

DETERMINACION DE LOS EFECTOS IONOSFERICOS SOBRE SEÑALES  
TRANSIONOSFERICAS EN LA ARGENTINA. PARTE II: Predicciones  
del SLIM (Semi-empirical Low-Latitude Ionospheric Model).

Nieves Ortiz de Adler, Rodolfo G. Ezquer y Teresita Heredia

Laboratorio de Ionósfera, Instituto de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología,  
Universidad Nacional de Tucumán.

RESUMEN

En la parte I de este trabajo se calculó el tiempo de retardo ( $\tau$ ) utilizando un modelo ionosférico global, el IRI-86. Dado que parte de la ionósfera sobre la Argentina está bajo la influencia de la anomalía ecuatorial, en esta parte del trabajo se calcula el  $\tau$  a partir de un modelo desarrollado para la ionósfera de baja latitud, el que pone especial énfasis en los efectos de la mencionada anomalía. Este modelo es el SLIM-87 (Semi-empirical Low - Latitude Ionospheric - Model, 1987). El mismo provee una base de datos con los perfiles de densidad electrónica, seis coeficientes para generarlos usando dos funciones tipo Chapman, y el contenido electrónico total (TEC). Con el TEC obtenido del SLIM se calculó el tiempo de retardo ( $\tau_s$ ), para distintos puntos geográficos de la Argentina, frecuencias, épocas del año, horas del día y actividad solar.

Dos de los seis coeficientes de la base de datos del SLIM son la densidad electrónica y la altura del pico de la Región F, los que fueron reemplazados por datos experimentales obtenidos de sondadores. Con esta nueva base de datos se calculó el tiempo de retardo ( $\tau_s^*$ ) para idénticas condiciones que  $\tau_s$ .

Los valores de  $\tau_s$  y  $\tau_s^*$  han sido comparados con valores experimentales de tiempo de retardo ( $\tau_{e,}$ ) calculados con mediciones de TEC realizadas en Tucumán.

Los resultados obtenidos son similares a los obtenidos con el IRI-86.

ABSTRACT

Using a global ionospheric model (IRI-86) the time delay ( $\tau$ ) was calculated in the first part of this work. Due to part of the ionosphere over Argentina is affected by the equatorial anomaly, in this paper  $\tau$  is calculated using an ionospheric model which takes into account the effects of the mentioned anomaly. It is the SLIM-87 (Semi-empirical Low - Latitude Ionospheric Model, 1987). This model gives a data base with the electron density profiles, six coefficients to generate them with two like-Chapman functions and the total electron content (TEC). Using the TEC obtained with SLIM the time delay ( $\tau_s$ ) is calculated for different Argentinien stations, frequencies, seasons, hours and solar activity.

Two coefficients of the SLIM data base are the electron density and height at the peak of the F region, which were replaced for experimental values obtained from ionosondes. With this new data base the time delay ( $\tau_s^*$ ) is calculated for the same conditions of  $\tau_s$ .

The calculated  $\tau_s$  and  $\tau_s^*$  values are compared with experimental values ( $\tau_{ex}$ ) obtained with TEC measurements carried out at Tucumán.

The obtained results are similar to those obtained with IRI-86.

## INTRODUCCION

En la primera parte de este trabajo se ha determinado el tiempo de retardo para distintos puntos geográficos de la Argentina, utilizando al IRI-86, uno de los más recientes modelos globales de la ionósfera.

Dado que parte del territorio argentino está bajo la influencia de la Anomalía Ecuatorial (AE), en este trabajo se ha utilizado un modelo semiempírico que tiene en cuenta dicha influencia, para determinar el contenido electrónico total (TEC) y el tiempo de retardo ( $\tau$ ).

## MODELO

El modelo Semi-empirical Low - Latitude Model (SLIM)(Anderson et al., 1982), val lido en el rango  $\pm 24^\circ$  de latitud dip pone, a diferencia de otros modelos, especial énfasis en el transporte de plasma por drift  $\vec{E} \wedge \vec{B}$ . Este drift ensancha los perfiles de densidad electrónica, tanto el inferior como el superior, en zonas de la ionósfera donde la AE hace sentir su influencia. Por esta causa el SLIM es un modelo con más capacidad para reproducir la ionósfera en bajas latitudes.

