

PARTE A:
CONDICIONES DE CALMA

La primera parte de esta investigación se centra en el estudio de la región ionosférica F visible desde tierra (150 km – 350 km aproximadamente) para días de calma. Se pretende obtener el comportamiento característico de los parámetros $B0$ y $B1$ en condiciones de calma. $B0$ y $B1$ definen respectivamente el espesor y la forma del perfil de densidad electrónica del IRI (Figura A.1). Así mismo, se pretende obtener un modelo empírico a escala global que mejore la predicción actual del IRI y que pueda representarse mediante funciones analíticas simples y no de forma tabular como ocurre en la actual versión que rige al IRI.

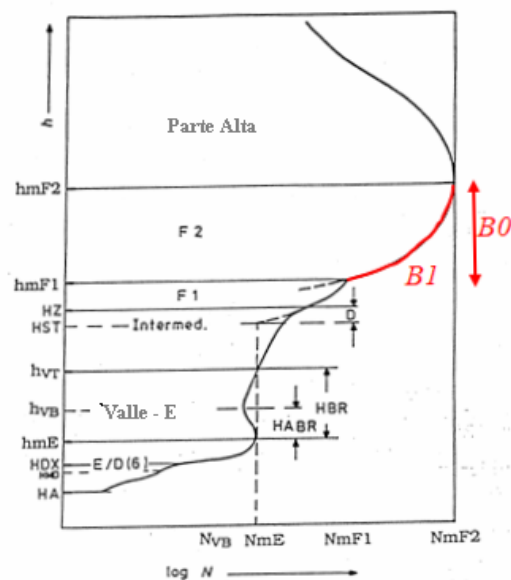


Figura A.1. Perfil de densidad electrónica del IRI correspondiente a la parte visible desde tierra. $B0$ y $B1$ definen respectivamente el espesor y la forma del perfil. Figura adaptada de Bilitza, 1990.

La investigación realizada en esta primera parte se ha conducido en tres etapas:

1. Determinar el comportamiento típico de estos parámetros en latitudes medias.
2. Elaborar un modelo local y analizar su validez a otras latitudes.
3. Expandir el modelo local a escala global.

CAPÍTULO A1: COMPORTAMIENTO CARACTERÍSTICO DE LOS PARÁMETROS *B0* Y *B1* PARA DÍAS DE CALMA

En este capítulo se determina el comportamiento típico de los parámetros *B0* y *B1* que definen la forma y espesor del perfil de densidad del IRI. El análisis se efectúa con los registros de los ionogramas de sondeo vertical del Observatorio del Ebro (40.8°N, 0.5°E) obtenidos por una digisonda DGS 256 una vez revisada su calidad por un operador. La base de datos utilizada abarca el período de Junio de 1988 hasta Diciembre de 2007 exceptuando los meses de Enero a Noviembre de 1989 y algunos meses de 1991 y 1996 por falta de datos y los años de 1992 al 1994 por no tener datos revisados por operador. En total se han analizado más de 17 años de perfiles de densidad electrónica, $N(h)$, en los que la actividad solar está comprendida entre $Rz_{12}^5 = 7.5$ y $Rz_{12} = 157.6$ (Tabla A1.1). Los resultados de dicho análisis serán el fundamento para modelar el comportamiento típico de *B0* y *B1* en función de la actividad solar, la estación del año y la hora local.

⁵ Rz_{12} es el promedio anual de los valores medios mensuales del número de Wolf. El número de Wolf es el índice de actividad solar que se obtiene de multiplicar el número de grupos de manchas solares por 10 y sumarlo al número total de manchas solares.

Tabla A1.1. Rz_{12} para cada año del análisis. Valores obtenidos del *Nacional Geophysical Data Center* (<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/ftpsunspotnumber.html>)

Año	Actividad solar (Rz_{12})	Año	Actividad solar (Rz_{12})
1988	100.2	2000	119.6
1989	157.6	2001	111
1990	142.6	2002	104
1991	145.7	2003	63.7
1995	17.5	2004	40.4
1996	8.6	2005	29.8
1997	21.5	2006	15.2
1998	64.3	2007	7.5
1999	93.3		

A1.1. Análisis

A partir de los perfiles individuales de densidad electrónica obtenidos a la misma hora de cada mes se ha obtenido el correspondiente perfil mensual representativo MARP (*Monthly Averaged Representative Profile*) utilizando la técnica descrita por Huang and Reinisch (1996a). Se recuerda que esta técnica calcula el perfil mensual representativo excluyendo el 25% de los perfiles que más se apartan del perfil promedio. Estos perfiles individuales que más se desvían suelen estar relacionados con condiciones perturbadas por lo que con esta técnica se obtiene un perfil típico para una hora y mes determinados en condiciones ionosféricas tranquilas. La Figura A1.1 muestra un ejemplo de la obtención del ionograma y perfil mensual representativo a partir de los ionogramas y perfiles individuales correspondientes utilizando el programa CARP (*Calculation of Average Representative Profile*).

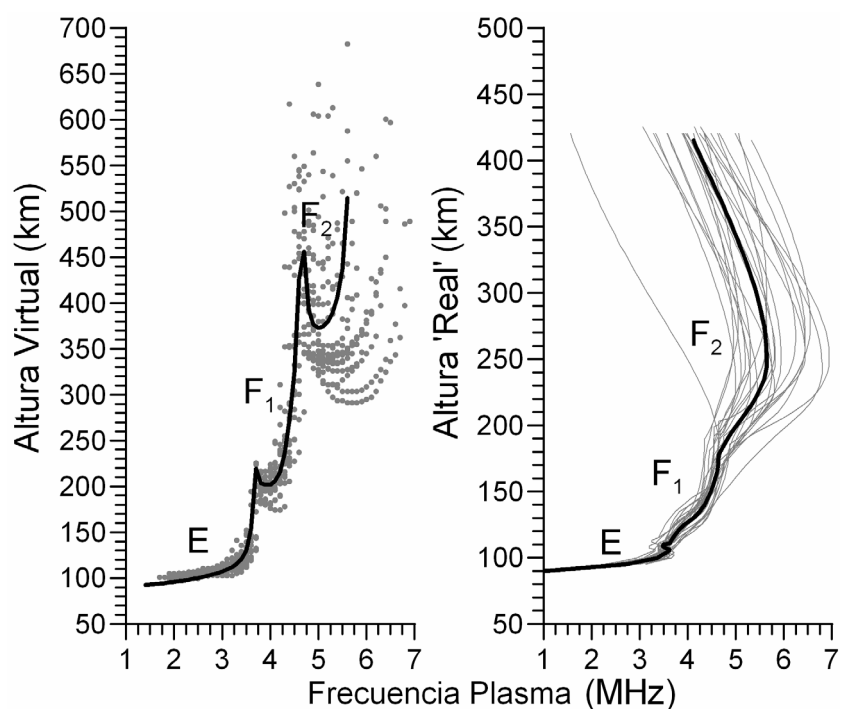


Figura A1.1. Ejemplo del perfil mensual representativo (MARP) obtenido para Junio de 2005 a las 12:00 UT para la estación de Ebro. Izquierda: Los puntos grises corresponden a las trazas de los ionogramas individuales de cada uno de los días del mes de Junio del 2005 a las 12:00 UT. La línea negra corresponde a la traza del ionograma representativo del mes calculado a partir del programa CARP. Derecha: Las líneas grises corresponden a los perfiles de altura real de la densidad electrónica de cada uno de los días del mes de Junio de 2005 a las 12:00 UT y la línea negra corresponde al perfil de altura real de densidad electrónica representativo del mes de Junio a las 12:00 UT.

Una vez se ha obtenido el perfil promedio en condiciones de calma lo comparamos con la predicción que nos proporciona el IRI para días tranquilos. Se ha utilizado el modelo IRI2001 (Bilitza, 2001) obtenido en <ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/models/ionospheric/iri/iri2001/>. Se ha calculado el perfil de densidad electrónica en la posición geográfica correspondiente al Observatorio del Ebro a la misma hora y mes en los que se han obtenido los perfiles representativos experimentales sin utilizar la opción STORM. Los parámetros ionosféricos analizados en esta sección se han extraído de los perfiles representativos obtenidos experimentalmente y de los calculados por el IRI. Esto nos ha permitido obtener dos tipos de series de datos por cada parámetro, uno experimental y otro resultado del modelo IRI. El análisis de estas series nos permitirá caracterizar el comportamiento de estos parámetros, verificar la bondad del modelo IRI y evaluar la necesidad de mejorarlo. La Figura A1.2 muestra la comparación entre las predicciones del IRI y los valores

mensuales representativos (MARP) de los parámetros $B0$, $B1$ y $D1$ ⁶ y de las frecuencias críticas y alturas del máximo de ionización de las capas E, F1 y F2 para un año de baja actividad solar. Se ha utilizado la opción estándar del IRI para obtener $B0$ y $B1$. El coeficiente de correlación lineal (R^2) correspondiente al ajuste lineal entre los valores experimentales y los valores predichos por el IRI para cada parámetro se indica también en la Figura A1.2. El coeficiente de correlación lineal da el grado de dependencia lineal entre dos series, cuanto mayor es R^2 mejor es el ajuste entre ellas. La expresión matemática de R^2 es:

$$R^2 = \left[\frac{\sum (x_i - \langle x \rangle)(y_i - \langle y \rangle)}{N\sigma_x\sigma_y} \right]^2 \quad \text{A1.1}$$

donde x_i y y_i se refiere respectivamente a los valores experimentales y predichos por el IRI, $\langle x \rangle$ y $\langle y \rangle$ son los valores medios de cada serie, N es el número de datos de la serie y σ_x y σ_y son sus respectivas desviaciones estándar. Los gráficos de la Figura A1.2 muestran que, para baja actividad solar, el IRI predice bien los parámetros que definen el pico de la capa F2 y el parámetro foE . El coeficiente de correlación lineal para $foF2$ es superior a 0.90, es 0.88 para $hmF2$ y 0.98 para foE . Sin embargo, el IRI da un valor constante de 110 km para hmE y un coeficiente de correlación lineal para $foF1$ de 0.55 y de 0.18 para $hmF1$. La predicción del IRI de $B0$, $B1$ y $D1$ también muestra una gran discrepancia respecto los valores experimentales confirmando los resultados de Sethi and Mahajan (2002) y Lei et al. (2004).

⁶ D1 es el parámetro del IRI que indica la presencia de la capa F1.

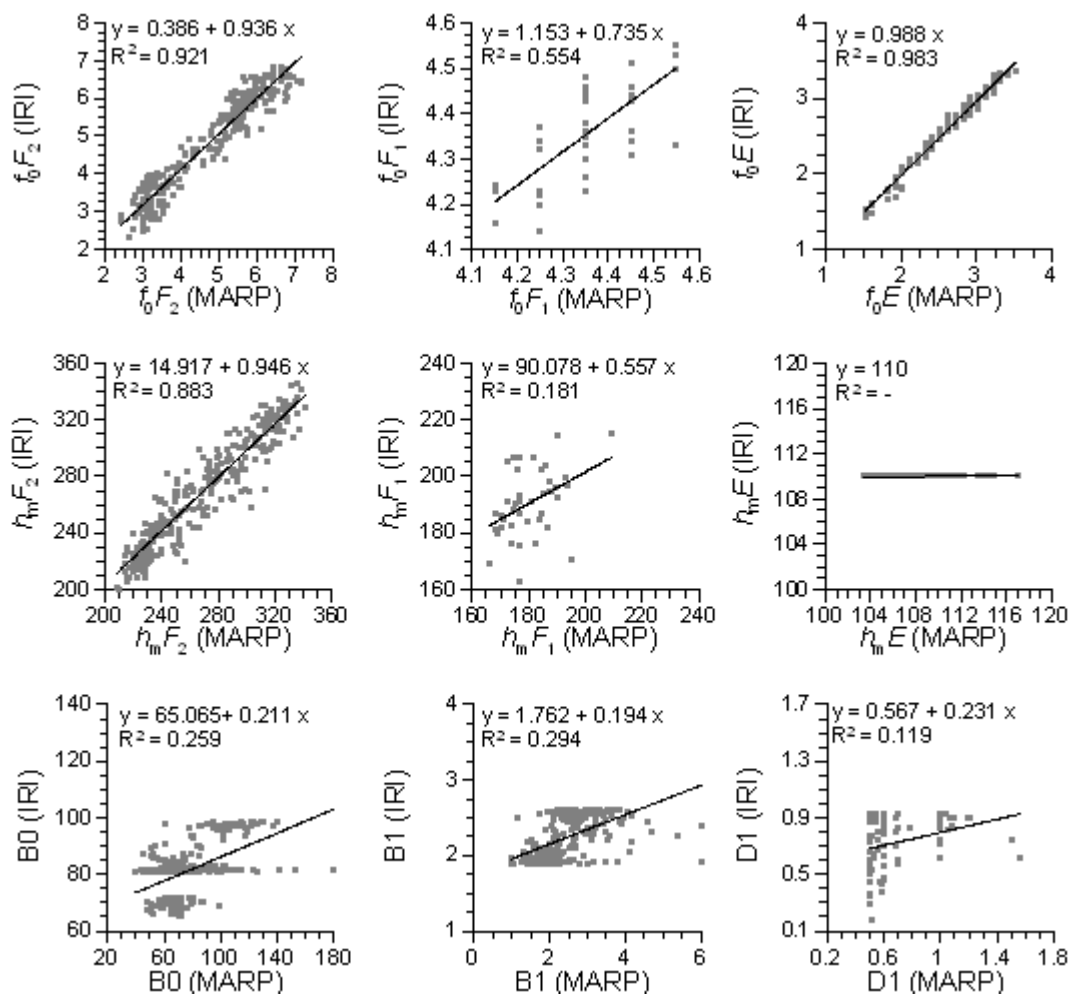


Figura A1.2. Comparación entre las predicciones del IRI (IRI2001) y los valores experimentales (MARP) para varios parámetros ionosféricos para un año de baja actividad solar (1995, $Rz_{12}=17.5$). Se ha utilizado la opción estándar del IRI para obtener B0 y B1 y no se ha utilizado el modelo de corrección STORM. Cada gráfico muestra la ecuación y el coeficiente de correlación lineal del mejor ajuste entre ellos.

La Figura A1.3 nos muestra esta misma comparativa para un año de alta actividad solar. Como antes, se confirma una buena correlación entre los valores predichos por el IRI y los valores experimentales para los parámetros ionosféricos $foF2$, $hmF2$ y foE y se observan discrepancias significativas para el resto de parámetros, especialmente para hmE , B1 y D1.

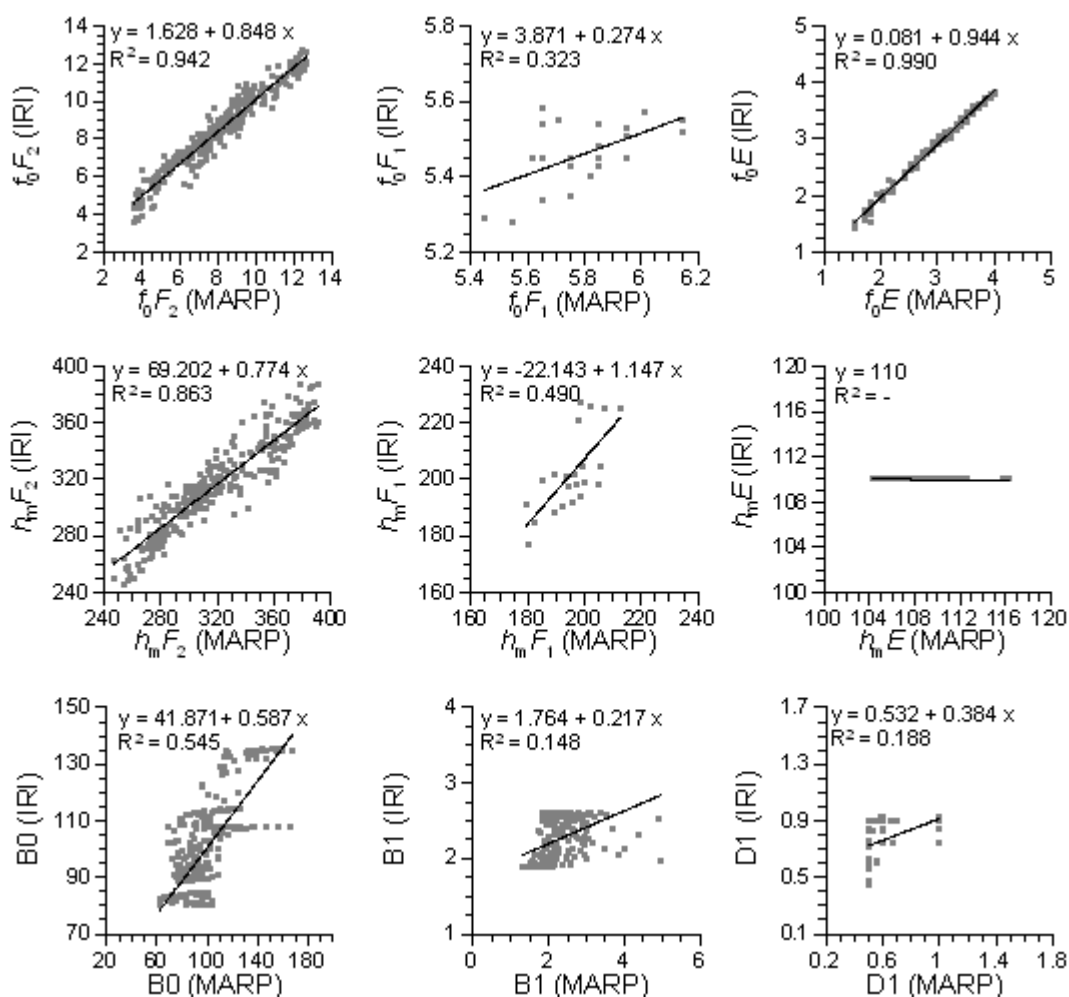


Figura A1.3. Lo mismo que en la Figura A1.2 para un año de alta actividad solar (2000, $Rz_{12}=119.6$).

Aunque no se muestren todas las comparativas aquí, estos resultados se confirman para todos los años analizados. La figura A1.4 muestra el coeficiente de correlación lineal de la comparativa de cada parámetro para todos los años. Se han utilizado las opciones estándar y Gulyaeva para $B0$ y la opción estándar para $B1$. Se observa que el IRI obtiene buenas predicciones para los parámetros $foF2$, $hmF2$ y foE independientemente de la actividad solar. La predicción del IRI para el parámetro $foF1$ depende de la actividad solar. Ésta es mejor en años de baja actividad. En cambio, la predicción del IRI para el parámetro $hmF1$ no depende de la actividad solar y el coeficiente de correlación lineal no supera el 0.3 de promedio. La predicción del IRI para $B0$ utilizando la opción estándar también depende de la actividad solar, a mayor actividad, mejor es la predicción, variando el índice de correlación lineal entre 0.4 y 0.6. Sin embargo la predicción del IRI para $B0$ utilizando la opción Gulyaeva parece no

depender de la actividad solar y es mejor que la opción estándar para todos los años, con valores que superan el 0.6 (barras sólidas Figura A1.4). Estos resultados para $B0$ corroboran los trabajos de Bilitza (1998), Mosert et al. (2004) y Zhang et al. (2004). Aún así, las dos opciones muestran importantes discrepancias con los valores experimentales. El coeficiente de correlación lineal para $B1$ es alrededor de 0.2 durante actividad solar alta y presenta un valor próximo a 0.4 durante actividad solar baja. No se han analizado los coeficientes de correlación lineal para la predicción de $B1$ a partir de la opción Gulyaeva del IRI porque ésta da un valor constante $B1=3$. Las predicciones del IRI para parámetro $D1$ son las que dan peores valores del coeficiente de correlación lineal (R^2 no supera el 0.25).

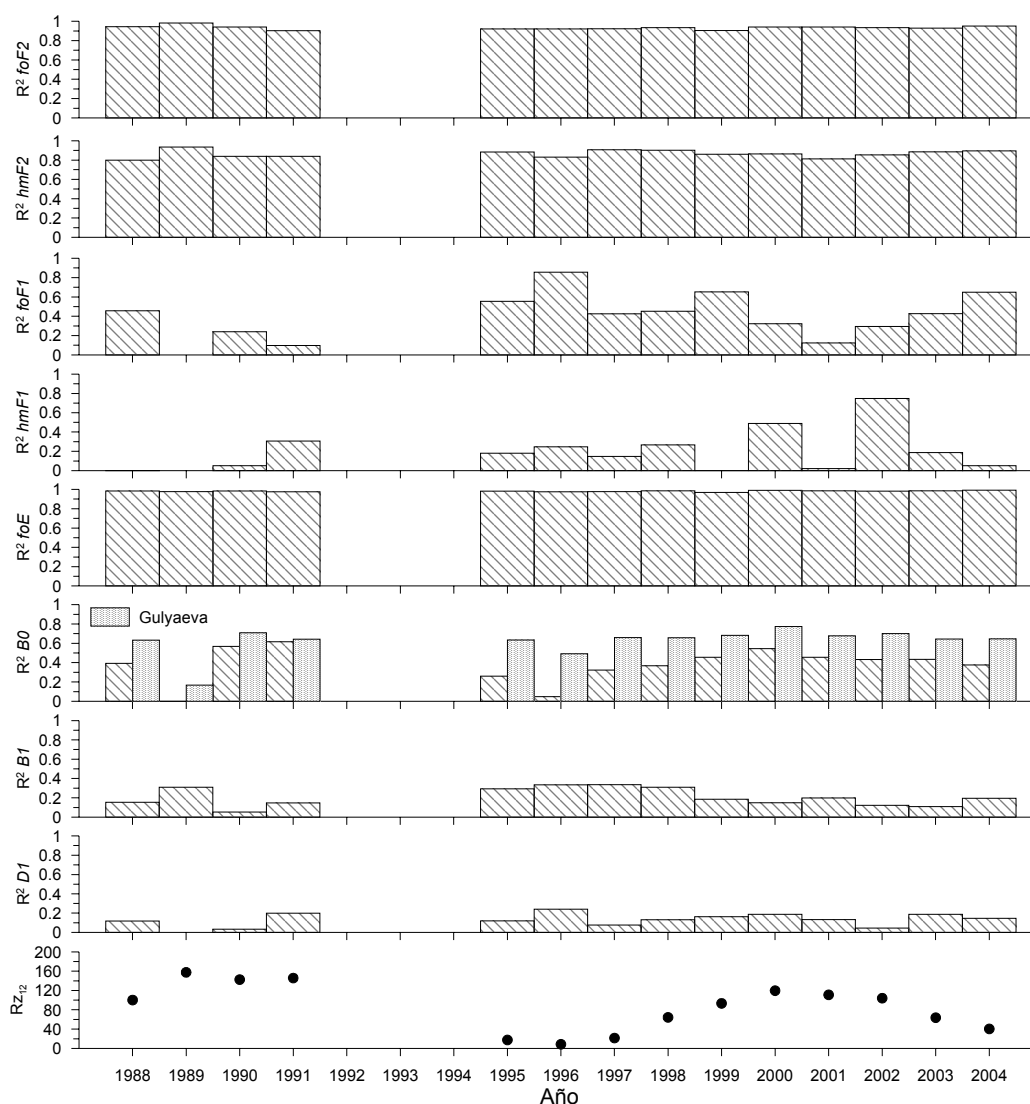


Figura A1.4. Coeficiente de correlación lineal para cada parámetro a lo largo de todo el período de análisis. El panel inferior muestra la actividad solar utilizando el índice Rz_{12} .

Los parámetros ionosféricos más relevantes son los correspondientes al máximo de densidad electrónica ($foF2$, $hmF2$) y el contenido total de electrones, TEC (*Total Electron Content*). El TEC se obtiene a partir de la integración del perfil de densidad electrónica. En condiciones de calma la densidad electrónica de la capa F2 es la contribución predominante, por lo que $foF2$ y el espesor de la capa F2 son parámetros clave para la determinación del TEC. El hecho de que los parámetros ionosféricos que definen la capa F2 sean importantes para conocer el estado de la ionosfera en condiciones de calma hace que sea necesario mejorar su predicción en modelos como el IRI. Se recuerda que el IRI describe la parte baja del perfil de densidad electrónica a partir de los parámetros ionosféricos $foF2$, $hmF2$, $B0$ y $B1$. El IRI da una buena predicción de los parámetros $foF2$ y $hmF2$ pero no de $B0$ y $B1$ (Figura A1.4) por lo que se ha decidido centrar los esfuerzos en mejorar la predicción de $B0$ y $B1$, los parámetros que definen respectivamente el espesor y la forma de la capa F2 hasta el máximo de ionización.

A1.2. Variaciones temporales de los parámetros B0 y B1

La Figura A1.5 muestra el comportamiento de $B0$ para distintos años correspondientes a diferente actividad solar. La variación temporal de $B0$ muestra una clara variación diurna en verano, siendo los valores de mediodía mayores que los valores de la noche (resultados que concuerdan con Bilitza et al., 2000; Lei et al., 2004). Este efecto es más pronunciado para los años de alta actividad solar. Sin embargo, se observa una clara variación semidiurna en los meses de invierno. Además de las variaciones diurnas, el comportamiento de $B0$ presenta una dependencia estacional, presentando valores inferiores en invierno y superiores en verano y también se observa que los valores de $B0$ en primavera son normalmente mayores que en otoño, concordando con los resultados obtenidos por Mosert and Radicella (1997).

