

TESIS PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE
LICENCIATURA EN ASTRONOMÍA



Facultad de Ciencias
**Astronómicas
y Geofísicas**
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA

APLICACIÓN DE ALGORITMOS
GENÉTICOS EN MAPAS
IONOSFÉRICOS DE f_oF2 PARA
AMÉRICA DEL SUR.

Directora: **Ángela Erika Gularte Scarone**

Codirector: **Daniel Diego Carpintero**

LA PLATA, ARGENTINA
FEBRERO DE 2017

AUTORA: JULIANA MARÍA JAEN

*Dedicado a
mi familia*

Agradecimientos

Agradecemos a las siguientes instituciones integrantes de RAPEAS: *Dirección de Investigación de la Armada (DIIV)*, *Instituto Antártico Argentino (IAA)*, *Instituto de Ciencias Astronómicas de la Tierra y del Espacio (ICATE)*, por habernos brindado la oportunidad de hacer uso de los datos ionosféricos de las estaciones de Buenos Aires, Trelew, Ushuaia (DIIV), Base Antártica San Martín (IAA), San Juan (ICATE), Concepción (Chile) y Jicamarca (Perú).

Son muchas las personas que me acompañaron en tantos años de carrera y no puedo dejar de agradecer:

A Brenda por acompañarme los primeros pasos de mi camino por esta facultad. Desde el segundo día del ingreso que nos conocimos y desde entonces no ha dejado de darme ánimos, incluso por aquellos días en donde todo era cuesta arriba.

A Claudio por mostrarnos una rama de la astronomía que no sabíamos que existía, por tomarnos bajo su ala e incentivarnos al mundo atmosférico.

A Francisco por comprometerse tanto para que aprendiéramos estadística que nos hizo amar la materia. Gracias por las lindas horas de cursar una materia que la mayoría detesta y la dedicación hizo: primero que nos entre en la cabeza y segundo que le encontremos el gustito!. En esas clases conocí excelentes personas, tanto docentes como alumnos que llegaron a ser grandes amigos.

A Erika por mostrarme el mundo ionosférico y por abrirme las puertas a su trabajo dándome ánimos y ayudándome incondicionalmente. En vos Erika encontré no solo una persona con todas las letras sino una amiga y guía. Gracias E!

A Daniel por saber hacer las preguntas claves para darme cuenta donde patino!, por su humor y tiempo que me ayudaron a hacer las cosas en tiempo y forma. Gracias Robin!

A Mili... Cómo agradecerte tantas horas, mates, explicaciones compartidas? y no olvidarme de las horas de peleas contra los programas, que por más que uno se frustra cuando no salen, es incluso divertido con tu compañía y ayuda!. Al poco tiempo de conocerte ya había encontrado una amiga incondicional!. Cursar, estudiar, dar consultas, rendir finales, todo siempre fue más fácil y placentero. Hasta el punto que una sola mirada y ya sabemos lo que estamos pensando. GRACIAS por tu compañía y amistad... las palabras no alcanzan...

A Juanma, nuestro tercer mosquetero, que te extrañamos por la facultad, pero me hace tan feliz que hayas encontrado tu camino. Gracias por las horas, cursadas compartidas y aguante!.

A Consu que de ser la novia de Juanma pasaste a ser una gran amiga!

A María Marta, creo que no compartí con nadie la cantidad de kilómetros y horas de charla que pasamos juntas, y a pesar de lo que digas.. sos una amiga incondicional!, gracias por todo!

A Silvi que hasta en momentos difíciles, salís con la mejor onda y compañía.

A Guille N. que estos últimos tiempos encontré un gran compañero de trabajo y amigo, me hiciste el aguante en la sala compartiendo mates, encontrándome errores y agregando humor a las horas.

A Mauricio, Isa, Francisco, Mica, Aye, Facu y Romi que me hicieron sentir como en casa desde el primer día en CH. Gracias!

A Lore y Ale que me dieron un lugar en el Observatorio Pedagógico, siempre con la mejor onda y me hicieron el aguante cuando mi vida se tornó complicada y difícil.

A Priscila, Mary, Carla, Noe, Guille A., Pablo, Amilcar, Leila, Fede G., Lucas, Natacha, Gabi, Laure, el Tano (Dankel), Pablo S., Mati. Con todos compartí mates, cursadas y charlas que siempre hacen más leve el camino.

A Tobi por darme una mano y ánimos cuando todo parecía negro.

A Cristina F., Marcela, Cristina A., Nancy, Jorge P., Gladys, Edgar, Rodolfo, Ivonn, Pato, Fausto, Lilia, Fede B., Guille H., Guille R., Lydia, Roberto, Gustavo, y tanto otros (seguro me estoy olvidando de medio observatorio). Que con su buena onda hacen de esta facultad un mejor lugar y me dieron una mano cuando se las pedí.

A Leo, mi compañero de vida, por aguantarme tantos: 'No puedo, tengo que estudiar', por compartir conmigo tantos años y entender a duras penas los sacrificios. Y gracias por las ediciones fotográficas que están en esta tesis!

A Lili que es parte de mi familia, a José que me hubiera encantado que hoy esté presente. Ambos siempre estuvieron firmes a la hora de alentarme.

A mi hermano que si bien nos llevamos mejor lejos que conviviendo, tampoco era para que vayas del otro lado del charco! te perdono solo porque me regalaste un título de Tía con un gordito hermoso.

A mis viejos que me bancaron tanto tiempo y no me pusieron peros cuando elegí esta carrera tan remota y larga.

A Ani y Nati, por ayudarme a crecer y enseñarme lo que es la amistad de verdad e incondicional, hace más de 20 años las conozco y todavía siento que vuelvo a la adolescencia cuando estoy con ustedes!, las considero mis hermanas!. Y gracias por el aguante a pesar de tantos 'No puedo, tengo que estudiar'.

A los Dybiec que siempre me ayudaron y me dieron ánimos, yo los considero mis segundos padres.

A Marcelo, que a pesar que en escenarios trágicos siempre eras el primero que sacrificábamos.. la vida demostró que sos unos de los pocos que quedó en la balsa! Gracias por darme tu amistad y una mano cuando lo necesité!

A Toto, por ayudarme cuando necesitaba un cambio de perspectiva.

A todos, muchas gracias! porque estuvieron ahí y porque sé que aprendí de cada uno.

La ionosfera es una región importante de la atmósfera, caracterizada por responder a las propiedades de un plasma. La señal electromagnética que la atraviesa sufre alteraciones; por esta razón, es de gran interés estudiarla y modelarla tanto para las telecomunicaciones como para la radioastronomía, entre otras ciencias.

El modelo más utilizado hoy en día es el modelo Ionosférico Internacional de Referencia (*International Reference Ionosphere*, IRI). Es un modelo semiempírico que describe tanto las densidades como las temperaturas electrónicas e iónicas de la ionosfera. Desde su creación en 1969, el modelo ha ido mejorando constantemente. Uno de los parámetros más relevantes de la ionosfera es la frecuencia crítica de la capa $F2$, f_oF2 , que corresponde al máximo de densidad de electrones de la ionosfera. El IRI calcula la f_oF2 a través de una serie de coeficientes que provienen de un conjunto de funciones en términos de la latitud y longitud geográficas y del tiempo universal. Dichos coeficientes fueron calculados en 1962 y ajustados con los datos de ionosondas disponibles en el mundo entre los años 1954 y 1958. La distribución y disponibilidad del dato de sondadores ionosféricos en los años '50 se hallaba en su mayoría ubicados en el hemisferio norte y por lo tanto la representación del hemisferio sur fue mínima en el cálculo de los coeficientes. Hoy en día se dispone de más estaciones y observaciones a nivel mundial; sin embargo, los coeficientes que calculan la f_oF2 provistos por el IRI siguen siendo los mismos calculados en el año 1962.

En este trabajo se propone probar la capacidad de un algoritmo genético para recalculer los coeficientes utilizando nueva información de ionosondas distribuidas en América del Sur. Estos algoritmos se basan en conceptos tomados de la evolución biológica y su ventaja es que poseen la capacidad de explorar espacios de soluciones de muchas dimensiones, así como también, de afrontar muestras desfavorables.

Implementando la información disponible para la región desde 1958 hasta 2009 y tomando como modelo matemático al provisto por el IRI, se calcularon dos nuevas series de coeficientes para cada mes, que corresponden a una actividad solar alta y baja, respectivamente.

Para medir la calidad de los resultados se realizó un análisis estadístico comparando las f_oF2 provenientes de la implementación de los coeficientes del algoritmo genético, las f_oF2 del IRI y los datos de ionosondas.

Se compararon las correlaciones entre los datos observados y los obtenidos con ambos modelos, obteniendo una mejora significativa en los coeficientes, descartándose asimismo la hipótesis de que ambos modelos sean estadísticamente iguales.

Por lo tanto se demostró que el algoritmo genético es una técnica viable que permite mejorar los coeficientes para la región de América del Sur.

The ionosphere is an important region of the atmosphere. Since it responds to plasma properties every signal that passes through it experiences changes. For this reason, it is important to study and model this region.

The most important parameter is the critical plasma frequency of the F layer, f_oF2 , which represents the maximum electron density of the ionosphere.

The currently most used model is the International Reference Ionosphere (IRI). IRI is an empirical model developed to predict plasma parameters in the Earth's ionosphere. Since its creation, in 1969, it has been improved continuously.

The f_oF2 is mapped through two sets of 988 coefficients provided by IRI and calculated with a series of functions that depend on geographical longitude and latitude and universal time. These coefficients were fitted with ionosondes' measurements taken between 1954 and 1958. The distribution of ionosondes in the '50s was mostly in the northern hemisphere, and the involvement of the southern hemisphere was weak for the coefficients fitness. Nowadays there are more ionosondes distributed worldwide, but the coefficients are the same as in 1962.

In this work, we propose to test the ability of a genetic algorithm to calculate the coefficients using new ionosondes' data distributed across South America. These algorithms are based on concepts of evolutionary biology. One of their advantages is their ability to converge rapidly even in unfavorable scenarios.

With information available from 1958 to 2009, and taking as a reference the coefficients provided by IRI, we have calculated two new series of coefficients for each month. One series corresponds to high solar activity and the other one to low solar activity.

To test the results we have performed an statistical analysis. We compared the f_oF2 ionosondes' observations with the f_oF2 provided by the genetic algorithm and those by the IRI coefficients.

We computed the correlation between the observed data and the calculated f_oF2 from our coefficients as well as the IRI's. As a result, we find a significant improvement, discarding at the same time the hypothesis of the two models being statistically the same.

Therefore, we demonstrate that the genetic algorithm is a viable method to calculate the ionospheric coefficients for South America.

Índice general

Agradecimientos	v
Resumen	vii
Abstract	ix
Lista de figuras	xiii
Lista de tablas	xv
1. Introducción	1
2. La ionosfera	3
2.1. La atmósfera	3
2.2. Descripción de la ionosfera	5
2.3. Variaciones en la ionosfera	6
2.4. Propagación de ondas en un plasma	9
2.5. Modelo físico de Chapman	11
2.5.1. Procesos de producción y procesos de pérdida	12
3. Metodología	15
3.1. Ionosonda	15
3.2. Modelo Internacional: IRI	18
3.3. Algoritmos genéticos	20
3.3.1. PIKAIA	20
4. Resultados	27
4.1. Resultados	27
4.2. Variaciones por actividad solar	31
4.3. Variaciones diarias	33
4.4. Variaciones estacionales	34
4.5. Variaciones latitudinales	36
5. Conclusiones	39
5.1. Trabajos a futuro	41

Índice de figuras

2.1. Clasificaciones de la atmósfera terrestre	4
2.2. Perfil de densidad electrónica de la ionosfera	5
2.3. Número de manchas solares desde el año 1954 hasta el 2016	6
2.4. Diferencias entre índices de manchas solar mensual e índice solar ionosférico.	6
2.5. Latitudes geomagnéticas y latitudes modip	8
2.6. Ejemplo del Spread F en Jicamarca.	8
2.7. Capas Chapman	11
3.1. Ionosonda e ionograma	16
3.2. Distribución de ionosondas utilizadas en América del Sur.	17
3.3. Diagrama de flujo de un algoritmo genético.	25
4.1. Correlación entre los observables y los modelos	28
4.2. Correlación entre los observables y los obtenidos de los modelos, agrupados por intervalos de actividad solar	31
4.3. Correlación entre las f_oF2_{Obs} y las f_oF2 de los modelos, para intervalos horarios representativos de día y noche	33
4.4. Correlación entre los observables y los modelos, para las estaciones del año	35
4.5. Correlación entre las f_oF2_{Obs} y las f_oF2 calculadas con los modelos, para Jicamarca, San Juan, Concepción, Ushuaia y Base General San Martín	37
4.5. (Continuación)	38

Índice de tablas

4.1. Valores estadísticos calculados para cada muestra de datos y coeficientes de correlación entre la f_oF2_{Obs} y las f_oF2 de los modelos.	28
4.2. Medias, varianzas, estadístico F del test de Fisher, para los errores relativos en valor absoluto entre las f_oF2 obtenidas de sondadores y las f_oF2 calculadas con los modelos.	29
4.3. Valores estadísticos y coeficientes de correlación entre las f_oF2_{Obs} y las f_oF2 de los modelos agrupados por actividad solar alta, media y baja.	32
4.4. Valores estadísticos para las diferencias relativas en valor absoluto entre las f_oF2_{Obs} y las f_oF2 de los modelos para actividad solar alta, media y baja.	32
4.5. Valores estadísticos y coeficientes de correlación entre las f_oF2_{Obs} y las f_oF2 de los modelos, para intervalos horarios representativos de día y noche.	33
4.6. Valores estadísticos para las diferencias relativas en valor absoluto entre las f_oF2_{Obs} y las f_oF2 calculadas con los modelos para horas diurnas y nocturnas.	34
4.7. Valores estadísticos calculados para cada estación del año y los coeficientes de correlación entre las frecuencias críticas observadas y las obtenidas por los modelos.	34
4.8. Valores estadísticos para las diferencias relativas en valor absoluto entre las f_oF2_{Obs} y las f_oF2 de los modelos para cada estación del año.	34
4.9. Valores estadísticos calculados para cada muestra de datos y coeficientes de correlación entre las f_oF2_{Obs} y las calculadas con los modelos para cada estación representativa de la latitud modip.	36
4.10. Valores estadísticos para las diferencias relativas en valor absoluto entre las f_oF2_{Obs} y las f_oF2 calculadas con los modelos para cada estación representativa de la latitud modip.	36

La atmósfera es el abrigo de nuestro planeta hogar. Como tal, nos protege de los rayos biológicamente dañinos que provienen de nuestra estrella más cercana, el Sol, y a su vez se calienta y mantiene el calor durante las horas en las que falta la radiación solar, permitiendo que la vida se desarrolle en nuestro pequeño mundo.

La ionosfera terrestre es la región de la alta atmósfera capaz de distorsionar las señales electromagnéticas que la atraviesan, por ejemplo en la transmisión de señales de Sistemas Globales de Navegación por Satélites [*Global Navigation Satellite System (GNSS)*][22]. Del mismo modo juega un rol importante para la radioastronomía y otras técnicas de exploración espacial que se desarrollan desde la Tierra. Por estas causas es importante estudiar y conocer dicha región de la atmósfera terrestre y su climatología global.

El modelo de referencia en la actualidad para este tipo de estudios es el modelo de la Ionosfera Internacional de Referencia [*International Reference Ionosphere (IRI)*]. Es un modelo semiempírico elaborado conjuntamente por los principales organismos internacionales encargados de la física ionosférica: el Comité de Investigaciones Espaciales [*Committee on Space Research (COSPAR)*] y la Unión Internacional de Radio Ciencia [*Union Radio-Scientifique Internationale (URSI)*]. Además de ser el modelo recomendado por el COSPAR y la URSI, también lo es por la Unión Internacional de Telecomunicaciones [*International Telecommunication Union (ITU)*] y por la Organización Internacional de Normalización [*International Standards Organization (ISO)*].

IRI describe tanto las densidades como las temperaturas electrónicas e iónicas de la ionosfera terrestre en un rango de altitud que se encuentra entre los 50 km y los 2000 km. Desde su creación en 1969, el modelo se ha ido mejorando de manera constante, tanto por incorporación de nuevos datos,

como por la aplicación de nuevas técnicas de modelado. Una descripción detallada del modelo, su marco matemático, la base de datos subyacentes, los gráficos y el listado de los parámetros involucrados fueron dados en [3] y [8]. Las últimas versiones del modelo fueron descriptas en [5] y [4]. A pesar de los esfuerzos, el modelo IRI sigue hoy en día utilizando los mapas del Comité Consultivo para la propagación de ondas de radio en la ionosfera [*Comité Consultatif International des Radiocommunications* (CCIR)] [9] para representar el modelo global de la frecuencia crítica del máximo de la densidad electrónica ionosférica, f_oF2 . Dichos mapas consisten en un conjunto de coeficientes que responden al modelo desarrollado por W. B. Jones y otros colegas [16] [17].

Este trabajo de tesis propone probar la capacidad de un algoritmo genético basado en el algoritmo PIKAIA desarrollado por P. Charbonneau y B. Knapp [11], para recalcular para América del Sur los coeficientes del desarrollo en serie de funciones provistas por el CCIR que calculan la frecuencia del máximo de densidad electrónica de la ionosfera f_oF2 . Los códigos de optimización basados en algoritmos genéticos se destacan frente a las técnicas tradicionales en cuanto a que poseen la capacidad de explorar espacios de soluciones de muchas dimensiones, así como también de afrontar muestreos desfavorables: dos características esenciales que encontramos en nuestro problema al requerirse 23712 coeficientes para la representación global de la f_oF2 a partir de observaciones aisladas en el espacio y el tiempo. Así, a partir de la gran cantidad de datos hoy en día existentes e implementando esta moderna técnica de modelado es plausible esperar una mejor representación de f_oF2 .

Los coeficientes obtenidos de la implementación del algoritmo genético serán validados por medio de la comparación estadística de la f_oF2 con los obtenidos por el IRI y comparados a su vez con los datos observados de América del Sur. Las mediciones de f_oF2 fueron provistas por la *Red Argentina Para el Estudio de la Atmósfera Superior* (RAPEAS) a través de sus instituciones integrantes: la *Dirección de Investigación de la Armada* (DIIV), el *Instituto Antártico Argentino* (IAA) y el *Instituto de Ciencias Astronómicas, de la Tierra y del Espacio* (ICATE).

En el Capítulo 2 se hará una descripción breve de la atmósfera, con hincapié en la ionosfera, región donde se centra este trabajo, sus capas y sus propiedades.

En el Capítulo 3 se abordará la metodología utilizada para alcanzar nuestro objetivo. Para ello se describirá cómo trabaja una ionosonda y su producto, se dará una breve descripción del IRI, y se explicarán los principios bajo los cuales trabajan los algoritmos genéticos. En particular, como trabajamos con el algoritmo PIKAIA, se explicarán las opciones que éste presenta y las implementadas.

Los resultados obtenidos serán analizados con herramientas estadísticas para evaluar la calidad de los coeficientes obtenidos en el Capítulo 4.

Finalmente, en el Capítulo 5 se expondrán las conclusiones obtenidas y los trabajos a futuro.