Anderson (1973) calculó los perfiles teóricos de densidad electrónica para latitudes medias y bajas basándose en distintos modelos para atmósfera neutra, vientos, etc., y mediciones experimentales del drift  $\vec{E} \wedge \vec{B}$  realizadas en Jicamarca. Dada la complejidad del cálculo para obtener dichos perfiles, Anderson et al., 1987; desarrollaron el SLIM, en el cual cada uno de los perfiles teóricos fue ajustado por medio de dos funciones tipo Chapman, una por debajo y otra por encima del pico de la región F. Cada perfil tiene seis coeficientes de ajuste entre los que intervienen la densidad electrónica máxima ( $Nm_{\max}$ ) y la altura del máximo ( $h_p$ ).

El SLIM provee una base de datos que da los perfiles de densidad electrónica y sus respectivos seis coeficientes así como el  $TEC_s$  correspondiente, entre  $24^\circ N$  y  $24^\circ S$  de latitud dip, cada  $2^\circ$ , para máxima y mínima actividad solar, para las 24 horas del día para equinoccios y solsticios. El modelo no diferencia entre equinoccio de primavera y otoño. Pero sí diferencia entre solsticio de verano e invierno.

Se calcularon los tiempos de retardo utilizando la base de datos del SLIM ( $\tau_s$ )

para distintas frecuencias, actividad solar, épocas del año, horas del día y puntos geográficos de la Argentina.

Con el objeto de incorporar observaciones experimentales que permitieran mejorar las predicciones del TEC, y por lo tanto del  $\tau$ , se implementó un sistema que permite calcularlos para distintas frecuencias, actividad solar, épocas del año, horas del día y puntos geográficos de la Argentina.

Cuando se usan datos experimentales de  $N_{max}$  y  $h_p$  en el cálculo del contenido electrónico total y del correspondiente tiempo de retardo, el modelo se denominó SLIMEX, y los parámetros calculados  $TEC_s^*$  y  $\tau_s^*$ .

Se hizo un estudio comparativo de las predicciones de  $TEC_s$ ,  $TEC_s^*$  para Tucumán, ya que se dispone de información experimental del contenido electrónico ionosférico sobre esa información.

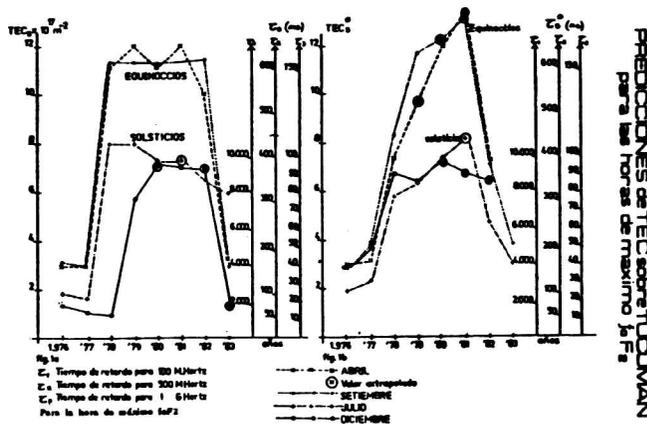


Fig. 1.a: Contenido electrónico sobre Tucumán y tiempo de retardo para la hora de máxima foF2 en función de los años, calculados con el SLIM.

Fig. 1.b: Idem calculados con el SLIMEX.

La figura 1a muestra los valores de contenido electrónico dados por el SLIM en función de los años, para Tucumán ( $-12^\circ$  de latitud dip), así como los tiempos de retardo para 100, 500 MHzertz y 1 GHzertz ( $\tau_1$ ,  $\tau_2$  y  $\tau_3$ ).

