H $\gamma$ i (C2-C5-C2), VZ Pyx (C2-C1-C2) y Z Cha (C3-C2-C3-C2).

---

<sup>8</sup>Solo hubo tres excepciones en el que se consideraron 4 supererupciones: GX Cas en el intervalo E=20-23, ya que corresponde a las últimas supererupciones disponibles y por observarse una disminución del superciclo luego de E=20. Por otro lado, SU UMa en el intervalo E=0-3, con una tendencia clara hacia una disminución de superciclo y que posteriormente no se encontraron supererupciones por aproximadamente 3.7 años hasta E=8. Finalmente, SW UMa en el intervalo E=20-23 en que se observa una disminución del superciclo, además la supererupción anterior más próxima ocurre en E=17 en donde la tendencia es contraria.

<sup>9</sup>El detalle de cada superciclo  $C$  encontrado y los casos de promedios ponderados de superciclos y calculados mediante la relación (3.2), son mostrados en mayor detalle en la Tabla 7.1 en *Anexo: Tablas*.

Figura 4.6: Residuos O-C versus número de ciclos  $E$  de las supererupciones luego de un ajuste lineal de mínimos cuadrados. Las líneas sólidas se refieren a los ajustes de superciclos en rangos de valor aproximadamente constante, donde los superciclos C1, C2, etc. se refieren a valores de superciclos en orden creciente. Los detalles de cada ajuste están dados en detalle en Tabla 7.1 en *Anexo: Tablas*.

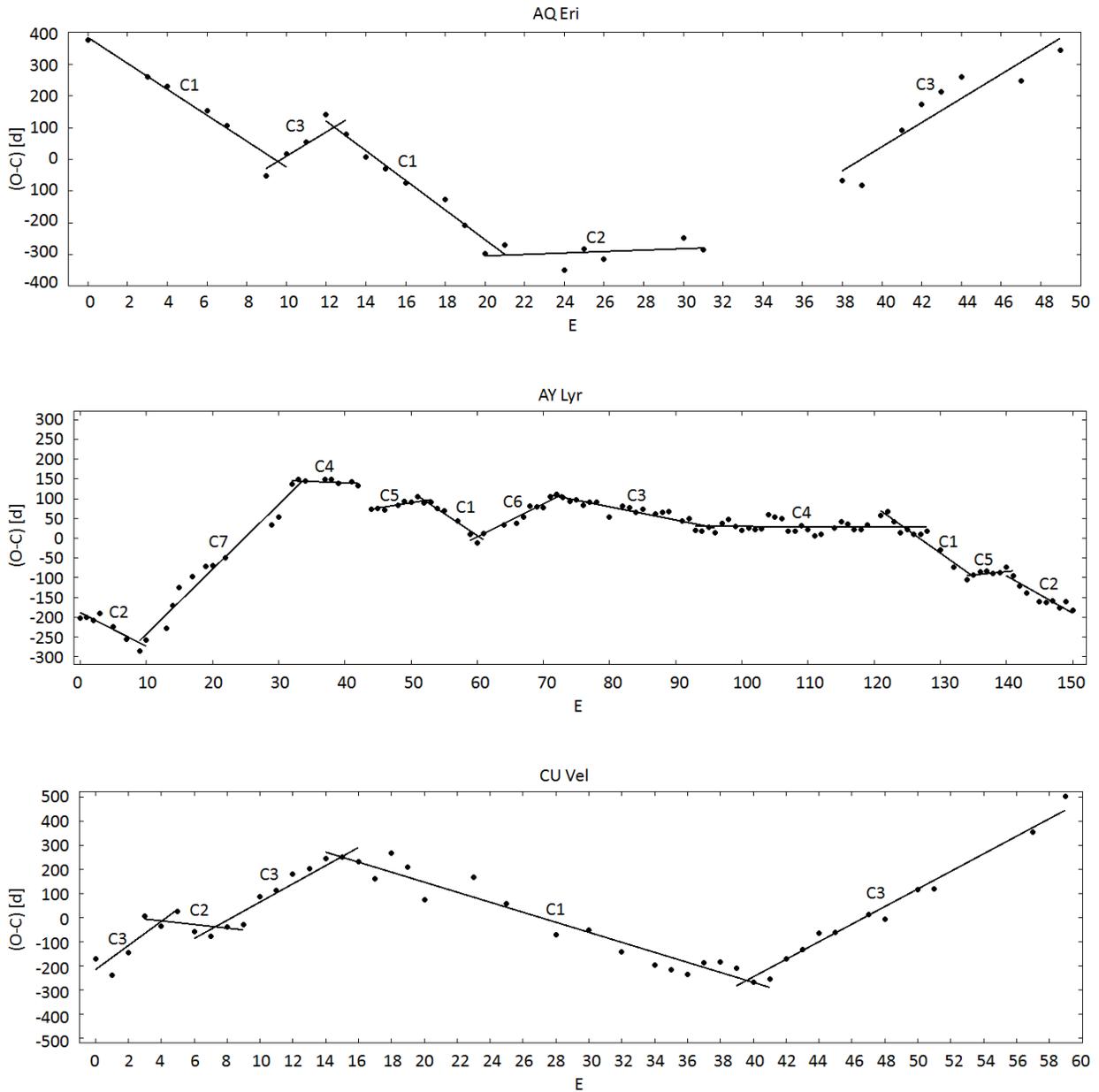


Figura 4.6: Continuación página anterior.

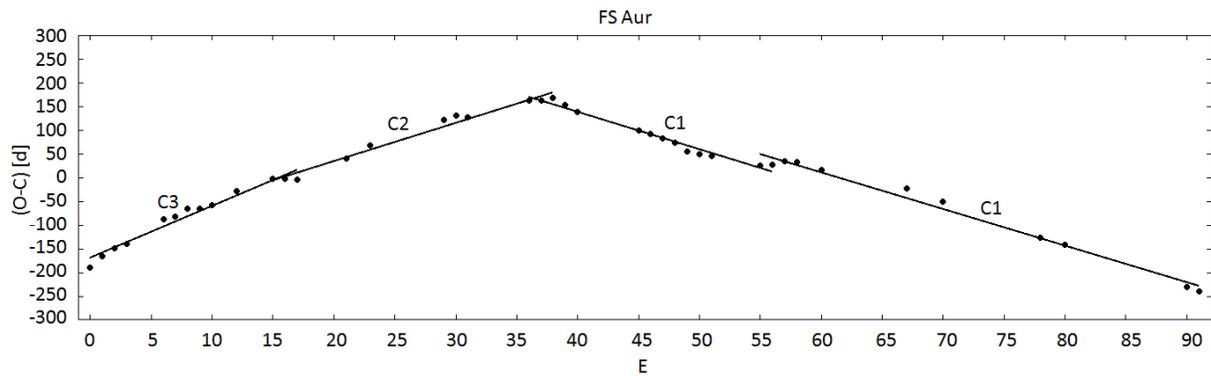
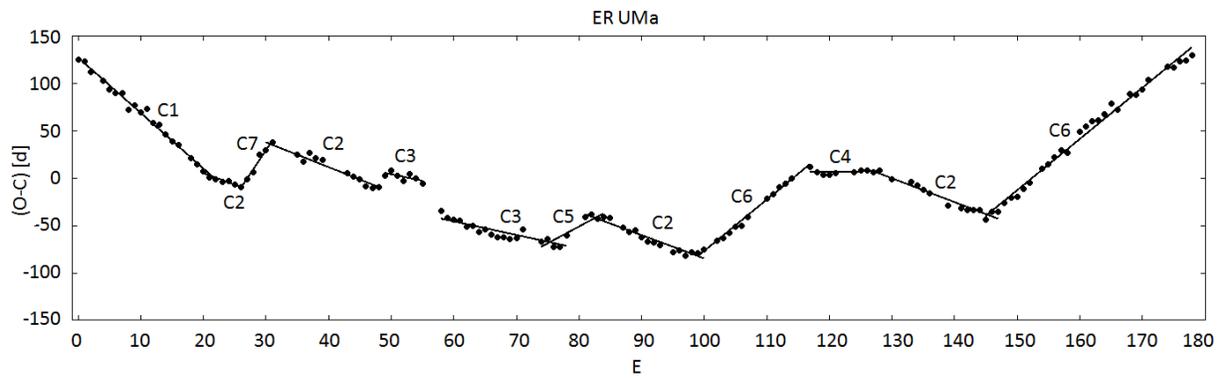
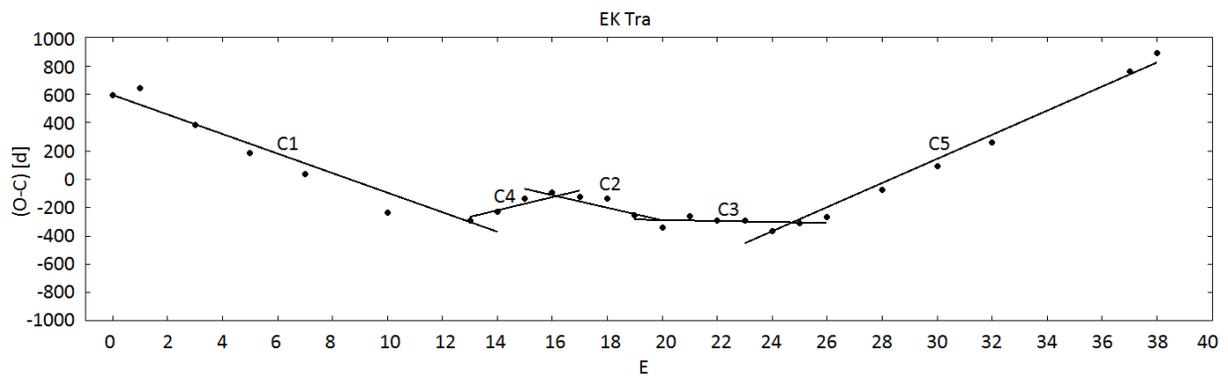
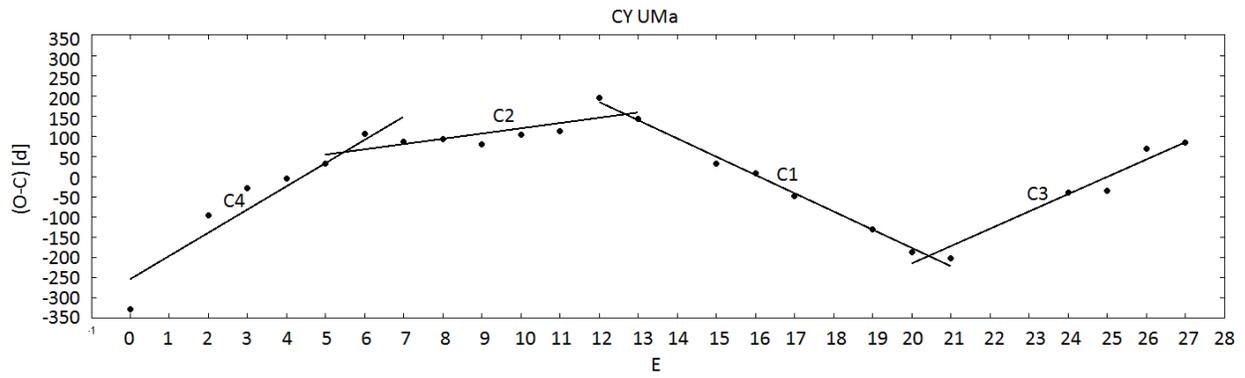


Figura 4.6: Continuación página anterior.

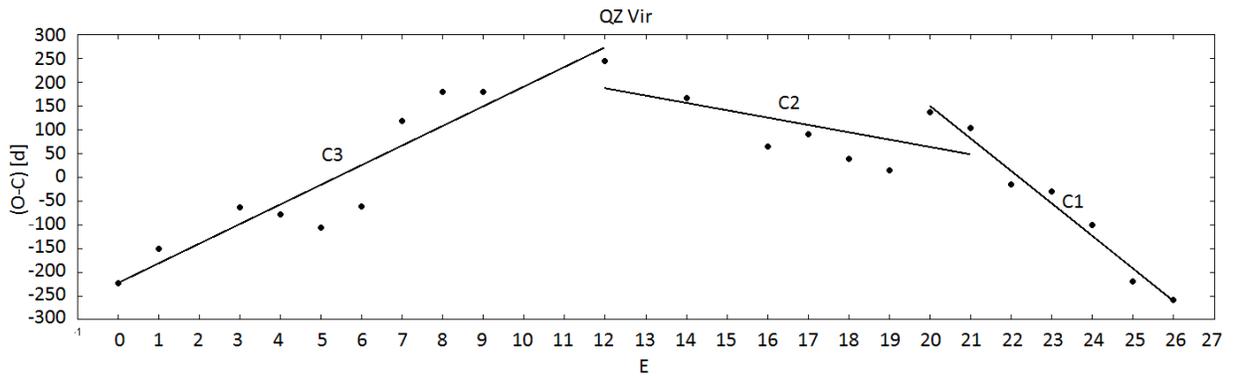
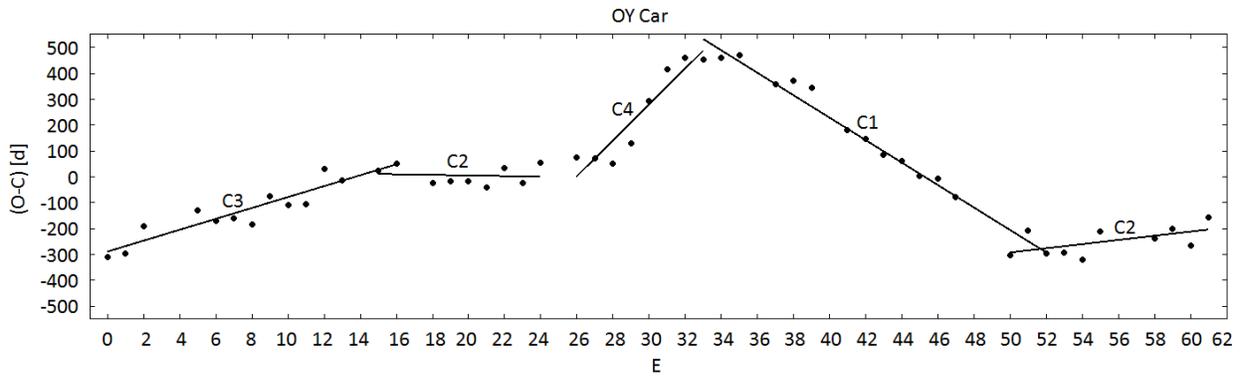
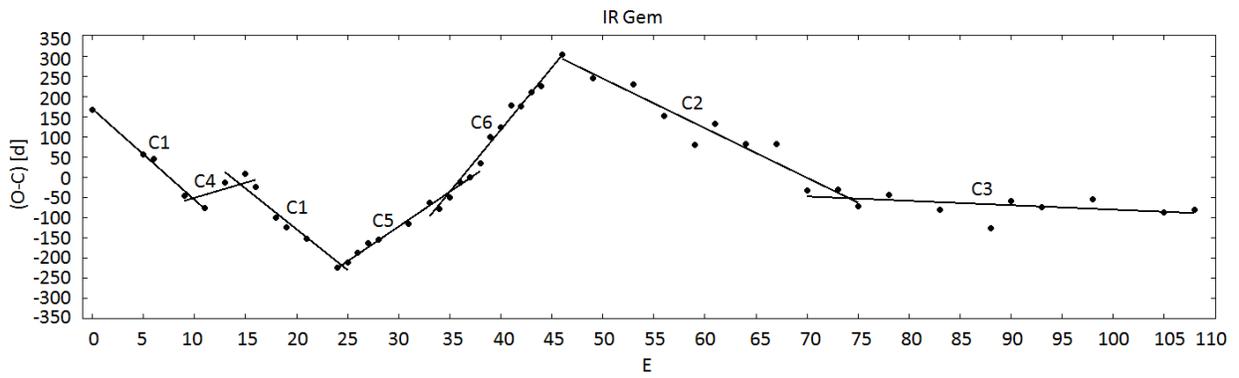
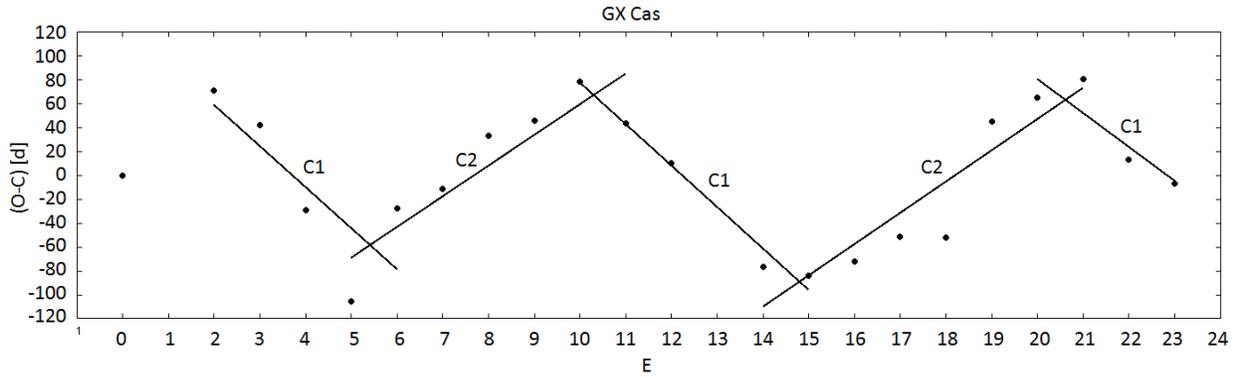


Figura 4.6: Continuación página anterior.

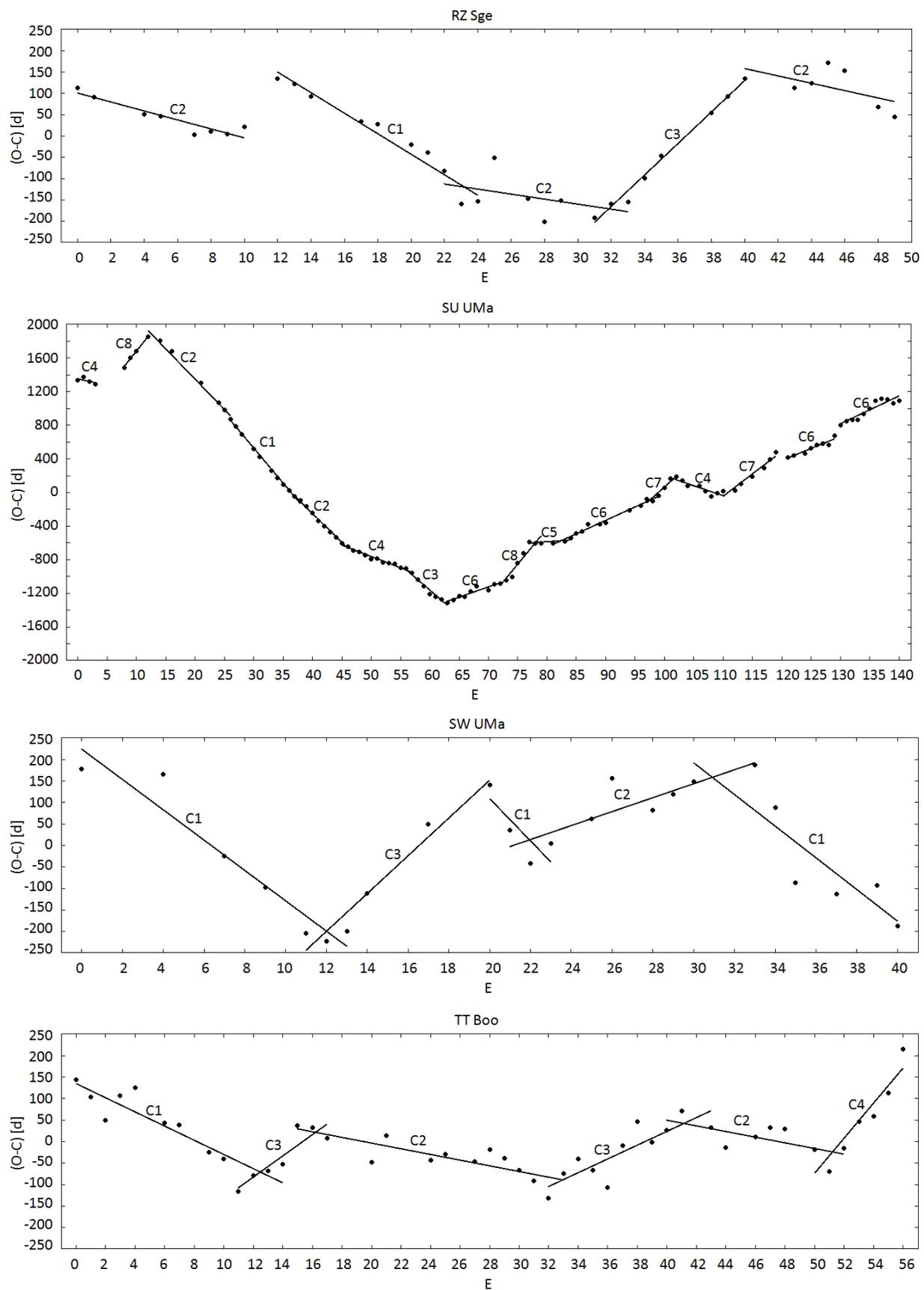


Figura 4.6: Continuación página anterior.

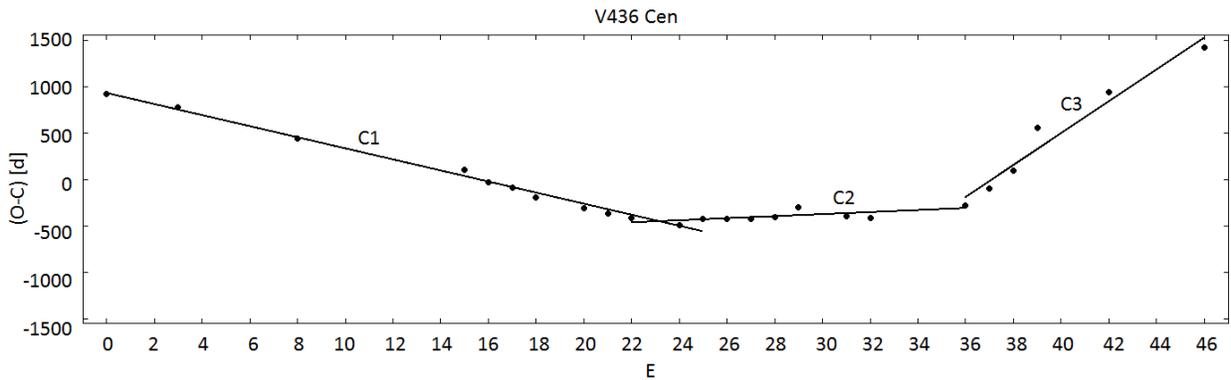
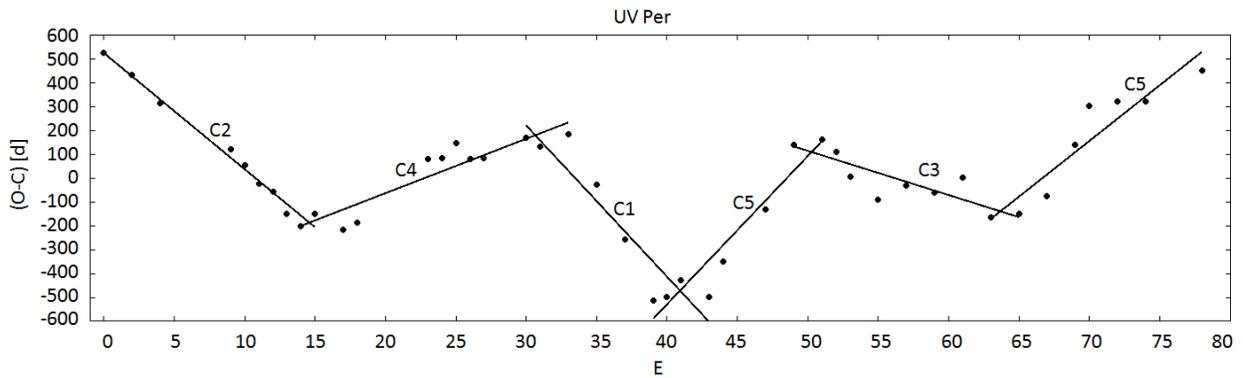
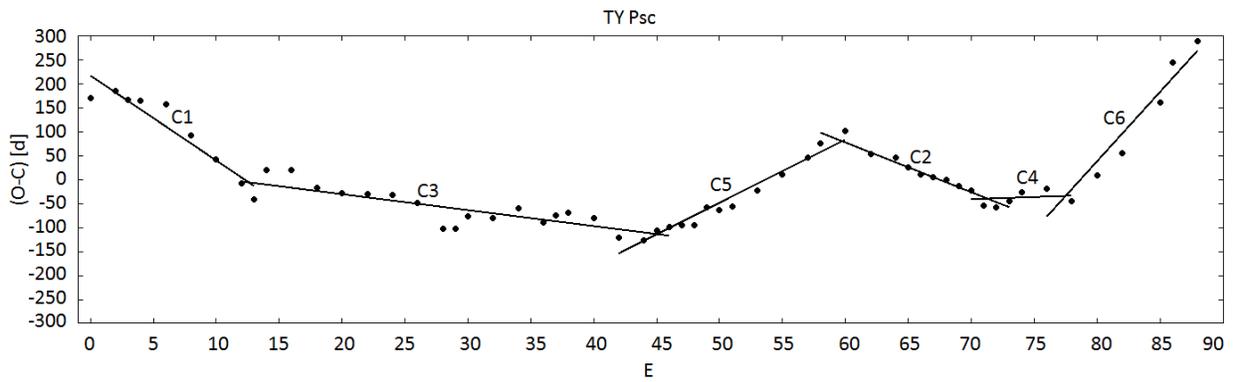
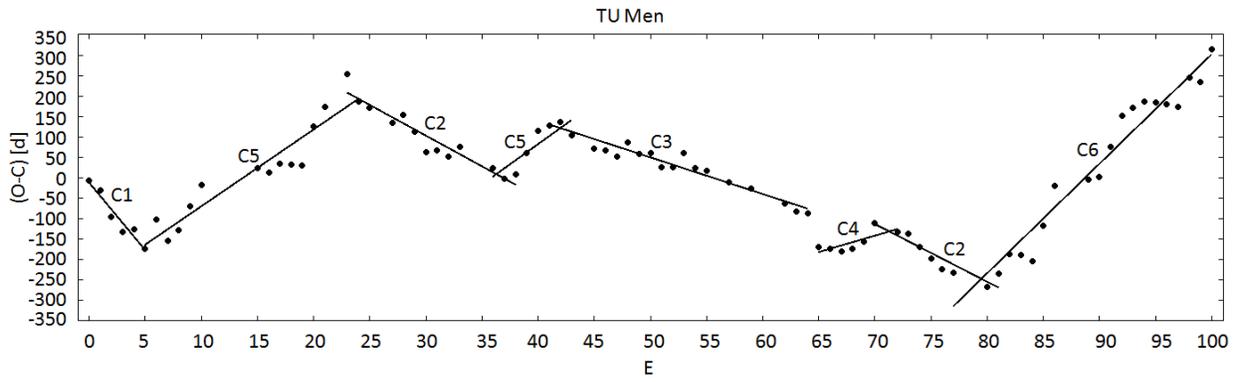


Figura 4.6: Continuación página anterior.

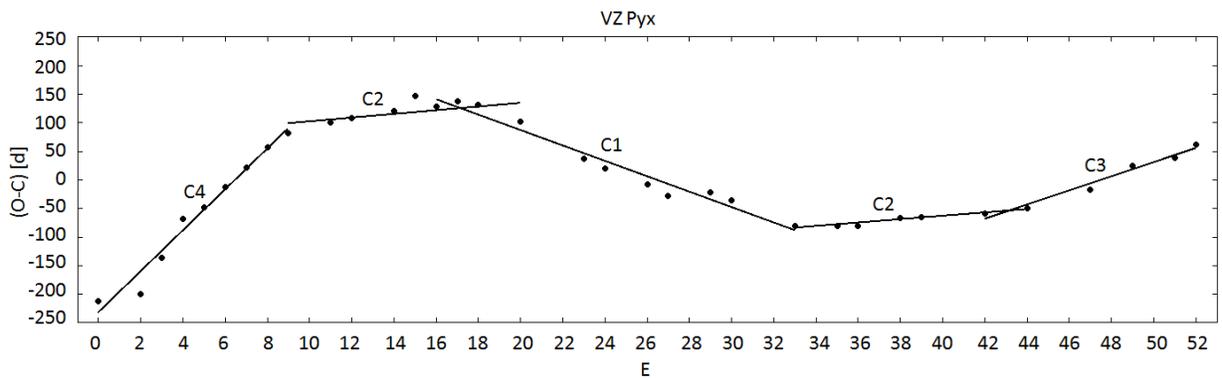
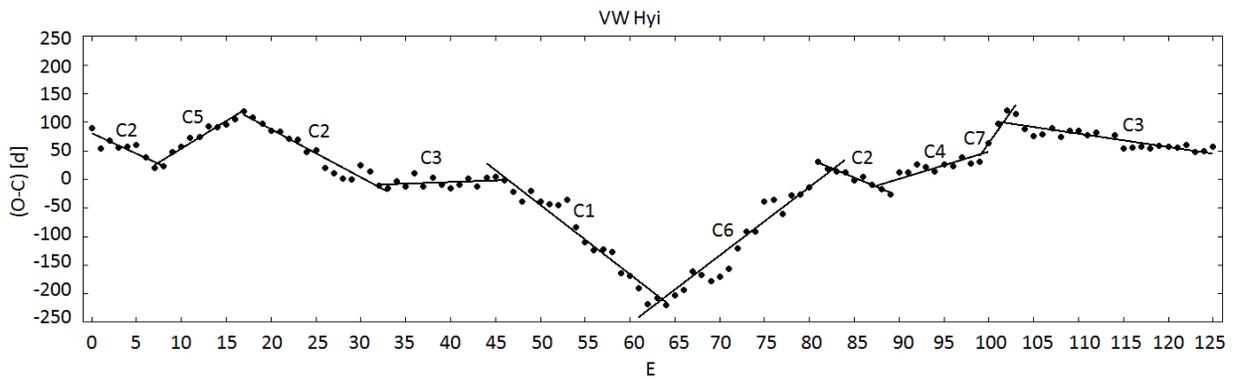
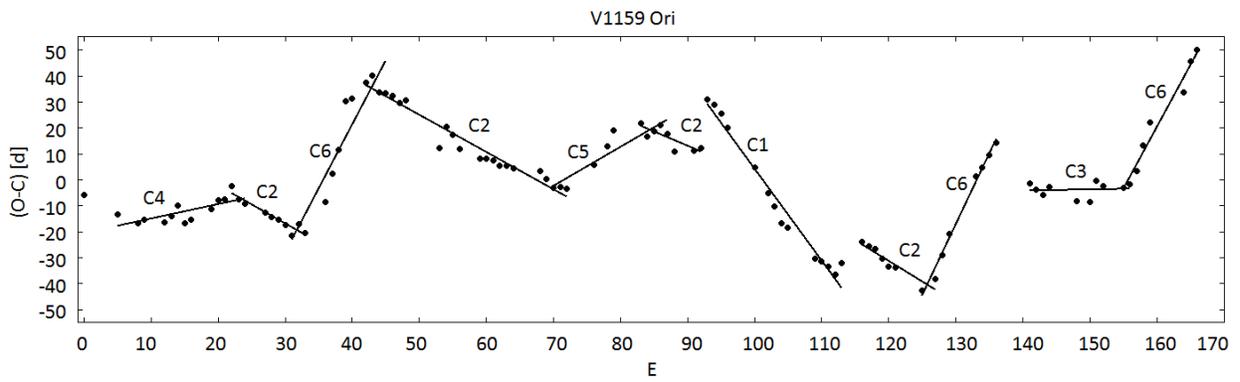
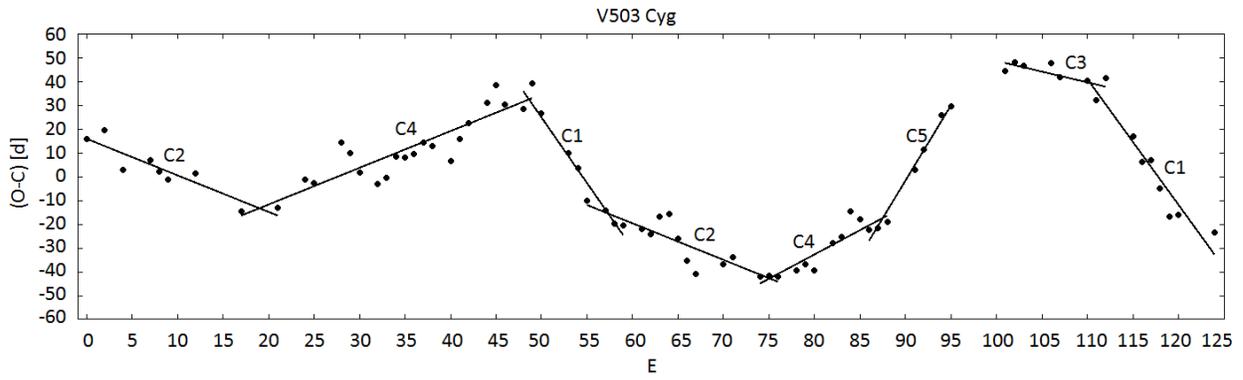


Figura 4.6: Continuación página anterior.

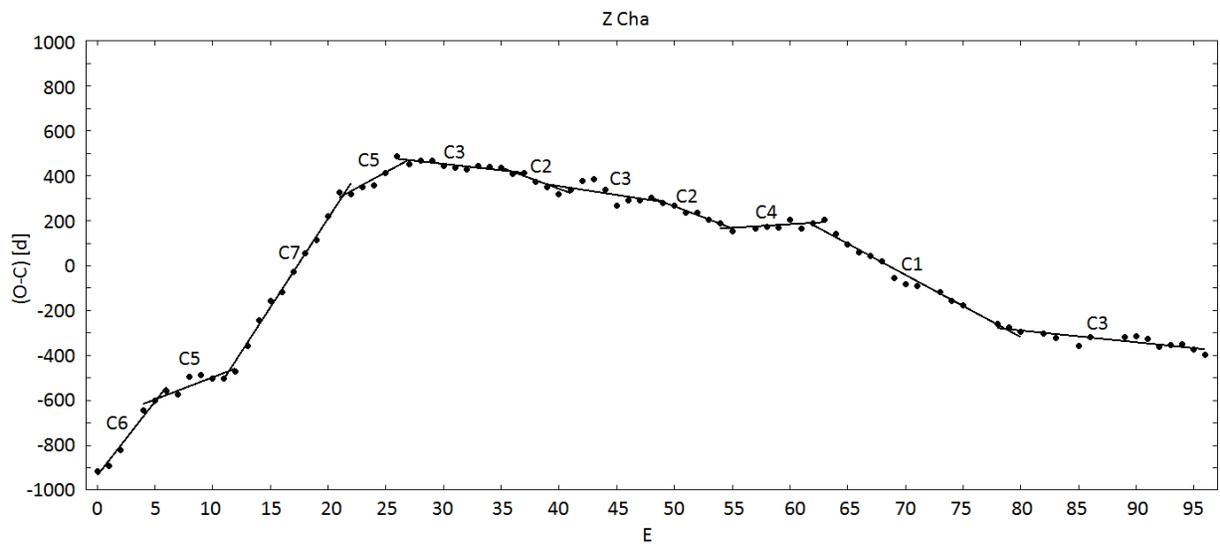
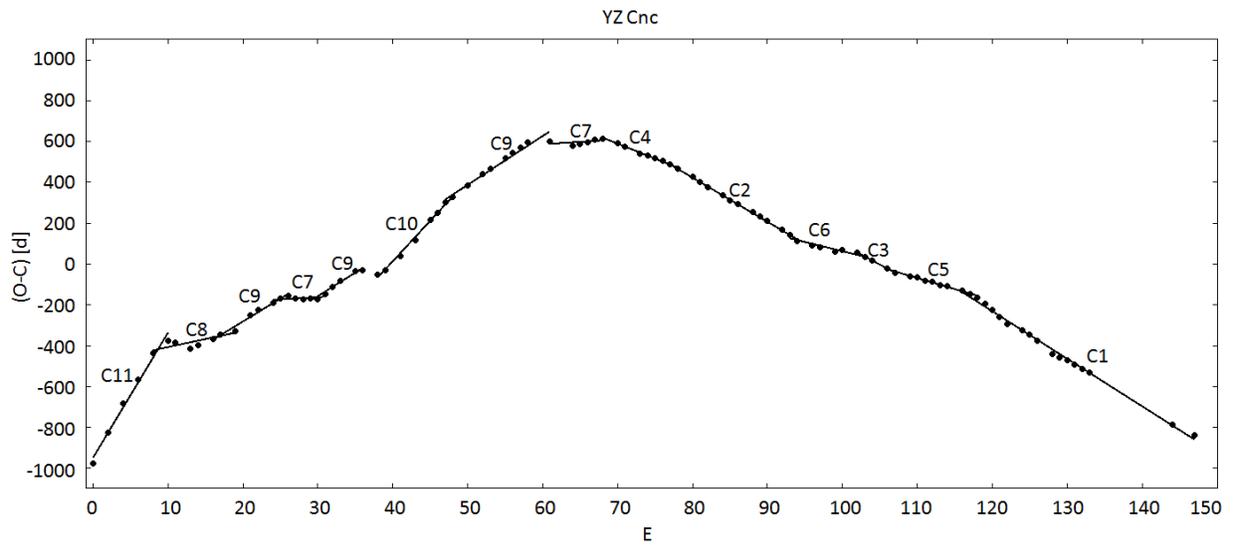
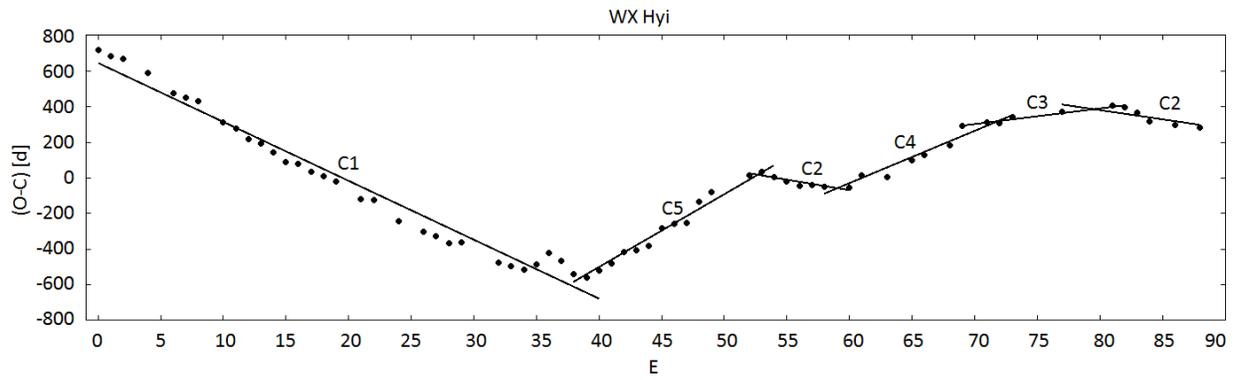


Table 4.2. Superciclos  $C$  determinados luego de un ajuste lineal de mínimos cuadrados en intervalos de superciclo constante a partir de los residuos O-C de Figura 4.6. Los superciclos están ordenados en forma creciente. Se incluyen los promedios ponderados con valores de superciclos similares, ver detalles en Tabla 7.1 en *Anexo: Tablas*.

Nombre	C1 [d]	C2 [d]	C3 [d]	C4 [d]	C5 [d]	C6 [d]	C7 [d]	C8 [d]	C9 [d]	C10 [d]	C11 [d]
AQ Eri	246.9 ± 2.4	294.2 ± 3.3	330.1 ± 5.9	...	...	...	...	...	...	...	...
AY Lyr	194.5 ± 0.7	197.0 ± 1.1	202.6 ± 0.3	205.8 ± 0.3	208.5 ± 0.7	214.3 ± 0.7	222.4 ± 0.8	...	...	...	...
CU Vel	345.3 ± 1.2	358.4 ± 6.4	402.9 ± 1.6	...	...	...	...	...	...	...	...
CY UMa	286.5 ± 1.5	344.3 ± 3.7	374.2 ± 4.8	388.9 ± 9.1	...	...	...	...	...	...	...
EK TrA	462.5 ± 7.3	487.6 ± 13.3	527.9 ± 6.4	577.4 ± 13.5	616.0 ± 5.1	...	...	...	...	...	...
ER UMa	43.46 ± 0.13	46.77 ± 0.10	47.86 ± 0.18	49.36 ± 0.21	52.83 ± 0.63	54.70 ± 0.08	59.25 ± 0.77	...	...	...	...
FS Aur	34.34 ± 0.24	50.24 ± 0.40	53.17 ± 0.64	...	...	...	...	...	...	...	...
GX Cas	306.9 ± 2.6	367.2 ± 3.5	...	...	...	...	...	...	...	...	...
IR Gem	126.3 ± 0.8	135.4 ± 1.0	146.6 ± 0.6	155.2 ± 4.7	164.8 ± 0.7	178.4 ± 1.4	...	...	...	...	...
OY Car	267.6 ± 1.9	314.9 ± 3.0	332.1 ± 2.3	380.6 ± 10.4	...	...	...	...	...	...	...
QZ Vir	342.1 ± 5.0	395.0 ± 7.7	451.8 ± 5.3	...	...	...	...	...	...	...	...
RZ Sge	257.5 ± 1.8	271.9 ± 1.4	318.6 ± 1.4	...	...	...	...	...	...	...	...
SU UMa	147.6 ± 1.6	160.0 ± 1.5	168.7 ± 4.4	203.9 ± 1.3	235.6 ± 3.2	261.3 ± 1.0	285.9 ± 4.7	318.5 ± 4.3	...	...	...
SW UMa	424.3 ± 3.8	476.6 ± 3.7	504.3 ± 4.7	...	...	...	...	...	...	...	...
TT Boo	251.5 ± 2.2	261.4 ± 1.1	286.6 ± 2.9	308.8 ± 7.7	...	...	...	...	...	...	...
TU Men	157.5 ± 4.4	175.7 ± 1.2	181.5 ± 0.5	198.5 ± 3.1	209.4 ± 1.6	217.2 ± 1.4	...	...	...	...	...
TY Psc	171.3 ± 2.3	178.5 ± 0.8	185.7 ± 0.4	190.0 ± 2.5	202.2 ± 0.8	217.9 ± 3.9	...	...	...	...	...
UV Per	350.1 ± 8.3	364.6 ± 2.1	395.1 ± 3.8	436.5 ± 2.9	467.2 ± 5.2	...	...	...	...	...	...
V436 Cen	367.3 ± 2.1	437.1 ± 3.8	598.4 ± 18.3	...	...	...	...	...	...	...	...
V503 Cyg	83.0 ± 0.4	86.8 ± 0.1	87.4 ± 0.3	90.0 ± 0.1	94.7 ± 0.4	...	...	...	...	...	...
V1159 Ori	42.18 ± 0.17	44.29 ± 0.06	45.78 ± 0.18	46.27 ± 0.14	47.22 ± 0.21	50.96 ± 0.18	...	...	...	...	...
VW Hyi	169.5 ± 0.6	174.4 ± 0.9	180.1 ± 0.5	185.9 ± 0.8	191.3 ± 0.7	193.6 ± 0.7	204.4 ± 4.7	...	...	...	...
VZ Pyx	114.9 ± 0.8	131.5 ± 0.4	140.7 ± 1.0	164.3 ± 2.3	...	...	...	...	...	...	...
WX Hyi	149.4 ± 1.0	171.4 ± 2.0	191.1 ± 0.8	211.7 ± 2.1	223.2 ± 1.9	...	...	...	...	...	...
YZ Cnc	94.5 ± 0.3	96.2 ± 0.2	98.2 ± 0.3	103.3 ± 0.4	106.8 ± 0.4	108.8 ± 1.1	120.6 ± 1.4	125.5 ± 2.3	140.3 ± 0.6	157.6 ± 1.1	179.1 ± 3.5
Z Cha	201.1 ± 1.1	209.1 ± 1.1	223.4 ± 0.7	231.5 ± 1.9	250.9 ± 2.9	294.3 ± 4.7	311.1 ± 2.2	...	...	...	...