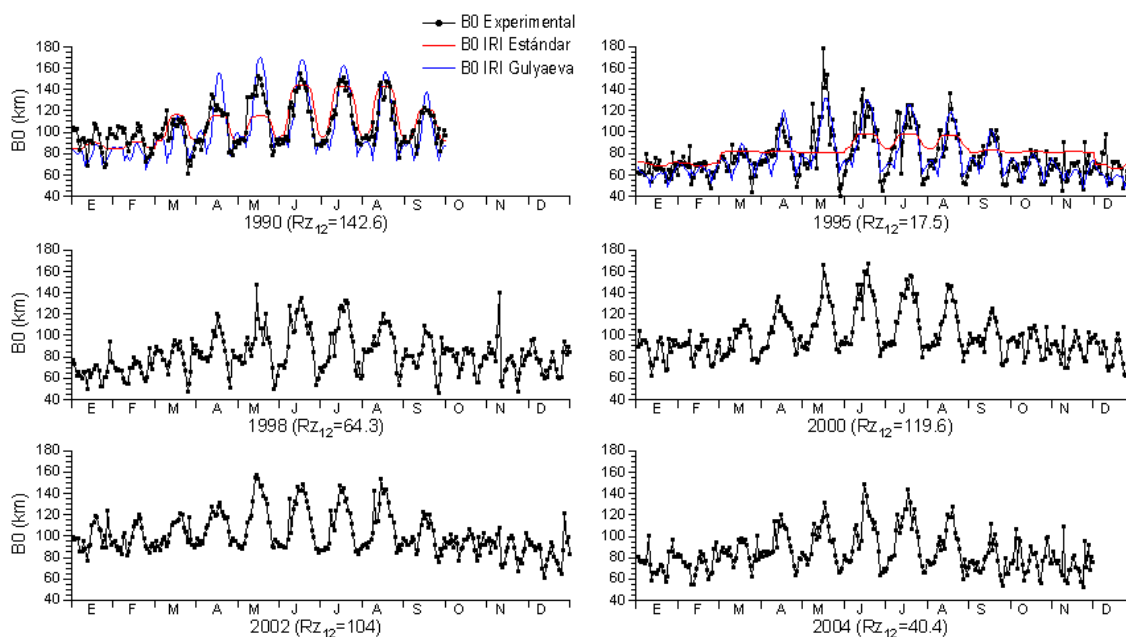


Figura A1.5. Variación temporal de $B0$ para diferente actividad solar (puntos). Se muestra la variación temporal de $B0$ predicha por el IRI utilizando las dos opciones, en rojo $B0$ calculado a partir de la opción estándar del IRI y en azul $B0$ calculado a partir de la opción Gulyaeva del IRI para un año de baja actividad solar (1995) y alta actividad solar (1990).

La Figura A1.5 también muestra los valores de $B0$ predichos por el IRI utilizando las dos opciones, la estándar (línea roja) y Gulyaeva (línea azul) para dos años, uno de baja actividad solar (1995) y otro de alta actividad solar (1990). De esta comparación se observa que los valores de $B0$ obtenidos con la opción Gulyaeva del IRI predicen bastante bien la variación diurna en los meses de verano aunque no tan bien en los meses de invierno especialmente para alta actividad solar, donde la opción Gulyaeva del IRI da valores inferiores a lo esperado. Por lo que respecta a los valores de $B0$ obtenidos con la opción estándar del IRI, se observa que el IRI no predice bien la variación diurna, especialmente para baja actividad solar y durante los meses de primavera y otoño en los que da un valor muy inferior a lo esperado, especialmente durante el mediodía, y un valor superior durante la noche. Estos resultados concuerdan con los resultados obtenidos por Lei et al. (2004) para una estación de latitudes medias (Millstone Hill, 42.6°N , 288.5°E).

La Figura A1.6 muestra la variación temporal de $B1$ para diferentes años correspondientes a diferente actividad solar. Para todos los años se observa que el parámetro $B1$ presenta una variación diurna en verano y una variación semidiurna en invierno y, contrariamente al comportamiento de $B0$, los valores

de $B1$ al mediodía son inferiores a los valores de medianoche (resultados que concuerdan con Lei et al., 2004). También se observa una clara variación estacional, siendo los valores de $B1$ en verano inferiores a los de invierno, contrario al comportamiento de $B0$ (Mosert and Radicella, 1997 y Lei et al., 2004).

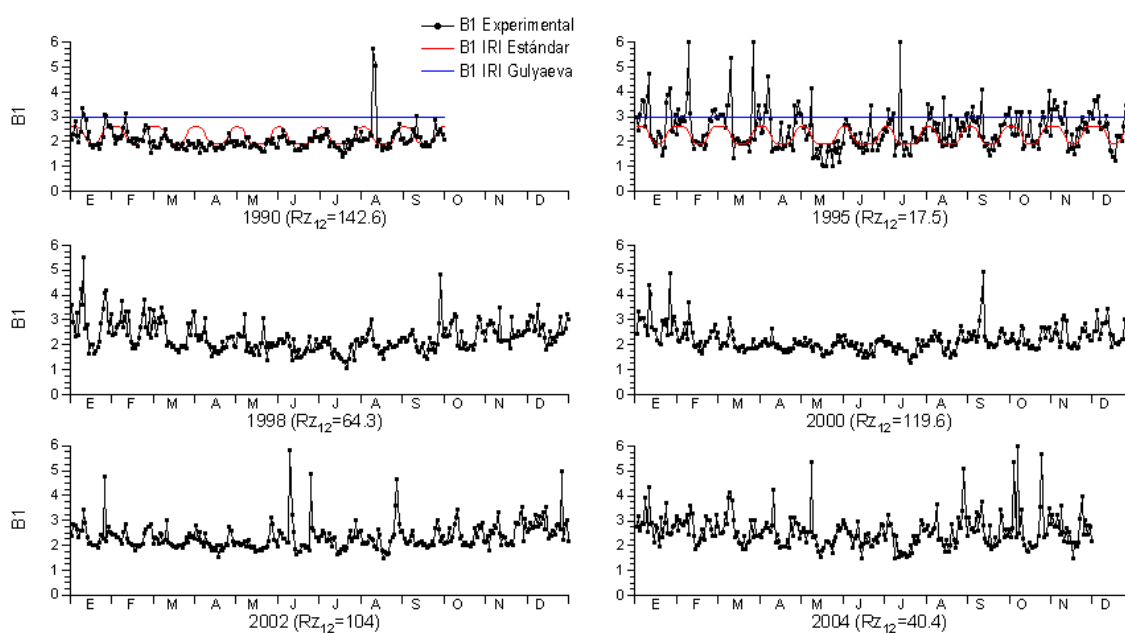


Figura A1.6. Lo mismo que la Figura A1.5 para el parámetro $B1$

Comparando los valores experimentales con los obtenidos por el IRI se observa que la opción Gulyaeva del IRI mantiene el valor de $B1=3$, sin reproducir ninguna variación temporal (línea azul). Sin embargo, la opción estándar del IRI (línea roja) permite una variación diurna entre 1.8 al mediodía y 2.6 por la noche pero no reproduce ni la variación estacional ni la variación debida a la actividad solar (Bilitza, 2001).

A1.3. Discusión

Los resultados anteriores muestran que el IRI no reproduce bien todos los parámetros ionosféricos. Mientras que el coeficiente de correlación lineal del ajuste entre los valores experimentales y los predichos es alrededor de 0.9 para parámetros como $foF2$, $hmF2$ y foE , éste no supera el 0.2 para parámetros como $D1$. El hecho de que la densidad electrónica de la capa F2 sea la contribución predominante al contenido total de electrones durante días

tranquilos hace necesario tener una buena predicción de los parámetros que definen el perfil de densidad electrónica de la capa F2. El IRI proporciona una buena predicción de f_oF2 y $hmF2$ pero no de $B0$ y $B1$, los parámetros que definen respectivamente el espesor y la forma del perfil de densidad electrónica del IRI de la capa F2. Por esta razón se han centrado los esfuerzos en analizar el comportamiento de estos dos parámetros para mejorar las predicciones actuales.

El comportamiento característico de $B0$ y $B1$ para la estación de Ebro muestra las siguientes variaciones temporales:

- Variación diurna: Variación diurna en los meses de verano siendo los valores de mediodía mayores que los de medianoche para el parámetro $B0$ y lo contrario para el parámetro $B1$. Variación semidiurna en los meses de invierno.
- Variación estacional: Los valores de verano son mayores que los de invierno para el parámetro $B0$ y lo contrario se observa para el parámetro $B1$.
- Variación con el ciclo solar: Los valores de $B0$ son mayores durante alta actividad solar y lo contrario ocurre para el parámetro $B1$.

Estas variaciones temporales se repiten sistemáticamente de manera que pueden ser modeladas utilizando funciones armónicas. En el capítulo siguiente se pretende modelar el comportamiento definido anteriormente a latitudes medias y verificar las mejoras potenciales respecto a la versión actual del IRI.

CAPÍTULO A2:

MODELO LOCAL DE LOS PARÁMETROS *B0* Y *B1* PARA DÍAS DE CALMA

En el capítulo anterior se ha determinado el comportamiento típico de los parámetros *B0* y *B1* para días de calma en la estación ionosférica del Observatorio del Ebro (40.8° N, 0.5° E) durante un intervalo de 17 años. Se ha identificado un comportamiento sistemático con las siguientes variaciones temporales: diurna, estacional y con el ciclo solar. El objetivo del presente capítulo es simular el comportamiento anterior mediante funciones analíticas lo más simples posible y que mejore la predicción actual del IRI. La metodología para abordar este objetivo se basará en el análisis de Fourier, debido al carácter periódico de las variaciones temporales de estos parámetros. Con ello se pretende construir un modelo basado en funciones armónicas. Para ello se utilizarán los registros ionosféricos del Observatorio del Ebro revisados por operador de 1988 hasta 2004 (lo que corresponde a 14 años de datos revisados con la excepción de algunos meses por falta de registros). Los datos de 2005 a 2007 se utilizarán para comprobar la validez de dicho modelo. Asimismo se evaluará la posibilidad de extender esta técnica de modelado a otras latitudes y a otros parámetros ionosféricos.

A2.1. Modelo Local para Ebro

A2.1.1 Simulación de la variación diurna y estacional

El comportamiento típico de los parámetros $B0$ y $B1$ en la estación de Ebro presenta una clara variación diurna modulada por una variación estacional. Los resultados de un análisis espectral Lomb-Scargle (Lomb, 1976; Scargle, 1982) sobre las series muestran que las variaciones diurnas y semidiurnas son estadísticamente significativas. La Figura A2.1 muestra la potencia normalizada para Junio de 2006 y Febrero de 2005 para los dos parámetros, $B0$ y $B1$. Los periodos dominantes para el parámetro $B0$ son aquellos que corresponden a la componente diurna (24h) en verano y a la componente semidiurna (12h) en invierno. El parámetro $B1$ es más ruidoso, aún así, se puede distinguir la componente diurna y semidiurna como los períodos más dominantes.

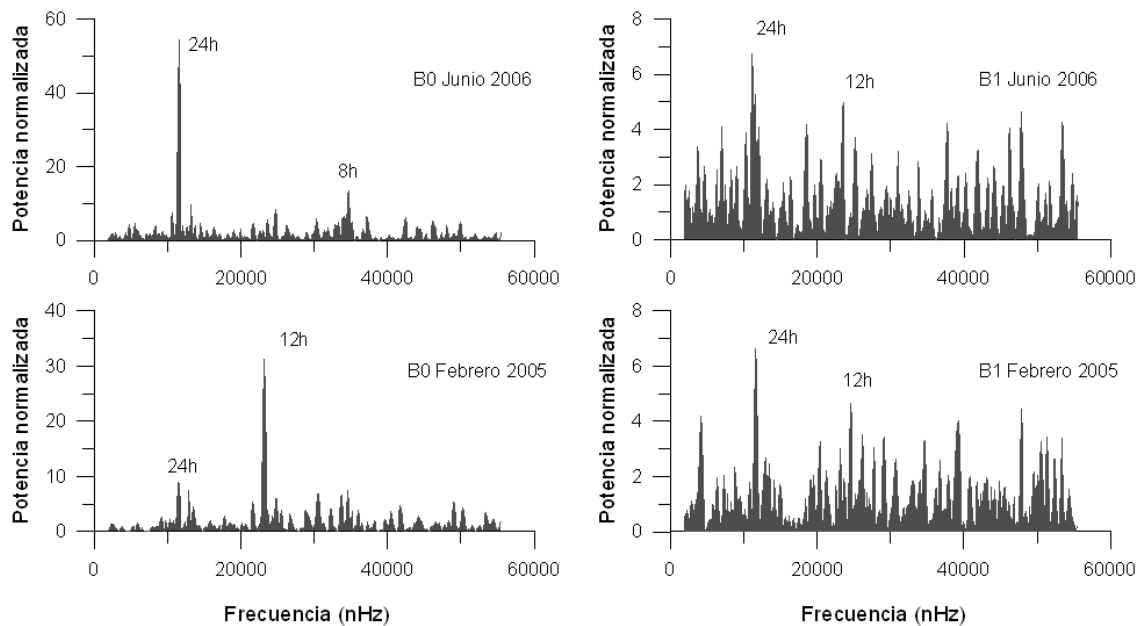


Figura A2.1. Potencia Lomb-Scargle normalizada para los parámetros $B0$ y $B1$ durante el periodo de 5 horas a 7 días (Lomb, 1976; Scargle, 1982). Los gráficos de arriba corresponden al mes de Junio de 2006 y los de abajo al mes de Febrero de 2005. La potencia normalizada con valores superiores a 11 son estadísticamente significantes a un nivel de confianza de 0.95.

Estos resultados se repiten para la mayoría de los meses analizados. Por ello, lo primero que se ha hecho ha sido simular estas variaciones ajustando, para cada mes en cuestión, la siguiente función armónica a los valores experimentales de $B0$ y $B1$ obtenidos en el capítulo anterior:

$$f(t) = A + B \cos(\omega_1 t - \psi_1) + C \cos(\omega_2 t - \psi_2) \quad (A2.1)$$

donde t corresponde al tiempo (0–23 h), $\omega_1 = 2\pi/24$ y $\omega_2 = 2\pi/12$ son las frecuencias angulares que representan respectivamente las variaciones diurna y semidiurna y ψ_1 y ψ_2 corresponden a las fases. Los coeficientes A, B y C son en cada caso: el valor medio del parámetro $B0$ ó del $B1$, la amplitud diurna y la amplitud semidiurna respectivamente. La variación estacional se ha introducido en el modelo ajustando la siguiente función armónica a los coeficientes A, B y C que se obtienen de cada ajuste mensual:

$$g(T) = a_i + b_i \cos(\Omega_1 T - \phi_{1i}) + c_i \cos(\Omega_2 T - \phi_{2i}) \quad (A2.2)$$

y la función $\Phi(T)$ a las fases ψ_1 y ψ_2 :

$$\Phi(T) = a'_j + b'_j \cos(\Omega_1 T - \phi'_{1j}) + c'_j \cos(\Omega_2 T - \phi'_{2j}) \quad (A2.3)$$

donde T corresponde al tiempo, en este caso 1–12 meses, $\Omega_1=2\pi/12$ y $\Omega_2=2\pi/6$ son las frecuencias angulares que corresponden a la variación anual y semianual respectivamente. Los coeficientes a_i , b_i y c_i son la media anual, la amplitud anual y la amplitud semianual respectivamente de cada coeficiente (A, B y C) y ϕ_{1i} y ϕ_{2i} son sus respectivas fases anuales y semianuales (i varía de 0 a 2 según nos referimos a A, B ó C respectivamente). Los coeficientes a'_j , b'_j y c'_j son la media anual, la amplitud anual y la amplitud semianual respectivamente de las fases (ψ_1 y ψ_2) y ϕ'_{1j} y ϕ'_{2j} son sus respectivas fases anuales y semianuales (j varía de 1 a 2 según nos referimos a ψ_1 ó ψ_2).

La expansión global de las ecuaciones anteriores se puede escribir como:

$$\begin{aligned} P(T) = & a_0 + b_0 \cos(\Omega_1 T - \phi_{10}) + c_0 \cos(\Omega_2 T - \phi_{20}) + \\ & [a_1 + b_1 \cos(\Omega_1 T - \phi_{11}) + c_1 \cos(\Omega_2 T - \phi_{21})] \cos(\omega_1 t - \{a'_1 + b'_1 \cos(\Omega_1 T - \phi'_{11}) + c'_1 \cos(\Omega_2 T - \phi'_{21})\}) + \\ & [a_2 + b_2 \cos(\Omega_1 T - \phi_{12}) + c_2 \cos(\Omega_2 T - \phi_{22})] \cos(\omega_2 t - \{a'_2 + b'_2 \cos(\Omega_1 T - \phi'_{12}) + c'_2 \cos(\Omega_2 T - \phi'_{22})\}) \end{aligned} \quad (A2.4)$$

donde P hace referencia a cualquiera de los dos parámetros, $B0$ ó $B1$. Los

coeficientes (amplitudes y fases) que definen esta función se obtienen ajustando por mínimos cuadrados la ecuación A2.4 a los valores experimentales. El ajuste anterior se ha efectuado para cada año y cada parámetro. El resultado de este análisis ha generado un conjunto de 14 grupos de coeficientes (uno por año) para cada parámetro. La Figura A2.2 muestra la función que mejor ajusta al parámetro $B0$ para diferentes años y la Figura A2.3 para el parámetro $B1$. Nótese que cada año se corresponde con su determinado nivel de actividad solar.

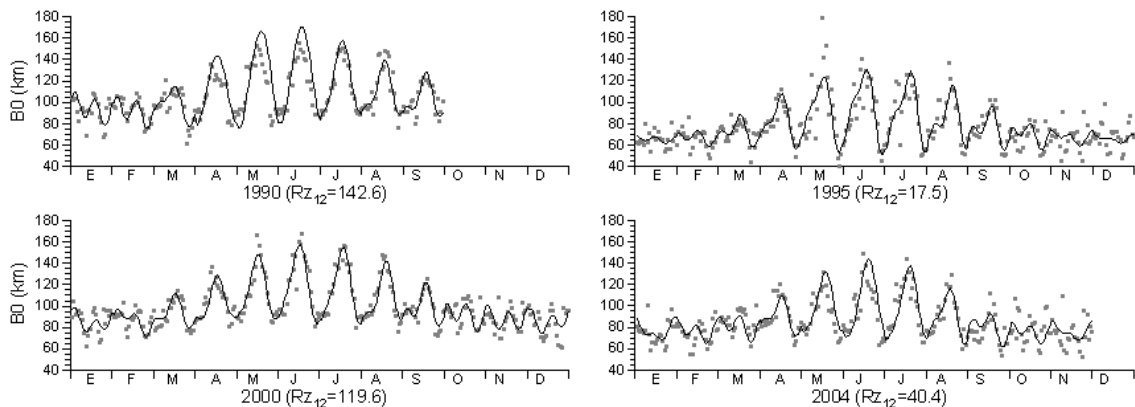


Figura A2.2. Ajuste de la función armónica definida en la ecuación A2.4 a los valores experimentales de Ebro para varios años de distinta actividad solar para $B0$. Los puntos grises son los valores experimentales y la línea negra es la función que mejor se ajusta a estos parámetros.

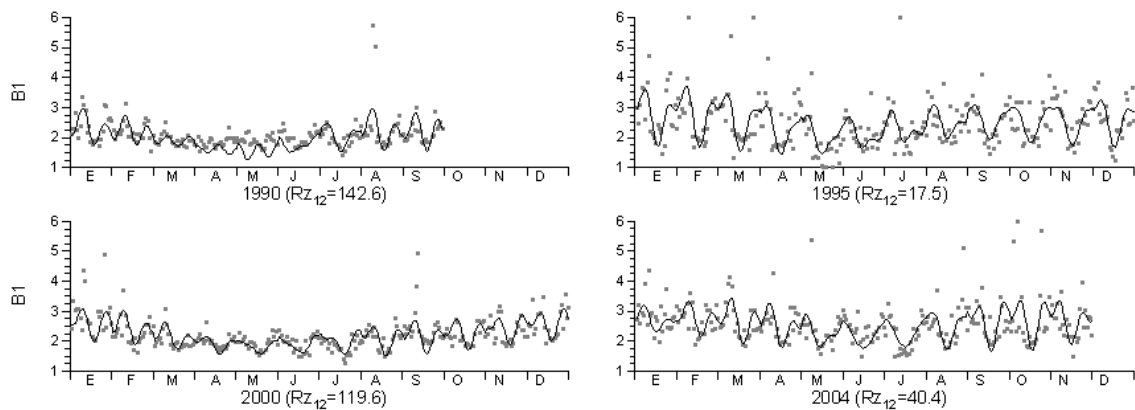


Figura A2.3. Lo mismo que la Figura A2.2 para $B1$

A2.1.2 Dependencia con la actividad solar. Coeficientes del Modelo Local

El comportamiento típico de $B0$ y $B1$ en la estación de Ebro también muestra una variación con la actividad solar. Para introducir esta variación en el modelo se ha buscado la posible relación matemática de cada uno de los coeficientes

de la Ecuación A2.4 con la actividad solar. Se ha utilizado Rz_{12} como índice de la actividad solar. Estudios anteriores demuestran que Rz_{12} es el índice más adecuado para analizar el efecto de la actividad solar en la región F2 mientras que el índice F10.7 (flujo solar a la longitud de onda de 10.7 cm) es el más adecuado para analizar la región de la ionosfera donde la ionización está fuertemente controlada por la radiación solar (región E y F1) (Bilitza, 2001). De todas formas se ha buscado la dependencia de los coeficientes de la ecuación (A2.4) con cada uno de los dos índices, Rz_{12} y F10.7 y, según lo esperado, se obtienen mejores ajustes utilizando el índice Rz_{12} (ver Figura A2.10 más adelante).

Con la pretensión de obtener un modelo lo más simple posible se ha buscado una dependencia lineal de los coeficientes de los ajustes anuales anteriores (Ec. A2.4) con la actividad solar. Los coeficientes $a_0(B0)$, $a_0(B1)$, $a_1(B0)$, $a_1(B1)$, $a'_2(B0)$, $a'_2(B1)$, $\phi_{21}(B1)$, $\phi_{12}(B0)$ y $\phi_{22}(B1)$ presentan una clara dependencia con el índice Rz_{12} con un coeficiente de correlación lineal significativamente alto. Los demás coeficientes no muestran ninguna tendencia clara con la actividad solar que pueda simularse con funciones matemáticas simples. Por ello, dichos coeficientes se han considerado constantes e iguales al valor medio de la serie. La Figura A2.4 muestra ejemplos de la dependencia lineal de algunos coeficientes con la actividad solar y de aquellos sin dependencia lineal clara.

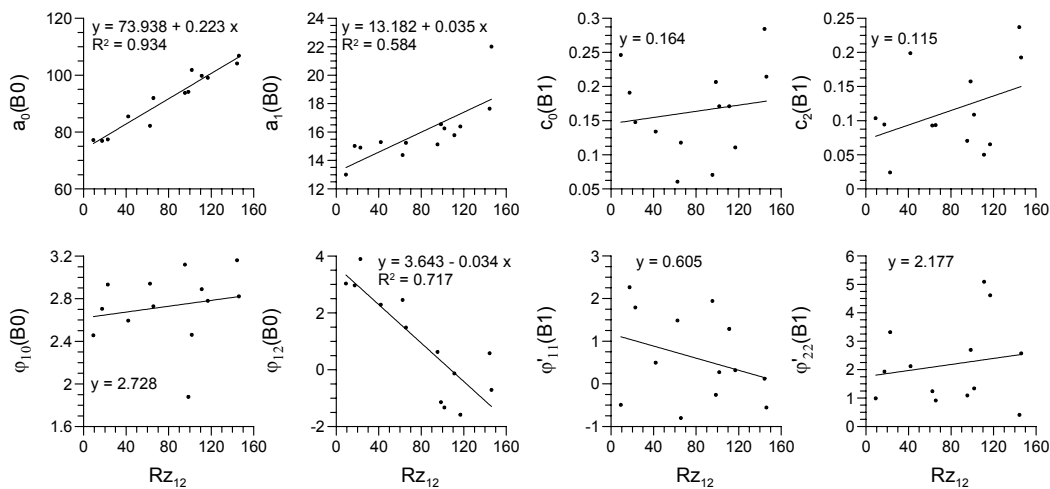


Figura A2.4. Dependencia de algunos de los coeficientes de la ecuación A2.4 con la actividad solar (índice Rz_{12}). Las líneas representan el mejor ajuste lineal para cada caso y se muestran las ecuaciones correspondientes al ajuste y el coeficiente de correlación. Aquellos casos en los que no se observa una dependencia lineal clara el valor del coeficiente se ha considerado constante e igual al valor medio.

La Tabla A2.1 muestra los coeficientes que definen el modelo final. Como resultado se han obtenido los Modelos Locales que simulan el comportamiento de $B0$ y $B1$ en la estación de Ebro, dependiendo únicamente del tiempo (hora y mes) y de la actividad solar (Rz_{12}).

Tabla A2.1. Coeficientes del Modelo Local (ML) que simula los parámetros $B0$ y $B1$ en Ebro de acuerdo con la ecuación A2.4. Rz_{12} es el promedio anual de los valores medios mensuales del número de Wolf.

	B0	B1
a₀	73.938+0.223Rz ₁₂	2.726-0.0041Rz ₁₂
b₀	14.93	0.300
c₀	6.122	0.164
φ₁₀	2.728	-0.459
φ₂₀	4.8356	0.83
a₁	13.182+0.035Rz ₁₂	0.575-0.0027Rz ₁₂
b₁	14.645	0.093
c₁	7.382	0.09
φ₁₁	2.763	3.452
φ₂₁	-1.060	2.510-0.019Rz ₁₂
a₂	6.945	0.297
b₂	3.014	0.179
c₂	2.733	0.115
φ₁₂	3.643-0.034Rz ₁₂	-0.887
φ₂₂	1.93	2.918-0.015Rz ₁₂
a'₁	2.252	0.174
b'₁	1.284	0.398
c'₁	0.681	0.419
φ'₁₁	2.674	0.605
φ'₂₁	2.407	1.849
a'₂	0.083+0.0033Rz ₁₂	2.469+0.0067Rz ₁₂
b'₂	0.568	0.734
c'₂	0.589	0.645
φ'₁₂	1.698	-0.507
φ'₂₂	0.849	2.177

A2.1.3 Validación del Modelo Local. Comparación con el IRI

Con el modelo descrito anteriormente (Ec. A2.4 y Tabla A2.1) se han simulado los parámetros $B0$ y $B1$ en la estación de Ebro para todo el intervalo analizado y se han comparado con los valores experimentales y con los predichos por el IRI. Los resultados de estas comparaciones nos indican la mejora del Modelo Local respecto el modelado del IRI. La Figura A2.5 muestra un ejemplo de estas comparaciones para un año de baja actividad solar (1995, $Rz_{12}=17.5$) y un año de alta actividad solar (2000, $Rz_{12}=119.6$). Los resultados muestran que la simulación con el Modelo Local está correlacionada linealmente con los valores experimentales mejor que el IRI. El índice de correlación lineal mejora en un factor 2.5 para 1995 y 1.4 para 2000 para el parámetro $B0$ y en un factor 1.2 y 3.0 respectivamente para cada año en el caso de $B1$.

