



INAOE

AzTEC: Mapas TEC Cercanos a Tiempo Real en México

Por:

Juan Jose D'Aquino Bautista

Tesis sometida como requisito parcial
para obtener el título de:

**MAESTRO EN CIENCIAS
EN EL ÁREA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
DEL ESPACIO**

En el:

**Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y
Electrónica**

Junio 2020

Tonantzintla, Puebla

Supervisada por:

Dr. Miguel Chávez Dagostino

Investigador Titular, INAOE

Dr. Víctor Hugo De la Luz Rodríguez

Prof. de Tiempo Completo, ENES Morelia UNAM



Vo.Bo.



©INAOE 2020

El autor otorga al INAOE el permiso de reproducir y
distribuir copias en su totalidad o partes de esta tesis



“Sin pasión no se hace nada serio en la historia. Entran en esto las grandes figuras, que muestran su pasión a través de la astucia de la razón. La astucia de la razón hace que la pasión sea la llama de la realización del interés universal”.

G. W. F. Hegel

Dedicado a mis padres:

María Salomé Bautista Célis

Víctor Manuel D'Aquino Estrada

Agradecimientos

Al Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) por el soporte y las gestiones durante mis estudios del posgrado. A todos los investigadores y personal administrativo por su apoyo en cada etapa de mi preparación académica, en especial, al Dr. Miguel Chávez Dagostino, quien fungió como mi asesor académico y director de mi proyecto de tesis en esta institución. A mis sinodales: Dr. José S. Guichard Romero y al Dr. Eduardo Mendoza Torres. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el soporte y manutención durante estos dos años de beca, así mismo, al proyecto Conacyt de Ciencia Básica 254497 y al proyecto Conacyt de Repositorios Institucionales 268273, por el apoyo en el desarrollo de mi trabajo.

Al Dr. Victor Hugo De la Luz Rodríguez, por su labor como director de mi proyecto de tesis y en mi formación en el ámbito científico durante mi estancia en la ciudad de Morelia, Michoacán; por todas sus enseñanzas, motivaciones y consejos, y por la confianza en este proyecto. A los investigadores: Dr. Juan Américo González Esparza, Dr. Mario Rodríguez Martínez y Dra. Esmeralda Romero Hernández, por las gestiones en el uso del software que permitió el desarrollo de mi trabajo. A la Dra. Maria Alexandra Sergeeva, por sus comentarios y recomendaciones en el proyecto. Especial agradecimiento a la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés), por permitir la utilización del software US-TEC con su modulo en Tiempo Real.

Al Laboratorio Nacional de Clima Espacial (LANCE), perteneciente al Instituto de Geofísica Unidad Michoacán de la Universidad Nacional Autónoma de México

(IGUM-UNAM), por las atenciones prestadas y el uso de sus instalaciones, en especial, a todo su grupo de colaboradores y personal administrativo. También, al proyecto “Fortalecimiento del Servicio de Clima Espacial: Colaboración Internacional y Sistema de Alerta Temprana”, con clave AEM-2017-01-292684 por el apoyo de la beca.

Los valores del TEC (que compartió el LANCE para esta tesis) fueron obtenidos en LANCE a partir de observaciones de las redes GPS del Servicio Sismológico Nacional (SSN), SSN-TLALOCNet y TLALOCNet del Servicio de Geodesia Satelital (SGS). Agradezco al personal del SSN y del SGS por el mantenimiento de estaciones, la adquisición de datos y el soporte de IT de estas redes. Las operaciones de las redes GPS TLALOCNet y SSN-TLALOCNet y GAGE en Mexico, han sido apoyadas por la National Science Foundation (NSF) y la National Aeronautics and Space Administration (NASA) bajo los proyectos EAR-1338091 y EAR-1724794 ejecutados por UNAVCO Inc., los proyectos CONACyT 253760, 256012 y 005955 y los proyectos UNAM-PAPIIT IN109315-3 y IN104818-3 de E. Cabral-Cano y el proyecto UNAM-PAPIIT IN111509 de R. Pérez.

Finalmente, a mi familia y amigos. Antes que nada, los quiero mucho. Gracias infinitas por su paciencia y apoyo, en especial a la Sra. Esperanza Estrada Coutiño, esto es por ti abue, ¡lo logramos!.

Resumen

El Contenido Total de Electrones (TEC, por siglas en inglés), es uno de los parámetros más importantes para el análisis de la *Ionósfera*, una de las regiones de la atmósfera terrestre por donde transitan las ondas electromagnéticas utilizadas por los sistemas de telecomunicaciones en la superficie de la Tierra como en el espacio. Las telecomunicaciones son sensibles a los cambios en la densidad electrónica en la *Ionósfera*. Actualmente, existen herramientas que utilizan un modelo basado en el desarrollo de mapas para el análisis y monitoreo de la *Ionósfera*, la cual es modificada por el clima terrestre y por las condiciones del Clima Espacial.

El Clima Espacial en México es un tema de reciente presencia, el desarrollo de protocolos y herramientas para su estudio y monitoreo, es un avance que se ha acelerado en fechas recientes, dado a que se han realizado estudios que demuestran los efectos del Clima Espacial en nuestro país, especialmente en radiocomunicaciones. Actualmente en México existen 3 instituciones involucradas en el desarrollo de proyectos que estudian y monitorean el Clima Espacial sobre su territorio, estas son: Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL).

AzTEC es el primer producto que crea mapas con las condiciones ionosféricas cercano a Tiempo Real sobre el territorio mexicano, ya que el país cuenta con una posición latitudinal privilegiada debido a su proximidad a la zona Subtropical de Cáncer, por ello, en el presente proyecto de tesis, se describe el desarrollo de una

metodología que caracteriza y valida los Mapas TEC generados durante dos años con datos observacionales en Tiempo Real provenientes de la red de estaciones GPS del SSN y de TLALOCNet; analizando el comportamiento del TEC en los más de 40,600 mapas y obteniendo sus valores estadísticos para determinar el impacto de los valores del TEC, debido a cambios en la resolución espacial de la malla de vértices del código MAGIC, un poderoso modelo computacional que usa el algoritmo del Filtro de Kalman y un modelo empírico de la *Ionósfera* para crear, en lapsos de 15 minutos, un Mapa TEC con las condiciones actuales de la *Ionósfera* sobre México.

Abstract

The Total Electron Content (TEC) is one of the most important parameters for the analysis of the *Ionosphere*, one of the regions of the Earth's atmosphere through which the electromagnetic waves used by telecommunications systems in the Earth's surface as in space. Telecommunications are sensitive to changes in electronic density in the *Ionosphere*. Currently, there are tools that use a model based on the development of maps for the analysis and monitoring of the *Ionosphere*, which is modified by the Earth's climate and by the conditions of Space Weather.