<https://www.pinterest.com/pin/423197696206658869/>

En este capítulo haremos una breve descripción del medio en el cual se centra esta tesis, desde su morfología hasta el modelo teórico más simple que lo representa.

Comenzaremos con una breve explicación de la atmósfera (Sec. 2.1) y nos centraremos en el núcleo de interés, la ionosfera (Sec. 2.2). Al ser este un medio sensible a los cambios, se explicarán las variaciones principales que la afectan de manera regular (Sec. 2.3).

Luego explicaremos cómo es la propagación de una señal en la ionosfera (Sec. 2.4) para entender cómo se mide la frecuencia de máxima densidad de electrones. Finalmente, expondremos cómo es el modelo teórico de Chapman y los procesos involucrados que generan el máximo de densidad electrónica (Sec. 2.5).

La atmósfera

La atmósfera es la envoltura gaseosa que rodea nuestro planeta. Se extiende desde los 0 km, desde la superficie del planeta, hasta los 2000 km y se encarga, entre otras cosas, de absorber la radiación del Sol que es perjudicial para que se desarrolle la vida, manteniéndonos protegidos de las altas y bajas temperaturas, como así también de rocas provenientes del espacio que amenazan nuestra existencia.

A esta capa gaseosa se la puede clasificar verticalmente de distintas formas: por temperatura, por composición o por contenido de plasma, como se muestra en la Fig. 2.1 En particular, la clasificación que es de interés para esta tesis es por contenido de plasma. Podemos diferenciar entre una capa neutra y otra ionizada, llamada ionosfera.

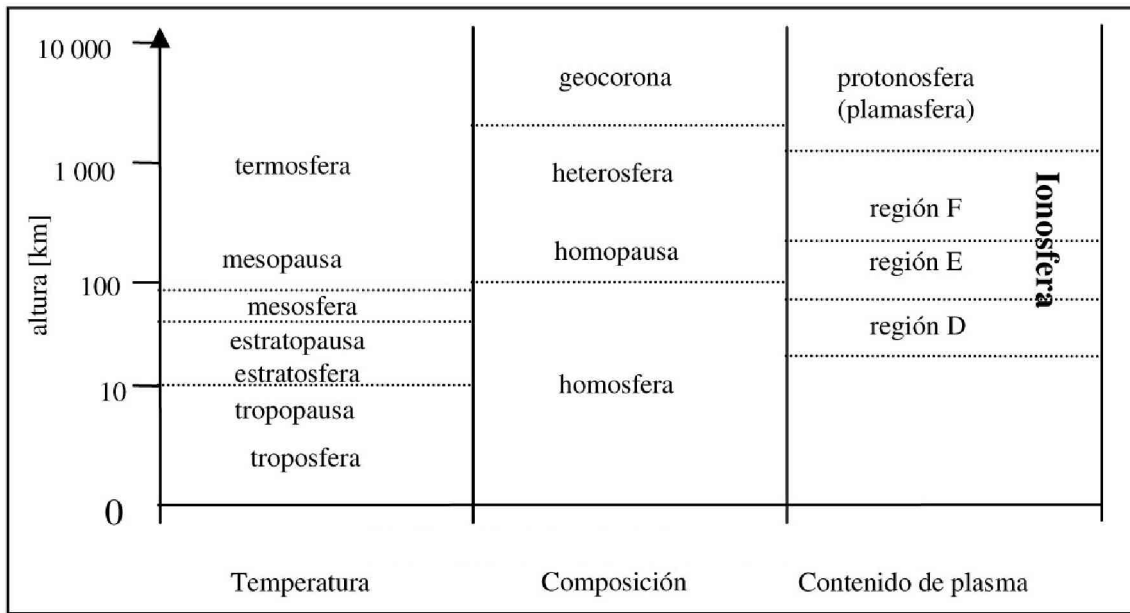


Figura 2.1. Distintas clasificaciones de la atmósfera y sus respectivas capas. De izquierda a derecha: Clasificación por temperatura, por composición y por contenido de plasma.

Cerca del suelo la atmósfera es un gas relativamente denso, compuesto en su mayoría por moléculas de nitrógeno y oxígeno, y en menor medida por dióxido de carbono, vapor de agua y otros gases [21]. Con el aumento de la altura, la presión y densidad se reducen. A los 50 km el 99.9% de la masa de la atmósfera se encuentra por debajo [14].

Entre los 50 km y los 1500 km se encuentra la ionosfera, donde penetra la emisión de luz ultravioleta y de rayos X provenientes del Sol. Estos fotones son lo suficientemente energéticos como para ionizar y disociar los átomos y moléculas alterando la composición atmosférica y entregándole calor. Este aumento de temperatura crea una región llamada termosfera que es menos turbulenta que las regiones inferiores, donde los gases de distintas densidades pueden separarse. Los gases más livianos, particularmente el hidrógeno, se transforman progresivamente en los gases más dominantes con la altura [14].

Debido a la baja presión por encima de los 100 km, las especies ionizadas no se recombinan de manera veloz, y hay una población permanente de iones y electrones libres. Generalmente, la concentración entre iones y electrones libres es equivalente y aumenta con la altura. A unos cientos de kilómetros la concentración de electrones libres puede llegar al 1% de la concentración neutra. La presencia de estos electrones tiene un efecto importante en las propiedades y comportamiento del medio, siendo eléctricamente conductivo y pudiendo soportar corrientes eléctricas fuertes. La ionosfera está compuesta por partículas neutras y también por un número significativo de iones positivos y electrones libres que, en su conjunto, forman un medio eléctricamente neutro. Los medios ionizados afectan las ondas de radio y sus propiedades son las de un plasma, que como tal, puede soportar y generar una variedad de ondas, interacciones e inestabilidades que no se encuentran presentes en un gas neutro [14].

Por encima de los 300 km aproximadamente, se encuentra la parte superior de la ionosfera, donde el oxígeno es el ion dominante y se extiende aproximadamente entre los 600 y 1500 km de altura [21]. Por sobre esta región el hidrógeno ionizado se vuelve un constituyente importante y se llama plamasfera o protonosfera. Algunos autores consideran que el límite superior de la protonosfera se encuentra cuando el elemento predominante es el hidrógeno ionizado, mientras que otros consideran que se encuentra limitado por la magnetosfera, que es la región donde las fuerzas magnéticas predominan ante las inerciales.

Descripción de la ionosfera

Utilizando la teoría de la propagación de las ondas electromagnéticas en un medio ionizado sometido a un campo magnético exterior (que explica la aparición de ecos reflejados en la ionosfera) junto con los resultados obtenidos por medio de sondeos con emisiones radioeléctricas a distintas frecuencias y con incidencia vertical, se ha podido obtener información muy valiosa de las capas ionosféricas. Los sondeos realizados metódicamente pusieron de manifiesto la existencia de diferentes máximos de ionización que delimitaban capas regulares de aparición sistemática y, recibiendo cada una de ellas un nombre según la altura a la cual se encontraban.

La región D o capa D, se sitúa ente los 60 km y los 90 km de altura, con su máximo de densidad electrónica alrededor de los 80 km que varía entre $10^2 \frac{e^-}{\text{cm}^3}$ y $10^4 \frac{e^-}{\text{cm}^3}$ [14]. La principal fuente ionizante de esta capa son los rayos X (0.2 – 0.8 nm) que ionizan sus principales constituyentes: el oxígeno en su forma molecular O_2 y el nitrógeno N_2 . Los procesos de recombinación dependen de la temperatura y de la altura. Generalmente esta capa se desvanece por la noche.

La región E se halla entre los 105 km y los 160 km de altura, con su máximo de densidad electrónica alrededor de los 110 km. En esta región la densidad electrónica toma valores entre $5 \times 10^3 \frac{e^-}{\text{cm}^3}$ por la noche y $10^5 \frac{e^-}{\text{cm}^3}$ durante el día [14]. En esta región encontramos la llamada capa esporádica (*Es*), originada de forma repentina por variaciones en la densidad de electrones que se producen entre los 90 km y los 140 km en altitud durante el día o la noche. La capa E se produce principalmente por la radiación del extremo ultravioleta (EUV) que pertenece a la región del espectro comprendida entre los 80 nm y los 102.7 nm, aunque también es afectada por los rayos X entre 1 nm y 80 nm, que ionizan el O_2 y el N_2 . El proceso de recombinación dominante es por disociación.

La capa F se encuentra entre los 140 km y los 1000 km de altura y se la subdivide en dos regiones, F1 y F2. La capa F1 comprende las alturas entre los 140 km y los 200 km, región donde se encuentra la mayor producción de electrones. Su densidad electrónica durante el día toma valores alrededor de $5 \times 10^5 \frac{e^-}{\text{cm}^3}$, desapareciendo dicha capa por la noche [14]. La formación de esta capa se encuentra estrechamente relacionada con la época del año y la actividad solar. La radiación que afecta mayormente esta región es el EUV entre 20 nm y 90 nm que ioniza el O y N_2 . Durante la ocurrencia de manchas solares la concentración electrónica varía entre $2.5 \times 10^5 \frac{e^-}{\text{cm}^3}$ y $4 \times 10^5 \frac{e^-}{\text{cm}^3}$.

La capa F2 se encuentra entre los 200 km y los 1000 km aproximadamente. El máximo de densidad de electrones se halla aproximadamente entre los 250 km y los 450 km de altura y es el máximo representativo de densidad electrónica de la ionosfera que es del orden de $10^6 \frac{e^-}{\text{cm}^3}$ [14]. El incremento de electrones de la capa F2 se debe a que la atmósfera disminuye su densidad y los procesos de difusión arrastran el plasma hacia arriba. Cuando ambos procesos, difusión y producción, son igual

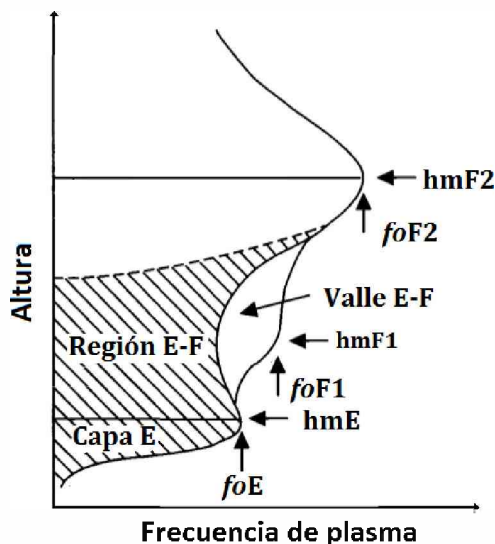


Figura 2.2. Perfil de densidad electrónica de la ionosfera. En las abscisas se tiene la frecuencia de plasma, mientras que en las ordenadas la altura. La curva que contiene la f_oF1 representa el perfil diurno de densidad electrónico, mientras que la curva llamada Valle E-F representa el perfil nocturno. Además se muestran las frecuencias críticas de las capas, f_oE , f_oF1 , f_oF2 y sus alturas correspondientes: hmE, hmF1, hmF2 [21].

de importantes, se observa el máximo de densidad electrónica llamado NmF^2 . El principal proceso que ocurre en la capa F2 es la fotoionización del O, que produce un catión de oxígeno O^+ , que es rápidamente recombinado con el N_2 y O_2 formando otros iones que se recombinan con los electrones libres. De esta manera se encuentra controlada la concentración de O, mientras que la pérdida está controlada por las concentraciones de O_2 y N_2 .

En la Fig. 2.2 se muestra un perfil de densidad electrónica en función de la altura, tanto para el día como para la noche. En ella se puede observar la representación de las distintas capas ionosféricas.

Variaciones en la ionosfera

La ionosfera terrestre es la región de la alta atmósfera caracterizada por la existencia de electrones libres tal que pueden modificar la propagación de las ondas radioeléctricas [13]. La misma presenta una gran variabilidad tanto temporal como espacial, debido fundamentalmente a la acción de la radiación solar ionizante, a las variaciones estacionales, a la rotación terrestre y a la distribución del campo magnético [14].

Las *variaciones diurnas* se producen debido a la incidencia de la radiación proveniente del Sol, por lo tanto tienen un ciclo de 24 h. Durante el día se observa el máximo de densidad electrónica alrededor del mediodía local, que puede ser asimétrico, con cambios rápidos en la salida del Sol, mientras que en la puesta, puede presentar pocos o ningún cambio. El máximo de densidad de electrones puede ocurrir tanto antes como después del mediodía local para el verano, mientras que en invierno ocurre muy cercano al mediodía local. A medida que la Tierra rota, los procesos de recombinación aumentan, dejando por lo general solo la capa F2 visible en las noches, con un mínimo de densidad de electrones.

Las *variaciones estacionales* tienen un ciclo de un año y son causadas por el cambio del ángulo cenital del Sol a través de la traslación de la Tierra en su órbita.

Hay varias características anómalas en las variaciones de temporada. Por ejemplo, los valores de densidad electrónica en los mediodías usualmente son mayores en invierno que en verano, mientras que la teoría de Chapman (Sec. 2.5) predice lo contrario [14]. Dicho fenómeno se llama anomalía estacional. Otra anomalía que se presenta es la semianual, que consiste en que la densidad de electrones es anormalmente alta en los equinoccios.

Además, la ionosfera responde ante la *actividad solar*, es decir para aumentos de actividad solar, el máximo de densidad electrónica también varía debido a la alta incidencia de partículas y radiación provenientes del Sol. Hay tres índices típicos que caracterizan la actividad solar:

- El número de manchas solares de Wolf, R . Se define como

$$R = k(f + 10g), \tag{2.1}$$

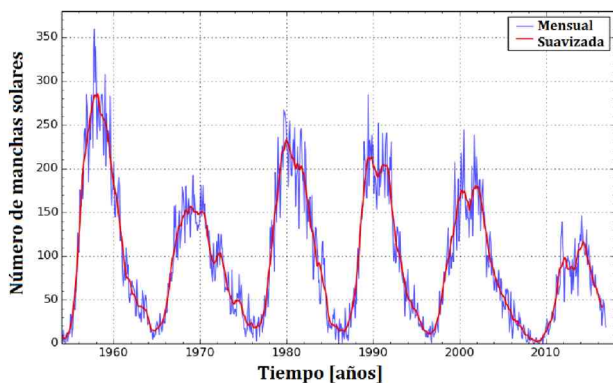


Figura 2.3. Número de manchas solares entre los años 1954 y 2016. En color azul se tiene el valor mensual y en rojo el valor suavizado. [24]

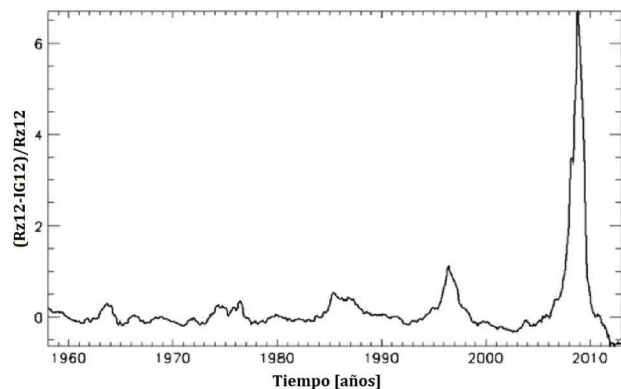


Figura 2.4. Diferencia relativa porcentual entre el índice solar mensual R_{12} y el índice de actividad solar ionosférico IG_{12} a lo largo de los años. [6]

donde f es el número de manchas solares observadas, g es el número de regiones solares perturbadas y k es un factor de corrección que depende de la sensibilidad del equipo de observación. Cuando se considera para una red de observatorios y se promedia un valor mensual (suavizado), se obtiene el valor de R_{12} . En la Fig. 2.3 se muestra el número de manchas solares desde el año 1954 hasta el año 2016 donde se evidencian varios ciclos solares.

- El flujo de radiación, $F10.7$. Es el nivel de ruido generado por el Sol a una longitud de onda de 10.7 cm que se obtiene en el observatorio de Pectictin en Canadá. Se relaciona con el índice de manchas solares mediante la relación,

$$F10.7 = 63.7 + 8.9R + 0.728R^2, \quad (2.2)$$

que se suaviza mediante una media mensual [14].

- El índice de actividad solar ionosférico, IG_{12} . Está basado en valores de f_oF2 tomados para el mediodía local de un grupo de 13 sondadores ionosféricos, normalizados con el número de manchas solares suavizado, es decir, con R_{12} . [4]

Es importante destacar que hoy en día el índice IG_{12} es el utilizado comúnmente para representar la respuesta de la ionosfera ante la actividad solar. En la Fig. 2.4 se pueden observar las diferencias relativas porcentuales entre el índice IG_{12} y el R_{12} entre los años 1958 y 2013 [6]. En particular se puede observar cómo se diferencian estos dos índices entre los años 2007 y 2010. Mientras que el número de manchas solares aumentó en dicho intervalo (R_{12}), el índice de actividad solar ionosférico (IG_{12}) se mantuvo bajo, dando origen al pico observado en la figura.

La actividad solar se puede caracterizar a través de los efectos que sufre el campo geomagnético. Las perturbaciones magnéticas son monitoreadas por observaciones geomagnéticas de las tres componentes del campo magnético y se utilizan varios índices para describir su actividad. En particular, el índice K responde a las variaciones de las perturbaciones irregulares del campo geomagnético, debido a la radiación solar de partículas en un intervalo de tres horas; toda otra perturbación regular o irregular no se considera. Los niveles de perturbación local se determinan midiendo la diferencia entre los valores máximo y mínimo durante intervalos de tiempo de tres horas de la componente horizontal más perturbada del campo magnético. Esta diferencia es convertida en un índice local K , que toma valores entre 0 y 9 de acuerdo a la escala cuasi logarítmica que es específica de cada estación de observación. Los intervalos de medida de tres horas se eligieron a fin de normalizar a frecuencia de ocurrencia de los distintos niveles de perturbación, debido a que se observa una variación diaria muy pronunciada. Al ser K un índice local que describe las perturbaciones en las vecindades de cada observatorio, aplicando métodos estadísticos se diseñaron tablas para obtener un índice estándar K_s para cada K en 13 observatorios seleccionados. El índice global K_p corresponde al valor medio de los niveles de perturbación en dos componentes horizontales del campo magnético, observadas por las 13 estaciones subaurorales. En base al índice K_p se clasifican los días para cada mes: los días Q representan los días tranquilos y los días D son los días más perturbados [21]. Para este trabajo de tesis, se consideraron los días que responden a esta clasificación, tomando sólo los días Q.

Las *variaciones latitudinales* se deben principalmente a la distribución del campo magnético. Se suele utilizar la latitud *modip* o *modifier dip* para representar más específicamente a la ionosfera, siendo ésta la latitud corregida respecto del campo magnético [1]. La latitud modip χ se define como

$$\chi = \arctan \frac{I(\lambda, \varphi, h_F)}{\sqrt{\cos \varphi}}, \quad (2.3)$$

siendo $I(\lambda, \varphi, h_F)$ la inclinación verdadera del campo geomagnético en el punto de coordenadas geográficas (λ, φ) y de altura h_F , donde se encuentra la capa F de la ionosfera. Se puede observar en la Fig. 2.5 cómo se distribuyen las líneas latitudinales del campo geomagnético (a) y en (b) la distribución de este último para distintas latitudes modip.