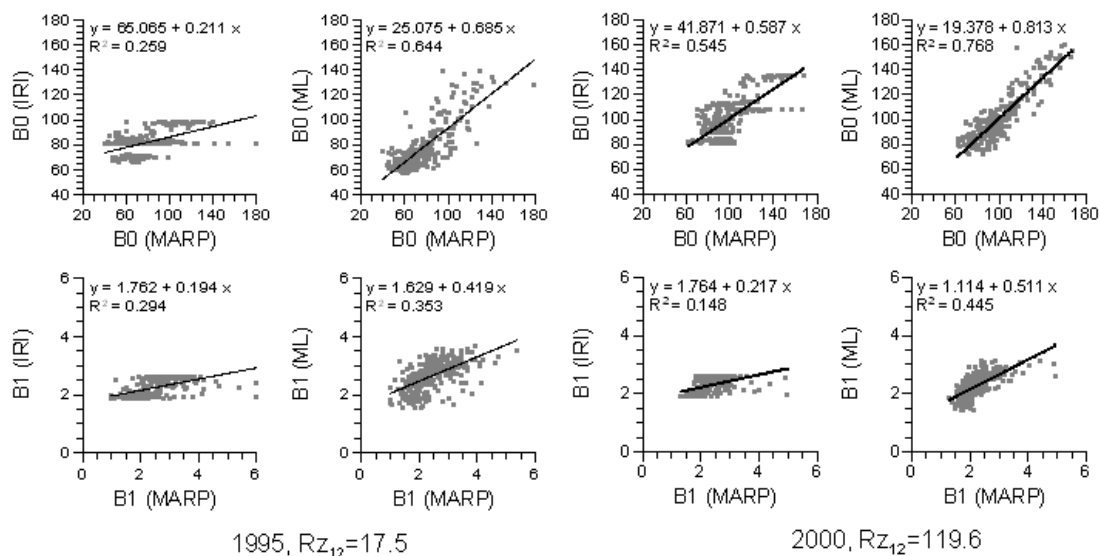


Figura A2.5. Comparación entre valores experimentales de $B0$ y $B1$ de Ebro con aquellos obtenidos por el IRI2001 y los obtenidos a partir del Modelo Local para diferente actividad solar. Las líneas representan el mejor ajuste lineal en cada caso y se muestran las ecuaciones correspondientes al ajuste y el coeficiente de correlación.

La Figura A2.6 muestra los coeficientes de correlación lineal de las comparaciones realizadas para todo el período analizado. Los resultados muestran que la simulación de $B0$ del Modelo Local se ajusta mejor a los parámetros experimentales que la predicción de $B0$ de la opción estándar del IRI para todos los años. Esta mejora, aunque no tan significativa, también se observa con respecto a la predicción de $B0$ de la opción Gulyaeva del IRI. Las simulaciones del Modelo Local también presentan una mejor correlación lineal

con los valores experimentales de $B1$ que la opción estándar del IRI. Esta mejora es más notable durante los años de alta actividad solar, en los que el índice de correlación lineal del ajuste entre los valores experimentales y la opción estándar del IRI no supera el 0.2 mientras que el índice de correlación lineal del ajuste con los valores simulados por el Modelo Local supera el 0.4 (hay una mejora de un factor 2). Sin embargo, se observa que la predicción de $B1$ del IRI está correlacionada linealmente con los valores experimentales mejor que la simulación del Modelo Local para dos años, 1989 y 1996. Este hecho podría deberse a que estos dos años disponen de pocos datos experimentales a los que se puede ajustar la función matemática propuesta por el Modelo Local (Ec. A2.4) para obtener los coeficientes correspondientes a estos años en cuestión. Lo mismo ocurre en 1989 para el parámetro $B0$, donde el índice de correlación lineal del ajuste entre los valores experimentales y el Modelo Local o la opción estándar del IRI es prácticamente 0.

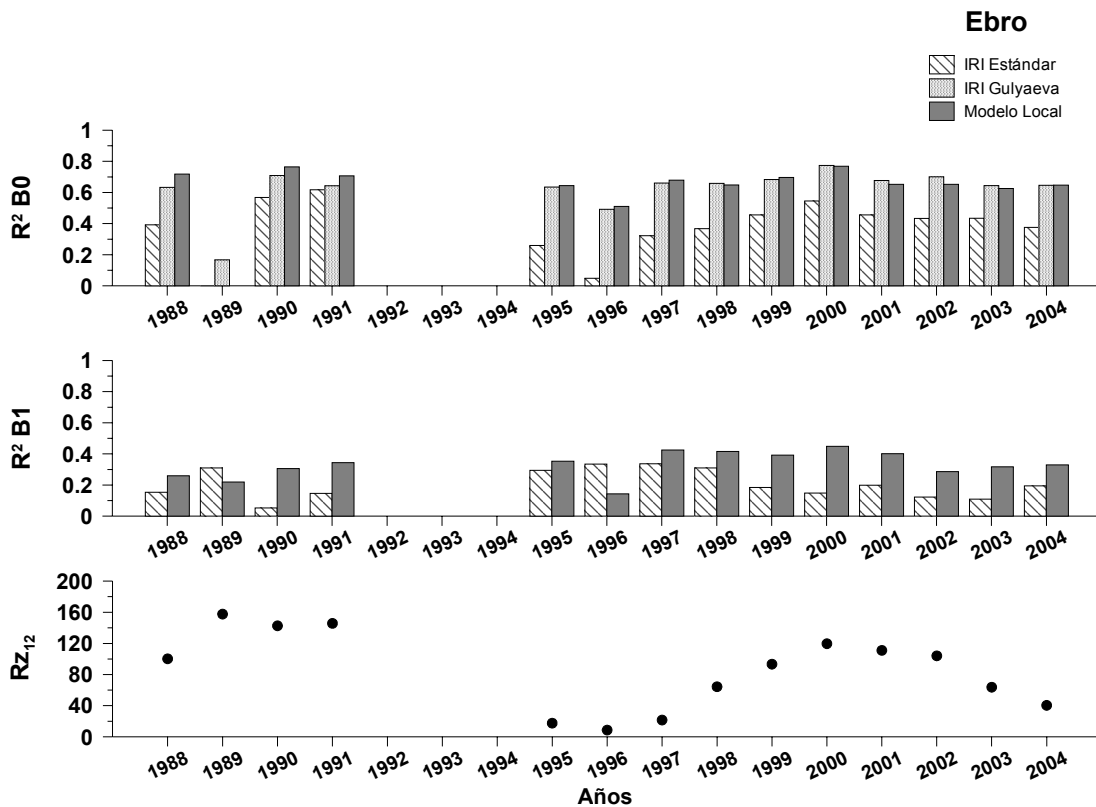


Figura A2.6. Coeficiente de correlación lineal del ajuste entre los valores experimentales y el Modelo Local y el IRI2001 para cada parámetro a lo largo de todo el período de análisis en la estación de Ebro. El panel inferior muestra la actividad solar a partir del índice RZ_{12} .

Sethi and Mahajan (2002) y Lei et al. (2004) observaron en sus respectivos trabajos que el coeficiente de correlación lineal del ajuste entre los valores

experimentales y la predicción del IRI para los parámetros $B0$ y $B1$ depende de la actividad solar. La Figura A2.7 muestra este efecto para el índice de correlación lineal del ajuste entre los valores experimentales y los modelados por el IRI en todo el periodo analizado. El IRI ajusta mejor a los valores experimentales de $B0$ durante los años de alta actividad solar, obteniendo un coeficiente de correlación lineal del ajuste próximo a 0.6 mientras que este coeficiente de correlación lineal es inferior a 0.4 durante años de baja actividad solar. Para el parámetro $B1$, este ajuste es mejor durante los años de baja actividad solar. El coeficiente de correlación lineal del ajuste de los valores experimentales con el Modelo Local ha perdido casi esta dependencia con la actividad solar. Se observa una ligera tendencia a obtener una mejor correlación para los años de alta actividad solar que podría ser debida al hecho de que la mayoría de los datos utilizados en el análisis corresponden a años de alta actividad solar. Aún así, esta tendencia es pequeña comparada con la del IRI. La Figura A2.7 muestra que, en general, el Modelo Local ajusta mejor a los parámetros experimentales que el IRI, tanto para $B0$ como $B1$ en la estación de Ebro. El coeficiente de correlación de este ajuste mejora en un factor 2 en promedio.

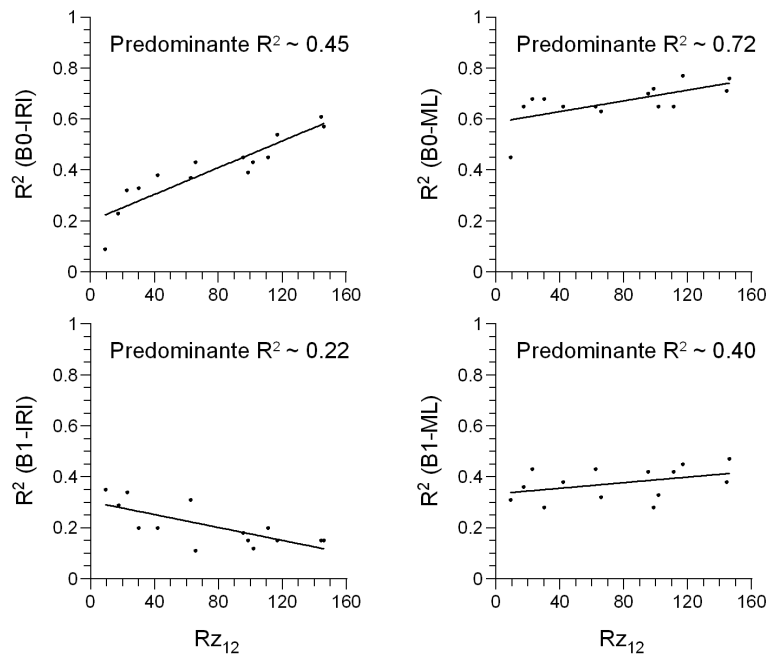


Figura A2.7. Dependencia con la actividad solar del coeficiente de correlación lineal del ajuste entre los valores experimentales y el IRI2001 (izquierda) y con el Modelo Local (derecha) para los parámetros $B0$ y $B1$ en Ebro.

Las Figuras A2.8 y A2.9 muestran, respectivamente, las variaciones temporales de los parámetros $B0$ y $B1$ simulados por el Modelo Local y su comparación con los valores experimentales y los predichos por el IRI en la estación de Ebro. Los resultados muestran que el Modelo Local simula las variaciones diurnas, semidiurnas, estacionales y con el ciclo solar de los valores experimentales mejor que el IRI. La opción estándar del IRI no reproduce las variaciones semidiurnas en invierno de los parámetros $B0$ y $B1$, subestima las amplitudes diurnas del parámetro $B0$ y no reproduce la variación estacional y con el ciclo solar del parámetro $B1$. La opción Gulyaeva del IRI, aunque da una predicción mejor del parámetro $B0$ que la opción estándar, subestima los valores nocturnos durante el invierno de alta actividad solar. Las simulaciones del Modelo Local corrigen estas limitaciones.

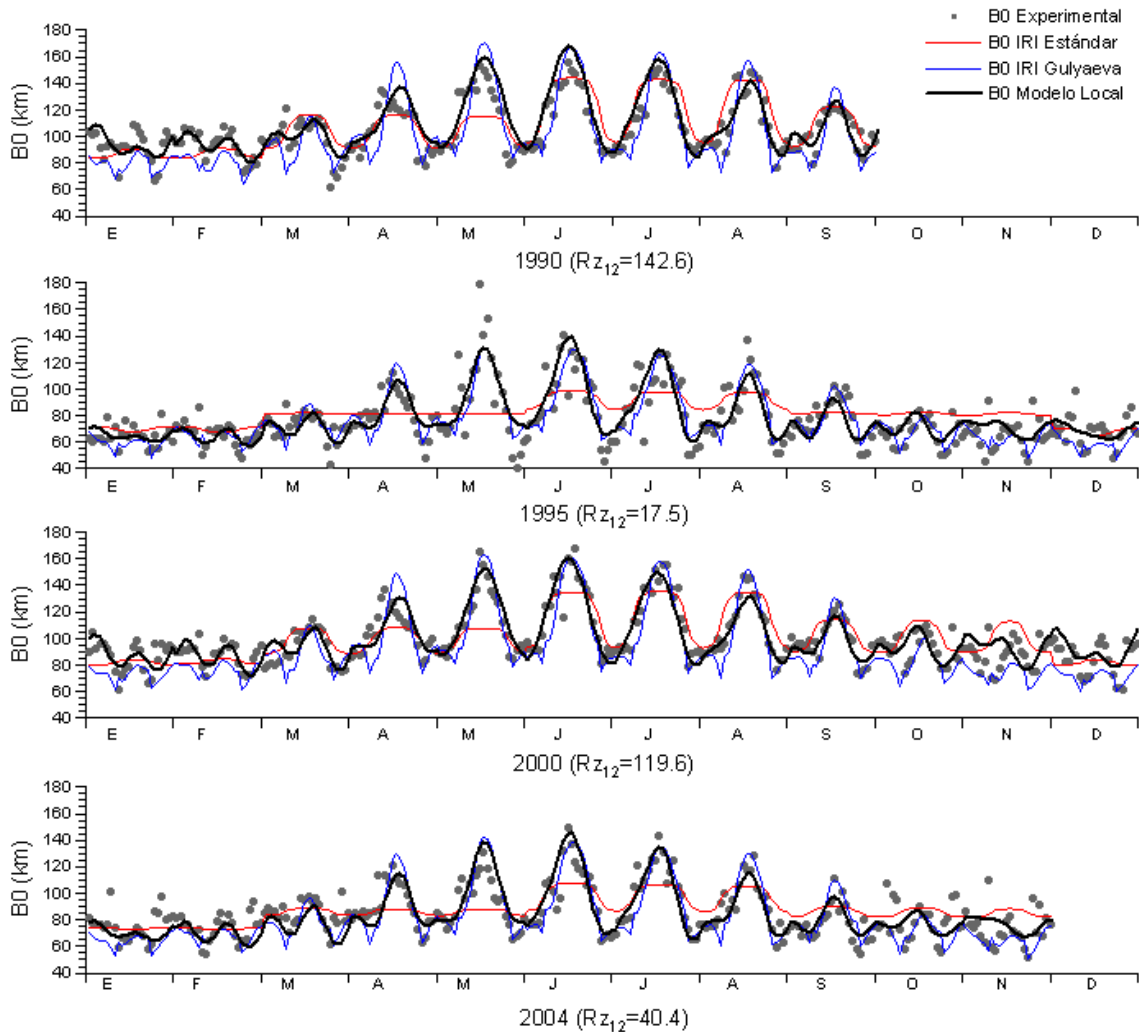


Figura A2.8. Comparación de las variaciones temporales del parámetro $B0$ obtenido a partir de del Modelo Local (línea negra), la opción estándar del IRI2001 (línea roja) y la opción Gulyaeva del IRI2001 (línea azul) en Ebro. Los puntos grises son los valores experimentales.

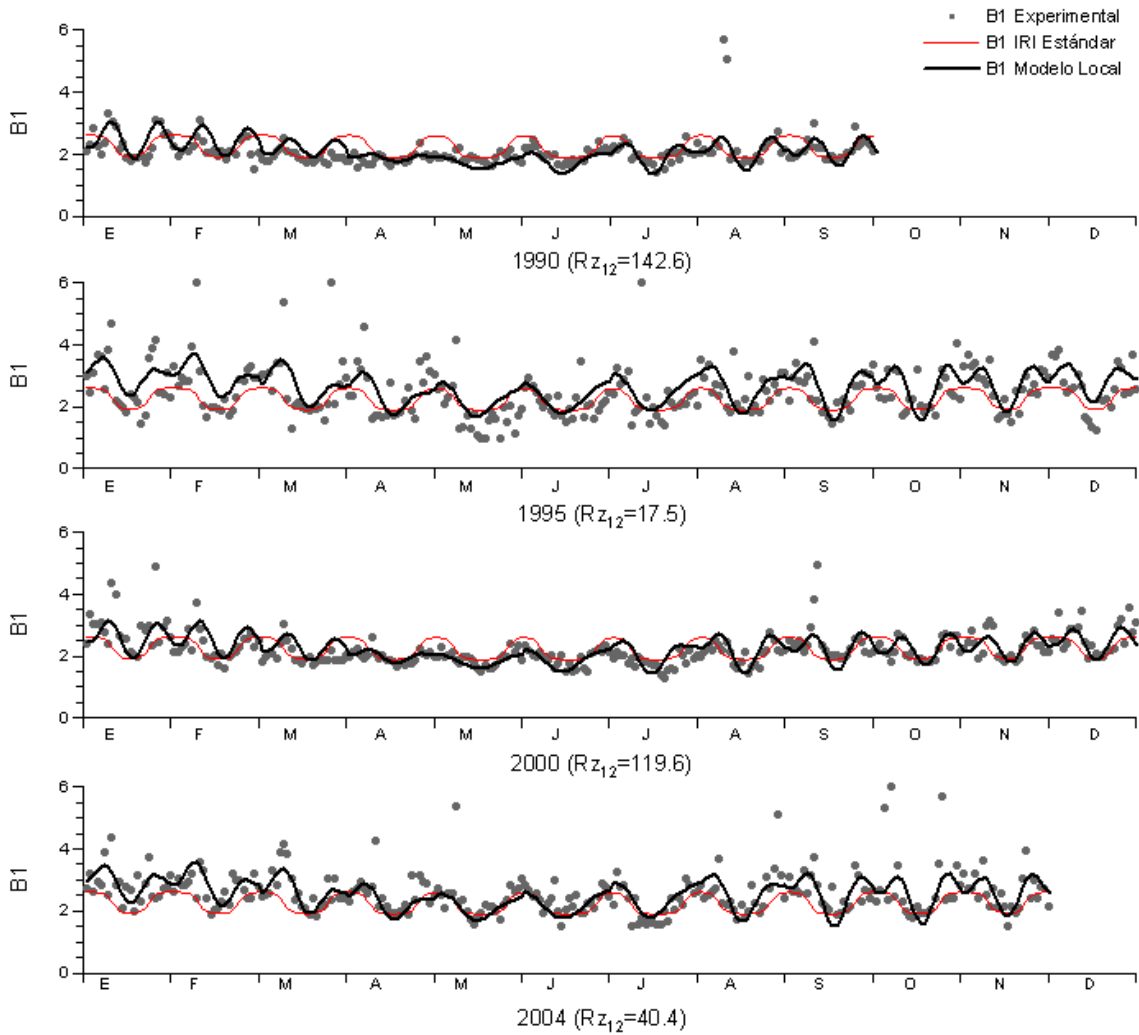


Figura A2.9. Comparación de las variaciones temporales del parámetro B1 obtenido a partir de del Modelo Local (línea negra) y la opción estándar del IRI2001 (línea roja) en Ebro. Los puntos grises son los valores experimentales.

Como ya se ha comentado antes, se ha aplicado la misma metodología para construir un Modelo Local para cada parámetro dependiente del índice F10.7 para verificar qué índice genera un modelo mejor. La Figura A2.10 muestra la comparación de los coeficientes de correlación lineal del ajuste entre los valores experimentales y los valores simulados por el Modelo Local dependiente del índice Rz_{12} (izquierda Figura A2.10) y los valores simulados por el Modelo Local dependiente del índice F10.7 (derecha Figura A2.10). Los resultados muestran que, en ambos parámetros, los modelos locales dependientes del índice Rz_{12} ajustan mejor que los modelos parametrizados con el índice F10.7. Los coeficientes de correlación de los ajustes con Rz_{12} son un 13-14 % superiores respecto F10.7.

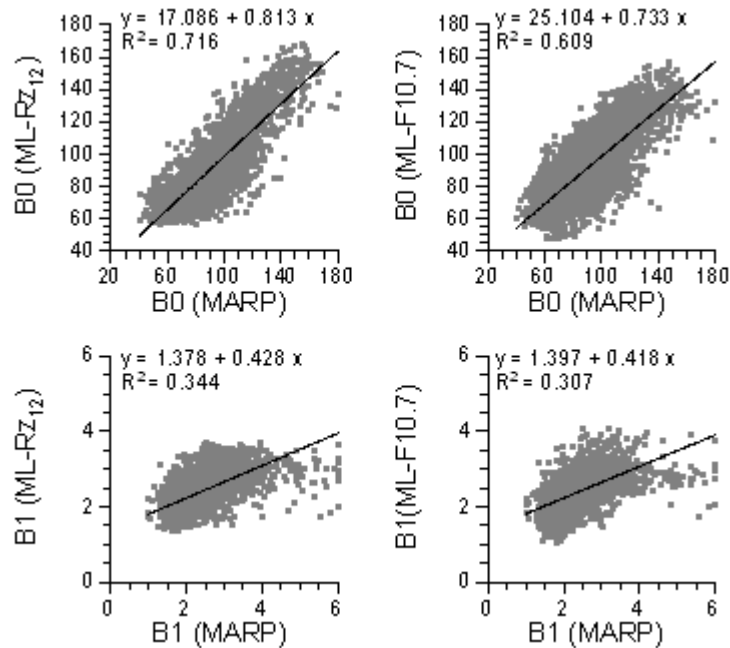


Figura A2.10. Comparación entre los valores experimentales de $B0$ y $B1$ con aquellos obtenidos por el Modelo Local dependiente de Rz_{12} (izquierda) y el Modelo Local dependiente de $F10.7$ (derecha) para toda la serie temporal. Las líneas representan el mejor ajuste lineal para cada caso y se muestran las ecuaciones correspondientes al ajuste y el coeficiente de correlación.

Para poder comprobar la aplicabilidad del Modelo Local en predicción, se han obtenido los parámetros $B0$ y $B1$ a partir del Modelo Local para varios años que no han sido utilizados en la obtención de dicho modelo (2005, 2006 y 2007). Se ha utilizado la Ecuación A2.4 con los coeficientes definidos en la Tabla A2.1 y el valor de Rz_{12} correspondiente a cada año en cuestión. La Figura A2.11 muestra la comparación entre los valores de $B0$ experimentales, los predichos por el IRI y los predichos por el Modelo Local para el año 2005 ($Rz_{12}=29.8$). Los resultados de esta comparación muestran que el Modelo Local predice las variaciones temporales de $B0$ y $B1$ mejor que el IRI, especialmente que la opción estándar.

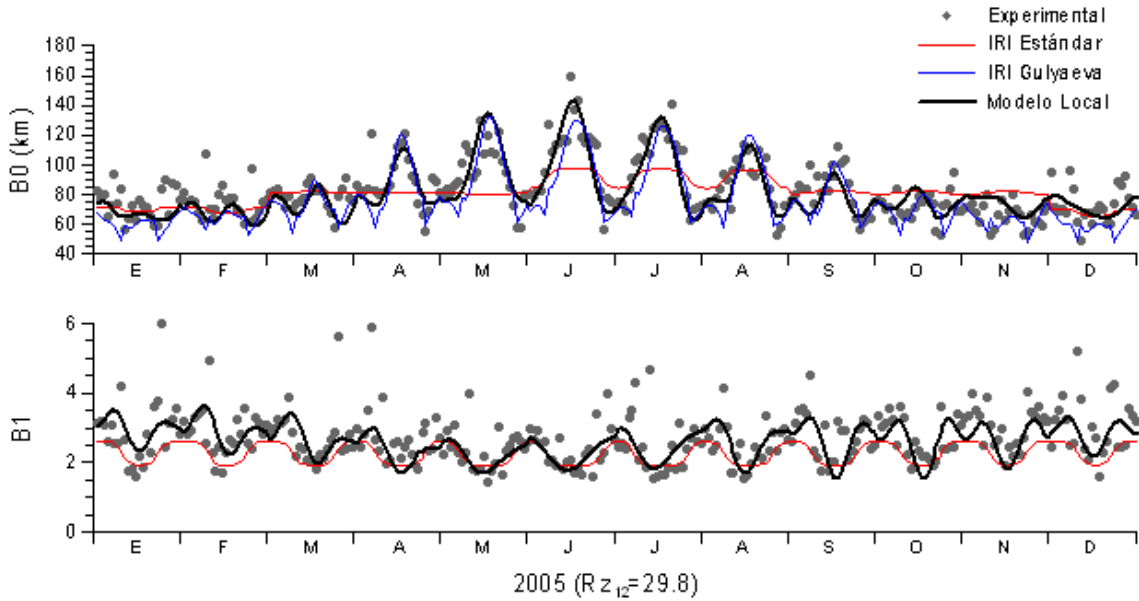


Figura A2.11. Comparación de las variaciones temporales de los parámetros B0 y B1 obtenidos a partir del Modelo Local (línea negra), la opción estándar del IRI2001 (línea roja) y la opción Gulyaeva del IRI2001 (línea azul) para la estación de Ebro el año 2005. Los puntos grises son los valores experimentales.