The Space Weather in Mexico is a topic of recent presence, the development of protocols and tools for its study and monitoring, is an advance that has accelerated in recent times, given that studies have been carried out that demonstrate the effects of Space Weather on our country, especially in radiocommunications. Currently in Mexico, there are 3 institutions involved in the development of projects that study and monitor the Space Weather on our territory, these are: the National Institute of Astrophysics, Optics and Electronics (INAOE, in spanish), the National Autonomous University of Mexico (UNAM, in spanish) and the Autonomous University of Nuevo León (UANL, in spanish).

AzTEC is the first product that creates maps with the ionospheric conditions near to Real Time on the Mexican territory, as Mexico has a privileged latitudinal position, due to its proximity to the Cancer Subtropical zone, for that reason, in the current thesis project, the development of a methodology that characterizes and validates the TEC Maps obtained during two years of observational data in

Real Time is described, coming from the network of GPS stations of the National Seismological Service (SSN, in spanish) and TLALOCNet. Analyzing the behavior of the TEC in the more than 40,600 maps and obtaining their statistical values to determine the impact of the TEC values, due to changes in the spatial resolution of the vertex mesh of the MAGIC model, a powerful computational model that uses the Filter of Kalman and the empirical model of the *Ionosphere* to create every 15 minutes, a TEC Map with the current conditions of the *Ionosphere* over Mexico.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. La Ionósfera	2
1.1.1. Composición Química	2
1.1.2. Estructura de la Ionósfera	3
1.1.3. La Magnetósfera	10
1.2. El Clima Espacial	10
1.2.1. Interacción Sol-Tierra	11
1.3. La Ciencia y Tecnología del Espacio en México	12
1.4. El Clima Espacial en México	13
1.5. Mapas Globales	14
1.6. Mapas Regionales	14
1.6.1. TECMAP	14
1.6.2. AzTEC	16
1.6.3. US-TEC	16
1.6.4. SCHA TEC	16
1.7. Estado del Arte en Mapas TEC	17
1.7.1. GIM vTEC	17
1.7.2. TayAbsTEC vTEC	17
1.8. Objetivo	18
2. Formación y Cálculo de la Densidad de Electrones	19

2.1. Equilibrio de Fotoionización y Recombinación	20
2.1.1. Fotoionización	20
2.1.2. Recombinación	21
2.2. Aproximaciones para el Cálculo de TEC	22
2.3. Afectaciones en Radiocomunicaciones	24
2.3.1. Telecomunicaciones Terrestres	24
2.3.2. Telecomunicaciones Tierra-Espacio	26
2.3.3. Instrumentos para Determinar el Efecto del Clima Espacial	26
2.4. Agentes que Perturban la Ionósfera	28
2.4.1. Huracanes	28
2.4.2. Iluminación Solar	29
2.4.3. Fulguraciones Solares	29
2.4.4. Variaciones Geomagnéticas	30
2.4.5. Rayos Cósmicos Galácticos	31
3. US-TEC en Tiempo Real (RT)	32
3.1. Introducción	32
3.2. Fuentes de Datos	33
3.2.1. Streaming	33
3.2.2. RINEX	35
3.3. Actualización Anual del Modelo IRI95	39
3.3.1. Modelo IRI95	41
3.4. Filtro de Kalman	41
3.4.1. Implementación del Filtro de Kalman	42
3.4.2. Asimilación de Observaciones GPS	45
3.5. MAGIC	45
3.5.1. MAGIC/US-TEC RT	46
3.5.2. Interpolación	47
3.6. Otras Aproximaciones Usadas para el Cálculo de TEC en Tiempo Real	50

3.6.1. ROB-TEC	50
3.6.2. My-Iono Service	52
4. Instrumentación	56
4.1. Red de Estaciones del SSN	56
4.2. Red de Estaciones de la TLALOCNet	58
5. AzTEC	59
5.1. Modificaciones adhoc en US-TEC RT	60
5.2. Configuraciones para México	62
5.3. Pre-procesamiento de datos	64
5.4. Comparación con US-TEC	66
5.5. Base de Datos de AzTEC	68
6. Análisis de Valores del TEC	69
6.1. Análisis de Valores del TEC con Malla de Vértices	70
6.1.1. Máximos, Promedios y Mínimos de los Valores TEC	70
6.2. Susceptibilidad de AzTEC	71
6.3. Valores Mínimos en Cero	72
6.3.1. Calidad de Datos	73
7. Resultados	76
7.1. Variación Estacional del TEC en México	77
7.1.1. Variación del TEC Durante el 2018 y 2019	77
7.1.2. Variación del TEC por el Cambio en la Resolución de la Malla	79
7.1.3. Variación del TEC en los Periodos de Otoño 2018 y 2019	80
7.1.4. Variación del TEC del Periodo Invierno 2018-2019	82
7.1.5. Evaluación de Sigmas	83
7.2. Análisis por Estado	84
7.3. Impacto de la Resolución Espacial	90

8. Conclusiones y Trabajo a Futuro	92
8.1. Conclusiones	92
8.2. Trabajo a Futuro	93
A. Tablas y Códigos	95
A.1. Tablas	95
A.1.1. Red de Estaciones GPS del Servicio Sismológico Nacional (SSN)	95
A.1.2. Red de Estaciones GPS de TLALOCNet	95
A.1.3. Bitácora de Reinicios de AzTEC	95
B. Coordenadas y Máscaras de Vértices	100
B.1. Coordenadas Geográficas para la Proyección de Vértices sobre el Te- rritorio de México [Lat, Lon]: 1ra Configuración	100
B.2. Coordenadas Geográficas para la Proyección de Vértices sobre el Te- rritorio de México [Lat, Lon]: 2da Configuración	101
B.3. Coordenadas Geográficas para la Proyección de las Estaciones GPS en México [Lat, Lon]	102
B.4. Máscaras de Vértices de cada Estado del Territorio de México para el Análisis de los Valores TECU en los Archivos ‘txt’ [x, y]:	102
C. Comportamiento del TEC por Estado	106
C.0.1. Región Noroeste	106
C.0.2. Región Noreste	109
C.0.3. Región Occidente	110
C.0.4. Región Oriente	112
C.0.5. Región Centronorte	113
C.0.6. Región Centrosur	115
C.0.7. Región Suroeste	116
C.0.8. Región Sureste	118

Capítulo 1

Introducción

Las recientes investigaciones sobre el Clima Espacial en México, han permitido el desarrollo de nuevas técnicas enfocadas en el estudio y monitoreo de su atmósfera ante posibles afectaciones a los sistemas tecnológicos con base terrestre y espaciales, provenientes de la interacción Sol-Tierra [Romero-Hernandez et al. (2017)]. Por ello, en el presente capítulo, se describe la estructura que define y motiva al estudio de una región en la atmósfera terrestre, que se ve afectada ante los fenómenos del tipo solar: la *Ionósfera*; en el capítulo 2, se hablará de la formación y cálculo de la densidad de electrones: el TEC; en el capítulo 3, se pone en contexto a la herramienta usada para la estimación en el cálculo del TEC, alimentada por un sistema de adquisición de datos GPS: el software US-TEC, desarrollado por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés); en el capítulo 4, se describe la instrumentación usada para la adquisición de los datos de observación en México; en el capítulo 5, se presenta AzTEC, el primer producto desarrollado para el cálculo del TEC y creación de Mapas TEC con datos observacionales en Tiempo Real en México; en el capítulo 6, se describe el desarrollo de la primer metodología para la validación de los Mapas TEC creados por AzTEC; en el capítulo 7, se presentan los resultados; finalmente en el capítulo 8, las conclusiones y el trabajo a futuro.