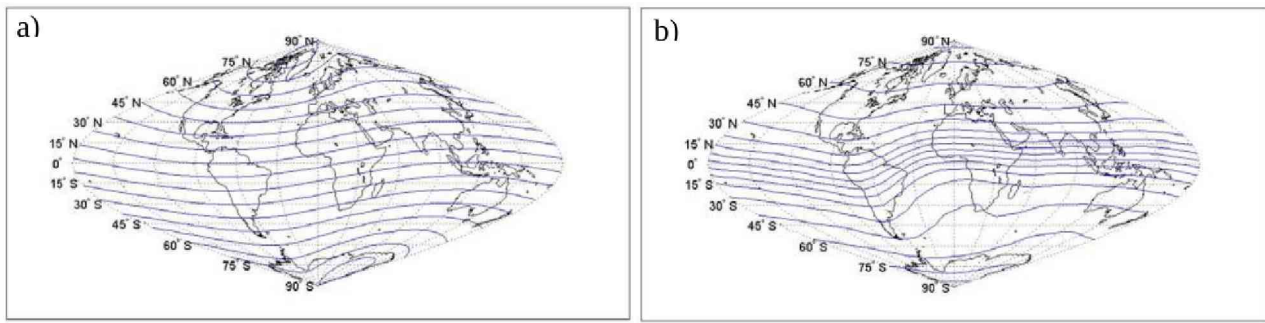


Figura 2.5. Líneas de isotatitud a) geomagnética y b) modip [1].

En la ionosfera se consideran tres grandes regiones para el análisis del comportamiento según la latitud modip: latitudes ecuatoriales, latitudes medias y latitudes polares. Se explicará brevemente el comportamiento en cada zona.

- **Latitudes ecuatoriales:** Comprenden entre los 0° y $\pm 30^\circ$. En esta región se observa un aumento de la densidad de electrones distribuida paralelamente entre los $\pm 10^\circ$ y $\pm 20^\circ$ del ecuador geomagnético. A este fenómeno se lo denomina anomalía ecuatorial o anomalía de Appleton [14]. Otro efecto que también se hace presente en estas latitudes es el centelleo [14], que es una dispersión de la frecuencia que aparece en la capa F (*Spread F*). En la Fig. 2.6 se puede observar dicho efecto.
- **Latitudes medias:** Se encuentran alrededor de los $\pm 30^\circ$ y $\pm 60^\circ$ del ecuador geomagnético y presentan densidad de electrones media con variaciones predecibles, aunque también se hallan afectadas en casos de tormentas magnéticas.
- **Latitudes polares:** Ubicadas entre los $\pm 60^\circ$ y $\pm 90^\circ$ del ecuador geomagnético, se caracterizan por tener densidades electrónicas bajas pero con variaciones espaciales y temporales impredecibles. En esta región, el campo magnético es hasta tres veces mayor que en el ecuador. Debido a la interacción del campo geomagnético con el viento solar, hay una gran cantidad de partículas que son arrastradas a los polos, generando la colisión de las mismas con las moléculas de la atmósfera. Cuando se recombinan, se generan las auroras boreales y australes.

Con todo lo expuesto anteriormente, queda claro que la ionosfera responde a los cambios que se producen en el campo magnético terrestre, y que, a su vez, este reacciona ante la incidencia de

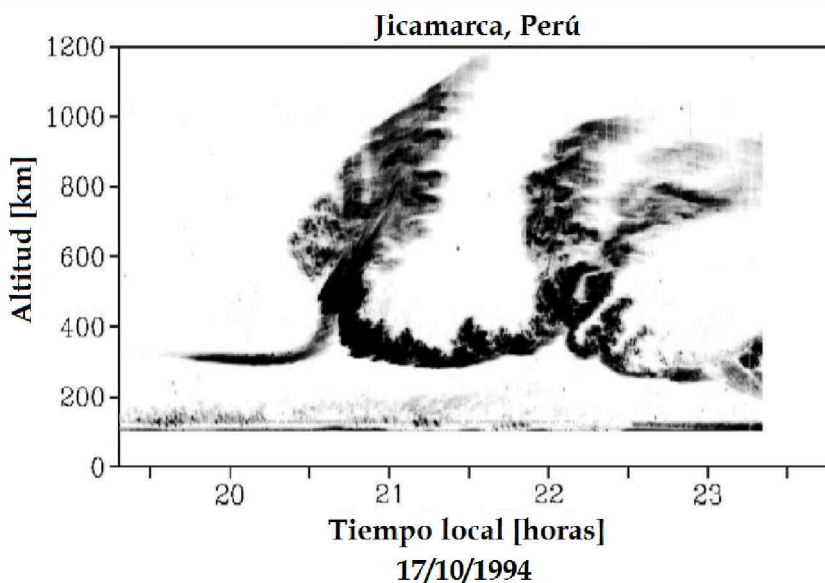


Figura 2.6. Altura de máximo de densidad electrónica en función del tiempo. Se observa el efecto llamado *Spread F*. Jicamarca - Perú. <http://jicamarca.ece.cornell.edu//>

partículas provenientes del Sol, como lo son las eyecciones de masa coronal o actividad turbulenta no regular. Como en esta tesis se quiere mejorar un modelo que responda a valores medios mensuales, los eventos de tormenta, por ser anómalos, no serán considerados.

Propagación de ondas en un plasma

Si consideramos la ionosfera como un medio ionizado formado por estratificaciones horizontales, con un aumento de la densidad de electrones libres con la altura, se puede resolver la propagación de ondas análogamente a la propagación de un rayo luminoso en distintos medios.

Despreciando el efecto de las colisiones y la presencia del campo geomagnético, se puede conocer el índice de refracción del medio para una onda incidente en la ionosfera haciendo la aproximación de una onda plana.

Para conocer el efecto de una onda electromagnética plana que avanza en la dirección del eje x en un plasma y usando las ecuaciones de Maxwell [15], al campo se lo puede representar como una onda eléctrica dada por

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i(kx - \omega t)}, \quad (2.4)$$

donde \vec{E}_0 es la amplitud del campo, k es el número de ondas, ω la frecuencia angular y t es el tiempo. Reemplazando en las ecuaciones de Maxwell se puede despejar

$$k^2 = \mu_0 \epsilon_0 (\omega^2 + i\omega\sigma/\epsilon_0), \quad (2.5)$$

siendo σ la densidad superficial de carga, ϵ_0 la permitividad eléctrica y μ_0 la permeabilidad magnética en el vacío.

Sabiendo que

$$\mu_0 \epsilon_0 = \frac{1}{c^2}, \quad (2.6)$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío, reemplazando en la Ec. (2.5) nos queda

$$k^2 = (1/c^2)(\omega^2 + i\omega\sigma/\epsilon_0). \quad (2.7)$$

Con la velocidad de fase $v = \omega/k$, esta última se transforma en

$$v = c(1 + i\sigma/\omega\epsilon_0)^{-1/2}. \quad (2.8)$$

Entonces, si $\sigma = 0$ la velocidad de fase es c . El apartamiento de v respecto de c es causado por la conductividad, que es distinta del cero. Por lo tanto, para determinar la conductividad se considera la ecuación de movimiento de un electrón de masa m y carga e ,

$$m \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \frac{e}{m} \vec{E}_0 e^{i(kx - \omega t)}. \quad (2.9)$$

Sobre el electrón se genera una vibración impuesta por la onda tal que

$$v = v_0 e^{-i\omega t}, \quad (2.10)$$

y reemplazando en la Ec. (2.9) se obtiene

$$v = (ie/\omega m) E. \quad (2.11)$$

Si tomamos la densidad de corriente

$$J = \sigma E, \quad (2.12)$$

que también se puede escribir como

$$J = Nev, \quad (2.13)$$

siendo N el número de cargas y reemplazamos v , se obtiene

$$J = \frac{iNe^2}{\omega m} E, \quad (2.14)$$

resultando

$$\sigma = \frac{iNe^2}{\omega m}. \quad (2.15)$$

La densidad de corriente y el campo eléctrico se hallan $\pi/2$ fuera de fase, de modo que no hay pérdida de energía de la onda en el plasma. Sustituyendo σ de la Ec. (2.15) en la Ec. (2.8) se obtiene

$$v = c \left(1 - \frac{Ne^2}{\omega^2 m \epsilon_0} \right)^{-1/2}. \quad (2.16)$$

Se define la frecuencia ω_p , conocida como la *frecuencia del plasma* [14] como

$$\omega_p^2 = \frac{Ne^2}{m \epsilon_0}, \quad (2.17)$$

con lo cual, reemplazando en la Ec. (2.16), se obtiene

$$v = c \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right)^{-1/2}. \quad (2.18)$$

La propagación se puede expresar con el índice de refracción $n^2 = c^2/v^2$, quedando

$$n^2 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}. \quad (2.19)$$

La frecuencia del plasma se encuentra influenciada por la presencia de iones positivos, pero su influencia es pequeña debido a que la masa se encuentra en el denominador, como se observa en la Ec. (2.17).

Ahora bien, si se considera el índice de refracción de una onda incidente en la ionosfera en presencia de un campo magnético externo, la expresión resulta [14]:

$$n^2 = 1 - \frac{X}{1 - \frac{Y_T^2}{2(1-X)} \pm \sqrt{\frac{Y_T^4}{4(1-X)^2} + Y_L^2}}, \quad (2.20)$$

donde

$$X = \frac{\omega_p^2}{\omega^2}, \quad Y = \frac{\omega_B}{\omega}, \quad Y_T = Y \sin \theta \quad \text{y} \quad Y_L = Y \cos \theta, \quad (2.21)$$

siendo ω_B la girofrecuencia angular del electrón en un campo geomagnético de intensidad B ($\omega_B = eB/m_e$ donde m_e es la masa del electrón) y θ el ángulo que forma la dirección del campo geomagnético con la dirección de la onda. Por lo tanto, se puede ver que la Ec. (2.19) es el caso particular de la Ec. (2.20) en ausencia de un campo magnético.

El signo \pm se debe a que la ionosfera es un medio birrefringente, es decir, es un medio en el que los rayos con diferente polarización viajan a velocidades distintas, dando origen a dos rayos que son llamados ordinario (para el signo negativo) y extraordinario (para el signo positivo) [14].

El índice de refracción para propagación de gases ionizados teniendo en cuenta colisiones se expresa mediante la fórmula de Appleton-Hartree:

$$n^2 = 1 - \frac{X}{1 - iZ - \left[\frac{Y_t^2}{2(1-X-iZ)} \right] \pm \sqrt{\frac{Y_t^4}{4(1-X-iZ)} + Y_l^2}}, \quad (2.22)$$

donde

$$\begin{cases} X = \frac{\omega_p^2}{\omega^2}, & \omega_p \equiv \text{frecuencia de plasma;} \\ Y = \frac{\omega_B^2}{\omega^2}, & \omega_B \equiv \text{girofrecuencia del electrón;} \\ Z = \frac{\nu}{\omega}, & \nu \equiv \text{frecuencia de colisión de electrones (e}^-) \text{ con partículas pesadas;} \\ Y_l = Y \cos\theta, & \theta \equiv \text{ángulo formado por la dirección de} \\ Y_t = Y \sin\theta, & \text{propagación de la onda y el campo magnético.} \end{cases}$$

A partir de la Ec. (2.22) se puede deducir que n depende de la posición, la frecuencia, la dirección de propagación por la presencia del campo magnético y de la frecuencia de colisión. Por lo tanto, la ionosfera es un medio inhomogéneo, dispersivo, anisotrópico y absorbente.

Modelo físico de Chapman

La teoría de Chapman [10] es un modelo simple que describe la ionosfera y su comportamiento con el tiempo. Tomando como hipótesis una atmósfera constituida por una única especie gaseosa, distribuida en capas horizontales planas, con un comportamiento exponencial respecto a la altura, con escala constante, una radiación monocromática proveniente del Sol y con absorción proporcional a la concentración de la especie, se determina la función de producción de ionización de Chapman q como:

$$q = q_{mo} \exp(1 - z - \exp(-z)\sec\chi), \quad (2.23)$$

siendo z la altura reducida del gas neutro $z = \frac{h-h_{mo}}{H}$, H la escala de altura $H = \frac{KT}{mg}$, h_{mo} la altura del máximo de producción cuando el Sol se encuentra en el cenit, q_{mo} el máximo de ionización, χ el ángulo cenital de llegada de la radiación ionizante, K la constante de Boltzmann, h la altura virtual (Sec. 3.1), m la masa de la especie, g la constante gravitatoria, y T la temperatura del plasma.

El modelo relaciona la distribución de electrones con la posición del Sol, dejando en evidencia una variación diaria de gran amplitud, con un máximo bien definido. La forma del perfil es acampanado

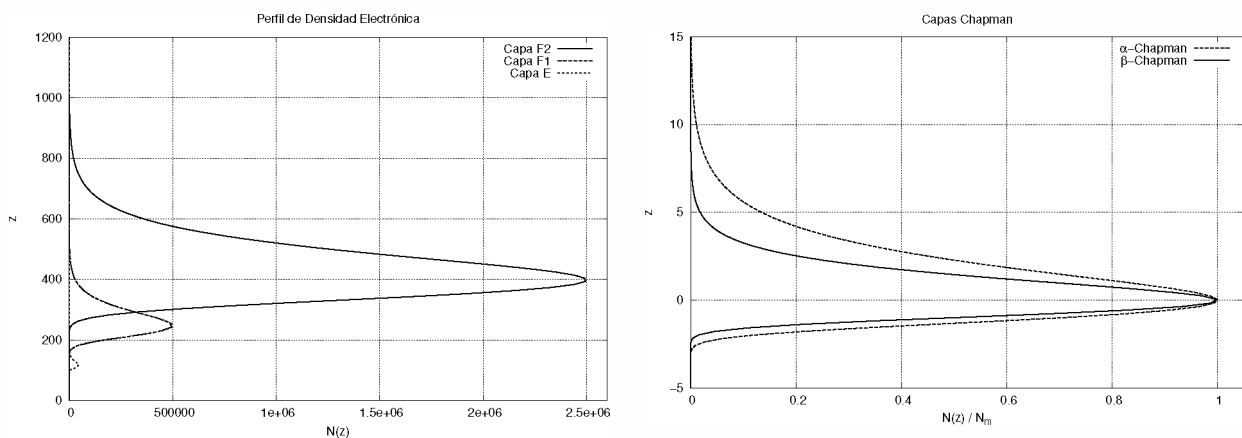


Figura 2.7. (a) A la izquierda: Perfil de densidad electrónica para distintas capas, realizado con la función de producción de Chapman. El eje y corresponde a la altura reducida del gas neutro z , sin unidades, mientras que el eje x corresponde a la densidad electrónica $N(z)$. (b) A la derecha: Función de Producción de Chapman con un valor fijo de χ , para la densidad electrónica normalizada en función de la altura reducida del gas neutro z .

aunque no presenta simetría. Se caracteriza por una pendiente alta, es decir, un aumento rápido de la densidad electrónica en las capas bajas. Cuando $z = 0$ ($h = h_{mo}$), se encuentra el pico de la función de producción de ionización. Si z es positiva se ubica por encima del máximo, mientras que si z es negativa se estará debajo. Esta función se considera para cada capa de la ionosfera, debido a que una de las hipótesis establece que se considera una sola especie gaseosa. En la Fig. 2.7.a se observa el modelo aplicado a las capas E, F1 y F2.

El perfil indica que la mayor cantidad de electrones se concentra en una capa delgada alrededor de 300 km y 550 km de altura. Este resultado justifica la habitual aproximación de modelar la ionosfera como una capa de espesor infinitesimal, donde se concentran los electrones libres.

Procesos de producción y procesos de pérdida

Partiendo de la ecuación de Chapman y teniendo en cuenta los procesos de pérdida y producción, ya sea por recombinación disociativa de iones o por la unión de electrones con partículas neutras, se pueden obtener las Capas Chapman α y β respectivamente:

$$\begin{aligned} N &= N_{mo} \exp\left[\frac{1}{2}(1 - z - \exp(-z)\sec\chi)\right] \quad y \\ N &= N_{mo} \exp(1 - z - \exp(-z)\sec\chi), \end{aligned} \quad (2.24)$$

siendo N la densidad de electrones y N_{mo} la densidad de electrones máxima que se dará cuando el Sol se halle en el cenit.

Como se puede observar en la Fig. 2.7.b, el perfil presenta un comportamiento acampanado asimétrico, ya que al ser menor la concentración de elementos en la ionosfera alta también será menor la producción.

Los valores negativos de z , que corresponden al segmento *bottomside* (parte inferior del perfil ionosférico), se caracterizan por un rápido incremento de la densidad electrónica. Por lo contrario, para z positivos o segmento *topside* (parte superior), se observa un ritmo más lento del descenso de la densidad electrónica.

Además, se puede observar que la diferencia para las capas Chapman α y Chapman β radica en lo acampanado del perfil.

Considerando que la ecuación de continuidad representa el equilibrio entre la producción q , el proceso de pérdida L y la pérdida de electrones por movimiento o transporte $\nabla(N \cdot \vec{v})$, se tiene

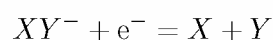
$$\frac{dN}{dt} = q - L - \nabla(N \cdot \vec{v}). \quad (2.25)$$

La función de producción de Chapman (q) representa la curva del proceso de producción de electrones. La atenuación de la radiación solar en la ionosfera se debe a la producción de electrones, que se modela con la función q .

Las hipótesis que los procesos q y L consideran son: atmósfera con especie gaseosa única, capas plano-paralelas y comportamiento exponencial respecto a la altura h , constante. En cuanto a la radiación solar, se considera que la radiación es monocromática y la absorción es proporcional a la concentración de la especie gaseosa considerada.

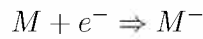
Además, los procesos de pérdida (L) se producen en dos etapas:

- Recombinación disociativa de iones:



siendo X e Y la representación de átomos o moléculas, Y^- la de un átomo o molécula ionizado y e^- es un electrón libre. En este caso, se produce $L = \alpha \cdot N^2$, que representa la capa α - Chapman, donde α es el coeficiente de recombinación que generalmente depende de la temperatura y no de la altura.

- Unión de electrones con partículas neutras:



donde M representa una especie neutra que se encuentra en mayor cantidad que los electrones libres y M^- es el anión resultante. La tasa de pérdida de electrones por recombinación es $L = \beta \cdot N$, que representa la capa conocida como β - *Chapman*, donde el coeficiente de recombinación β depende de la concentración molecular y por lo tanto, decrece rápidamente a medida que aumenta la altura.