En relación con la distribución de los números de ciclos  $E$ , ver Figura 4.7, alrededor del 90 % de los casos las SU UMA cambian sus períodos de tiempo entre supererupciones después de 5 a 26 superciclos, con un promedio de 15. Además, se observa un peak en torno 8-9 y se obtiene una mediana de 12.

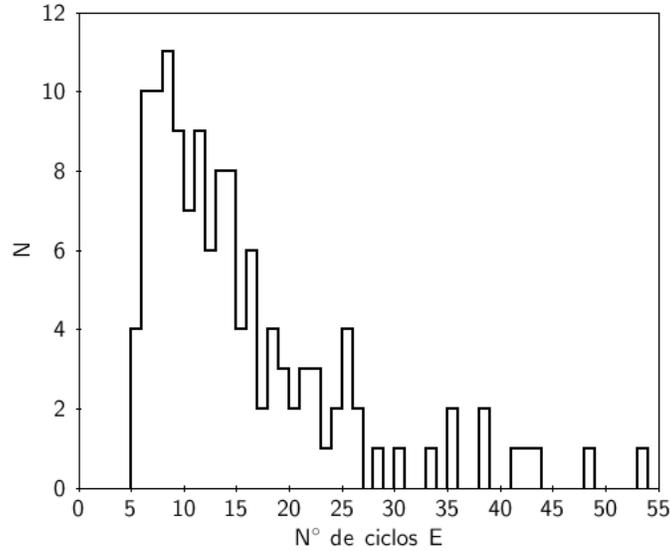


Figura 4.7: Distribución de los números de ciclos  $E$  para los 130 casos de superciclos  $C$  ( $P_{SC}$ ) encontrados, con  $\text{bin}=1$ . El 90 % de estos superciclos cambian sus valores después de 5 a 26 supererupciones, ver Figura 4.6, en intervalos de superciclo aproximadamente constante.

Por otra parte, si se compara el total de número de ciclos  $E$  ( $E_{\text{max}}$ ) con el número de superciclos  $C$ , es decir C1, C2, etc., para cada objeto se encuentra una clara tendencia de que a mayor cantidad de supererupciones encontradas, mayor será la posibilidad de que se presenten distintos superciclos  $C$  en diferentes intervalos, ver Figura 4.8. No obstante, si descartamos el caso de YZ Cnc que presenta 11 superciclos  $C$ , y una gran dispersión con respecto al promedio de sus superciclos, esta correlación aumenta ligeramente desde un coeficiente de correlación  $r=0.795$  a  $r=0.816$  y pendiente  $0.031 \pm 0.005$ .

Por otro lado, la distribución de los valores de superciclos  $C$  ( $P_{SC}$ , ver Figura 4.9) muestra que el 74.6 % de los superciclos  $C$  de las SU UMA (línea continua) presentan superciclos entre los 80 a 320 días, con dos peaks alrededor de 100 y 200[d] con una disminución drástica en torno a los 250 días. Así mismo, los 16 superciclos encontrados para las ER UMA (línea a trazos) oscilan entre los 34.34 a 59.25 días y un peak  $\sim 45$ [d].

La relación de los superciclos  $C$  y sus errores  $\Delta P_{SC}$ [d], ver arriba de Figura 4.10, muestra que se encontraron 4 casos con errores sobre los 10 días. Con lo anterior, se realizó un ajuste lineal de mínimos cuadrados (línea sólida) donde se obtuvo un coeficiente de correlación  $r=0.746$  y una pendiente de  $0.016 \pm 0.001$ . Los superciclos  $C$  excluidos corresponden a C4 de OY Car, C2 y C4 de EK TrA y de C3 para V436 Cen, donde estos valores se encuentran dentro del 90 % de superciclos  $C$  más altos. Por otro lado, la gráfica inferior de Figura 4.10 muestra la distribución de estos errores, donde se observa un fuerte peak alrededor de 0.75 días (21 casos) y una posterior disminución. Además, se encuentra que el 90 % (121 casos) de los errores son menores a 5.3 días (primer vacío) y que el valor medio es 2.43[d], no obstante la mediana es de 1.4[d].

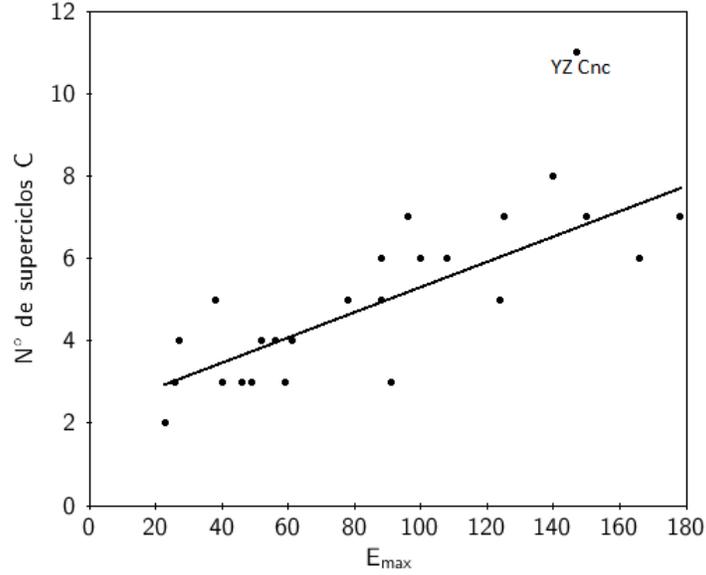


Figura 4.8: Relación entre el total de número de ciclos  $E$  ( $E_{\max}$ ) y la cantidad de superciclos  $C$  ( $C_1$ ,  $C_2$ , etc.) encontrados para cada objeto. La línea sólida señala un ajuste lineal descartando el caso de YZ Cnc, de donde se obtiene un coeficiente de correlación  $r=0.816$  y una pendiente  $=0.031 \pm 0.005$ . En consecuencia, se encuentra una tendencia de que a mayor cantidad de supererupciones mayor será la posibilidad de encontrar diferentes superciclos  $C$ .

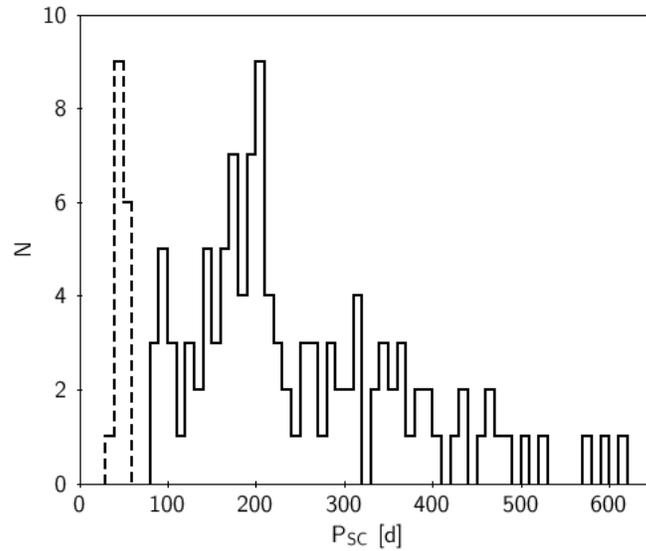


Figura 4.9: Distribución de los 130 superciclos  $P_{SC}$ , con  $\text{bin}=10$  días, donde el 74.6% de las SU UMa (línea continua) presentan valores entre 80 a 320 [d] y con peak alrededor de 200 días. Por otro lado, la línea a trazos se refiere a los superciclos de las ER UMa con un peak  $\sim 45$  días.

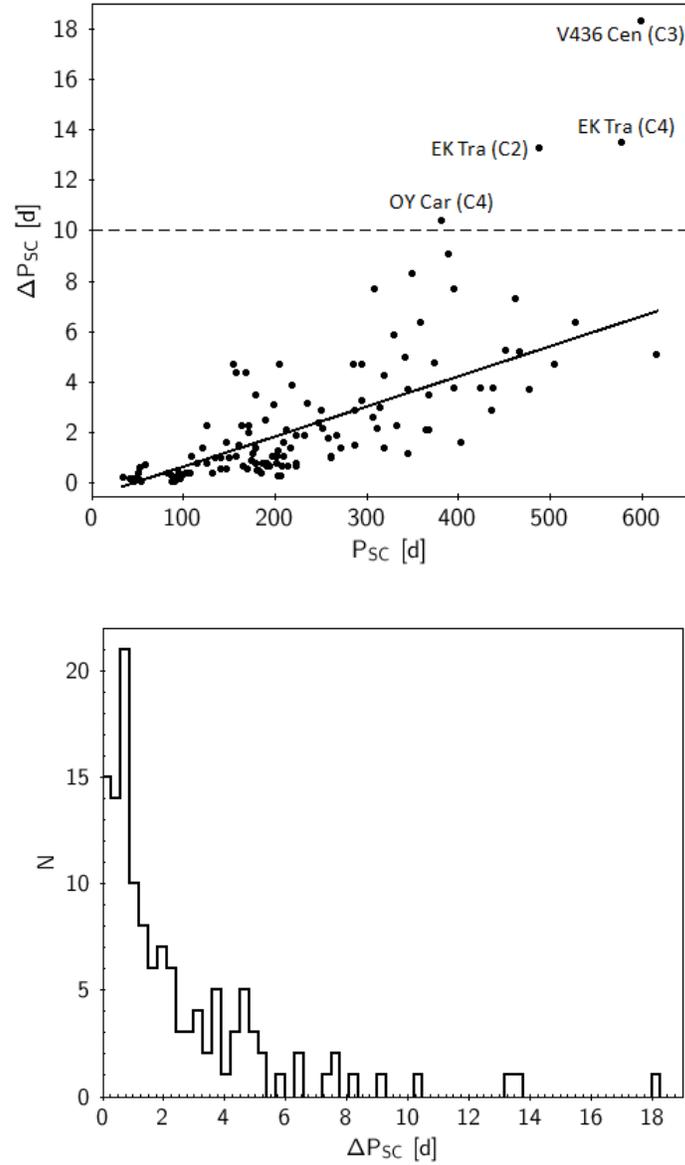


Figura 4.10: **Arriba:** Relación entre los valores de superciclos  $C$  ( $P_{SC}$ ) y sus errores  $\Delta P_{SC}$  en días. La línea sólida muestra el mejor ajuste lineal con pendiente  $0.016 \pm 0.001$  y coeficiente de correlación  $r=0.746$  descartando los 4 casos señalados y que poseen errores superiores a los 10 días (señalado con una línea punteada). **Abajo:** Distribución de los errores  $\Delta P_{SC}$  de los superciclos  $P_{SC}$ , con  $\text{bin}=0.3[\text{d}]$ . Se observa un peak en 0.75 días y se determina que 121 casos (90%) corresponden a errores menores a  $5.3[\text{d}]$ . Ver discusión en texto.

Por otra parte, si se compara el número de ciclos  $E$  para el cálculo de cada superciclo  $C$  ( $P_{SC}$ ) se puede observar que a mayor número de supererupciones los períodos de tiempo tienen una leve tendencia a disminuir, ver Figura 4.11. No obstante, en este caso esta relación no es tan clara como para  $\bar{P}_{SC}$  vs número de ciclos  $E$  (ver Figura 4.2), ya que la correlación en este caso es de tan solo  $-0.210$  (ajuste lineal no incluido en la figura).

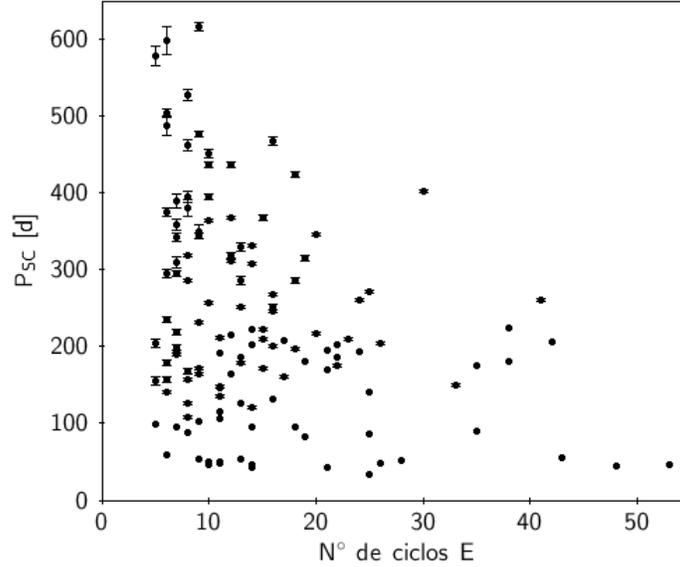


Figura 4.11: Comparación entre los número de ciclos  $E$  para los 130 superciclos  $C$  ( $P_{SC}$ ). No se observa ninguna tendencia clara como en Figura 4.2.

Como consecuencia de los 130 superciclos  $C$  encontrados, se investigó una posible relación entre estos valores. Por consiguiente, se realizó para cada estrella el cociente entre sus superciclos  $C$ , lo anterior de la forma:

$$R = \frac{C_i}{C_j}; \quad i = (n, n - 1, n - 2, \dots, 3, 2), \quad j = (n - 1, n - 2, \dots, 1) \quad (4.1)$$

donde:

- $R$ , corresponde a la razón entre superciclos  $C$ .
- $C_i$  y  $C_j$ , son los superciclos  $C$  de Tabla 4.2.
- $n$ , se refiere al total de superciclos  $C$  ( $C_1, C_2$ , etc.).

En consecuencia, la Figura 4.12 reúne la distribución de las 313 razones obtenidas, donde se señala los diferentes *bins*. Los valores oscilaron entre 1.007 y 2.158, sin embargo en la Figura se presentan hasta 1.32 para una mejor visualización de los datos. Además, se encuentra que alrededor del 90 % posee valores menores o iguales a 1.463, con un valor promedio de 1.203, una mediana de 1.141 y dispersión de los datos  $\sigma=0.193$ . Por otro lado, se encuentra que los siguientes vacíos (*gaps*): 1.050, 1.060, 1.091, 1.126 y 1.157 (señalados con una flecha) pueden ser considerados como reales ya que los *gaps* se mantienen con distintos *bins*.

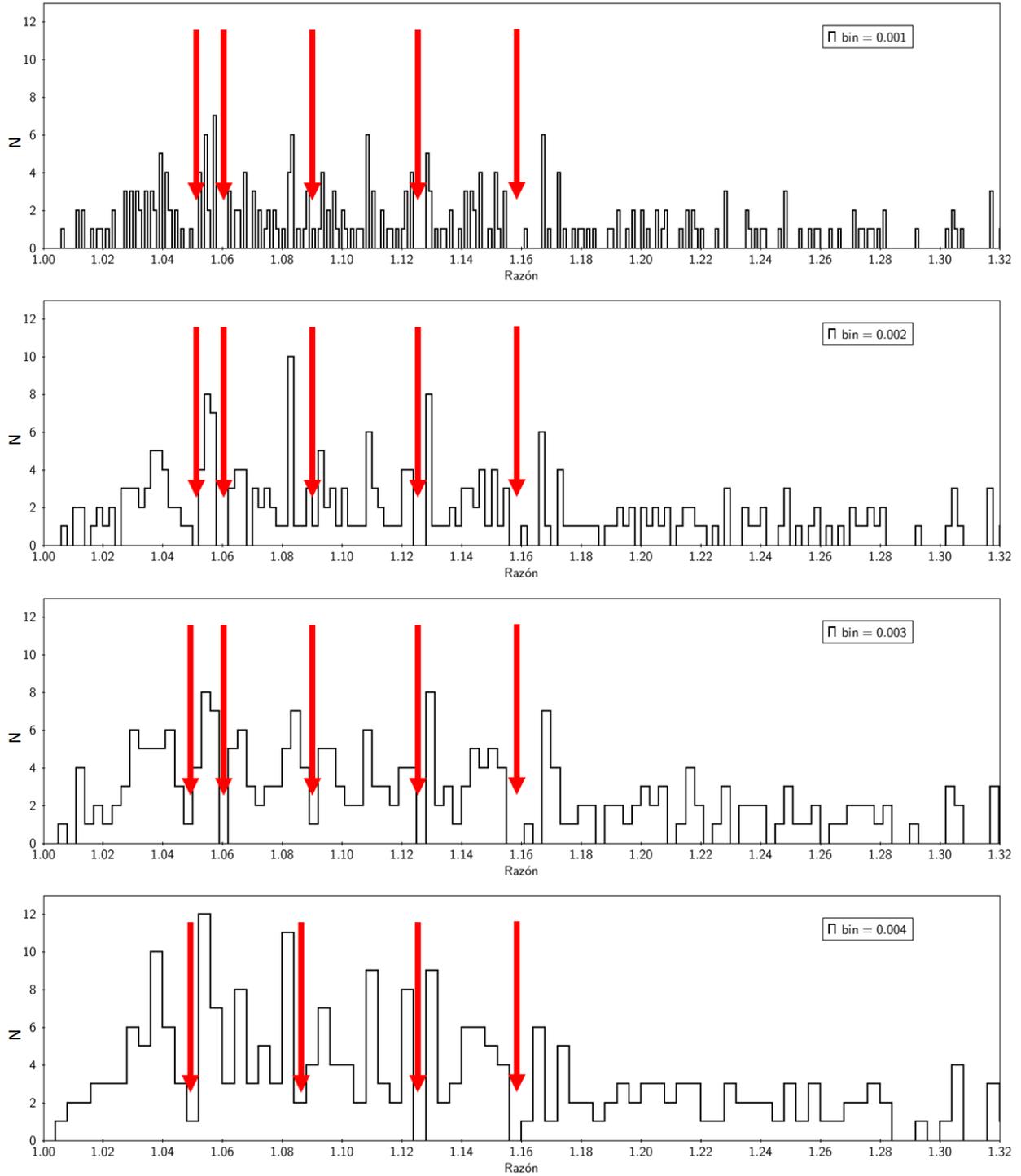


Figura 4.12: Distribución de las 313 razones con bins=(0.001, 0.002, 0.003, 0.004) obtenidas por el cociente entre los valores de superciclos de la forma  $(R = \frac{C_i}{C_j})$ , según expresión 4.1. Se señalan con flechas los vacíos que se repiten para cada bin y que podrían ser reales.

### 4.3. Superciclos a largo plazo

A partir de los residuos O-C de los ajustes lineales se puede observar variaciones de los superciclos a largo plazo, revelando en algunos casos un aumento o disminución de forma sostenida de los superciclos, ver Figura 4.13. De esta forma, es posible ajustar una parábola a dichas variaciones, sin embargo, éstas están fuertemente restringidas por el tiempo de observación para cada objeto, por ejemplo el caso de UV Per. No obstante, este estudio busca encontrar cambios significativos en rangos de tiempo amplios. Con lo anterior, la Tabla 4.3 muestra en detalle los resultados de los ajustes de mínimos cuadrados parabólicos para las 26 SU UMa. Se señalan, entre otros, los valores de  $a$  (ver relación 3.4) donde el signo de  $a$  indica si hay un aumento o disminución de los superciclos, positivo o negativo respectivamente. Por consiguiente, se encuentran 11 casos con valores negativos y los 15 restantes muestran un aumento de tiempo entre cada supererupción. Sin embargo, se puede evaluar el cociente entre  $a$  y su error absoluto  $\Delta a$ , donde un valor  $a/\Delta a > 3$  indica que el cambio a largo plazo es realmente significativo. De esta forma, 17 casos muestran este tipo de cambios relevantes a largo plazo, donde 6 de ellos presentan una disminución y 11 aumentan, por otro lado 9 no presentan cambios significativos, ver gráficas de la Figura 4.13, con valores medios de  $\bar{P}_{SC}$  de 219.4, 276.8 y 233.2 días respectivamente. De igual manera, si se descartan las tipo ER UMa los valores medios para cada grupo aumentan a 254.9, 299.6 y 256.7 días respectivamente. Por otra parte, los 9 casos que no poseen variaciones significativas muestran amplitudes menores a  $\sim 160$  días, así mismo para los cambios positivos y negativos se observan amplitudes de  $\sim 150$ -2830 y  $\sim 260$ -1280 días respectivamente. Por otro lado, la Figura 4.14 muestra la distribución de estas amplitudes, donde 20 casos poseen valores menores a 700 días y 12 menores a 200[d]. Además, si se analizan los cocientes entre las amplitudes y sus errores para conocer los casos significativos, se encuentran 9 casos<sup>10</sup> con  $(A_p/\Delta A_p) < 3$ , donde sus amplitudes varían desde 4.7 hasta los 160.8 días y que muestran claras oscilaciones alrededor de los ajustes de mínimos cuadrados parabólicos (ver líneas sólidas en Figura 4.13). En contraste, para  $(A_p/\Delta A_p) > 3$  las amplitudes son mayores ya que van desde los 154.4 a los 2827.1[d]. De esta forma si se comparan los casos con alta significancia y  $\sigma_p$ , ver Figura 4.15, se encuentra un correlación con pendiente  $7.48 \pm 1.05$  y coeficiente de correlación  $r=0.879$ , donde la línea sólida señala un ajuste lineal de mínimos cuadrados lineal.

Por otro lado, en la Tabla 4.3 se incluye el parámetro  $P_{SC,0}$  que indica el primer valor de superciclo para cada caso. Ahora bien, la comparación de estos superciclos iniciales con sus errores ( $\Delta P_{SC,0}$ ) dan como resultado la gráfica arriba de la Figura 4.16, donde un ajuste lineal (línea sólida) da un pendiente  $0.016 \pm 0.002$  y coeficiente de correlación  $r=0.845$ , donde fueron descartados V436 Cen, CY UMa y SW UMa. De esta forma estos tres casos señalan una mala determinación del primer superciclo como consecuencia de una falta de número de ciclos  $E$ . De modo que, en el caso de V436 Cen se pudieron encontrar sólo 24 números de ciclos  $E$  de los 46 posibles (ver  $E_{max}$  en Tabla 4.1), mas aún hay sólo 3 puntos para  $E < 15$ . El caso de CY UMa puede deberse a la falta de un punto entre  $E=0$  y  $E=2$  y porque además sólo se encontraron 23 supererupciones de los 27 posibles. Por último, en SW UMa hay sólo dos puntos para  $E < 7$  junto con haber encontrado 24 de las posibles 40 supererupciones.

En cuanto a la dispersión de los ajustes parabólicos ( $\sigma_p$ ) se puede comparar con  $P_{SC,0}$ , ver abajo de la Figura 4.16, donde se muestra el ajuste lineal que da una pendiente  $0.21 \pm 0.08$ , coeficiente de correlación  $r=0.483$ , para los valores de  $\sigma_p$  menores a 210 días. El caso extremo corresponde a la prototipo SU UMa con una dispersión de 340.3[d], sin embargo se encuentra entre las 3 mejores significancia ( $a/\Delta a$ ) junto con ER UMa e YZ Cnc. Finalmente, se puede comparar la relación entre las dispersiones lineales ( $\sigma_l$ ) y parabólicas ( $\sigma_p$ ), ver Figura 4.17, donde el ajuste lineal da una

<sup>10</sup>Casos con baja significancia  $(A_p/\Delta A_p) < 3$ : CU Vel, CY UMa, GX Cas, IR Gem, SW UMa, TU Men, V1159 Ori, V503 Cyg y VZ Pyx.

Table 4.3. Resultados de los ajustes de mínimos cuadrados parabólicos. Se señalan los valores de  $a$  que indica un aumento o disminución del superciclo a largo plazo (positivo o negativo respectivamente),  $a/\Delta a$  es la significancia al cambio antes mencionado,  $P_{SC,0}$  señala el valor del primer superciclo, dispersión del ajuste parabólico ( $\sigma_p$ ), coeficiente de correlación del ajuste de mínimos cuadrados ( $r$ ), amplitud de la parábola  $A_p$ [d] y finalmente se indica la razón entre las dispersiones lineales y parabólicas  $\sigma_l/\sigma_p$ .

Nombre	$T_0$ [d]*	$(a \pm \Delta a)$ [d]	$a/\Delta a$	$P_{SC,0}$ [d]	$\sigma_p$ [d]	$r$	$A_p$ [d]	$\sigma_l/\sigma_p$
AQ Eri	43,221.6 ± 46.0	1.092 ± 0.086	12.70	237.16 ± 4.46	84.6	0.999817	686.3 ± 65.1	2.59
AY Lyr	26,621.1 ± 15.6	-0.0515 ± 0.0028	-18.39	213.87 ± 0.45	52.6	0.999982	303.7 ± 22.1	1.98
CU Vel	35,480.4 ± 71.0	0.16 ± 0.11	1.45	357.13 ± 6.30	183.2	0.999597	119.8 ± 100.4	1.01
CY UMa	48,370.8 ± 72.3	-0.84 ± 0.43	-1.95	354.83 ± 12.25	120.1	0.999116	160.8 ± 102.2	1.07
EK TrA	35,289.6 ± 57.0	2.90 ± 0.17	17.06	424.67 ± 6.43	102.0	0.999847	967.6 ± 80.6	3.75
ER UMa	48,763.5 ± 5.6	0.0201 ± 0.0008	25.13	45.72 ± 0.15	23.8	0.999999	157.7 ± 7.9	2.30
FS Aur	54,028.3 ± 12.1	-0.158 ± 0.008	-19.75	55.13 ± 0.66	33.0	0.999558	262.1 ± 17.1	3.44
GX Cas	48,009.6 ± 37.7	0.294 ± 0.302	0.97	334.15 ± 7.38	58.3	0.999731	41.3 ± 53.3	1.00
IR Gem	41,499.8 ± 54.4	-0.055 ± 0.022	-2.50	153.50 ± 2.40	124.8	0.999576	153.2 ± 76.9	1.06
OY Car	38,281.7 ± 59.2	-0.617 ± 0.070	-8.81	348.86 ± 4.42	143.6	0.999676	577.4 ± 83.7	1.61
QZ Vir	46,794.3 ± 39.0	-2.39 ± 0.27	-8.85	473.33 ± 7.21	66.1	0.999835	410.9 ± 55.2	2.23
RZ Sge	43,860.6 ± 41.1	0.390 ± 0.073	5.34	262.21 ± 3.75	83.5	0.999802	239.8 ± 58.1	1.34
SU UMa	25,994.8 ± 108.7	0.522 ± 0.022	23.73	153.36 ± 3.31	340.3	0.999316	2827.1 ± 153.7	2.49
SW UMa	38,598.2 ± 97.0	-0.071 ± 0.231	-0.31	463.22 ± 10.10	140.6	0.999678	31.6 ± 137.2	0.98
TT Boo	42,516.3 ± 21.7	0.198 ± 0.031	6.39	257.01 ± 1.79	53.2	0.999935	154.4 ± 30.7	1.37
TU Men	38,223.3 ± 43.1	0.015 ± 0.019	0.79	188.94 ± 1.97	136.9	0.999717	37.6 ± 61.0	1.00
TY Psc	40,566.9 ± 22.2	0.130 ± 0.013	10.00	177.78 ± 1.16	57.3	0.999931	243.3 ± 31.4	1.67
UV Per	24,627.0 ± 91.0	0.347 ± 0.068	5.10	386.79 ± 5.42	200.2	0.999774	515.0 ± 128.7	1.26
V436 Cen	36,650.6 ± 139.7	3.03 ± 0.25	12.12	285.47 ± 12.09	199.8	0.999292	1639.1 ± 197.6	2.78
V503 Cyg	46,703.8 ± 9.3	0.0068 ± 0.0024	2.83	87.47 ± 0.32	24.5	0.999967	27.6 ± 13.1	1.04
V1159 Ori	49,805.5 ± 6.5	-0.0007 ± 0.0010	-0.70	45.83 ± 0.18	20.9	0.999954	4.7 ± 9.2	1.00
VW Hyi	34,888.7 ± 15.5	0.0499 ± 0.0045	11.09	175.51 ± 0.58	59.1	0.999961	193.6 ± 21.9	1.41
VZ Pyx	50,312.9 ± 40.2	-0.151 ± 0.072	-2.10	136.17 ± 3.80	89.7	0.999082	98.5 ± 56.8	1.05
WX Hyi	40,978.2 ± 60.0	0.507 ± 0.036	14.08	139.03 ± 3.17	170.9	0.999308	927.4 ± 84.9	2.04
YZ Cnc	39,628.9 ± 36.2	-0.258 ± 0.008	-32.25	154.25 ± 1.17	115.2	0.999709	1283.1 ± 51.2	3.39
Z Cha	35,142.7 ± 54.6	-0.46 ± 0.03	-15.33	272.50 ± 2.63	175.9	0.999620	1041.5 ± 77.2	2.11

Note. —

(\*) Se refiere a (JD - 2400000)

pendiente  $0.33 \pm 0.04$  y coeficiente de correlación  $r=0.848$ , dando cuenta de que las dispersiones de los ajustes parabólicos son menores a los lineales, además para ambas dispersiones el valor extremo corresponde a la prototipo SU UMa.

Figura 4.13: Residuos O-C vs número de ciclos  $E$  de las supererupciones luego de un ajuste lineal de mínimos cuadrados. Las líneas sólidas se refieren a los ajustes de períodos parabólicos (detalles en Tabla 4.3).

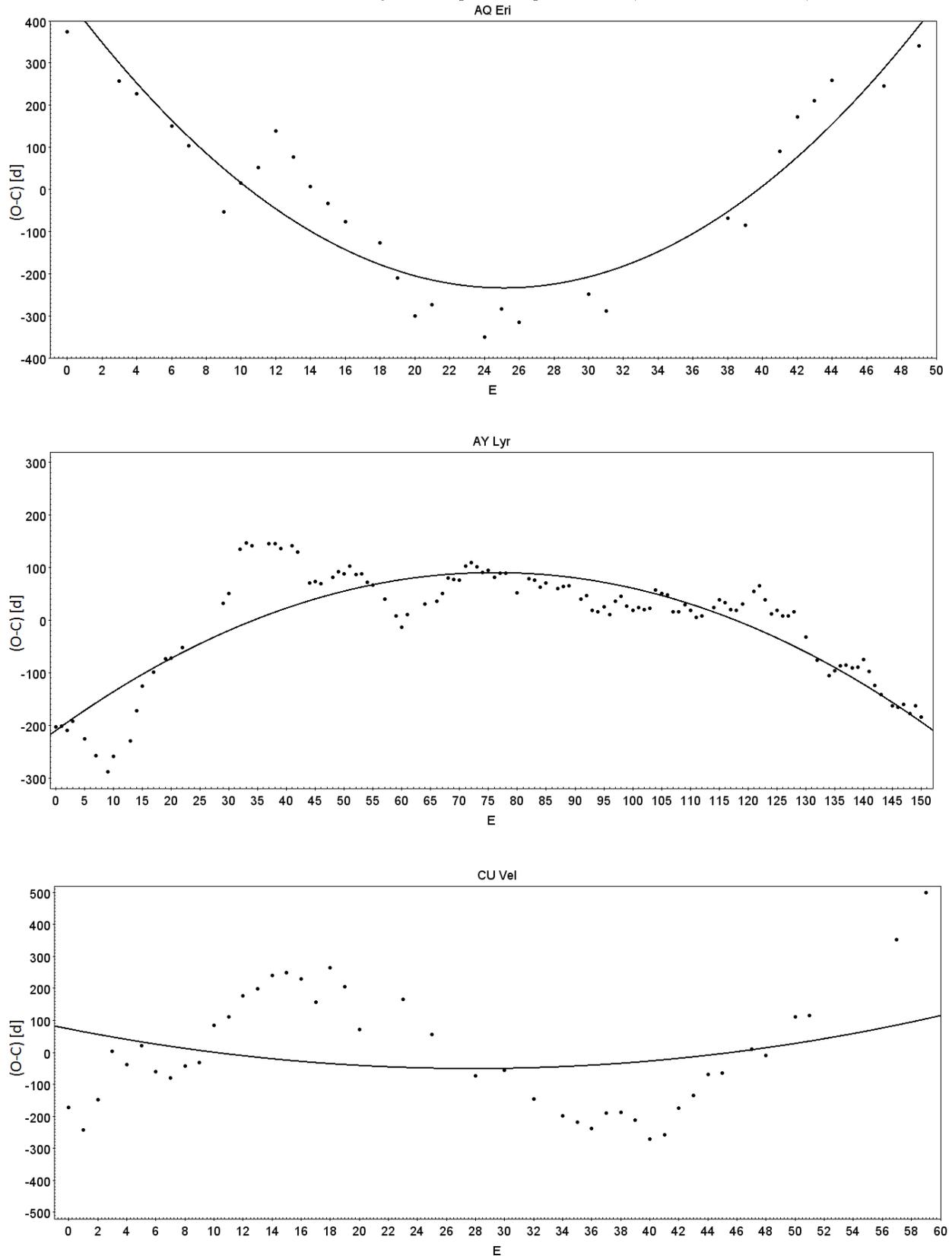


Figura 4.13: Continuación página anterior.

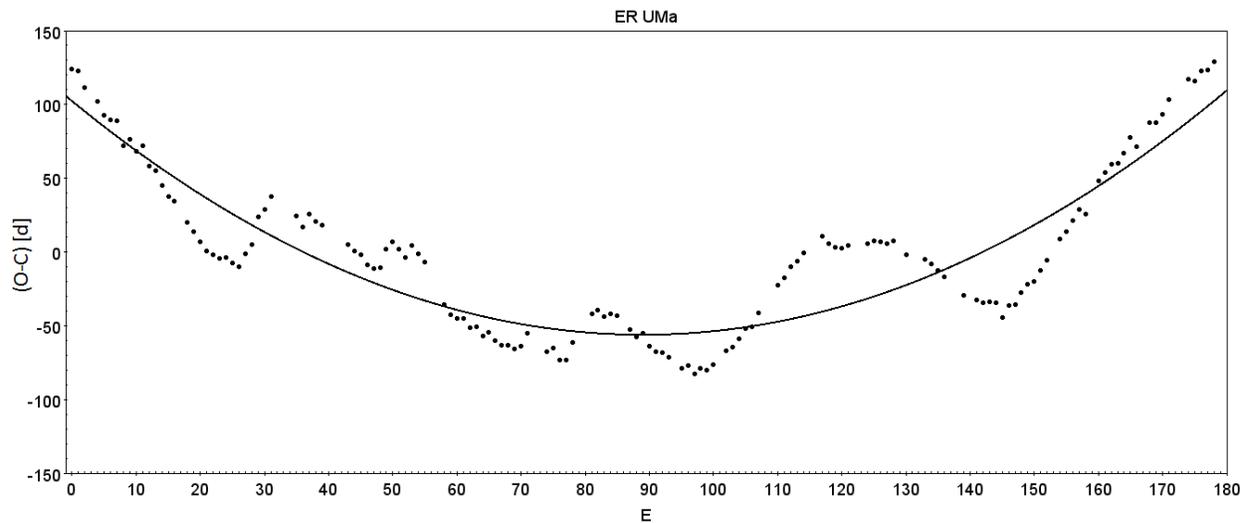
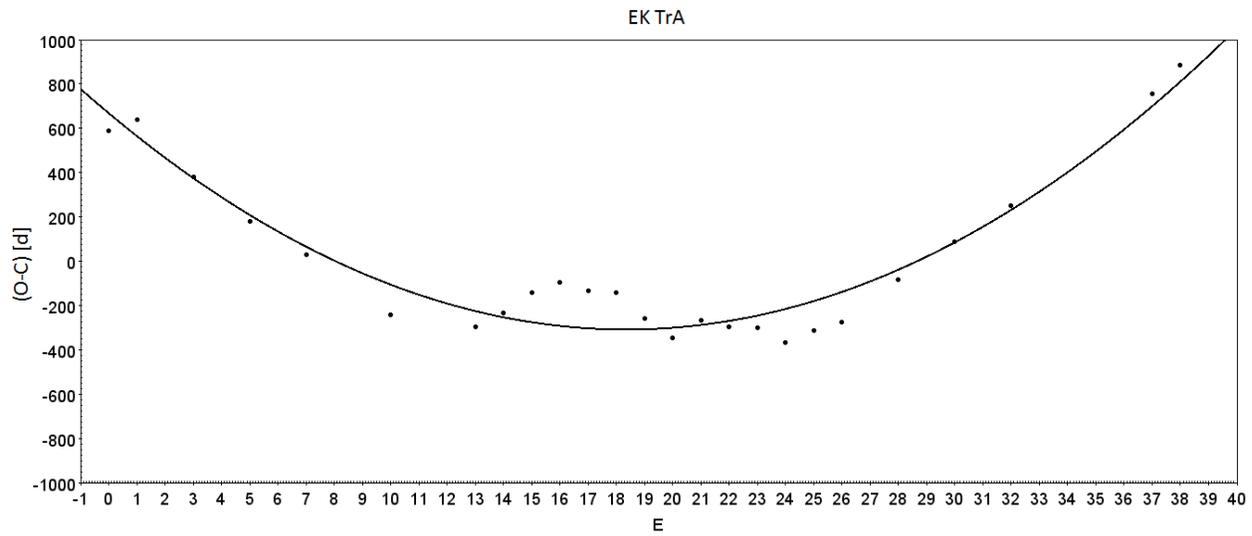
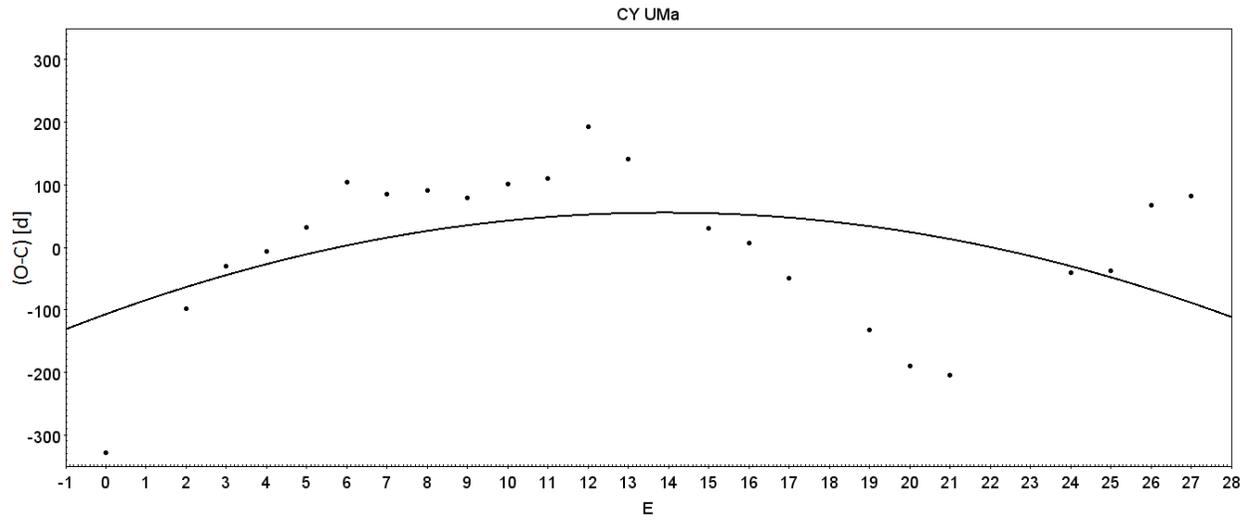


Figura 4.13: Continuación página anterior.