La Figura A2.12 muestra los coeficientes de correlación lineal del ajuste de los valores experimentales con los valores predichos por el IRI y los valores predichos por el Modelo Local para los años 2005, 2006 y 2007.

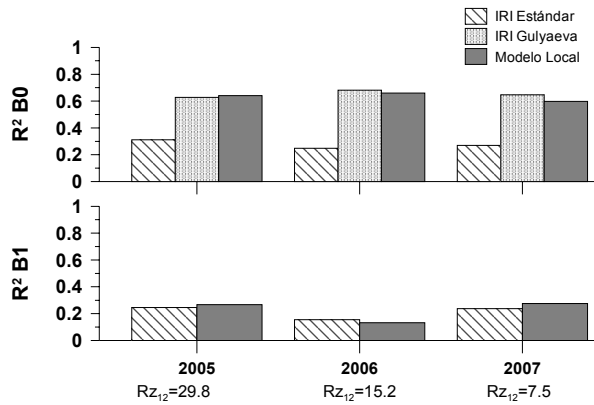


Figura A2.12. Coeficiente de correlación lineal del ajuste entre los valores experimentales con los valores predichos por el Modelo Local y los valores predichos por el IRI2001 para los años y parámetros indicados en la estación de Ebro.

La predicción del Modelo Local del parámetro *B0* mejora en un factor 2 con respecto la opción estándar del IRI. Esta mejora no es tan significativa para el parámetro *B1* debido a la mayor dispersión que presenta este parámetro. Comparando las predicciones del Modelo Local con las predicciones de la

opción Gulyaeva del IRI para el parámetro $B0$ se observa que éstas no varían significativamente. Es importante mencionar que este buen ajuste de la opción Gulyaeva del IRI se produce básicamente a latitudes medias pero no ocurre lo mismo en latitudes ecuatoriales y altas donde la opción Gulyaeva del IRI subestima significativamente los valores experimentales de $B0$ (Bilitza, 2001; Altadill et al., 2009).

A2.2. Extensión del Modelo Local a otras latitudes

En esta sección se pretende analizar la validez de la formulación del Modelo Local a otras estaciones de latitudes medias. Se han utilizado los ionogramas de sondeo vertical revisados por operador de la estación de El Arenosillo (37.1°N, 353.3°E) obtenidos por una digisonda DGS 256 durante el intervalo de tiempo de 1993 a 2004. La larga base de datos de El Arenosillo permite construir un Modelo Local para esta estación de manera similar al obtenido para la estación de Ebro. También se han utilizado los ionogramas de incidencia vertical revisados por operador de la estación de Pruhonice (50.0°N, 14.6°E) obtenidos por una digisonda DPS4 y los ionogramas de incidencia vertical escalados automáticamente por el ARTIST (*Automatic Real Time Ionogram Scaler with true Height*; Huang and Reinisch, 1996b) de la estación de Atenas (38.0°N, 23.5°E), Juliusruh (54.6°N, 13.4°E) y Grahamstown (33.3°S, 26.5°E) para el 2004. Aunque para estas estaciones sólo se dispone de un año de datos, es suficiente para comprobar la validez de esta formulación en simular las variaciones diurnas y estacionales en otras latitudes diferentes a las de Ebro. Los valores experimentales de $B0$ y $B1$ se han obtenido a partir del perfil mensual representativo para cada mes del año de cada estación del mismo modo que se realizó con los datos de Ebro (Huang and Reinisch, 1996a).

A2.2.1 Análisis y resultados para El Arenosillo

El análisis del comportamiento de los parámetros $B0$ y $B1$ para la estación de El Arenosillo muestra unas variaciones temporales similares a las observadas en la estación de Ebro. El parámetro $B0$ presenta una clara variación diurna en verano, siendo los valores de mediodía mayores que los de la noche y una

variación semidiurna en invierno. Estas variaciones a su vez están moduladas por una variación estacional y con el ciclo solar. Comparando con las predicciones del IRI, se observa que la opción Gulyaeva reproduce este comportamiento mejor que la opción estándar (Figura A2.13).

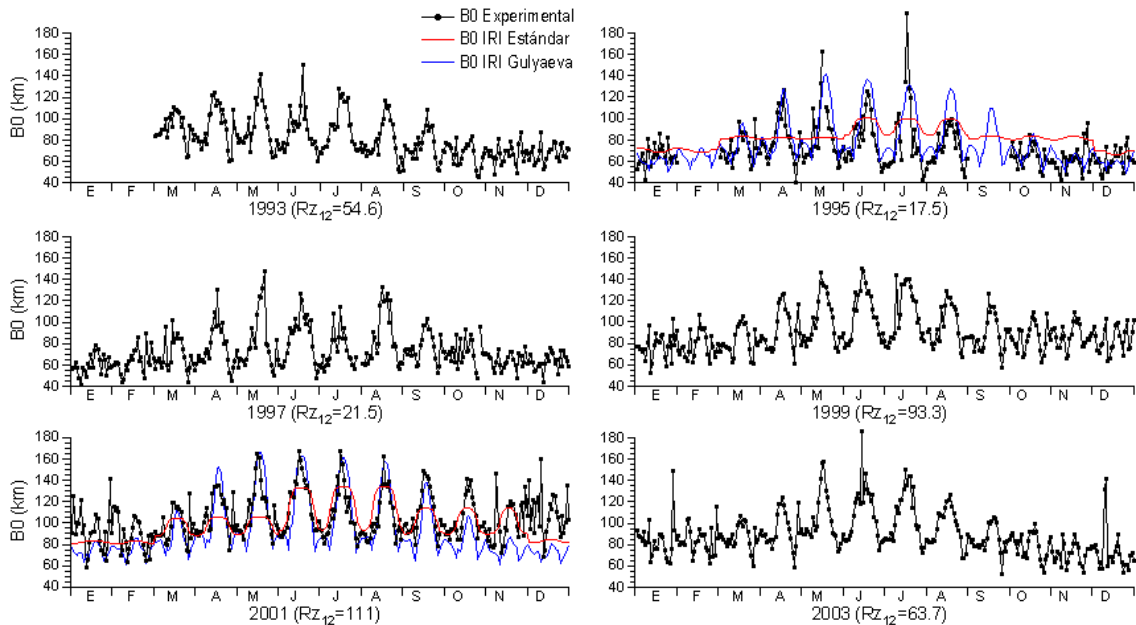


Figura A2.13. Variación temporal de B0 para diferente actividad solar (puntos). Se muestra la variación temporal de B0 predicha por el IRI2001 utilizando las dos opciones, en rojo B0 calculado a partir de la opción estándar del IRI y en azul B0 calculado a partir de la opción Gulyaeva del IRI para un año de baja actividad solar (1995) y alta actividad solar (2001). Datos de la estación de El Arenosillo.

El parámetro $B1$ (Figura A2.14) muestra una variación diurna clara en verano y una variación semidiurna en invierno que también están moduladas por una variación estacional y con el ciclo solar. Igual que ocurre en la estación de Ebro, el parámetro $B1$ de la estación de El Arenosillo presenta una mayor dispersión que el parámetro $B0$, especialmente durante años de baja actividad solar.

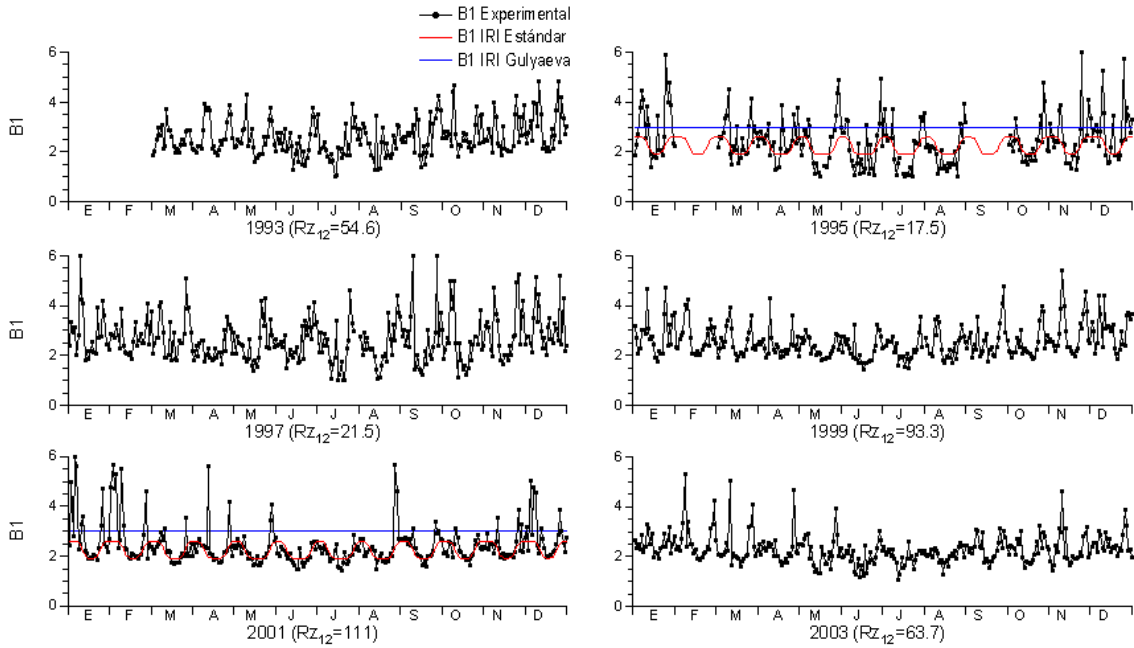


Figura A2.14. Lo mismo que la Figura A2.13 para B1

El hecho de que las variaciones temporales de los parámetros $B0$ y $B1$ de El Arenosillo tengan un carácter periódico similar a los de Ebro implica que se pueda utilizar la misma formulación para obtener un Modelo Local válido para esta estación. Se ha ajustado por mínimos cuadrados la Ec. A2.4 a los valores experimentales de $B0$ y $B1$ de El Arenosillo para cada año, obteniendo así los coeficientes de la función armónica (Ec. A2.4) que mejor ajusta para cada año. Se ha buscado una dependencia entre los coeficientes de estos ajustes anuales y la actividad solar (Rz_{12}). Aquellos coeficientes que no presentan una clara dependencia con la actividad solar (hasta segundo orden) se han considerado constantes e igual a la media. Los coeficientes $a_0(B0)$, $a_0(B1)$, $a_1(B0)$, $a_1(B1)$, $b_1(B0)$, $c_1(B0)$, $b_2(B0)$, $c_2(B1)$, $a'_1(B1)$, $c'_1(B0)$, $a'_2(B1)$, $c'_2(B1)$, $\varphi_{22}(B0)$, $\varphi'_{11}(B0)$ y $\varphi'_{12}(B1)$ presentan una clara dependencia con la actividad solar con un coeficiente de correlación lineal significativamente alto. La Figura A2.15 muestra algunos ejemplos de coeficientes que dependen de la actividad solar y ejemplos de algunos coeficientes sin una dependencia clara. Los coeficientes que definen el Modelo Local para la estación de El Arenosillo se presentan en la Tabla A2.2.

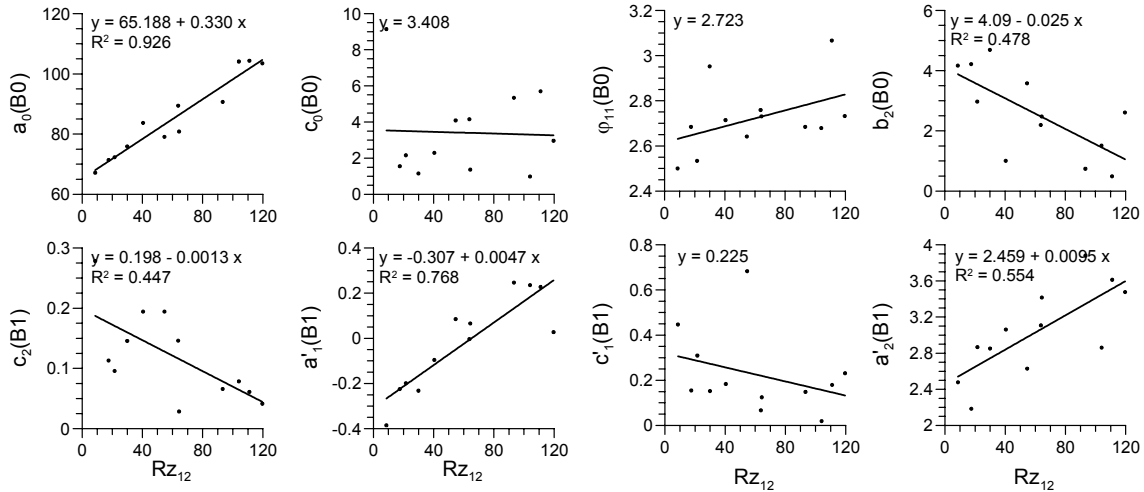


Figura A2.15. Dependencia con la actividad solar (índice Rz_{12}) de algunos coeficientes de la ecuación A2.4 obtenidos para la estación de El Arenosillo. Las líneas representan el mejor ajuste lineal para cada caso y se muestran las ecuaciones correspondientes al ajuste y el coeficiente de correlación. Aquellos casos en los que no se observa una dependencia lineal clara el valor del coeficiente se ha considerado constante e igual al valor medio.

Tabla A2.2. Coeficientes del Modelo Local (ML) que simula los parámetros B0 y B1 de acuerdo con la ecuación A2.4 para la estación de El Arenosillo. Rz_{12} es el promedio anual de los valores medios mensuales del número de Wolf.

	B0	B1
a₀	$65.188+0.33Rz_{12}$	$2.61-0.0021Rz_{12}$
b₀	13.755	0.282
c₀	3.408	0.088
φ₁₀	2.684	$-0.515+0.0041Rz_{12}$
φ₂₀	1.912	$0.97+ 0.048Rz_{12} -4.5 \cdot 10^{-4}Rz_{12}^2$
a₁	$13.104+0.025Rz_{12}$	$0.612-0.0023Rz_{12}$
b₁	$18.133-0.178Rz_{12}+1.23 \cdot 10^{-3}Rz_{12}^2$	0.216
c₁	$7.14-0.044Rz_{12}$	0.139
φ₁₁	2.723	1.303
φ₂₁	2.034	1.97
a₂	8.347	0.378
b₂	$4.09-0.025Rz_{12}$	0.163
c₂	3.607	$0.184-0.0012Rz_{12}$
φ₁₂	2.435	1.625
φ₂₂	$2.093+0.024Rz_{12}-2.6 \cdot 10^{-4}Rz_{12}^2$	1.914
a'₁	2.753	$-0.307+0.0047Rz_{12}$
b'₁	0.96	0.434
c'₁	$0.313+0.0081Rz_{12}$	0.225
φ'₁₁	$1.956+0.0098Rz_{12}$	1.821

φ'_{21}	2.267	0.982
a'_2	0.378	$2.459+0.0095Rz_{12}$
b'_2	0.737	0.992
c'_2	0.445	$1.752-0.0361Rz_{12}+2.2\cdot 10^{-4}Rz_{12}^2$
φ'_{12}	1.812	$2.264-0.016Rz_{12}$
φ'_{22}	0.199	1.527

Se ha comprobado la mejora de la aplicación de este Modelo Local para El Arenosillo con respecto al IRI comparando los valores de $B0$ y $B1$ obtenidos a partir de dicho modelo con los valores experimentales y los obtenidos por el IRI. La Figura A2.16 muestra los coeficientes de correlación lineal de dichas comparaciones para cada año de la serie temporal utilizada. La opción Gulyaeva del IRI da un mejor ajuste del parámetro $B0$ que la opción estándar. Este resultado era de esperar siendo la estación de El Arenosillo una estación situada a latitudes medias (Bilitza, 2001). Aún así, el Modelo Local ajusta mejor el parámetro $B0$ que la opción Gulyaeva del IRI para la mayoría de los años. El promedio del coeficiente de correlación lineal de la comparación entre los valores experimentales de $B0$ y los valores predichos por la opción estándar del IRI durante toda la serie temporal es 0.32. Este promedio es 0.61 para la comparación de los valores experimentales con la opción Gulyaeva del IRI y 0.65 con el Modelo Local. El Modelo Local se ajusta mejor a los valores experimentales que la opción estándar del IRI para el parámetro $B1$. La opción Gulyaeva da un valor constante de $B1=3$. El promedio del coeficiente de correlación lineal de la comparación entre los valores experimentales de $B1$ y los valores predichos por el IRI durante toda la serie temporal es 0.22 y 0.37 para la comparación con los valores obtenidos a partir del Modelo Local.

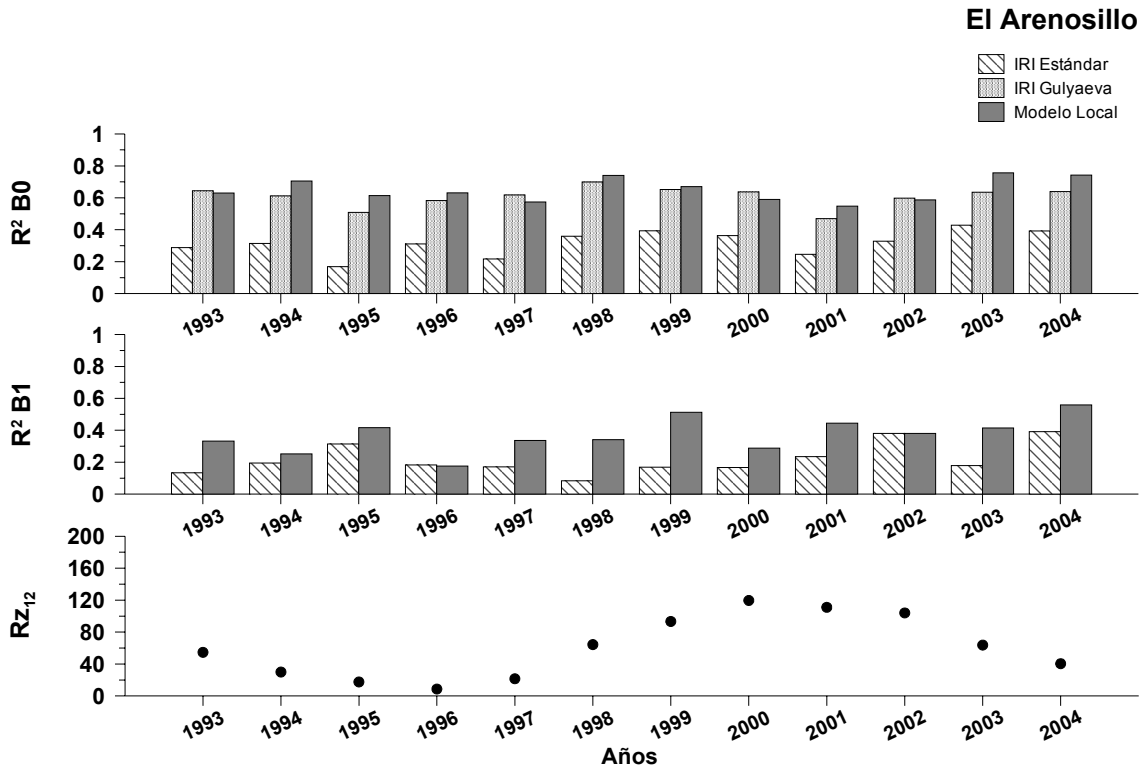


Figura A2.16. Coeficiente de correlación lineal del ajuste entre los valores experimentales y el Modelo Local y el IRI2001 para cada parámetro a lo largo de todo el período de análisis para la estación de El Arenosillo. El panel inferior muestra la actividad solar a partir del índice Rz₁₂.

Las Figuras A2.17 y A2.18 muestran, respectivamente, las variaciones temporales de los parámetros *B0* y *B1* simulados por el Modelo Local y su comparación con los valores experimentales y los predichos por el IRI para la estación de El Arenosillo. De forma similar que para la estación de Ebro, el Modelo Local simula las variaciones temporales de los valores experimentales mejor que el IRI, especialmente para la opción estándar.

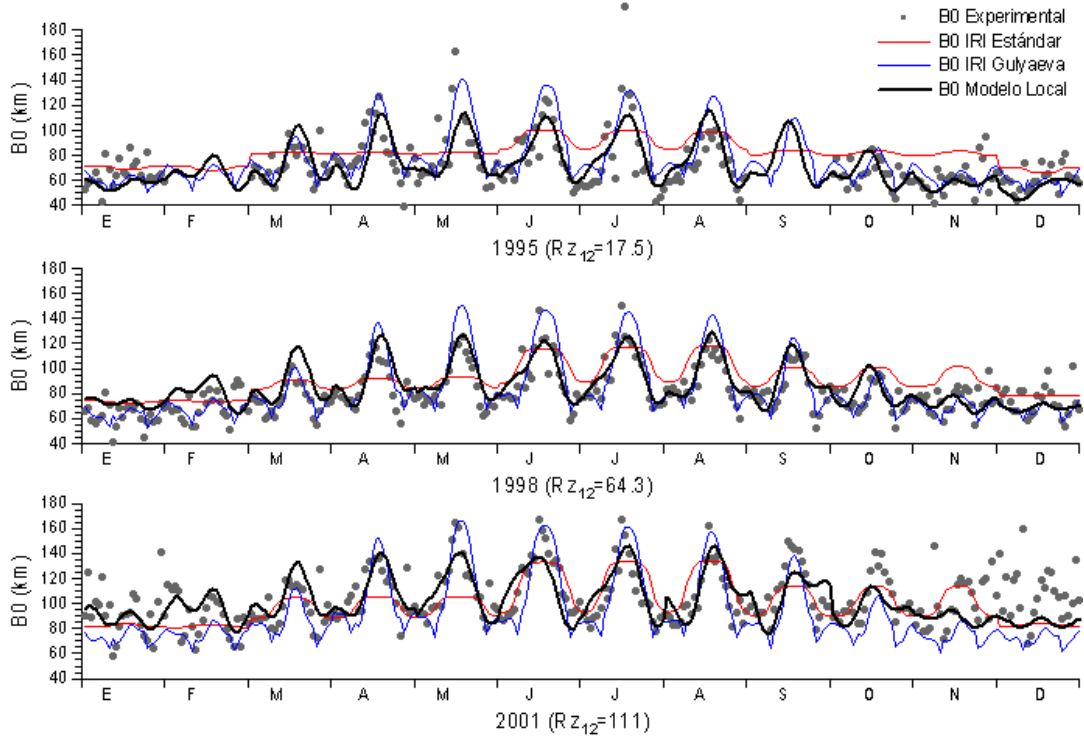


Figura A2.17. Comparación de las variaciones temporales del parámetro B0 obtenido a partir del Modelo Local (línea negra), la opción estándar del IRI2001 (línea roja) y la opción Gulyaeva del IRI2001 (línea azul) para la estación de El Arenosillo. Los puntos grises son los valores experimentales.

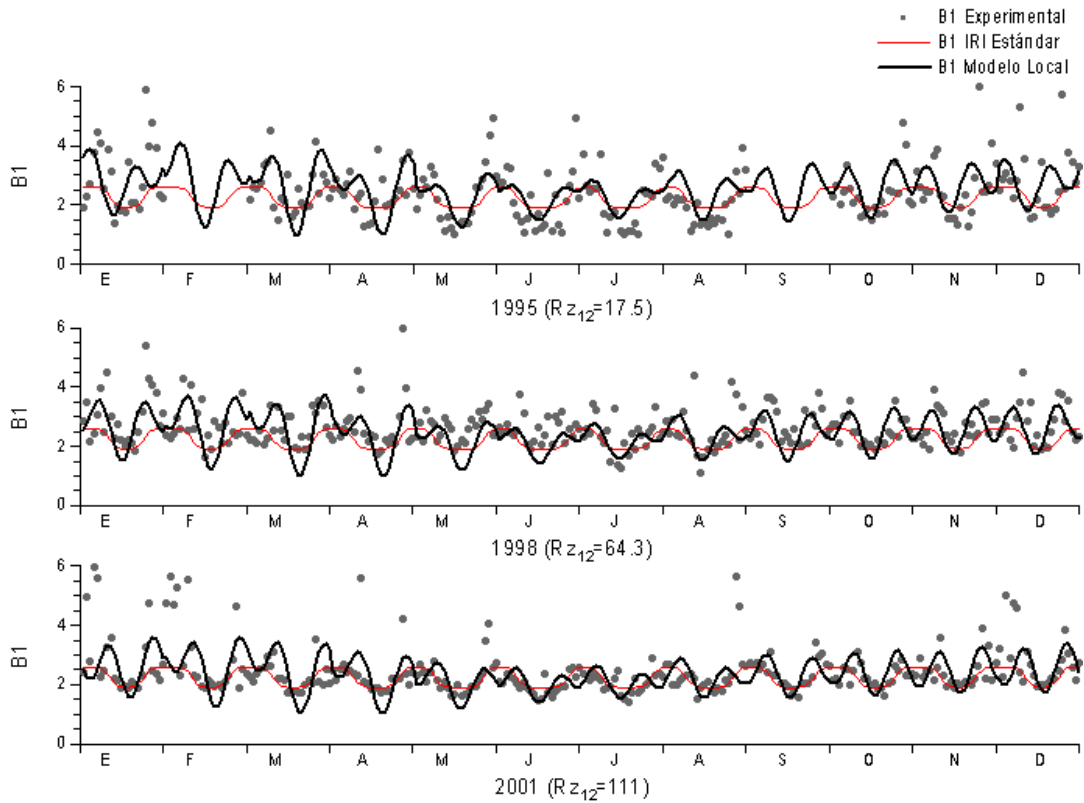


Figura A2.18. Comparación de las variaciones temporales del parámetro B1 obtenido a partir de del Modelo Local (línea negra) y la opción estándar del IRI2001 (línea roja) para la estación de El Arenosillo. Los puntos grises son los valores experimentales.