1.1. La Ionósfera

Desde finales de los años 40s, una mayor comprensión en la formación de la *Ionósfera* se ha desarrollado simultáneamente con nuestro conocimiento en la composición y dinámica de la radiación solar [Schunk & Nagy (2009)]. A medida que los datos de los cohetes, ionosondas y satélites estuvieron disponibles, las teorías tempranas sobre las propiedades de la *Ionósfera* basadas en el análisis de electrones, han esclarecido nuestro panorama, definiéndolo como un plasma, cuyo comportamiento se encuentra estrechamente relacionado con el de la atmósfera neutra (atmósfera muy limitada de oxígeno libre), las radiaciones solares ionizantes y las influencias electrodinámicas de la Magnetósfera [Hudson (2011)].

1.1.1. Composición Química

Aproximadamente a 85 km de altitud, entre las regiones de la *Mesósfera* y la *Termósfera*, una mezcla turbulenta de gases mantiene la composición homogénea de la atmósfera. Los porcentajes de las densidades numéricas del N (Nitrógeno), el O₂ (Oxígeno molecular) y del Ar (Argón) (elementos principales en esta región) a nivel del mar son: N₂ = 78.08 %, O₂ = 20.95 %, Ar = 0.93 %, sumando 99.96 % de los elementos en esta región (el resto es Dióxido de Carbono), cuyo peso molecular es de 28.96 g/mol [Davies (2008)].

Encima de la *Mesopausa*, el O₂ se disocia por la radiación solar en el Ultravioleta (UV, por sus siglas en inglés) con una longitud de onda más corta que 1,759 Å (175.9 nm). El proceso es tan rápido que no puede mantener al O (Oxígeno) mezclado en O₂, por lo tanto la densidad numérica de O incrementa rápidamente con una altura pico cercano a los 100 km. La fracción de O incrementa hasta por encima de los 150 km, volviéndose principalmente en una atmósfera de O [Danilov (1970)].

1.1.2. Estructura de la Ionósfera

El perfil mostrado en la Figura 1.1 representa las condiciones típicas de las regiones de la atmósfera en una latitud media, de acuerdo con el estándar de nomenclatura definida por la Unión Internacional Geodésica y Geofísica (IUGG, por sus siglas en inglés), el perfil vertical se divide en cuatro regiones, estas son: *Tropósfera*, *Estratósfera*, *Mesósfera* y *Termósfera*. En la cima de cada una de estas capas se encuentran la *Tropopausa*, *Estratopausa*, *Mesopausa* y *Termopausa*, respectivamente.

La *Troposfera* se caracteriza por una disminución en la temperatura con respecto a la altura media de la superficie terrestre, cerca de 288 K hasta los 220 K, con un rango típico de incrementos de 6.5 K km^{-1} . La *Estratósfera* es caracterizada por una capa isotérmica desde la *Tropopausa* hasta cerca de los 20 km, encima del cual la temperatura incrementa hasta la *Estratopausa* con una temperatura cerca de 270 K. Al igual que en la *Tropósfera*, la temperatura en la *Mesósfera* disminuye con la altura desde los 50 hasta los 85 km. Sobre esta altura y extendida hacia una altitud aproximada entre los 450 y 500 km, yace la *Termósfera*, la cual posee las más altas variaciones de temperatura de todas las capas atmosféricas, donde el rango de temperatura va desde los 500 tan alto como los 2,000 K, dependiendo del nivel de actividad solar. Y finalmente sobre la *Termósfera*, la región más externa de la atmósfera terrestre, tenemos a la *Exósfera* [Liou (2002)].

La *Ionósfera*, es otra clasificación de la atmósfera, basado en la densidad electrónica, donde ocurren los cambios más drásticos en la composición atmosférica, la cual se ioniza parcialmente y adquiere las propiedades de un magneto-plasma. La radiación en el Ultravioleta Extremo (EUV, por sus siglas en inglés) es absorbida en esta región y es aquí donde ocurren la mayoría de los sistemas de corrientes eléctricas, responsables de las llamadas variaciones del campo magnético [Dieminger et al. (1996)]. El término *Ionósfera* se define como la región que se extiende entre los 50 km hasta la *Magnetósfera* (aproximadamente 10,000 km) sobre la superficie de la Tierra, en la que existe la suficiente ionización para influir en la propagación de