Se han elegido los meses de Setiembre (-.-) y Abril (X-X) como representativos de época equinoccial y de Julio (+ - +) y Diciembre (o - o) para solsticios de invierno y verano.

La figura 1b muestra los valores de  $TEC_s^*$  y  $\tau_s^*$  para las mismas condiciones.

Teniendo en cuenta la figura 2 que muestra la variación de la actividad solar en unidades de flujo solar en F10.7 cm en función de los años, se puede ver que los valo-

## 14 Determinación. .Parte II

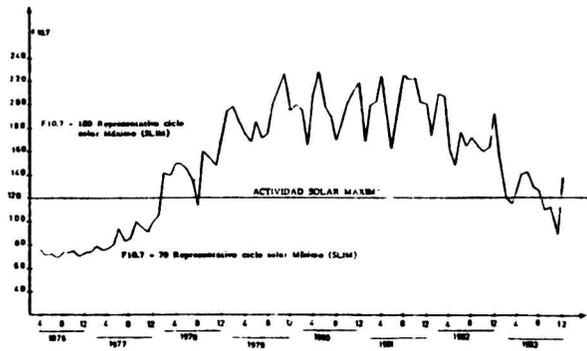


Fig. 2: Flujo solar en F10.7 cm en función de los años.

res más altos de TEC ( $\delta \tau$ ) corresponden a los años de actividad solar mayor. Este ciclo solar, que es el 2º ciclo solar de actividad más alta registrado, tiene un máximo de F10.7 = 200.

El SLIM considera flujos solares de 180 y 70 como valores representativos de períodos de máxima y mínima actividad solar, y sólo toma valores extremos para construir su base de datos. Por este motivo, a los efectos del cálculo del  $TEC_s$ ,  $TEC_s^*$  (y los  $\tau_s$  y  $\tau_s^*$  correspondientes) se han tomado los perfiles del SLIM que corresponden a actividad solar máxima cuando F10.7 es  $\geq 120$  y F10.7  $< 120$  para actividad solar mínima.

Es evidente que habría períodos que correspondan claramente a actividad solar mínima (1976 - 1977, con F10.7 = 70) y máxima (1979 - 1980 - 1981 - 1982 con F10.7 = 180), según el criterio del SLIM. Pero los años 1977 - 1978 y 1982 - 1983, corresponden a períodos de actividad solar intermedia, y no tienen su correspondiente base de datos construida en el SLIM. Por ese motivo los resultados que corresponden a estos períodos merecerán un análisis especial.

Las figuras 1a y 1b corresponden a las horas de máximo foF2, para las cuales es de esperar los mayores valores de TEC y por lo tanto de tiempo de retardo.

La figura 3 muestra las variaciones de la hora de máximo foF2 en función de los años (o ciclo solar).

Para los equinoccios de Setiembre y Abril la hora de máximo está entre las 15 y 16 TL en períodos de mínima actividad solar (1976 - 1977) y entre las 17 - 18 TL para actividad solar máxima ( $\sim 1980$ ).

En las figuras 4a, 4b y 4c puede verse la superposición de los valores de  $TEC_s$  y  $TEC_s^*$  de las figuras 1a y 1b. Para los meses equinociales y para el solsticio de invierno (4a y 4b) las predicciones del SLIM y las del SLIMEX son coincidentes para ac-

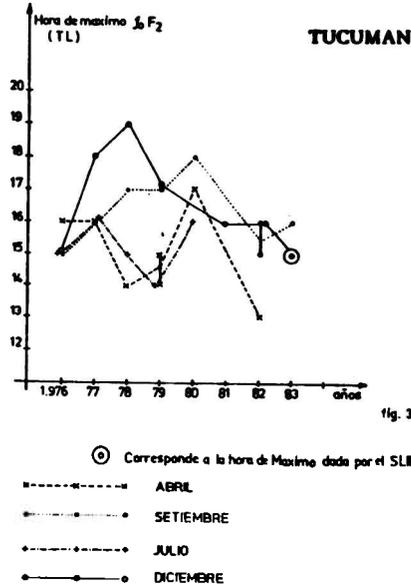


Fig. 3: Hora de ocurrencia de la máxima foF2 en función de los años.

tividad solar mínima (1976 - 1977) y están en buen acuerdo en el orden de magnitud del contenido electrónico para el período de máxima actividad solar (1980 - 1981). Para equinoccios durante máxima actividad solar, el SLIM predice un valor máximo de TEC de  $12,3 \times 10^{17} \text{ m}^{-2}$  a las 22 TL, y de  $3,3 \times 10^{17} \text{ m}^{-2}$  a las 14 - 15 TL para actividad solar mínima.