A2.2.2 Análisis y resultados para Pruhonice

El análisis del comportamiento de los parámetros $B0$ y $B1$ para la estación de Pruhonice (50.0°N, 14.6°E) muestra unas variaciones temporales similares a las estaciones de Ebro y El Arenosillo (puntos grises Figura A2.19). Este comportamiento similar era de esperar ya que seguimos dentro del rango de latitudes medias, por lo tanto, el planteamiento de ajustar los parámetros experimentales a funciones armónicas sigue siendo válido para esta estación. Se ha ajustado por mínimos cuadrados la Ecuación A2.4 a los valores experimentales ($B0$ y $B1$) de la estación de Pruhonice para el año 2004 (año para el que se dispone de datos revisados por operador). La Figura A2.19 muestra la función que mejor se ajusta a los parámetros experimentales y la comparación con éstos y los valores predichos por el IRI. Se observa que el Modelo Local reproduce las variaciones temporales de $B0$ y $B1$ mejor que el IRI, especialmente comparando con la opción estándar del parámetro $B0$.

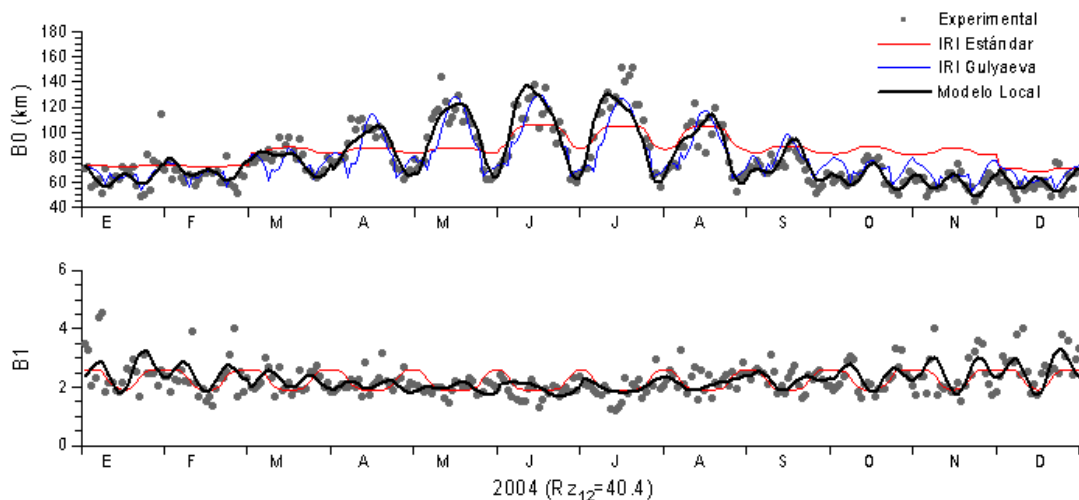


Figura A2.19. Comparación de las variaciones temporales de los parámetros $B0$ y $B1$ obtenidos a partir de del Modelo Local (línea negra), la opción estándar del IRI2001 (línea roja) y la opción Gulyaeva del IRI2001 (línea azul) para la estación de Pruhonice. Los puntos grises son los valores experimentales.

La Figura A2.20 muestra el ajuste entre los valores experimentales y los simulados por el Modelo Local y con los predichos por el IRI. El coeficiente de correlación lineal muestra que los valores obtenidos por el Modelo Local se ajustan a los parámetros experimentales mejor que los predichos por el IRI. El índice de correlación lineal mejora en un factor 1.6 para el parámetro $B0$ con respecto a la opción estándar del IRI y en un factor 1.2 con respecto a la opción

Gulyaeva. Esta mejora es de un factor 2 para el parámetro $B1$.

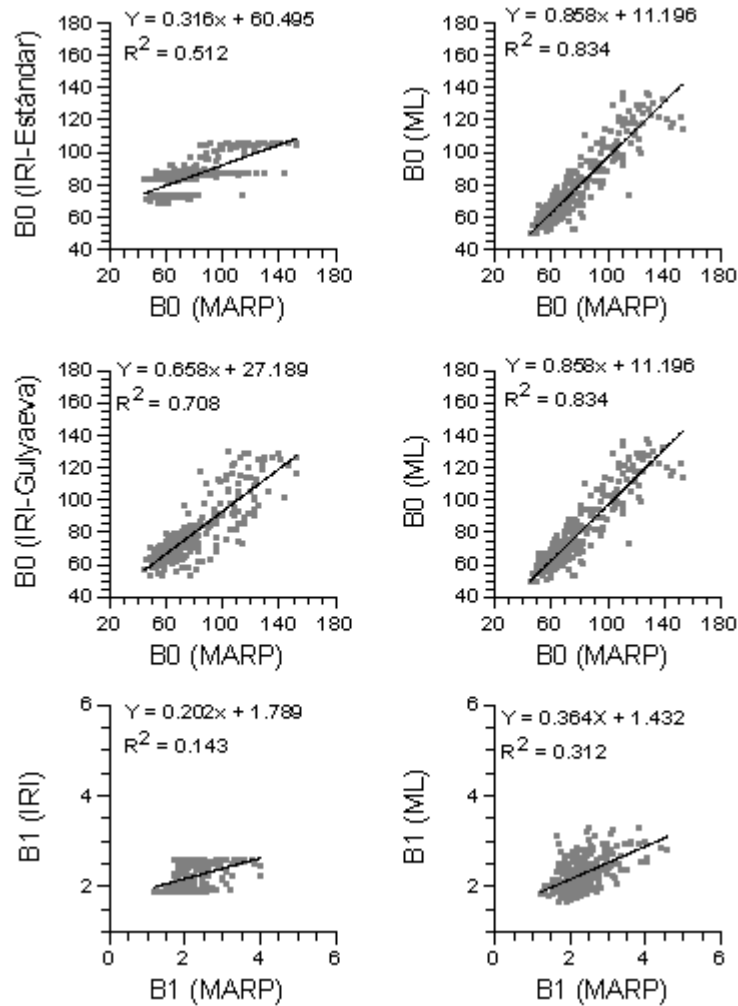


Figura A2.20. Comparación entre los valores experimentales de $B0$ y $B1$ con aquellos obtenidos por el IRI2001 y los obtenidos a partir del Modelo Local para la estación de Pruhonice. Las líneas muestran el mejor ajuste lineal para cada caso y se muestran las ecuaciones correspondientes al ajuste y el coeficiente de correlación.

A2.2.3 Análisis y resultados para otras estaciones con escalado automático

La red actual de digisondas (Reinisch et al., 2004) ofrece rutinariamente el perfil de densidad electrónica en altura real, $N(h)$, obtenido por reducción automática y en tiempo real del ionograma en un amplio rango de latitudes y longitudes (Reinisch et al., 2005). Por lo tanto esta red establece una base de datos adecuada para poder extender la formulación del Modelo Local a escala Global. Sin embargo, la mayoría de los ionogramas no están revisados por operador, lo

que establece una limitación en la calidad de los datos. El objetivo de este análisis ha sido comprobar la validez de aplicar la formulación del Modelo Local a estaciones con datos escalados automáticamente por el ARTIST (*Automatic Real Time Ionogram Scaler with True Height*). El hecho de que esta metodología utiliza los valores experimentales que se obtienen del perfil mensual representativo (MARP) implica que valores extremos producidos por algún error en el escalado automático sean excluidos del mismo modo que se excluyen aquellos valores que pueden haber sido afectados por condiciones de perturbación. Se han utilizado los perfiles de densidad electrónica escalados automáticamente de las estaciones de Atenas, Juliusruh y Grahamstown. Al ser estaciones situadas a latitudes medias, las variaciones temporales de los parámetros $B0$ y $B1$ son similares a las ya observadas anteriormente, teniendo en cuenta que Grahamstown está situada en el Hemisferio Sur (puntos grises de las Figuras A2.21 y A2.22). Se ha ajustado por mínimos cuadrados la Ecuación A2.4 a los valores experimentales ($B0$ y $B1$) de cada estación y para cada una de ellas se han obtenido los coeficientes que definen el Modelo Local correspondiente. La Figura A2.21 muestra la función que mejor se ajusta a los parámetros experimentales y la comparación con éstos y los valores predichos por el IRI para el parámetro $B0$. Se observa que el Modelo Local reproduce las variaciones temporales mejor que el IRI aunque se hayan utilizado datos sin revisar. Lo mismo se observa para el parámetro $B1$ (Figura A2.22).

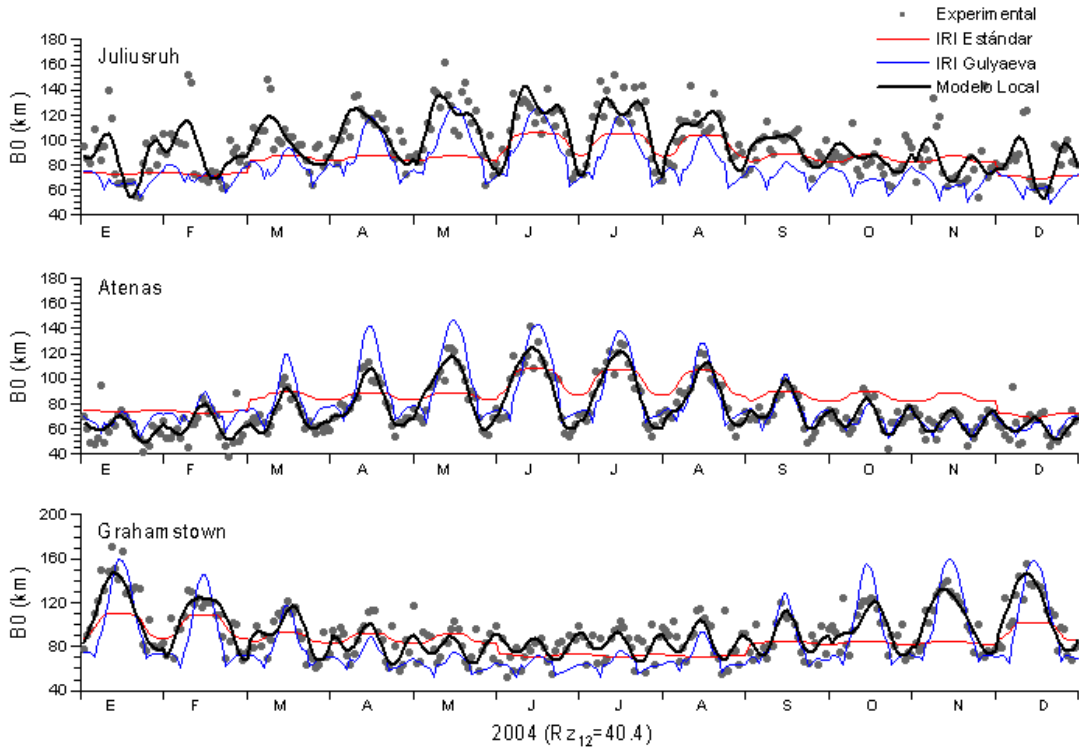


Figura A2.21. Comparación de las variaciones temporales del parámetro B0 obtenido a partir de del Modelo Local (línea negra), la opción estándar del IRI2001 (línea roja) y la opción Gulyaeva del IRI2001 (línea azul) para las estaciones indicadas. Los puntos grises son los valores experimentales obtenidos del escalado automático.

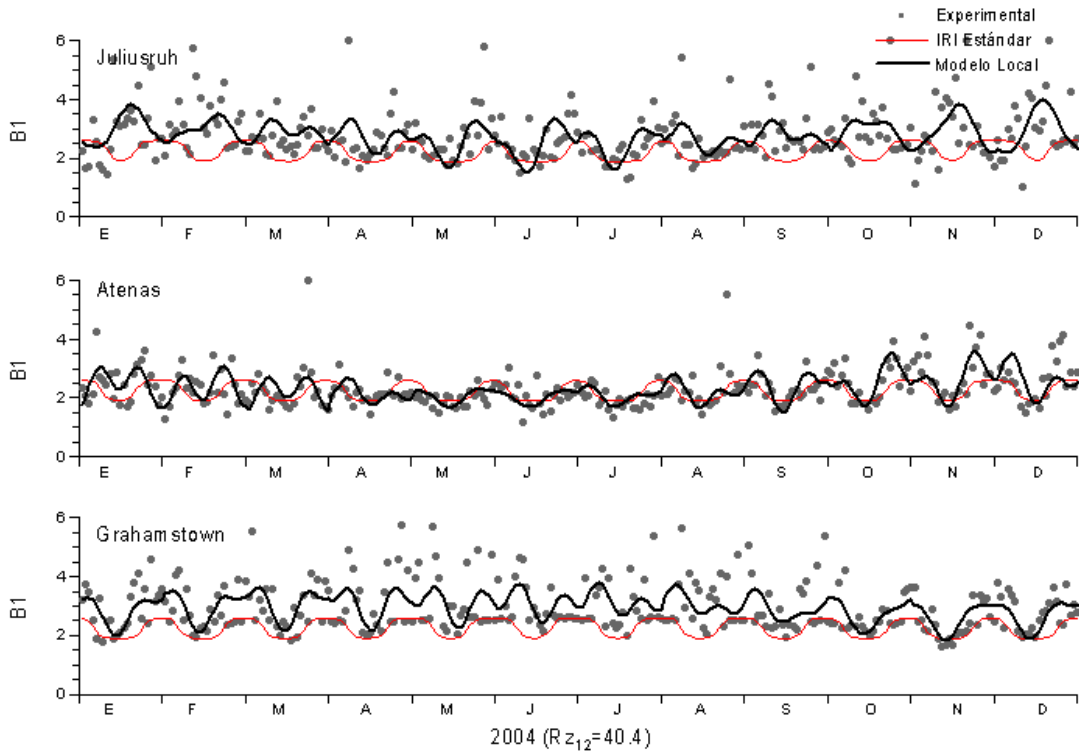


Figura A2.22. Comparación de las variaciones temporales del parámetro B1 obtenido a partir de del Modelo Local (línea negra) y la opción estándar del IRI2001 (línea roja) para las estaciones indicadas. Los puntos grises son los valores experimentales obtenido del escalado automático.

La Figura A2.23 muestra los coeficientes de correlación lineal de las comparaciones entre los valores experimentales y los simulados por el Modelo Local y con los predichos por el IRI para $B0$ y $B1$. Se observa que para la estación de Juliusruh la predicción del parámetro $B0$ del Modelo Local mejora en un factor 2.4 respecto la opción estándar del IRI y en un factor 1.7 respecto la opción Gulyaeva. Aunque el índice de correlación lineal de la comparación entre los valores experimentales y los simulados por el Modelo Local para el parámetro $B1$ sea bajo (0.2) debido a la mayor dispersión de los datos, éste es superior que el índice de correlación lineal de la comparación con los valores predichos por el IRI, que era muy cercano a cero. El Modelo Local de la estación de Atenas muestra una mejora en la predicción de $B0$ de un factor 1.6 con respecto a la opción estándar del IRI y un factor 1.2 con respecto a la opción Gulyaeva. El parámetro $B1$ de la estación de Atenas presenta menos dispersión, por lo que el ajuste de la Ecuación A2.4 a los valores experimentales da un Modelo Local que mejora significativamente las predicciones del IRI. El Modelo Local obtenido para la estación del Hemisferio Sur, Grahamstown, también mejora la predicción de los parámetros $B0$ y $B1$ con respecto al IRI. Se tiene una mejora de un factor 2.2 con respecto a la opción estándar del IRI y de un factor 1.2 con respecto a la opción Gulyaeva para el parámetro $B0$; y una mejora de un factor 2.4 para $B1$. De nuevo, el coeficiente de correlación lineal de la comparación entre los valores experimentales y los valores simulados por el Modelo Local para $B1$ presenta un valor bajo debido a la dispersión de los datos.

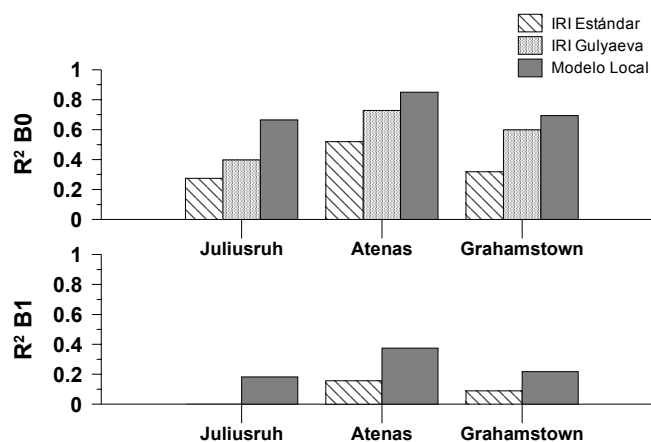


Figura A2.23. Coeficiente de correlación lineal del ajuste entre los valores experimentales y el Modelo Local y el IRI2001 para cada parámetro para las diferentes estaciones.

A2.3. Aplicación del Modelo Local a otros parámetros

En esta sección se pretende analizar la validez de la formulación del Modelo Local a otros parámetros ionosféricos. Se han utilizado los ionogramas revisados por operador de la estación de Ebro durante el año 2005 y se han obtenido los parámetros $hmF2$, hmE y Hm del perfil mensual representativo. $hmF2$ y hmE son, respectivamente, las alturas del máximo de densidad electrónica de la capa F2 y de la capa E. Hm es la escala de alturas equivalente del plasma en el máximo de densidad electrónica considerando la parte baja de la capa F2 como una función Chapman. Este parámetro es de importancia para estimar el perfil de densidad electrónica de la parte alta de la ionosfera (Reinisch and Huang, 2001). Se ha ajustado por mínimos cuadrados la Ecuación A2.4 a los valores experimentales de cada uno de estos parámetros ionosféricos y, para cada uno de ellos, se han obtenido los coeficientes que determinan el Modelo Local correspondiente. La Figura A2.24 muestra las variaciones temporales de los valores experimentales de dichos parámetros y su comparación con los valores simulados por el Modelo Local correspondiente y los predichos por el IRI. Aunque el IRI ya da buenas predicciones del parámetro $hmF2$, se observa que, utilizando esta metodología el ajuste de los valores experimentales con los valores obtenidos por el Modelo Local es bueno, mejorando en este caso concreto la predicción del IRI en un factor 1.1. La mejora en la predicción de hmE es claramente visible: mientras que el IRI da un valor constante de $hmE=110$ km, el Modelo Local reproduce sus variaciones temporales con un coeficiente de correlación lineal de la comparación con los valores experimentales de 0.72. El Modelo Local también reproduce significativamente bien las variaciones temporales del parámetro Hm obteniendo un coeficiente de correlación lineal de la comparación entre los valores experimentales y los valores simulados de 0.82. Debido a que el IRI no predice directamente este parámetro, la utilización de esta formulación podría contribuir a mejorar la predicción del perfil de densidad de la parte alta de la ionosfera.

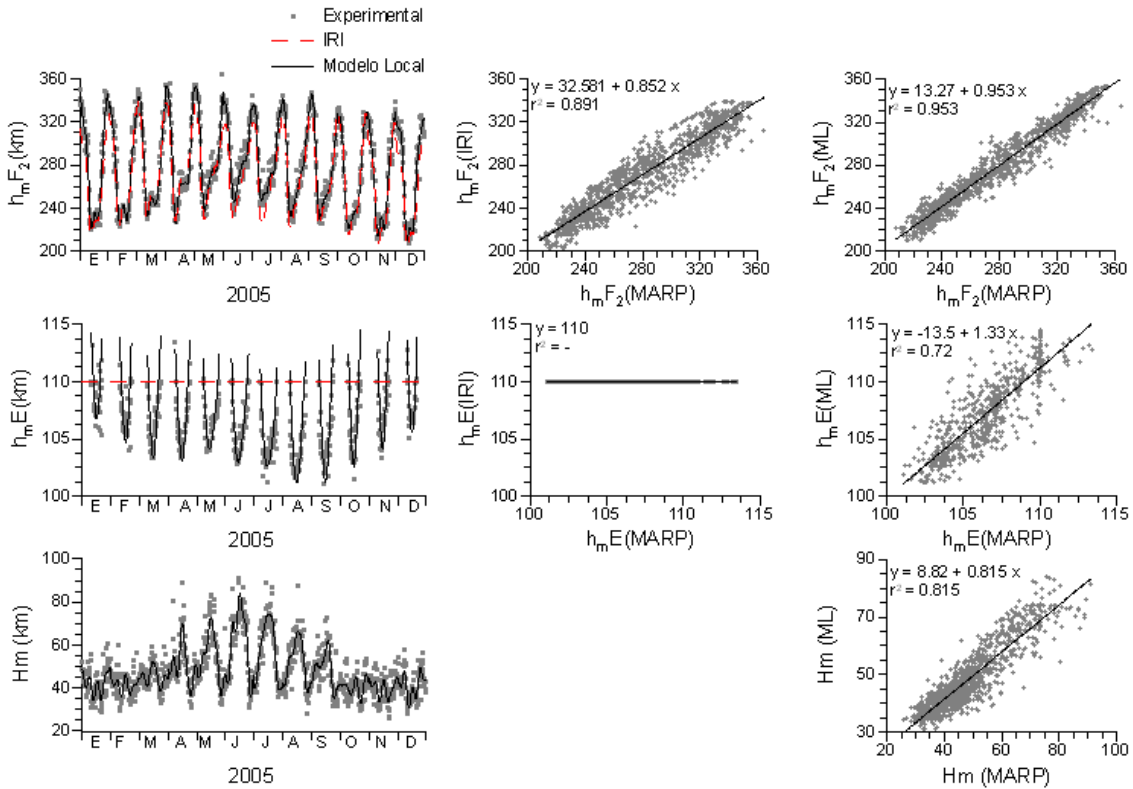


Figura A2.24. Izquierda: Comparación de las variaciones temporales de los parámetros $h_m F_2$, $h_m E$ y H_m obtenidos a partir del Modelo Local (línea negra) y el IRI2001 (línea roja) para la estación de Ebro. Los puntos grises son los valores experimentales. Columnas del centro y derecha: Comparación entre los valores experimentales de $h_m F_2$, $h_m E$ y H_m con aquellos obtenidos por el IRI2001 y los obtenidos a partir del Modelo Local, respectivamente, para la estación de Ebro. Las líneas negras representan el mejor ajuste lineal para cada caso y se muestran las ecuaciones correspondientes al ajuste y el coeficiente de correlación.

A2.4. Discusión

En este Capítulo se ha determinado la formulación de un Modelo Local que simula las variaciones temporales de los parámetros $B0$ y $B1$ para días tranquilos sobre estaciones situadas en latitudes medias. Los coeficientes de la función analítica que define este Modelo Local (Ec. A2.4) se han obtenido ajustando esta función a los valores experimentales. Se ha desarrollado un Modelo Local dependiente de la actividad solar para las estaciones de Ebro y El Arenosillo. Los resultados de estos análisis muestran que el Modelo Local proporciona una simulación de las variaciones temporales de los parámetros ionosféricos en cuestión mejor que el IRI. Se ha comprobado la validez de esta formulación para otras estaciones de latitudes medias y otros parámetros ionosféricos utilizando datos revisados por operador y datos escalados automáticamente por el ARTIST. Las ventajas más significativas que se han

observado comparando con las predicciones del IRI son:

- El Modelo Local reproduce con más precisión las amplitudes diurnas, especialmente para el parámetro $B0$ para el que la opción estándar del IRI subestima los valores máximos diurnos y sobreestima los valores nocturnos.
- El Modelo Local reproduce las variaciones semidiurnas de los parámetros $B0$ y $B1$ que se observan en invierno mientras que la opción estándar del IRI no las tienen en cuenta y la opción Gulyaeva subestima los valores de $B0$ en invierno.
- El Modelo Local tiene en cuenta la variación estacional, dando valores más adecuados a las amplitudes en verano y en invierno para todos los parámetros pero especialmente para $B1$ para el que el IRI da los mismos valores de la amplitud diurna para los diferentes meses del año.
- El Modelo Local tiene en cuenta la variación con la actividad solar. Se observa una mejora significativa en la predicción del parámetro $B1$ ya que el IRI no tiene en cuenta esta variación temporal para este parámetro.
- La precisión de la simulación del Modelo Local no depende de la actividad solar, mientras que el IRI da una mejor predicción del parámetro $B0$ durante años de alta actividad solar y una mejor predicción del parámetro $B1$ durante los años de baja actividad solar.

En cierta manera, esta mejora en la predicción que ofrece el Modelo Local con respecto al IRI era de esperar ya que el IRI es un modelo global y el Modelo Local es válido sólo para una región geográfica concreta. Sin embargo, los resultados muestran que la formulación que define este Modelo Local es adecuada para reproducir las variaciones temporales de varios parámetros ionosféricos a diferentes latitudes, abriendo la puerta a la posibilidad de adaptar esta formulación para definir un modelo a escala global. El haber obtenido

buenos resultados al utilizar datos no revisados por operador permite utilizar la red actual de digisondas como base de datos para este análisis global. El capítulo siguiente muestra el análisis y los resultados conseguidos en este sentido. Mientras tanto, se sugiere a los usuarios del IRI que utilicen la opción Gulyaeva para obtener una mejor predicción del parámetro $B0$ y la opción estándar para una mejor predicción del parámetro $B1$ para estaciones de latitudes medias.

CAPÍTULO A.3:

MODELO GLOBAL DE LOS PARÁMETROS B_0 y B_1 PARA DÍAS DE CALMA

Una vez elaborado un Modelo Local que simula el comportamiento de los parámetros B_0 y B_1 a latitudes medias y comprobada su validez en otras latitudes, la pretensión de este capítulo es expandir el modelo a escala global. Para ello nos basaremos en la misma filosofía que en la obtención del Modelo Local y se aplicará la misma metodología de trabajo. El objetivo es obtener un modelo basado en una formulación analítica en términos de armónicos esféricos cuyos coeficientes dependan de la actividad solar.