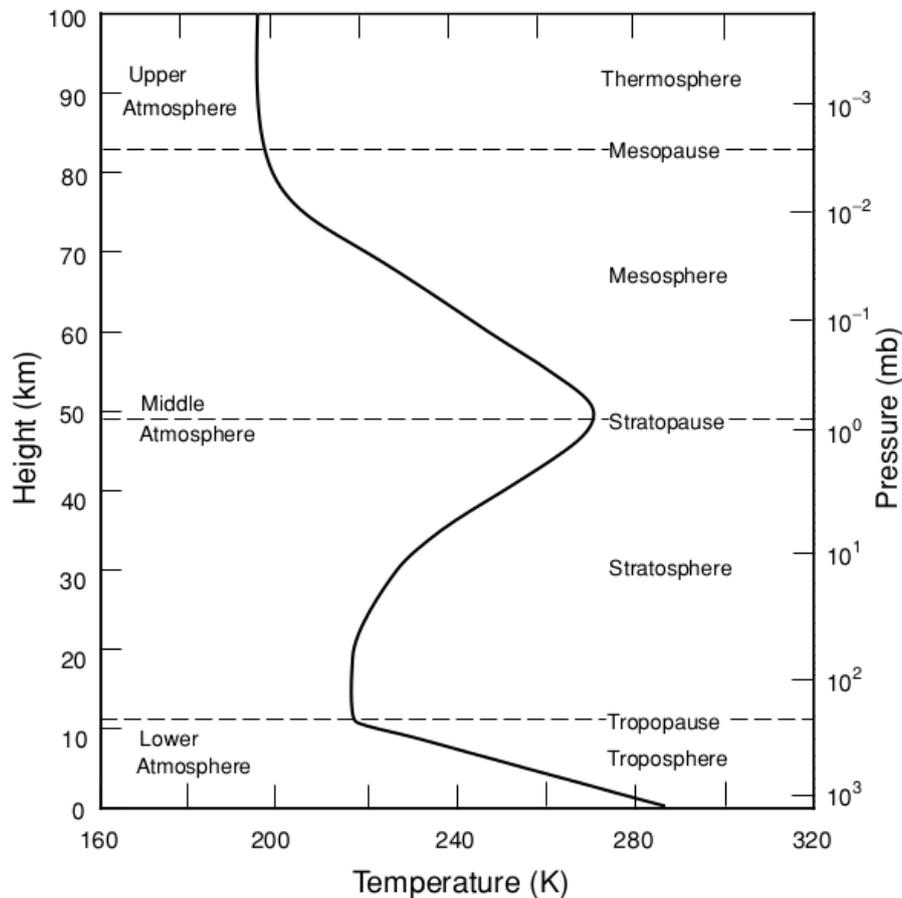


Figura 1.1: Perfil estándar de la *Ionósfera*. En el eje X, tenemos la temperatura en Kelvin, en el eje Y izquierdo, tenemos la altura de la atmósfera y en el eje Y derecho, la presión en estas regiones. [Extraída de: Liou (2002)]

las ondas de radio. Para términos de este trabajo, llamaremos ‘*Ionósfera Superior*’ al rango que va por debajo de los 1,000 km incluyendo parte de la región F y los términos ‘altitud baja’, ‘altitud media’ y ‘altitud superior’, para regiones entre los 1,000 a los 4,000 km, entre los 4,000 a los 10,000 km y por encima de los 10,000 km, respectivamente [Liu & Fujimoto (2011)]. Debido a la existencia de iones y electrones libres, la *Ionósfera* es conductor eléctrico y medio de refracción para ondas de radio.

La *Ionósfera* es producida principalmente por el espectro de radiación electromagnética proveniente del Sol que disocia e ioniza la mezcla de gases en la atmósfera superior. Su rango de altura, coincide con la *Mesosfera* y la *Termosfera*, ya que se encuentra estratificada verticalmente y subdividida en regiones clasificadas como *D*,

E y F , donde la región D es conocida como la más baja de la *Ionósfera* y la región F como la más alta. Adicionalmente, la región F es descrita en términos de las capas F_1 y F_2 (los términos ‘región’ y ‘capa’ son a menudo usados como sinónimos, sin embargo para este trabajo, la palabra ‘región’ será usada para describir una sección de la atmósfera y la palabra ‘capa’ describirá una distribución de electrones dentro de la región), observado en la Figura 1.2. Todas las *Ionósferas* planetarias conocidas muestran una estructura similar, las cuales generalmente se caracterizan de acuerdo a su perfil vertical de densidad de electrones [Yiğit (2018)], tal como lo describe la Tabla 1.1.

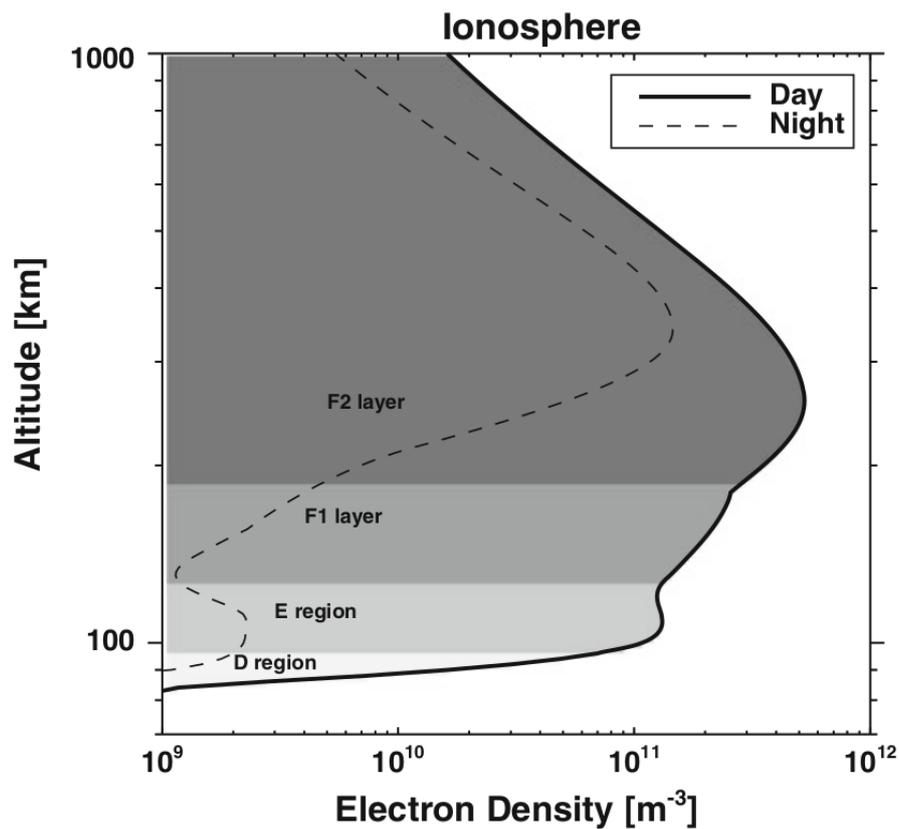


Figura 1.2: Modelo ionosférico 2012. En el eje x tenemos la densidad de electrones en metros cúbicos y en el eje y, la altitud de las distintas regiones de la *Ionósfera*. [Extraída de: Yiğit (2018)]

Región	Altura Aproximada (km)	Capas	Densidad Electrónica (m^{-3})
<i>D</i>	50-90	<i>C, D</i>	$10^8, 10^9$
<i>E</i>	90-140	<i>E1, E2, E_s</i>	$10^{11}, 10^{11}, variable$
<i>F</i>	140-350	<i>F₁, F₂</i>	$2 \times 10^{11}, 10^{12}$
Lado Superior	350-1000		$10^{10} - 10^{11}$
Protonósfera	>1000		10^9

Tabla 1.1: Regiones y Densidad Electrónica Aproximada Durante el Día de la *Ionósfera*. [Fuente: Dieminger et al. (1996)]

Región *D*

La región *D* es usualmente definida como la parte de la atmósfera de la Tierra que va desde los ≈ 50 hasta los ≈ 90 km. Típicamente desaparece por la noche, coexiste con una *Mesósfera* relativamente más densa y una *Termósfera* más baja. Su densidad de electrones libres es mucho menor que la densidad molecular, además la frecuencia de colisión entre electrones y moléculas es relativamente alta.