Los valores de contenido electrónico graficados corresponden a la hora de máximo foF2 sobre Tucumán (figura 3).

Para períodos de actividad intermedia hay discrepancia entre los valores de contenido electrónico dados por el SLIM y el SLIMEX. Esto era previsible ya que el modelo no tiene en cuenta actividad solar intermedia, y al introducir los datos de  $N_{\text{máx}}$  y  $h_p$  en el SLIMEX se está introduciendo a través de éstos, la dependencia con la actividad solar. Los valores de contenido electrónico del SLIMEX son menores que los del SLIM para meses equinociales y el solsticio de invierno.

En el solsticio de verano, para años de actividad solar baja e intermedia el SLIM predice valores de contenido electrónico menores que el SLIMEX. Situación inversa a la de equinoccios y solsticios de invierno. Esto está indicando que los valores de  $N_{\text{máx}}$  del SLIM son menores que los experimentales, por lo menos para el período de baja actividad solar. Para actividad solar intermedia la discrepancia podría deberse, además de a esta causa, al hecho de que la base de datos ha sido construída para valores extre-

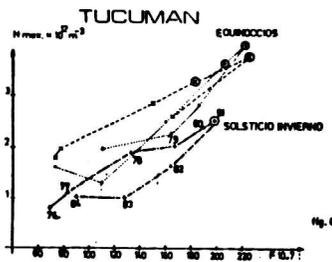
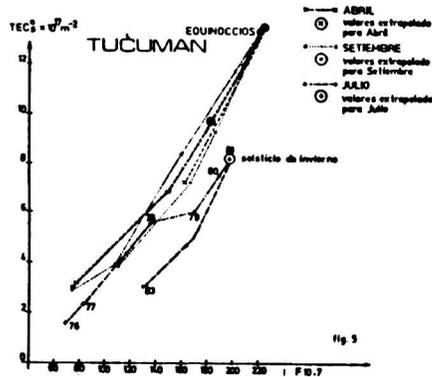


Fig. 5: TEC<sub>5</sub> en función de F10.7 cm para el período 1976 - 1983.

Fig. 6: Nm<sub>max</sub> en función de F10.7 cm para el período 1976 - 1983.

rán predicciones similares para el contenido electrónico en equinoccios y solsticios de invierno cuando la actividad sea próxima a 70 o 180. Pero para el caso de actividad solar intermedia es conveniente utilizar el SLIMEX.

En cuanto al solsticio de verano, tanto el SLIM como el SLIMEX coinciden en sus predicciones solamente para alta actividad. Dado que el SLIMEX incorpora datos experimentales, sería éste el modelo más adecuado para calcular TEC y  $\tau$  en actividad media y baja.

#### COMPARACION CON DATOS EXPERIMENTALES

Para analizar la bondad del SLIM y del SLIMEX se comparan los valores de TEC predichos por los modelos con datos experimentales de Tucumán para el período Abril 1982 a Marzo 1983 (Ezquer y Adler, 1989), época de actividad intermedia.

La figura 7 muestra los valores de contenido electrónico sobre Tucumán versus ho-

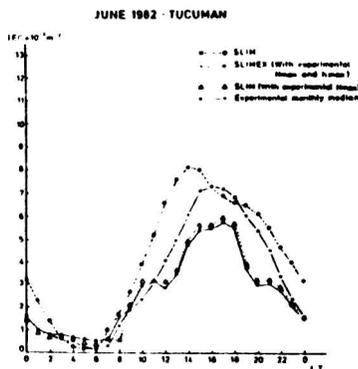


Fig. 7: Comparación entre los valores de TEC experimental y los dados por el SLIM y el SLIMEX.

ra local para junio 1982.