A3.1. Datos y técnica de modelado

Para realizar este estudio se han utilizado los ionogramas de sondeo vertical de la base de datos ionosféricos DIDB (*Digital Ionogram Data Base*) del *Center for Atmospheric Research* de la Universidad de Massachussets, Lowell (Reinisch et al., 2004). Se han seleccionado aquellas estaciones con la mayor disponibilidad de datos y con la mejor distribución geográfica durante el período de 1998 a 2006, prácticamente todo el ciclo solar 23. La lista de las estaciones utilizadas en este estudio se encuentra en la Tabla A3.1. La Figura A3.1 muestra la distribución geográfica de estas estaciones y la Figura A3.2 muestra la disponibilidad de los datos.

Tabla A3.1. Catálogo de las estaciones ionosféricas utilizadas en el estudio ordenadas de mayor a menor latitud geográfica. Para cada una de ellas se muestra el código, la latitud y longitud geográfica y geomagnética y la latitud magnética Dip a 300 km de altura (latitud obtenida a partir de la Inclínación magnética). Tanto las coordenadas geomagnéticas como la latitud Dip se han obtenido utilizando el modelo de campo geomagnético IGRF evaluado en 1998.5.

Estación	Código	Lat.	Lon.	Lat	Long	Lat. Dip
	URSI	Geog.	Geog.	Geom.	Geom.	
Qaanaaq	THJ77	77.5°N	290.6°E	87.98°N	13.14°E	82.31°N
Sondrestrom	SMJ67	66.98	309.06	76.35	35.63	70.89
Goose Bay	GSJ53	53.3	299.7	63.55	15.14	60.48
Chilton	RL052	51.5	359.4	53.77	84.46	48.55
Ebro, Roquetes	EB040	40.8	0.5	43.24	81.29	36.32
Wallops Is.	WP937	37.9	284.5	48.39	355.27	48.83
Anyang	AN438	37.39	126.95	27.35	196.47	33.78
El Arenosillo	EA036	37.1	353.3	40.92	72.80	31.83
Osan AB	SN437	37.1	127.0	27.06	196.53	33.43
Point Arguello	PA836	34.8	239.5	41.27	304.49	40.22
Wuhan	WU430	30.5	114.4	20.03	185.43	26.74
Eglin AFB	EG931	30.4	273.2	40.5	342.61	41.87
Okinawa	OK426	26.7	128.2	16.75	198.35	21.09
Hainan	HA419	19.4	109.0	8.88	180.50	13.36
Ramey	PRJ18	18.5	292.9	28.99	4.8	27.98
Kwajalein	KJ609	9.0	167.2	3.45	237.74	3.78
Sao Luis	SAA0K	-2.6	315.8	6.75	27.50	-0.48
Fortaleza	FZA0M	-3.8	322.0	4.98	33.58	-5.05
Ascension Is.	AS00Q	-7.95	345.6	-2.17	56.34	-20.42
Jicamarca	JI91J	-12.0	283.2	-1.52	354.84	0.6
Learmonth	LM42B	-21.8	114.1	-32.27	186.18	-36.08
Madimbo	MU12K	-22.39	30.88	-24.25	97.92	-39.20
Cachoeira Pau.	CAJ2M	-23.2	314.2	-13.66	24.24	-16.99
Louisvale	LV12P	-28.5	21.2	-28.47	86.99	-45.10
Grahamstown	GR13L	-33.3	26.5	-34.13	91.0	-44.97
Bundoora	BV53Q	-37.7	145.05	-45.83	222.58	-52.13
Port Stanley	PSJ5J	-51.6	302.1	-41.32	11.23	-30.8

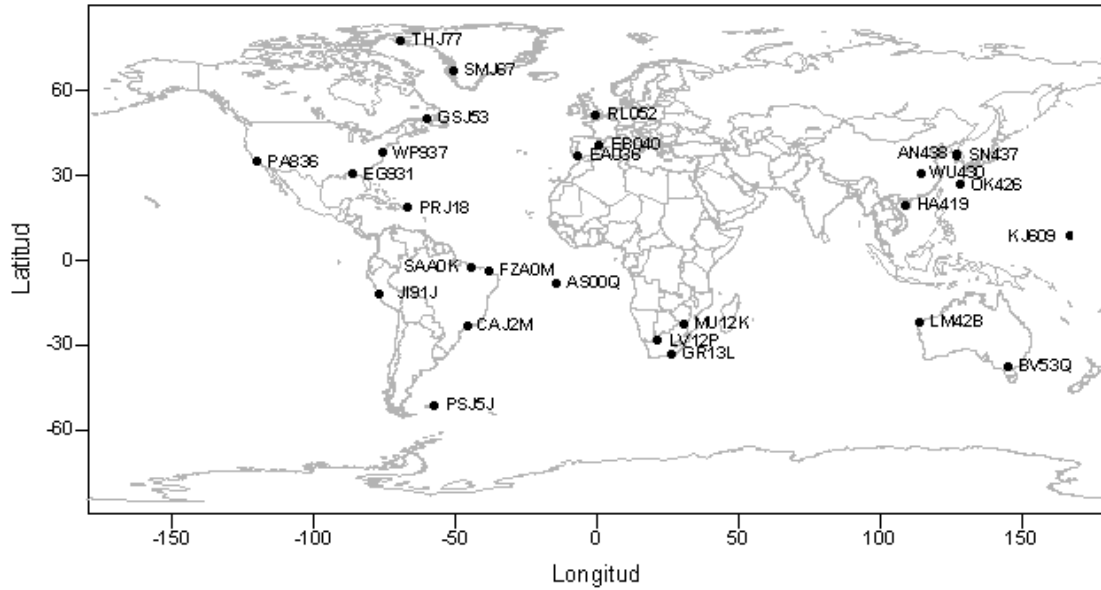


Figura A3.1. Distribución geográfica de las 27 estaciones ionosféricas pertenecientes a la base de datos ionosféricas digital (DIDB) utilizadas en este estudio.

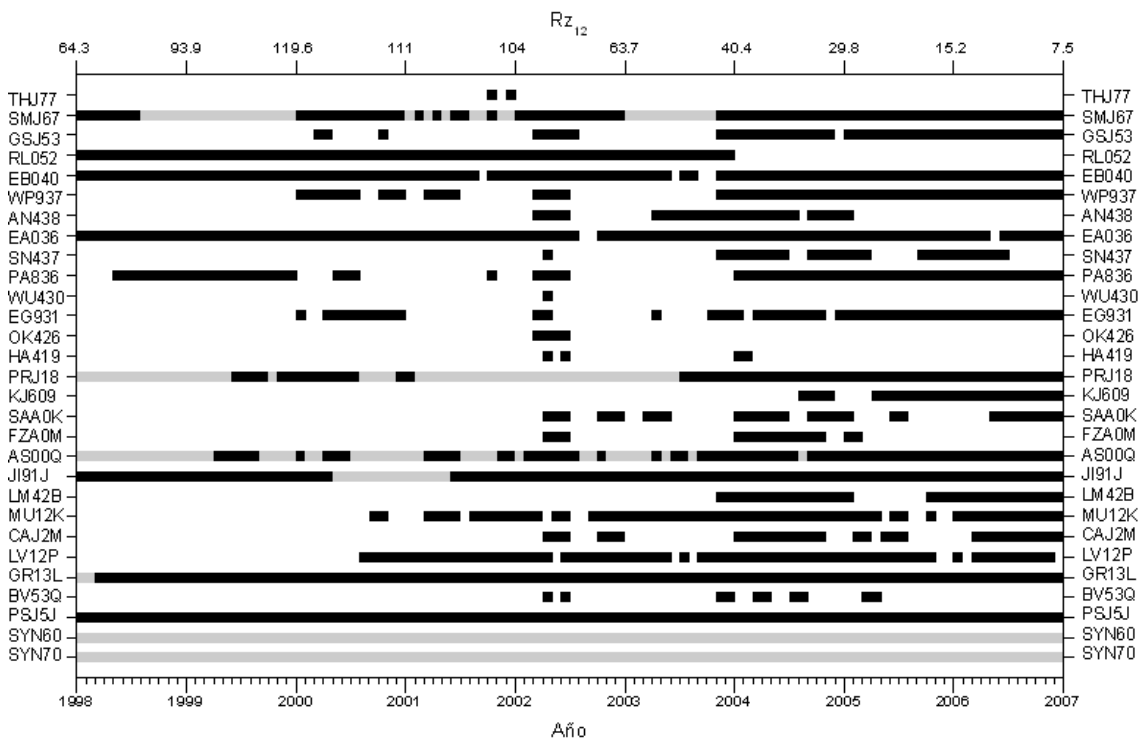


Figura A3.2. Disponibilidad de los datos para las estaciones utilizadas en el análisis (barras negras). Las barras grises indican el período de tiempo cubierto por datos sintetizados según se describe en la sección A3.3. Las estaciones están distribuidas según la latitud geográfica, desde el Hemisferio Norte al Hemisferio Sur.

Se han obtenido los valores experimentales de $B0$ y $B1$ a partir del perfil mensual representativo para cada estación durante todo el período de estudio según la disponibilidad de los datos. Se ha utilizado el IRI2001 para obtener los valores predichos de estos parámetros sobre la posición geográfica

correspondiente a cada estación e intervalo de tiempo con el fin de verificar si el modelo global predice los valores experimentales mejor que el IRI.

Los resultados del capítulo anterior sugieren que las variaciones temporales de los parámetros $B0$ y $B1$ pueden ser modelados utilizando funciones armónicas. Por esta razón se ha escogido el análisis de armónicos esféricos (SHA, *Spherical Harmonic Analysis*) como técnica analítica para realizar el modelado de los parámetros $B0$ y $B1$. El SHA es una potente herramienta para analizar datos distribuidos sobre una superficie esférica por su capacidad de resolver la ecuación de Laplace en coordenadas esféricas (desde Gauss, 1838). Esta técnica es ampliamente utilizada para el modelado de las variaciones de las diferentes contribuciones del campo geomagnético ya que puede distinguir entre las contribuciones de origen interno y externo (Chapman and Bartels, 1940; Haines and Torta, 1994; Sabaka et al., 2002). Para más detalle sobre SHA se puede consultar, por ejemplo, la Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism (2007). Poco a poco esta técnica se ha ido utilizando en otros campos, como por ejemplo en aeronomía para el modelado de los parámetros ionosféricos (Jones and Gallet (1962, 1965); Bradley, 1990; Lazo et al., 2004) por su capacidad de modelar analíticamente una función sobre una superficie esférica como:

$$f(\theta, \varphi, T) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n P_n^m(\cos \theta) \{g_n^m(T) \cos(m\varphi) + h_n^m(T) \sin(m\varphi)\} \quad (\text{A3.1})$$

donde θ y φ son las coordenadas geocéntricas esféricas, colatitud y longitud respectivamente, T es el tiempo, P_n^m son las funciones asociadas de Legendre de primer orden (o polinomios de Legendre) de grado y orden enteros n y m respectivamente y g_n^m y h_n^m son los coeficientes armónicos esféricos (o coeficientes de Gauss) que definen el modelo, que pueden ser función del tiempo T .

A3.2. Análisis y resultados.

Aplicar esta técnica (SHA) es relativamente simple cuando se dispone de observaciones alrededor de toda la esfera o cuando las observaciones están distribuidas sobre una red densa que produce un sistema de ecuaciones sobre-determinado que puede ser resuelto por mínimos cuadrados. Sin embargo, la base de datos disponible no proporciona una distribución geográfica deseable de las estaciones ionosféricas, especialmente en longitud (ver Fig. A3.1). Por esta razón ha sido necesario realizar la siguiente aproximación: se asume que en condiciones de calma la forma de la ionosfera permanece aproximadamente constante durante un día dado y, debido a que la tierra gira 360° alrededor de un sistema fijo con respecto al Sol, se ha considerado que las variaciones en longitud son equivalentes a las variaciones en tiempo local. Una importante cuestión de esta aproximación es la elección de las coordenadas que definen los paralelos que pasan por la posición de la estación original. Estos paralelos deben definir la latitud geográfica de las 27 estaciones ficticias, separadas entre ellas 15° en longitud (Campbell, 1990). Entre los procesos físicos que causan la variación diurna de los parámetros ionosféricos, la fotoionización y el calentamiento están determinados principalmente por la latitud geográfica y la posición del Sol, pero los campos eléctricos y los efectos del viento neutro, que juegan un papel importante en la variación de $hmF2$, son sensibles a la dirección del campo magnético principal (Rishbeth and Mendillo, 2001). Se han probado diferentes sistemas de coordenadas para definir cuál es la mejor elección: geográficas, geomagnéticas, magnéticas dip, magnéticas dip modificadas (modip) y magnéticas ápex. Las coordenadas geomagnéticas son aquellas que se obtienen de considerar un campo magnético dipolar. Las coordenadas magnéticas dip tienen en cuenta la inclinación magnética (*dip*) (Torta et al., 1997). Para calcular las coordenadas geomagnéticas y las magnéticas dip es necesario utilizar un modelo de campo geomagnético principal. En este estudio se ha utilizado el modelo IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*) evaluado en 1998.5. Las coordenadas magnéticas dip modificadas (modip) fueron introducidas por Rawer (1963) y es el sistema de coordenadas utilizado por el IRI (Bilitza, 2001). La latitud modip se comporta como la inclinación magnética a latitudes bajas y a medida que aumenta la latitud se comporta como la latitud geográfica. Las coordenadas

magnéticas ápx (Richmond, 1995) están alineadas con las líneas de campo geomagnético. Son muy utilizadas para describir corrientes ionosféricas horizontales, campos eléctricos y velocidades de deriva del plasma a alturas de la ionosfera ya que están fuertemente influenciadas por el campo geomagnético. La diferencia entre estas coordenadas y las coordenadas geomagnéticas se encuentra en que las coordenadas ápx tienen en cuenta la contribución del campo geomagnético no dipolar. Los resultados de utilizar estos diferentes sistemas de coordenadas para definir los paralelos que pasan por la posición de las estaciones originales concluyen que las coordenadas magnéticas dip son la mejor opción para modelar el parámetro $B0$ y que las coordenadas geográficas son la mejor opción para $B1$. La Figura A3.3 muestra un ejemplo de la posición geográfica de las estaciones ficticias según los paralelos que pasan por algunas de las estaciones originales obtenidos a partir de las coordenadas magnéticas dip.

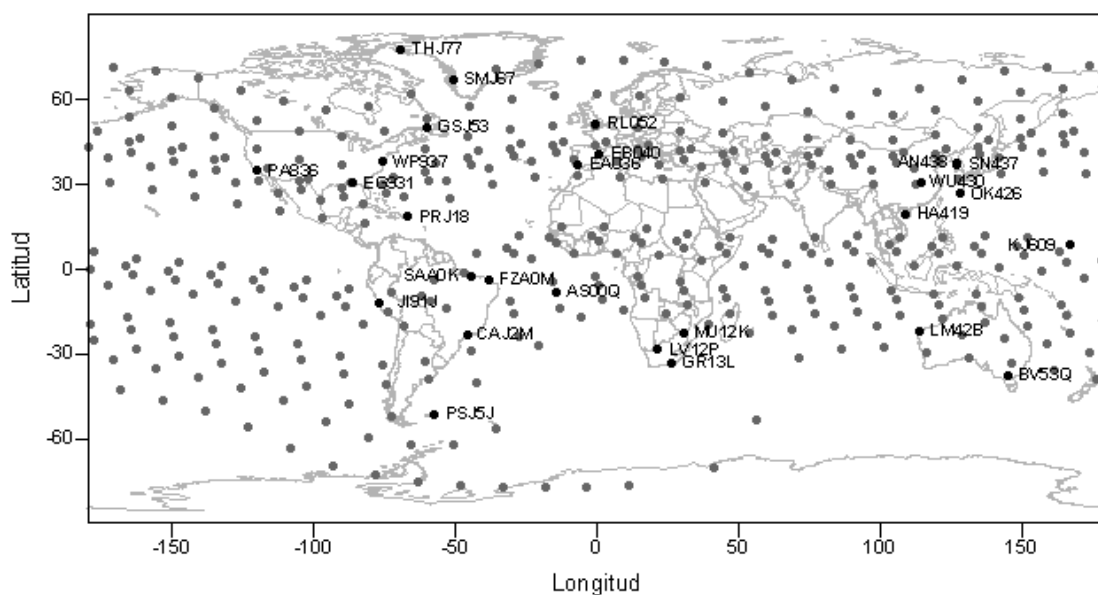


Figura A3.3. Posición geográfica de las estaciones ficticias (gris) según los paralelos que pasan por alguna de las estaciones originales (en negro) obtenidos a partir de la latitud magnética dip a 300 km de altura.

El resto de sistemas de coordenadas han dado peores resultados desde el punto de vista de las simetrías estacionales esperadas entre hemisferios. De acuerdo con estos resultados las coordenadas magnéticas dip y las geográficas se han utilizado para agrupar las estaciones en diferentes anillos

latitudinales para realizar una inspección del comportamiento característico de $B0$ y $B1$ respectivamente.

A3.2.1 Comportamiento característico

La variación en tiempo local del parámetro $B0$ (Figura A3.4) y $B1$ (Figura A3.5) muestra un comportamiento sistemático distinto para estaciones situadas en diferentes rangos latitudinales. La Figura A3.4 muestra la variación diurna del parámetro $B0$ para los diferentes cinturones de latitud magnética dip, estación del año y actividad solar. Análogamente, la Figura A3.5 muestra la variación diurna del parámetro $B1$ pero con agrupación de las estaciones en cinturones de latitud geográfica. El verano abarca los meses de Mayo a Julio para las estaciones del Hemisferio Norte y los meses de Noviembre a Enero para las estaciones del Hemisferio Sur. El invierno abarca los meses de Noviembre a Enero para las estaciones del Hemisferio Norte y los meses de Mayo a Julio para las estaciones del Hemisferio Sur. Los puntos grises de las Figura A3.4 y A3.5 corresponden respectivamente a los valores experimentales de $B0$ y $B1$. Las líneas negras corresponden a las funciones polinómicas que mejor se ajustan a los valores experimentales mostrando el comportamiento diurno dominante como una función del tiempo local.

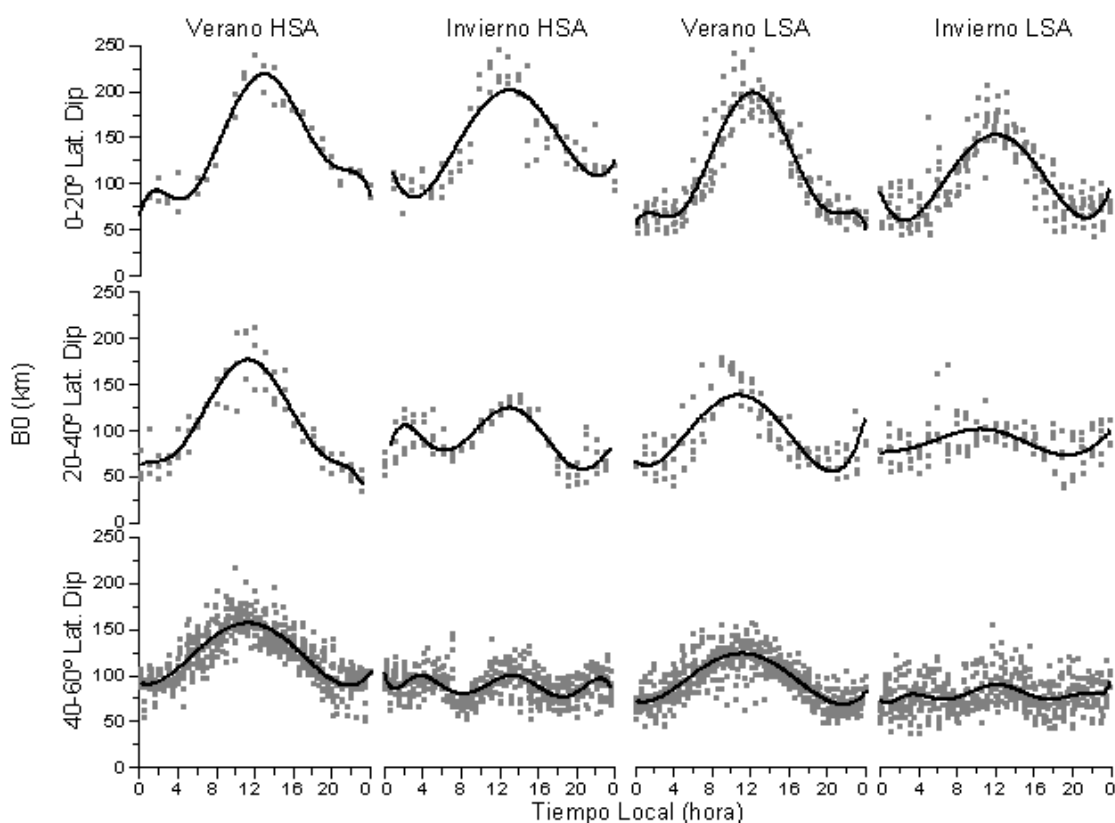


Figura A3.4. Variación en tiempo local del parámetro $B0$ para diferentes estaciones situadas dentro de los cinturones de latitud magnética dip indicados para diferentes estaciones del año y actividad solar. De izquierda a derecha: $B0$ durante verano para alta actividad solar (HSA, *High Solar Activity*), $B0$ durante invierno para HSA, $B0$ durante verano para baja actividad solar (LSA, *Low Solar Activity*) y $B0$ durante el invierno para LSA.

La variación en tiempo local del parámetro $B0$ (Figura A3.4) muestra una clara variación diurna durante el verano para todos los rangos de latitud magnética dip y nivel de actividad solar, siendo mayores los valores de mediodía que los de medianoche. La amplitud diurna durante el verano decrece a medida que aumenta la latitud y aumenta con la actividad solar. Además, los valores de $B0$ durante alta actividad solar son mayores que durante baja actividad solar. La variación en tiempo local del parámetro $B0$ en invierno es significativamente distinta a la observada en verano ya que esta depende claramente de la latitud. La variación en tiempo local de $B0$ en invierno a latitudes bajas muestra una clara variación diurna para todos los niveles de actividad solar, con los valores de mediodía mayores que los de medianoche. Además, los valores de $B0$ en invierno y la amplitud diurna a latitudes bajas son mayores durante alta actividad solar que durante baja actividad solar. El comportamiento de $B0$ en invierno a latitudes medias-bajas muestra una clara variación semidiurna durante alta actividad solar y una débil variación diurna para baja actividad

solar. Además, los valores de $B0$ en invierno a latitudes medias-bajas durante alta actividad solar son mayores que durante baja actividad solar. Finalmente, el comportamiento del parámetro $B0$ en invierno a latitudes medias-altas muestra una clara variación semidiurna, estando mejor desarrollada durante alta actividad solar que durante baja actividad solar. Los valores de $B0$ en invierno a latitudes medias-altas durante alta actividad solar también son mayores que durante baja actividad solar.

La Figura A3.5 muestra los resultados de este análisis para $B1$, y una primera inspección indica que este parámetro presenta una mayor dispersión que $B0$, especialmente para baja actividad solar. Además, esta dispersión es más significativa en invierno. La variación en tiempo local del parámetro $B1$ muestra una clara variación diurna durante el verano para todos los rangos de latitud y niveles de actividad solar, siendo menores los valores del mediodía que los de medianoche. La amplitud diurna durante el verano disminuye a medida que aumenta la latitud y los valores de $B1$ en verano durante alta actividad solar son menores que durante baja actividad solar. No se observa una clara variación en tiempo local del parámetro $B1$ durante el invierno de baja actividad solar, la dispersión en $B1$ es muy significativa y sólo se manifiesta una débil variación diurna a latitudes bajas. Sin embargo, se observa una clara variación diurna a bajas latitudes durante el invierno de alta actividad solar mientras que la variación semidiurna se convierte en dominante a latitudes medias-bajas y latitudes medias-altas. Además, los valores de $B1$ durante el invierno tienden a ser mayores que durante el verano.

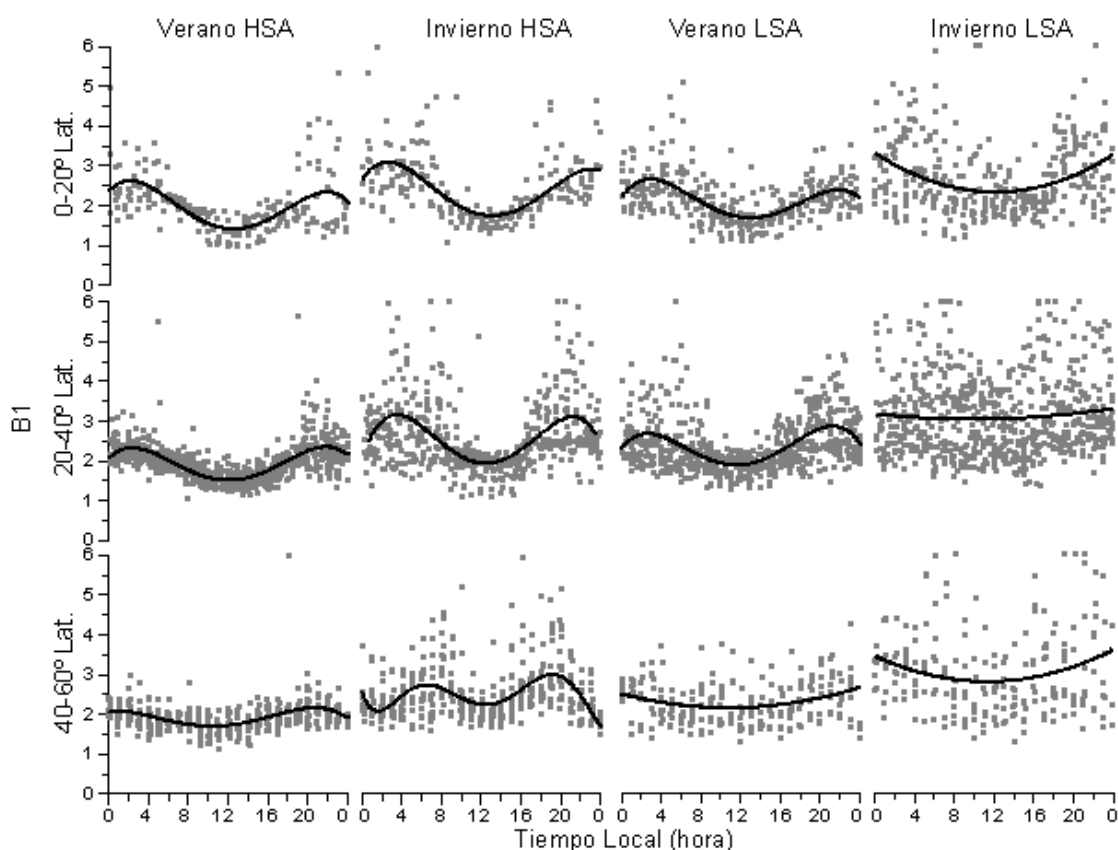


Figura A3.5. Lo mismo que la Figura A3.4 para el parámetro B1 agrupado las estaciones según la latitud geográfica.