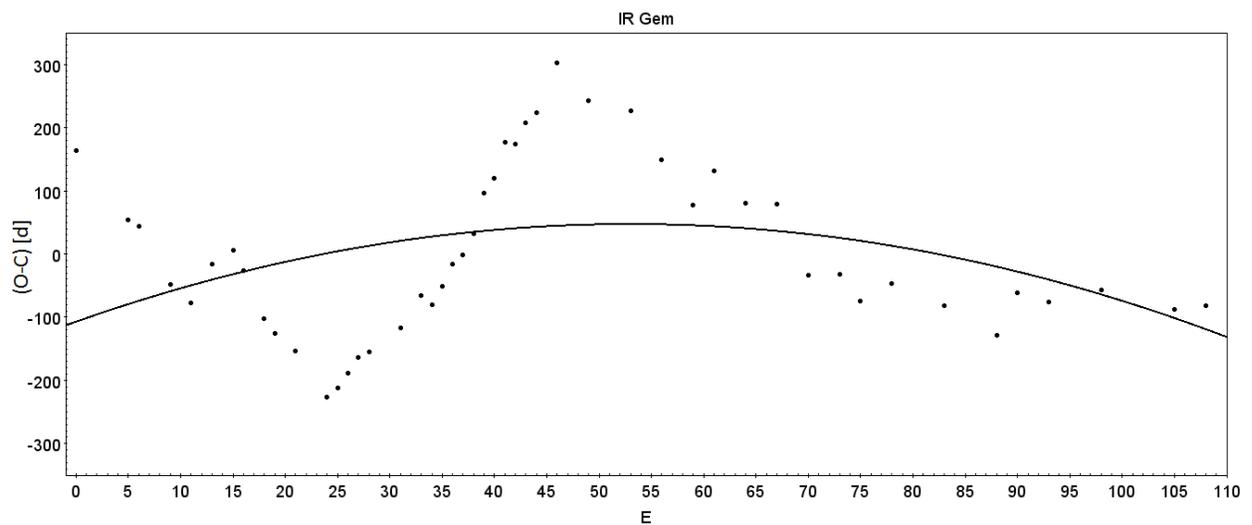
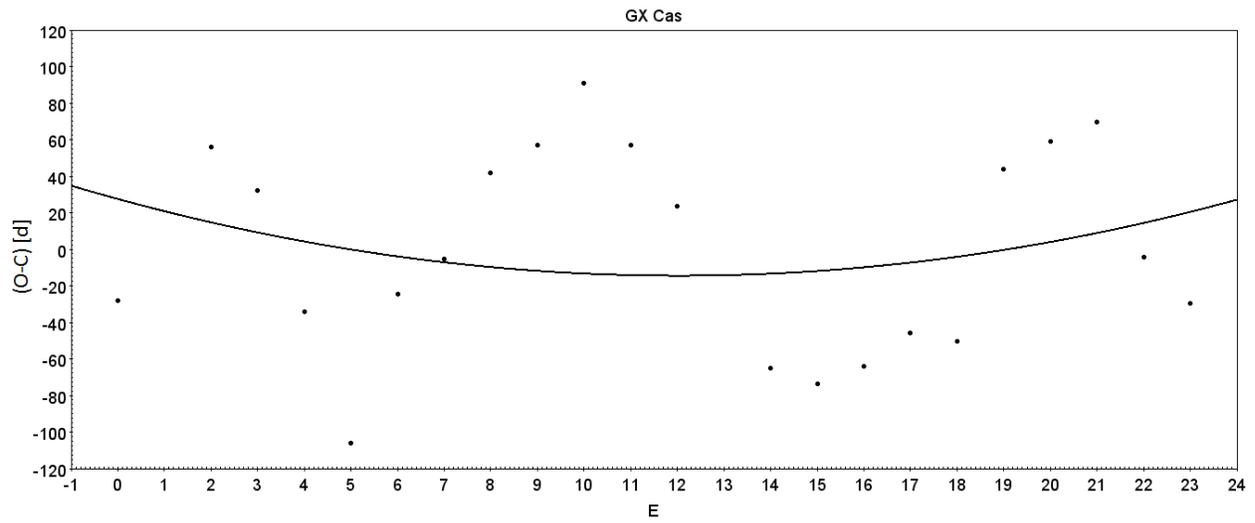
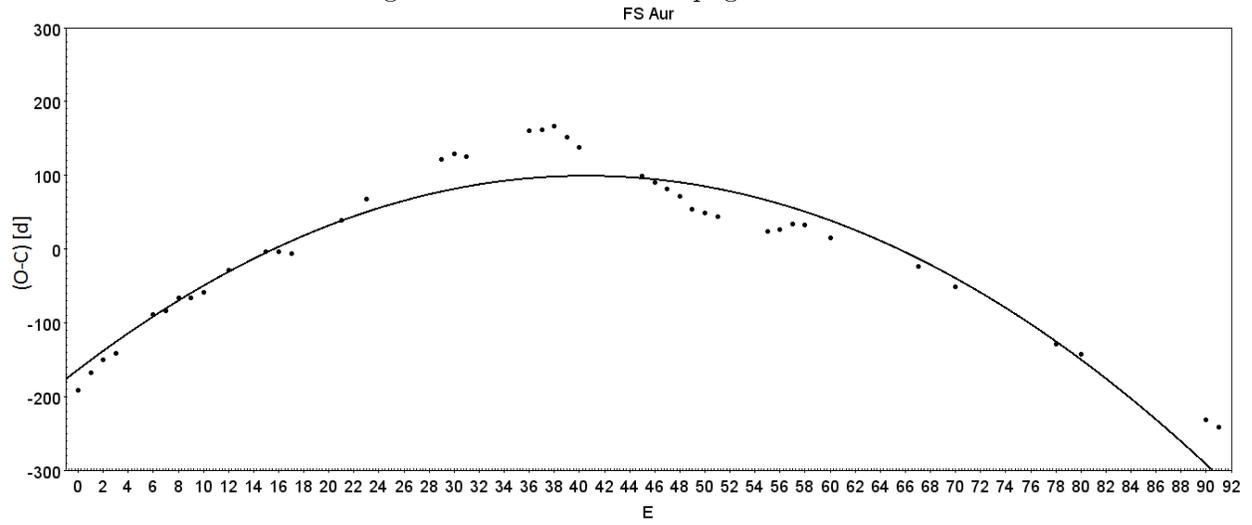


Figura 4.13: Continuación página anterior.

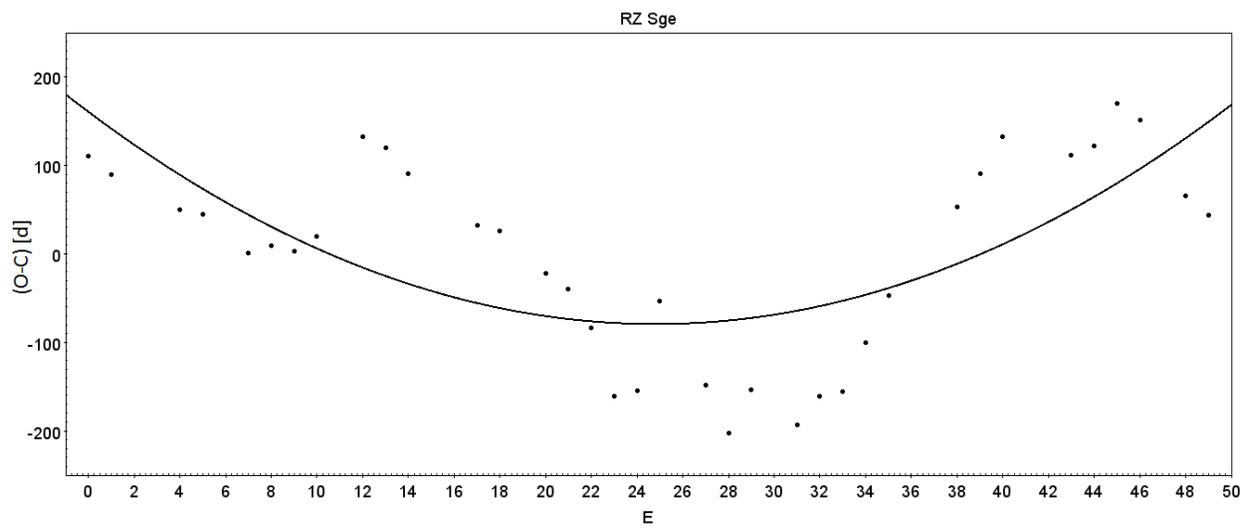
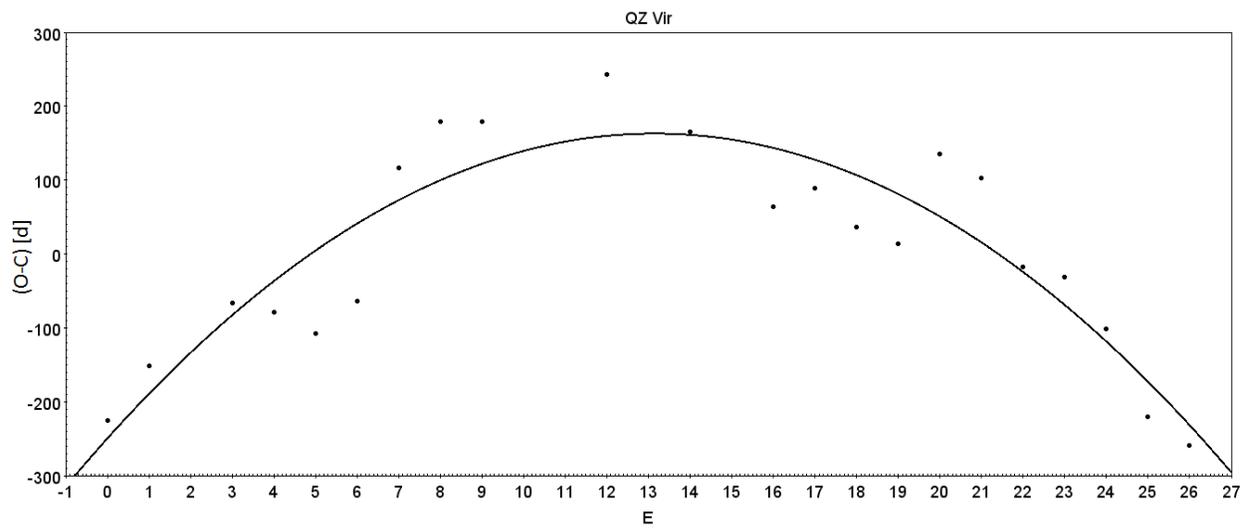
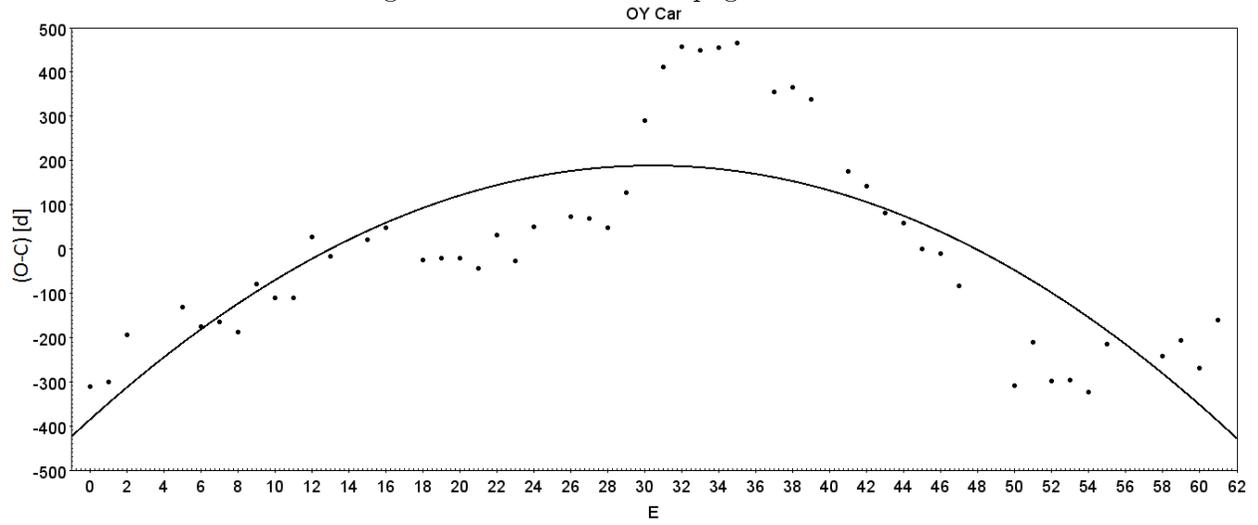


Figura 4.13: Continuación página anterior.

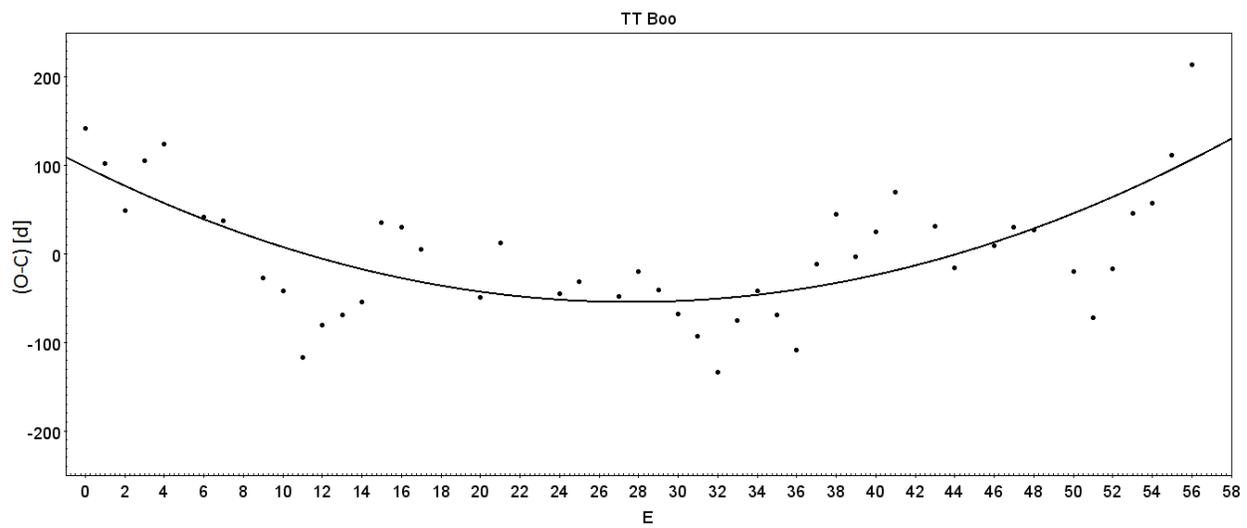
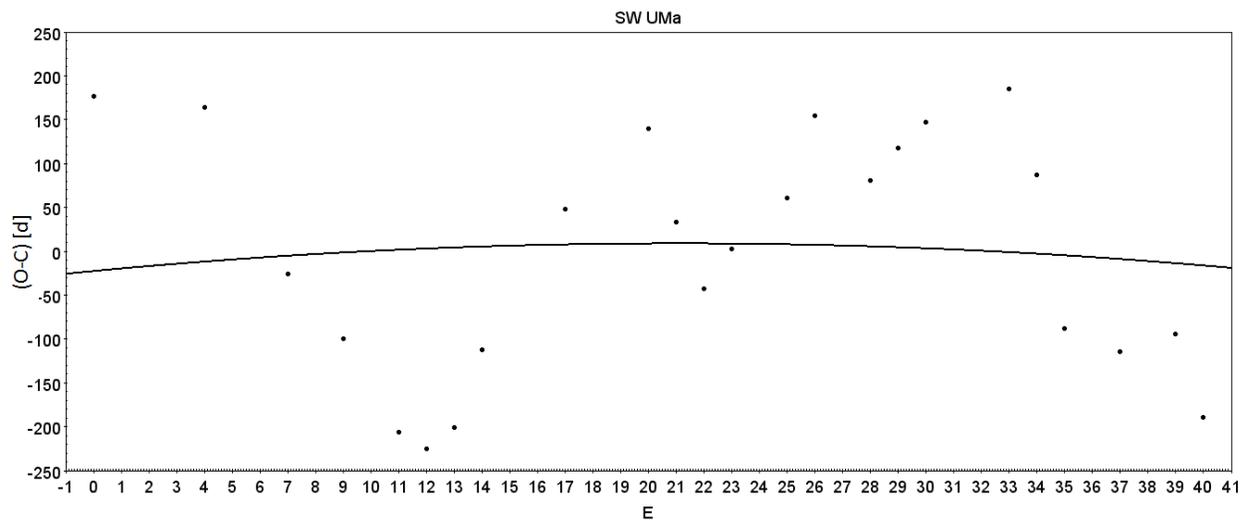
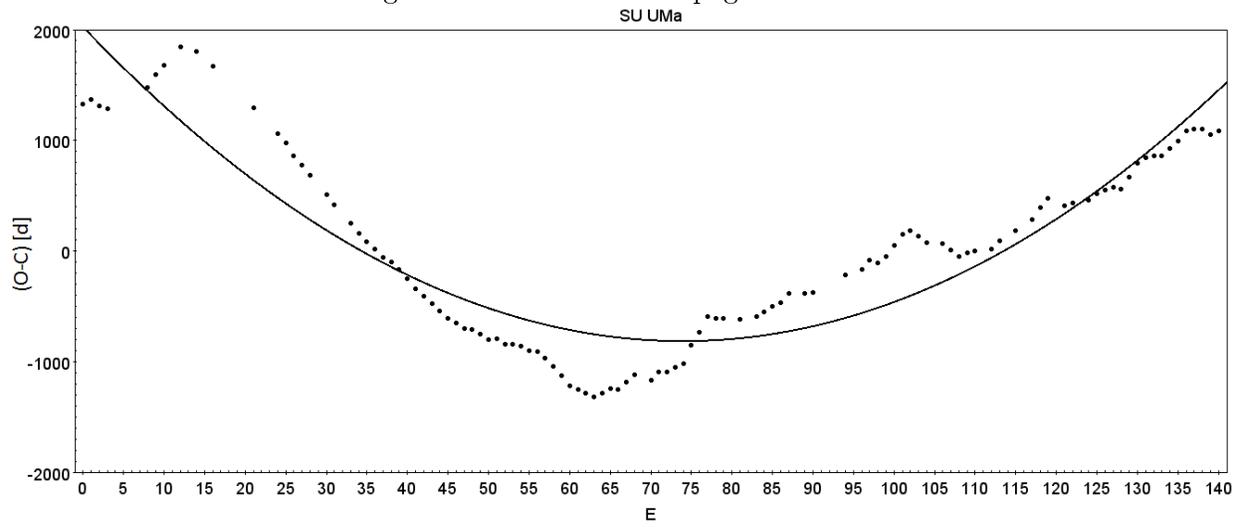


Figura 4.13: Continuación página anterior.

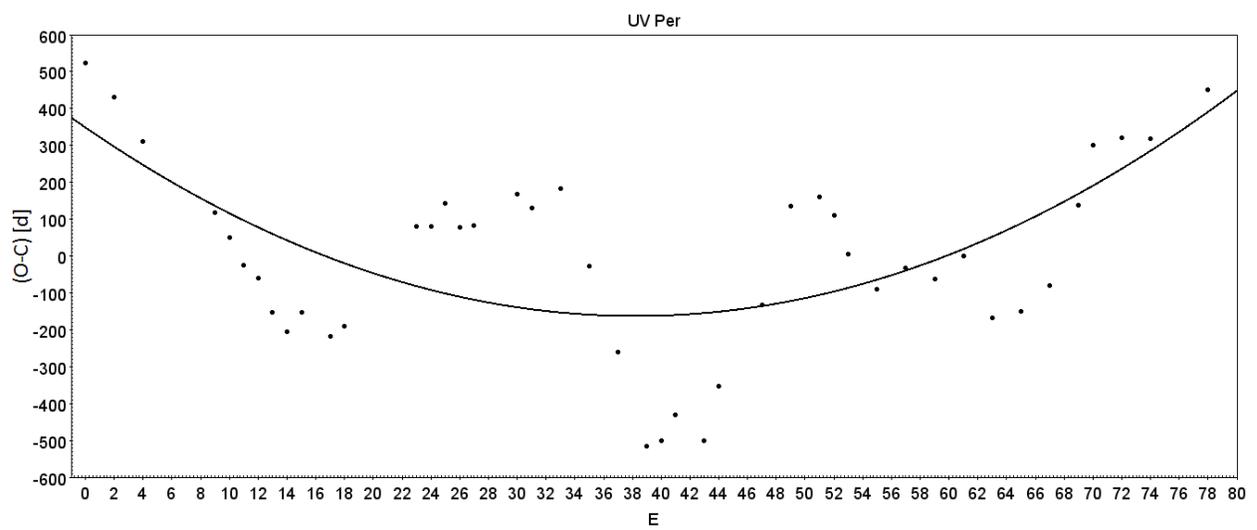
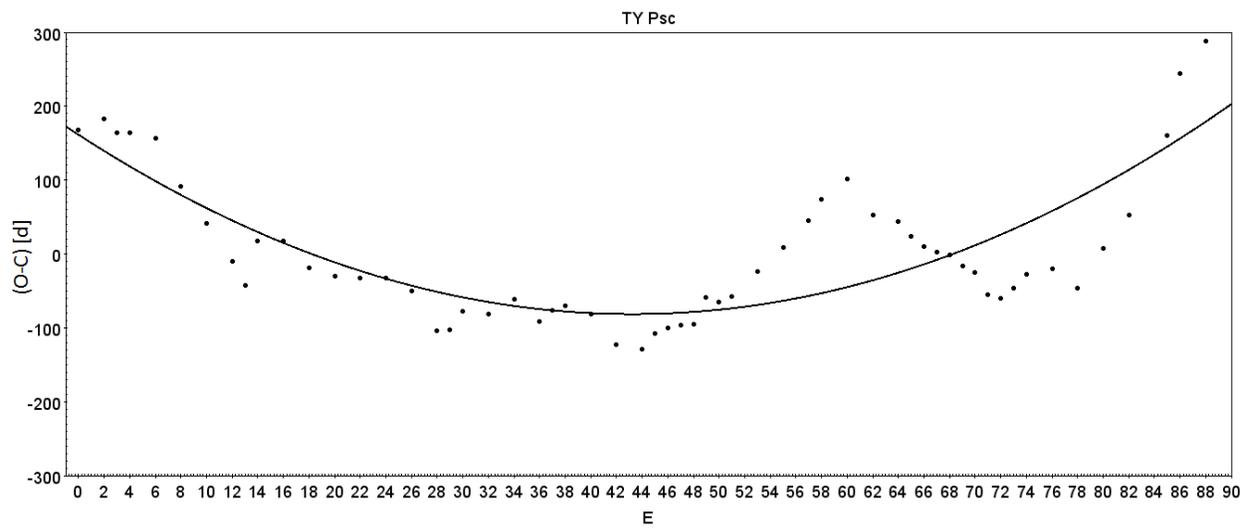
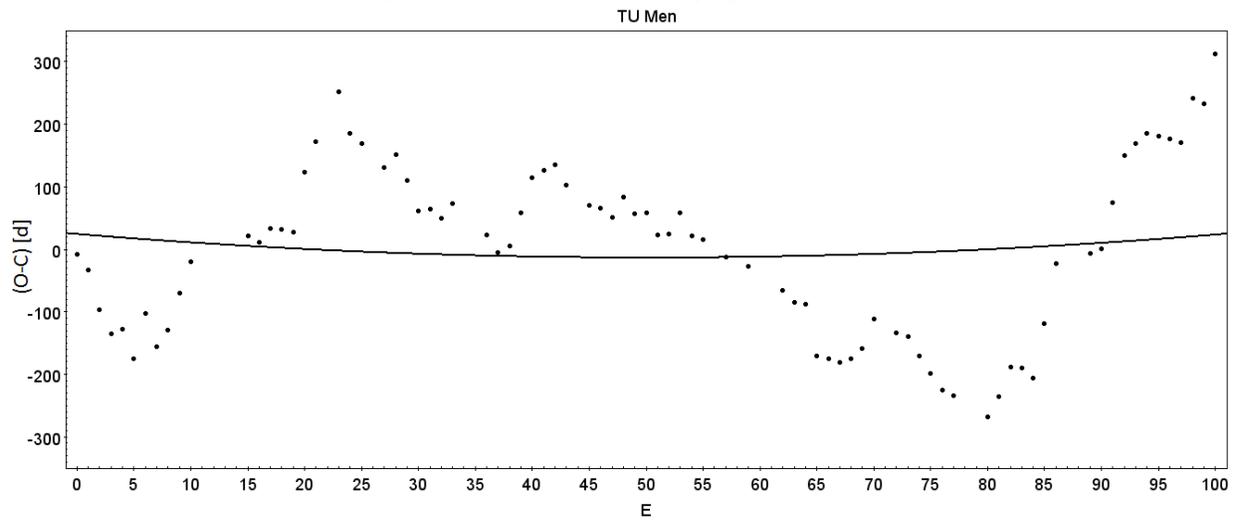


Figura 4.13: Continuación página anterior.

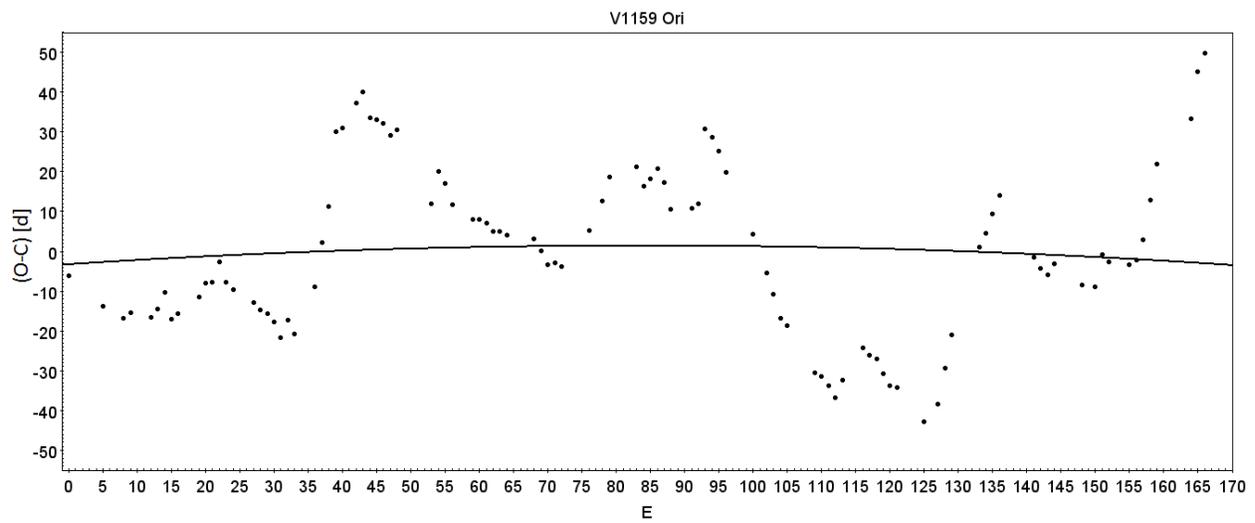
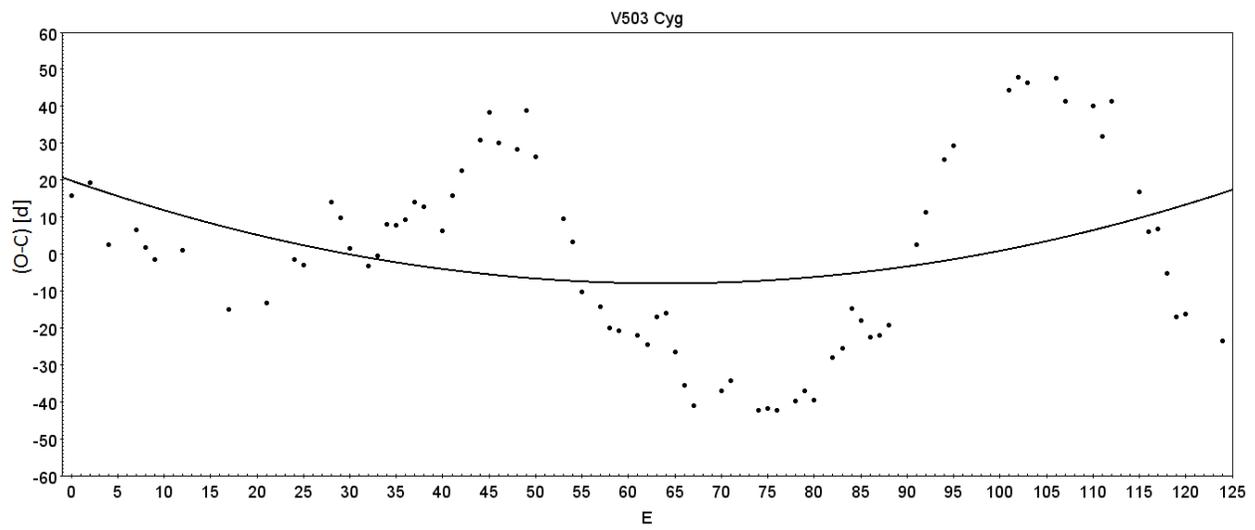
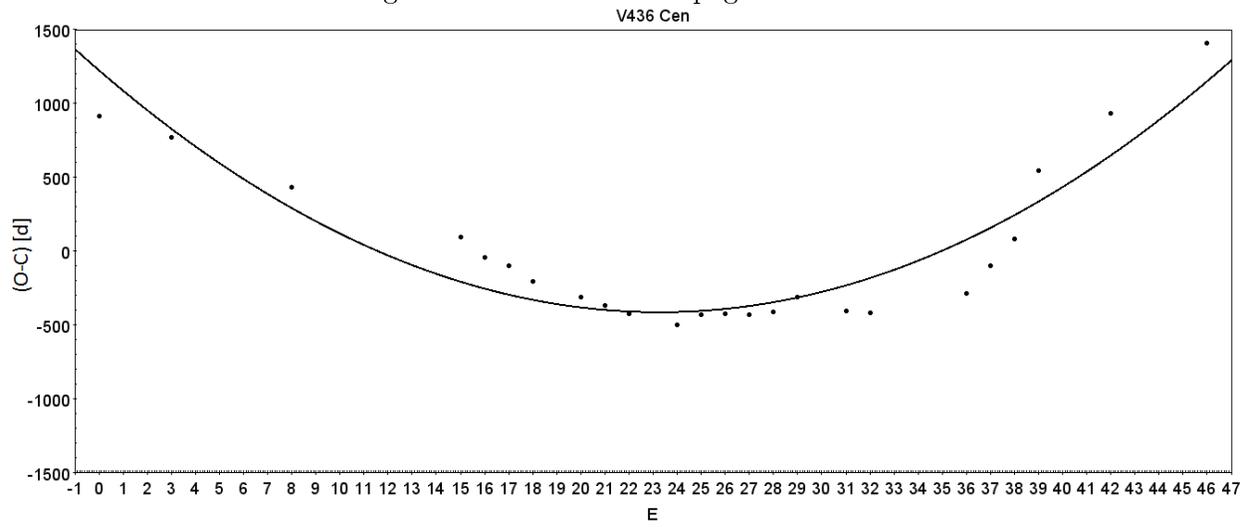


Figura 4.13: Continuación página anterior.

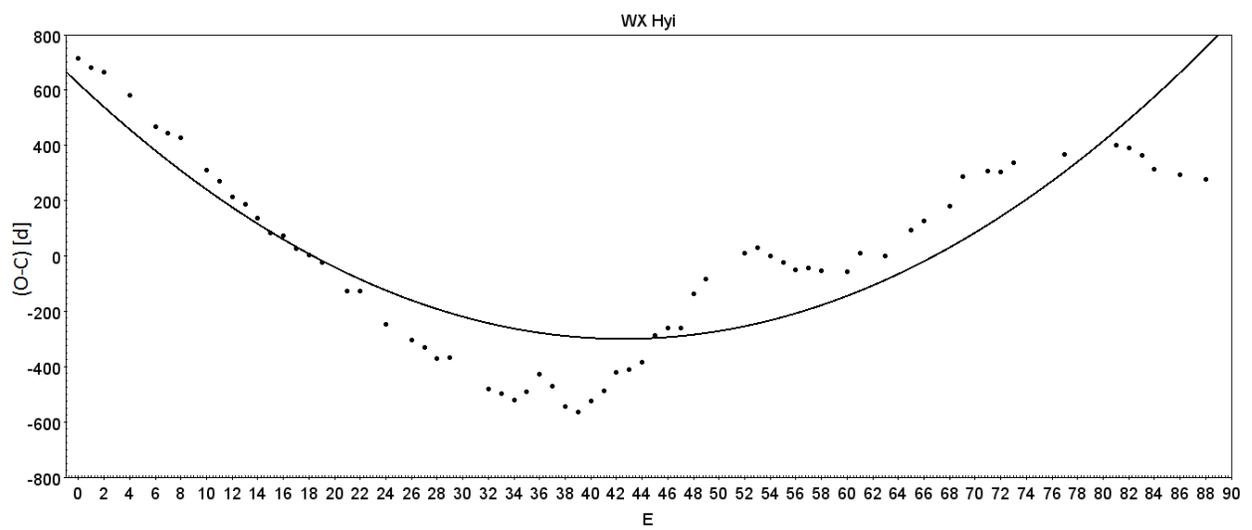
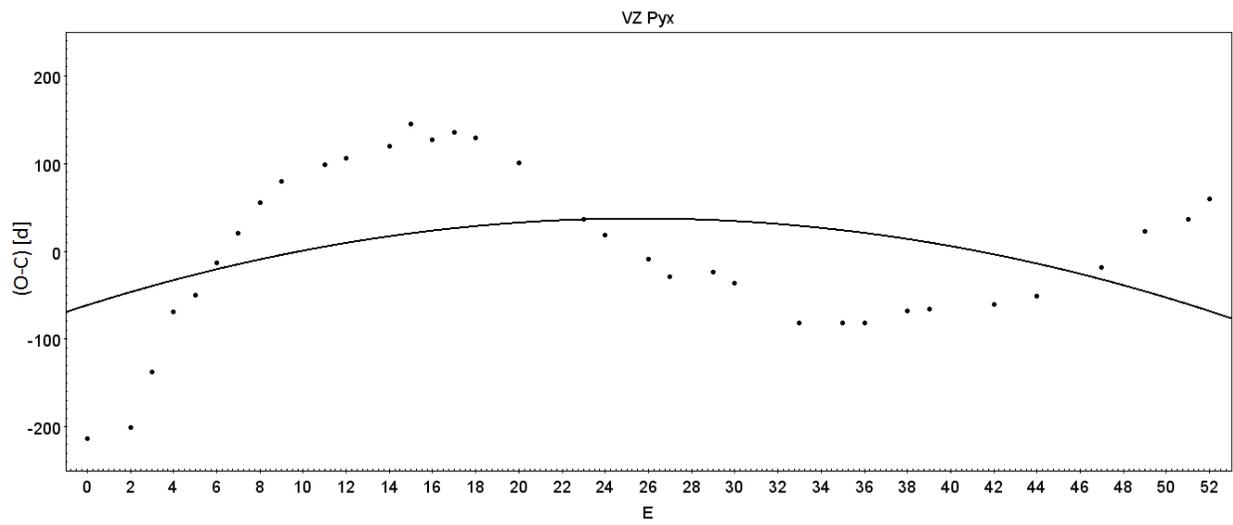
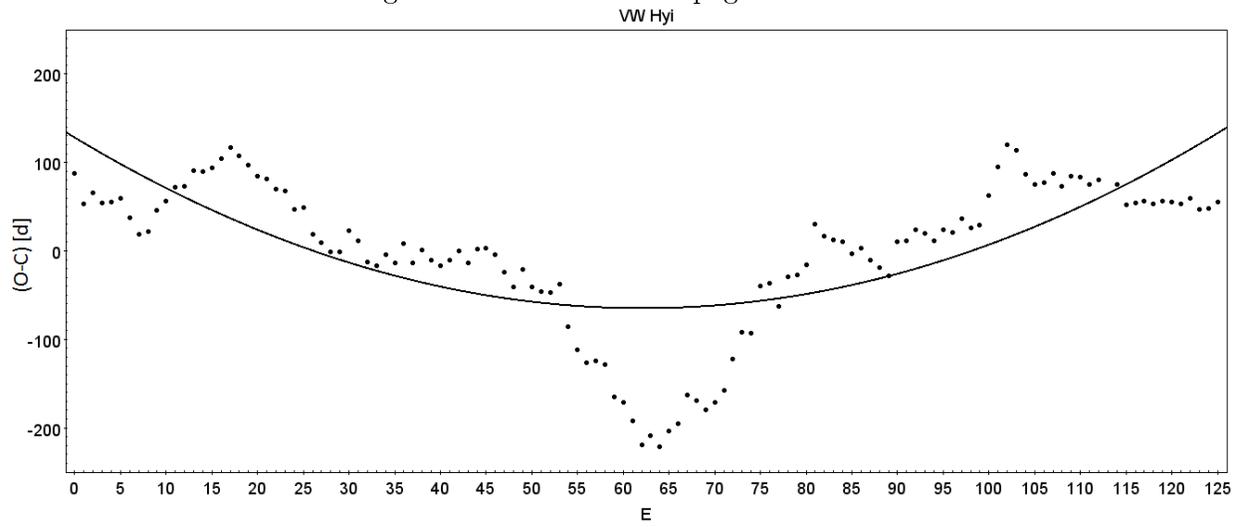
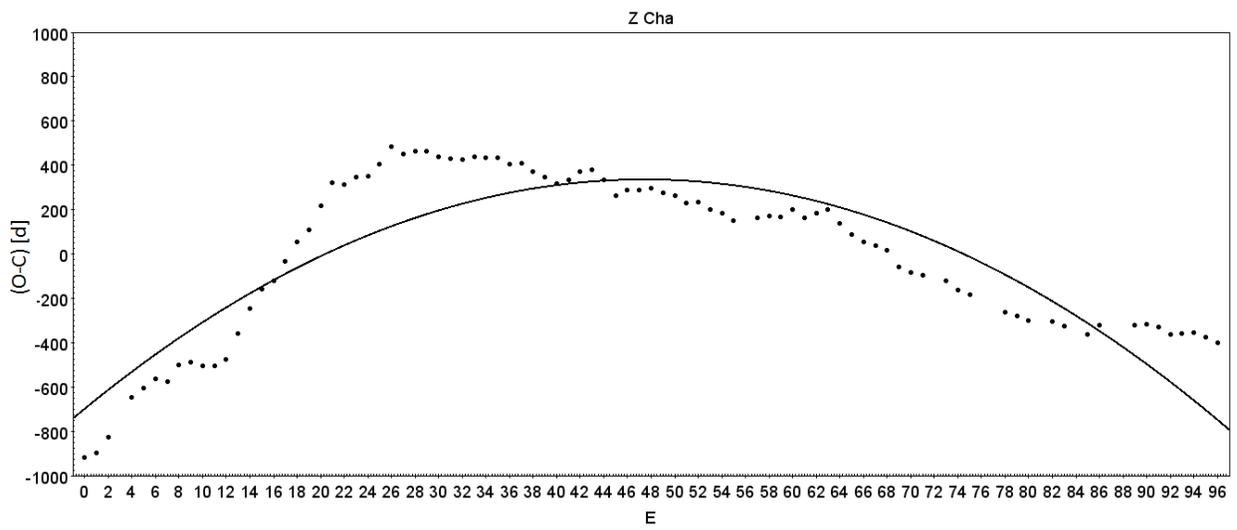
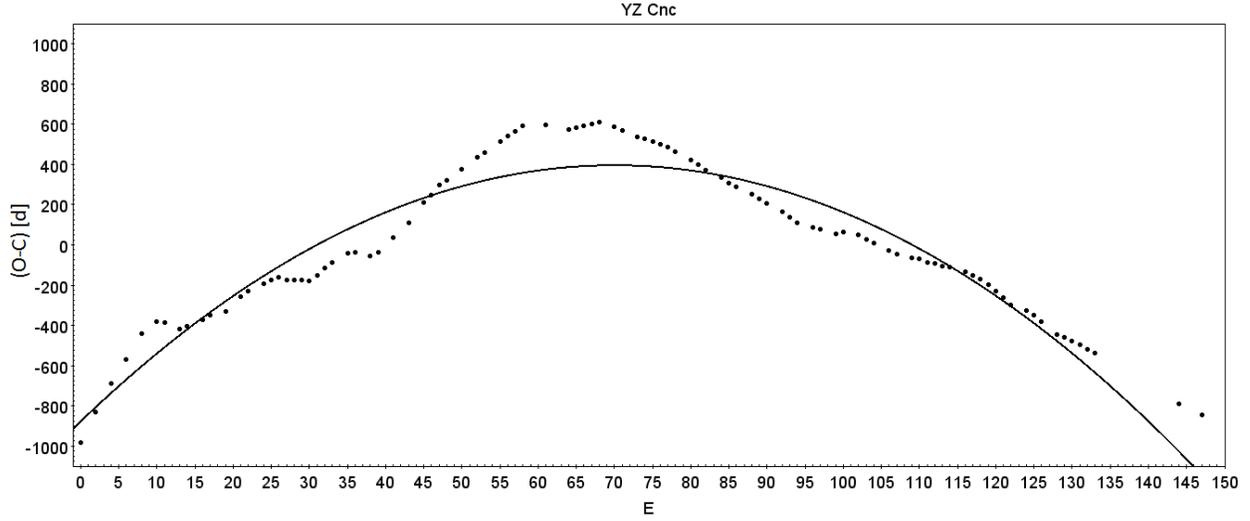


Figura 4.13: Continuación página anterior.



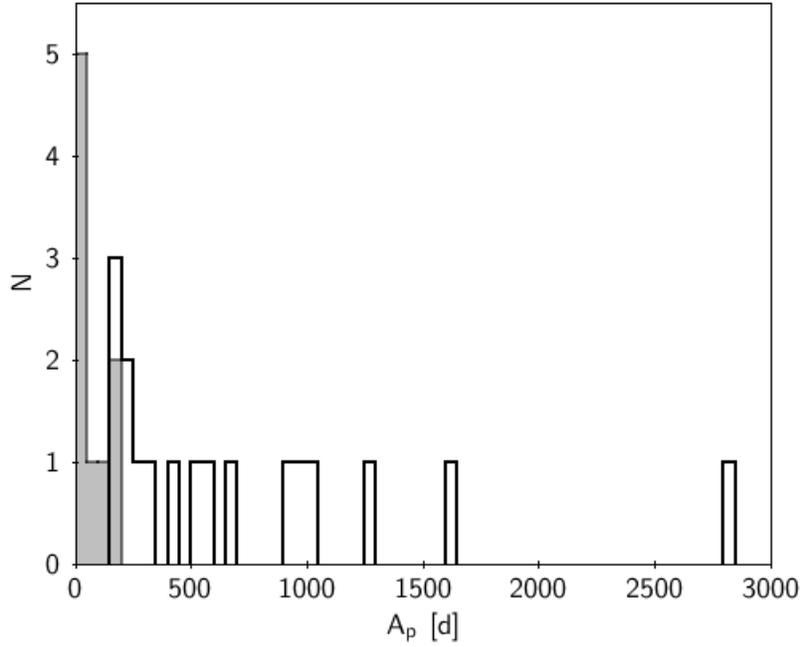


Figura 4.14: Distribución de las amplitudes parabólicas con  $\text{bin}=50[\text{d}]$ . Para 20 casos los valores son menores a los 700 días. Además, se destaca en zona gris las amplitudes poco significativas, es decir, con  $(A_p/\Delta A_p) < 3$  (9 casos).

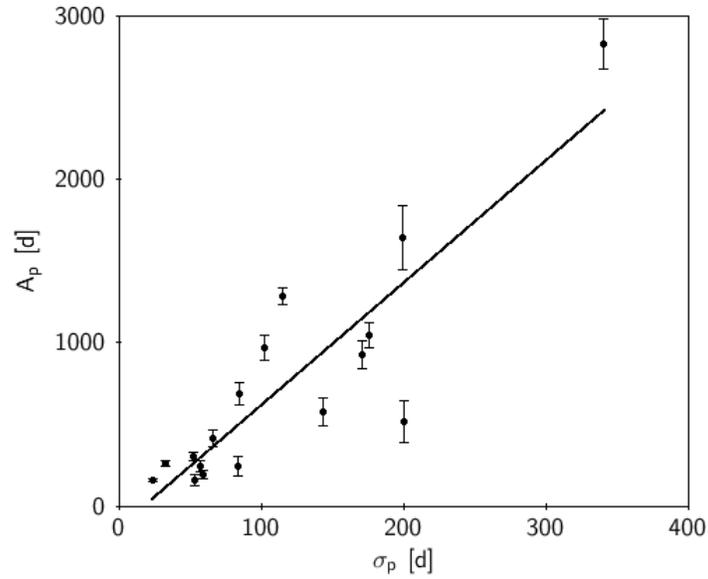


Figura 4.15: Comparación amplitud parabólica y la dispersión de los datos luego del ajuste de mínimos cuadrados parabólico ( $\sigma_p$ ) para los 17 casos con  $|A_p/\Delta A_p| > 3$ . La línea sólida señala el ajuste lineal con pendiente  $7.48 \pm 1.05$  y coeficiente de correlación  $r=0.879$ . El caso extremo corresponde a la prototipo SU UMa.