La frecuencia de colisión entre electrones y partículas neutras v_m , se calcula como:

$$v_m = 8 \times 10^5 p s^{-1} \quad (1.1)$$

Donde p es la presión del gas atmosférico (en newtons m^2) y s es la velocidad de deriva (o de desplazamiento) del electrón. La composición neutra en la región *D* es esencialmente la misma como en la superficie, no obstante, los componentes menores como NO (Óxido de Nitrógeno), O_3 , O_2 juegan un papel importante.

Dentro de la región *D* existen dos capas, la capa *C* y la capa *D* (ver Tabla 1.1). El primero es producido por los Rayos Cósmicos Galácticos (GCR, por sus siglas en ingles), y el último, por el UV solar y los rayos X.

Entre los 50 y 85 km de esta región, la temperatura del gas neutral decae desde los 260 K hasta al rededor de los 180 K. En la *Termósfera*, encima de los 85 km, la temperatura aumenta constantemente.

Región *E*

Situado entre los 90 y 140 km de altitud, la región *E* incrementa rápidamente su temperatura con la altura y pasa de ser la región en la cual los gases son esencialmente mezclados (la Homósfera) a ser la región cuyos constituyentes están separados por dispersión (la Heterósfera).

La región *E*, está formada por la radiación que cruza secciones menores a $5 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$. En el rango de 31 a 100 Å y $\lambda > 800 \text{ Å}$, son de especial importancia. En la línea de Lyman β a 1,025 Å y la línea del C_{III} a 977 Å son de principal importancia ya que ambos ionizan O_2 . El Lyman continuo a 910 Å también contribuye a través de la ionización del O [Banks & Kockarts (1973)].

Región *F*

La región *F* es una sola capa en la noche, pero durante el día, se divide en dos capas: F_1 y F_2 .

Se considera a la **Capa** F_1 como la parte de la atmósfera entre los 140 y 220 km de altura, sin embargo, estos límites son arbitrarios y no implica que sean límites físicos. El N_2 (Nitrógeno molecular) es su componente más importante, ya que es ionizado por la radiación solar en el EUV, en el rango de longitud de onda de 275 a 796 Å. Su temperatura incrementa rápidamente con la altura, alrededor de 500 K en 140 km hasta por encima de 1,000 K en 220 km. Es importante mencionar que el pico de producción de electrones ocurre alrededor de los 180 km, por lo que es considerado como la región más importante de la *Ionósfera* [Buonsanto (1999)].

Extendida entre los 220 km hasta aproximadamente 2,000 km, la **Capa** F_2 nuevamente posee límites arbitrarios y aunque la producción máxima de electrones ocurre en la capa F_1 , las densidades máximas de estos ocurren en la capa F_2 , entre alturas de aproximadamente 220 a 500 km. Esto ocurre debido a que la tasa de pérdida de electrones disminuye rápidamente con la altura, motivo por lo que la densidad molecular también disminuye por un flujo de plasma entre la *Protonósfera* y la *Ionósfera*

[Dieminger et al. (1996)].

El gas neutro dominante en esta región es el O, aunque el N₂ y el O₂ juegan un papel importante en el proceso de intercambio de átomos que conduce a la pérdida de electrones por recombinación disociativa [por ejemplo, un O₂⁺ (ion de Oxígeno molecular) se recombina a un electrón (e^-), dando lugar al O₂] [Fuller-Rowell & Schrijver (2009)]. Debido a la disociación de O₂ para formar O, la altura de la atmósfera incrementa con una masa molecular más baja en la capa F₂.

Parte Superior

Por encima de la densidad máxima de electrones (entre los 300 y 2,000 km) se sitúa la parte superior de la *Ionósfera*. Inaccesible para los sondeos de radio de alta frecuencia desde la superficie de la Tierra, sin embargo, la información que tenemos proviene de varias técnicas que consisten en ionosondas, radares de dispersión incoherentes¹ y detectores satelitales in situ (espectroradiómetros). En esta región predomina el O⁺ (ion de Oxígeno), y por encima del pico, a 100 km aproximadamente, la densidad de electrones decae exponencialmente con la altura, con una escala de altura² apropiada para un plasma de O⁺ sin electrones. Sobre la altura de transición (h_T), el H⁺ (ion de Hidrógeno) se convierte en el ion dominante y la escala de altura aumenta notablemente. A 1,000 km la densidad de electrones es del orden de 10¹⁰ a 10¹¹ electrones por m⁻³.

Anomalía Ecuatorial Ionosférica

Los campos eléctricos del dínamo que se genera en la región *E* a latitudes ecuatoriales por los vientos termosféricos, se transmiten a lo largo de las líneas del campo magnético dipolo, a las altitudes de la región *F* debido a la alta conductividad paralela. Durante el día, estos campos eléctricos están hacia el este, lo que provoca una deriva de plasma $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$, donde \mathbf{E} es el campo eléctrico de la región *E* ecuatorial y \mathbf{B}

¹Medición directa de la densidad de electrones en la *Ionósfera*.

²Escala a la que hay que elevarse para que la presión atmosférica disminuya.

es el campo magnético de la Tierra, hacia arriba, mientras que ocurre lo contrario por la noche. El plasma que se levanta durante el día, se difunde por las líneas del campo magnético y se aleja del ecuador debido a la acción de la gravedad [Schunk & Nagy (2009)]. Esta combinación de deriva electromagnética y difusión, produce un patrón de movimiento de plasma en forma de fuente (véase Figura 1.3), produciendo picos de ionización en latitudes subtropicales por ambos lados del ecuador magnético. Cuatro horas más tarde, la deriva $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ es descendente, la altura de la región F en el ecuador magnético cae a 400 km y los picos de ionización se acercan al ecuador. A esta característica se le denomina Anomalía Ecuatorial Ionosférica (EIA, por sus siglas en inglés), también Anomalía de Appleton.

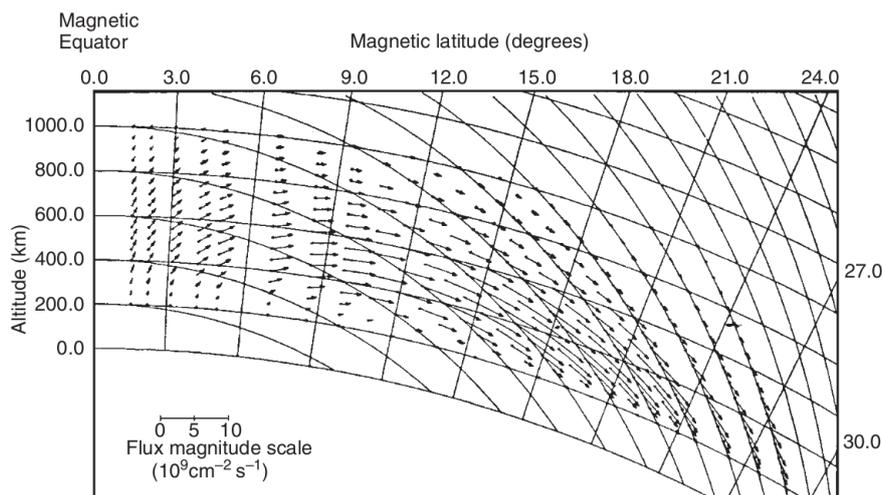


Figura 1.3: Patrón del plasma en latitudes bajas debido a una acción combinada de una deriva $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ hacia arriba cerca del ecuador magnético y una difusión hacia abajo a lo largo del campo magnético (\mathbf{B}). [Extraída de: Schunk & Nagy (2009)].