Estos resultados experimentales son consistentes con los publicados en estudios previos (Adeniyi and Radicella, 1998; Sethi and Mahajan, 2002; Lei et al., 2004; Blanch et al., 2007), indicando que la aproximación realizada es razonable.

A3.2.2 Enfoque del modelado

El modelado de los parámetros $B0$ y $B1$ se basa en el ajuste de una función como la expresada en A3.1 al comportamiento experimental, siendo el grado de expansión de los modelos diferentes en $B0$ y $B1$. El grado máximo de la expansión para la dependencia latitudinal (n en la Ecuación A3.1) se ha fijado en 6 para los dos modelos. Esta condición es un compromiso razonable entre los diferentes comportamientos a altas, medias y bajas latitudes (Figuras A3.4 y A3.5) y el número de estaciones distribuidas en latitud. El orden máximo de la expansión para la dependencia longitudinal (en este caso para la dependencia en tiempo local) (m en la Ec. A3.1) se ha limitado a 4 para $B0$ pero sólo a 2

para $B1$. Trabajando con valores horarios no tiene sentido permitir más de 4 armónicos diurnos. Además, la gran dispersión observada en el parámetro $B1$, especialmente a baja actividad solar (Fig. A3.5) sugiere que se limite la representación de este parámetro a la media, el término de la variación diurna y el de la variación semidiurna. La dependencia temporal a lo largo del año (dependencia estacional) ha sido representada por una expansión de segundo grado de Fourier para modelar las variaciones anuales y semianuales según los resultados experimentales (Fig. A3.4 y A3.5) y los resultados de investigaciones previas (Altadill et al., 2008a). Por lo tanto, los coeficientes de Gauss de la Ecuación A3.1 se han expresado como:

$$\begin{Bmatrix} g_n^m(T) \\ h_n^m(T) \end{Bmatrix} = \sum_{q=0}^2 \begin{Bmatrix} ga_{n,q}^m \\ ha_{n,q}^m \end{Bmatrix} \cos(2\pi qT/12) + \begin{Bmatrix} gb_{n,q}^m \\ hb_{n,q}^m \end{Bmatrix} \sin(2\pi qT/12) \quad (\text{A3.2})$$

La aplicación de esta técnica a los valores experimentales ha proporcionado un conjunto de coeficientes armónicos que define un modelo global para cada año y parámetro ($B0$ y $B1$). Sin embargo, algunos de estos modelos anuales se ven afectados por la falta de datos en algunas estaciones situadas en puntos críticos; especialmente en aquellas estaciones situadas en latitudes más septentrionales o meridionales que determinan las condiciones de contorno del comportamiento del modelo. También afectarán la determinación del modelo la escasez de datos experimentales en aquellas regiones con gradientes en su comportamiento temporal y sin ninguna estación vecina. La Figura A3.6 muestra cómo la falta de datos produce un modelo anual poco realista en algunas estaciones (SMJ67 y GR13L). Para resolver esta falta de datos que perturba alguno de los modelos anuales se han añadido datos sintéticos a las latitudes críticas de la siguiente manera. Se han utilizado aquellos años con suficientes datos en las estaciones situadas estratégicamente que permiten obtener modelos anuales realistas para los dos parámetros ($B0$ y $B1$). Estos años son 2002, 2004, 2005 y 2006, que cubren prácticamente todo el rango de niveles de actividad solar (Figura A3.2). Se ha buscado la dependencia con la actividad solar de los coeficientes que se obtienen de cada uno de estos años de una forma similar a la que se realizó en el capítulo anterior para obtener el

Modelo Local (Blanch et al., 2007; Altadill et al., 2008a). Los coeficientes de Gauss de estos 4 años se han expresado como funciones lineales del índice de la actividad solar Rz_{12} y se ha obtenido un modelo global provisional que depende de la actividad solar para $B0$ y otro para $B1$. Finalmente, estos modelos provisionales se han utilizado para crear datos sintéticos para las siguientes estaciones críticas cuando no disponen de datos experimentales: SMJ67, PRJ18, JI91J, AS00Q y GR13L. La Figura A3.2 muestra los huecos de datos correspondientes a estas estaciones que han sido rellenados con datos sintéticos. Además, se ha creado un par de estaciones ficticias en el Hemisferio Sur situadas a la latitud magnética dip Sur de 60° y 70° (SYN60, SYN70 en la Figura A3.2) para $B0$ y una estación a 70° de latitud geográfica Sur para $B1$ para forzar el comportamiento del modelo a latitudes altas del Hemisferio Sur ya que se dispone de pocas estaciones en esas latitudes. Los datos sintéticos de estas estaciones ficticias se han obtenido utilizando los valores obtenidos por el modelo provisional a 60° y 70° de latitud magnética dip Norte para $B0$ y a 70° de latitud geográfica Norte para $B1$ (donde los modelos provisionales están bien definidos por los datos experimentales). Estos datos, correspondientes al Hemisferio Norte, se han desfasado 6 meses para satisfacer las simetrías estacionales en el Hemisferio Sur (Campbell, 1990). El último paso, previo a la construcción de los modelos globales, fue reanalizar el nuevo conjunto de datos, constituido por datos reales y datos sintéticos. Este nuevo análisis proporcionó los nueve conjuntos de coeficientes armónicos esféricos definitivos para cada parámetro ($B0$ y $B1$) (un conjunto para cada año). Estos conjuntos de coeficientes armónicos esféricos proporcionan modelos anuales realistas (Fig A3.6).

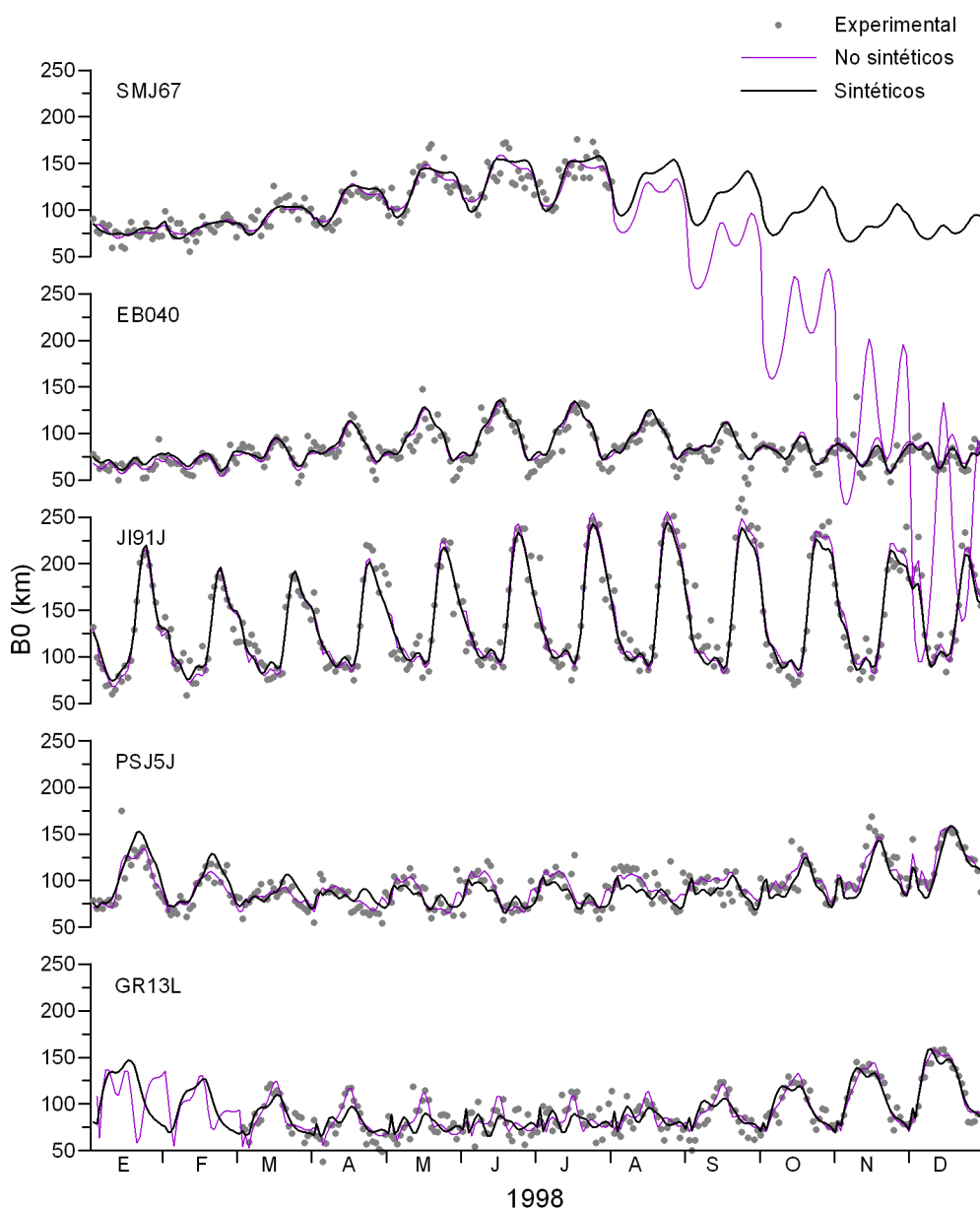


Figura A3.6. Resultados del modelo anual de 1998 para el parámetro B0 obtenido sin utilizar los datos sintéticos (línea morada) y utilizando datos sintéticos (línea negra). Los resultados se comparan con los datos experimentales para las estaciones indicadas (puntos grises).

Una vez se dispone de los coeficientes de Gauss definitivos para cada año se ha determinado la dependencia de estos coeficientes con la actividad solar expresándolos como funciones lineales del índice de actividad solar Rz_{12} . La Figura A3.7 muestra algunos ejemplos de este ajuste lineal.

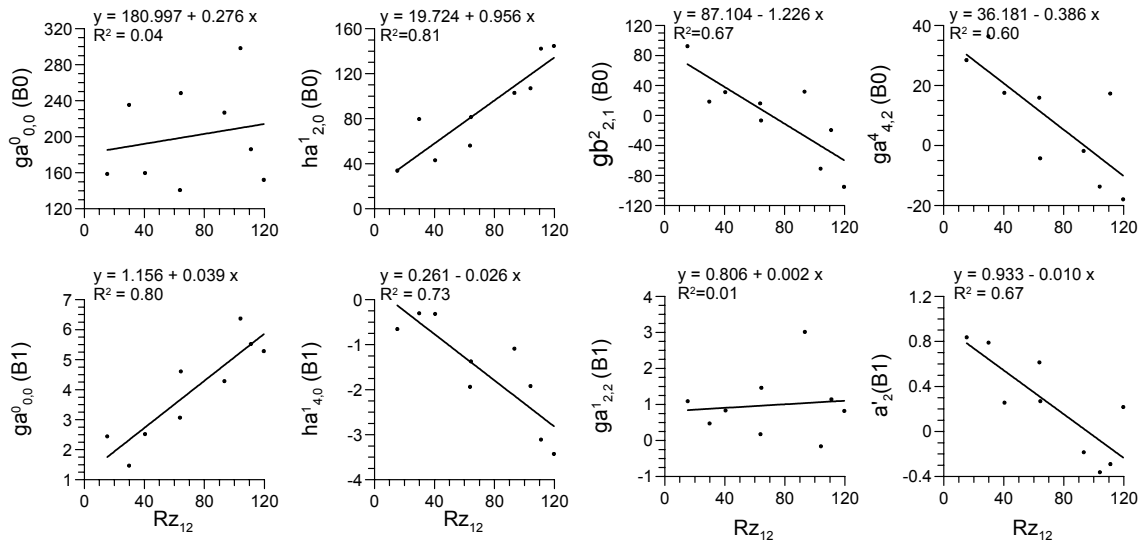


Figura A3.7. Dependencia de algunos de los coeficientes de la ecuación A3.2 con la actividad solar (índice Rz_{12}). Las líneas representan el mejor ajuste lineal para cada caso y se muestran las ecuaciones correspondientes al ajuste y el coeficiente de correlación.

Según la diferente parametrización que se ha utilizado, el Modelo Global de $B0$ está fijado por 215 coeficientes que dependen de la actividad solar y el Modelo Global de $B1$ está fijado por 145, también dependientes de la actividad solar. La Tabla A3.2 muestra los coeficientes correspondientes al Modelo Global de $B0$ y la Tabla A3.3 para el parámetro $B1$.

Tabla A3.2. Coeficientes del Modelo Global que simula el parámetro B0 de acuerdo con las ecuaciones A3.1 y A3.2. R corresponde al promedio anual de los valores medios mensuales del número de Wolf, Rz₁₂.

n	m	ga ^m _{n,0}	ha ^m _{n,0}	ga ^m _{n,1}	ha ^m _{n,1}	gb ^m _{n,1}	hb ^m _{n,1}	ga ^m _{n,2}	ha ^m _{n,2}	gb ^m _{n,2}	hb ^m _{n,2}
0	0	180.997+0.276R	0	-116.416+0.004R	0	-72.972+0.023R	0	41.199-0.037R	0	-19.627+0.005R	0
1	0	78.211+0.870R	0	-91.405-1.107R	0	-72.579-0.766R	0	66.334+0.540R	0	-17.501-0.210R	0
1	1	-110.590+0.601R	4.053-0.097R	101.755-0.712R	-4.570+0.049R	49.020-0.519R	2.162-0.073R	-31.230+0.318R	-3.919-0.020R	26.164-0.115R	-1.493+0.056R
2	0	-0.576-1.537R	0	-1.229+1.619R	0	-10.902+1.000R	0	8.089-0.574R	0	7.746+0.201R	0
2	1	-18.354-1.628R	19.724+0.956R	33.188+1.948R	-31.835-1.045R	27.553+1.295R	-18.088-0.797R	-37.556-0.785R	21.711+0.383R	13.872+0.292R	-11.062-0.057R
2	2	-94.089+1.670R	121.402-1.817R	128.536-2.098R	-153.578+2.215R	87.104-1.226R	-102.177+1.543R	-45.143+0.703R	63.311-0.823R	16.867-0.383R	-25.781+0.294R
3	0	11.768+0.811R	0	-10.840-0.826R	0	-5.125-0.691R	0	6.309+0.301R	0	-5.302+0.001R	0
3	1	-50.651+1.725R	8.536-1.718R	58.062-1.995R	3.410+2.027R	57.210-1.340R	-19.649+1.666R	-25.094+0.664R	3.467-0.787R	-4.155-0.239R	14.092+0.098R
3	2	-23.954-0.506R	47.220-0.807R	35.944+0.600R	-49.903+0.949R	14.202+0.571R	-41.130+0.698R	-8.540-0.375R	20.889-0.424R	10.582+0.041R	-3.988+0.129R
3	3	87.688-1.246R	-80.854+0.227R	-117.288+1.501R	97.713-0.312R	-60.803+0.809R	66.548-0.156R	37.357-0.448R	-37.891+0.113R	-27.659+0.302R	13.739-0.078R
4	0	0.030-0.334R	0	25.596+0.351R	0	-2.788+0.565R	0	4.317-0.297R	0	14.445-0.099R	0
4	1	-84.394+0.759R	98.890-0.893R	121.851-1.100R	-123.694+1.130R	72.413-0.496R	-88.655+0.791R	-33.783+0.223R	47.037-0.444R	20.423-0.270R	-16.873+0.157R
4	2	-44.380-0.446R	5.844+0.057R	44.317+0.691R	-13.539+0.010R	33.991+0.314R	-5.500-0.060R	-20.322-0.163R	0.632-0.010R	4.906+0.151R	-1.257+0.042R
4	3	86.869-0.711R	-14.778+0.809R	-108.778+0.839R	19.840-1.052R	-76.579+0.502R	6.860-0.605R	45.738-0.290R	-0.181+0.385R	-14.807+0.157R	3.558-0.214R
4	4	71.315-0.669R	112.644-0.712R	-80.227+0.781R	-144.575+0.987R	-67.035+0.702R	-82.188+0.360R	36.181-0.386R	42.634-0.217R	-4.484+0.019R	-27.398+0.287R
5	0	75.095-0.072R	0	-94.768+0.329R	0	-53.951+0.069R	0	40.891-0.042R	0	-24.746+0.128R	0
5	1	7.676+0.929R	71.184-1.672R	-31.947-1.061R	-85.934+1.829R	-28.554-0.726R	-63.409+1.285R	23.945+0.364R	34.156-0.776R	-4.006-0.136R	-6.986+0.227R
5	2	35.624-1.024R	-10.668+0.346R	-49.908+1.074R	15.965-0.457R	-25.379+0.644R	20.209-0.257R	7.764-0.373R	-6.386+0.157R	-4.792+0.147R	-6.025-0.069R
5	3	-26.151+0.886R	36.787+0.076R	23.290-0.871R	-51.204+0.047R	27.695-0.720R	-35.268-0.123R	-17.261+0.466R	22.579+0.053R	-2.264-0.060R	-8.073+0.049R
5	4	67.432-0.529R	-4.215-0.175R	-79.249+0.596R	3.058+0.174R	-54.109+0.384R	10.818+0.092R	32.321-0.252R	-5.956-0.068R	-12.436+0.101R	-3.146+0.022R
6	0	79.635-1.269R	0	-116.780+1.403R	0	-67.716+0.757R	0	40.222-0.518R	0	-16.957+0.273R	0
6	1	-44.388+0.491R	-60.494+1.333R	39.349-0.424R	56.783-1.367R	38.714-0.526R	55.381-1.204R	-31.296+0.291R	-23.458+0.716R	4.565+0.047R	-3.831-0.037R
6	2	-2.144+0.651R	24.306+0.027R	-1.502-0.698R	-23.744-0.116R	16.404-0.679R	-31.721+0.163R	-11.944+0.393R	21.485-0.034R	-11.758+0.063R	2.579-0.148R
6	3	26.352-0.744R	-78.142+0.395R	-21.127+0.741R	102.571-0.497R	-28.289+0.716R	66.398-0.278R	16.884-0.444R	-40.458+0.192R	3.872+0.003R	19.508-0.137R
6	4	51.888+0.137R	-70.708+0.838R	-64.105-0.104R	82.787-1.010R	-31.302-0.214R	55.424-0.661R	14.303+0.168R	-30.971+0.369R	-15.903+0.053R	12.081-0.142R

Tabla A3.3. Lo mismo que la Tabla A3.4 para el parámetro B1.

n	m	ga^m_{n,0}	ha^m_{n,0}	ga^m_{n,1}	ha^m_{n,1}	gb^m_{n,1}	hb^m_{n,1}	ga^m_{n,2}	ha^m_{n,2}	gb^m_{n,2}	hb^m_{n,2}
0	0	1.156+0.039R	0	1.725-0.053R	0	1.097-0.032R	0	-0.579+0.019R	0	0.265-0.010R	0
1	0	-2.895+0.023R	0	3.269-0.025R	0	2.278-0.015R	0	-1.789+0.009R	0	0.653-0.005R	0
1	1	-3.240+0.052R	-2.645+0.030R	4.404-0.062R	3.283-0.038R	2.827-0.038R	2.181-0.019R	-1.496+0.020R	-1.143+0.011R	0.688-0.011R	0.512-0.008R
2	0	-0.023-0.025R	0	-0.370+0.031R	0	-0.385+0.017R	0	0.150-0.009R	0	0.019+0.007R	0
2	1	1.704+0.006R	-1.766+0.022R	-2.115-0.007R	2.309-0.028R	-1.610-0.003R	1.314-0.015R	0.806+0.002R	-0.873+0.010R	-0.249-0.002R	0.445-0.005R
2	2	0.256-0.009R	-2.959+0.023R	-0.662+0.013R	3.643-0.030R	-0.208+0.001R	2.208-0.015R	0.144-0.001R	-1.326+0.010R	-0.205+0.005R	0.678-0.007R
3	0	1.730-0.030R	0	-2.072+0.035R	0	-1.027+0.016R	0	0.946-0.008R	0	-0.644+0.009R	0
3	1	3.925-0.060R	1.613-0.015R	-4.790+0.070R	-2.021+0.019R	-3.293+0.048R	-1.273+0.006R	1.829-0.026R	0.797-0.005R	-0.767+0.011R	-0.395+0.006R
3	2	-1.988+0.027R	-0.761+0.003R	2.258-0.031R	0.978-0.004R	1.772-0.026R	0.459-0.003R	-0.813+0.014R	-0.257+0.004R	0.173-0.003R	0.223-0.001R
4	0	-1.356+0.011R	0	0.079-0.003R	0	0.415-0.012R	0	-0.249+0.004R	0	-0.087+0.004R	0
4	1	-1.155-0.012R	0.261-0.026R	1.619+0.011R	-0.217+0.032R	0.989+0.009R	-0.361+0.019R	-0.745-0.001R	0.009-0.009R	0.347+0.000R	0.178+0.005R
4	2	4.672-0.032R	0.562+0.017R	-5.868+0.040R	-0.850-0.020R	-3.788+0.026R	-0.145-0.020R	2.079-0.014R	0.160+0.008R	-0.943+0.007R	-0.417+0.001R
5	0	2.477+0.000R	0	-1.815-0.011R	0	-1.571+0.002R	0	0.551+0.004R	0	-0.044-0.008R	0
5	1	2.160-0.010R	-0.305+0.012R	-2.618+0.010R	0.529-0.016R	-1.782+0.006R	0.634-0.007R	0.976-0.003R	-0.449+0.006R	-0.331+0.001R	-0.004-0.004R
5	2	-0.394+0.002R	0.851-0.020R	0.359-0.003R	-1.051+0.024R	0.357+0.002R	-0.239+0.012R	0.005-0.001R	0.210-0.008R	-0.028-0.003R	-0.322+0.005R
6	0	-6.760+0.064R	0	7.700-0.073R	0	5.394-0.054R	0	-2.788+0.026R	0	0.923-0.007R	0
6	1	-2.328+0.024R	-0.463+0.020R	2.923-0.027R	0.490-0.025R	1.768-0.019R	0.711-0.017R	-1.068+0.009R	-0.363+0.010R	0.596-0.004R	-0.073-0.004R
6	2	-1.911+0.016R	-4.519+0.041R	2.644-0.024R	5.569-0.050R	1.287-0.009R	3.707-0.031R	-0.894+0.007R	-2.121+0.019R	0.669-0.007R	0.933-0.010R

A3.3 Resultados del modelo y validación

Se han calculado los parámetros $B0$ y $B1$ a partir de los coeficientes que definen el Modelo Global (Tablas A3.2 y A3.3 respectivamente) para poder comprobar su validez comparándolos con los valores experimentales y con los valores predichos por el IRI. Las Figuras A3.8 y A3.9 muestran ejemplos de los resultados del modelo para $B0$ y $B1$ respectivamente para diferentes estaciones del año y niveles de actividad solar calculado a las 0 UT. Aunque estos modelos globales permiten obtener los parámetros en todo el rango de latitudes, los gráficos de contorno de las Figuras A3.8 y A3.9 se han restringido al rango de latitudes de 70°N y 50°S . Este rango geográfico corresponde al que se han obtenido los datos experimentales que alimentan el modelo y donde se considera que éste es válido. Un análisis detallado comparando los resultados del modelo (Figuras A3.8 y A3.9) con el comportamiento característico (Figuras A3.3 y A3.4) muestra que el modelo empírico reproduce el comportamiento dominante descrito en la sección anterior. El panel superior (a) de la Figura A3.8 muestra los resultados del parámetro $B0$ para el mes de Julio de alta actividad solar ($Rz=119.6$). Los resultados del Modelo Global muestran una variación diurna en todos los rangos de latitud del Hemisferio Norte (HN), siendo mayores los valores de mediodía que los de medianoche y mayores a latitudes bajas tal y como cabe esperar según el comportamiento característico observado en la Figura A3.3. El panel (b) de la Figura A3.8 muestra los resultados de $B0$ para el mes de Enero con alta actividad solar ($Rz=119.6$). Los resultados del Modelo Global muestran una variación diurna a latitudes bajas y una variación semidiurna a latitudes medias del HN, concordando con los resultados esperados (Fig. A3.3). El panel (c) de la Figura A3.8 muestra los resultados del Modelo Global para el mes de Julio con baja actividad solar ($Rz=15.2$). De nuevo se observa una variación diurna en todo el rango de latitudes del HN, con una amplitud diurna mayor a latitudes bajas (Fig. A3.3). Finalmente, el panel (d) de la Figura A3.8 muestra los resultados del Modelo Global para el mes de Enero con baja actividad solar ($Rz=15.2$). En él se observa una variación diurna a latitudes bajas y una variación semidiurna débil a latitudes más altas (Fig. A3.3).