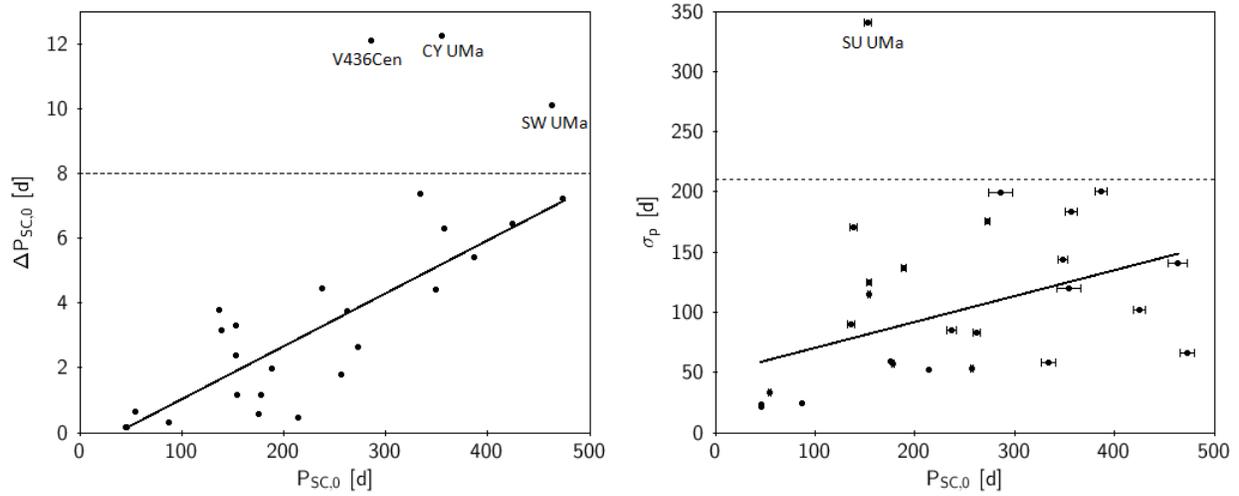


Figura 4.16: **Arriba:** Relación superciclo inicial  $P_{SC,0}$  y su error estándar. Se señala un ajuste lineal (línea sólida) con una pendiente  $0.016 \pm 0.002$  y coeficiente de correlación  $r=0.845$  para los valores  $\Delta P_{SC,0} < 8$  días. Ver discusión en el texto sobre los objetos destacados. **Abajo:** Relación entre los superciclos iniciales y la dispersión ( $\sigma_p$ ) luego del ajuste de mínimos cuadrados parabólicos, el ajuste lineal (en línea sólida) da una pendiente  $0.21 \pm 0.08$  y un débil coeficiente de correlación  $r=0.483$ , descartando a la prototipo SU UMa.

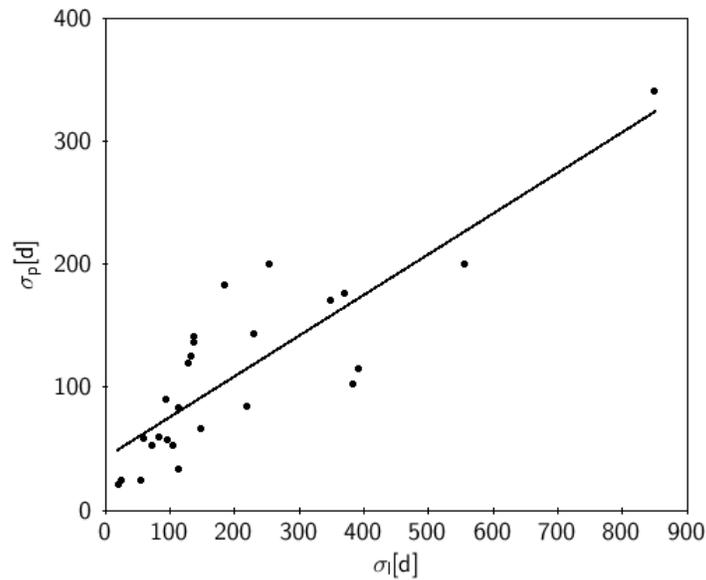


Figura 4.17: Relación de las desviaciones estándar lineal ( $\sigma_l$ ) y parabólico ( $\sigma_p$ ) de los ajustes de mínimos cuadrados. Se observa que los errores del ajuste parabólico disminuyen a la mitad respecto a los lineales. El ajuste lineal (línea sólida) da como resultado una pendiente  $0.33 \pm 0.04$  y coeficiente de correlación  $r=0.848$ , donde se incluyeron todos los datos. El valor extremo corresponde a la prototipo SU UMa.

## 4.4. Superciclos a mediano plazo

A partir de los residuos O-C de los ajustes de mínimos cuadrados parabólicos es posible notar que todos los objetos presentan variaciones sinusoidales, ver gráficas de Figura 4.18. Estas variaciones representan cambios en los superciclos con valores intermedios en comparación con Secciones 4.2 y 4.3. Los resultados obtenidos de los ajustes son mostrados en Tabla 4.4, a partir de la relación (3.5), y graficados en línea a trazos en Figura 4.18. Se señalan la fase inicial  $\phi$ , como también la semiamplitud y período del superciclo dado en número de ciclos  $E$  ( $\varepsilon[E]$ ). Sin embargo, usando la relación (3.6) para obtener los superciclos en días, los resultados muestran que los superciclos a mediano plazo ( $P_{SCsin}$ ) oscilan para las tipo ER UMa entre los  $\sim 5.4$  años para el caso de V1159 Ori hasta los  $\sim 7.5$  años para FS Aur. En cuanto a las SU UMa, los superciclos sinusoidales van desde los  $\sim 9.0$  años para el caso de GX Cas hasta los  $\sim 48.4$  años para la prototipo SU UMa. Como consecuencia, la Figura 4.19 muestra la distribución de estos superciclos, donde se observa un peak en torno a los 9000 días ( $\sim 24.7$  años)

La figura 4.20 muestra la relación entre los superciclos sinusoidales ( $P_{SCsin}$ ) y el tiempo total de observación ( $T_{obs}$ ), donde se observa una fuerte correlación para tiempos de observación menores a los 25000 días ( $\sim 68.5$  años), donde un ajuste lineal de mínimos cuadrados (línea sólida) da un coeficiente de correlación  $r=0.898$  y una pendiente de  $0.69 \pm 0.07$ . Fueron descartados los casos de AY Lyr que posee un débil coeficiente de correlación  $r=0.577$  luego del ajuste sinusoidal de sus residuos O-C, además de una gran semiamplitud entre  $E=15-60$  (ver Figura 4.18), UV Per posiblemente por falta de números de ciclos  $E$  (se contabilizaron el 56 % de sus supererupciones) y estar dentro de los 3 casos con más alta dispersión ( $\sigma_s[d]$ ), por su parte la prototipo SU UMa que posee  $\sigma_s$  más alto y donde se observa un rápido aumento en sus superciclos en  $E=0-15$  (ver Figura 4.18). Sin embargo, como ya fue comentado en la sección anterior, los ajustes parabólicos están directamente relacionados con  $T_{obs}$  y en consecuencia sus residuos también lo estarán, como se encuentra en figura 4.20. Como resultado, se podrían encontrar variaciones sinusoidales en algunos objetos pero que no poseen oscilaciones significativas intrínsecas.

Si se comparan los superciclos sinusoidales ( $P_{SCsin}$ ) y sus respectivos errores absolutos ( $\Delta P_{SCsin}$ ), ver arriba Figura 4.21, se encuentra que para errores inferiores a 500 días existe una relación directa entre estos parámetros donde la línea sólida en la figura señala un ajuste lineal de mínimos cuadrados con una correlación  $r=0.796$  y pendiente  $0.019 \pm 0.003$ . Lo anterior al ser descartados los casos de AQ Eri posiblemente por los vacíos en el intervalo  $E=21-41$  (ver Figura 4.18) así como también para SW UMa en el rango  $E=0-20$ , TY Psc donde las oscilaciones se mantienen relativamente constantes entre  $E=0$  y  $E=50$ , y V436 Cen que también posee vacíos en  $E=0-15$ . Por otro lado, la parte inferior de la Figura 4.21 muestra que la distribución de errores  $\Delta P_{SCsin}$  posee un peak alrededor de los 175 días y donde el 90 % de los casos presentan errores menores a los 420 días.

A su vez, la relación entre el período sinusoidal y su dispersión de datos ( $\sigma_s$ ) sólo destaca el caso de la prototipo SU UMa que posee un  $\sigma_s > 130$  días, ver Figura 4.22, donde la línea sólida representa un ajuste lineal con un coeficiente de correlación  $r=0.758$  y pendiente  $112.35 \pm 20.16$ , descartando este valor extremo. Por otra parte, si se comparan los superciclos sinusoidales y sus semiamplitudes se encuentra que para la estrella prototipo SU UMa posee la mayor amplitud, ver Figura 4.23. Con lo anterior y descartando este caso extremo se encuentra una relación lineal con pendiente  $0.013 \pm 0.002$  y coeficiente de correlación  $r=0.758$ . Así mismo, la amplitud está directamente relacionada con la dispersión de datos  $\sigma_1$  ya que se obtiene un ajuste lineal de pendiente  $2.29 \pm 0.21$  y coeficiente de correlación  $r=0.911$ , ver Figura 4.24.

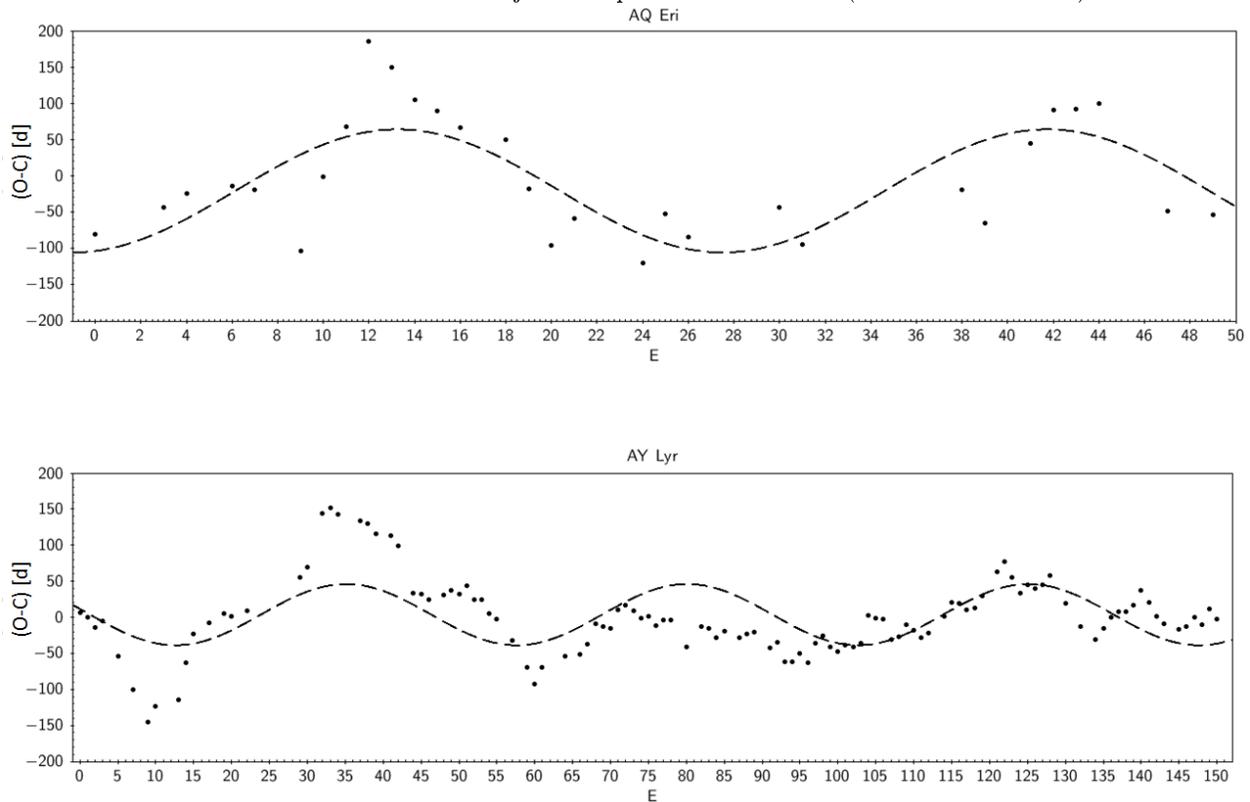
Por otra parte, la Figura 4.25 muestra la relación entre las 'amplitudes' parabólica y sinusoidal. De esta forma, es posible notar nuevamente que el caso de la prototipo SU UMa posee un valor extremo. Además, los casos restantes están agrupados en un 'triángulo' donde existe un corte claro

alrededor de  $A_{\text{sin}} \simeq 500$  días ( $\sim 1.4$  años) y  $A_p \simeq 1640$ [d] ( $\sim 4.5$  años), donde todos los valores están bajo una recta de pendiente 5 señalada en la figura con línea a trazos.

Ahora bien, si se comparan los superciclos promedio ( $\bar{P}_{\text{SC}}$ ) y los superciclos sinusoidales se encuentra que existen dos grupos bien definidos, ver Figura 4.26. Dicho lo anterior, para períodos  $\bar{P}_{\text{SC}}$  menores a 250 días<sup>11</sup> existe, aparentemente, una relación de tipo lineal con respecto a los superciclos de mediano plazo, ver línea sólida de la figura. Sin embargo, para  $\bar{P}_{\text{SC}} > 250$ [d] no se encuentra una tendencia clara. A su vez un resultado similar se obtuvo en Figura 4.3, no obstante como ya fue mencionado  $P_{\text{SCsin}}$  está directamente relacionado con  $T_{\text{obs}}$ , ver Figura 4.20.

También cabe mencionar que los rangos de las dispersiones de los ajustes de mínimos cuadrados lineales, parabólicos y sinusoidales ( $\sigma_l$ ,  $\sigma_p$  y  $\sigma_s$ , respectivamente) disminuyen aproximadamente a la mitad en cada ajuste, destacando en todos los casos la estrella prototipo SU UMa. Finalmente, la Figura 4.27 muestra las comparaciones entre las desviaciones estándar con un ajuste lineal (línea sólida) para  $\sigma_l$  vs  $\sigma_s$  (izquierda) y  $\sigma_p$  vs  $\sigma_s$  (derecha).

Figura 4.18: Residuos O-C vs número de ciclos  $E$  de las supererupciones luego de un ajuste parabólico de mínimos cuadrados. Las líneas a trazos se refieren a los ajustes de períodos sinusoidales (detalles en Tabla 4.4).



<sup>11</sup>Los 14 casos son: AY Lyr, ER UMa, FS Aur, IR Gem, SU UMa, TU Men, TY Psc, V503 Cyg, V1159 Ori, VW Hyi, VZ Pyx, WX Hyi, YZ Cnc y Z Cha.

Figura 4.18: Continuación página anterior.

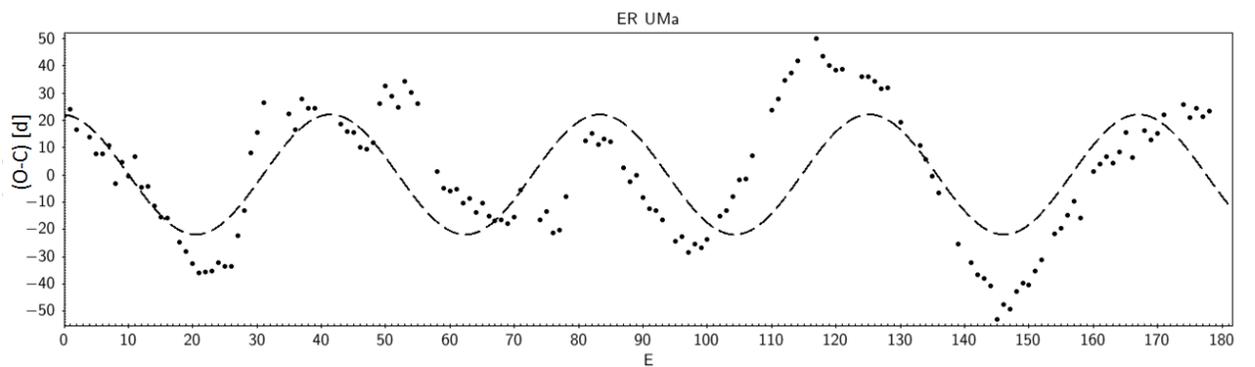
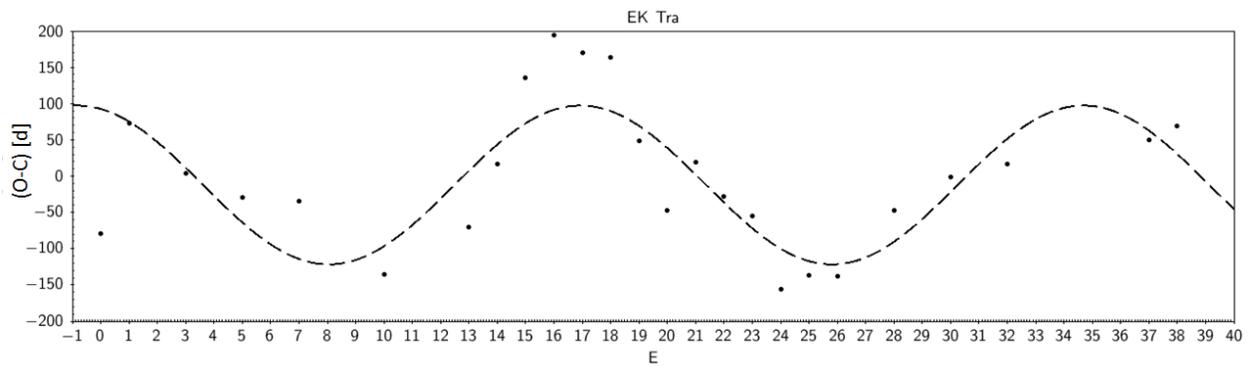
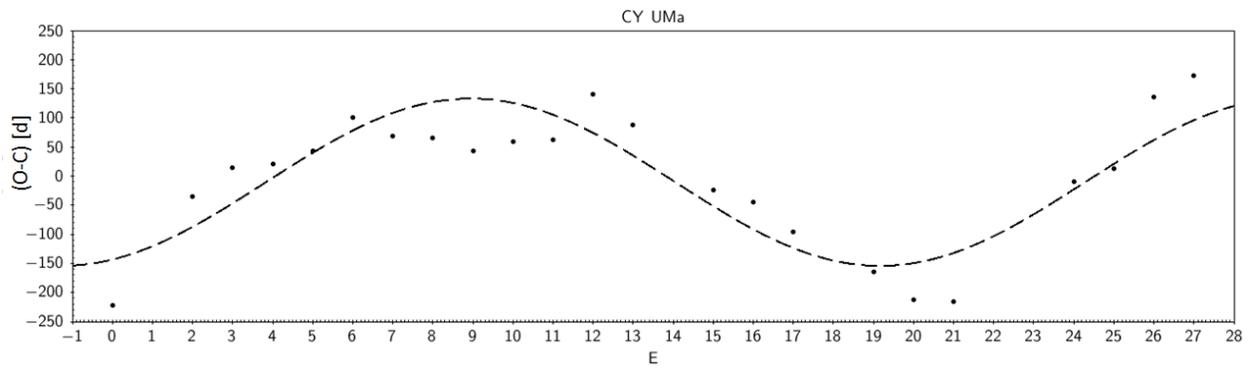
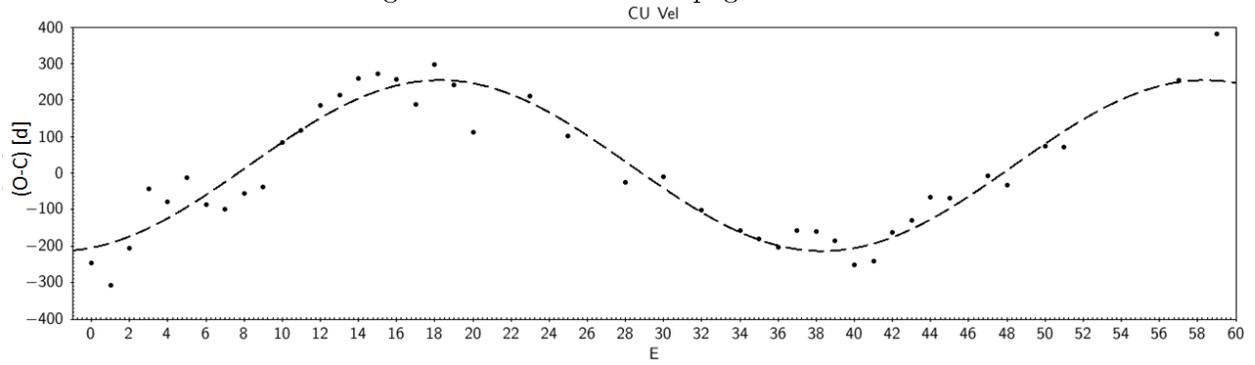


Figura 4.18: Continuación página anterior.

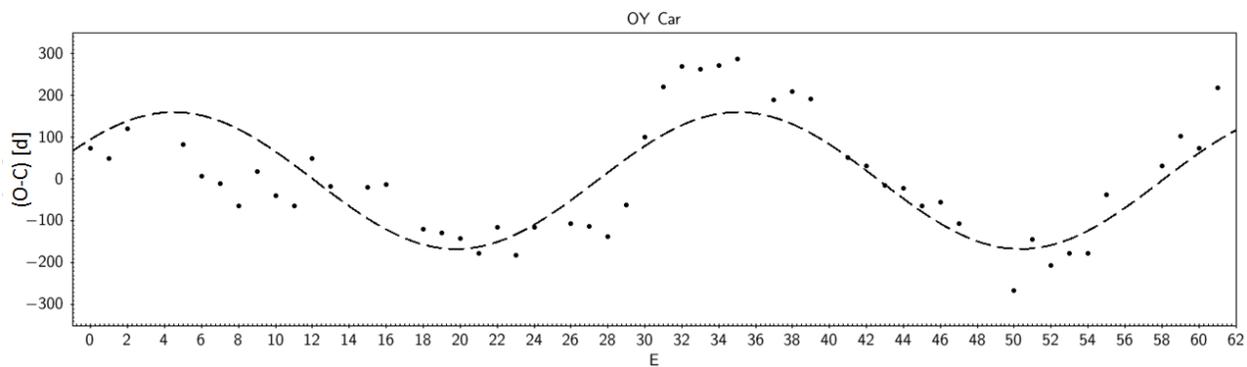
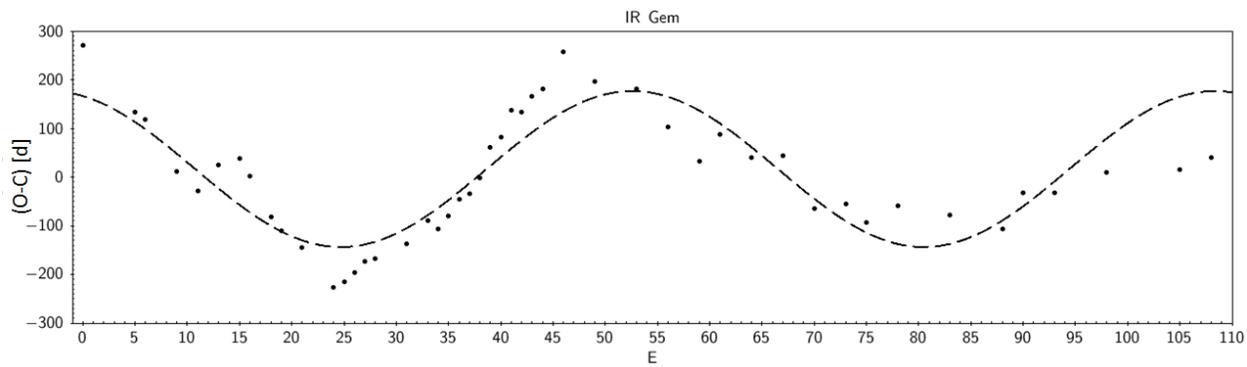
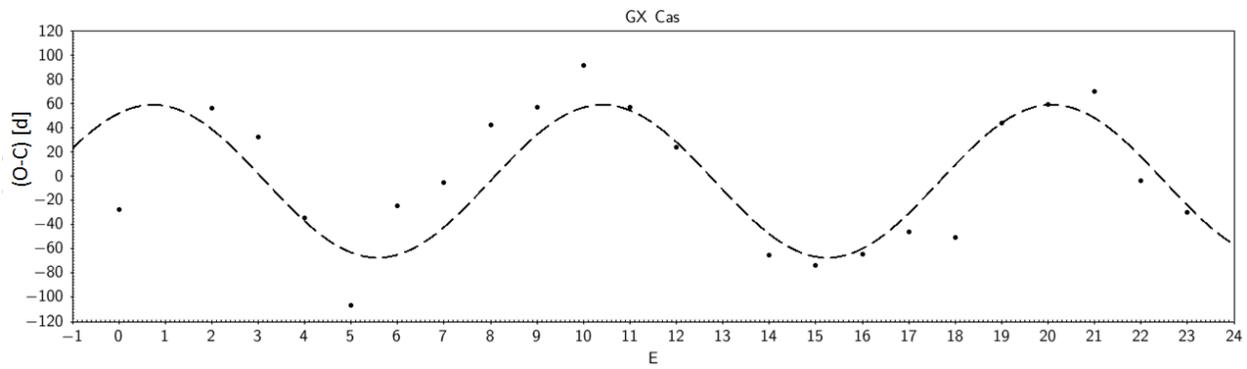
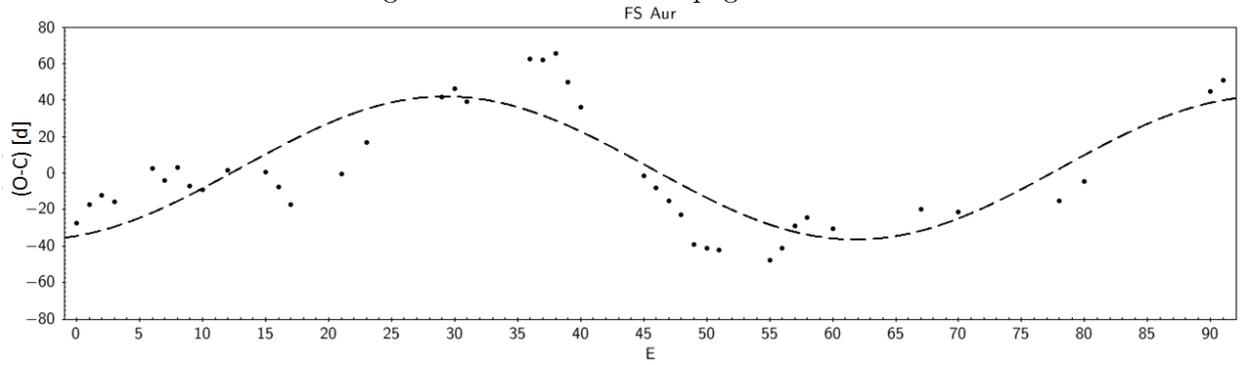


Figura 4.18: Continuación página anterior.

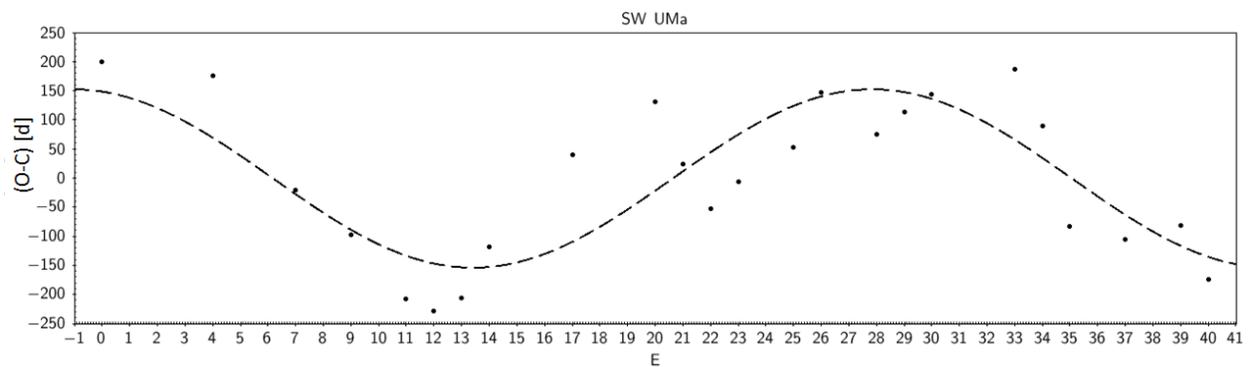
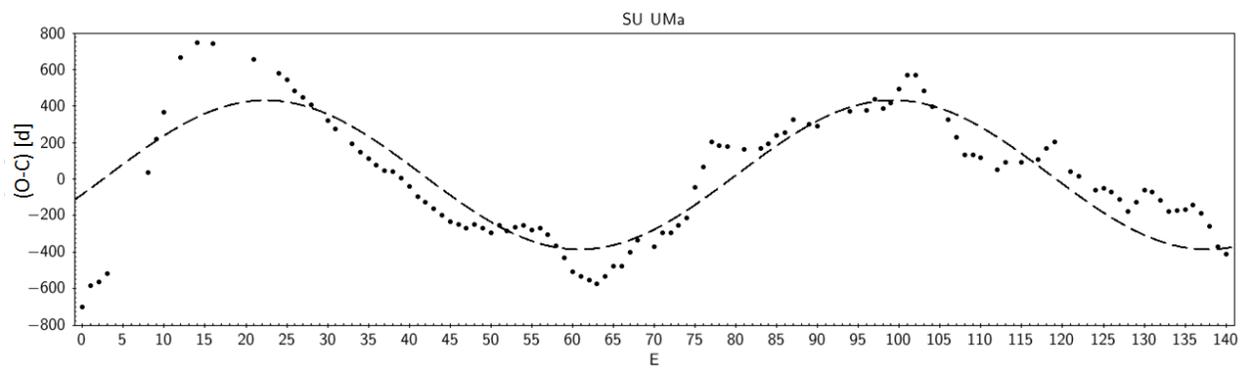
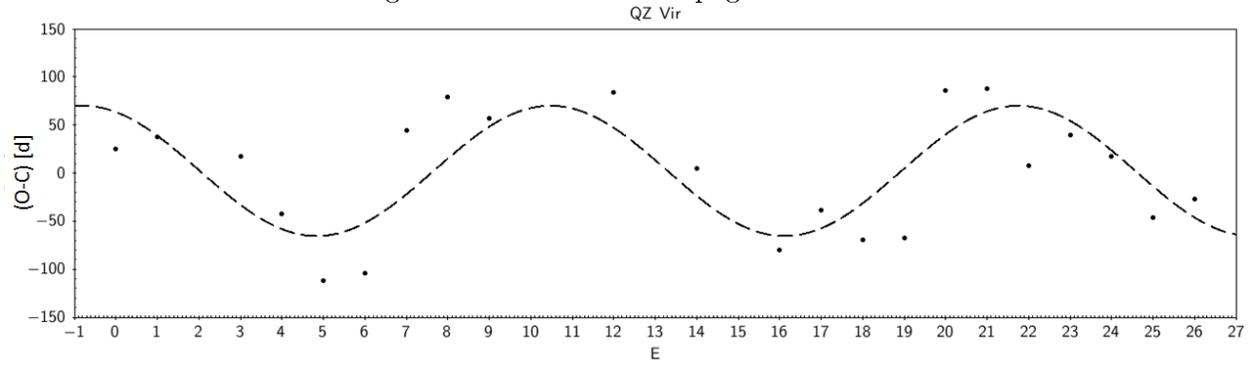


Figura 4.18: Continuación página anterior.

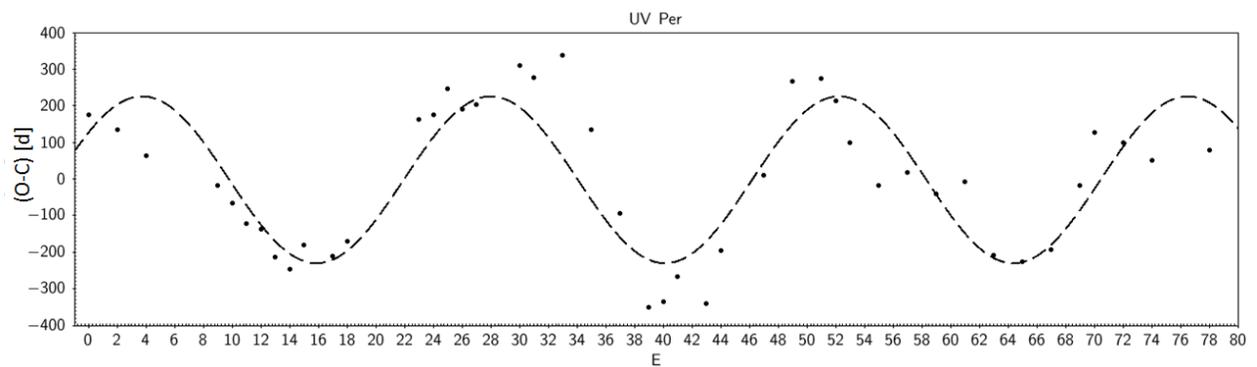
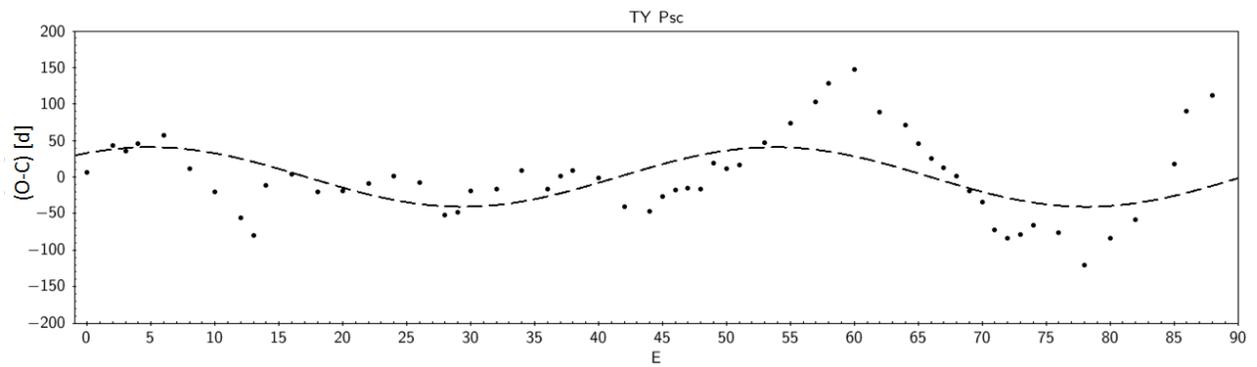
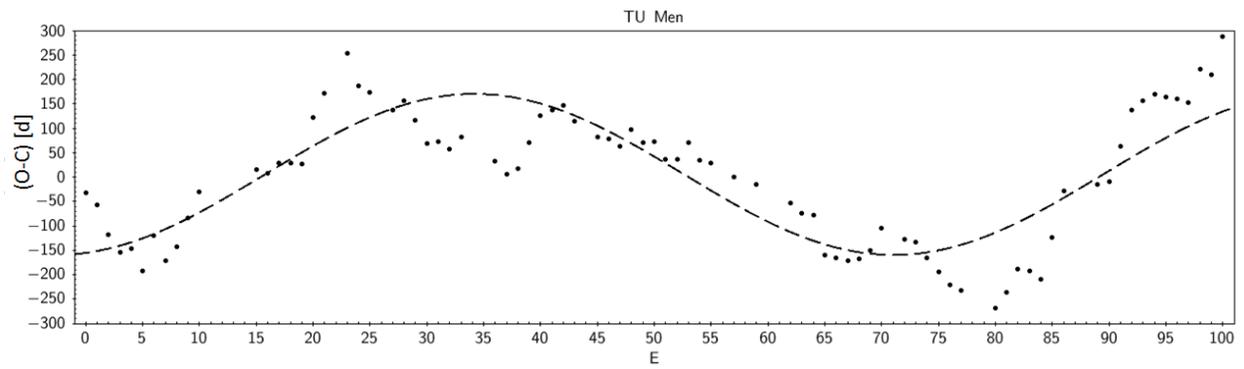
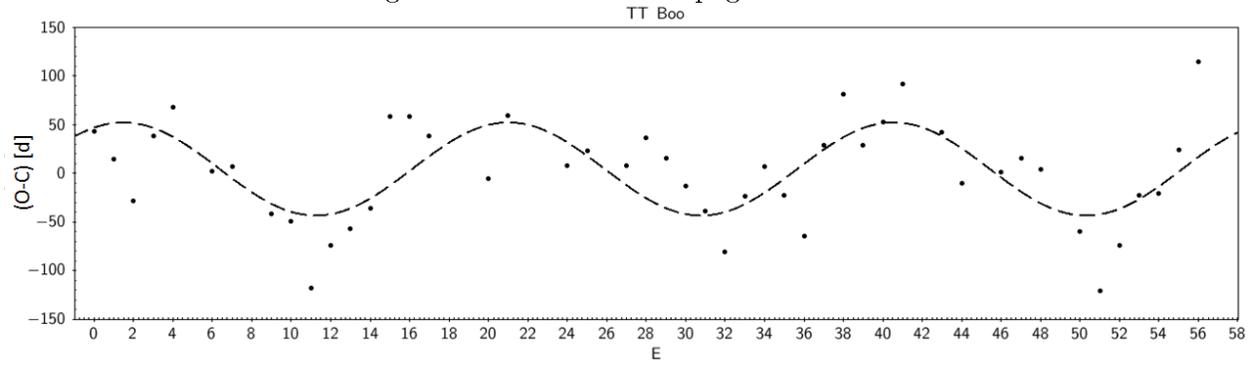


Figura 4.18: Continuación página anterior.

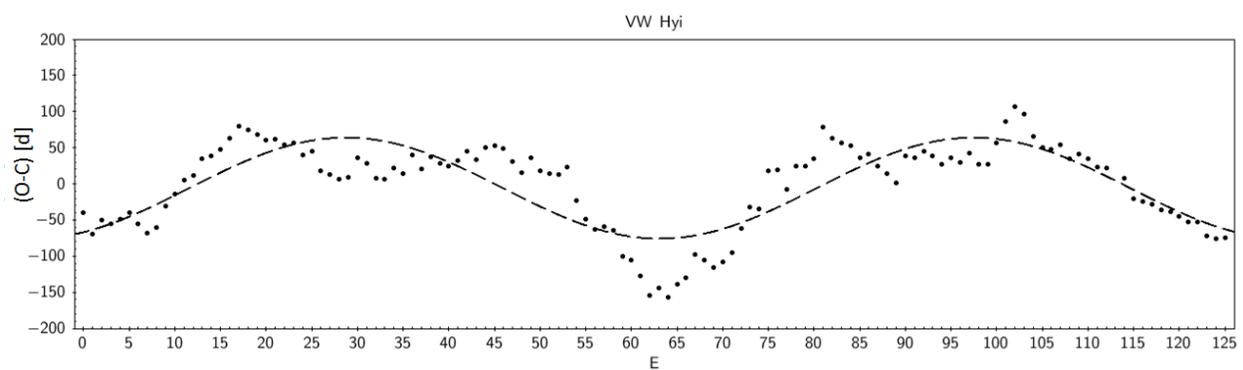
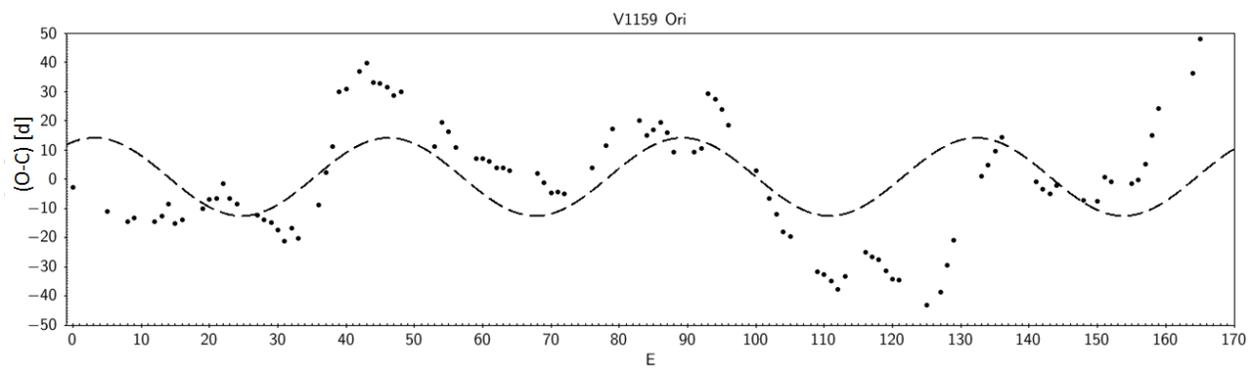
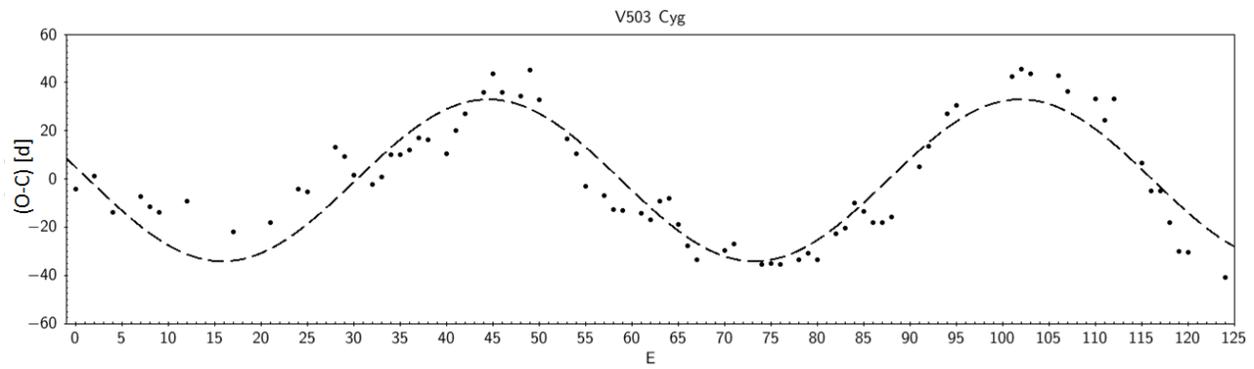
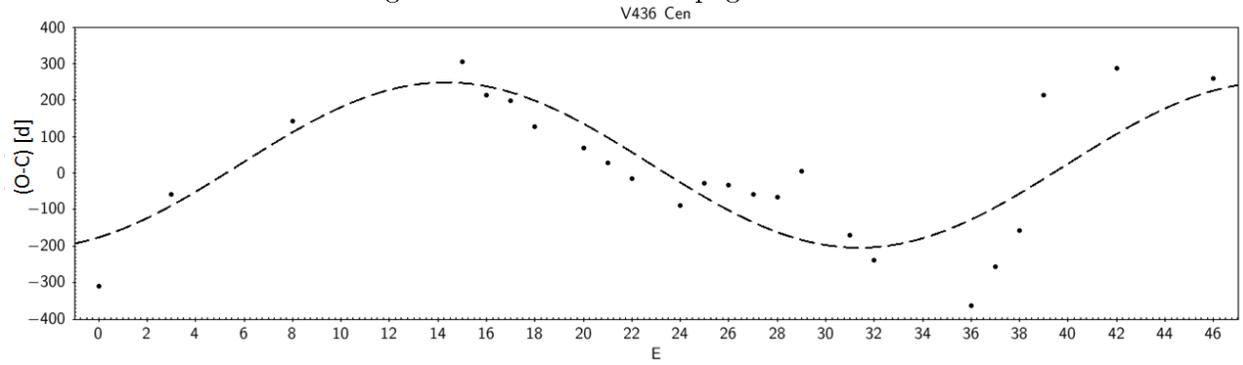


Figura 4.18: Continuación página anterior.