Juntando los procesos de producción y pérdida, e igualando a cero, se obtiene el equilibrio cuando no existe variación de la densidad electrónica en el tiempo,

$$\frac{dN}{dt} = 0. \tag{2.26}$$

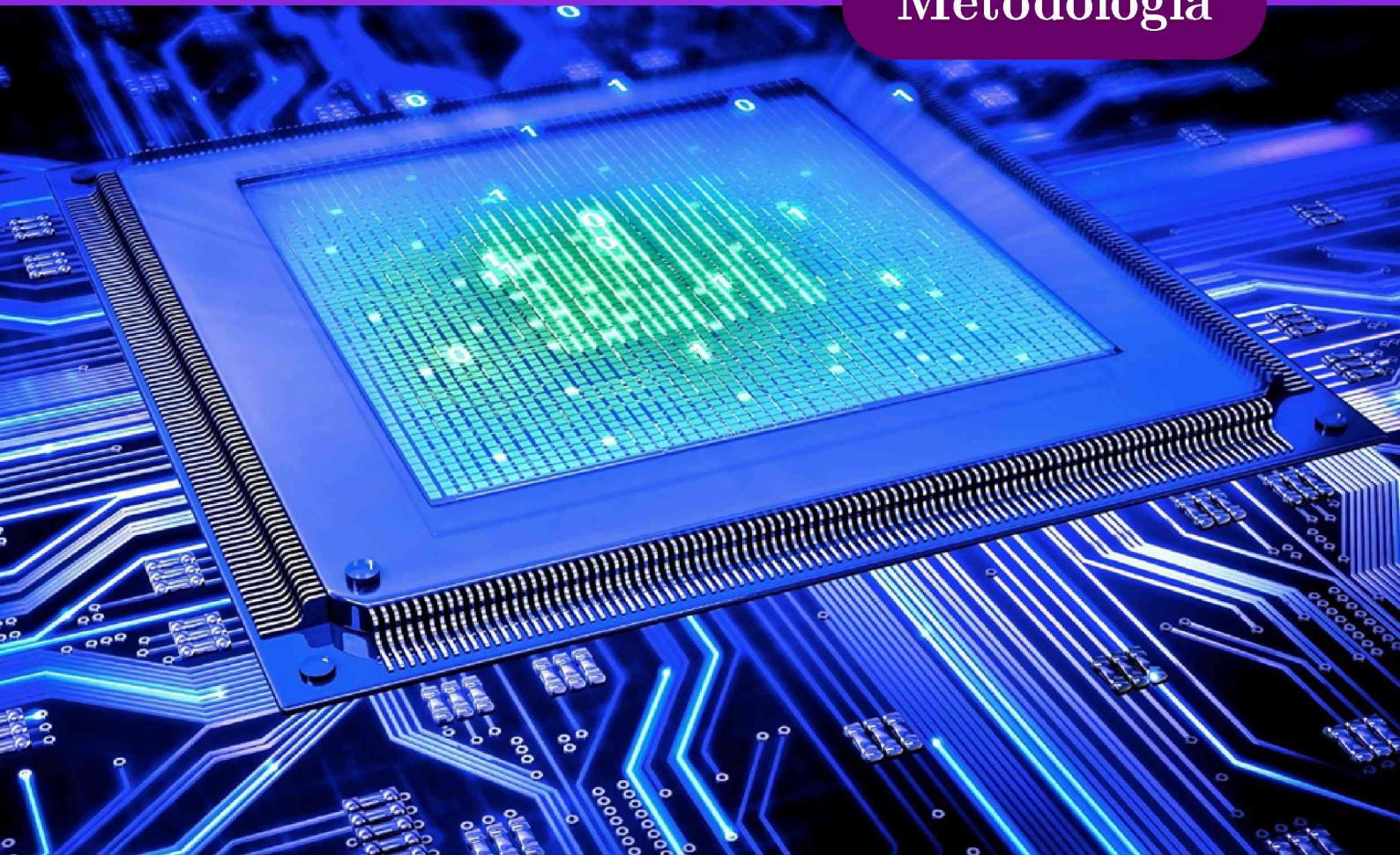
En 1946 Bates y Massey [2] escribieron las ecuaciones de continuidad para las concentraciones de electrones (N), de los iones atómicos (N_{A+}) y de los iones moleculares (N_{M+}) con las siguientes suposiciones:

- las reacciones de intercambio ion-átomo involucran un gas molecular de concentración $n[M]$,
- se desprecian las producciones directas de iones moleculares por fotoionización, debido a la baja concentración de O_2 , y la disminución de cationes de nitrógeno, N_2^+ , se produce a causa de una recombinación disociativa,
- se desprecia la probabilidad de que los N_2^+ se combinen para la producción de otros iones,
- se considera condición de equilibrio.

Con estas hipótesis hallaron que el proceso de pérdida se puede expresar en dos etapas y su transición es del paso de una expresión cuadrática a lineal:

$$\begin{aligned} q = \alpha \cdot N^2 & \quad \text{si } \beta \gg \alpha \cdot N & \quad \text{entonces } N_{M+} \gg N_{A+} & \quad \text{y} \\ q = \beta \cdot N & \quad \text{si } \beta \ll \alpha \cdot N & \quad \text{entonces } N_{M+} \ll N_{A+}. \end{aligned} \tag{2.27}$$

Es decir, cuando la tasa de pérdida electrónica está determinada por una reacción de recombinación disociativa, los iones son principalmente moleculares y se aplica la fórmula $\alpha \cdot N^2$. El coeficiente α puede depender de la temperatura, pero en general no depende de la altura. Por otra parte, β varía con la concentración molecular y por lo tanto, decrece rápidamente a medida que aumenta la altura. En consecuencia, a grandes alturas, se debe aplicar la condición $\beta \ll \alpha \cdot N$, en cuyo caso la reacción de intercambio ion-átomo es la que controla la tasa de pérdida, que es lineal en N , y los iones son mayormente atómicos.



Este trabajo de tesis consiste en el modelado de la frecuencia de plasma correspondiente al máximo de la densidad electrónica en la región ionosférica F2, f_oF2 , siendo este uno de los parámetros más importantes del perfil ionosférico.

La metodología propuesta consiste en adoptar la formulación del modelo CCIR provista por el IRI. Luego calcular los coeficientes de dicho modelo mediante la técnica de algoritmos genéticos. El *algoritmo genético* (AG) implementado es el PIKAIA donde se utiliza información de los observables de f_oF2 .

Para implementar todo esto, se explica cómo funciona una ionosonda y cómo se obtiene el observable de la frecuencia crítica de la capa F2 (Sec. 3.1) que es necesaria tanto para el ajuste de los coeficientes, como para evaluar la calidad de los coeficientes resultantes.

En la Sec. 3.2 se explica el modelo IRI y la función utilizada para la representación espacio-temporal de f_oF2 .

Además para entender la relación entre la genética biológica y los algoritmos genéticos, se explica brevemente en qué consisten estos algoritmos (Sec. 3.3) y en particular la subrutina PIKAIA (Sec. 3.3.1), con las opciones que presenta para su uso y las modificaciones que se realizaron para calcular los coeficientes en esta tesis.

Ionosonda

La ionosonda es un sondador ionosférico que trabaja con frecuencias entre 0.5 MHz y 30 MHz, que corresponden a la banda de altas frecuencias (High Frequency, *HF*) en el espectro radioeléctrico.

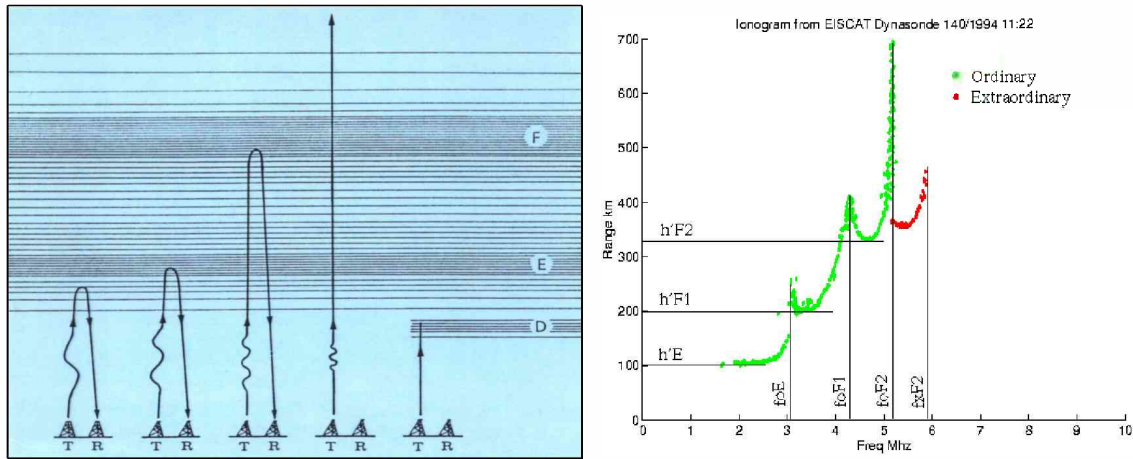


Figura 3.1. (a) A la izquierda, esquema de los pulsos transmitidos (T) y recibidos (R) por una ionosonda [23]. (b) A la derecha, ionograma de un sondador de la Asociación Científica Europea de Radares de Dispersión Incoherente (EISCAT) [25]. En el eje de las abscisas se grafican las frecuencias [MHz] y en el eje de las ordenadas las alturas virtuales [km]. En particular se destacan las alturas virtuales (h') para cada una de las capas y las frecuencias críticas respectivas (f_o). Además se marca en rojo el rayo extraordinario de la capa F2 y su frecuencia crítica ($f_x F2$).

Este instrumento es de medición pasiva, es decir, no altera el medio para tomar medidas, a diferencia de los instrumentos de medición activa que entregan energía al medio para tomar muestras.

Estos radares envían pulsos electromagnéticos a diferentes frecuencias desde la tierra en sentido vertical (u oblicuo), que llegan a la ionosfera y miden el retardo de la onda reflejada que se traduce en alturas. Estas ondas al llegar a la ionosfera responden al principio de propagación de ondas en un plasma (Sec. 2.4) de donde se obtiene la frecuencia del plasma para las distintas capas ionosféricas.

Debido a la suposición de que las ondas electromagnéticas se propagan a la velocidad de la luz, las alturas medidas son alturas virtuales (h'). La velocidad de propagación real de las ondas es menor por la interacción de las ondas electromagnéticas con el medio (Sec. 2.4), por lo tanto las alturas reales son menores que las virtuales, y se debe considerar este cambio al pasar de las mediciones de la ionosonda al perfil de densidad electrónico.

En la Fig 3.1.a se puede observar un esquema de las ondas transmitidas (T) y recibidas (R) por un sondador. La ionosonda es un transmisor-receptor de frecuencia variable. Este transmite una señal vertical (u oblicua) de corta duración que se propaga hasta llegar a la ionosfera donde es reflejada. Comienza su medición enviando un pulso de baja frecuencia. La onda enviada es reflejada en la capa de menor altura y recibida por el sondador. A medida que la frecuencia aumenta, ocurrirá lo mismo hasta que llegue a la frecuencia crítica de la capa en cuestión, donde se refractará y pasará a la siguiente capa. Este proceso ocurre hasta que la región donde se refleja es la capa F2. Allí, al llegar a la frecuencia crítica, la onda se refractará y se perderá fuera de la ionosfera. En este punto, es donde se encuentra el máximo de densidad electrónica. Si bien la densidad a mayor altura de este punto disminuye, el sondador no puede medir el decrecimiento, debido a que la frecuencia debería ser menor a la alcanzada para poder determinar la parte superior del perfil de densidad, y por lo tanto, quedará apantallada por las capas inferiores. Es por ello que el sondador sólo puede obtener información del perfil de densidad electrónico de la parte inferior del perfil de densidad.

Como resultado de una ionosonda se obtiene un ionograma (Fig. 3.1.b). En el eje de las abscisas se grafican las frecuencias a las cuales trabaja el instrumento y en el eje de las ordenadas se grafican las alturas virtuales (h') obtenidas.

Un fenómeno que se observa en los ionogramas es el desdoblamiento de la señal que depende de la girofrecuencia del lugar donde se halla ubicada la ionosonda y su magnitud depende del campo geomagnético. El desdoblamiento se observa como dos señales llamadas rayo *ordinario* (se lo denota

con una o) que siempre se observa en los ionogramas, y rayo *extraordinario* (se denota con una x), que de aparecer en los ionogramas, lo hace a mayor frecuencia que la del rayo ordinario.

Los parámetros importantes que se obtienen de los ionogramas y se buscan destacar, son las frecuencias de plasma críticas f_o (estos valores indican la frecuencia máxima de reflexión total de la onda) de cada capa y sus alturas correspondientes, las cuales están relacionadas con el factor de oblicuidad de la capa, $M(3000)$. Este factor está vinculado con la máxima frecuencia de una señal que, reflejada en la ionosfera, puede recibirse a una distancia de 3000 km sobre la Tierra, y su máxima frecuencia utilizable es MUF que se calcula [7]:

$$MUF(3000) = f_o \times M(3000).$$

El proceso por el cual esta onda es reflejada (Sec. 2.4) corresponde al índice de refracción n , intrínseco de la capa ionosférica:

$$n^2 = 1 - \left(\frac{f_p}{f} \right)^2,$$

donde f_p es la frecuencia crítica de plasma y f es la frecuencia del pulso emitido. Por lo tanto si la frecuencia emitida es menor que la frecuencia de la capa, $f < f_p$, la onda es reflejada y, de lo contrario, la onda atraviesa la capa en cuestión. La frecuencia del plasma proviene de la relación con su frecuencia angular (Ec. 2.17) como:

$$\omega_p^2 = \frac{e^2 N}{m_e \cdot \epsilon_0} \quad \text{y} \quad f_p = \frac{\omega_p}{2\pi},$$

donde N es la densidad electrónica, m_e es la masa del electrón, e su carga y ϵ_0 es la permitividad del vacío. Con estas relaciones se llega a que:

$$f_p = \sqrt{\frac{N \cdot e^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot \epsilon_0 \cdot m_e}}.$$

En particular, la frecuencia crítica de interés para esta tesis es la más representativa de la ionosfera, es decir, la frecuencia del rayo ordinario de la capa $F2$, f_oF2 , que es donde se observa el máximo de densidad electrónica de la ionosfera, $NmF2$. Entonces, considerando que la frecuencia del rayo ordinario es la frecuencia de plasma ($f_oF2 = f_p$) y evaluando las constantes conocidas, se obtiene el máximo de densidad electrónica en la ionosfera como:

$$NmF2 = \frac{1}{80.6} f_oF2^2.$$

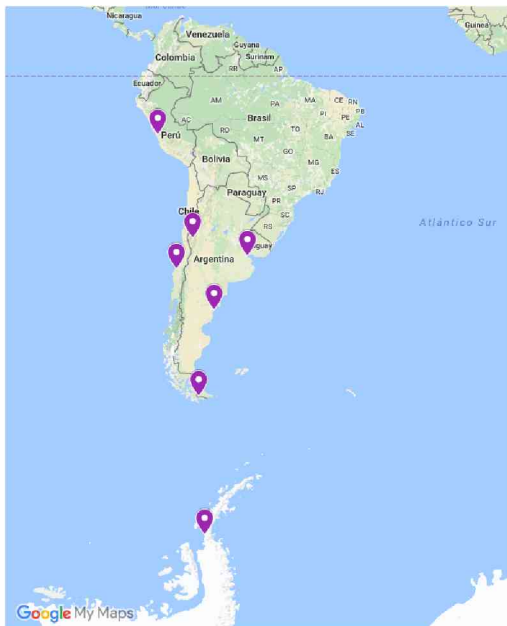


Figura 3.2. Distribución de sondadores ionosféricos utilizados. Las estaciones marcadas desde el ecuador terrestre hacia el polo sur son:

Estación	Lat. geog. [°]	Long. geog. [°]	Lat. modip [°]
Jicamarca	-12.00	283.00	2.73
San Juan	-31.50	290.40	-27.94
Buenos Aires	-34.60	301.70	-31.70
Concepción	-36.80	287.00	-34.44
Trelew	-43.20	294.70	-41.49
Ushuaia	-54.80	291.70	-49.45
San Martín	-68.10	293.00	-60.20

Para esta tesis se utilizaron datos de f_oF2 provistos por la *Red Argentina para el Estudio de la Atmósfera Superior* (RAPEAS), que pertenece al *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas* (CONICET), a través de sus instituciones integrantes: la *Dirección de Investigación de la Armada* (DIIV), el *Instituto Antártico Argentino* (IAA) y el *Instituto de Ciencias Astronómicas, de la Tierra y del Espacio* (ICATE), quienes muy amablemente aportaron datos de los sondadores en las estaciones que se marcan en el mapa de la Fig. 3.2.

Los datos aportados por la RAPEAS, provienen de siete estaciones de la región de América del Sur. Se adquirieron un total de 78.339 observables, correspondientes a valores diurnos horarios, para días tranquilos, en distintos meses y para distintas actividades solares entre los años 1958 y 2009. Es importante destacar que los datos no solo provienen de distintas fuentes, sino que también el dato ofrecido proviene de un procedimiento manual. Por lo tanto, se ha hecho un análisis descartando los observables espurios recibidos.

Modelo Internacional: IRI

El modelo ionosférico internacional de referencia (IRI) se inició por iniciativa del Comité de Investigaciones Espaciales (COSPAR) y de la Unión Internacional de Radio Ciencia (URSI), con el objetivo de establecer una representación estandar de los parámetros del plasma ionosférico terrestre.

El modelado de la ionosfera es importante para muchas aplicaciones que se basan en la propagación de ondas electromagnéticas que viajan a través de la misma, incluyendo las radiocomunicaciones, telecomunicaciones satelitales, GNSS, observaciones desde la Tierra al espacio, radioastronomía y muchas más.

IRI es un modelo semiempírico de ionosfera basado en la mayoría de los datos disponibles y confiables tanto terrestres como espaciales, evitando, en lo posible, la dependencia de teorías que aún se hallan en desarrollo [4]. Este modelo describe tanto las densidades como las temperaturas electrónicas e iónicas de la ionosfera terrestre en un rango de altitud que va desde los 50 km hasta los 2000 km.

Desde su creación en 1969, el modelo se ha ido mejorando de manera constante, tanto por incorporación de nuevos datos a medida que estos estuvieron disponibles, como por aplicación de nuevas técnicas de modelado con los datos existentes o modelos [3], [8], [5], [4].

El modelo global de f_oF2 más utilizado hoy en día sigue siendo aquel que fue desarrollado por W. B. Jones y otros colegas [16] [17]. Dicho modelo fue adoptado también para su uso internacional por el CCIR de la ITU. Utilizando una base de datos de 150 ionosondas distribuidas por todo el mundo, ubicadas mayormente en el hemisferio Norte y con registros entre los años 1954 y 1958, la frecuencia f_oF2 se describe en este modelo como un conjunto de funciones en términos de la latitud y longitud geográficas y del tiempo universal. El modelo consta de 24 mapas de 988 coeficientes cada uno, distribuidos en dos mapas para cada mes del año, uno correspondiente a actividad solar baja ($R_{12} = 10$) y otro de actividad solar alta ($R_{12} = 100$), donde R_{12} es el valor medio del número mensual de manchas solares (Sec. 2.3). Es decir que en este modelo hay un total de 23712 ($= 2 \times 12 \times 988$) coeficientes para la representación global de la f_oF2 . Para el caso de altas actividades solares, se obtienen sin embargo mejores resultados mediante la sustitución de R_{12} por el índice solar ionosférico IG_{12} [18].