Se han graficado las predicciones del SLIM (o-o), del SLIMEX (-.-) y datos experimentales (X-X).

El SLIM predice buenos valores entre las 03 y las 08 TL. Presenta un máximo más temprano y sobreestima un 33% a las 14 hs TL (hora de máximo). El SLIMEX da buenas predicciones del TEC entre las 22 y 10 TL.

La hora de máximo coincide con la de los valores experimentales, y subestima en un 24% el TEC de las 16 TL (hora de máximo experimental).

Las figuras 8a y 8b muestran la variación latitudinal (latitud dip) del  $TEC_S^*$  para periodos de alta (1979 - 1980) y baja actividad solar (1976 - 1977), de los meses equinocciales de Setiembre y Abril.

Los valores corresponden al  $TEC_S^*$  calculado con datos ionosféricos de Tucumán, San Juan, Buenos Aires y Puerto Argentino.

La figura 8a muestra los valores de  $TEC_S^*$  para las 12 TL, y la 8b, los valores que corresponden a la hora de máximo TEC en Tucumán para actividad solar alta (17 - 18 TL) y para actividad baja (15 - 16 TL).

De las figuras 8a y 8b puede observarse cómo cambia la variación latitudinal del TEC desde las 12 a las (17 - 18) TL. Es marcado el efecto que produce la AE.

- El TEC crece con la actividad solar, siendo más marcado el efecto sobre Tucumán (la pendiente para baja actividad es menor que para alta). Esto sería consecuencia de que la ionización aumenta en todas latitudes por el aumento de F10.7 pero sobre Tucumán también aumenta la influencia de la AE.

A partir de las gráficas de  $TEC_S^*$  versus latitud dip pueden estimarse por interpolación los valores del  $TEC_S^*$  en latitudes donde no se dispone de datos para calcularlo.

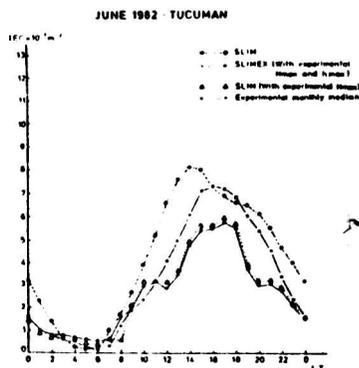


Fig. 7: Comparación entre los valores de TEC experimental y los dados por el SLIM y el SLIMEX.

ra local para junio 1982.

Se han graficado las predicciones del SLIM (o-o), del SLIMEX (.-.) y datos experimentales (X-X).

El SLIM predice buenos valores entre las 03 y las 08 TL. Presenta un máximo más temprano y sobreestima un 33% a las 14 hs TL (hora de máximo). El SLIMEX da buenas predicciones del TEC entre las 22 y 10 TL.

La hora de máximo coincide con la de los valores experimentales, y subestima en un 24% el TEC de las 16 TL (hora de máximo experimental).

Las figuras 8a y 8b muestran la variación latitudinal (latitud dip) del  $TEC_s^*$  para periodos de alta (1979 - 1980) y baja actividad solar (1976 - 1977), de los meses equinocciales de Setiembre y Abril.

Los valores corresponden al  $TEC_s^*$  calculado con datos ionosféricos de Tucumán, San Juan, Buenos Aires y Puerto Argentino.

La figura 8a muestra los valores de  $TEC_s^*$  para las 12 TL, y la 8b, los valores que corresponden a la hora de máximo TEC en Tucumán para actividad solar alta (17 - 18 TL) y para actividad baja (15 - 16 TL).

De las figuras 8a y 8b puede observarse cómo cambia la variación latitudinal del TEC desde las 12 a las (17 - 18) TL. Es marcado el efecto que produce la AE.