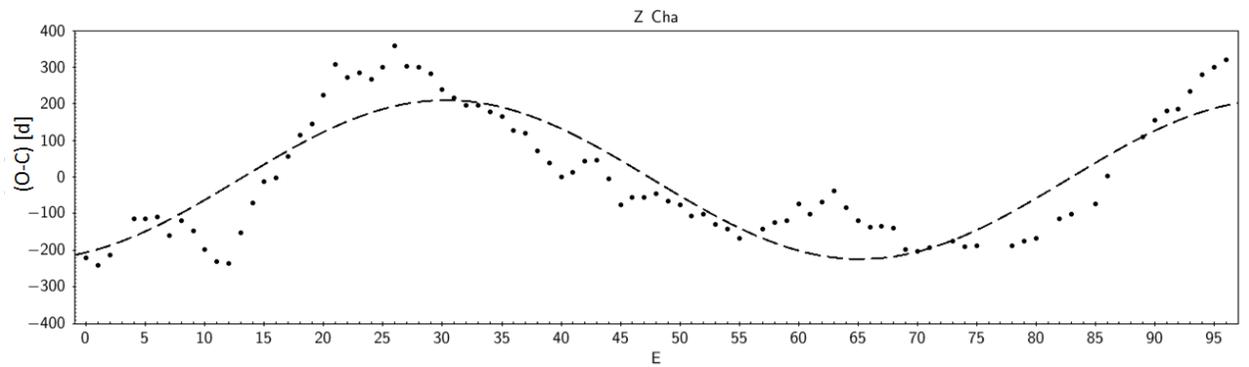
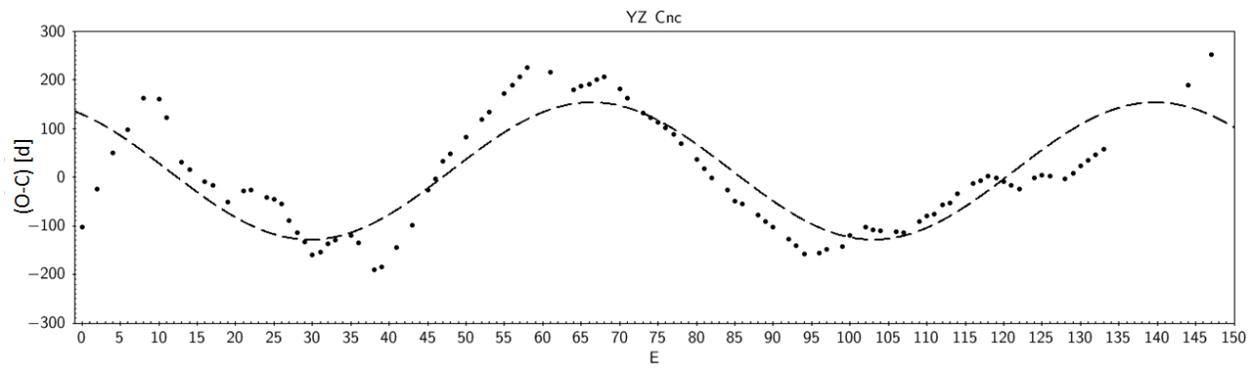
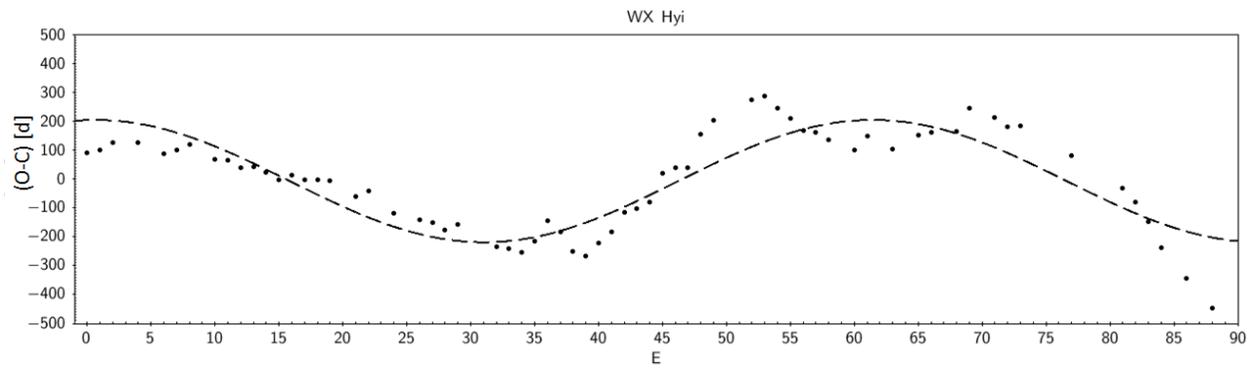
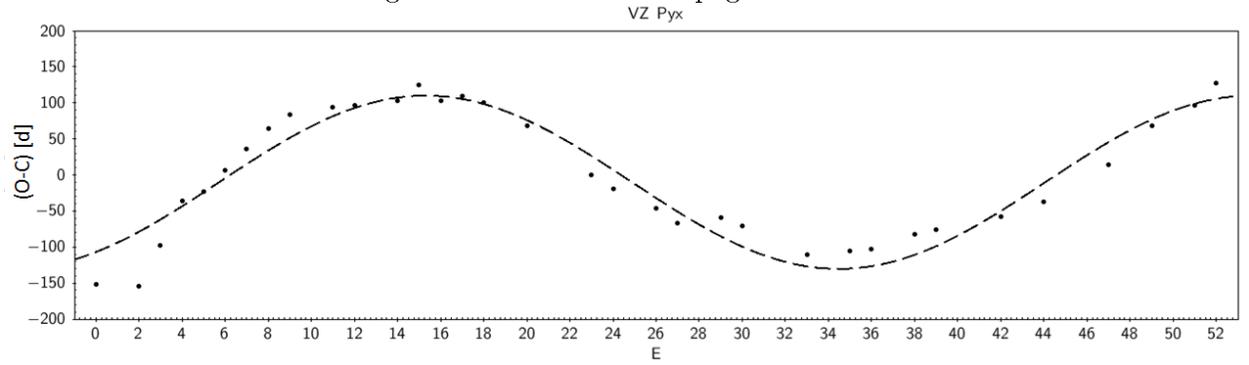


Table 4.4. Resultados de los ajustes de mínimos cuadrados sinusoidales. Se indican fase inicial ( $\phi$ ), semiamplitud, períodos en número de ciclos  $E$ , dispersión del ajuste sinusoidal ( $\sigma_s$ ), cociente de dispersión lineal y sinusoidal ( $\sigma_l/\sigma_s$ ) y finalmente cociente de dispersión parabólica y sinusoidal ( $\sigma_p/\sigma_s$ ).

Nombre	$\phi$ [d]	Semiamp [d]	$\varepsilon$ [E]*	$\sigma_s$ [d]	$P_{SCsin}$ [d]**	r	$\sigma_l/\sigma_s$	$\sigma_p/\sigma_s$
AQ Eri	6.14 ± 1.28	84.79 ± 15.38	28.45 ± 1.79	58.22	8304.56 ± 522.50	0.737558	3.76	1.45
AY Lyr	23.85 ± 1.59	42.43 ± 5.69	44.99 ± 1.03	43.15	9267.94 ± 212.18	0.576935	2.41	1.22
CU Vel	8.24 ± 0.52	233.91 ± 11.87	40.09 ± 0.80	56.64	14672.94 ± 292.8	0.952211	3.28	3.23
CY UMa	3.83 ± 0.59	143.70 ± 18.47	20.44 ± 0.94	59.47	6775.86 ± 311.61	0.875816	2.15	2.02
EK TrA	12.49 ± 0.58	109.46 ± 18.82	17.75 ± 0.78	64.57	9427.03 ± 414.26	0.785710	5.93	1.58
ER UMa	30.96 ± 0.94	22.01 ± 2.09	41.85 ± 0.51	17.84	2062.79 ± 25.14	0.664150	3.07	1.33
FS Aur	12.99 ± 1.60	39.19 ± 4.61	65.08 ± 3.26	18.82	2744.42 ± 137.47	0.826208	6.04	1.75
GX Cas	7.99 ± 0.30	63.00 ± 10.41	9.67 ± 0.34	34.38	3298.44 ± 115.97	0.819085	1.70	1.70
IR Gem	38.64 ± 0.68	160.05 ± 13.78	55.75 ± 1.47	62.38	8234.28 ± 217.12	0.869341	2.11	2.00
OY Car	-3.16 ± 1.09	163.54 ± 16.83	30.56 ± 0.85	83.66	9507.22 ± 264.44	0.817162	2.76	1.72
QZ Vir	7.66 ± 0.44	67.77 ± 13.81	11.27 ± 0.48	44.24	4626.34 ± 197.04	0.758546	3.33	1.49
RZ Sge	8.97 ± 0.59	103.87 ± 10.36	25.67 ± 0.69	41.55	7226.11 ± 194.24	0.871808	2.70	2.01
SU UMa	3.21 ± 1.37	408.20 ± 23.48	76.82 ± 1.43	175.12	17683.96 ± 329.19	0.858806	4.85	1.94
SW UMa	20.63 ± 0.75	153.20 ± 23.91	28.87 ± 1.86	81.72	13285.97 ± 855.97	0.823645	1.69	1.72
TT Boo	16.13 ± 0.74	47.81 ± 8.30	19.52 ± 0.67	40.39	5233.31 ± 179.63	0.660366	1.81	1.32
TU Men	15.76 ± 1.30	164.86 ± 11.84	73.68 ± 1.94	73.28	14028.67 ± 369.38	0.846761	1.86	1.87
TY Psc	41.54 ± 1.84	40.75 ± 9.11	48.79 ± 3.65	49.37	9221.31 ± 689.85	0.520478	1.94	1.16
UV Per	21.92 ± 0.49	227.93 ± 22.06	24.25 ± 0.43	104.12	10027.38 ± 177.81	0.858039	2.43	1.92
V436 Cen	5.79 ± 1.70	226.29 ± 37.71	34.10 ± 2.51	119.14	14543.65 ± 1070.52	0.813288	4.66	1.68
V503 Cyg	30.23 ± 0.59	33.59 ± 1.85	57.34 ± 0.69	10.46	5065.42 ± 60.95	0.905899	2.45	2.34
V1159 Ori	-7.60 ± 2.83	13.36 ± 2.55	43.02 ± 1.21	18.59	1966.87 ± 55.32	0.463758	1.12	1.12
VW Hyi	11.57 ± 1.17	69.86 ± 4.63	68.67 ± 1.30	34.69	12477.34 ± 236.21	0.811107	2.41	1.70
VZ Pyx	5.71 ± 0.46	120.12 ± 6.64	38.33 ± 0.78	26.09	4921.57 ± 100.15	0.958230	3.62	3.44
WX Hyi	46.23 ± 0.66	211.36 ± 14.61	60.74 ± 1.67	81.16	11078.98 ± 304.608	0.882032	4.29	2.11
YZ Cnc	48.00 ± 0.82	141.02 ± 8.94	73.32 ± 1.33	60.97	8637.10 ± 156.67	0.850197	6.41	1.89
Z Cha	12.85 ± 1.02	216.95 ± 13.69	69.75 ± 1.68	87.50	15965.78 ± 384.55	0.869131	4.23	2.01

Note. —

(\*) Superciclo dado en número de ciclos  $E$ .

(\*\*) Período y su error obtenido a partir de  $\varepsilon^* \bar{P}_{SC}$  (relación 3.6)

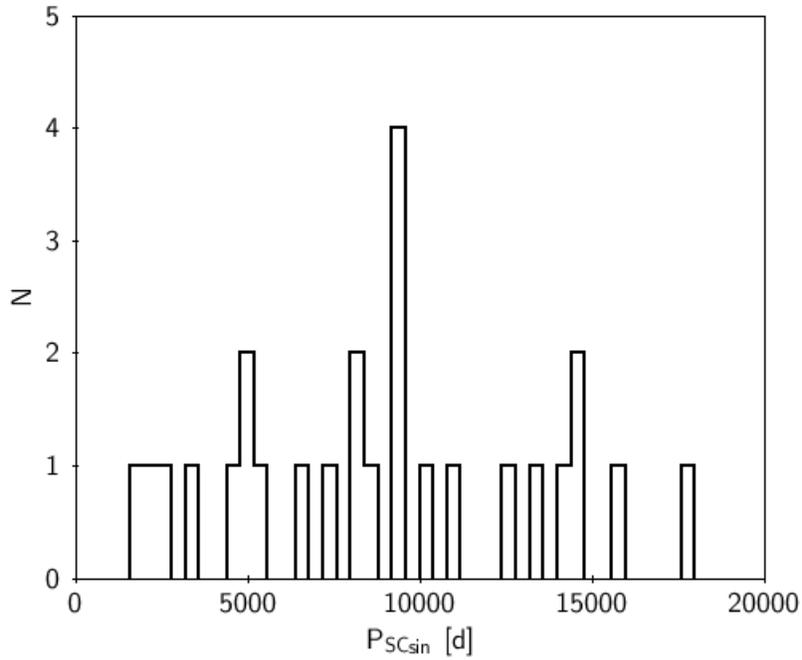


Figura 4.19: Distribución de los superciclos sinusoidales ( $P_{SCsin}$ ) con bin=400 días. Se observa un peak alrededor de los 9000[d]( $\sim 24.7$  años).

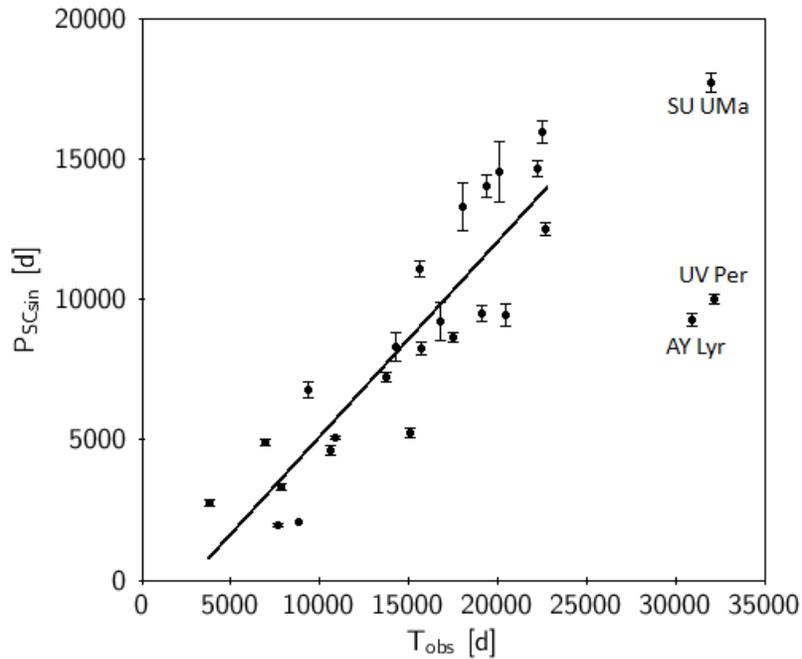


Figura 4.20: Relación de superciclo sinusoidal ( $P_{SCsin}$ ) y tiempo de observación ( $T_{obs}$ ). La línea sólida señala un ajuste lineal, descartando los casos señalados que poseen  $T_{obs}$  sobre los 25000 días ( $\sim 68.5$  años), con una pendiente  $0.69 \pm 0.07$  y coeficiente de correlación  $r=0.898$ . Ver discusión en el texto sobre la restricción de estos resultados.

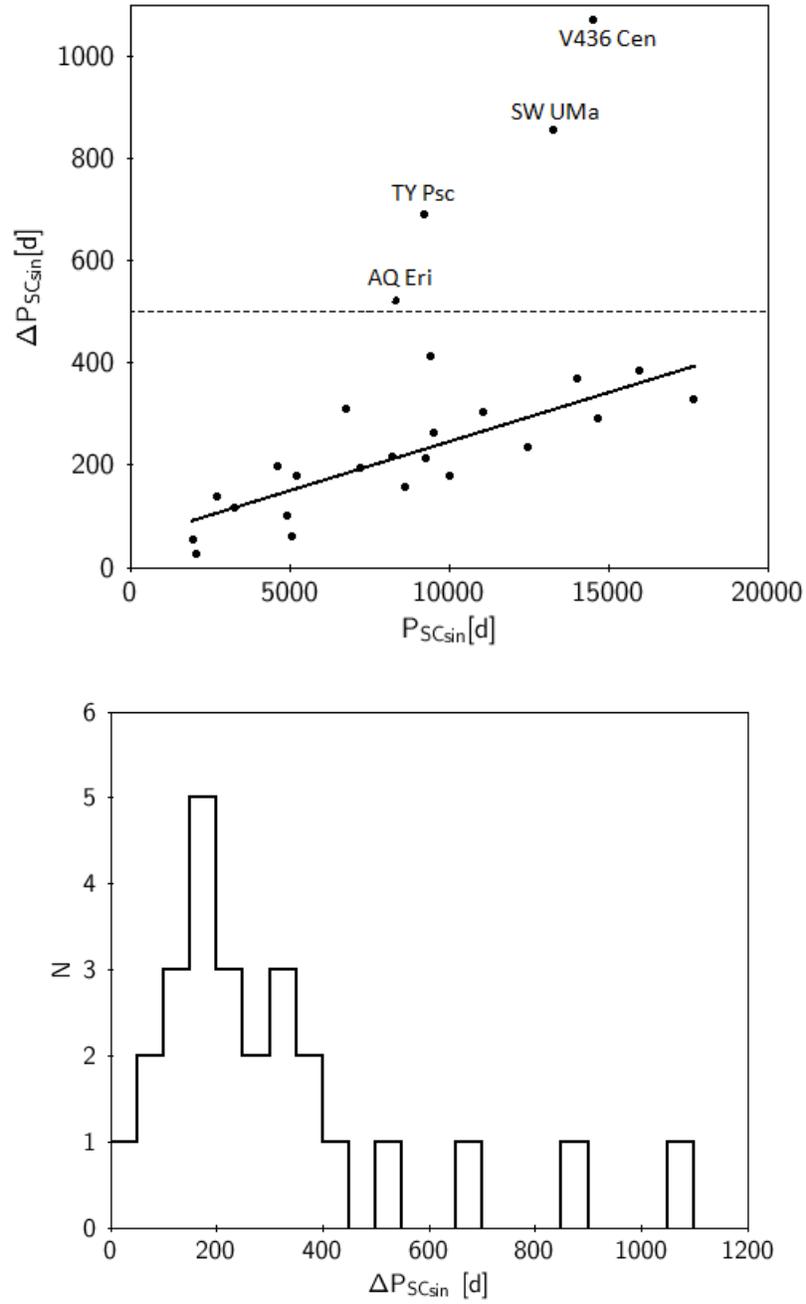


Figura 4.21: **Arriba:** Comparación entre los superciclos sinusoidales ( $P_{SCsin}$ ) y sus errores estándar ( $\Delta P_{SCsin}$ ). Se observa que para  $\Delta P_{SCsin} < 500$  días existe una relación directa. Con lo anterior, la línea sólida señala un ajuste lineal de mínimos cuadrados (con  $r=0.796$  y pendiente  $0.019 \pm 0.003$ ). Los 4 casos descartados con errores más grandes pueden deberse a que no se observaron supererupciones en algunos intervalos de tiempo. **Abajo:** Distribución de los errores de los ajustes sinusoidales, con  $\text{bin}=50$  días. Se observa un peak  $\sim 175$  días y que alrededor del 90% de los casos los errores son menores 420 días.

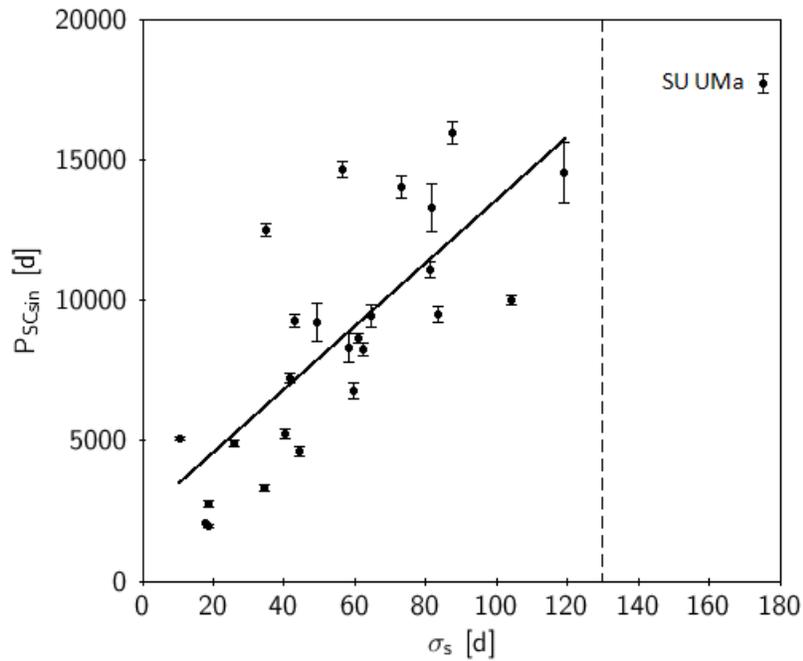


Figura 4.22: Relación entre el superciclo sinusoidal y la dispersión de datos  $\sigma_s$ , la línea sólida señala un ajuste lineal con pendiente  $0.0051 \pm 0.0009$  y coeficiente de correlación  $r=0.758$ , donde fue descartado el caso de la prototipo SU UMa ya que tiene  $\sigma_s > 130$  días.

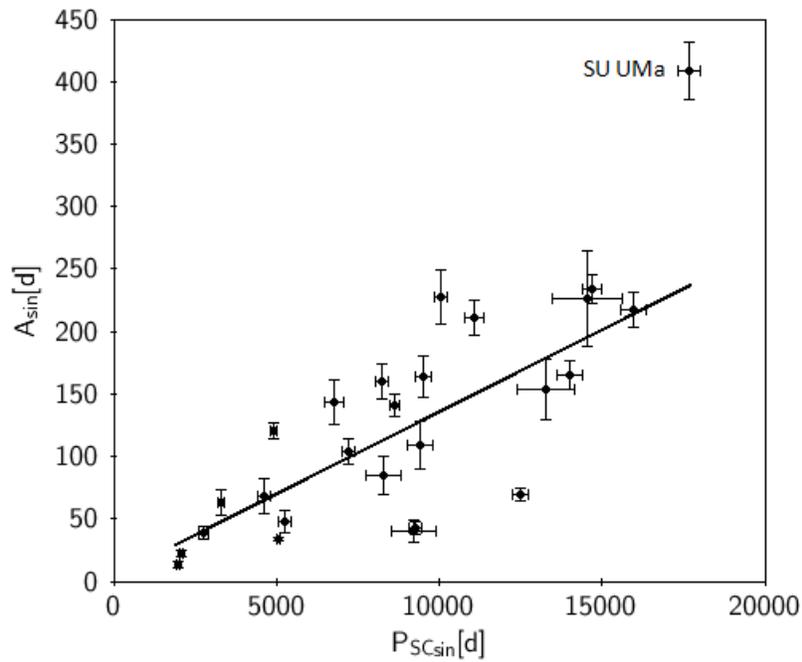


Figura 4.23: Superciclo sinusoidal versus semiamplitud donde se destaca el caso extremo para la prototipo SU UMa. De esta forma, descartando este caso la línea sólida señala un ajuste lineal con pendiente  $0.013 \pm 0.002$  y coeficiente de correlación  $r=0.758$ .

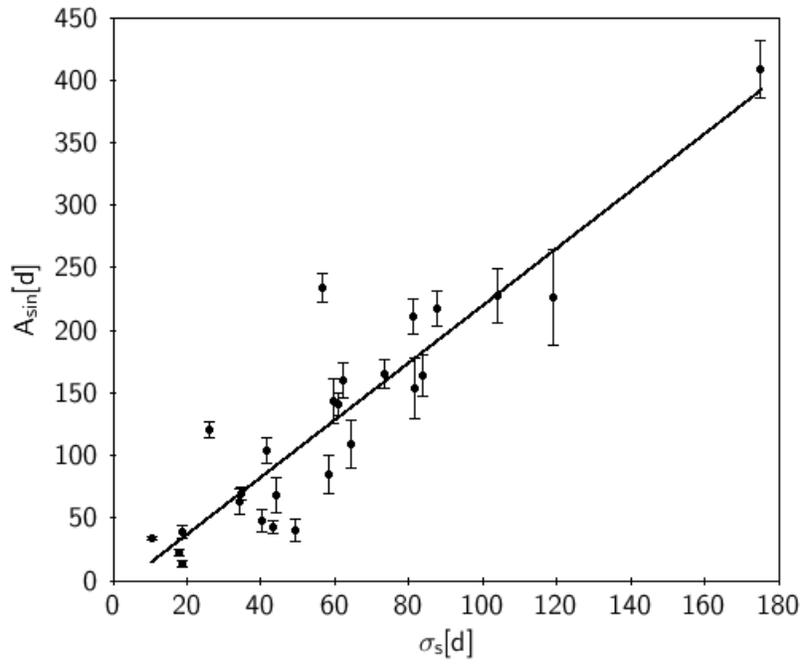


Figura 4.24: Relación entre dispersión de datos sinusoidales ( $\sigma_s$ ) y las semiamplitudes ( $A_{sin}$ ) donde se encuentra una fuerte correlación  $r=0.911$  y pendiente  $2.29 \pm 0.21$ . El caso extremo corresponde a la prototipo SU UMa.

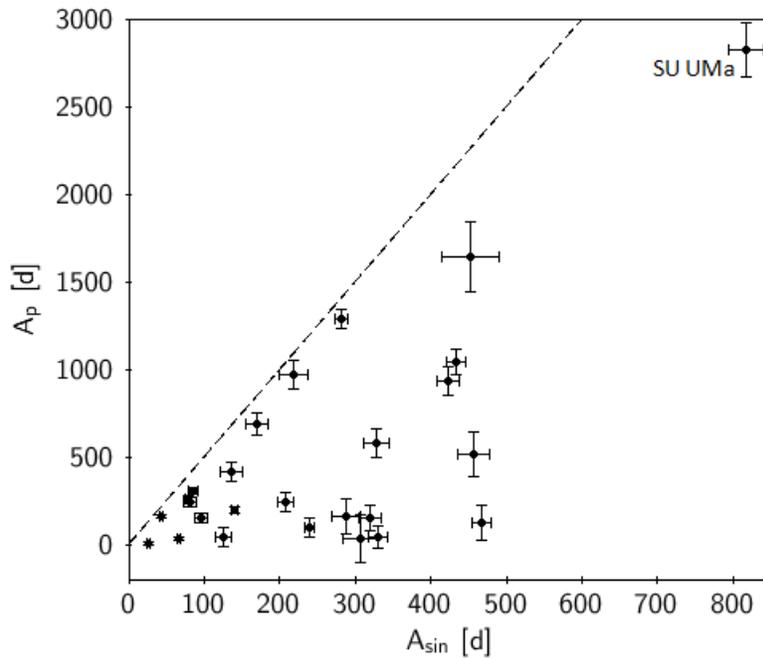


Figura 4.25: Se muestra la relación entre las 'amplitudes' parabólica y sinusoidal donde es posible notar el caso extremo de la prototipo SU UMa. Además, se observa que la mayor parte de los casos se encuentran agrupados en un 'triángulo' con cortes claros en  $A_{sin} \sim 500$  días y  $A_p \sim 1640$ [d], correspondientes a 1.4 y 4.5 años respectivamente. Además, todos los valores están bajo una recta (línea a trazos) de pendiente 5.

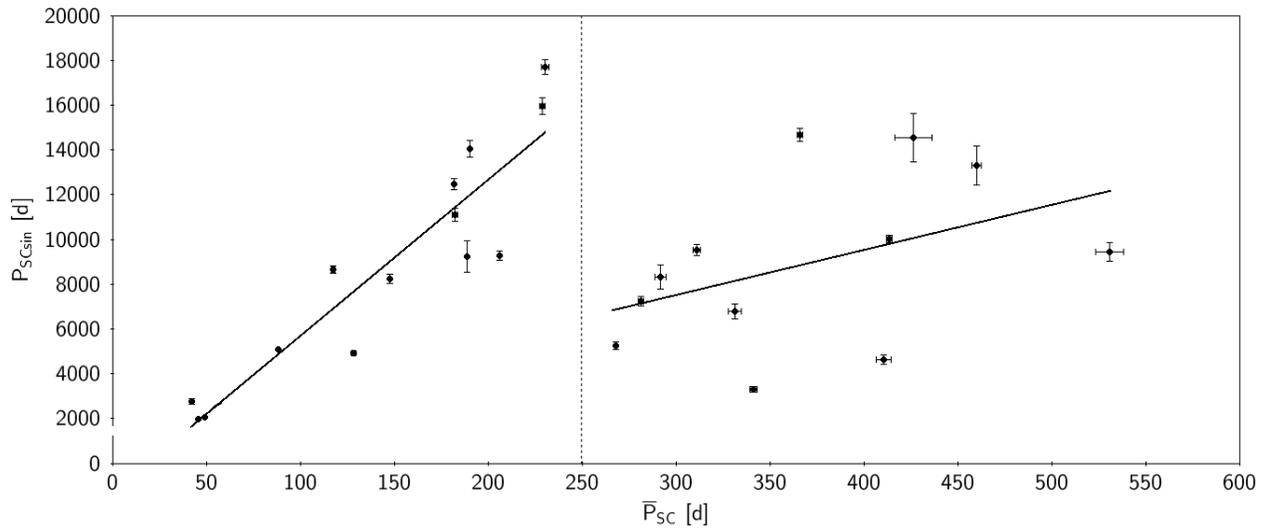


Figura 4.26: Relación entre superciclo promedio ( $\bar{P}_{SC}$ ) y superciclo sinusoidal ( $P_{SCsin}$ ). Se destaca el corte alrededor de  $\bar{P}_{SC}$  250[d] donde para superciclos menores a este límite se encuentra una correlación directa ( $r=0.923$ ).

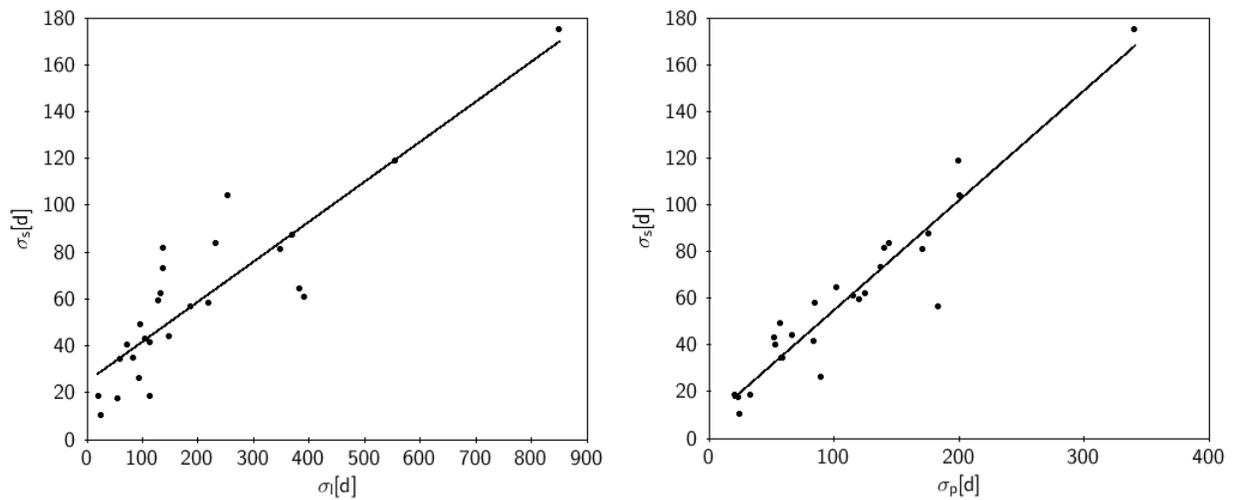


Figura 4.27: Relación de las desviaciones estándar a partir de los diferentes ajustes realizados. **Izquierda:**  $\sigma_l$  vs  $\sigma_s$ . **Derecha:**  $\sigma_p$  vs  $\sigma_s$ . Las líneas sólidas señalan ajustes lineales con correlaciones  $r=0.883$  y  $r=0.948$  respectivamente. Cabe destacar que el valor extremo para ambas gráficas corresponde a la prototipo SU UMA.

## 4.5. Superciclos a mediano plazo - nuevos ajustes

Como ya se mencionó en subsección 3.2.4, los residuos O-C parabólicos podrían mostrar oscilaciones sinusoidales de manera artificial para todos los casos. Es por esto que se realizó un nuevo ajuste sinusoidal utilizando los residuos O-C lineales. Con lo anterior, se pudieron encontrar variaciones a mediano plazo para 16 casos, donde el criterio principal fue que se cubrieran todas las fases de la oscilación con el fin de confirmar dicha variación, ver Figura 4.28.

Los nuevos resultados de los ajustes (ver Tabla 4.5) muestran que los  $P_{SCsin2}$  son más altos que  $P_{SCsin}$ , ver Figura 4.29 que muestra la relación entre ambos superciclos sinusoidales, donde un ajuste lineal muestra una correlación  $r=0.899$  y pendiente  $1.24 \pm 0.16$ . Los  $P_{SCsin2}$  van desde los 2006 hasta a los 21386 días, o  $\sim 5.5$  a  $\sim 58.6$  años respectivamente, con un valor medio de 10666 días y mediana de 10306 días. Con respecto a la razón entre ambos superciclos sinusoidales, es decir  $P_{SCsin}/P_{SCsin2}$  (ver Figura 4.30) se encuentra que 9 casos muestran períodos similares con valores desde 0.9 a 1.1 de los cuales 7 tienen una baja significancia ( $|a/\Delta a| < 3$ ) en sus ajustes parabólicos. En cambio, hay 6 casos con  $|a/\Delta a| > 3$  y que indican superciclos ( $P_{SCsin2}$ ) con períodos más largos a los  $P_{SCsin}$  y con amplitudes mayores, estos objetos están señalados en Figura 4.30. En consecuencia, si se comparan los nuevos ajustes sinusoidales con los ajustes parabólicos (Figura 4.13) se encuentra que para estos 6 casos el nuevo ajuste sinusoidal prácticamente reemplaza a la parábola, y por lo tanto se obtiene una mayor amplitud. Por otra parte, la razón entre las dispersiones  $\sigma_{s1}/\sigma_{s2}$  son en promedio 0.81 con un máximo de 1.07, revelando que en general las dispersiones son mayores para los segundos ajustes, algo que se espera ya que los residuos lineales son mayores a los parabólicos.

Si se comparan estos nuevos períodos con los superciclos promedio general se obtiene un resultado similar en torno a  $\bar{P}_{SC} \simeq 250[d]$  como fue observado en Figura 4.26. De esta forma, la Figura 4.31 se encuentra para  $\bar{P}_{SC}$  menores a 250[d] una relación directa con coeficiente de correlación  $r=0.951$  (ligeramente mayor que en el caso de Figura 4.26) y pendiente  $106.5 \pm 14.1$ . Sin embargo, para  $\bar{P}_{SC} > 250$  días el resultado es muy distinto ya que no hay ninguna correlación ( $r=0.026$ , mucho más baja que en Figura 4.26) y donde la pendiente es  $2.71 \pm 42.38$ .

Finalmente, la Tabla 4.6 presenta un resumen con todos los ajustes de mínimos cuadrados lineales entre los diferentes parámetros utilizados y mencionados en este capítulo. En consecuencia, se muestra las variables dependientes e independientes, X e Y respectivamente junto con los rangos utilizados, además de los valores de pendiente, dispersión de los ajustes ( $\sigma$ ), coeficientes de correlación ( $r$ ) y figuras de referencia. Es necesario recalcar que no se encontró ningún tipo de correlación entre los parámetros señalados en este capítulo con los períodos orbitales de la muestra.

Figura 4.28: Residuos O-C vs número de ciclos  $E$  de las supererupciones luego de un ajuste lineal de mínimos cuadrados. Las líneas a trazos se refieren a los ajustes de períodos sinusoidales (detalles en Tabla 4.5).

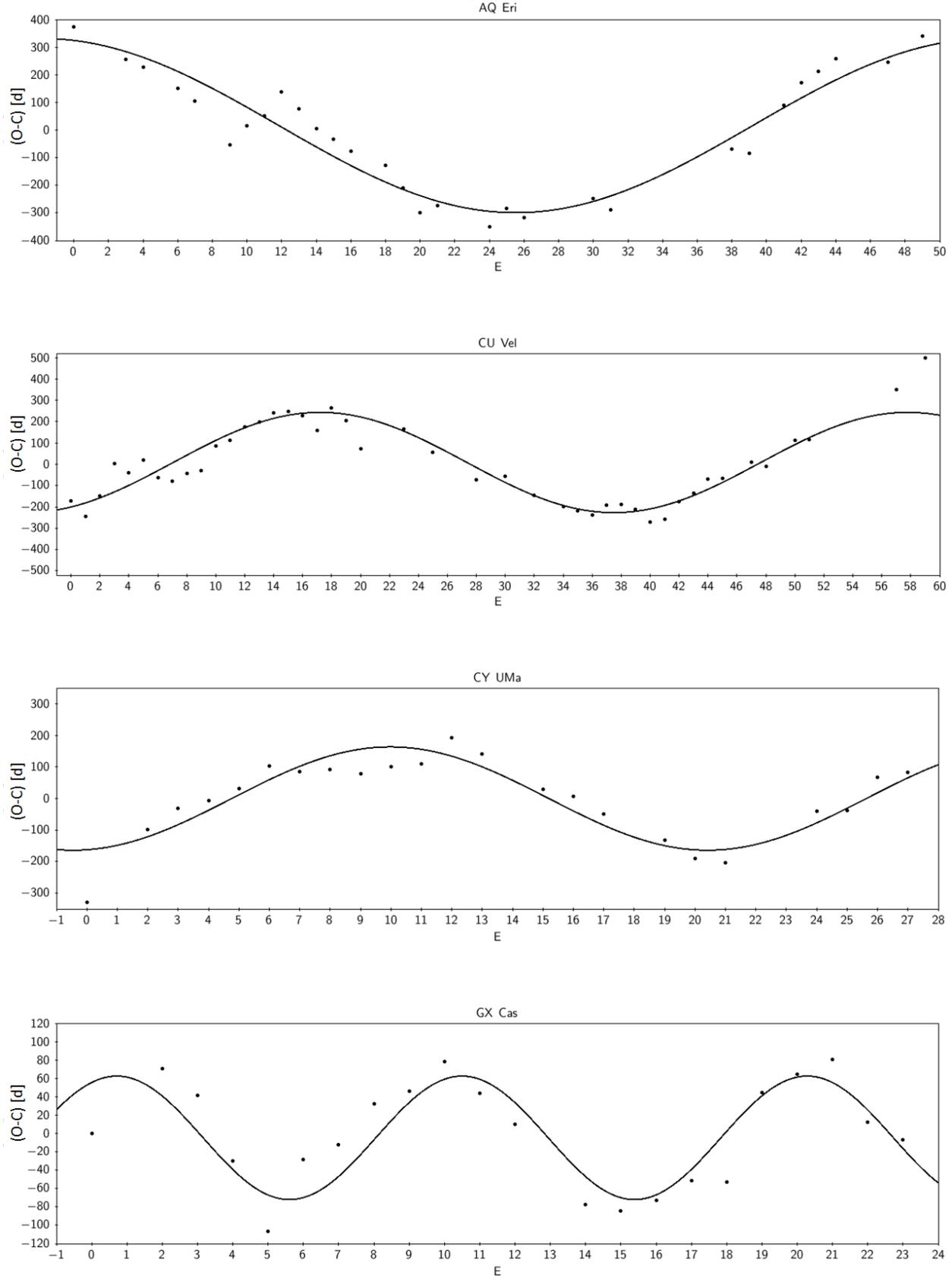


Figura 4.28: Continuación página anterior.