Más tarde, un grupo de trabajo especial de la URSI, presidida a la sazón por K. Davies y después por C. Rush, encabezó un gran esfuerzo para mejorar la representación global de la f_oF2 . En base al trabajo de Fox y McNamara [12], se estableció un nuevo conjunto de coeficientes para un modelo de tipo CCIR. En este desarrollo, además de haberse utilizado una base de datos mucho más grande que en el modelo anterior, se introdujeron consideraciones teóricas para establecer puntos artificiales en zonas del mundo con escasez de datos. En el caso de los mapas originales del CCIR, se había utilizado un esquema bastante simple de extrapolación a lo largo de las líneas de ángulo de inclinación magnética

constante para la zona oceánica. En cambio, en la nueva representación, Rush et ál. [20] ajustaron un modelo teórico de tal manera que estuviese en concordancia con los valores de f_oF2 medidos en zonas terrestres, usando luego el modelo resultante para calcular puntos artificiales sobre los océanos. Como resultado de este mecanismo, las predicciones de su modelo fueron superiores a las de CCIR [9] en las regiones oceánicas. Pero dado que se utilizaron las mismas fórmulas y el mismo número de coeficientes, la precisión ganada en algunas zonas del planeta (océanos) fue a expensas de la precisión perdida en otras áreas (tierra). Debido a que la precisión global del modelo CCIR [9] y la correspondiente al modelo de Rush et ál. [20] son comparables, la ITU no cambió su política y todavía utiliza el CCIR [9] como su modelo oficial.

Los mapas del CCIR y los de la URSI han tenido un gran éxito en la representación de los patrones de variabilidad, tanto espaciales como temporales. Hasta el día de hoy, dichos mapas siguen siendo el estándar internacional recomendado para la obtención de f_oF2 , y se encuentran en el corazón de muchos modelos ionosféricos. El modelo IRI ofrece ambos mapas como opciones para la f_oF2 , y recomienda el uso del modelo del CCIR sobre la tierra y el modelo de Rush et ál. [20] (a menudo referido como modelo URSI-88) sobre las áreas del océano.

Para este trabajo de tesis se utilizó la formulación del CCIR [16] provista por el IRI para la representación global de la f_oF2 . Se basa, en primer lugar, en el análisis de Fourier de sexto orden de la variación media diurna observada por las ionsondas disponibles mundialmente en la época, dando como resultado 13 coeficientes. En segundo lugar, se basa en una descripción mundial en términos de funciones esféricas de Legendre, encontradas por separado para cada uno de los 13 coeficientes. El resultado son dos conjuntos de 988 coeficientes para cada mes. Así, la ecuación que representa la frecuencia crítica de la capa F2 queda

$$f_oF2(\lambda, \varphi, t) = A_0(\lambda, \varphi) + \sum_{i=1}^R [A_{2i-1}(\lambda, \varphi) \cdot \cos(it) + A_{2i}(\lambda, \varphi) \cdot \text{sen}(it)], \quad (3.1)$$

siendo λ la latitud geográfica ($-90^\circ \leq \lambda \leq 90^\circ$), φ la longitud geográfica hacia el este desde el meridiano de Greenwich ($0^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$), t el tiempo universal coordinado en ángulo ($-180^\circ \leq t \leq 180^\circ$), y R el número máximo de armónicos utilizados para representar la variación diurna ($R = 6$).

Las funciones A_i quedan representadas por el octavo grado de expansión de funciones de Legendre, con lo cual se obtiene un total de 78 coeficientes esféricos:

$$A_i(\lambda, \varphi) = \sum_{j=0}^{J(0)} C_{ij0} P_{j0}(\lambda, \varphi) + \sum_{k=1}^8 \sum_{j=0}^{J(k)} (C_{ij(2k-1)} \cos(k\varphi) + C_{ij(2k)} \text{sen}(k\varphi)) P_{jk}(\lambda, \varphi), \quad (3.2)$$

siendo $(J(0), J(1), \dots, J(k))$ enteros que dependen del orden de la longitud y

$$P_{jk}(\lambda, \varphi) = (\text{sen}\chi(\lambda, \varphi))^{j'} (\cos \lambda)^k, \quad (3.3)$$

donde χ es la latitud modip para la capa F (Ec. 2.3)

$$\chi(\lambda, \varphi) = \arctan \left(\frac{I(\lambda, \varphi)}{\sqrt{\cos \varphi}} \right). \quad (3.4)$$

Los coeficientes C_{ijk} son los 988 coeficientes para cada mes y para dos niveles de actividad solar (en total $988 \times 12 \times 2 = 23712$) que se implementan en el modelo para predecir el valor de f_oF2 . Para el modelado con valores de actividad solar media, el IRI realiza una interpolación lineal entre los coeficientes de actividad solar alta y los coeficientes de actividad solar baja.

A fin de predecir los nuevos valores de la f_oF2 propuestos en esta tesis, se calculan los nuevos 23712 coeficientes mediante un algoritmo genético.

Algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos son técnicas que intentan reproducir computacionalmente lo que ocurre en la biología reproductiva a lo largo de miles de años. Mientras la Naturaleza hace prueba y error con los genes, estos algoritmos intercambian y mutan los genes para encontrar el individuo (solución al problema) más óptimo.

En la evolución, la genética necesita dos componentes: herencia y variación. Por ello en la Naturaleza dos padres generan uno o más hijos que heredan sus características, pero que son distintos, es decir, tienen características propias porque varían sus genes.

Para establecer la relación entre los algoritmos genéticos con la biología, podemos definir:

- ★ **Gen:** codificación de un parámetro del espacio de las incógnitas.
- ★ **Cromosoma:** cadena de genes que representa un individuo o solución.
- ★ **Población:** conjunto de individuos presentes en un determinado momento representados cada uno por un cromosoma.
- ★ **Aptitud:** habilidad de un individuo para sobrevivir y reproducirse en un ambiente.

Estos algoritmos toman dos individuos y generan dos hijos. Para la generación siguiente se toman los cromosomas de los padres, se intercambian genes y se mutan. De esta manera los hijos heredan genes de ambos padres y al mismo tiempo reciben mutaciones que no dependen de los genes de sus procreadores.

Por lo tanto un AG es una técnica heurística que incorpora estas ideas computacionalmente para optimizar (maximizar) un problema, utilizando los recursos disponibles para generar individuos más aptos.

Las componentes que tienen estos algoritmos son:

- ▷ Técnica de codificación: cómo se elige la manera de armar los genes y cromosomas.
- ▷ Procedimiento de iniciación: se debe establecer una población inicial de padres, que puede ser aleatoria.
- ▷ Función de evaluación: es lo que tiene que cumplir un individuo para ser más apto, una condición que se debe imponer.
- ▷ Selección de los padres para reproducción: es por probabilidad proporcional a la aptitud.
- ▷ Operadores genéticos: serán las técnicas de reproducción, mutación y elitismo.

En particular en este trabajo se utilizó una subrutina basada en PIKAIA [11] que está programada en Fortran77. A continuación se explicará qué herramientas presenta y cuáles se eligieron para el desarrollo de este trabajo.

PIKAIA

Es un algoritmo de optimización basado en un AG, que busca maximizar una función $f(x)$ en un dominio $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, con $x_k \in [0.0, 1.0], \forall k$, donde n es el número de parámetros por individuo.

Este algoritmo utiliza una población con número de individuos fijo en toda la ejecución. Se usa un número par np de individuos. En caso de no tener paridad, está programado para utilizar $np - 1$ individuos. Entonces la ejecución del programa se realizará en ciclos de $np/2$ veces, ya que cada pareja de padres engendra dos hijos, para mantener el número de individuos de la población.

El núcleo de PIKAIA son dos bucles anidados que controlan las generaciones y los ciclos reproductivos. Su estructura es la siguiente:

inicio del ciclo generacional	se realizará n_{gen} veces
inicio ciclo reproductivo	$\frac{np}{2}$ veces
elige dos individuos según su aptitud, y los llama ip1, ip2	serán mamá y papá
excluye que sean ambos el mismo punto del dominio	no se puede cruzar a sí mismo
arma los cromosomas de ip1 e ip2	los cromosomas de mamá y papá
los cruza	reproduce dos hijos
muta cada hijo	cambia aleatoriamente algún gen
decodifica ambos hijos	quedan dos nuevas soluciones
guarda los nuevos individuos	se va armando una nueva generación

Para todo este procedimiento se tienen que tomar decisiones. Desde cómo se elegirán los individuos para reproducirse y cómo serán mutados, hasta la forma en que serán guardados en la población. En la siguiente lista se detallan los procesos importantes que se deben elegir para el funcionamiento de PIKAIA:

- ◇ **Población inicial:** para evitar algún desvío en el inicio del programa, se inicia generando sus genes con números aleatorios $R \in [0.0, 1.0]$. Se calcula la aptitud para cada individuo.
- ◇ **Técnicas de selección:** PIKAIA utiliza mecanismos de selección para elegir ambos padres en una iteración del ciclo reproductivo. El método de selección va acompañado de la probabilidad de un individuo para ser seleccionado para procrear, que es proporcional a la aptitud del individuo. Esto asegura que los genes más aptos tengan más probabilidad de pasar a la siguiente generación.

1. *Algoritmo de ruleta:* en analogía al juego de la ruleta del casino, esta técnica asigna un espacio proporcional a la probabilidad del individuo. Si un individuo es más apto que otro, tendrá el espacio más grande para que la bola tenga más probabilidades de caer en él.

Si S_i es la aptitud del individuo i , se calcula la suma de todos los valores de aptitud de la población,

$$F = \sum_{i=1}^{np} S_i,$$

y se define

$$T_j = \sum_{i=1}^j S_i, \quad j = 1, \dots, np,$$

siendo $T_{j+1} \geq T_j, \forall j$ y $T_{np} = F$. Luego se genera un número aleatorio $R \in [0.0, F]$, y se elige el elemento T_j para el cual $T_{j-1} \leq R < T_j$. Para un dado valor de R la suma T_j tiene un solo valor j que lo cumple y ese será el elegido para procrear.

2. *Algoritmo del más apto:* Usa también la aptitud como probabilidad para elegir a los padres. Asigna un ranking r_j basado en la aptitud S_j donde $r = 1$ es el más apto y $r = np$ es el menos apto. Luego la función ranking se escribe:

$$S'_j = \frac{np - r_j + 1}{np}, \quad S'_j \in [0.0, 1.0].$$

En este caso se utiliza S'_j en vez de S_j como función de probabilidad en la ruleta.

3. *Presión de selección:* Es posible cambiar la selección de ranking con diferentes pendientes entre el mejor y el peor individuo. Considerando la ecuación de una recta, con pendiente m , que representa la medida de selección, y b su ordenada al origen; tendremos

$$S'(r) = b - m \left(\frac{r}{np} \right), \quad m, b \geq 0.$$

La razón [mejor:peor] de la función de aptitud normalizada se transforma en

$$\frac{S'_M}{S'_P} = \frac{b - \frac{r}{np}}{b - m}.$$

PIKAIA hace uso de una versión modificada para la selección, con probabilidad:

$$S'(r) = (fdif + 1)(np + 1) - 2r \times fdif$$

donde $0.0 \leq fdif \leq 1.0$ que es equivalente a la pendiente m en la ecuación lineal [11].

- ◇ **Codificación y decodificación:** el proceso de codificación produce, para cada padre seleccionado, una estructura como la de un cromosoma, que será utilizada para procrear a través de varios operadores de reproducción. La decodificación es el proceso inverso, que transforma el cromosoma en los parámetros físicos, de interés. Entonces, la codificación consiste en producir un cromosoma de los n parámetros que definen la función $f(x)$, con $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, que será maximizada.

PIKAIA codifica estos parámetros usando un alfabeto decimal de enteros en base 10 de un dígito. Esquemáticamente,

$$x_k \in [0.0, 1.0] \rightarrow X_k = (X_1, X_2, \dots, X_{nd}),$$

donde nd es el número de genes del cromosoma.

El algoritmo de codificación será:

$$X_j = \text{mód}(10^{nd-j+1}x_j, 10), \quad j = 1, 2, \dots, nd,$$

resultando que $X_j \in [0, 9]$, y siendo $\text{mód}(x, y)$ el resto de la división entre x e y . Cada uno de los parámetros definidos se transforma en una secuencia de nd dígitos enteros; por lo tanto, la codificación de todos los n parámetros hasta nd dígitos significativos produce un arreglo de una dimensión o cromosoma de $n \times nd$ dígitos de largo. Cada elemento de este arreglo puede ser pensado como un gen, teniendo la posibilidad de 10 aleloides¹. Para cada parámetro codificado la decodificación es

$$x_k = \frac{1}{10^{nd}} \sum_{j=1}^{nd} X_j \times 10^j.$$

Como ejemplo de la codificación, consideremos un par ordenado de dos parámetros (x, y) :

$$(x, y) = (0.01234567, 0.23456789).$$

Si se definen 8 genes en cada parámetro, codificando queda:

$$\text{cromosoma: } [0123456723456789],$$

que es un cromosoma de 16 genes.

- ◇ **Operador de cruce:** es el operador de reproducción, y es una de las diferencias importantes entre los algoritmos genéticos y los puramente heurísticos. PIKAIA solo tiene operador de cruce de un punto y de dos puntos.

Trabaja sobre los cromosomas de los padres para producir dos cromosomas hijos. Se para sobre un mismo punto (o dos) en ambos cromosomas e intercambia las secuencias que continúan a partir de ese punto. Son dos hijos diferentes pero mantienen secuencias completas del material genético de los padres. Se establece, además, un valor de probabilidad de cruce, $pcross$, que

¹Aleloide: es cada una de las formas alternativas que puede tener un mismo gen que se diferencian en su secuencia y que se puede manifestar en modificaciones concretas de la función de ese gen.

en este trabajo se fijó en $pcross = 0.95$. De esta manera, se genera un número aleatorio R y si $R \leq pcross$ se produce la reproducción. En caso de que $R > pcross$ los padres se copian exactamente igual como hijos.

Como ejemplo de la reproducción de un punto, consideremos dos cromosomas padres; la barra representa el punto de corte elegido aleatoriamente por el operador de cruce:

$$(x, y)_1 = (0.01234567, 0.23456789) \quad \rightarrow \quad 012345672|3456789$$

$$(x, y)_2 = (0.56789012, 0.67890123) \quad \rightarrow \quad 567890126|7890123$$

los trozos resultantes se intercambian a partir de la barra, quedando:

$$012345672|7890123 \quad \rightarrow \quad (x_1, y_1) = (0.01234567, 0.27890123)$$

$$567890126|3456789 \quad \rightarrow \quad (x_2, y_2) = (0.56789012, 0.63456789).$$

- ◇ **Operador mutación:** PIKAIA ofrece un solo operador de mutación, llamada mutación uniforme de un punto, pero con varias opciones. También ofrece variar la tasa de mutación, es decir, una tasa dinámica a través del progreso de la evolución.

Para cada gen del cromosoma de los hijos, se genera un número aleatorio R y se activa la mutación si $R \leq pmut$ (valor que se halla entre 0 y 1), donde $pmut$ es la tasa de mutación. Esta operación consiste en reemplazar los genes que cumplen la condición $R \leq pmut$ con un número entero aleatorio $K \in [0, 9]$. Hay que destacar que si bien la mutación puede cambiar un solo gen, el efecto en la solución puede ser de un orden de magnitud, dependiendo del gen afectado. Es por ello que este operador puede ser muy beneficioso y necesario para variar la población, o puede destruir una generación superior de soluciones.

El ajuste dinámico de la tasa de mutación es la solución ante la destrucción de generaciones idóneas. PIKAIA implementa este ajuste dinámico para monitorear el grado de convergencia en la población y ajustar en consecuencia, la tasa de mutación. Tiene dos formas de implementar el monitoreo de la convergencia:

- Por medio de la distancia de las aptitudes S entre el mejor individuo y el del medio de la población. Se define:

$$\Delta S = \frac{S(r = 1) - S(r = np - /2)}{S(r = 1) + S(r = np/2)},$$

como medida del grado de convergencia. La tasa de mutación se incrementa (baja) cuando la cantidad ΔS es menor (mayor) que un nivel predeterminado.

- Por medio de la distancia en el dominio de la función de aptitud. Es similar al anterior, pero tanto el numerador como el denominador de ΔS se calculan como la distancia entre los puntos x_i en el espacio de parámetros, para los mismos individuos que en el caso anterior.

Para este trabajo se utilizó la tasa de mutación :

$$\begin{cases} i_o = 0.005 & \text{(tasa de mutación inicial),} \\ i_{\min} = 0.0005 & \text{(tasa de mutación mínima),} \\ i_{\max} = 0.01 & \text{(tasa de mutación máxima),} \end{cases}$$

con el monitoreo de convergencia con el uso de la función de aptitud.

- ◇ **Planes de reproducción:** controlan la forma en que los nuevos individuos son incorporados a la población. PIKAIA ofrece tres tipos de planes reproductivos:

1. *Reemplazo de la población entera*: es el plan más simple de reproducción. Se genera un número de hijos igual al número de individuos de la población y se reemplazan todos los padres con la generación de hijos. De esta manera, todos los individuos solo viven una generación.
2. *Estado fijo*: inserta los individuos a medida que son procreados. Se debe elegir un criterio:
 - Bajo qué condiciones nuevos miembros serán insertados.
 - Cómo serán borrados los individuos padres de la población para hacer espacio a los nuevos miembros.
 - Si hay un límite de vida que imponer a los individuos.

PIKAIA incorpora dos planes de estado fijo. En ambos casos los nuevos hijos son insertados cuando su aptitud es mejor que la de los padres, a menos que sea idéntico a un miembro ya existente de la población, en cuyo caso es eliminado. Además PIKAIA no impone límite de vida a la población. Un individuo puede sobrevivir a través de todas las generaciones si es lo suficientemente apto. La diferencia entre estos dos planes es cómo se hace espacio para la siguiente generación:

- a) *Estado fijo, eliminación del peor*: con esta opción se elimina de la población previa al individuo de menor aptitud.
- b) *Estado fijo, eliminación aleatoria*: un miembro de los padres es elegido aleatoriamente y borrado, independientemente de su aptitud.

Para estos planes se debe recalcular el ranking para cada individuo en cada paso de reemplazo.

- ◊ **Elitismo**: ante la posibilidad de destrucción de buenos individuos por los operadores de mutación y cruce, existe la posibilidad de que el mejor individuo de una generación no pase a la siguiente. Solo el plan de *estado fijo, eliminación del peor* garantiza que el más apto pueda sobrevivir. Para el resto de los planes, se puede implementar la estrategia conocida como elitismo, que salva al individuo de mejor aptitud.

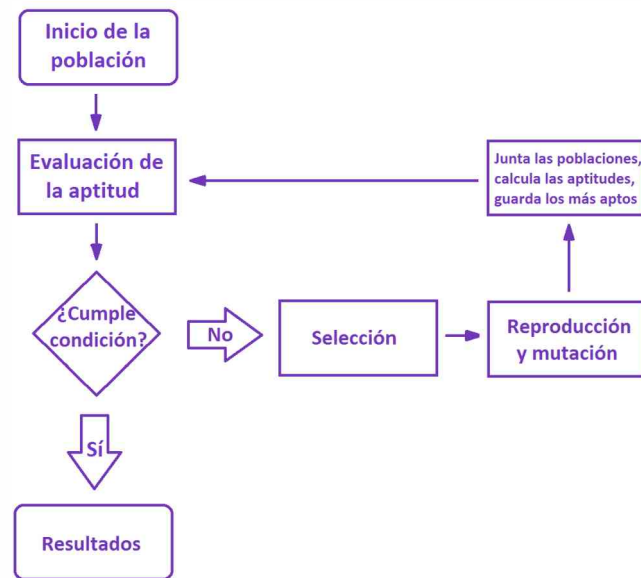
Opera según la técnica de reproducción elegida:

1. *Reemplazo de la población entera*: con el elitismo, se salva al individuo de mejor aptitud y lo guarda en la nueva población. En caso de que todos los hijos sean más aptos, lo elimina sin guardarlo.
2. *Estado fijo, eliminación aleatoria*: para evitar que se borre el padre de mejor aptitud, el elitismo lo protege. Funciona de modo tal que, si el padre de mejor aptitud es elegido para ser borrado, no permite que esto ocurra, de este modo se termina guardando a salvo en la siguiente generación.