Protonósfera

La *Protonósfera* (a veces conocido como Plasmasfera), es el límite inferior de la *Magnetósfera* que gira conjuntamente con la Tierra y se extiende a altitudes de ≈ 4 Radios Terrestres (RT^3). Su plasma frío de alta densidad consta de hasta 99% de protones y electrones, con pequeñas fracciones de He^+ (ion de Helio) y

³RT: el radio promedio de la Tierra es de 6,371 km.

O^+ disminuyendo gradualmente con la altura en que la densidad plasmática cae en uno o dos órdenes de magnitud en su límite exterior, conocida como Plasmapausa [Wilkinson (2012)].

En esta región, no hay producción de plasma, por lo tanto, es importante tener en cuenta que la ionización tiene que difundirse desde la *Ionósfera*. Así, la *Protonósfera* actúa como una reserva de plasma de la *Ionósfera* durante el día y la devuelve por la noche, lo que ayuda a mantener la capa nocturna de la región *F*.

1.1.3. La Magnetósfera

La *Magnetósfera* es una región que rodea a la Tierra con un sistema de corriente eléctrica complejo altamente dinámico. Contiene plasma del viento solar, el campo geomagnético y un flujo de partículas de alta energía que transporta energía del viento solar a la *Ionósfera*. Desde la Tierra hacia el Sol, su tamaño depende de la densidad del flujo de plasma del viento solar y de la intensidad del campo magnético, en un rango entre $\approx 6.6-8$ hasta $\approx 10-12$ RT, teniendo como capa externa a la Magnetopausa, cuyo espesor es de $\approx 100-200$ km, el cual forma el límite entre el flujo del plasma del viento solar y la Magnetosfera.

1.2. El Clima Espacial

El Clima Espacial se puede definir como perturbaciones al ambiente natural en los campos magnéticos y la atmósfera superior de la Tierra, provenientes del Sol y del espacio, que pueden influir en el rendimiento de los sistemas de telecomunicaciones tanto en la superficie de la Tierra como en el espacio y poner en peligro la vida y salud de los humanos [Baker & Lanzerotti (2016)]. La actividad solar y la variabilidad en su producción de energía son vinculados a este comportamiento; como la modulación del ciclo solar cada 11 años, los 27 días de su rotación, hasta escalas menores a 1 segundo durante una fulguración. Estudiar cómo actúa la variabilidad en la actividad solar

con el tiempo, nos permite desarrollar métodos para realizar maniobras oportunas durante un evento de Clima Espacial, e incluso, pronosticarlo.

1.2.1. Interacción Sol-Tierra

En términos generales, hay 3 formas a través de las cuales la actividad solar influye en la Tierra y su entorno, estas son: ondas electromagnéticas (radiación), flujos de partículas de alta energía (rayos cósmicos) y flujos o nubes de plasma de partículas cargadas [electrones, protones y partículas alfa; traídas por el viento solar y las Eyecciones de Masa Coronal (CME, por sus siglas en inglés)], sin embargo, la mayor parte de la energía que recibimos proviene en forma de radiación solar en el espectro visible, en cuyo intervalo de $380 < \lambda < 750$ nm (véase Figura 1.4), se observa muy poca variación debido a la actividad solar (aunque existen reportes indicando que grandes fulguraciones solares pueden conducir a aumentos significativos a corto plazo, incluso en este rango del espectro) [Lilensten (2007)].

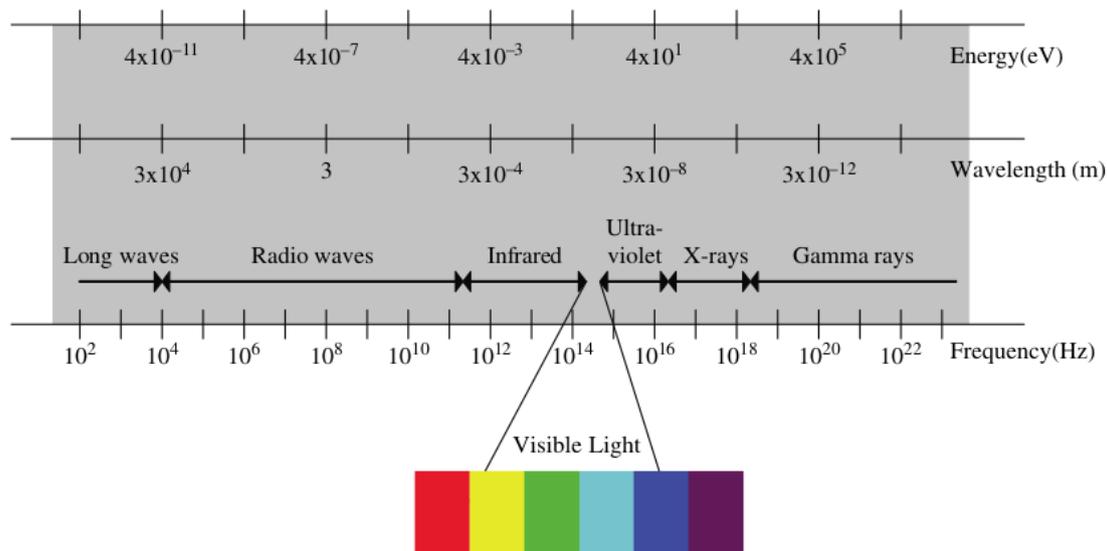


Figura 1.4: El espectro electromagnético. Las escalas logarítmicas para Frecuencia, Longitud de Onda y Energía se muestran juntas con el nombre de varias regiones generales. [Extraída de: Newman (2008)].

Además de las fulguraciones solares, las Partículas Energéticas Solares (SEP, por sus siglas en inglés), las CMEs y las Regiones de Interacción de Rotación (CIR, por

sus siglas en inglés) asociadas a las corrientes de viento solar desde los agujeros coronales, son los eventos (geo-efectivos) más importantes en la interacción Sol-Tierra. Los diferentes rangos espectrales de la radiación emitida, muestran un esquema típico: inicialmente se presenta un abrillantamiento llamado ‘pre-fulguración’ durante unos minutos, seguido de la fase ‘impulsiva’, el cual también dura unos minutos, consiste en estallidos de rayos gamma, rayos X fuertes, radiación en el EUV y radiación de microondas. Después de la fase impulsiva, la radiación térmica domina; esta es la fase del decaimiento gradual de la fulguración que puede tomar varias horas.