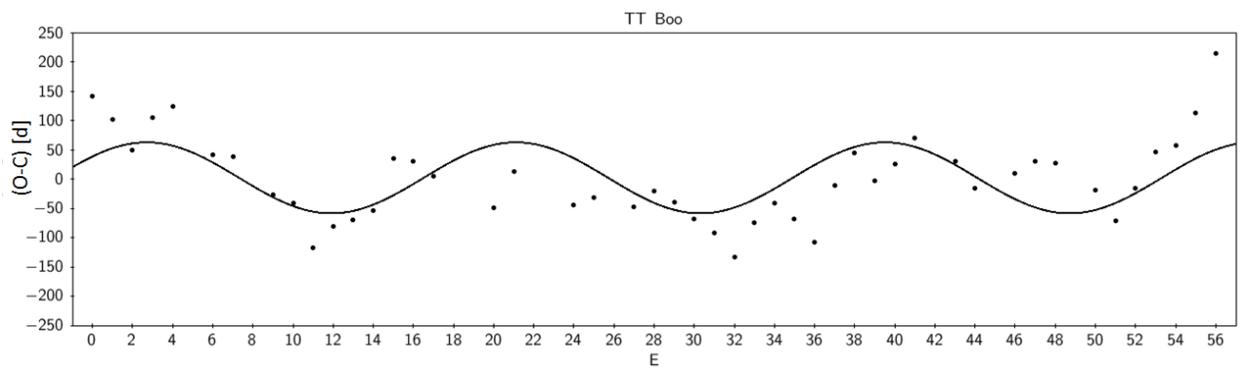
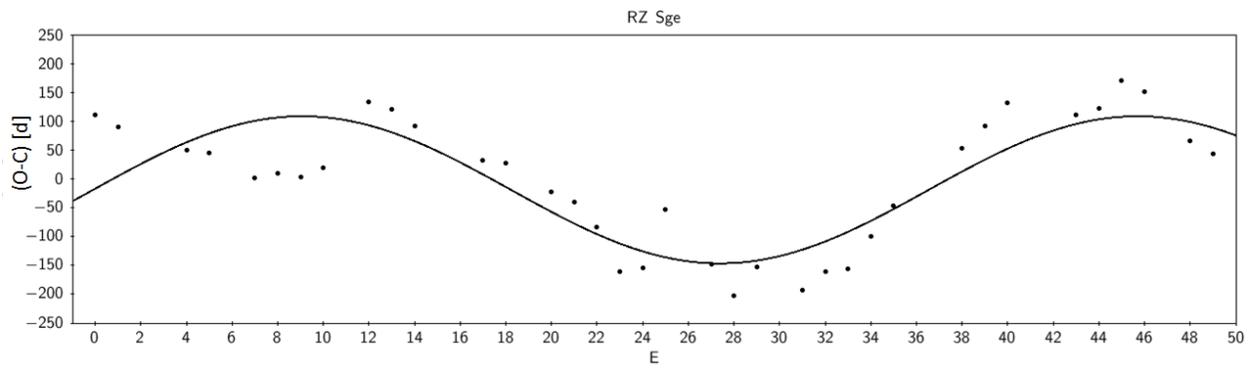
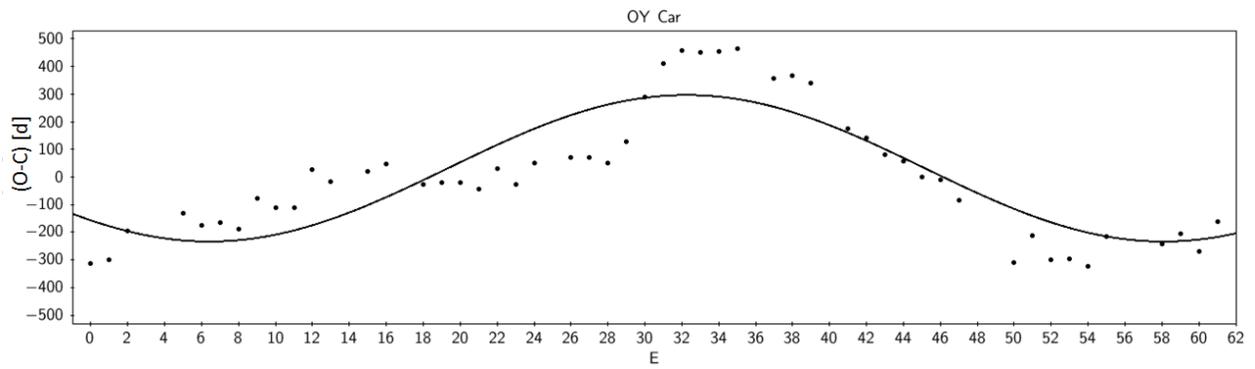
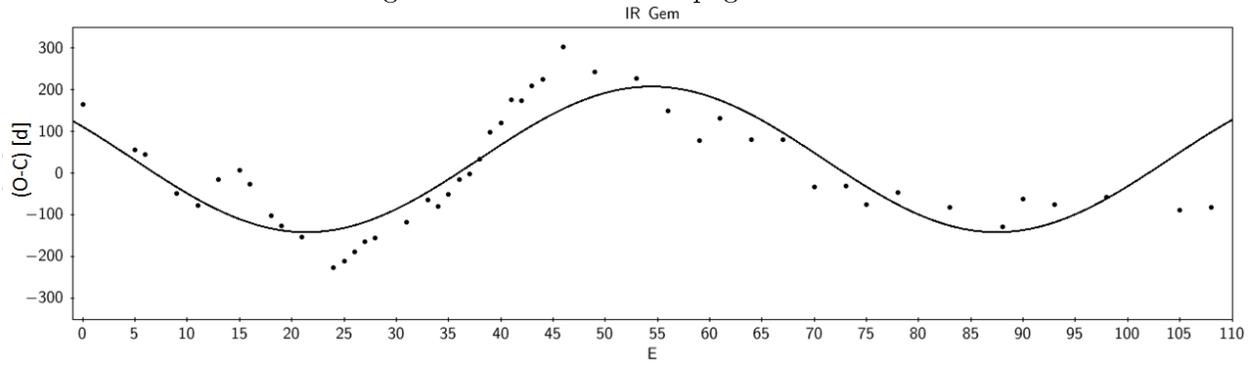


Figura 4.28: Continuación página anterior.

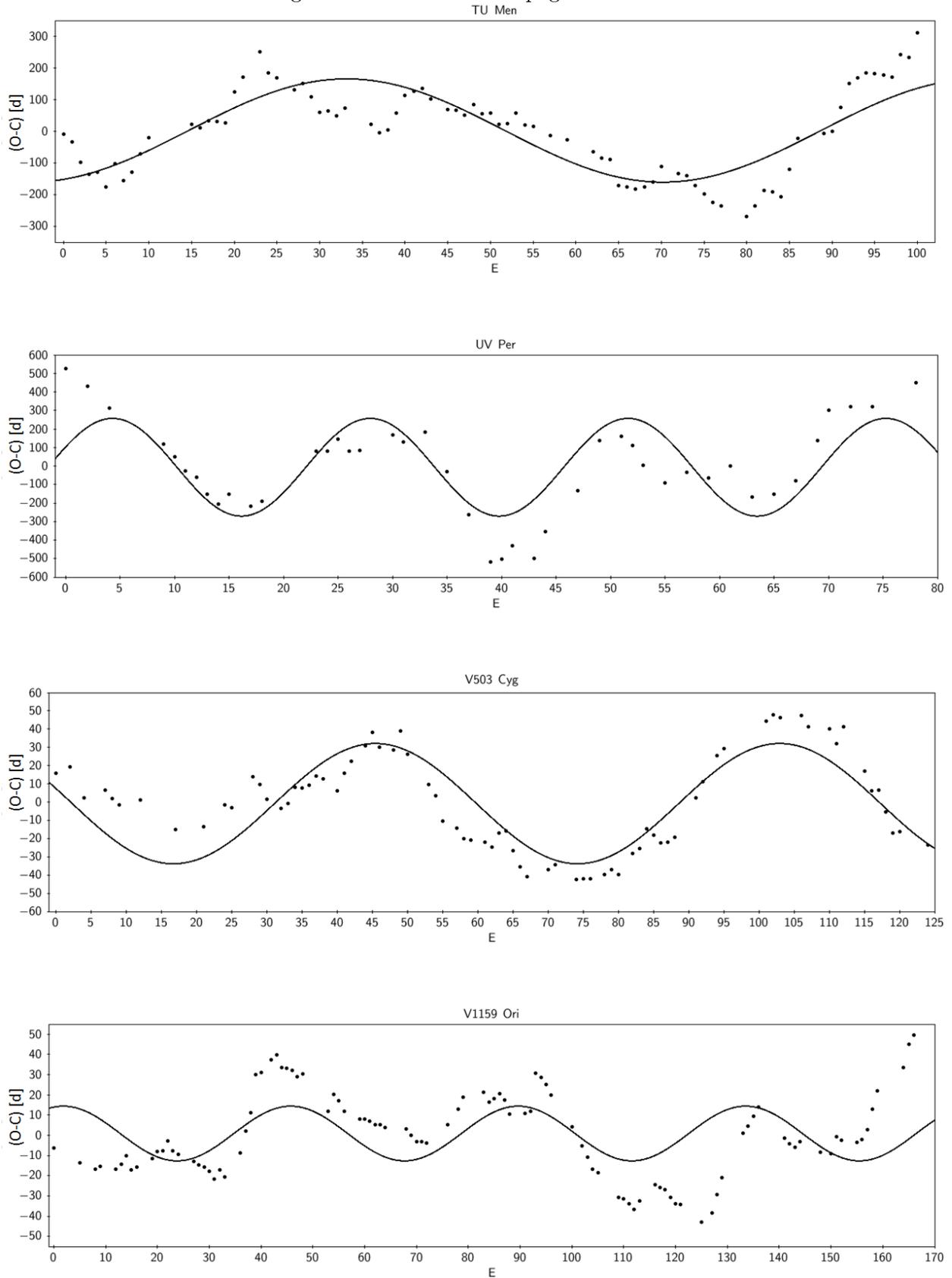


Figura 4.28: Continuación página anterior.

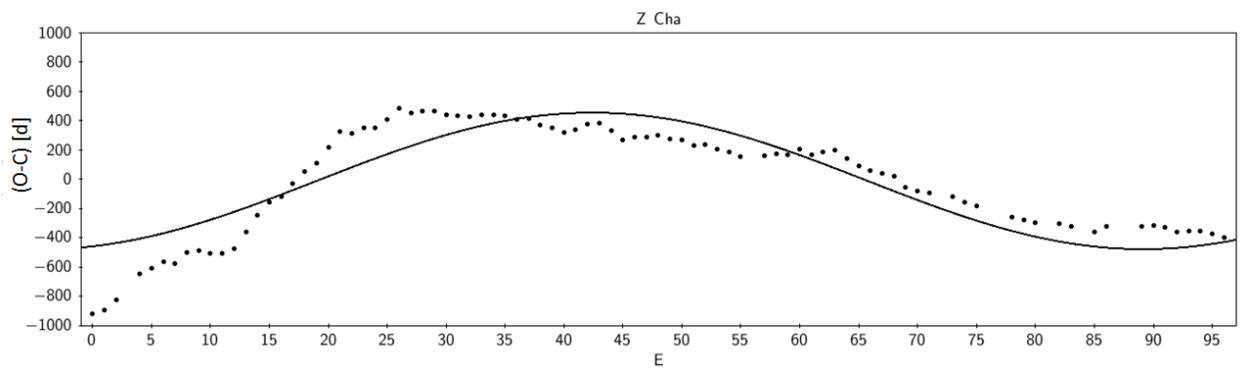
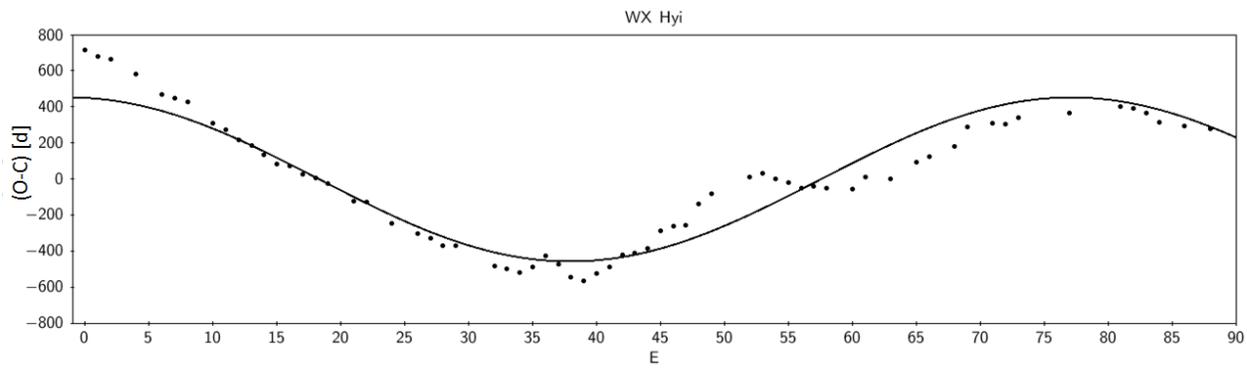
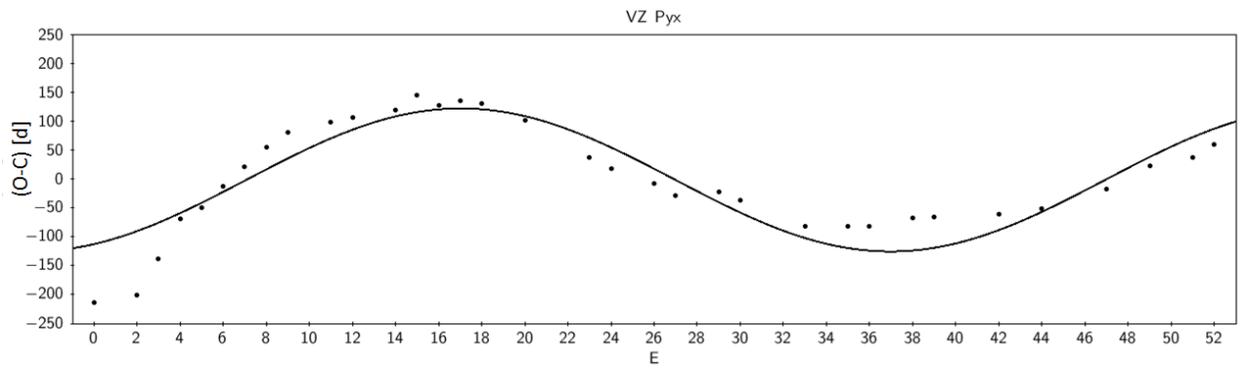
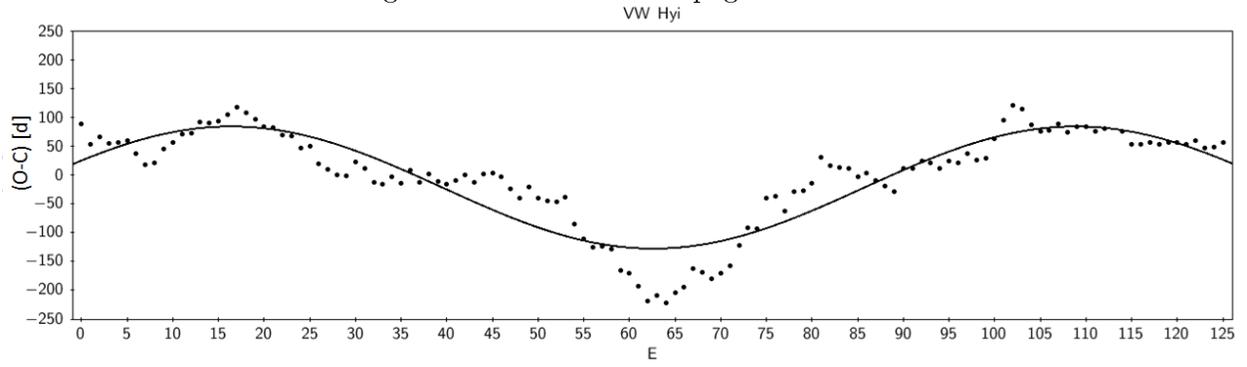


Table 4.5. Resultados de los ajustes de mínimos cuadrados sinusoidales a partir de los residuos O-C de los ajustes lineales. Se indican fase inicial ( $\phi$ ), semiamplitud, períodos en número de ciclos  $E$ , dispersión del ajuste sinusoidal ( $\sigma_s$ ), período sinusoidal en días, coeficiente de correlación y cociente entre los ajustes sinusoidales.

Nombre	$\phi_2$ [d]	Semiamp <sub>2</sub> [d]	$\varepsilon_2$ [E]*	$\sigma_{s2}$ [d]	P <sub>SCsin2</sub> [d]**	r	$\frac{P_{SCsin}}{P_{SCsin2}}$	$\frac{\sigma_s}{\sigma_{s2}}$
AQ Eri	39.20 ± 1.46	315.01 ± 31.23	54.68 ± 5.44	69.55	15961.09 ± 1587.94	0.952	0.52	0.84
CU Vel	7.06 ± 0.64	234.99 ± 14.75	40.56 ± 0.98	70.15	14844.96 ± 358.68	0.930	0.99	0.81
CY UMa	4.76 ± 0.51	163.59 ± 18.10	20.86 ± 0.82	58.28	6915.09 ± 271.83	0.902	0.98	1.02
GX Cas	86.33 ± 2.33	67.19 ± 10.68	9.78 ± 0.31	31.86	3335.96 ± 105.74	0.855	0.99	1.08
IR Gem	37.91 ± 0.85	174.46 ± 16.18	66.04 ± 1.90	70.54	9754.11 ± 280.63	0.852	0.84	0.88
OY Car	19.33 ± 1.02	265.04 ± 22.31	51.64 ± 3.07	117.52	16065.20 ± 955.08	0.867	0.59	0.71
RZ Sge	-0.09 ± 1.37	127.53 ± 14.02	36.61 ± 1.89	60.80	10305.72 ± 532.04	0.851	0.70	0.68
TT Boo	16.52 ± 0.78	60.55 ± 12.15	18.39 ± 0.67	59.44	4930.36 ± 179.63	0.606	1.06	0.68
TU Men	14.65 ± 1.38	162.98 ± 12.52	74.01 ± 2.07	77.05	12062.15 ± 337.37	0.830	1.00	0.95
UV Per	-1.63 ± 1.05	263.79 ± 35.65	23.65 ± 0.55	166.66	9779.28 ± 227.43	0.766	1.03	0.62
V503 Cyg	31.11 ± 0.78	32.96 ± 2.47	57.45 ± 0.94	13.96	5075.13 ± 83.04	0.843	1.00	0.75
V1159 Ori	-9.13 ± 2.89	13.53 ± 2.54	43.87 ± 1.25	18.55	2005.73 ± 57.15	0.471	0.98	1.00
VW Hyi	-6.74 ± 1.57	105.80 ± 4.74	92.42 ± 1.90	36.71	16792.71 ± 345.23	0.900	0.74	0.94
VZ Pyx	7.06 ± 0.72	123.62 ± 10.65	39.85 ± 1.21	41.09	5116.74 ± 155.36	0.907	0.96	0.63
WX Hyi	-20.86 ± 1.77	454.81 ± 18.47	78.34 ± 2.15	106.25	14289.22 ± 392.16	0.954	0.78	0.76
Z Cha	19.02 ± 1.40	466.01 ± 25.50	93.43 ± 4.46	163.73	21386.13 ± 1020.89	0.899	0.75	0.53

Note. —

(\*) Superciclo dado en número de ciclos  $E$ .

(\*\*) Período y su error obtenido a partir de  $\varepsilon^* \bar{P}_{SC}$  (relación 3.6)

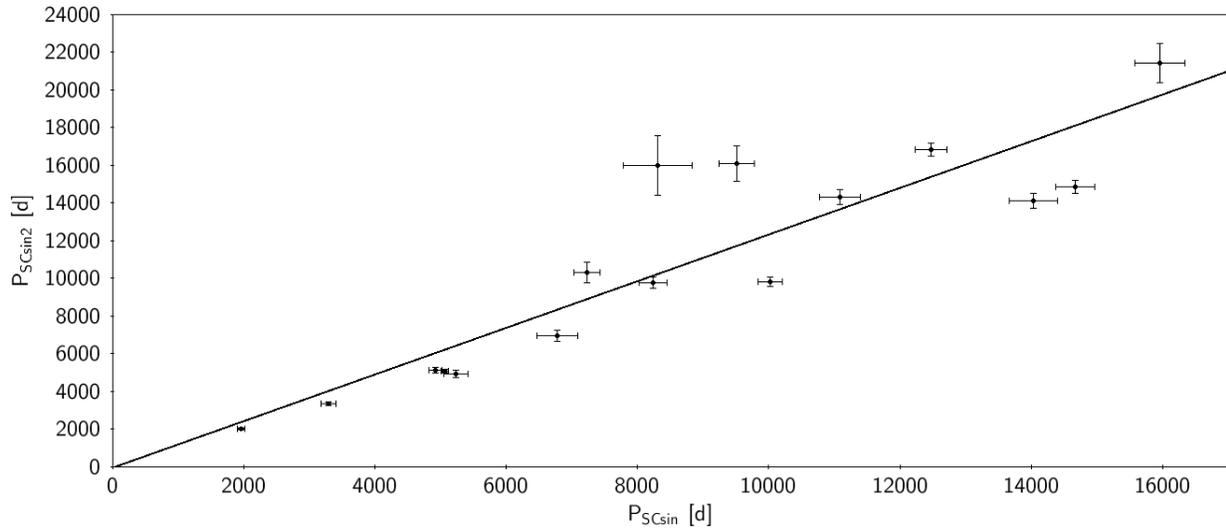


Figura 4.29: Relación entre el primer y segundo ajuste sinusoidal de mínimos cuadrados,  $P_{SCsin}$  y  $P_{SCsin2}$  respectivamente para 16 casos. La correlación lineal indica una pendiente  $1.24 \pm 0.16$  y coeficiente de correlación  $r=0.899$ . De esta forma, se observa que los superciclos  $P_{SCsin2}$  son mayores a  $P_{SCsin}$ .

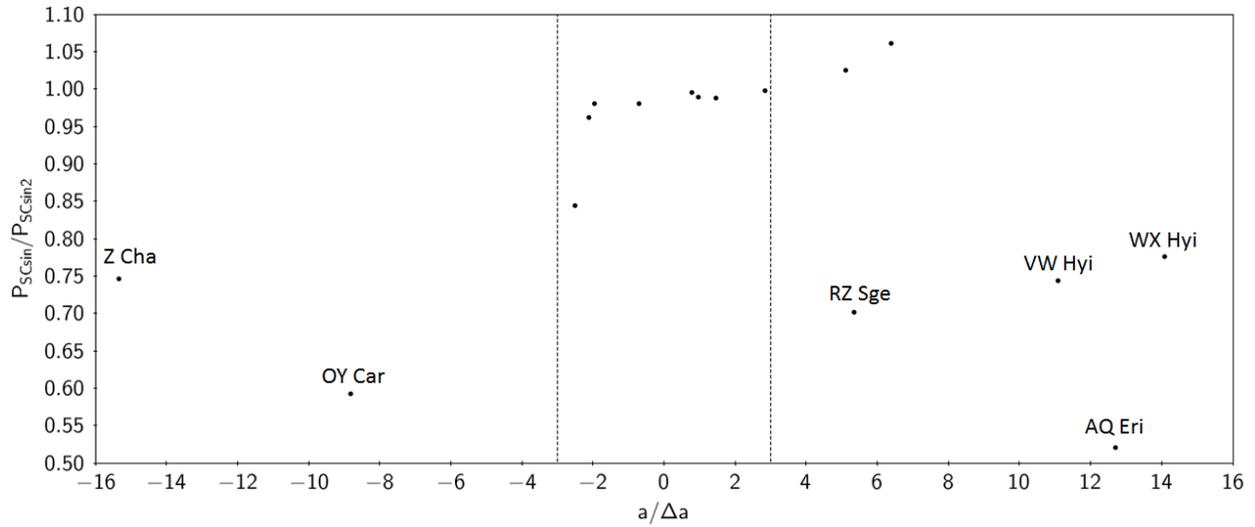


Figura 4.30: Relación entre la significancia de los ajustes parabólicos ( $a/\Delta a$ ) y la razón entre los ajustes sinusoidales  $P_{SCsin}$  y  $P_{SCsin2}$ . Se encuentra que 9 casos poseen superciclos sinusoidales muy similares  $\simeq 1$  y 6 casos con  $|a/\Delta a| > 3$  presentan periodos y amplitudes más grandes ya que los nuevos ajustes sinusoidales vienen a reemplazar al anterior ajuste parabólico.

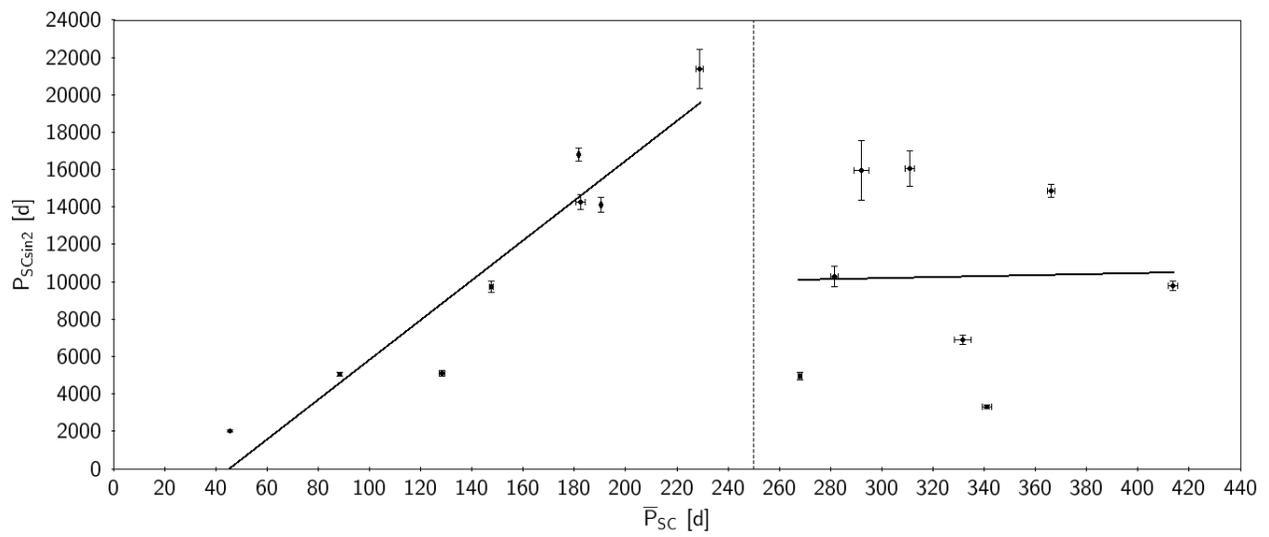


Figura 4.31: Relación entre el nuevo ajuste sinusoidal con los superciclos promedio para los 16 casos. Se encuentra un resultado similar a Figura 4.26, ya que para  $\bar{P}_{SC} < 250$ [d] existe una fuerte correlación ( $r=0.951$  y pendiente  $106.49 \pm 14.08$ ). Sin embargo, para  $\bar{P}_{SC} > 250$ [d] no existe correlación ( $r=0.026$ ).

Table 4.6. Resumen de los resultados de ajustes de mínimos cuadrados lineales entre distintos parámetros obtenidos en este capítulo. Se indican las variables independientes (X) y dependientes (Y), junto con los valores de pendiente y dispersión de los datos ( $\sigma$ ), coeficientes de correlación ( $r$ ) y figura de referencia.

X	Y	Pendiente	$\sigma$	$r$	Figura
$N_{SC}$	$E_{max}$	$1.16 \pm 0.09$	17.12	0.931	4.2
$\bar{P}_{SC}[d]$	$E_{max}$	$-0.25 \pm 0.05$	31.11	0.747	4.2
$\bar{P}_{SC}[d] (<250)$	$T_{obs}[d]$	$109.39 \pm 18.98$	4594.91	0.857	4.3
$\bar{P}_{SC}[d] (>250)$	$T_{obs}[d]$	$33.03 \pm 24.12$	6424.72	0.397	4.3
$\bar{P}_{SC}[d]$	$\sigma_l[d] (<300)$	$0.31 \pm 0.09$	51.33	0.623	4.4
$\bar{P}_{SC}[d]$	$\Delta\bar{P}_{SC}$	$0.0065 \pm 0.0012$	0.699	0.754	4.4
$\sigma/\bar{P}_{SC}[d]$	$r (>0.995)$	$-0.0014 \pm 0.0002$	0.0011	0.781	4.5
$E_{max}$	N° de superciclos	$0.031 \pm 0.005$	1.000	0.816	4.8
$P_{SC}[d]$	$\Delta P_{SC}[d] (<10)$	$0.016 \pm 0.001$	1.932	0.746	4.10
$\sigma_p[d]$	$A_p[d]  A_p/\Delta A_p  >3$	$7.48 \pm 1.05$	342.26	0.879	4.15
$P_{SC,0}[d]$	$\Delta P_{SC,0}[d] (<8)$	$0.016 \pm 0.002$	1.287	0.845	4.16
$P_{SC,0}[d]$	$\sigma_p[d] (<210)$	$0.21 \pm 0.08$	50.85	0.483	4.16
$\sigma_l[d]$	$\sigma_p[d]$	$0.33 \pm 0.04$	39.47	0.848	4.17
$T_{obs}[d](<25000)$	$P_{SCsin}[d]$	$0.69 \pm 0.07$	1942.32	0.898	4.20
$P_{SCsin}[d]$	$\Delta P_{SCsin}[d]$	$0.019 \pm 0.003$	68.092	0.796	4.21
$\sigma_s[d] (<130)$	$P_{SCsin}[d]$	$112.35 \pm 20.16$	2756.80	0.758	4.22
$P_{SCsin}[d]$	$A_{sin}[d] (<300)$	$0.013 \pm 0.002$	47.813	0.758	4.23
$\sigma_s[d]$	$A_{sin}[d]$	$2.29 \pm 0.21$	38.20	0.911	4.24
$\bar{P}_{SC}[d] (<250)$	$P_{SCsin}[d]$	$69.77 \pm 8.40$	2033.37	0.923	4.26
$\bar{P}_{SC}[d] (>250)$	$P_{SCsin}[d]$	$20.14 \pm 13.45$	3582.11	0.428	4.26
$\sigma_l[d]$	$\sigma_s[d]$	$0.17 \pm 0.02$	17.30	0.883	4.27
$\sigma_p[d]$	$\sigma_s[d]$	$0.47 \pm 0.03$	11.71	0.948	4.27
$P_{SCsin}[d]$	$P_{SCsin2}[d]$	$1.24 \pm 0.16$	2588.81	0.899	4.29
$\bar{P}_{SC}[d] (<250)$	$P_{SCsin2}[d]$	$106.49 \pm 14.08$	2228.48	0.951	4.31
$\bar{P}_{SC}[d] (>250)$	$P_{SCsin2}[d]$	$2.71 \pm 42.38$	5398.67	0.026	4.31

## Capítulo 5

# Comparación con la literatura y discusión

### 5.1. Promedio de los superciclos y sus variaciones a corto plazo

En el capítulo anterior se mostró evidencia de los distintos tipos de variaciones de los superciclos y que se observan en diferentes escalas de tiempo. De esta manera, este trabajo presenta un estudio en detalle de estas variaciones y posibles correlaciones para los distintos parámetros utilizados. En Tabla 4.5 se muestran los resultados de los ajustes de mínimos cuadrados lineales entre algunos de ellos. En particular, cabe destacar la relación entre los valores del promedio general de superciclo ( $\bar{P}_{SC}$ ) y los períodos sinusoidales debido a variaciones a mediano plazo ( $P_{SCsin}$ ) y que presenta una división alrededor de  $\bar{P}_{SC}=250$  días, ver Figura 4.26. En consecuencia, para los casos con  $\bar{P}_{SC}<250$ [d] existe una alta correlación ( $r=0.923$ ) entre los parámetros. Sin embargo, se da la misma relación entre los superciclo promedio general (menores a 250 días) y el tiempo total de observación ( $T_{obs}$ ), ver Figura 4.3, donde un ajuste lineal entrega una pendiente= $109.4 \pm 19.0$ , coeficiente de correlación  $r=0.857$  y  $\sigma=4594.91$ [d], en contraste con  $\bar{P}_{SC}>250$ [d] con un  $r=0.397$ . Por consiguiente,  $P_{SCsin}$  está fuertemente ligado a la extensión de la base de datos que se posea, ya que para  $T_{obs}$  menores a los 25000[d] $\simeq 68.5$  años, se encuentra un coeficiente de correlación  $r=0.898$ , pendiente  $1.16 \pm 0.12$  y  $\sigma=2512.13$ [d], ver Figura 4.19. Por otro lado,  $P_{SC}=250$  días coincide con la disminución drástica encontrada para los superciclos  $C$  (variaciones a corto plazo, ver derecha de Figura 4.9) y donde además un  $\sim 64\%$  de los  $P_{SC}$  son menores a los 250 días. Sin embargo, Vogt et al. (en preparación y que incluyen los datos de este trabajo) han encontrado un peak máximo de superciclos, ver Figura 5.1, en este valor para 231 SU UMa con superciclos no determinados anteriormente.

El catálogo de '*Binarias Cataclísmicas, LMXBs, y objetos relacionados*' de Ritter & Kolb (2003, versión 7.2 año 2013) ofrece una gran variedad de parámetros para estos objetos, dentro de los cuales se encuentran disponibles valores típicos de superciclos para 115 novas enanas del tipo SU UMa, que incluye 12 del tipo ER UMa. Los valores de superciclo oscilan desde los 19 a 1000 días para RZ LMi y V725 Aql respectivamente. En contraste, el presente trabajo los valores son menos extremos con superciclos que oscilan entre los 42.17 y 531.1[d]. La Figura 5.2 muestra la distribución de estos superciclos, donde se observa un peak alrededor de los 310 días y un caída desde los 400[d]. El valor medio de los superciclos es de 287.4[d], la mediana es de 178.8[d], así como también el 90 % de los objetos posee valores menores a 440[d]. Por otra parte, la Tabla 4.6 muestra los valores en dicho catálogo para 25 casos en común<sup>12</sup> junto con la diferencia en días con los superciclos promedio ( $\bar{P}_{SC}$ , de Tabla 4.1). Así mismo, la Figura 5.3 muestra que los valores de Ritter & Kolb (2003) son

---

<sup>12</sup>Si bien otros parámetros de FS Aur se encuentran en este catálogo su superciclo está indeterminado.

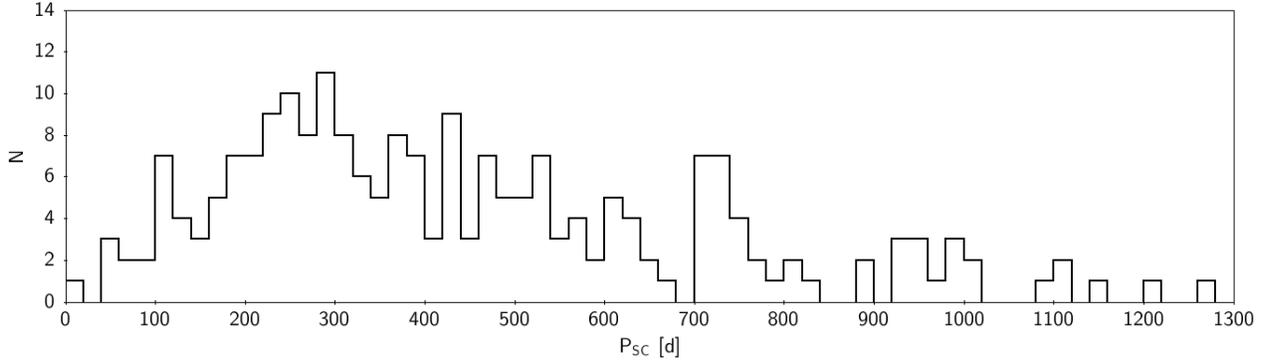


Figura 5.1: Distribución de superciclos ( $P_{SC}$ ) para 231 SU UMa obtenidos por Vogt et al. (en preparación), con  $\text{bin}=20\text{d}$ . Se destaca un peak alrededor de los 250 días correspondiente al corte obtenido en Figura 4.12 que relaciona superciclos generales promedio y los sinusoidales. Por otro lado, el 90% de los objetos posee valores menores a los 1000[d]. Para una mejor visualización de los datos se muestran superciclos hasta los 1300 días.

similares para  $P_{SC}$  menores a  $\sim 600$  días, de esta forma un ajuste lineal arroja una pendiente de  $0.87 \pm 0.06$  con un coeficiente de correlación  $r=0.960$  y  $\sigma=33.74$ . Los 4 objetos no considerados se deben a diversas razones, por ejemplo, para el caso de TU Men por la incertidumbre en su superciclo (600[d]?) y SU UMa por su alta variabilidad, sin embargo los casos de V436 Cen y UV Per poseen valores de superciclo muy altos con valores de aproximadamente 1.7 y 2.6 años respectivamente. El caso de V436 Cen es de destacar ya que, como se mostró en el capítulo anterior, este objeto presentó una gran incertidumbre en la determinación de su superciclo, tanto en su promedio general (error  $\Delta\bar{P}_{SC}[\text{d}]$  más alto) como en el sinusoidal (error  $\Delta P_{SC\text{sin}}[\text{d}]$  más alto). Lo anterior como consecuencia de que tan sólo 24 de 47 supererupciones fueron encontradas en esta estrella, junto con considerar que dentro de los primeros 16 números de ciclos  $E$  fueron detectados sólo 4 supererupciones en un intervalo de tiempo de aproximadamente 15.3 años, ver Figura 4.6. Sin embargo, se debe destacar que los datos del presente trabajo son más completos que los de Ritter & Kolb (2003) ya que se examinaron de forma exhaustiva y sistemática todas las curvas de luz disponibles en AAVSO para 26 SU UMa, trabajo no realizado anteriormente con esta extensión ya que la base de datos abarca hasta 88 años de observaciones, por lo cual se contabilizaron un total de 1589 supererupciones.

Por otro lado, Šimon (2004) estudió los tiempos entre erupciones para distintas novae enanas de los tres tipos, mencionadas en sección 1.2, dentro de las cuales incluyó a la estrella prototipo SU UMa dentro del período  $\sim 1960\text{-}2001$ . Como resultado, encontró alrededor de 60 supererupciones y determinó un superciclo promedio  $P_{SC}=244$  días, en contraste con el determinado en este trabajo que es ligeramente menor  $\bar{P}_{SC}=230.2 \pm 2.0[\text{d}]$  y los 160[d] según Ritter & Kolb (2003). Así mismo, encontró que su diagrama O-C muestra oscilaciones al corto plazo pero sin una tendencia clara. Por otra parte, sus datos corresponden a aproximadamente los números de ciclo  $E$  en los intervalos 60-125 en Figura 4.1, donde los superciclos  $C$  muestran valores entre los 235.6 y 318.5[d] con una clara tendencia hacia un aumento.

Kato (2001) examinó la curva de luz de V1159 Ori, una nova enana del tipo ER UMa, con la base de datos de VSNET de aproximadamente 2200 días encontrando un superciclo promedio de 46.82 días, con valores que oscilan entre los 44.6 a 53.3 [d]. De esta forma, su superciclo promedio es mayor al obtenido por Robertson et al. (1995) de 44.5[d] y ligeramente superior al superciclo promedio determinado en el presente trabajo  $\bar{P}_{SC}=45.72 \pm 0.04[\text{d}]$ . Igualmente, los valores extremos de superciclos  $C$  de Anexo: Tabla 7.1 muestran que son mucho menores a los encontrados por Kato (2001), ya que se encontraron  $C1=42.18 \pm 0.17[\text{d}]$  y  $C6=50.96 \pm 0.18[\text{d}]$ . Aunque sus datos corresponden a los números de ciclo  $E=0\text{-}47$  en este trabajo, incluso registrando el aumento en los

Table 5.1. Comparación entre los valores típicos de superciclo del catálogo de Ritter & Kolb (2003) y la diferencia con los superciclos promedio de Tabla 4.1.

Nombre	$P_{SC}$ (RK)[d] <sup>a</sup>	$\bar{P}_{SC} - P_{SC}$ (RK)[d] <sup>b</sup>
AQ Eri	300	-8.1
AY Lyr	210	-4.0
CU Vel	393	-27.0
CY UMa	300	31.5
EK TrA	485	46.1
ER UMa	43	6.3
GX Cas	307	34.1
IR Gem	183	-35.3
OY Car	325	-13.9
QZ Vir	420	-9.5
RZ Sge	266	15.5
SU UMa	160	70.2
SW UMa	353	107.2
TT Boo	245	23.1
TU Men	600?	-409.6
TY Psc	210	-21.0
UV Per	960	-546.5
V436 Cen	630	-203.5
V503 Cyg	89	-0.7
V1159 Ori	45-53	-3.3 <sup>c</sup>
VW Hyi	183	-1.3
VZ Pyx	270	-141.6
WX Hyi	180	2.4
YZ Cnc	134	-16.2
Z Cha	287	-58.1

Note. —

a. Superciclos según Ritter & Kolb (2003, versión 7.2 año 2013).

b. Diferencia en días entre los superciclos de este trabajo y Ritter & Kolb (2003).

c. Diferencia con respecto al valor medio de 49 días.

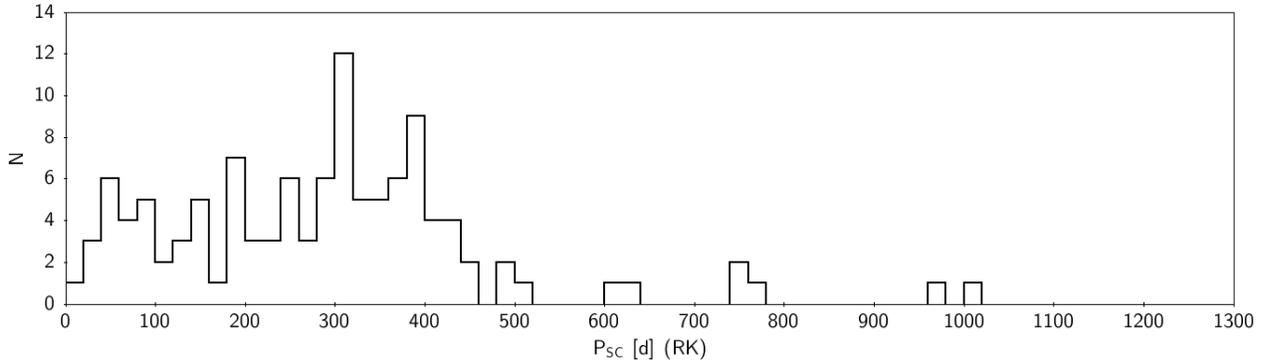


Figura 5.2: Distribución de superciclos ( $P_{SC}$ ) para 115 SU UMa del catálogo RK (Ritter & Kolb 2003, versión 7.2 año 2013) con un bin de 20[d]. Además, la figura muestra un peak alrededor de los 350 días y donde el 90 % de los objetos posee valores menores a los 440[d].

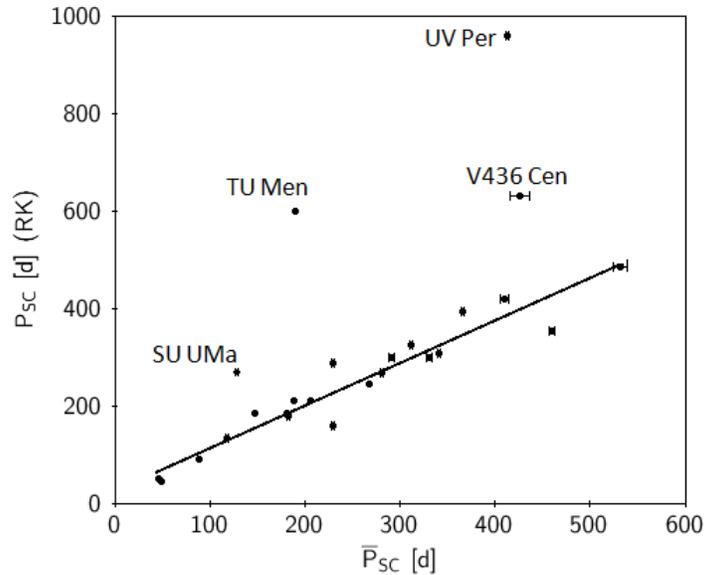


Figura 5.3: Valores comparativos de 25 superciclos del catálogo RK (Ritter & Kolb 2003, versión 7.2 año 2013) y los obtenidos en sección 4.1 ( $\bar{P}_{SC}$ ). El ajuste lineal mostrado con una línea sólida descarta los 4 casos señalados, donde se obtiene una pendiente de  $0.87 \pm 0.06$  con un coeficiente de correlación  $r=0.960$  y  $\sigma=33.74$ . Para el caso de V1159 Ori fue considerado el valor medio de 49 días.

superciclos en el diagrama O-C desde  $E=36$  (ver Figura 4.1), la base de datos de AAVSO es mucho más extensa con 7646 días de observaciones.