En este trabajo se utilizó el plan de reproducción de *reemplazo de la población entera* con modificaciones. La diferencia consiste en que luego de procrear la nueva generación, junta a los padres con los hijos, quedando $2 \times np$ individuos, calcula la aptitud para todos y se queda con los np individuos más aptos.

La población inicial se construyó en base a los coeficientes provistos por el IRI, calculados por el CCIR. Se toma un coeficiente y se le asigna un rango entre 95 % y 105 % de su valor. Se normaliza el rango de modo que quede entre 0 y 1. Se busca aleatoriamente un valor en dicho rango y se consideran los 6 primeros dígitos (que le siguen al cero inicial) como 6 genes de ese coeficiente. Este proceso se hace con todos los coeficientes y se concatenan los 6 genes de cada coeficiente, dando como resultado el cromosoma de un individuo. De esta manera se generan 5100 individuos que constituyen la población inicial. Se realizaron 500 generaciones o iteraciones para cada mes y para dos niveles de actividad solar.

Figura 3.3. Diagrama de flujo del algoritmo genético PIKAIA modificado. En este trabajo de tesis se utilizó, como condición de finalización, completar las 500 generaciones.



La función de aptitud que se utilizó es la siguiente:

$$APT = \frac{1}{\sum_{Obs} |f_o F2_{AG}(\lambda, \varphi, t) - f_o F2_{Obs}|}, \quad (3.5)$$

donde $f_o F2_{AG}(\lambda, \varphi, t)$ son los valores de $f_o F2$ que provienen de ejecutar la rutina del IRI (ver 3.2) con los coeficientes decodificados y $f_o F2_{Obs}$ los provenientes de los datos de los sondadores.

En la Fig. 3.3 se muestra un diagrama de flujo de PIKAIA modificado. El programa se inicia con una población inicial, calcula la aptitud de cada miembro de la población y se fija la condición. En esta tesis se utilizó la condición de completar las 500 generaciones. El programa termina y el individuo de mayor aptitud en ese momento, es el individuo que al ser decodificado es el conjunto de coeficientes finales. Si no, procede a la selección de los miembros para reproducción. Una vez elegidos, inicia el operador de cruce, los muta y junta padres con hijos. Evalúa la aptitud, y lo repite hasta completar una generación. Cuando la generación se completa, se queda con los np más aptos y vuelve a iniciar el ciclo con la evaluación de la función de aptitud.

Es importante destacar que una de las desventajas de los algoritmos genéticos, es el tiempo de cálculo. Considerando que son 78339 datos observables y 23712 coeficientes, que corresponden a 988 coeficientes para cada mes y para cada nivel de actividad solar, cada conjunto se procesa en etapas. El algoritmo, además, se ha paralelizado con el paradigma MPI (*Message Passing Interface*), de manera tal que el cálculo de las aptitudes, que es la parte más costosa del cálculo, se puede distribuir en varios procesadores. Una ejecución del programa calculando los coeficientes para un mes y un nivel de actividad solar, con 5100 individuos, 500 generaciones y aproximadamente 5000 datos observables, toma alrededor de 6 horas de procesamiento en una computadora con un procesador *i7* de cuatro núcleos. Otro factor que se observó es que el tiempo de cálculo tiene una dependencia casi lineal con la cantidad de datos observados implementados.



Con los coeficientes calculados con el AG se procedió a evaluar la calidad de los valores de f_oF2 obtenidos. Para ello se ejecutó la rutina del IRI con los coeficientes obtenidos con el AG y luego con los coeficientes del CCIR, ambos con valores de latitud y longitud geográficas y tiempo universal correspondientes a la ubicación y el instante en que se midieron las f_oF2_{Obs} con ionosondas, datos provistos por la RAPEAS (Fig. 3.2). De esta manera se obtuvieron los valores de la frecuencia crítica de la capa F2 para los coeficientes obtenidos por el AG, (f_oF2_{AG}), y las f_oF2_{IRI} para los coeficientes provistos por el IRI.

Se evaluó el comportamiento global de la muestra para América del Sur (Sec. 4.1). Luego, se consideraron los distintos factores de variabilidad en la ionosfera y se agruparon partiendo de la muestra global por: actividad solar (Sec. 4.2), considerando que los datos obtenidos corresponden a varios ciclos solares, los comprendidos entre los años 1958 a 2009 (Fig. 2.3); horas representativas diurnas y nocturnas, ya que la frecuencia crítica de la capa F2 varía significativamente en presencia o ausencia de la radiación solar (Sec. 4.3); estaciones del año (Sec. 4.4), debido a que la respuesta de la ionosfera responde ante el ángulo cenital del Sol con respecto al lugar; y finalmente para distintas latitudes modip (Sec. 4.5), debido a que la ionosfera no responde de igual manera ante distintas latitudes.

Resultados

Para comparar los datos f_oF2 observados con los valores f_oF2 obtenidos por ambos modelos, se ajustó por mínimos cuadrados una recta de correlación entre los primeros y cada uno de los modelos,

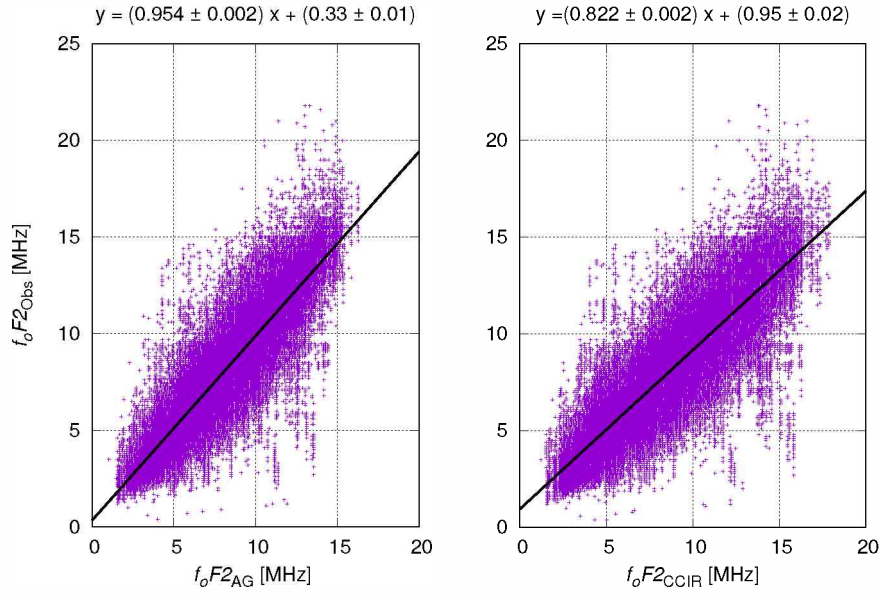


Figura 4.1. Correlación entre los datos observados (f_oF2_{Obs}) y calculados con el Algoritmo Genético (f_oF2_{AG}) a la izquierda, y entre los datos observados y los calculados por el CCIR (f_oF2_{CCIR}) a la derecha.

como se muestra en la Fig. 4.1. Para el AG se obtuvo $y = (0.953 \pm 0.002)x + (0.33 \pm 0.02)$ y para el IRI $y = (0.822 \pm 0.002)x + (0.95 \pm 0.02)$. Los errores son los resultantes del ajuste de mínimos cuadrados.

Para evidenciar una mejor correlación con el AG, se procedió a realizar una prueba estadística que confirme o rechace esta hipótesis. Se calculó la media (μ) para cada muestra de datos,

$$\mu_{Obs} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_oF2_i^{Obs}, \quad \mu_{AG} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_oF2_i^{AG}, \quad \mu_{IRI} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_oF2_i^{IRI}, \quad (4.1)$$

con $n = 78339$ el número total de datos observados. Asimismo se calcularon la desviación estándar y la covarianza entre las f_oF2 observadas y las f_oF2 de los modelos para calcular los coeficientes de correlación de Pearson (ρ).

En el caso de los datos observados y los calculados con el modelo AG, el coeficiente de Pearson se calcula como

$$\rho_{[AG-Obs]} \equiv \frac{\sigma_{[AG][Obs]}}{\sigma_{AG}\sigma_{Obs}} = \frac{\sum_{i=1}^n (f_oF2_i^{AG} - \mu_{AG})(f_oF2_i^{Obs} - \mu_{Obs})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (f_oF2_i^{AG} - \mu_{AG})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (f_oF2_i^{Obs} - \mu_{Obs})^2}}, \quad (4.2)$$

mientras que para los datos observados y los adquiridos con los coeficientes del IRI, el coeficiente se

μ_{Obs}	μ_{AG}	μ_{IRI}	σ_{Obs}	σ_{AG}	σ_{IRI}	$\sigma_{[AG][Obs]}$	$\sigma_{[IRI][Obs]}$	$\rho_{[Obs-AG]}$	$\rho_{[Obs-IRI]}$
7.8	7.9	8.4	3.4	3.2	3.6	9.7	10.5	0.897	0.869

Tabla 4.1. Valores estadísticos calculados para cada muestra de datos y coeficientes de correlación entre la f_oF2_{Obs} y las f_oF2 de los modelos.

$\mu_{[\text{Obs-AG}]}$	$\mu_{[\text{Obs-IRI}]}$	$\sigma_{[\text{Obs-AG}]}$	$\sigma_{[\text{Obs-IRI}]}$	F	$n - 1$	P
0.16	0.21	0.043	0.061	1.42	78338	1.00

Tabla 4.2. Medias, varianzas, estadístico F del test de Fisher, para los errores relativos en valor absoluto entre las f_oF2 obtenidas de sondadores y las f_oF2 calculadas con los modelos.

calcula mediante

$$\rho_{[\text{IRI}][\text{Obs}]} = \frac{\sigma_{[\text{IRI}][\text{Obs}]}}{\sigma_{\text{IRI}}\sigma_{\text{Obs}}} = \frac{\sum_{i=1}^n (f_oF2_i^{\text{IRI}} - \mu_{\text{IRI}})(f_oF2_i^{\text{Obs}} - \mu_{\text{Obs}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (f_oF2_i^{\text{IRI}} - \mu_{\text{IRI}})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (f_oF2_i^{\text{Obs}} - \mu_{\text{Obs}})^2}}. \quad (4.3)$$

El coeficiente de correlación de Pearson se halla entre -1 y 1 , siendo 1 el valor para el cual hay correlación positiva completa entre las variables evaluadas, -1 cuando hay completa anticorrelación, y 0 correspondiendo a la falta total de correlación. Al haber obtenido para ambas muestras valores cercanos a 1 , ($\rho_{[\text{AG}][\text{Obs}]} = 0.897$ y $\rho_{[\text{IRI}][\text{Obs}]} = 0.869$) esto implica que hay una correlación positiva importante entre los datos observados y los obtenidos mediante los modelos (Tabla 4.1). Se ha calculado además la significación estadística de estos coeficientes de correlación, a través de un test t de Student de la variable z de Fisher [19]. En ambos casos, el área Q bajo la curva de densidad de probabilidad a la derecha del estadístico dio 0 , lo cual indica verosimilitud estadística de ambos coeficientes con cualquier grado de confiabilidad preelegido. Como resultado se puede asegurar que ambos modelos son representativos de las frecuencias críticas de plasma ionosférico. Como el coeficiente para el modelo de AG se encuentra más cercano a 1 que el coeficiente para el IRI, esto supondría una mejor representación de la frecuencia crítica con el modelo propuesto, aunque la mejora es a primera vista marginal. Es de interés conocer si el trabajo realizado presenta una mejora significativa, es decir, si la implementación de este algoritmo provee de mejores coeficientes, o simplemente pertenecen a la misma muestra estadística. Para ello se implementa el test de Fisher, con el fin de evaluar si las muestras son iguales estadísticamente o no. Para ello, calculamos las varianzas de las diferencias entre observaciones y modelos.

Como el rango de variabilidad de la ionosfera es amplio y los valores f_oF2 difieren en gran medida para el día (en presencia de radiación solar) y para la noche (en ausencia de la misma), los errores absolutos presentan grandes diferencias. Para poder compararlos se calculó la diferencia relativa en valor absoluto entre las f_oF2 observadas y las f_oF2 calculadas,

$$\text{AG}_i = \left| \frac{f_oF2_i^{\text{Obs}} - f_oF2_i^{\text{AG}}}{f_oF2_i^{\text{Obs}}} \right|, \quad \text{IRI}_i = \left| \frac{f_oF2_i^{\text{Obs}} - f_oF2_i^{\text{IRI}}}{f_oF2_i^{\text{Obs}}} \right|, \quad i = 1, \dots, n. \quad (4.4)$$

Con estos valores relativos se calculan las respectivas varianzas y se plantea la hipótesis nula que ambas muestras tienen varianzas estadísticamente iguales.

Se escribió un programa en Fortran que calcula la media (μ) y la varianza (σ^2) para cada muestra de diferencias relativas en valor absoluto:

$$\mu_{[\text{Obs-AG}]} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{AG}_i, \quad \mu_{[\text{Obs-IRI}]} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{IRI}_i, \quad (4.5)$$

$$\sigma_{[\text{Obs-AG}]}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\text{AG}_i - \mu_{[\text{Obs-AG}]})^2, \quad \sigma_{[\text{Obs-IRI}]}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\text{IRI}_i - \mu_{[\text{Obs-IRI}]})^2, \quad (4.6)$$

con los cuales se calcula el estadístico F^1 del test de Fisher:

$$F = \frac{\sigma_{[\text{Obs-IRI}]}}{\sigma_{[\text{Obs-AG}]}}. \quad (4.7)$$

En la Tabla 4.2 se muestran los valores obtenidos. Se procedió a hacer el cálculo del área bajo la curva de la distribución de Fisher, P , por medio de un programa [19]. El resultado obtenido para el área bajo la curva que queda a la izquierda de la F calculada resulta $P = 1$. Por lo tanto, la hipótesis de que ambas varianzas son estadísticamente iguales es rechazable, lo que permite afirmar que los coeficientes calculados en esta tesis son superiores a los del IRI para representar las f_oF^2 .

¹Para calcular F , se utiliza la varianza de mayor magnitud en el numerador y la de menor magnitud en el denominador. En este trabajo resulta: $\sigma_{[\text{Obs-IRI}]}^2 > \sigma_{[\text{Obs-AG}]}^2$ para todos los casos, salvo uno. El programa evalúa cuál es la mayor varianza y calcula el F como corresponde.

Variaciones por actividad solar

Los resultados presentados anteriormente (Sec. 4.1) son valores globales de la muestra, considerando los datos desde 1958 hasta 2008, inclusive. En un rango amplio como este, hay distintas variables que entran en juego. El ciclo de manchas solares tiene una duración de 11 años y como los datos de ionosondas utilizadas fueron tomados entre los años 1958 y 2009, se registran varios ciclos de actividad solar (Fig. 2.3). Por lo tanto, es de interés estudiar cómo se comportan los modelos ante distintos rangos de actividad solar.

Para este estudio se dividieron las f_oF2 en tres muestras: actividad solar alta ($IG_{12} \geq 120$), actividad solar media ($40 < IG_{12} < 120$) y actividad solar baja ($IG_{12} \leq 40$). Considerando estos rangos se realizó el mismo tratamiento que en la Sec. anterior, obteniendo los gráficos presentados en la Fig. 4.2, donde se observa que los mayores valores de f_oF2 tienen una estrecha relación con la actividad solar alta, como es de esperarse.

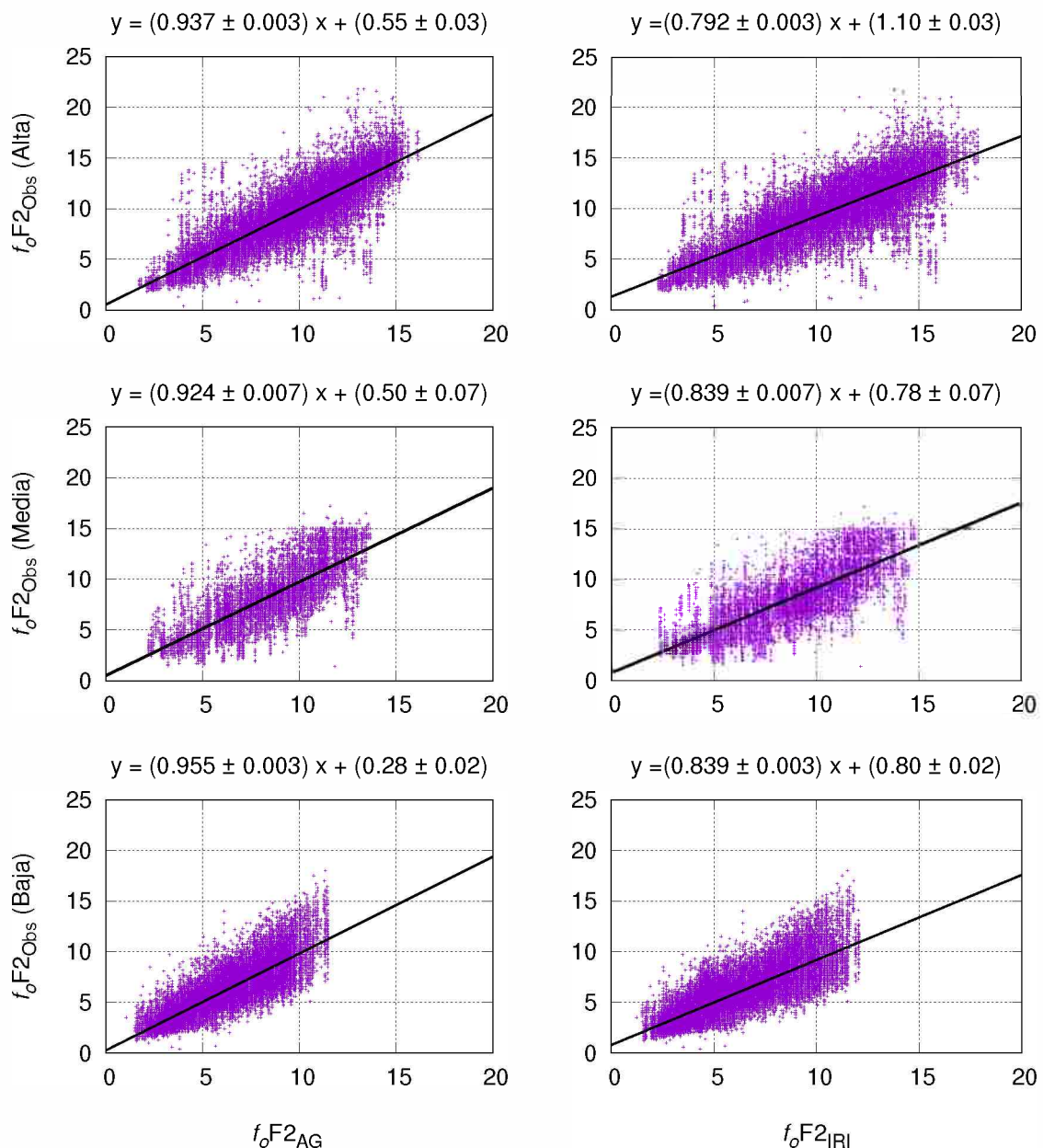


Figura 4.2. Correlación entre los datos observados y los obtenidos de los modelos para actividad solar alta, media y baja; ajustados mediante mínimos cuadrados.