1.3. La Ciencia y Tecnología del Espacio en México

El Centro Regional de Enseñanza de Ciencia y Tecnología del Espacio para América Latina y el Caribe (CRECTEALC), fue establecido mediante un acuerdo entre los Gobiernos de Brasil y México firmado en Marzo de 1997. El Acuerdo contempla que el Centro tendría un Campus en Brasil y uno en México. El Campus México fue creado conforme a las Bases de Coordinación entre la Secretaría de Relaciones Exteriores, el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) firmadas en Octubre de 2002, y al acuerdo entre el Gobierno de México y el Centro promulgado en el Diario Oficial de la Federación en Junio de 2003, relativo a la operación del Centro en México. De acuerdo con las Bases de Coordinación referidas, el INAOE es la institución sede del Campus México, siendo un organismo internacional afiliado a la Organización de las Naciones Unidas (ONU), que durante más de una década, ha evolucionado hasta convertirse en uno de los centros especializados más importantes en América Latina y el Caribe.

El CRECTEALC, en el contexto científico, apoya el desarrollo nacional e internacional, la formación de recursos humanos y contribuye a generar el conocimiento que puede coadyuvar en la solución de problemas que afectan el entorno social y

económico de México, y de los países de la región [CRECTEALC (2020)].

1.4. El Clima Espacial en México

En el 2014, México incluye referencias específicas a peligros espaciales y fenómenos climáticos como parte de las modificaciones legislativas en su Ley General de Protección Civil, consistente con la Promoción de las Naciones Unidas al compromiso y cooperación internacional en materia de conscientización en el estudio y monitoreo del Clima Espacial. En Octubre de 2014 el Servicio de Clima Espacial México (SCiESMEX) inicia sus operaciones desde las instalaciones del Instituto de Geofísica de la Universidad Autónoma de México (IG-UNAM), convirtiéndose en el Centro Regional de Alertas del Servicio Internacional del Ambiente Espacial (ISES, por sus siglas en inglés) en Junio de 2015 [Gonzalez-Esparza et al. (2017)]. El servicio cuenta con una infraestructura informática, el cual incluye una aplicación web donde comparte de forma pública reportes semanales y especiales de Clima Espacial, un repositorio de datos y un servidor de alto rendimiento para el procesamiento de modelos numéricos. El SCiESMEX utiliza datos de la red de instrumentación terrestre del Laboratorio Nacional de Clima Espacial (LANCE), cubriendo las emisiones de ráfagas de radio solar, el viento solar y las perturbaciones interplanetarias (mediante observaciones de centelleo interplanetario), mediciones geomagnéticas y el análisis del TEC con la proyección de mapas cercanos a Tiempo Real de la *Ionósfera* sobre México, utilizando datos del Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés) que obtiene a 1 Hz de la red de estaciones GPS del Servicio Sismológico Nacional (SSN) y de la Red de Observación y Colaboración a Largo Plazo Transfronteriza, Terrestre y Atmosférica (TLALOCNet, por sus siglas en inglés) cada 15 minutos.

1.5. Mapas Globales

Durante la última década, los Sistemas Satelitales de Navegación Global (GNSS, por sus siglas en inglés) de doble frecuencia, en particular el GPS, se han convertido en una herramienta para monitorear el TEC, calculando la integral de la densidad electrónica a lo largo de la trayectoria de la señal entre el satélite transmisor y el receptor. Por lo tanto, las mediciones GNSS, proporcionan información sobre la densidad de electrones que dependen de la posición espacial y tiempo [Krisp et al. (2013)].

En la actualidad, la comunidad científica detrás del Servicio Internacional GNSS (IGS, por sus siglas en inglés), en particular CODE, ESA, JPL y UPC, contribuyen continuamente a proporcionar y mejorar Mapas del TEC vertical (vTEC, por sus siglas en inglés), utilizando datos de una extensa red mundial de más de 100 estaciones terrestres (véase Figura 1.5), sin embargo, estas se encuentran principalmente en los continentes, lo que significa que sobre los océanos, los resultados son menos precisos [Hernández-Pajares et al. (2009)].

1.6. Mapas Regionales

1.6.1. TECMAP

Al sur del continente americano, los Mapas climáticos ionosféricos se han producido desde el 2013 por el Programa de Estudio y Monitoreo de Clima Espacial (EMBRACE, por sus siglas en portugués) del Instituto Nacional de Investigación Espacial (INPE, por sus siglas en portugués) para cubrir toda la región de Sudamérica utilizando 4 receptores GNSS: RBMC/IBGE, LISN, IGS, RAMSAC, en un total de ≈ 140 sitios, contando con una baja resolución espacial que varía entre los 50 ($.5^\circ$) hasta 500 km (4.5°), dependiendo de la densidad de los puntos de observación