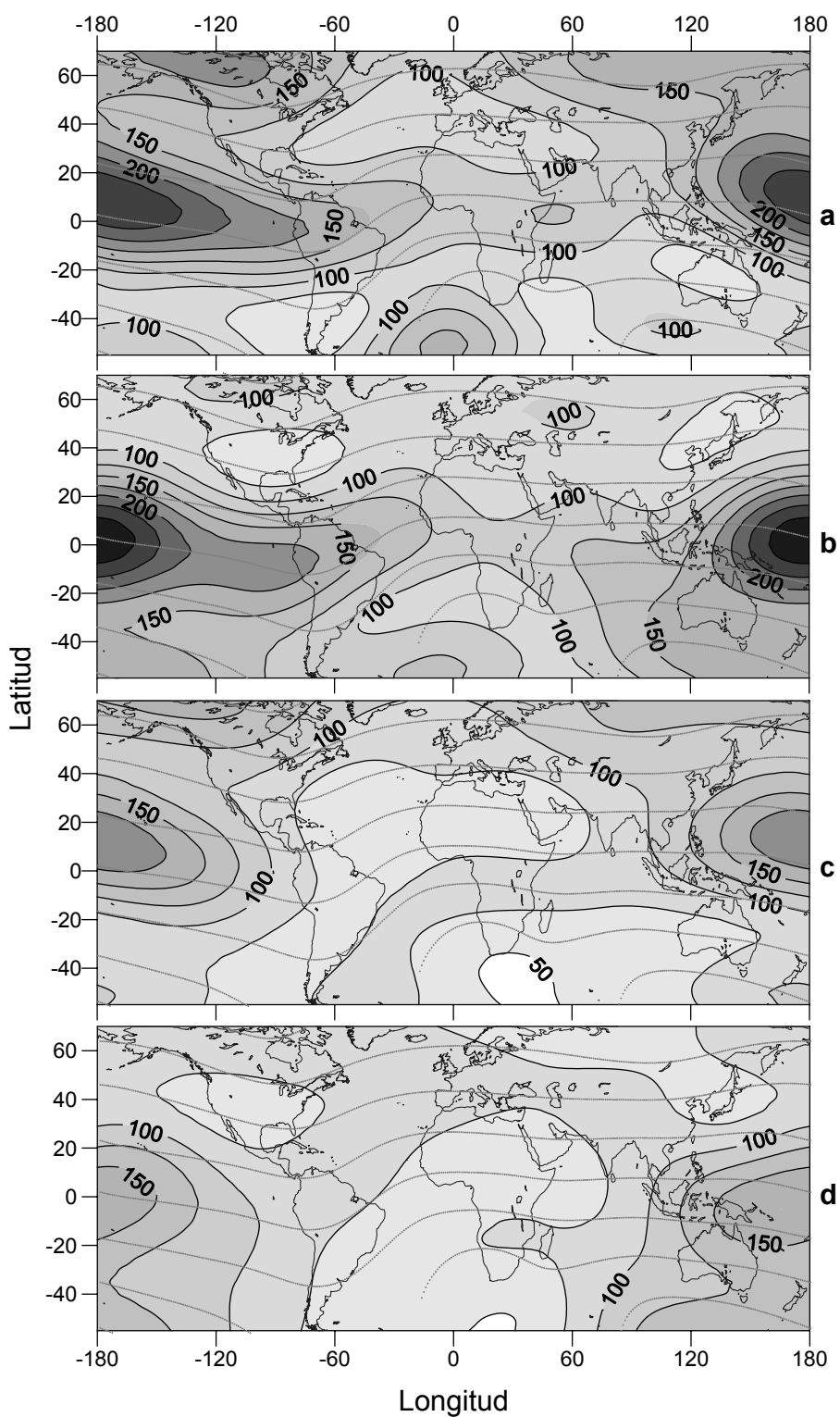


Figura A3.8. Mapas de contorno de los resultados del Modelo Global para el parámetro B0 en función de la latitud y longitud geográficas a las 0 UT para diferentes estaciones del año con diferentes niveles de actividad solar. Se superponen los paralelos de latitud magnética dip. Los paneles (a) y (b) corresponden a los meses de Julio y Enero respectivamente para alta actividad solar ($Rz_{12}=119.6$); los paneles (c) y (d) corresponden a los meses de Julio y Enero respectivamente para baja actividad solar ($Rz_{12}=15.2$).

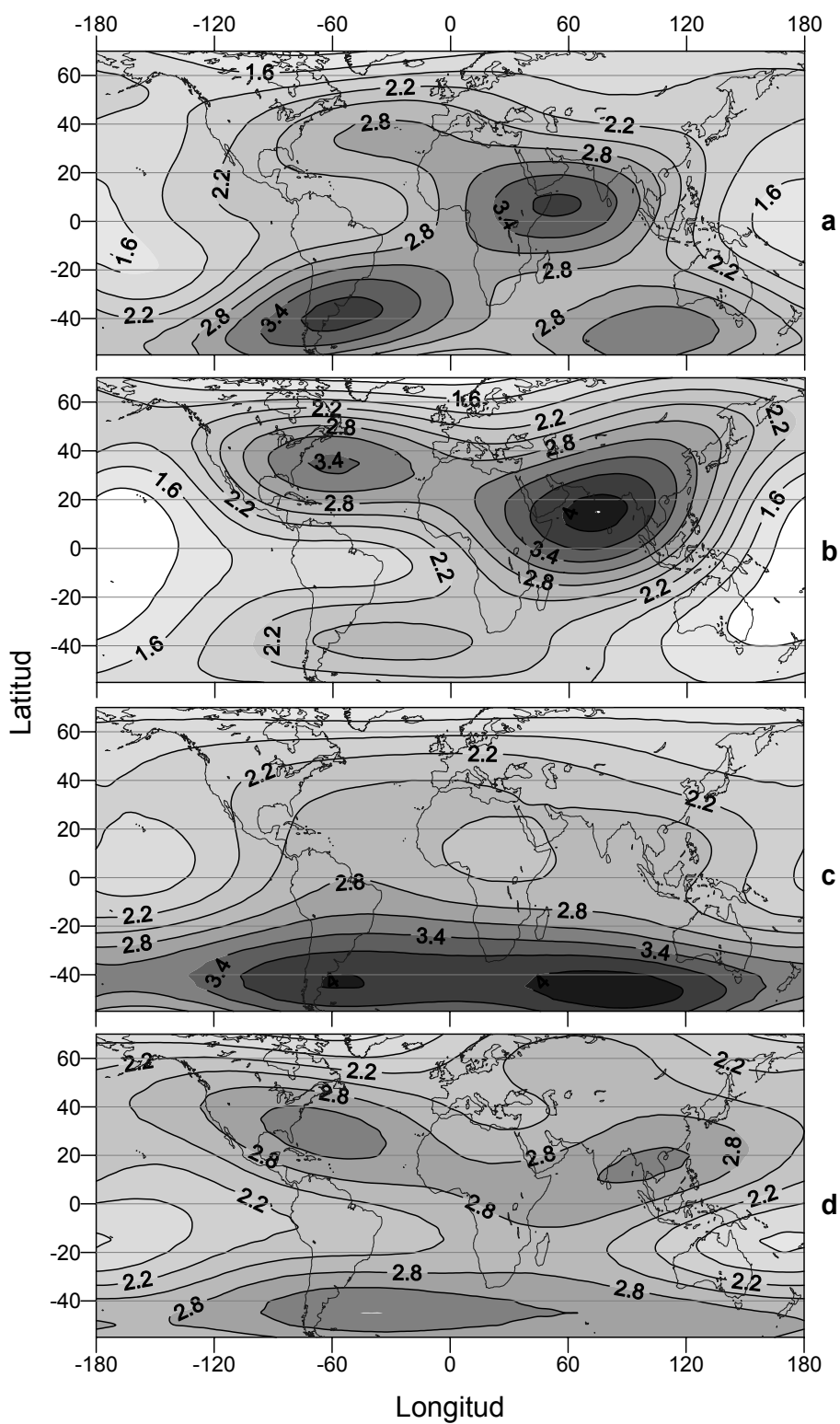


Figura A3.9. Lo mismo que la Figura A3.7 pero para el parámetro B1. En este caso se superponen los paralelos de latitud geomagnética.

Los paneles (a), (b), (c) y (d) de la Figura A3.9 corresponden a las mismas condiciones que en la Figura A3.8 pero para el parámetro $B1$. Comparando estos resultados con el comportamiento patrón observado en la Figura A3.4,

también se observa que el Modelo Global simula las variaciones temporales observadas según la latitud, época del año y actividad solar. Estos resultados indican que estos modelos globales son capaces de predecir al menos cualitativamente las variaciones temporales de los parámetros B0 y B1.

Además de validar el Modelo Global de manera cualitativa, las simulaciones de éste se han comparado con los valores obtenidos por el IRI y con los datos experimentales para evaluar la posible mejora que introduce. Las comparaciones con los valores que se obtienen del IRI muestran que el Modelo Global mejora significativamente la predicción de los parámetros $B0$ y $B1$. La Figura A3.10 muestra un ejemplo de estas comparaciones para el parámetro $B0$ utilizando las dos opciones del IRI, la estándar y la Gulyaeva, para un cierto nivel de actividad solar. Los resultados muestran que el Modelo Global reproduce las variaciones diurnas, semidiurnas y estacionales observadas en el comportamiento patrón (Fig. A3.3) para todas las latitudes mejor que el IRI. La opción estándar del IRI subestima las variaciones diurnas y estacionales de $B0$ para las estaciones de latitudes altas (SMJ67), subestima la variación diurna para las estaciones de latitudes medias (EB040 y GR13L) y proporciona buenos resultados a latitudes ecuatoriales (JI91J). La opción Gulyaeva del IRI proporciona buenos resultados a latitudes medias, pero no es el caso para latitudes altas y ecuatoriales (SMJ67 y JI91J respectivamente). Este comportamiento que predice el IRI concuerda con resultados anteriores (Bilitza, 2001): la opción Gulyaeva del IRI se comporta mejor que la opción estándar para el parámetro $B0$ a latitudes medias mientras que la opción estándar da mejores resultados a latitudes ecuatoriales.

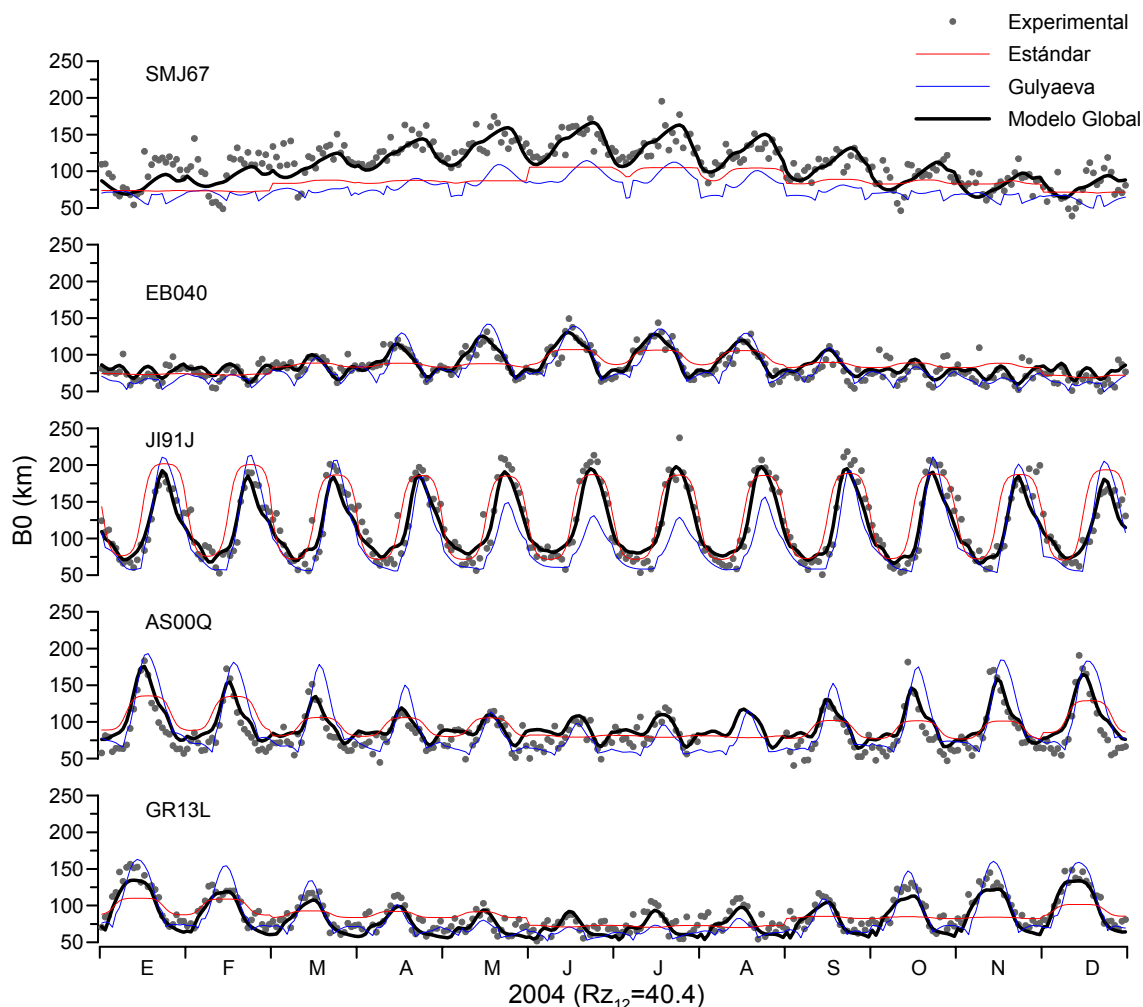


Figura A3.10. Comparación de las variaciones temporales del parámetro B0 obtenido a partir del Modelo Global (línea negra), la opción estándar del IRI2001 (línea roja) y la opción Gulyaeva del IRI2001 (línea azul) para las estaciones indicadas. Los puntos grises son los valores experimentales.

La Figura A3.11 muestra un ejemplo de la misma comparación utilizando sólo la opción estándar del IRI, para el parámetro *B1*. Los resultados muestran que el Modelo Global reproduce las variaciones temporales de *B1* mejor que el IRI. La opción estándar del IRI sobreestima la variación diurna de *B1* a latitudes altas (SMJ67), especialmente en los meses de invierno, y subestima significativamente la variación diurna a latitudes medias en el Hemisferio Sur (GR13L) mientras que da una buena aproximación del comportamiento de *B1* a latitudes ecuatoriales (JI91J).

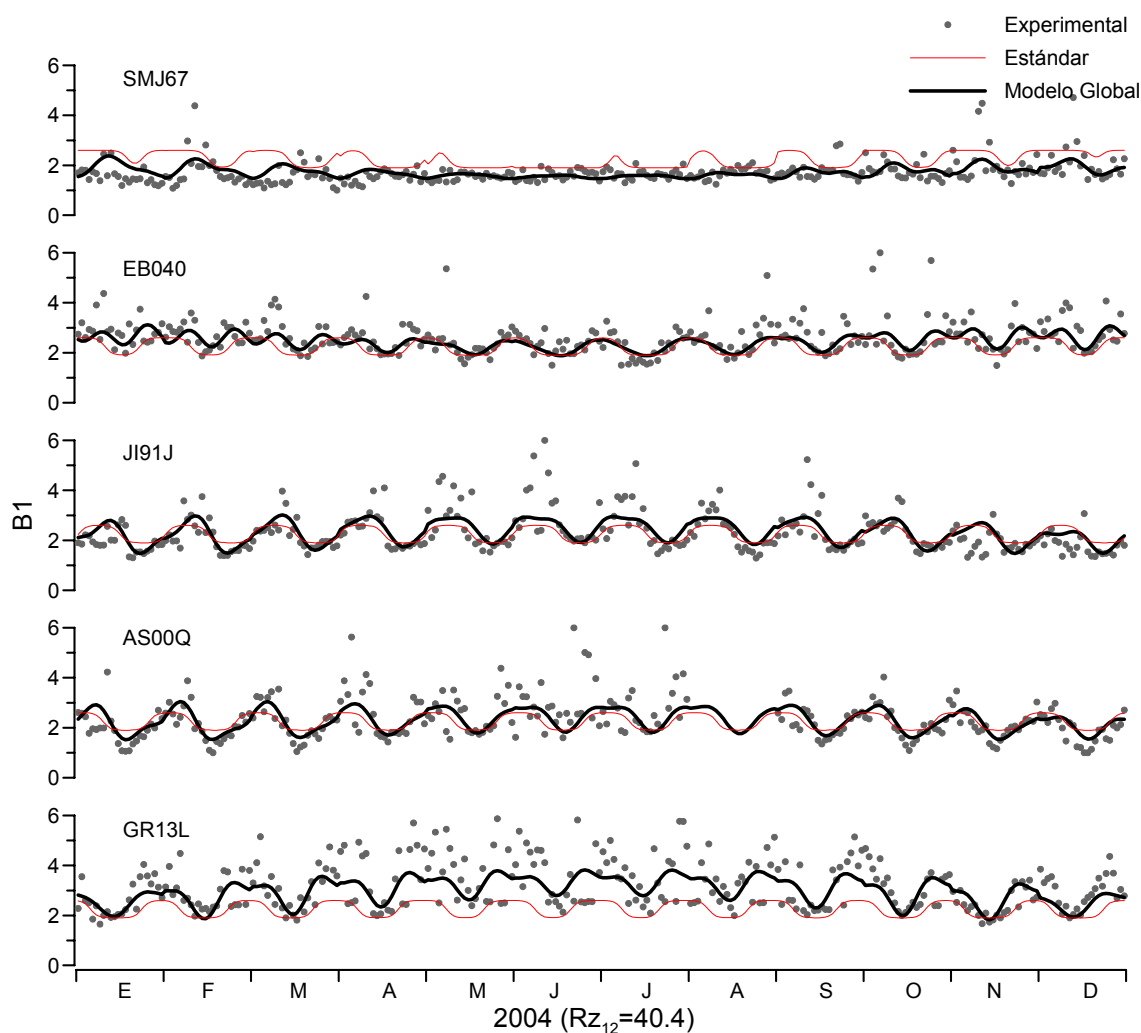


Figura A3.11. Comparación de las variaciones temporales del parámetro B1 obtenido a partir de del Modelo Global (línea negra) y la opción estándar del IRI2001 (línea roja) para las estaciones indicadas. Los puntos grises son los valores experimentales.

Se ha calculado la raíz del error cuadrático medio (RMSE, *Root Mean Square Error*) para cada año con respecto a los valores experimentales que proporciona cada modelo para comprobar numéricamente la bondad del Modelo Global y cuantificar esta mejora con respecto al IRI. El RMSE da una estimación de cómo ajusta una función (en este caso los parámetros predichos por cada uno de los modelos) a los valores experimentales, cuanto menor sea el RMSE, mejor es el ajuste entre las dos series. El RMSE se calcula a partir de:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum [f(x_i) - y_i]^2}{n}} \quad (A3.3)$$

donde n es el número total de datos, $f(x_i)$ es el valor de la función y y_i es el valor experimental correspondiente. Estas comparaciones se han realizado para cada año (diferentes niveles de actividad solar) y de manera global teniendo en cuenta las dos opciones del IRI para $B0$ y la opción estándar para $B1$. Los resultados muestran que los modelos globales proporcionan un RMSE inferior que el IRI para los dos parámetros y para todos los niveles de actividad solar (Figura A3.12).

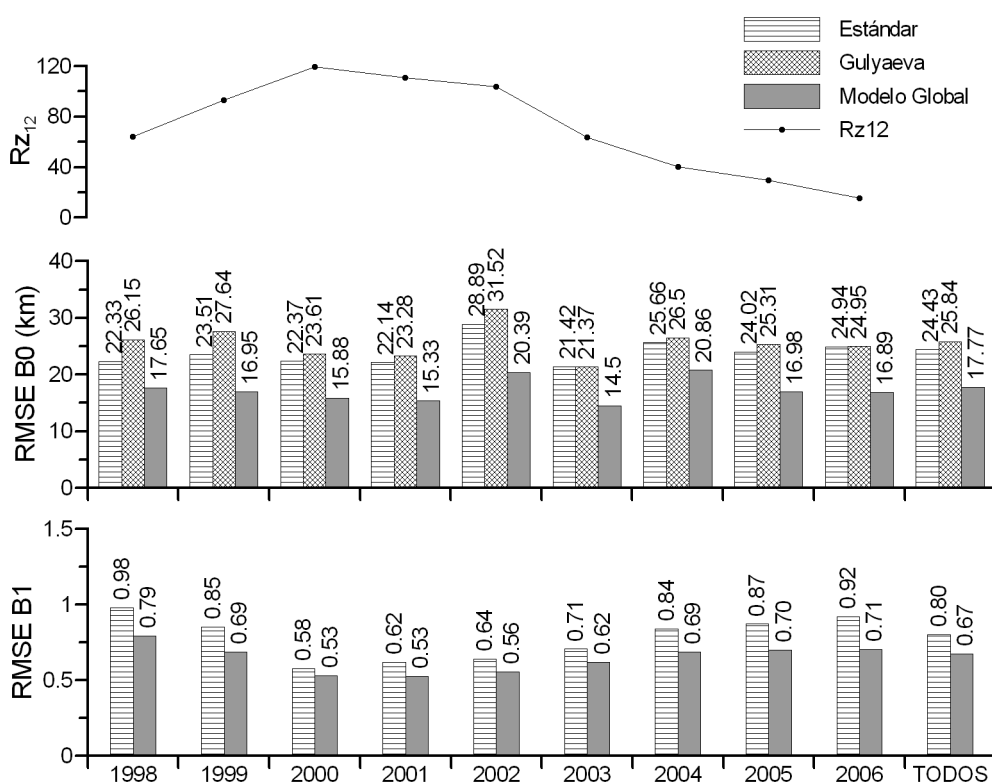


Figura A3.12. Comparación entre el RMSE obtenido con el Modelo Global y las dos opciones del IRI para el parámetro $B0$ (panel del medio) y la opción estándar del IRI2001 para $B1$ (panel inferior). El panel superior del gráfico muestra la actividad solar a partir del promedio anual de los valores medios mensuales del número de Wolf correspondiente a cada año, Rz_{12} .

El RMSE del Modelo Global de $B0$ para todo el período de análisis es 17.77 km, el RMSE de la opción estándar del IRI es 24.43 km y el de la opción Gulyaeva es 25.84 km. Por lo tanto, la predicción del Modelo Global de $B0$ proporciona un 37.5 % menos de error (RMSE) que la opción estándar del IRI y un 45.4 % menos que la opción Gulyaeva. Estos resultados indican una mejora significativa del Modelo Global comparando con el IRI para el parámetro $B0$. Referente a $B1$, el RMSE del Modelo Global para todo el período de estudio es

0.67 y mientras que el de la opción estándar del IRI es 0.80. Así, la predicción del Modelo Global de $B1$ proporciona un 19.4 % menos de error que el IRI. La mejora de la predicción del Modelo Global de $B1$ con respecto al IRI es inferior que la mejora para $B0$, seguramente debido a que el parámetro $B1$ presenta más dispersión que el parámetro $B0$. Aún así, existe una mejora significativa.

A3.4. Discusión

En este capítulo se ha determinado la formulación de un Modelo Global que simula las variaciones temporales de los parámetros $B0$ y $B1$ para días tranquilos. Se han utilizado los perfiles de densidad electrónica de 27 estaciones distribuidas alrededor del planeta durante el intervalo de tiempo de 1998 a 2006. Los valores experimentales de $B0$ y $B1$ se han obtenido del perfil mensual representativo y se han utilizado para obtener el comportamiento característico de éstos y para la parametrización del modelo. Las variaciones en hora local se han considerado iguales a las variaciones en longitud para resolver el problema de la pobre densidad de datos alrededor del planeta. Además, se han diseñado modelos provisionales de los dos parámetros para sintetizar datos a las latitudes críticas donde no se dispone de datos experimentales y para forzar el comportamiento de los modelos a latitudes altas del Hemisferio Sur. Se ha utilizado el análisis de armónicos esféricos como técnica de modelado. Este análisis ha proporcionado nueve conjuntos de coeficientes armónicos esféricos para cada parámetro $B0$ y $B1$. Finalmente, los coeficientes correspondientes a cada parámetro se han expresado como funciones lineales de la actividad solar (índice Rz_{12}), proporcionando dos modelos, uno para $B0$ y otro para $B1$. Los resultados de comparar la simulación de estos modelos empíricos con el IRI muestran que los modelos globales propuestos en este estudio mejoran la predicción de $B0$ en un 40% y la de $B1$ en un 20%. Por lo tanto, tiene sentido considerar estos modelos como posibles opciones para próximas versiones del IRI (IRI 2007 Workshop report, http://iri.gsfc.nasa.gov/docs/iri_07_report.html).

Aunque estos modelos pueden representar $B0$ y $B1$ a escala global, se ha limitado su validez al rango de latitudes de 70°N a 50°S donde se dispone de

datos experimentales. Otro punto débil de estos modelos surge de la aproximación realizada de considerar las variaciones en tiempo local equivalentes a las variaciones en longitud. Esto podría esconder algunos efectos longitudinales en la variación de los parámetros. Por lo tanto, futuros trabajos para desarrollar mejores modelos deberían buscar una mejor cobertura temporal y espacial de los datos. La utilización de datos de satélite (Gulyaeva, 2007) y la obtención de los parámetros experimentales $B0$ y $B1$ de ionosondas clásicas (Zhang et al., 2008) ayudarían en este aspecto.

La metodología para obtener estos modelos globales de $B0$ y $B1$ se podría aplicar a otros parámetros ionosféricos, como por ejemplo $hmF2$, hmE y Hm , para mejorar su actual predicción durante días tranquilos. Esto podría ayudar, entre otras cosas, a la obtención de desviaciones del comportamiento en condiciones de calma durante intervalos magnéticamente perturbados. En la siguiente parte de la tesis se analiza el comportamiento ionosférico en condiciones geomagnéticas perturbadas. En ella se determinan las variaciones características generadas por las tormentas geomagnéticas y en concreto se caracterizarán las perturbaciones en la altura del máximo de densidad, $hmF2$, respecto el comportamiento tranquilo. La pretensión del siguiente análisis es obtener un modelo empírico que simule estas variaciones motivado por la falta de un modelo de ésta característica ionosférica en los modelos actuales de referencia, como el IRI.