Actividad	μ_{Obs}	μ_{AG}	μ_{IRI}	σ_{Obs}	σ_{AG}	σ_{IRI}	$\sigma_{[\text{AG}][\text{Obs}]}$	$\sigma_{[\text{IRI}][\text{Obs}]}$	$\rho_{[\text{Obs-AG}]}$	$\rho_{[\text{Obs-IRI}]}$
Alta	9.6	9.6	10.5	3.2	3.0	3.3	8.2	8.7	0.870	0.823
Media	8.3	8.4	8.9	3.2	2.7	2.9	6.6	6.9	0.787	0.767
Baja	5.8	5.8	6.0	2.4	2.2	2.4	4.5	4.6	0.860	0.818

Tabla 4.3. Valores estadísticos y coeficientes de correlación entre las f_oF2_{Obs} y las f_oF2 de los modelos agrupados por actividad solar alta, media y baja.

Los valores calculados para las medias, las desviaciones estándar y las correlaciones de Pearson se aprecian en la Tabla 4.3. Los resultados de los coeficientes de correlación de Pearson siguen el mismo patrón que los valores obtenidos para la muestra global, salvo para los valores obtenidos con actividad solar media, donde ambos modelos se alejan de los observados. Esto podría ser consecuencia de que ambos modelos tienen coeficientes calculados para actividad solar alta y baja, y realizan interpolación lineal para valores de actividad solar media.

En cuanto a los resultados obtenidos para las diferencias relativas en valor absoluto (Tabla 4.4), se observa el mismo comportamiento que los valores globales, para actividad solar alta y baja. Para actividad solar media el modelo de IRI es aparentemente mejor. En cuanto a la hipótesis de igualdad estadística entre las diferencias relativas en valor absoluto de las f_oF2_{Obs} y las calculadas por los modelos, el test de Fisher descarta la hipótesis para los tres conjuntos de datos.

Actividad	$\mu_{[\text{Obs-AG}]}$	$\mu_{[\text{Obs-IRI}]}$	$\sigma^2_{[\text{Obs-AG}]}$	$\sigma^2_{[\text{Obs-IRI}]}$	F	$n - 1$	P
Alta	0.14	0.20	0.049	0.074	1.51	35621	1.0
Media	-0.08	-0.07	0.116	0.048	2.71	9449	1.0
Baja	0.16	0.21	0.026	0.036	1.40	33266	1.0

Tabla 4.4. Valores estadísticos para las diferencias relativas en valor absoluto entre las f_oF2_{Obs} y las f_oF2 de los modelos para actividad solar alta, media y baja.

Intervalo	μ_{Obs}	μ_{AG}	μ_{IRI}	σ_{Obs}	σ_{AG}	σ_{IRI}	$\sigma_{[\text{AG}][\text{Obs}]}$	$\sigma_{[\text{IRI}][\text{Obs}]}$	$\rho_{[\text{Obs-AG}]}$	$\rho_{[\text{Obs-IRI}]}$
11 h - 14 h	9.7	9.9	10.7	3.1	2.8	3.0	7.7	8.0	0.865	0.838
23 h - 02 h	6.6	6.6	7.1	3.1	2.8	3.3	7.8	8.6	0.901	0.862

Tabla 4.5. Valores estadísticos y coeficientes de correlación entre las f_oF2_{Obs} y las f_oF2 de los modelos, para intervalos horarios representativos de día y noche.

Variaciones diarias

Se puede estudiar cómo responden los modelos ante el comportamiento de la f_oF2 entre las horas de máximo y mínimo de radiación solar. Se consideran horas diurnas y nocturnas, ya que los valores de la frecuencia crítica varían de forma importante en presencia o ausencia de la radiación solar. Entonces se considera el mediodía local con una hora antes y dos horas después ya que el máximo puede ocurrir antes o después del mediodía local [14]. Además se considera el mismo intervalo 12 h más tarde, para el rango nocturno.

Para estos dos grupos de datos se realiza el mismo procedimiento que en la Sec. 4.1: se grafican y calculan las rectas de correlación con mínimos cuadrados (Fig. 4.3). En este gráfico se puede observar que los mínimos de frecuencia crítica se encuentran por las noches, como es de esperarse. Sin embargo, hay valores de frecuencia crítica mínima en el gráfico para valores diurnos que son atípicos. Este fenómeno se puede explicar debido a que una de las estaciones de donde se obtuvieron los observables se encuentra en la Antártida, y tanto para invierno como para verano, los datos no corresponden completamente a esta división de horas diurnas y nocturnas, lo cual fue verificado.

A continuación se evaluaron los coeficientes de correlación de Pearson para las muestras. Los resultados obtenidos se hallan en la Tabla 4.5. Nuevamente no se encuentra una diferencia signifi-

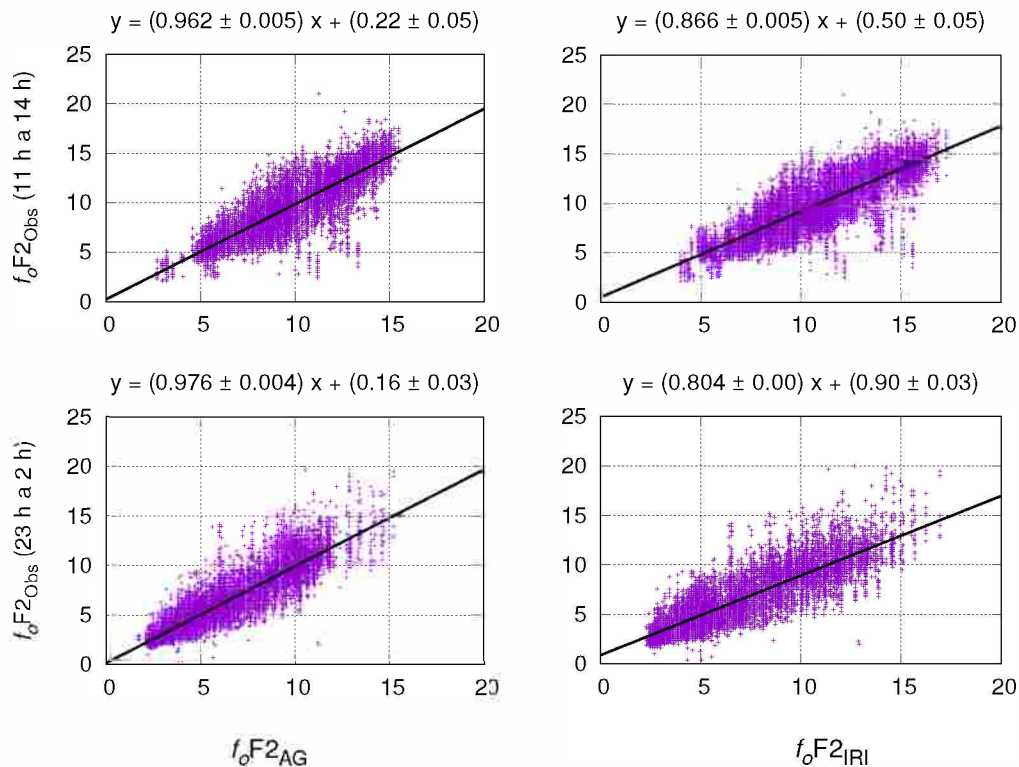


Figura 4.3. Correlación entre los datos observados y los obtenidos de los modelos para intervalos de tiempo de 11 h a 14 h y de 23 h a 2 h hora local, ajustados con mínimos cuadrados.

Intervalo	$\mu_{[\text{Obs-AG}]}$	$\mu_{[\text{Obs-IRI}]}$	$\sigma^2_{[\text{Obs-AG}]}$	$\sigma^2_{[\text{Obs-IRI}]}$	F	$n - 1$	P
11 h - 14 h	0.14	0.18	0.054	0.080	1.53	13339	1.0
23 h - 02 h	0.16	0.23	0.036	0.054	1.56	12391	1.0

Tabla 4.6. Valores estadísticos para las diferencias relativas en valor absoluto entre las f_oF2_{Obs} y las f_oF2 calculadas con los modelos para horas diurnas y nocturnas.

cativa respecto de los resultados obtenidos para la muestra global, siendo que el AG da resultados marginalmente superiores a los del IRI.

Luego se realizó el cálculo de diferencias relativas en valor absoluto con las muestras de datos, con lo cual se hizo el test estadístico de Fisher para ver si las muestras son estadísticamente iguales. Los resultados se presentan en la Tabla 4.6. Como se puede observar, el test de Fisher descarta la hipótesis de igualdad estadística de varianzas para ambos grupos de valores.

Variaciones estacionales

Otro comportamiento que se puede estudiar es el comportamiento de f_oF2 para las estaciones del año. Separando los datos para otoño, primavera, invierno y verano, se obtuvo el gráfico de la correlación entre datos y se ajustó con mínimos cuadrados (Fig. 4.4). Como se puede observar, para todas las épocas los coeficientes producto del AG parecieran ajustar mejor que los coeficientes del IRI.

Con el fin de conocer los valores de correlación de Pearson, se realizó el mismo tratamiento que el aplicado anteriormente, dando como resultados los expresados en la Tabla 4.7.

Para los valores obtenidos del coeficiente de correlación, se encuentra que siempre es superior para el modelo de AG que para el IRI, es decir $\rho_{[\text{Obs-AG}]} > \rho_{[\text{Obs-IRI}]}$, recordando que el máximo es la unidad que corresponde a una correlación completa entre las variables, que en este trabajo son los datos observados y los predichos por los modelos.

Implementando las diferencias relativas en valor absoluto, se establece la hipótesis que ambas muestras son iguales y se calcula el test de Fisher para cada época del año, dando como resultado los valores expresados en la Tabla 4.8.

Época	μ_{Obs}	μ_{AG}	μ_{IRI}	σ_{Obs}	σ_{AG}	σ_{IRI}	$\sigma_{[\text{AG}][\text{Obs}]}$	$\sigma_{[\text{IRI}][\text{Obs}]}$	$\rho_{[\text{Obs-AG}]}$	$\rho_{[\text{Obs-IRI}]}$
Otoño	7.3	7.4	8.0	3.7	3.5	4.0	11.7	12.9	0.898	0.875
Primavera	8.9	8.9	9.4	3.2	3.0	3.5	8.6	9.6	0.886	0.856
Invierno	6.2	6.4	7.0	3.1	3.0	3.2	8.2	8.8	0.887	0.870
Verano	8.9	8.8	9.1	2.7	2.5	3.0	5.7	6.6	0.855	0.818

Tabla 4.7. Valores estadísticos calculados para cada estación del año y los coeficientes de correlación entre las frecuencias críticas observadas y las obtenidas por los modelos.

Época	$\mu_{[\text{Obs-AG}]}$	$\mu_{[\text{Obs-IRI}]}$	$\sigma^2_{[\text{Obs-AG}]}$	$\sigma^2_{[\text{Obs-IRI}]}$	F	$n - 1$	P
Otoño	0.18	0.24	0.052	0.079	1.53	19080	1.0
Primavera	0.14	0.18	0.039	0.049	1.27	20441	1.0
Invierno	0.18	0.24	0.053	0.080	1.50	19651	1.0
Verano	0.13	0.16	0.026	0.032	1.24	19163	1.0

Tabla 4.8. Valores estadísticos para las diferencias relativas en valor absoluto entre las f_oF2_{Obs} y las f_oF2 de los modelos para cada estación del año.

Comparando el estadístico F con el área bajo la curva de la distribución de densidad de P , en todos los casos la hipótesis de que las varianzas son estadísticamente iguales se rechaza. Por lo tanto la diferencia entre AG e IRI es estadísticamente significativa.

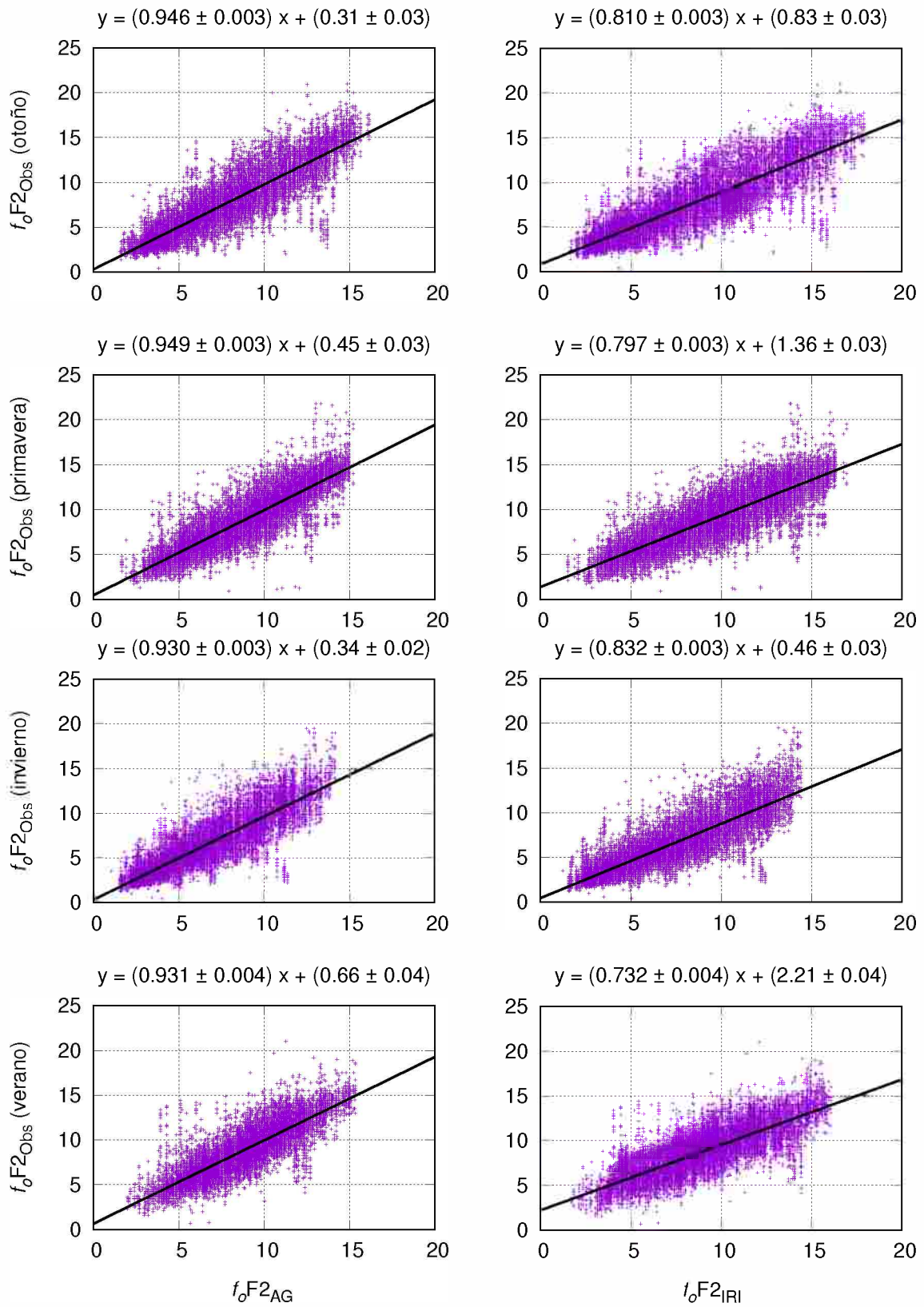


Figura 4.4. Correlación entre los datos observados y los calculados por los modelos para las estaciones: otoño, primavera, invierno y verano.

Variaciones latitudinales

Por último se puede estudiar la variabilidad según las latitudes modip por estación. Se elige una estación representativa para cada latitud modip disponible de las cuales se obtuvieron datos con ionosondas, considerando los intervalos como:

Designación modip	Latitud modip [°]	Estación
[Meq] Ecuatorial (Equatorial)	0 – 10	Jicamarca [Perú]
[Mlo] Baja (Low)	10 – 30	San Juan [Argentina]
[Mmi] Media (Middle)	30 – 49	Concepción [Chile]
[Mhi] Alta (High)	49 – 60	Ushuaia [Argentina]
[Msa] Subauroral (Sub-Auroreal)	60 – 65	Base San Martín [Argentina]
[Mpo] Polar	65 – 90	Sin datos

Una vez separados los datos según las estaciones elegidas por su latitud modip, se ajustan por cuadrados mínimos las frecuencias críticas entre los datos observados y los datos obtenidos de los modelos, como se muestra en la Fig. 4.5. Para latitudes ecuatoriales se observa una baja correlación entre las f_oF2_{Obs} y las f_oF2 calculadas con los modelos. Esto podría ser consecuencia de la escasez de datos observables en la región para la obtención de los coeficientes, junto a las incertezas en la adquisición de los f_oF2_{Obs} , ya que debido al comportamiento de la región, se ven afectados por ejemplo por el *Spread F* (Sec. 2.3).

Para obtener los coeficientes de Pearson se calcularon las medias y varianzas de las tres muestras y se buscó la correlación entre los datos observados y las f_oF2 de los modelos, obteniéndose como resultados los expresados en la Tabla 4.9. Para estos coeficientes se observa que el modelo obtenido con el AG siempre responde mejor que el IRI; sin embargo, para la latitud modip ecuatorial la predicción no es tan buena para ambos casos.

A continuación se aplicó el programa que calcula el test de Fisher, con la hipótesis que ambas muestras son estadísticamente las mismas. Los resultados se expresan en la Tabla 4.10. Para estos

Lat. modip	μ_{Obs}	μ_{AG}	μ_{IRI}	σ_{Obs}	σ_{AG}	σ_{IRI}	$\sigma_{[AG][Obs]}$	$\sigma_{[IRI][Obs]}$	$\rho_{[Obs-AG]}$	$\rho_{[Obs-IRI]}$
[Meq] Ji	7.5	8.0	8.7	2.6	3.2	3.8	4.3	5.0	0.509	0.502
[Mlo] SJ	9.2	9.4	10.0	3.6	3.0	3.2	9.3	9.8	0.852	0.841
[Mmi] Co	8.6	8.6	9.4	3.5	3.3	3.7	11.0	11.9	0.943	0.922
[Mhi] Us	6.2	6.0	6.1	2.6	2.4	2.7	5.9	6.3	0.936	0.900
[Msa] SM	5.3	5.3	5.2	1.9	1.8	1.8	3.0	2.6	0.886	0.745

Tabla 4.9. Valores estadísticos calculados para cada muestra de datos y coeficientes de correlación entre las f_oF2_{Obs} y las calculadas con los modelos para cada estación representativa de la latitud modip.