- El TEC crece con la actividad solar, siendo más marcado el efecto sobre Tucumán (la pendiente para baja actividad es menor que para alta). Esto sería consecuencia de que la ionización aumenta en todas latitudes por el aumento de F10.7 pero sobre Tucumán también aumenta la influencia de la AE.

A partir de las gráficas de  $TEC_s^*$  versus latitud dip pueden estimarse por interpolación los valores del  $TEC_s^*$  en latitudes donde no se dispone de datos para calcularlo.

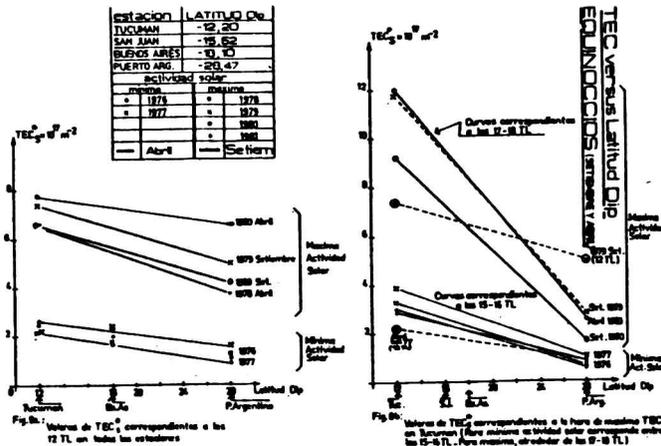


Fig. 8.a: Variación latitudinal del  $TEC_s$  a las 12 TL para períodos de máxima y mínima actividad solar.

Fig. 8.b: Idem pero a la hora de máximo TEC en Tucumán.

CONCLUSIONES

- 1) Se ha puesto operativo un programa de cálculo que permite determinar el valor del contenido electrónico total, y a través de éste, los efectos en las ondas transionosféricas que dependan de él, haciendo uso de un modelo ionosférico semiempírico (el SLIM).
- 2) Los resultados indican que el valor del contenido electrónico depende fuertemente de la actividad solar y de la época del año. Para período equinoccial los mayores valores de TEC en actividad solar mínima son  $3 \times 10^{17}$  y para actividad solar máxima  $13 \times 10^{17}$ . En solsticios los valores son  $2 \times 10^{17}$  y  $7 \times 10^{17}$  respectivamente.  
Estos valores muestran que la diferencia entre equinoccios y solsticios es menor en actividad solar baja.
- 3) El estudio comparativo con datos experimentales indica que el SLIMEX muestra un excelente acuerdo entre sus predicciones y los valores experimentales entre las 22 y 10 TL. Además permite obtener hasta un 70% del TEC en horas de máximo.
- 4) El SLIMEX reproduciría mejor que el SLIM los valores de TEC, para períodos de baja, mediana y alta actividad solar. Pero se necesita datos de foF2 de un sondador

## 20 Determinación...Parte II.

cercano al lugar donde se quiere calcular el TEC.

- 5) La estimación del contenido electrónico utilizando el SLIMEX, para latitudes donde no se dispone de foF2, puede realizarse interpolando los valores deseados de las gráficas  $TEC_s^*$  versus latitud dip.
- 6) Los resultados son similares a los obtenidos con el IRI-86.

Agradecimientos: Este trabajo fue parcialmente subvencionado por el CONICET a través del PRONARP. Rodolfo G. Ezquer es investigador del CONICET.

Los autores agradecen a Ricardo J. Ezquer la colaboración brindada en la obtención de los datos y la confección del presente trabajo.

### REFERENCIAS

- Anderson, D.N., 1973: A theoretical study of the ionospheric F-region equatorial anomaly - II - Results in the American and Asian sectors; Planet. Space Sci., 21, 421.
- Anderson, D.N., Mendillo M. and Herniter B., 1987: A Semi-Empirical Low-Latitude Ionospheric Model, Radio Science, 22(2), 292.
- Ezquer, R.G. and Ortiz de Adler, N., 1989: Electron Content Over Tucumán, Journal of Geophysical Research, Vol. 94, A7.