Zemko et al. (2013) estudiaron los superciclos para la estrella prototipo ER UMa con diferentes base de datos, entre ellas AAVSO, cubriendo aproximadamente 20 años de observaciones. Encontrando un superciclo promedio  $\bar{P}_{SC}=48.7$ [d] a partir de un ajuste de mínimos cuadrados lineal. Además, encuentran que los superciclos mantienen un valor estable luego de 6 a 30 números de ciclos  $E$  con valores entre los 43.7 y 59.2 días, así mismo encuentran que los superciclos se distribuyen bimodalmente con peaks de 48 y 53 días. Por otra parte, no encuentran una correlación entre la longitud de superciclos con el número de erupciones normales o superhumps negativos<sup>13</sup> detectados para esta binaria. Si bien, Zemko et al. (2013) mencionan las tendencias de superciclo constante no calculan los valores en estos rangos. Con lo anterior, el presente trabajo encuentra superciclos  $C$  entre  $C1=43.46$

<sup>13</sup>Se refiere a casos donde el período de superhump es ligeramente más corto al período orbital de la binaria.

$\pm 0.13$ [d] y  $C7=59.25 \pm 0.77$ [d], donde éste último también corresponde al valor superior extremo encontrado por Zemko et al. (2013). Así mismo, sus peaks corresponderían a aproximadamente a C3 y C5 del presente trabajo, ver Anexo: Tabla 7.1.

Como ya fue mencionado en el capítulo 2, Vogt (1980) encontró variaciones en los superciclos de 8 novae enanas del tipo SU UMa<sup>14</sup>. Así mismo, encontró de 2 a 3 diferentes ciclos periódicos, mediante ajustes lineales en rangos de ciclo constante, ver Figura 2.1. Por otro lado, la Figura 5.4, muestra los valores de superciclo encontrados por Vogt (1980, Tabla 2) y los superciclos  $C$  de este trabajo (ver Anexo: Tabla 7.1). Lo anterior muestra que los valores de superciclo son muy similares o iguales en los mismos intervalos de tiempo, junto con mostrar las mismas tendencias y oscilaciones a corto plazo. Sin embargo, Vogt (1980) encontró superciclos entre los  $141.5 \pm 0.7$ [d], para WX Hyi, a los  $551.5 \pm 8.0$ [d] para EK TrA. En contraste, el presente trabajo encontró de 3 a 8 diferentes número de superciclos  $C$  para estas estrellas con valores que oscilan entre los  $147.6 \pm 1.6$ [d], para la prototipo SU UMa, hasta los  $616.0 \pm 5.1$ [d] para EK TrA. Sin embargo, aunque los valores extremos son similares se pudieron encontrar, en general, superciclos  $C$  con valores más altos, ver Figura 5.4. Finalmente, Vogt (1980) propuso que dichas multiperiodicidades podrían deberse a oscilaciones internas de la componente secundaria producto de la rotación de modos-g (ondas de gravedad, que actúan como fuerza restauradora) no lineales. A partir de esto, propuso que el punto brillante en las curvas de luz podría deberse a la alineación temporal de los antinodos de dos o más oscilaciones de modos-g, las cuales rotan a diferentes velocidades y se superponen en diferentes fases de las supererupciones. Sin embargo, oscilaciones internas en estrellas tipo Sol se esperan que sean entre 3 a 15 minutos, y no en el orden de días como propuso Vogt (1980) para las frecuencias fundamentales. Así mismo, las razones entre cada superciclo  $C$  para cada estrella (ver relación 4.1), difieren totalmente a las presentadas por Vogt (1980), ya que él encontró el rango 1.248-1.264 ( $C2/C1$ ) para 4 estrellas, y en el presente trabajo sólo se encontraron 8 razones (total = 313) dentro de esos valores. Además, respecto a los vacíos del histograma de estas razones, ver Figura 4.12, no se encontró ningún tipo de relación con algún otro parámetro.

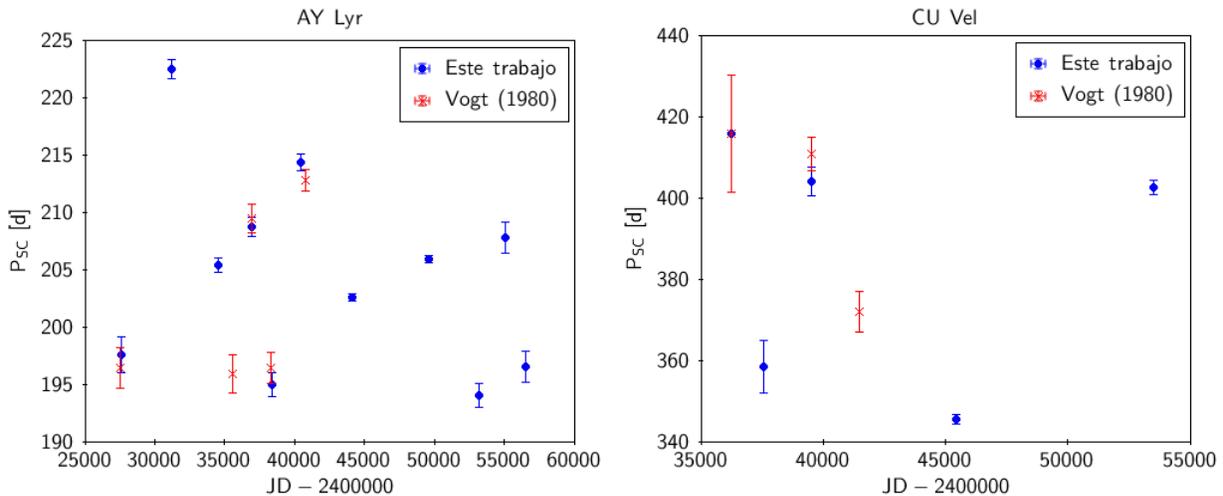


Figura 5.4: Comparación entre los valores de superciclo de Vogt (1980) (indicadas con cruces rojas) y los superciclos  $C$  de este trabajo (círculos azules) para los 8 casos comunes. Aunque se observan valores similares en los mismos intervalos de tiempo, en el presente trabajo se pudieron encontrar superciclos más altos.

<sup>14</sup>Estas son: AY Lyr, CU Vel, EK TrA, SU UMa, V436 Cen, VW Hyi, WX Hyi y Z Cha

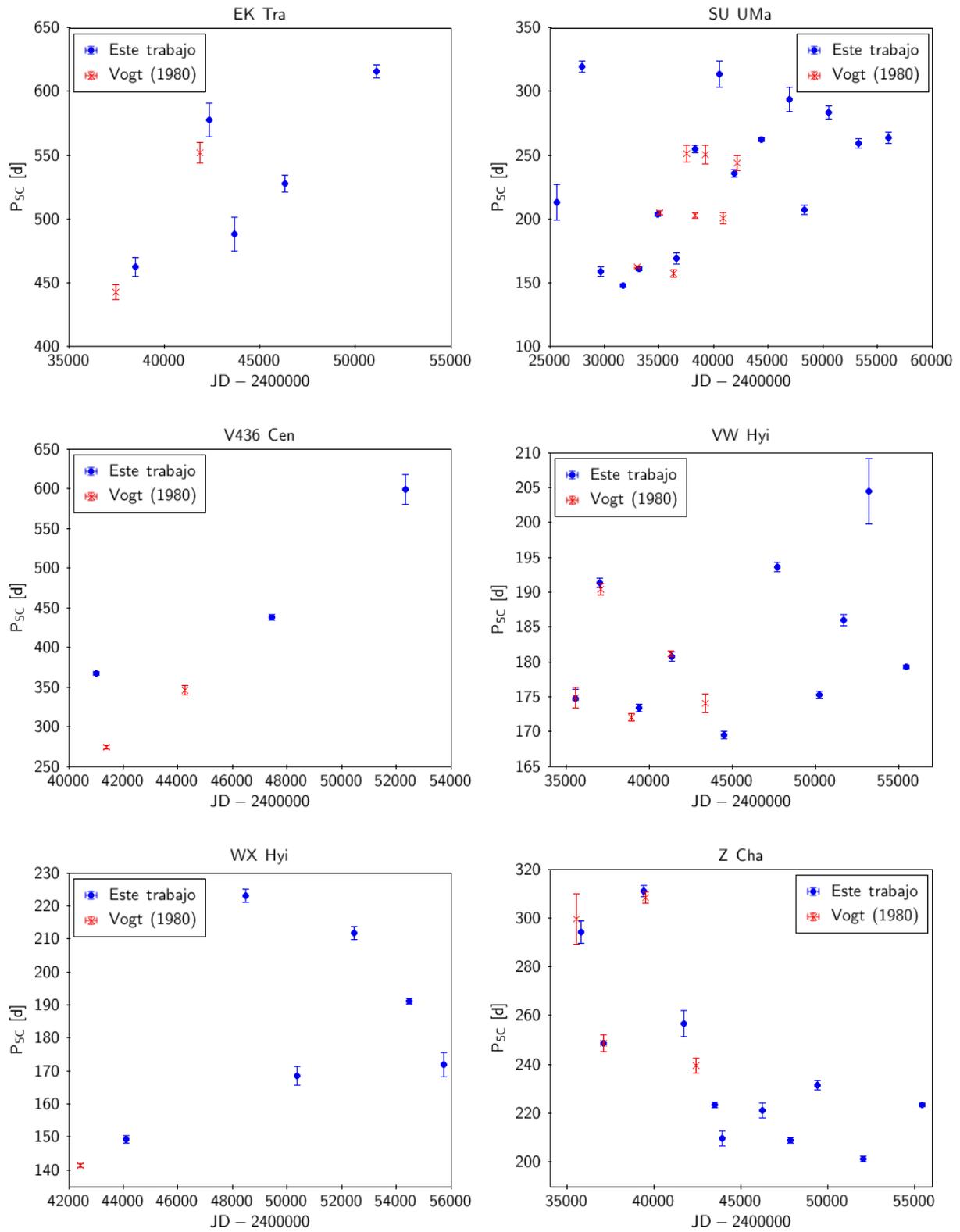


Figura 5.4: Continuación página anterior.

Por otra parte, se encuentra el estudio de longitud de superciclos para las 9 estrellas SU UMa más activas con superciclos menores a 120 días<sup>15</sup> realizado por Otulakowska-Hypka & Olech (2013, OHO de aquí en adelante). Los datos de dicho trabajo se obtuvieron desde distintas fuentes, entre ellas AAVSO, abarcando aproximadamente de 2 a 5 décadas de observaciones. Mediante un análisis de series de tiempo usando la técnica de análisis de la varianza a través del software *ANOVA* (Schwarzenberg-Czerny 1996) dividieron las curvas de luz en 5 grillas de igual rango de tiempo para buscar el peak más prominente dentro del espectro de potencias y con ello obtener los valores de superciclo ( $P_{SC}$ ). La Tabla 5.1 muestra sus valores de superciclos mínimos ( $P_{SC}^{\min}$ ) y máximos ( $P_{SC}^{\max}$ ) en el que están incluidos sus errores, ver Tabla 2 de dicho trabajo. Además, se incluye los superciclos  $C$  mínimos ( $C_1$ ) y máximos ( $C_{\max}$ ) de este trabajo (ver Tabla 4.2) para los 4 casos en común. Sin embargo, aunque los rangos de observaciones que fueron utilizadas son similares, la cantidad de superciclos  $C$  encontrados en este trabajo (8 a 14, ver Anexo: Tabla 4.6) son más del doble a los calculadas por OHO (4-5). De esta forma, la Figura 5.4 muestra gráficas comparadas en los mismos intervalos de tiempo de observación. Para este trabajo, la fecha (JD) se determinó como el valor medio en este intervalo de tiempo a partir de la tabla antes mencionada. En vista de que los valores de superciclos y fechas no son publicados en el estudio de OHO, se hizo una estimación a partir de las gráficas de su Figura 4 para poder compararlos con el presente trabajo. De esta forma, es posible calcular sus superciclos  $\bar{P}_{SC}$ , dando los siguientes valores:  $\sim 48.6 \pm 0.3$ [d],  $\sim 123.1 \pm 1.4$ [d],  $\sim 45.58 \pm 0.967$ [d] y  $\sim 110.1 \pm 1.4$ [d], para ER UMa, V503 Cyg, V1159 Ori y YZ Cnc respectivamente. Así mismo, para el caso de ER UMa es posible notar el aumento sostenido de los superciclos y la similitud entre los datos, exceptuando el valor  $C7=59.25 \pm 0.77$ [d] y donde el superciclo promedio es ligeramente mayor  $49.29 \pm 0.086$ [d]. De igual manera, V1159 Ori muestra una tendencia similar incluyendo el leve aumento de los últimos valores, así como también con  $\bar{P}_{SC}=45.72 \pm 0.043$ [d]. Sin embargo, el caso de V503 Cyg presenta diferencias de hasta 40 días, no obstante el catálogo de Ritter & Kolb (2003) señala un superciclo típico de 89 días muy cercano a  $\bar{P}_{SC}=88.34 \pm 0.088$ [d]. Por otro lado, cabe destacar el caso particular de YZ Cnc en el que hay una caída drástica en el superciclo luego de  $JD=2,448,000$ [d], esos dos puntos fueron descartados por OHO (después de un doble chequeo) ya que consideraron que fue producto de una transición desde el incremento a una longitud de superciclo constante, misma conclusión para las fluctuaciones de V503 Cyg. Así mismo, el superciclo de este trabajo es mayor  $117.8 \pm 1.0$ [d]. De igual forma, conjeturan la posibilidad de que haya algún valor crítico para valores altos de  $P_{SC}$  que produzcan esta disminución drástica.

Finalmente, Coppejans et al. (2016) estudian las propiedades observacionales de 722 novas enanas y 309 CVs de otros tipos con la base de datos del '*Catalina Real-time Transient Survey*'. Con lo anterior, encuentran correlaciones entre el límite superior del tiempo de recurrencia ( $t_{recur}^{\lim,u}$ , el menor tiempo entre dos erupciones) y el '*duty cycle*' (fracción de tiempo usado en la erupción, es decir, número de días en erupción dividido por el número total de días observado), ver su figura 10, junto con relaciones entre el período orbital y duty cycle,  $t_{recur}^{\lim,u}$  y límite inferior de las amplitudes de erupciones  $\Delta v^{\lim,l}$ , ver su figura 11. Sin embargo, su estudio incluye todos los tipos de novas enanas y para el caso de las SU UMa no distingue entre erupciones normales y supererupciones. De esta forma, cualquier tipo de comparación con el presente trabajo no fue posible.

---

<sup>15</sup>Estas son: DI UMa, ER UMa, RZ LMi, SS UMi, V1159 Ori, V1504 Cyg, V344 Lyr, V503 Cyg e YZ Cnc.

Table 5.2. Comparación de los superciclos mínimos y máximos calculados por Otulakowska-Hypka & Olech (2013) y los superciclos  $C$  de este trabajo. Además, se incluye la cobertura de las observaciones utilizadas en años.

Nombre	Otulakowska-Hypka & Olech (2013)*			Este trabajo		
	$P_{SC}^{\min}$ [d]	$P_{SC}^{\max}$ [d]	Rango [años]	$C1$ [d]	$C_{\max}$ [d]	Rango [años]
ER UMa	42.7	51.5	20	$43.46 \pm 0.13$	$59.25 \pm 0.77$	24.0
V503 Cyg	112.1	128.1	20	$83.0 \pm 0.4$	$94.7 \pm 0.4$	29.9
V1159 Ori	42.6	55.1	19	$42.18 \pm 0.17$	$50.96 \pm 0.18$	20.9
YZ Cnc	90.5	149.5	51	$94.5 \pm 0.3$	$179.1 \pm 3.5$	47.8

Note. —

(\*) Estos valores son los presentados en Tabla 2 de Otulakowska-Hypka & Olech (2013) a partir de los errores en la determinación de los superciclos.

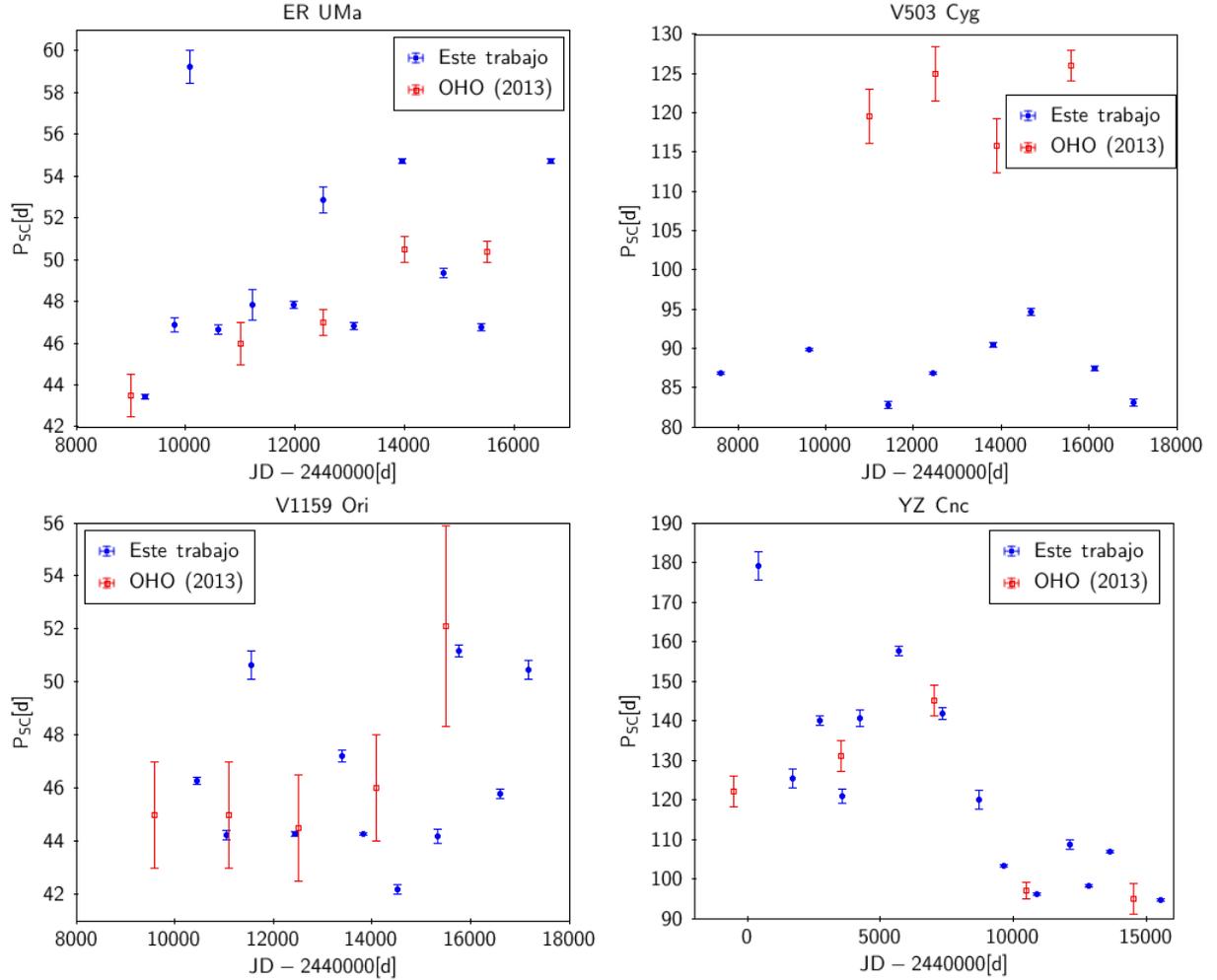


Figura 5.5: Comparación del estudio de longitudes de superciclos para estrellas SU UMa de Otulakowska-Hypka & Olech (2013) con períodos menores a 120 días con los 4 casos comunes con el presente trabajo. Dicha investigación concluye que aparentemente todas las SU UMa presentan un aumento en sus superciclos a largo plazo.

## 5.2. Cambios seculares de los superciclos

Zemko et al. (2013) en su estudio de la prototipo ER UMa, junto con sus resultados ya mencionados en la sección anterior, encuentran con una confianza estadística del 90 % que existe un aumento gradual en los superciclos, al igual que el presente trabajo (ver Tabla 4.3 y Figura 4.5). Además, determinan que la razón de crecimiento del superciclo es de  $dT_s/dE=0.003(6)d/ciclos$ , donde  $dT_s$  es la variación de longitud del superciclo y  $dE$  es la variación en número de ciclos  $E$ .

Así mismo, en el estudio de OHO si bien comentan que los valores de superciclos cambian en períodos cortos argumentan que su análisis sólo se basa en el comportamiento general de los superciclos en escalas de tiempo de décadas. Por lo cual, finalmente encuentran que para 7 de sus casos la longitud de los superciclos aumenta sostenidamente a lo largo del tiempo. Lo anterior basándose en otros estudios del objeto IX Dra, una estrella del tipo ER UMa, en el que existe un aumento en su superciclo durante aproximadamente 20 años, con valores de  $\sim 45.7$ ,  $53$ ,  $54 \pm 1$  y  $58.5 \pm 0.5$  días (Klose 1995; Ishioka et al. 2001; Olech et al. 2004; Otulakowska-Hypka et al. 2013, respectivamente). Según el catálogo de Ritter & Kolb (2003) éste posee un superciclo de 59 días. De esta forma, concluyen que hay una disminución de las tasas de transferencia de masa promedio en estos objetos y que aparentemente este comportamiento es común para las novae enanas del tipo SU UMa. Sin embargo, OHO utilizaron grillas de tiempo iguales para determinar los superciclos y no tomaron en consideración las fluctuaciones y cambios que se producen en los superciclos en escala de tiempo más breves (en particular el caso de YZ Cnc, ver Figura 5.5, donde dos puntos fueron descartados). Además, sus superciclos para los 4 casos en común poseen errores entre 2 a 5.6 veces más grandes que el presente trabajo.

En Sección 4.3, se presentaron los resultados de 17 objetos que presentaron variaciones significativas luego de varias décadas, de éstos 11 mostraron un aumento en sus superciclos (valor medio de 254.9 días) y 6 una disminución (valor medio de 299.6 días). De esta forma, si bien lo anterior no es estadísticamente relevante, sí se encuentra evidencia de que algunas SU UMa presentan variaciones en sus superciclos luego de varias décadas. En particular, los resultados de OHO concluyen que siempre se presenta un aumento en los valores de superciclo, sin embargo, aquí se presentaron 6 casos que descartan dicha afirmación. De esta forma, si bien los métodos automáticos nos ayudan a encontrar valores típicos, éstos necesitan mayor refinamiento para valores menos frecuentes y que si son reales. Este trabajo demuestra que un análisis exhaustivo de las curvas de luz de novae enanas del tipo SU UMa (u otras estrellas) junto con observaciones ininterrumpidas a largo plazo de dichos objetos nos ayuda a aplicar restricciones en los análisis estadísticos de grandes volúmenes de datos.

Por otro lado, cambios a largo plazo han sido observados en erupciones de otras novae enanas. Por ejemplo, en el caso de la nova enana SS Cyg ( $P_{orb} \sim 6.6$  horas) Hempelmann & Kurths (1990) analizaron la base de datos de AAVSO desde 1896 a 1979 encontrando una variación secular del orden de 100 años en sus erupciones, con una tendencia hacia una disminución. Así mismo, Šimon (2000) estudió las curvas de luz de CH UMa, nova enana del tipo U Gem con un  $P_{orb} \sim 8.2$  horas, abarcando 25 años de observaciones encontrando un período entre cada erupción de entre 300-370 días junto con un cambio de tipo parabólico en el cual este período disminuye gradualmente a partir de un diagrama O-C de sus erupciones, ver Figura 5 de dicho trabajo. En contraste, Šimon (2002) encuentra un aumento en el tiempo entre cada erupción para el caso de la nova GK Per (una polar intermedia, con período orbital de casi 2 días), con valores que van desde los 385 días entre los años 1948–1967 hasta 890 días en 1970, donde actualmente tiene un incremento lineal, ver su Figura 5.

Finalmente, el escenario de hibernación propuesto por Shara et al. (1986) predice que posterior a la erupción de una nova clásica la tasa de transferencia de masa en la binaria se mantiene alta durante algunos siglos, para luego decrecer significativamente durante miles a millones de años para entrar posteriormente a una fase de hibernación. Luego de esta etapa se produciría eventualmente

una nueva erupción tipo nova. Ya que se esperan oscilaciones de alta y baja transferencia de masa, los resultados de disminución o aumento de los superciclos podrían estar relacionados con esta fase.

### 5.3. Cambios de los superciclos en períodos intermedios y su posible relación con ciclos tipo solar

Bianchini (1990) propuso que las componentes secundarias de tipo tardío en variables cataclísmicas (CVs) podrían producir variaciones cíclicas de tipo solar<sup>16</sup>( $\sim 22$  años) debido a los fuertes campos magnéticos que se producen en estas estrellas producto de zonas convectivas en su interior. En consecuencia, se pueden observar variaciones en: a) la luminosidad en tiempos de inactividad ('*quiescent*'), b) el intervalo de tiempo entre las erupciones de novas enanas y c) el período orbital de las binarias. Por lo tanto, a continuación se compararán distintos períodos cíclicos reportados en la literatura, junto con los presentados en este trabajo ( $P_{SCsin}$  y  $P_{SCsin2}$ ).

En el caso particular de la nova enana SS Cyg Kiplinger et al. (1988) encuentran un período en 'quiescent' de 7.2 años. De igual manera, Jevtic et al. (2003) encuentran una periodicidad de 52 años realizando un análisis no lineal usando la sección de Poincaré para 100 años de observaciones de AAVSO. De la misma forma, Price et al. (2007) encuentran una característica cuasi periódica de 1000-2000 días en su estudio de erupciones analizando la base de datos de AAVSO cubriendo 102 años de observaciones.

Bianchini (1990) estudió las variaciones cíclicas para sistemas binarios cercanos, entre ellas 8 novas enanas<sup>17</sup>. En consecuencia, encontró variaciones entre los 0.88 y 29 años (ver su Tabla 1 y referencias allí dentro) con un peak alrededor de los 6 años. Por otra parte, Meyer-Hofmeister et al. (1996) encontraron ciclos de 7 años para SS Cyg (7.3 y 2.2 años en Bianchini (1990)) y 8 años para SS Aur (2.3 y 1.2 años en Bianchini (1990)), estudiando frecuencias de erupciones en novas enanas. De la misma forma, Ak et al. (2001) encontraron variaciones cíclicas de 9.7 años para CVs estudiando magnitudes en períodos de inactividad incluyendo intervalos de erupciones de 21 novas enanas, 1 nova y 1 una nova-like, encontrando valores en el rango de  $2.8 \pm 0.1$  a  $28.7 \pm 0.9$  años. En particular, para sus SU UMa<sup>18</sup> los rangos van desde los  $6.3 \pm 0.6$  a  $26.3 \pm 0.8$  años. Así mismo, encuentran peaks de 9.7, 7.9 y 8.6 años en las funciones de densidad de probabilidad estimada para CVs, estrellas de secuencia principal (MS) y CVs+MS, respectivamente. Como resultado de los diferentes ajustes de mínimos cuadrados para las distintas escalas de tiempo se pudieron encontrar diferentes valores para los superciclos. Dicho lo anterior las variaciones promedio de superciclos ( $\bar{P}_{SC}$ ) oscilaron para las ER UMa entre los 42.17 y 49.29[d], y para las SU UMa entre los 88.34 a 531.1[d] ( $\sim 1.5$  años), ver Tabla 4.1. Por otro lado, para variaciones a mediano plazo se encontraron valores para las ER UMa de 1966.9[d] ( $\sim 5.4$  años) a 2744.4[d] ( $\sim 7.5$  años) y para las SU UMa los superciclos oscilaron entre los 3298.4[d] ( $\sim 9.0$  años) y los 17684.0[d] ( $\sim 48.4$  años), ver Tabla 4.4. En este sentido distintos tipos de oscilaciones en los superciclos han sido encontrados en otros estudios, como ya se mencionó, Kato (2001) estudió la curva de luz de V1159 Ori usando la base de datos de VSNET (<http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/vsnet/>) y entre sus resultados se encuentra un cambio en la periodicidad de los superciclos en torno a  $\sim 1800$  días (4.9 años). Sin embargo, el cambio a mediano plazo encontrado en el presente trabajo es ligeramente superior, el ya mencionado  $P_{SCsin} \sim 5.4$  años. Además, se cubrió casi 3.5 veces más de tiempo de observación con la base de datos de AAVSO.

<sup>16</sup>Se refiere al tiempo de un ciclo de las manchas solares del Sol, no obstante, este término se aplica a todas las estrellas (de cualquier tipo espectral) que presenten variaciones alrededor de este tiempo.

<sup>17</sup>Éstas son: EX Hya (en Ritter & Kolb (2003) aparece como tipo nova-like), RU Peg, RX And, SS Aur, SS Cyg, U Gem y Z Cam

<sup>18</sup>Éstas son: EK TrA, SW UMa, TU Men, WZ Sge, OY Car, V436 Cen y Z Cha

Zemko et al. (2013) por su parte determinaron una variación cíclica de 300 a  $\sim 1900$  días para la prototipo ER UMa, donde su límite superior es levemente inferior al de este trabajo  $P_{SC\sin}=2062.79 \pm 25.14[d]$ .

Con respecto a los períodos orbitales de variables cataclísmicas (CV) éstos oscilan típicamente entre los 70 minutos a 24 horas y su distribución revela un *gap* entre las 2 y 3 horas, ver Figura 1.3. No obstante, es posible encontrar otro tipo de variabilidades en torno a modulaciones orbitales. En este sentido, Rubenstein et al. (1991) encuentran posibles períodos sinusoidales de 7.1, 10.7 y 30.5 años en la prototipo UX UMa del tipo nova-like estudiando sus eclipses. Baptista et al. (2000) encuentran un comportamiento cíclico de  $\cong 4$  años y una amplitud de 1.2 minutos en la nova enana eclipsante, del tipo U Gem, EX Dra estudiando los residuos de su período orbital, en contraste Shafter & Holland (2003) encuentran un  $P \simeq 5$  años y una amplitud de  $\sim 1.65$  minutos. Baptista et al. (2002) determinan un cambio cíclico del período orbital en la nova enana eclipsante Z Cha (del tipo SU UMa) cada  $28 \pm 2$  años con una amplitud de  $1.0 \pm 0.2$  min. Si bien, poseen 30 años de observaciones encuentran una significancia estadística del 99.9 %. Así también, Baptista et al. (2003) encuentran cambios cíclicos en los períodos orbitales de las novae enanas SU UMa eclipsantes V2051 Oph y V4140 Sgr con observaciones de 25 y 16 años respectivamente. Los períodos encontrados son  $22 \pm 2$  años y una amplitud de  $17 \pm 3$  [s] para V2051 Oph y  $6.9 \pm 0.3$  años para V4140 Sgr, con confianzas estadísticas del 99.9 y 99.7% respectivamente. De igual manera, Greenhill et al (2006) encuentran una disminución en el período orbital de OY Car  $\Delta P/P = 2.6 \times 10^{-7}$  y un posible cambio cíclico cada  $35 \pm 3.5$  años, sin embargo no encuentran la modulación de 6.3 años reportada por Ak et al. (2001). Así también, Borges et al. (2008) encuentran variaciones cíclicas en el período orbital de la CV eclipsante HT Cas ( $P_{orb} = 1.77$  horas) con 29 años de observaciones con una modulación de 36 años y una semiamplitud de  $\sim 40$ [s] con una confianza estadística del 99.9 %. Con todo lo anterior, Rubenstein et al. (1991); Baptista et al. (2000); Kato (2001); Baptista et al. (2002, 2003); Greenhill et al (2006); Borges et al. (2008), ya mencionados, discuten la posibilidad de que las oscilaciones periódicas encontradas puedan deberse a ciclos de tipo solar en la componente secundaria.

Por otra parte, Yang et al. (2007) concluyen que precesiones de los discos de acreción de las CVs podrían ser la causa para otro tipos de períodos entre los 101 y los 199 días. De la misma manera, Chavez et al. (2012) encontraron una modulación en la curva de luz para FS Aur, nova enana del tipo ER UMa, con una periodicidad de alrededor de 900 días ( $\sim 2.5$  años). No obstante, lo anterior se determinó mediante una simulación numérica en la cual podría estar presente un objeto de masa sub-estelar con una masa de 25 a 64 veces la de Júpiter.

Baliunas et al. (1995) estudiaron variaciones cromosféricas de las líneas de emisión de Ca II H y K en 111 estrellas de secuencia principal de tipo espectral F2-M2, con una base de datos de aproximadamente 25 años encontraron variaciones en tiempos de escalas similares la actividad de 11 años el Sol, así mismo detectaron variaciones sobre los 25 años que sugieren la posibilidad de períodos cíclicos sobre los 50 años. Suárez-Mascareño et al. (2016) estudiaron modulaciones fotométricas debido a ciclos de actividad magnética en estrellas de tipo tardío (F, G, K y M) del catálogo All Sky Automated Survey (ASAS) abarcando hasta 9 años, con ello midieron períodos sinusoidales de entre 2.5 a 14 años con amplitudes de 5-20[mmag] para 47 estrellas usando la base de datos de ASAS. Adicionalmente, incluyeron otros ciclos conocidos desde la literatura (ver referencias ahí dentro) obteniendo una distribución para 173 estrellas donde los ciclos promedio son de  $9.5 \pm 5.3$ ,  $6.7 \pm 3.6$ ,  $8.5 \pm 3.6$ ,  $6.0 \pm 2.9$  y  $7.1 \pm 2.7$  años para las tipo espectrales F, G, K, M-temprano y M-medio respectivamente. Sin embargo, no encuentran una correlación entre las longitudes de los ciclos y tipo espectral. Por otro lado, las tipo espectral M-temprano y M-medio son de gran importancia ya que las estrellas secundarias en las novae enanas SU UMa pertenecen son de estos tipos. Con lo anterior, Suárez-Mascareño et al. (2016) reúnen un total de 57 ciclos (incluyendo 31 de sus objetos), alrededor de un 33% de la muestra, para estos tipos espectrales.

Dado que la literatura muestra evidencia de que existen variaciones de tipo solar en muchas estrellas, este trabajo especula la posibilidad de que los superciclos de las SU UMa presenten este tipo de oscilaciones como resultado de variaciones cíclicas de los campos magnéticos en las componentes secundarias de este tipo de binarias. Por consiguiente, la Tabla 5.2 muestra un resumen de 61 períodos cíclicos ( $P_{\text{cic}}$ ) para 35 objetos, algunos mencionados en esta sección. Los rangos de las bases de datos van desde los 8 a 129 años de observaciones, con un promedio de  $\sim 41$  años, sin embargo la mitad de los períodos dados poseen observaciones bajo los 25 años, en contraste, este trabajo el rango de observaciones está en el rango 10-88 años pero con un promedio de 45.8 años y mediana similar (45.9 años). Los períodos cíclicos van desde los 0.88 hasta los 100 años, con un valor medio de 14.2 años y mediana de 8.2 años. Además, se incluyen los períodos orbitales ( $P_{\text{orb}}$ ) de cada objeto desde 1.4 a 47.9 horas, junto con otros datos de interés. A partir de dicha tabla, e incluyendo los resultados obtenidos en el presente trabajo para oscilaciones a mediano plazo ( $P_{\text{SCsin}}$  y  $P_{\text{SCsin}2}$ ), se obtiene la Figura 5.6 que muestra la relación entre  $P_{\text{orb}}$  y 103 períodos cíclicos ( $P_{\text{cic}}$ ) para 54 objetos<sup>19</sup>, donde se realiza la distinción entre las novae enanas del tipo U Gem, Z Cam y SU UMa, además de las nova-like, distinguiéndose claramente que la mayoría de las SU UMa están bajo el gap de 2 horas a diferencia de las otras novae enanas.

Para toda la muestra se encuentra un valor medio de  $P_{\text{cic}}$  de  $19.1 \pm 1.6$  años y una mediana de 13.9 años. Por otro lado, las CVs con  $P_{\text{orb}}$  sobre el gap ( $>3\text{h}$ ) poseen un valor medio de  $P_{\text{cic}}$  de  $13.1 \pm 2.6$  años con  $\sigma=16.9$  y mediana 7.3 años respectivamente, por el contrario, para  $P_{\text{orb}} < 3\text{h}$  el valor medio es más alto  $23.6 \pm 1.7$  años, con  $\sigma=13.3$  y mediana 22.8 años respectivamente. Por lo tanto, la relación entre estos dos grupos es de 1.8, con una significancia relevante de  $4.0\sigma$ . De esta forma, las SU UMa presentan períodos cíclicos mucho mayores que otras novae enanas. Así mismo, la Figura 5.7 muestra 56  $P_{\text{cic}}$  entre los 4.9 a 58.6 años para 30 SU UMa que poseen períodos orbitales en el rango 1.3-3.0 horas, donde no se observa ninguna correlación entre ambos parámetros. Además, los  $P_{\text{cic}}$  de las SU UMa de Tabla 5.3 van desde los 4.9 a 36.0 años siendo menores a los reportados aquí que abarcan desde 5.4 a 58.6 años. Sin embargo, estos resultados están restringidos por el rango de tiempo de las observaciones y la vinculación de las oscilaciones a mediano plazo de los superciclos con variaciones tipo solar es limitada, no obstante, es importante recalcar que estudios como el presente trabajo no se han realizado.

---

<sup>19</sup>Por claridad, no se muestra el caso de GK Per ya que posee un  $P_{\text{orb}}$  de 47.9h

Table 5.3. Resultados reportados en la literatura para períodos cíclicos ( $P_{\text{cic}}$ ) para distintos tipos de variables cataclísmicas y su posible relación con ciclos tipo solar ( $\sim 22$  años) debido a variaciones en la componente secundaria de la binaria. Se señalan el tipo de CV, período orbital ( $P_{\text{orb}}$ ), tipo de variación, intervalo de tiempo de las observaciones, período cíclico, amplitud de la magnitud en la variación (si corresponde) y referencias utilizadas.

Nombre	Tipo <sup>a</sup>	$P_{\text{orb}}[\text{h}]^b$	Variación <sup>c</sup>	Intervalo [años]	$P_{\text{cic}}$ [años]	$\Delta m$ [mag]	Ref.
BV Pup	UG	6.36	M	19	$14.2 \pm 0.6$	0.21	1
CZ Ori	UG	5.2536	M	19	$17.1 \pm 0.9$	0.30	1
FQ Sco	UG	3.3	M	25	$8.6 \pm 0.7$	0.12	1
SS Aur	UG	4.3872	M	36	$10.6 \pm 0.6$	0.17	1
			E	22	2.32	...	2
			E	22	1.2	...	2
			E	77	8	...	3
			M	96	$7.2 \pm 0.4$	0.11	1
			E	88	7.3	...	2
SS Cyg	UG	6.60312	E	88	2.2	...	2
			M	96	46.7	0.23	1
			M	88	7.2	0.15	4
			M	101	52	...	5
			E	102	2.7	...	6
			E	102	5.5	...	6
			E	?	7	...	3
E	83	$\sim 100$	...	7			
UZ Ser	UG	4.22136	M	21	$6.7 \pm 0.6$	0.15	1
V442 Cen	UG	11.04	M	24	$8.0 \pm 0.5$	0.11	1
U Gem	UG	4.245744	M	16	$5.6 \pm 0.7$	0.13	1
			E	129	6.9	...	2
			P	21	$19 \pm 4$	...	8
TT Crt	UG	6.44208	M	8	$4.3 \pm 0.9$	0.23	1
RU Peg	UG	8.9904	E	$\simeq 28$	6	...	2
			E	$\simeq 28$	12	...	2
UU Aql	UG	3.924768	E	??	12.87	...	??
EX Dra	UG	5.038488	M	1.2	$\simeq 4$	...	10
			P	0.12	$\simeq 5$	...	11
AH Her	ZC	6.194784	M	26	$16.0 \pm 0.8$	0.15	1
HL CMa	ZC	5.202888	M	16	$2.8 \pm 0.1$	0.22	1
UY Pup	ZC	11.502456	M	13	$5.7 \pm 0.3$	0.13	1
WW Cet	ZC	4.2192	M	18	$5.6 \pm 0.3$	0.14	1
Z Cam	ZC	6.956184	M	32	$19.9 \pm 0.7$	0.20	1
			E	11.4	8.84 ...	...	2
RX And	ZC	5.037432	E	11.5	0.88	...	2
EK TrA	SU	1.52784	M	24	$8.9 \pm 0.6$	0.20	1

Table 5.3 (continuación)

Nombre	Tipo <sup>a</sup>	P <sub>orb</sub> [h] <sup>b</sup>	Variación <sup>c</sup>	Intervalo [años]	P <sub>cic</sub> [años]	Δm [mag]	Ref.
ER UMa	SU	1.53	E	20	5.21	...	12
SW UMa	SU	1.36356	M	35	13.6 ± 1.3	0.32	1
TU Men	SU	2.8128	M	18	8.2 ± 0.8	0.32	1
WZ Sge	SU	1.360512	M	18	10.6 ± 0.5	0.31	1
OY Car	SU	1.514904	M	18	6.3 ± 0.6	0.26	1
			P	8	35 ± 3.5	...	14
Z Cha	SU	1.787976	M	18	14.6 ± 0.4	0.16	1
			P	30	28.0 ± 2.0	...	15
V436 Cen	SU	1.500024	M	25	26.3 ± 0.8	0.57	1
V1159 Ori	SU	1.49232	E	6.03	4.9	...	16
V2051 Oph	SU	1.54272	P	25	22 ± 2	...	17
V4140 Sgr	SU	1.47432	P	16	6.9 ± 0.3	...	17
HT Cas	SU	1.767528	P	29	36	...	18
					7.1	...	
UX UMa	NL	4.720104	P	54.7	10.7	...	19
					30.5	...	
					7.6	...	
RW Tri	NL	5.565192	P	8	13.6	...	20
					...	...	
AC Cnc	NL	7.211472	P	54.2	16.2		21
			M	43	28.7 ± 0.9	0.16	1
EX Hya	NL	1.637616	?	...	19	...	22
			P	29	17.5 ± 1.2	...	23
GK Per	N	47.923272	M	36	27.1 ± 0.8	0.15	1
			M	66	7.24	0.3	2

Note. —

<sup>a</sup> UG = U Gem, ZC = Z Cam, SU = SU UMa, NL = Nova-like, N = Nova.