Lat. modip	$\mu_{[Obs-AG]}$	$\mu_{[Obs-IRI]}$	$\sigma^2_{[Obs-AG]}$	$\sigma^2_{[Obs-IRI]}$	F	$n - 1$	P
[Meq] Ji	0.34	0.41	0.195	0.275	1.41	3384	1.0
[Mlo] SJ	0.21	0.24	0.079	0.094	1.19	9119	1.0
[Mmi] Co	0.12	0.18	0.016	0.029	1.84	31651	1.0
[Mhi] Us	0.12	0.16	0.024	0.039	1.65	8406	1.0
[Msa] SM	0.14	0.20	0.029	0.040	1.37	7163	1.0

Tabla 4.10. Valores estadísticos para las diferencias relativas en valor absoluto entre las f_oF2_{Obs} y las f_oF2 calculadas con los modelos para cada estación representativa de la latitud modip.

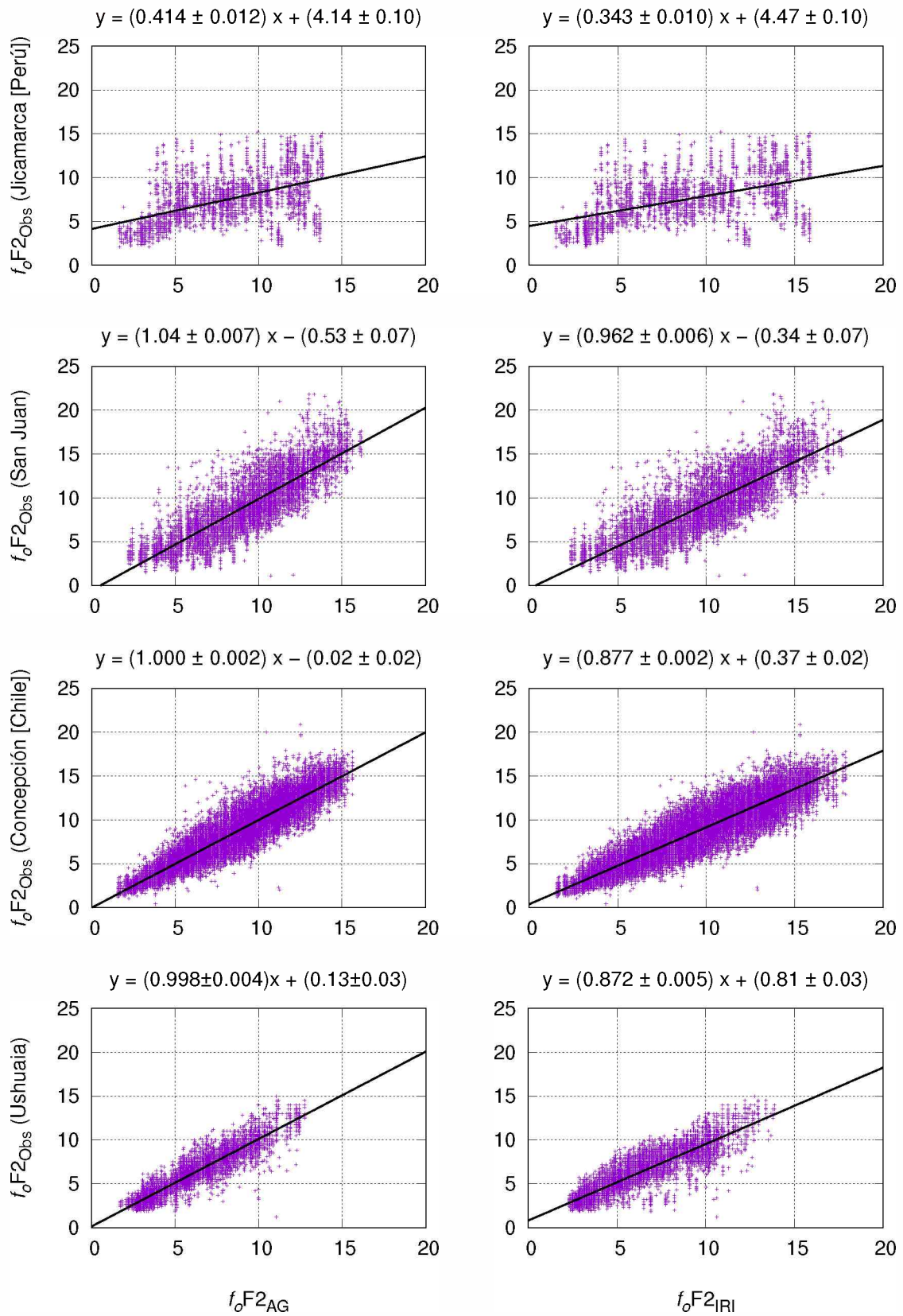


Figura 4.5. Correlación entre los datos observados y los calculados con los modelos, ajustados con el método de mínimos cuadrados, para las ionosondas en las estaciones de Jicamarca, San Juan, Concepción, Ushuaia y Base San Martín con latitud modip ecuatorial, baja, media, alta y subauroral, respectivamente.

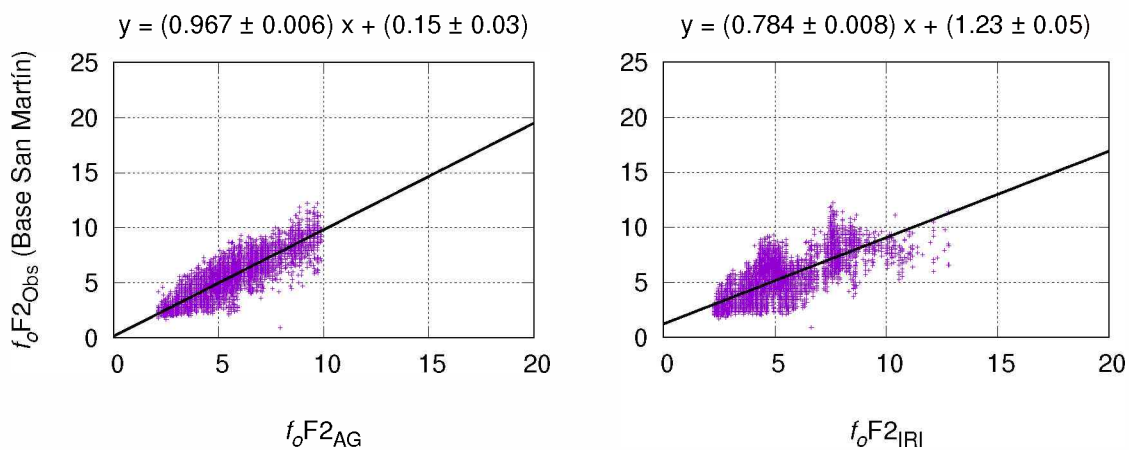


Figura 4.5. (Continuación)

conjuntos de valores, se obtuvo en todos los casos que las muestras son estadísticamente diferentes, y como los coeficientes de correlación siempre fueron superiores para los calculados con el método de algoritmo genético, como ambos tienen significancia estadística perfecta, se puede concluir que los coeficientes encontrados representan de manera más efectiva la f_oF2 de la ionosfera.



En esta tesis se implementó un nuevo método para calcular, para la región de América del Sur, los coeficientes que utiliza el modelo Ionosférico de Referencia Internacional (IRI) para calcular uno de los parámetros principales del perfil de densidad ionosférico, la frecuencia crítica, en referencia al modelado de la capa $F2$.

El método implementado se basa en un algoritmo genético llamado PIKAIA [11], que a través de una codificación de los parámetros que modelan la ionosfera y observaciones tomadas con ionosondas, busca optimizar una función propuesta por medio de herramientas de iteración entre generaciones y mutación de los parámetros que se hallan dentro de la secuencia codificada, obteniéndose como resultado una serie de nuevos coeficientes para dos tipos de actividad solar (alta y baja) para cada mes del año.

Con los resultados obtenidos de la implementación del algoritmo se realizó un análisis estadístico para medir la calidad de los coeficientes obtenidos, comparándolos con los datos provenientes de ionosondas y con el modelo IRI, actualmente vigente.

Se buscó la correlación entre los datos observados y los datos calculados por los modelos para la muestra global, y se aplicaron tests estadísticos para estudiar los resultados. Además se consideró agrupar los datos según parámetros que introducen variabilidad en la ionosfera, repitiendo los pasos del análisis estadístico. Las variables que se consideraron son la actividad solar, horas diurnas y nocturnas, épocas del año y latitud modip.

A continuación se detallan los resultados:

- En el análisis global de los datos se obtuvo que la dispersión entre los f_oF2 observados y los

calculados por los modelos, que presenta el IRI frente al AG, es mayor. El coeficiente de correlación de Pearson es superior para las frecuencias críticas calculadas con el AG que para las del IRI, siendo ambos estadísticamente significativos. Por lo tanto, ambos coeficientes representan bien la f_oF2 de la ionosfera. En cuanto a las distribuciones de los errores relativos, la desviación estándar obtenida por el AG es menor que la obtenida con el IRI. Considerando la hipótesis de que ambas muestras son estadísticamente idénticas, el test de Fisher la rechaza, es decir, que ambos conjuntos de datos son estadísticamente distintos y por lo tanto el modelo propuesto presenta mejoras en la predicción de la f_oF2 .

- En el análisis de los coeficientes para distinta actividad solar se encontró que el coeficiente de correlación del modelo propuesto siempre fue superior al del IRI, aun cuando ambos modelos bajan su eficiencia para actividad solar media. Esto último puede ser consecuencia de que ambos modelos realizan una interpolación lineal entre los coeficientes para actividad alta y baja. Además, ambas muestras mostraron tener diferencias significativas. Por el test de Fisher se demostró que ambos modelos son estadísticamente distintos, pudiéndose afirmar entonces que el modelo propuesto es mejor que el actualmente vigente.
- Para el análisis de horas representativas diurnas y nocturnas, el comportamiento es el mismo que en el análisis global. El coeficiente de correlación es superior para el AG que para el modelo IRI. Para las diferencias relativas en valor absoluto, nuevamente el test de Fisher demostró que ambas muestras son estadísticamente diferentes, demostrando que el modelo propuesto describe mejor la frecuencia crítica de la capa F2 que el modelo actualmente vigente.
- Cuando se analizó por época del año, no se encontraron discrepancias con el comportamiento global. Ambas muestras de errores relativos son diferentes y el coeficiente de correlación favorece al modelo propuesto.
- Al diferenciar para la latitud modip y estudiarse para distintas estaciones, se observa tanto en los gráficos (Fig. 4.5) como en el coeficiente de Pearson (Tabla 4.9) que el comportamiento entre las frecuencias críticas calculadas con los modelos y las obtenidas con sondadores para latitudes ecuatoriales no responde de la manera esperada. Esto podría deberse a la escasez de datos observables en la región, y a las incertezas en la obtención de las f_oF2_{Obs} , ya que debido al comportamiento de la región, se ven afectados por ejemplo por el *Spread F*. Para las demás latitudes se observa una buena correlación y mejor predicción por parte de los coeficientes calculados con el AG que con el IRI. Para este estudio, el test de Fisher rechazó una vez más la hipótesis de igualdad estadística entre las muestras de errores relativos entre las frecuencias de plasma calculadas por los modelos y las obtenidas de ionogramas, de donde concluimos que los coeficientes calculados con el AG tienen una mejor representación que los del IRI.

Por todo lo expuesto anteriormente, los valores de f_oF2 calculados con los coeficientes obtenidos producto del algoritmo genético tienen una dispersión menor a la que presentan los valores calculados con el IRI. Además se hallan mejor correlacionados con los datos observados, siendo que las rectas de correlación de ambos modelos son estadísticamente significativas.

Al observarse las distribuciones de desvíos para los errores relativos de cada escenario, se obtuvieron diferencias estadísticas significativas, a favor de los coeficientes productos del algoritmo genético.

Por lo tanto, los coeficientes calculados con el algoritmo genético constituyen una mejora con respecto a los tradicionales del IRI, demostrando por un lado la capacidad de PIKAIA y por otro, el éxito de esta nueva metodología para incorporar nuevos observables.

Trabajos a futuro

El éxito obtenido nos impulsa a continuar y explorar otras variables en juego:

- ★ Como siguiente paso, se propone realizar el grillado que trace el mapa de la f_oF2 en América del Sur, haciendo variar la longitud cada 5° y la latitud cada 2.5° , y realizar el análisis estadístico para evaluar tanto el modelo propuesto como el IRI en regiones donde no hay datos de sondadores.
- ★ Utilizar datos observables de la f_oF2 del sondador ionosférico de La Plata para analizar la respuesta de ambos modelos. Siendo que este sondador no ha sido utilizado para el ajuste de ninguno de los modelos, podrá ser considerado como una estación de control.
- ★ Calcular una nueva serie de coeficientes del modelado de f_oF2 para actividad solar media, y evaluar la capacidad de modelar la ionosfera con tres series de coeficientes en vez de dos (actividad solar alta y baja), para favorecer la predicción de la frecuencia crítica de plasma de la capa $F2$ para actividad solar media.
- ★ Analizar la respuesta de la metodología propuesta utilizando distintos índices de actividad solar.
- ★ Intentar mejorar el resultado variando los parámetros del algoritmo genético (número de generaciones, número de individuos, plan de reproducción, algoritmo de mutación, etc.)
- ★ Optimizar el tiempo de ejecución del modelo propuesto, a fin de poder ir incorporando sistemáticamente nuevos observables.
- ★ Realizar un estudio equivalente al propuesto pero con la incorporación de datos de sondadores de las redes mundiales, a fin de optimizar el mapa de f_oF2 en todo el globo terráqueo.

- [1] **Azpilicueta F., Brunini C. y Radicella S. M.** *Global ionospheric maps from GPS observations using modip latitude.* Advances in Space Research. Elsevier, 38(2006):2324-2331, 2005.
- [2] **Bates D. y Massey H.S.W.** *The basic reactions in the upper atmosphere. I,* Proc. Roy. Soc., A187, 261-296, London, 1946.
- [3] **Bilitza D.** *International Reference Ionosphere 1990.* National Space Science Data Center, NSSDC/WDC-A-R&S, 90-22, Greenbelt, EE.UU., 1990.
- [4] **Bilitza D.** *The International Reference Ionosphere-Status 2013.* Advances in Space Research. Elsevier, 55(8):1914-1927, 2015.
- [5] **Bilitza D., Altadill D., Zhang Y., Mertens C., Truhlik V., Richards P., McKinnell L. -A., y Reinisch B.** *The International Reference Ionosphere 2012 - A model of international collaboration.* J. Space Weather and Space Clim., 4, A07, 1-12, doi:10.1051/swsc/2014004, 2014.
- [6] **Bilitza D., Brown S. A., Wang M. Y., Souza J. R. y Roddy P. A.** *Measurements and IRI model predictions during the recent solar minimum.* Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 86(2012):99-106, 2012.
- [7] **Bilitza D., Eygrig R. y Sheikh N. M.** *A global model for the height of the F2-peak using M3000 values from the CCIR numerical map.* ITU Telecommunication Journal, 46(1979):549-553, 1979.
- [8] **Bilitza D. y Rawer K.** *International Reference Ionosphere.* En: *The Upper Atmosphere - Data Analysis and Interpretation.* W. Dieminger, G. Hartmann y R. Leitinger (eds.), Springer-Verlag, Berlín - Heidelberg, 735-772, 1996.
- [9] **CCIR Comité Consultatif International des Radiocommunications.** Report 340-1, ISBN 92-61-04417-4, Ginebra, Suiza, 1966.
- [10] **Chapman S.** *The absorption and dissociative or ionizing effect of monochromatic radiation in the atmosphere on rotating Earth.* Proc. Phys. Soc. London, 43, 26, 1931.
- [11] **Charbonneau P. y Knapp B.** *A user's guide to PIKAIA 1.0.* NCAR Technical Note 418+IA, National Center for Atmospheric Research, 1996.
- [12] **Fox M. W. y McNamara L. F.** *Improved worldwide maps of monthly median f_oF_2 .* Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 50(12):1077-1086, 1988.
- [13] **IRE - Institute of Radio Engineers.** *Standards on wave propagation: definitions of terms.* Proc. IRE, 38:1264-1268, 1950.
- [14] **Hargreaves J. K.** *The solar-terrestrial environment.* Cambridge University Press, 1992.
- [15] **Jackson J. D.** *Classical Electrodynamics.* Third Edition, John Wiley & Sons, Inc, 1999.

- [16] **Jones W. B. y Gallet R. M.** *Representation of diurnal and geographical variations of ionospheric data by numerical methods.* Telecommunication Journal, 29:129-149, 1962.
- [17] **Jones W. B., Graham R. P. y Leftin M.** *Advances in Ionospheric Mapping by Numerical Methods.* ESSA Technical Report ERL, US Government Printing Office, Washington DC, USA, 107-ITS 75, 1969.
- [18] **Liu R. M., Smith P. A. y King J. W.** *A new solar index which leads to improved foF2 predictions using the CCIR atlas.* Telecommunication Journal, 50(8):408-414, 1983.
- [19] **Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T. y Flannery B. P.** *Numerical Recipes in Fortran 77: The Art of Scientific Computing.* Second Edition, Cambridge University Press, 1992.
- [20] **Rush C., Fox M., Bilitza D., Davies K., McNamara L., Stewart F. y PoKempner M.** *Ionospheric mapping- an update of foF2 coefficients.* Telecomm J 56:179-182, 1989.
- [21] **Schunk R. W. y Nagy A. F.** *Ionospheres - Physics, Plasma Physics, and Chemistry* Cambridge University Press, 2000.
- [22] **Teunissen P. J. G. y Kleusberg A.** *GPS for Geodesy.* Second Edition, Springer, 1998.
- [23] **Zolesi B.** *Ionospheric service and HF radio propagation prediction.* El Qhahira, 2004.
- [24] <http://www.sidc.be/silso/monthlyssnplot>.
- [25] https://www.ukssdc.ac.uk/ionosondes/ionogram_interpretation.html.

- **AG:** Algoritmo Genético.
- **CCIR:** Comité Consultatif International des Radiocommunications.
- **CONICET:** Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.
- **COSPAR:** Committee on Space Research.
- **DIIV:** Dirección de Investigación de la Armada.
- **EISCAT:** European Incoherent Scatter Scientific Association.
- **EUV:** Extreme Ultraviolet.
- **GNSS:** Global Navigation Satellite System.
- **HL:** Hora Local.
- **IAA:** Instituto Antártico Argentino.
- **ICATE:** Instituto de Ciencias Astronómicas, de la Tierra y del Espacio.
- **IRI:** International Reference Ionosphere.
- **ISO:** International Standards Organization.
- **ITU:** International Telecommunication Union.
- **Meq:** Modip Equatorial.
- **Mhi:** Modip High.
- **Mlo:** Modip Low.
- **Mmi:** Modip Middle.
- **Mpo:** Modip Polar.
- **Msa:** Modip Sub-Auroreal.
- **RAPEAS:** Red Argentina Para el Estudio de la Atmósfera Superior.
- **URSI:** Union Radio-Scientifique Internationale.