<sup>b</sup> Periodos orbitales según Ritter & Kolb (2003), excepto para FQ Sco que fue estimado por Ak et al. (2002).

<sup>c</sup> Tipo de periodicidad debido a variaciones en: M = magnitud en el mínimo ('quiescent'); E = erupciones; P = período orbital.

Referencias:

(1) Ak et al. (2001); (2) Bianchini (1990); (3) Meyer-Hofmeister et al. (1996); (4) Kiplinger et al. (1988); (5) Jevtic et al. (2003); (6) Price et al. (2007); (7) Hempelmann & Kurths (1990); (8) Beuermann & Pakull (1984); (10) Baptista et al. (2000); (11) Shafter & Holland (2003); (12) Zemko et al. (2013) (14) Greenhill et al (2006); (15) Baptista et al. (2002); (16) Kato (2001); (17) Baptista et al. (2003); (18) Borges et al. (2008); (19) Rubenstein et al. (1991); (20) Africano et al. (1978); (21) Qian et al. (2007); (22) Warner (1988); (23) Hellier & Sproats (1992); () Shakun (1987) UUAql.

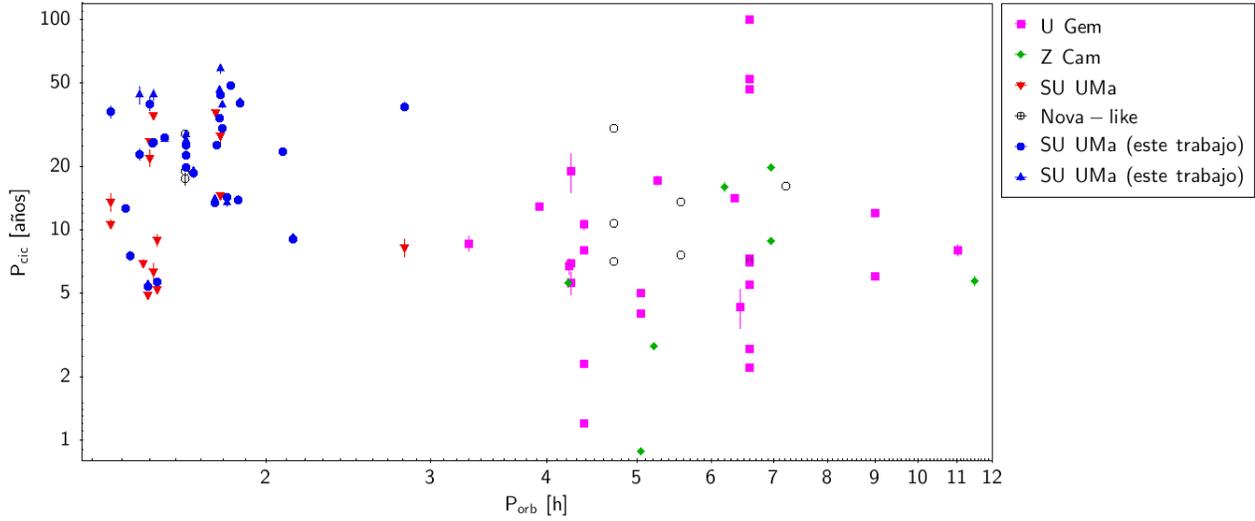


Figura 5.6: Relación entre 103 períodos orbitales y períodos cíclicos para 53 objetos. Se señalan con distintos símbolos las novae enanas del tipo U Gem, Z Cam y SU UMa (con círculos y triángulos los ajustes sinusoidales  $P_{SCsin}$  y  $P_{SCsin2}$  respectivamente) además de las nova-like. Aparentemente, las SU UMa ( $P_{orb} < 3h$ ) presentan en promedio períodos cíclicos más largos que las otras novae enanas ( $P_{orb} > 3h$ ). Por claridad no se incluye el caso de GK Per que posee un  $P_{orb}$  de 47.9[h].

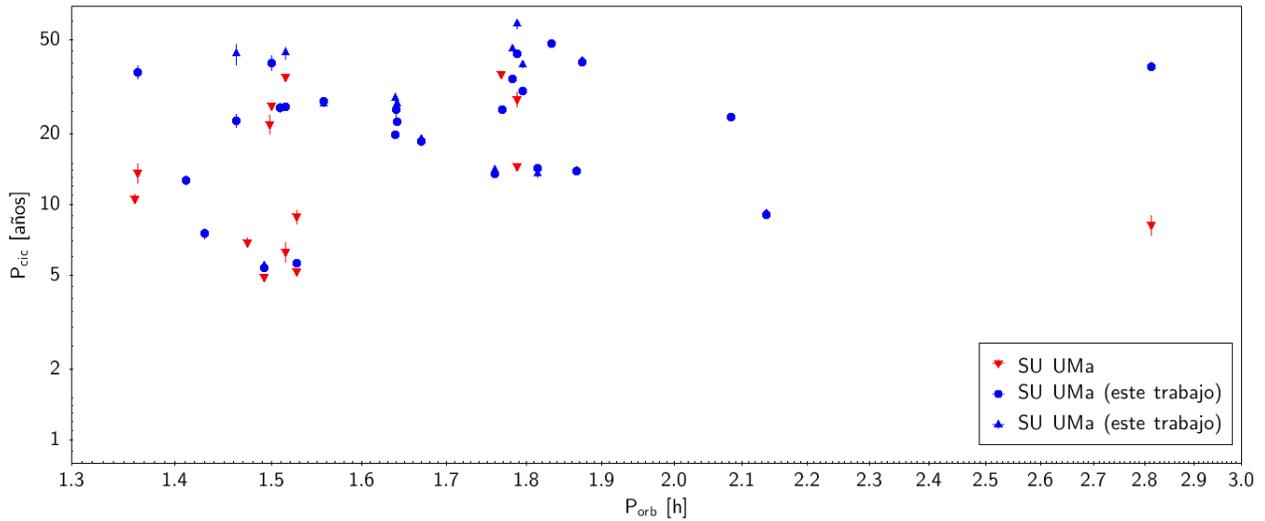


Figura 5.7: Relación entre 56 períodos orbitales y períodos cíclicos para 30 novae enanas del tipo SU UMa. Se distinguen en triángulos invertido rojos los valores encontrados en la literatura (14) y en círculos y triángulos azules los superciclos de mediano plazo encontrados en este trabajo  $P_{SCsin}$  y  $P_{SCsin2}$  respectivamente. No se encuentra ninguna correlación entre  $P_{cic}$  y  $P_{orb}$ .



# Capítulo 6

## Conclusiones

A continuación se presentan los principales resultados obtenidos en este trabajo:

- Por primera vez, se realiza un estudio sistemático de superciclos de 26 novae enanas del tipo SU UMa, abarcando entre 10 a 88 años de observaciones para cada caso.
- Se encontraron un total de 1589 supererupciones con lo cual se contó con alrededor de 1190 años de observaciones para toda la muestra.
- Se encontraron superciclos promedio ( $\bar{P}_{SC}$ ) entre los 42 a 531 días.
- Se analizaron 3 diferentes tipos de variaciones con ajustes de mínimos cuadrados para escalas de tiempo que van desde unos pocos meses hasta algunas décadas, primer trabajo de este tipo hasta la fecha.
- Variaciones a corto plazo: se confirman cambios en la periodicidad de los superciclos (Vogt 1980). Sin embargo, se encuentra una mayor cantidad de superciclos (2 a 11 por estrella). Lo anterior, a partir de los residuos O-C de los ajustes de mínimos cuadrados lineales en intervalos de tiempo entre  $\sim 1$  a 33 años.
- Variaciones a largo plazo: a partir de los residuos O-C de los ajustes lineales se observan tendencias hacia una disminución o aumento de los superciclos a lo largo de varias décadas. Luego de los ajustes de mínimos cuadrados parabólico se encuentran que 17 casos presentan variaciones seculares significativas sobre los 20 años. Dentro de las cuales 11 casos muestran un aumento en la longitud de sus superciclos, así también, existen 6 objetos que muestran una clara tendencia de una disminución. Aunque este tipo de ajuste depende del tiempo total que abarcan las observaciones ( $T_{obs}$ ) que no es un parámetro físico, estos resultados podrían reflejar cambios en la tasas de transferencia de masa en el contexto de la hipótesis de hibernación de novae (Shara et al. 1986).
- Variaciones a mediano plazo: a partir de ajustes de mínimos cuadrados sinusoidales a los residuos O-C del ajuste parabólico se encuentra que para todos los casos se presentan oscilaciones de los superciclos ( $P_{SCsin}$ ), entre los 5.4 a 48.4 años aproximadamente. Sin embargo, ya que estos resultados dependen de los residuos parabólicos éstos podrían mostrar variaciones artificiales, por lo tanto se realizaron nuevos ajustes sinusoidales para 16 objetos a partir de los residuos O-C lineales y que muestran resultados similares para 9 de ellos, además estos superciclos ( $P_{SCsin2}$ ) son ligeramente mayores entre los 5.5 a los 58.6 años, con un promedio de 29.2 años.

- Se observa una separación entre dos grupos de la muestra en torno  $\bar{P}_{SC} \simeq 250[d]$ . Como resultado, para  $\bar{P}_{SC} < 250$  días se encuentra una fuerte correlación entre  $\bar{P}_{SC}$  versus  $P_{SCsin}$ . Por otra parte, para  $\bar{P}_{SC} > 250[d]$  no existe tal correlación significativa. De forma análoga, se encuentra el mismo resultado para  $\bar{P}_{SC}$  versus  $P_{SCsin2}$ . Sin embargo, lo anterior depende directamente de  $T_{obs}$  por lo cual es posible encontrar una mayor cantidad de superciclos más cortos en una base de datos extensa.
- Se investiga una posible relación entre los  $P_{SCsin}$  y  $P_{SCsin2}$  con ciclos de tipo solar ( $\sim 22$  años) debido a variaciones en la componente secundaria de la binaria como resultado de los fuertes campos magnéticos en el interior de estas estrellas. Así, por ejemplo, Suárez-Mascareño et al. (2016) encuentran variaciones cíclicas para estrellas con tipos espectrales M-temprano y M-medio que corresponden a las componentes secundarias de las SU UMa. A partir de valores reportados en la literatura, se encuentra que para 54 variables cataclísmicas (CVs) y un total de 103 períodos cíclicos ( $P_{cic}$ ) el valor medio de estos ciclos para CVs con  $P_{orb} > 3h$  es de  $13.1 \pm 2.6$  años, en contraste, para  $P_{orb} < 3h$  (donde se encuentran todas las SU UMa) el valor medio aumenta significativamente a  $23.6 \pm 1.7$  años. De modo que, en promedio, las SU UMa parecen presentar ciclos tipo solar más largos que las otras novas enanas.

## Bibliografía

- Africano, J. L., Nather, R. E., Patterson, J. et al., 1978, *PASP*, 90, 568
- Ak, T., Ozkan, M. T., & Mattei, J. A. 2001 *A&A*, 369, 882
- Ak, T., Ozkan, M. T., & Mattei, J. A. 2002 *A&A*, 389, 478
- Baliunas, S. L., Donahue, R. A., Soon, W. H. et al., 1995, *ApJ*, 438, 269
- Baptista, R., Catalán, M. S., Costa, L., 2000, *MNRAS*, 316, 529
- Baptista, R., Jablonski, F., Oliveira, E., et al., 2002, *MNRAS*, 335,75
- Baptista, R., Borges, B. W., Bond, H. E., et al., 2003, *MNRAS*, 345, 889
- Bateson, F. M., 1979, *PVSS*, 7, 5
- Bateson, F. M., 1982, *PVSS*, 9, 1
- Bateson, F. M., 1983, *PVSS*, 11, 1
- Beuermann, K., Pakull, M. W., 1984, *A&A*, 136, 250
- Bianchini, A., 1990, *AJ*, 99, 1941
- Borges, B. W., Baptista, R., Papadimitriou, C., et al., 2008, *A&A*, 480, 481
- Coppejans, D. L., Körding, E. G., Knigge, C. et al., 2016, *MNRAS*, 456, 4441
- Chavez, C. E., Tovmassian, G., Aguilar, L.A., et al., 2012, *A&A*, 538A, 122C
- Greenhill, J. G., Hill, K. M., Dieters, S., et al., 2006, *MNRAS*, 372, 1129
- Hellier, C., Sproats, L. N., 1992, *IBVS*, 3724, 1
- Hellier, C., 2001, *Cataclysmic Variable Stars*
- Hempelmann, A. & Kurths, J., 1990, *A&A*, 232, 356
- Ishioka R., Kato T., Uemura M., et al., 2001, *PASJ*, 53, L51
- Isles, J. E., 1975, *JBAA*, 85, 528
- Jevtic, N., Mattei, J. A., & Schweitzer, J. S., 2003, *J. AAVSO*, 31, 138
- Kato, T., 2001, *PASJ*, 53L, 17K
- Kiplinger, A. L., Mattei, J. A., Danskin, K. H., et al., 1988, *J. AAVSO*, 17, 34
- Klose S., 1995, *ApJ*, 446, 357
- Meyer F. & Meyer-Hofmeister, E. 1981, *A&A*, 104, L10
- Meyer-Hofmeister, E., Vogt, N., & Meyer, F. 1996, *A&A*, 310, 519
- Olech A., Zloczewski K., Mularczyk K., et al., 2004, *Acta Astron.*, 54, 57
- Osaki, Y., 1989, *PASJ*, 41, 1005
- Osaki, Y., 2005, *Proc. Japan Acad., Ser. B*, 81, 291
- Osaki, Y., & Kato, T., 2013, *PASJ*, 65, 50
- Otulakowska-Hypka M., Olech A., de Miguel E., et al., 2013, *MNRAS*, 429, 868
- Otulakowska-Hypka, M. & Olech, A., 2013, *MNRAS*, 433, 1338
- Price, A., Henden, A. A., Foster, G., et al., 2007, *PASP*, 119, 1361
- Qian, S.-B., Dai, Z.-B., He, J.-J., 2007, *A&A*, 466, 589

Ritter, H., Kolb, U., 2003, A&A, 404, 301  
Robertson, J.W., Honeycutt, R.K., Turner, G.W., 1995, PASP, 107, 443R  
Rolfe, D. J., Haswell, C. A., Patterson, J., 2001, MNRAS, 324, 529  
Rubenstein, E. P., Patterson, J., Africano, J. L., 1991, PASP, 103, 1258  
Schwarzenberg-Czerny A., 1996, ApJ, 460, L107  
Šimon, V., 2000, A&A, 354, 103  
Šimon, V., 2002, A&A, 382, 910  
Šimon, V., 2004, BaltA, 13, 101S  
Shafter, A. W., Holland, J. N., 2003, PASP, 115, 1105  
Shakun, L. I., ATsir, 1491, 7  
Shara, M. M., Livio, M., Moffat, A. F. J. et al., 1986, ApJ, 311, 163  
Suárez-Mascareño, A., Rebolo, R., & González Hernández, J. I. 2016, A&A, 595, A12  
Vogt, N., 1974, A&A, 36, 369  
Vogt, N., 1980, A&A, 88, 66  
Vogt, N., 1982, ApJ, 252, 653  
Warner, B., 1975, MNRAS, 170, 219  
Warner, B., 1976, IAUS, 73,85  
Warner, B., 1988, Nature, 336, 129  
Whitehurst, R., 1988, MNRAS, 232, 35  
Yang, M. T-C., Chou. Y., Ngeow, C-C. et al., 2007, PASP, 129, 979  
Zemko, P.,Kato, T., Shugarov, S. Y., 2013, PASJ, 65, 54

## Capítulo 7

### Anexo: Tablas

Table 7.1. Duración de superciclos promedio general ( $\bar{P}_{SC}$ , en negrita) y superciclos  $C$  luego de un ajuste de mínimos cuadrados lineal. Además, se indica el tipo de superciclo  $C$  (C1, C2, etc) junto con su promedio ponderado para superciclos similares dentro de sus errores (promedio, en negrita), intervalos de tiempo cubierto en días julianos (JD) y en número de ciclos  $E$ , número de ciclos  $E$  utilizados para el ajuste ( $N$ ), valor de superciclo y finalmente la dispersión de cada ajuste ( $\sigma$ ).

Nombre	Tipo	JD - 2400000	Intervalo E	N	Superciclo[d]	$\sigma$ [d]
AQ Eri	$\bar{P}_{SC}$	<b>43141.0 - 57412</b>	<b>0 - 49</b>	<b>30</b>	<b>291.9 <math>\pm</math> 2.8</b>	<b>218.7</b>
		46409.9 - 48625.0	12-21	9	245.0 $\pm$ 2.9	26.7
		43141.0 - 45701.3	0-10	7	251.2 $\pm$ 4.3	36.6
	C1		<b>promedio</b>	16	246.9 $\pm$ 2.4	
	C2	48306.3 - 51529.0	20-31	7	294.2 $\pm$ 3.3	33.9
		45341.4 - 46639.0	9-13	5	330.4 $\pm$ 13.8	43.8
		53791.6 - 57412.5	38-49	8	330.0 $\pm$ 6.5	64.4
AY Lyr	C3		<b>promedio</b>	13	330.1 $\pm$ 5.9	
	$\bar{P}_{SC}$	<b>26628.0 - 57540.3</b>	<b>0 - 150</b>	<b>116</b>	<b>206.0 <math>\pm</math> 0.2</b>	<b>104.2</b>
		37437.6 - 39405.6	51-61	9	194.9 $\pm$ 1.0	10.8
		51807.7 - 54539.9	121-135	12	194.0 $\pm$ 1.0	15.6
	C1		<b>promedio</b>	21	194.5 $\pm$ 0.7	
		55590.7 - 57540.3	140-150	10	196.5 $\pm$ 1.4	15.0
		26628.0 - 28631.7	0-10	8	197.6 $\pm$ 1.6	16.2
	C2		<b>promedio</b>	18	197.0 $\pm$ 1.1	
	C3	41556.7 - 46614.7	71-96	22	202.6 $\pm$ 0.3	10.9
		33556.6 - 35611.8	32-42	8	205.4 $\pm$ 0.6	6.3
		46003.7 - 53210.4	93-128	34	205.9 $\pm$ 0.3	15.8
	C4		<b>promedio</b>	42	205.8 $\pm$ 0.3	
	CU Vel		35964.5 - 37835.6	44-53	9	208.7 $\pm$ 0.8
		54323.7 - 55773.8	134-141	8	207.8 $\pm$ 1.4	8.9
C5			<b>promedio</b>	17	208.5 $\pm$ 0.7	
C6		38990.6 - 41967.6	59-73	12	214.3 $\pm$ 0.7	10.8
C7		28396.6 - 33975.7	9-34	14	222.4 $\pm$ 0.8	25.9
$\bar{P}_{SC}$		<b>35233.8 - 57502.2</b>	<b>0-59</b>	<b>44</b>	<b>366.0 <math>\pm</math> 1.6</b>	<b>185.6</b>
C1		40771.9 - 50157.0	14-41	20	345.3 $\pm$ 1.2	47.6
C2		36508.9 - 38670.2	3-9	7	358.4 $\pm$ 6.4	33.8
		49471.2 - 57502.2	39-59	13	402.4 $\pm$ 1.8	39.1
		37542.0 - 41491.9	6-16	11	403.9 $\pm$ 3.6	37.3
	35233.8 - 37258.1	0-5	6	415.6 $\pm$ 14.3	59.7	
CY UMa	C3		<b>promedio</b>	30	402.9 $\pm$ 1.6	
	$\bar{P}_{SC}$	<b>48148.7 - 57509.4</b>	<b>0-27</b>	<b>23</b>	<b>331.5 <math>\pm</math> 3.3</b>	<b>128.1</b>
	C1	52647.9 - 55234.4	12-21	8	286.5 $\pm$ 1.5	12.8
	C2	50166.6 - 52928.7	5-13	9	344.3 $\pm$ 3.7	29.0
	C3	54917.7 - 57509.4	20-27	6	374.2 $\pm$ 4.8	30.1
EK TrA	C4	48148.7 - 50882.4	0-7	7	388.9 $\pm$ 9.1	53.7
	$\bar{P}_{SC}$	<b>35211.0 - 55688.0</b>	<b>0-38</b>	<b>25</b>	<b>531.1 <math>\pm</math> 7.4</b>	<b>383.0</b>
	C1	35211.0 - 41821.0	0-14	8	462.5 $\pm$ 7.3	102.8
	C2	42448.0 - 44896.8	15-20	6	487.6 $\pm$ 13.3	55.6
	C3	44454.8 - 48156.2	19-26	8	527.9 $\pm$ 6.4	41.4
	C4	41231.0 - 43517.9	13-17	5	577.4 $\pm$ 13.5	42.8
ER UMa	C5	46537.8 - 55688.0	23-38	9	616.0 $\pm$ 5.1	79.4
	$\bar{P}_{SC}$	<b>48785.4 - 57563.3</b>	<b>0-178</b>	<b>145</b>	<b>49.29 <math>\pm</math> 0.086</b>	<b>54.7</b>
	C1	48785.4 - 49743.5	0-22	21	43.46 $\pm$ 0.13	3.8
		50168.8 - 51016.5	30-48	13	46.64 $\pm$ 0.21	4.5
		54926.6 - 55870.5	127-147	15	46.76 $\pm$ 0.16	4.1
		52611.7 - 53513.4	81-100	18	46.83 $\pm$ 0.16	4.1
		49653.6 - 49932.5	20-26	7	46.85 $\pm$ 0.32	1.7
	C2		<b>promedio</b>	53	46.77 $\pm$ 0.10	
		51078.3 - 51365.4	49-55	7	47.86 $\pm$ 0.73	3.9
		51484.4 - 52444.4	58-78	19	47.86 $\pm$ 0.19	5.2
C3		<b>promedio</b>	26	47.86 $\pm$ 0.18		

Table 7.1 (continuación)

Nombre	Tipo	JD - 2400000	Intervalo E	N	Superciclo[d]	$\sigma$ [d]
	C4	54438.8 - 54977.6	117-128	10	$49.36 \pm 0.21$	2.5
	C5	52240.7 - 52759.6	74-84	9	$52.83 \pm 0.63$	6.6
	C6	53460.8 - 54438.8	99-117	14	$54.70 \pm 0.13$	2.7
		55763.4 - 57563.3	145-178	29	$54.70 \pm 0.10$	5.3
		<b>promedio</b>		43	$54.70 \pm 0.08$	
C7	49932.5 - 50226.7	26-31	6	$59.25 \pm 0.77$	3.2	
<b>FS Aur</b>	<b>P<sub>SC</sub></b>	<b>54000.7 - 57787.7</b>	<b>0-91</b>	<b>41</b>	<b><math>42.17 \pm 0.70</math></b>	<b>113.6</b>
	C1	55870.7 - 56578.9	36-56	14	$34.27 \pm 0.35$	8.3
		56534.9 - 57787.7	55-91	11	$34.41 \pm 0.33$	14.0
		<b>promedio</b>		25	$34.34 \pm 0.24$	
	C2	54820.4 - 55960.4	15-38	11	$50.24 \pm 0.40$	11.0
C3	54000.7 - 54902.8	0-17	13	$53.17 \pm 0.64$	12.7	
<b>GX Cas</b>	<b>P<sub>SC</sub></b>	<b>47980.0 - 55820.9</b>	<b>0-23</b>	<b>22</b>	<b><math>341.1 \pm 1.8</math></b>	<b>58.3</b>
	C1	51471.5 - 53014.3	10-15	5	$306.5 \pm 2.7$	11.4
		48735.0 - 50000.5	2-6	5	$306.6 \pm 15.5$	49.0
		54869.4 - 55820.9	20-23	4	$312.7 \pm 10.9$	24.4
	<b>promedio</b>		14	$306.9 \pm 2.6$		
	C2	49581.5 - 51777.8	5-11	7	$366.8 \pm 5.7$	29.9
52680.5 - 55226.3		14-21	8	$367.4 \pm 4.4$	28.6	
<b>promedio</b>		15	$367.2 \pm 3.5$			
<b>IR Gem</b>	<b>P<sub>SC</sub></b>	<b>41770.6 - 57473.3</b>	<b>0-108</b>	<b>48</b>	<b><math>147.7 \pm 0.7</math></b>	<b>131.9</b>
	C1	41770.6 - 43153.7	0-11	5	$125.1 \pm 1.2$	10.3
		43510.7 - 45086.6	13-25	8	$127.5 \pm 2.1$	24.1
		<b>promedio</b>		13	$126.3 \pm 0.8$	
	C2	48701.4 - 52607.4	46-75	11	$135.4 \pm 1.0$	29.8
	C3	51909.3 - 57473.3	70-108	11	$146.6 \pm 0.6$	25.2
	C4	42887.7 - 43942.7	9-16	5	$155.2 \pm 4.7$	27.1
	C5	44924.7 - 47250.6	24-38	12	$164.8 \pm 0.7$	12.3
C6	46414.8 - 48701.4	33-46	13	$178.4 \pm 1.4$	18.9	
<b>OY Car</b>	<b>P<sub>SC</sub></b>	<b>38356.0 - 57484.0</b>	<b>0-61</b>	<b>51</b>	<b><math>311.1 \pm 1.8</math></b>	<b>230.6</b>
	C1	49384.0 - 54546.0	33-52	16	$267.6 \pm 1.9$	44.8
		43355.9 - 46184.2	15-24	9	$310.0 \pm 4.4$	38.1
		53915.0 - 57484.0	50-61	10	$318.9 \pm 4.0$	47.1
	<b>promedio</b>		19	$314.9 \pm 3.0$		
	C3	38356.0 - 43692.9	0-16	14	$332.1 \pm 2.3$	41.3
C4	46828.9 - 49384.0	26-33	8	$380.6 \pm 10.4$	67.3	
<b>QZ Vir</b>	<b>P<sub>SC</sub></b>	<b>46819.0 - 57457.4</b>	<b>0-26</b>	<b>22</b>	<b><math>410.5 \pm 3.8</math></b>	<b>147.3</b>
	C1	55389.9 - 57457.4	20-26	7	$342.1 \pm 5.0$	26.2
	C2	52213.7 - 55766.9	12-21	8	$395.0 \pm 7.7$	62.3
	C3	46819.0 - 52213.7	0-12	10	$451.8 \pm 5.3$	59.1
<b>RZ Sge</b>	<b>P<sub>SC</sub></b>	<b>43810.8 - 57539.6</b>	<b>0-49</b>	<b>36</b>	<b><math>281.5 \pm 1.3</math></b>	<b>112.3</b>
	C1	47211.7 - 50302.9	12-24	10	$257.5 \pm 1.8$	23.4
		43810.8 - 46535.6	0-10	8	$271.1 \pm 1.6$	15.7
		55094.5 - 57539.6	40-49	7	$272.9 \pm 5.4$	40.1
	C2	49810.6 - 52835.4	22-33	10	$275.6 \pm 3.6$	41.6
		<b>promedio</b>		25	$271.9 \pm 1.4$	
C3	52235.3 - 55094.5	31-40	8	$318.6 \pm 1.4$	12.7	
	<b>P<sub>SC</sub></b>	<b>25292.4 - 57285.5</b>	<b>0-124</b>	<b>112</b>	<b><math>230.2 \pm 2.0</math></b>	<b>848.9</b>
	C1	30816.6-32618.0	26-38	11	$147.6 \pm 1.6$	21.0
		28574.0-30816.6	12-26	7	$158.2 \pm 3.4$	47.6
		32428.4-33907.5	37-46	10	$160.4 \pm 1.7$	15.9
	<b>promedio</b>		17	$160.0 \pm 1.5$		
	C2	35952.4-37155.7	56-63	8	$168.7 \pm 4.4$	28.8

Table 7.1 (continuación)

Nombre	Tipo	JD - 2400000	Intervalo E	N	Superciclo[d]	$\sigma$ [d]
	C4	33718.0-36125.3	45-57	13	$203.5 \pm 1.4$	18.4
		47376.4-49298.9	101-110	9	$206.7 \pm 3.9$	35.4
		25292.4-25942.6	0-3	4	$212.8 \pm 13.9$	31.1
		<b>promedio</b>	26	$203.9 \pm 1.3$		
	C5	41103.5-42755.3	77-84	6	$235.6 \pm 3.2$	20.3
	C6	37155.7-39449.8	63-72	9	$254.8 \pm 3.3$	29.9
		52237.5-54338.5	121-129	8	$259.3 \pm 3.6$	26.8
		42002.4-46711.6	81-99	13	$262.2 \pm 1.2$	25.1
		54693.4-57285.5	130-140	11	$263.7 \pm 4.5$	47.5
		<b>promedio</b>	41	$261.3 \pm 1.0$		
	C7	49298.9-51840.3	110-119	7	$283.6 \pm 5.4$	43.8
		46217.4-47636.0	97-102	6	$293.6 \pm 9.9$	41.3
		<b>promedio</b>	13	$285.9 \pm 4.7$		
	C8	27289.0-28574.0	8-12	4	$319.6 \pm 4.7$	13.9
		39449.8-41545.4	72-79	8	$313.4 \pm 10.0$	65.0
		<b>promedio</b>	12	$318.5 \pm 4.3$		
SW UMa	$\bar{P}_{SC}$	<b>38797.6 - 56840.3</b>	<b>0-40</b>	<b>24</b>	<b><math>460.2 \pm 2.5</math></b>	<b>137.7</b>
	C1	47965.3 - 49208.6	20-23	4	$411.3 \pm 24.9$	55.7
		52574.7 - 56840.3	30-40	7	$423.3 \pm 8.8$	75.3
		38797.6 - 44402.7	0-13	7	$424.9 \pm 4.3$	49.8
	<b>promedio</b>	18	$424.3 \pm 3.8$			
	C2	48319.3 - 53993.5	21-33	9	$476.6 \pm 3.7$	41.6
C3	43477.3 - 47965.3	11-20	6	$504.3 \pm 4.7$	35.4	
TT Boo	$\bar{P}_{SC}$	<b>42559.6 - 57643.3</b>	<b>0-56</b>	<b>47</b>	<b><math>268.1 \pm 0.6</math></b>	<b>73.0</b>
	C1	42559.6 - 46116.7	0-14	13	$251.5 \pm 2.2$	36.2
	C2	46474.0 - 51188.7	15-33	14	$261.4 \pm 1.2$	25.7
		53165.4 - 56340.6	40-52	10	$261.5 \pm 2.4$	29.6
		<b>promedio</b>	24	$261.4 \pm 1.1$		
	C3	50862.4 - 53975.4	32-43	11	$284.1 \pm 3.4$	37.0
		45249.5 - 46980.4	11-17	7	$292.8 \pm 5.3$	28.2
<b>promedio</b>	18	$286.6 \pm 2.9$				
C4	55801.4 - 57643.3	50-56	7	$308.8 \pm 7.7$	40.5	
TU Men	$\bar{P}_{SC}$	<b>38190.0 - 57554.9</b>	<b>0-100</b>	<b>83</b>	<b><math>190.4 \pm 0.5</math></b>	<b>136.6</b>
	C1	38190.0 - 38976.0	0-5	6	$157.5 \pm 4.4$	18.2
	C2	42831.0 - 45440.9	23-38	13	$175.5 \pm 1.4$	24.2
		51417.6 - 53389.1	70-81	9	$176.3 \pm 2.1$	20.9
		<b>promedio</b>	22	$175.7 \pm 1.2$		
	C3	46132.9 - 50298.9	41-64	19	$181.5 \pm 0.5$	16.2
	C4	50407.0 - 51776.9	65-72	7	$198.5 \pm 3.1$	18.5
	C5	38976.0 - 42954.0	5-24	15	$209.3 \pm 1.7$	41.9
		45076.8 - 46490.2	36-43	8	$210.4 \pm 4.8$	31.0
		<b>promedio</b>	23	$209.4 \pm 1.6$		
C6	52628.0 - 57554.9	77-100	20	$217.2 \pm 1.4$	43.6	
TY Psc	$\bar{P}_{SC}$	<b>40573.6 - 57326.3</b>	<b>0-88</b>	<b>58</b>	<b><math>189.0 \pm 0.5</math></b>	<b>95.7</b>
	C1	40573.6 - 42819.5	0-13	9	$171.3 \pm 2.3$	29.5
	C2	51442.7 - 54156.5	58-73	13	$178.5 \pm 0.8$	13.0
	C3	42663.6 - 49000.4	12-46	22	$185.7 \pm 0.4$	22.3
	C4	53611.5 - 55101.6	70-78	7	$190.0 \pm 2.5$	17.3
	C5	48221.5 - 51847.3	42-60	14	$202.2 \pm 0.8$	16.4
	C6	54750.5 - 57326.3	76-88	7	$217.9 \pm 3.9$	41.7
UV Per	$\bar{P}_{SC}$	<b>24803.0 - 56985.5</b>	<b>0-78</b>	<b>44</b>	<b><math>413.5 \pm 1.7</math></b>	<b>253.0</b>
	C1	36852.5 - 41560.7	30-43	9	$350.1 \pm 8.3$	107.6
	C2	24803.0 - 30327.7	0-15	10	$364.6 \pm 2.1$	33.1

Table 7.1 (continuación)

Nombre	Tipo	JD - 2400000	Intervalo E	N	Superciclo[d]	$\sigma$ [d]
	C3	44678.3 - 51007.9	49-65	10	$395.1 \pm 3.8$	62.3
	C4	29862.9 - 38107.6	14-33	12	$436.5 \pm 2.9$	61.3
	C5	50162.3 - 56985.5	63-78	8	$460.4 \pm 6.9$	89.5
		39889.6 - 45529.8	39-51	8	$476.0 \pm 7.9$	91.5
		<b>promedio</b>		16	$467.2 \pm 5.2$	
<b>V436 Cen</b>	<b>P<sub>SC</sub></b>	<b>36341.0 - 56453.9</b>	<b>0-46</b>	<b>24</b>	<b><math>426.5 \pm 9.8</math></b>	<b>555.1</b>
	C1	36341.0 - 45653.1	0-25	12	$367.3 \pm 2.1$	55.9
	C2	44382.8 - 50493.1	22-36	10	$437.1 \pm 3.8$	47.0
	C3	48242.6 - 56453.9	36-46	6	$598.4 \pm 18.3$	152.2
<b>V503 Cyg</b>	<b>P<sub>SC</sub></b>	<b>46699.7 - 57614.4</b>	<b>0-124</b>	<b>77</b>	<b><math>88.34 \pm 0.088</math></b>	<b>25.6</b>
	C1	50952.6 - 51875.2	48-59	9	$82.8 \pm 0.5$	5.4
		56441.3 - 57614.4	110-124	10	$83.1 \pm 0.5$	7.0
		<b>promedio</b>		19	$83.0 \pm 0.4$	
	C2	46699.7 - 48525.7	0-21	9	$86.8 \pm 0.2$	4.7
		51532.3 - 53355.5	55-76	16	$86.8 \pm 0.2$	5.0
	<b>promedio</b>		25	$86.8 \pm 0.1$		
	C3	55650.6 - 56619.3	101-112	8	$87.4 \pm 0.3$	3.9
	C4	48170.7 - 51051.4	17-49	22	$89.9 \pm 0.1$	6.7
		53178.6 - 54438.4	74-88	13	$90.4 \pm 0.3$	4.4
<b>promedio</b>		35	$90.0 \pm 0.1$			
C5	54258.6 - 55105.6	86-95	7	$94.7 \pm 0.4$	3.3	
<b>V1159 Ori</b>	<b>P<sub>SC</sub></b>	<b>49802.6 - 57448.3</b>	<b>0-166</b>	<b>104</b>	<b><math>45.72 \pm 0.043</math></b>	<b>20.8</b>
	C1	54091.6 - 54942.9	93-113	14	$42.18 \pm 0.17$	4.4
	C2	55088.2 - 55577.0	116-127	8	$44.17 \pm 0.25$	2.6
		50812.0 - 51296.9	22-33	10	$44.24 \pm 0.17$	1.9
		51766.3 - 53096.9	42-72	22	$44.29 \pm 0.070$	3.2
		53625.0 - 54027.1	83-92	8	$44.29 \pm 0.06$	2.8
	<b>promedio</b>		48	$44.29 \pm 0.06$		
	C3	56254.0 - 56939.2	141-156	10	$45.78 \pm 0.18$	3.0
	C4	50023.6 - 50896.5	5-24	14	$46.27 \pm 0.14$	3.1
	C5	53006.0 - 53803.9	70-87	11	$47.22 \pm 0.21$	4.1
	C6	56892.2 - 57448.3	155-166	8	$50.47 \pm 0.36$	4.1
		51204.4 - 51899.4	31-45	12	$50.62 \pm 0.55$	8.6
		55481.1 - 56040.9	125-136	8	$51.19 \pm 0.22$	2.4
<b>promedio</b>		28	$50.96 \pm 0.18$			
<b>VW Hyi</b>	<b>P<sub>SC</sub></b>	<b>34848.7 - 57531.2</b>	<b>0 - 125</b>	<b>125</b>	<b><math>181.7 \pm 0.2</math></b>	<b>83.6</b>
	C1	42758.1 - 46168.9	44 - 64	21	$169.5 \pm 0.6$	17.4
	C2	34848.7 - 36236.0	0 - 8	9	$174.7 \pm 1.4$	11.0
		37966.9 - 40740.9	17 - 33	17	$173.4 \pm 0.6$	12.0
		49509.9 - 50905.3	81 - 89	9	$175.2 \pm 0.6$	4.6
		<b>promedio</b>		35	$174.4 \pm 0.9$	9.2
	C3	53415.9 - 57531.2	101 - 125	23	$179.3 \pm 0.3$	10.0
		40235.0 - 42758.1	32-46	15	$180.8 \pm 0.7$	11.5
	<b>promedio</b>		38	$180.1 \pm 0.5$	10.8	
	C4	50560.2 - 52779.8	87 - 100	13	$185.9 \pm 0.8$	11.3
	C5	36051.0 - 37966.9	7 - 17	11	$191.3 \pm 0.7$	7.1
	C6	45653.2 - 50035.9	61 - 84	24	$193.6 \pm 0.7$	22.4
	C7	52779.8 - 53591.2	99-103	5	$204.4 \pm 4.7$	14.7
	<b>VZ Pyx</b>	<b>P<sub>SC</sub></b>	<b>50161.3 - 57112.9</b>	<b>0-52</b>	<b>34</b>	<b><math>128.4 \pm 1.0</math></b>
C1		52556.3 - 52556.3	16 - 33	11	$114.9 \pm 0.8$	15.0
C2		51610.3 - 53043.9	9 - 20	9	$131.7 \pm 1.9$	18.6
		54531.0 - 55975.0	33 - 44	7	$131.5 \pm 0.4$	3.6
<b>promedio</b>		16	$131.5 \pm 0.4$			

Table 7.1 (continuación)

Nombre	Tipo	JD - 2400000	Intervalo E	N	Superciclo[d]	$\sigma$ [d]
	C3	55707.9 - 57112.9	42 - 52	6	$140.7 \pm 1.0$	8.8
	C4	50161.3 - 51610.3	0 - 9	9	$164.3 \pm 2.3$	19.5
WX Hyi	P <sub>SC</sub>	<b>41069.0 - 56686.9</b>	<b>0-88</b>	<b>66</b>	<b><math>182.4 \pm 1.7</math></b>	<b>348.1</b>
	C1	41069.0 - 47128.9	0-40	33	$149.4 \pm 1.0$	70.7
	C2	49850.3 - 50882.0	52-60	8	$168.5 \pm 2.9$	15.2
		54768.0 - 56686.9	77-88	7	$171.9 \pm 3.8$	33.2
		<b>promedio</b>	15	$171.4 \pm 2.0$		
	C3	53228.0 - 55704.8	69-82	7	$191.1 \pm 0.8$	10.2
	C4	50882.0 - 54009.0	58-73	11	$211.7 \pm 2.1$	33.1
	C5	46742.9 - 50206.3	38-54	15	$223.2 \pm 1.9$	36.1
YZ Cnc	P <sub>SC</sub>	<b>39525.7 - 56986.0</b>	<b>0-147</b>	<b>100</b>	<b><math>117.8 \pm 1.0</math></b>	<b>390.9</b>
	C1	54041.6 - 56986.0	116-147	18	$94.5 \pm 0.3$	12.2
	C2	50066.4 - 51692.4	77-94	14	$96.2 \pm 0.2$	4.0
	C3	52578.9 - 53068.4	102-107	5	$98.2 \pm 0.3$	1.4
	C4	49131.4 - 50160.4	68-78	9	$103.3 \pm 0.4$	4.0
	C5	52971.5 - 54243.4	106-118	11	$106.8 \pm 0.4$	5.0
	C6	51604.5 - 52674.1	93-103	8	$108.8 \pm 1.1$	10.6
		48293.5 - 49131.4	61-68	6	$120.1 \pm 2.3$	12.7
		43140.7 - 44008.6	24-31	8	$120.8 \pm 1.7$	10.8
	C7	<b>promedio</b>	14	$120.6 \pm 1.4$		
	C8	41008.7 - 42414.7	8-19	8	$125.5 \pm 2.3$	22.5
	C9	42020.8 - 43409.0	16-26	8	$140.1 \pm 1.2$	11.9
		43752.0 - 44713.4	29-36	7	$140.6 \pm 2.0$	12.3
		46342.0 - 48293.5	47-61	10	$141.8 \pm 1.6$	21.5
		<b>promedio</b>	25	$140.7 \pm 0.9$		
	C10	44928.1 - 46486.7	38-48	8	$157.6 \pm 1.1$	11.0
C11	39525.7 - 41304.8	0-10	6	$179.1 \pm 3.5$	29.5	
Z Cha	P <sub>SC</sub>	<b>34921.9 - 57413.3</b>	<b>0-96</b>	<b>88</b>	<b><math>228.9 \pm 1.4</math></b>	<b>370.3</b>
	C1	50214.0 - 53851.9	62-80	16	$201.1 \pm 1.1$	23.8
	C2	47123.9 - 48580.1	48-55	8	$209.0 \pm 1.2$	7.9
		42285.0 - 45560.2	35-41	7	$209.7 \pm 2.9$	15.1
		<b>promedio</b>	15	$209.1 \pm 1.1$		
	C3	45114.8 - 47331.9	39-49	11	$221.0 \pm 2.9$	30.4
		42276.8 - 44719.8	26-37	12	$223.4 \pm 1.0$	11.7
		53430.0 - 57413.3	78-96	15	$223.6 \pm 0.9$	19.6
	<b>promedio</b>	38	$223.4 \pm 0.7$			
	C4	48384.8 - 50459.1	54-63	9	$231.5 \pm 1.9$	16.8
	C5	36109.9 - 38110.9	4-12	9	$248.6 \pm 3.4$	26.7
		40970.0 - 42469.9	21-27	7	$256.9 \pm 5.5$	29.1
		<b>promedio</b>	16	$250.9 \pm 2.9$		
	C6	34921.9 - 36652.7	0-6	6	$294.3 \pm 4.7$	24.9
C7	37853.0 - 40970.0	11-22	12	$311.1 \pm 2.2$	23.1	