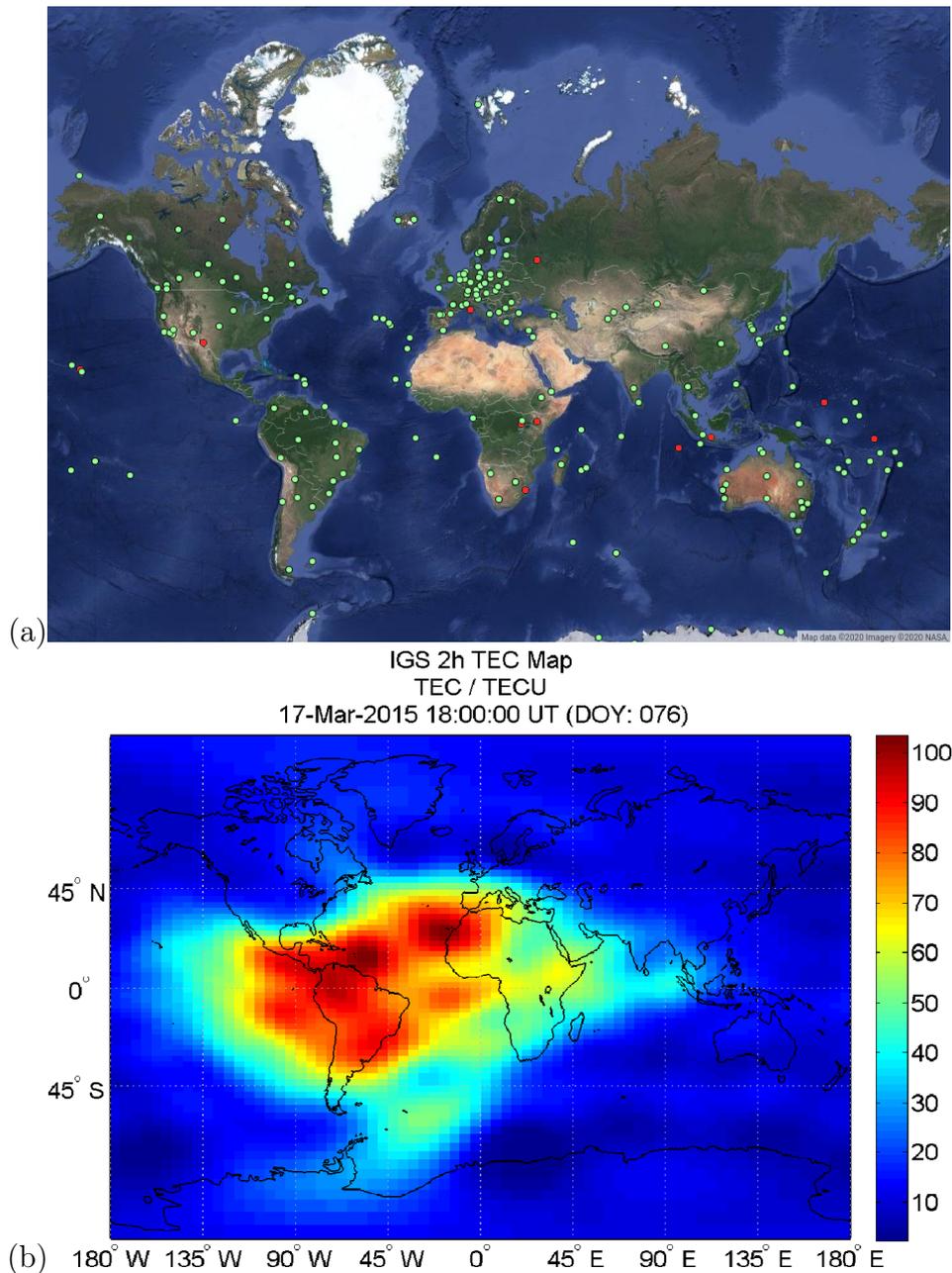


Figura 1.5: (a) Mapa de estaciones terrestres del IGS. [Fuente: Copyright 2020 IGS (2020)] (b) Mapa TEC Global del día 17 de Marzo de 2015 a las 18:00 Tiempo Universal (UT) con información TEC de 2 horas [Extraídos de: Wilken et al. (2018)].

[Takahashi et al. (2016)]. Aquí las grandes variaciones día a día de la EIA⁴ cuenta con un gradiente en un rango de $10 < \text{TECUs} < 80$ ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ electrones} \times \text{m}^{-2}$), monitoreando la evolución de las Burbujas Ionosféricas de Plasma (IPB, por sus siglas en inglés).

⁴Anomalia Ecuatorial Ionosférica.

1.6.2. AzTEC

AzTEC es el primer producto operacional del LANCE (SCiESMEX, IG-UNAM), que usa datos observacionales en Tiempo Real para producir Mapas TEC con cadencias de 15 minutos sobre el territorio de México. Este proyecto, el cual aún se encuentra en fase experimental desde Enero de 2018, está basado en un modelo que utiliza técnicas de asimilación de datos provenientes de la red de estaciones GPS del SSN [SSN (2020)] y de la TLALOCNet [UNAVCO (2020a)] con el modelo empírico de la *Ionósfera*.

1.6.3. US-TEC

En Noviembre de 2014, el Centro de Ambiente Espacial (SEC, por sus siglas en inglés) lanza US-TEC, el primer producto de Clima Espacial que utilizaría técnicas de asimilación de datos en una versión de prueba operacional sobre los Estados Unidos Continentales (CONUS, por sus siglas en inglés) con cadencias de aproximadamente 15 minutos, basado en el Filtro de Kalman [Fuller-Rowell et al. (2006)] y un esquema de procesamiento de datos manejado por una red de estaciones GPS en Tiempo Real.

1.6.4. SCHA TEC

Generando Mapas TEC con la producción diaria del TEC cercano al Tiempo Real sobre el territorio de Canadá y regiones adjuntas, en forma de coeficientes SCHA (o estimaciones de puntos de cuadrícula), así como el error ionosférico en el dominio de posición y la cuantificación de los errores en el modelo actual de corrección de la *Ionósfera* de difusión por GPS. Los Mapas de SCHA TEC se comparan con los Mapas TEC del IGS para su publicación cada 15 minutos con datos obtenidos a 1 Hz desde su red de estaciones/receptores GPS [Ghoddousi-Fard et al. (2011)].

1.7. Estado del Arte en Mapas TEC

El avance en la aplicación de ionosondas para el estudio y monitoreo del TEC en la *Ionósfera* (el cual lo monitorea en Tiempo Real con estimaciones directas y más precisas del plasma ionosférico) sobre México, sigue en desarrollo. Por ello, el peso que recae en proyectos alternativos que permitan avanzar en el cálculo del TEC para el estudio y monitoreo de esta región de la atmósfera sobre el territorio mexicano, tiene un valor especial.

Los métodos de estimación en el comportamiento del TEC global, usan dos tipos de formatos (archivos fuente): IONEX y RINEX, cuyo contenido en sus archivos, poseen información de órbitas precisas de GPS, Parámetros de Orientación de la Tierra (EOP, por sus siglas en inglés), coordenadas de la estación, información del reloj satelital, y a modo de prueba, retrasos en el cenit troposférico [Sergeeva et al. (2018)]. IONEX contienen información de Mapas Globales y los RINEX de Mapas Regionales.

1.7.1. GIM vTEC

Usado para el estudio del vTEC, se reconstruyen utilizando datos extraídos de las señales GPS, de los datos de vTEC proporcionados por los Mapas Ionosféricos Globales (GIM, por sus siglas en inglés) y luego son calculados independientemente por diferentes centros que se clasifican y combinan de acuerdo con las capacidades necesarias para producir mapas vTEC globales, establecidas por el IGS.

1.7.2. TayAbsTEC vTEC

Luego de que los datos extraídos de los archivos RINEX, obtenidos de los receptores GPS locales, sean procesados por una ‘tec-suite’ para calcular los valores del TEC inclinado (sTEC, por sus siglas en inglés), el software TayLabTEC obtiene los valores del vTEC basados en un método que usa las coordenadas del receptor al

calcular el sTEC, al saber que la función de mapeo influye considerablemente en la precisión de la estimación absoluta del vTEC [Sergeeva et al. (2018)], luego utiliza un factor de corrección α^5 para convertir el sTEC en vTEC usando a la Serie de Taylor (expansión de Taylor de segundo orden) para el procesamiento de los datos. Después de esta sección, el vTEC será lo mismo que el TEC.

1.8. Objetivo

Desarrollar una metodología que permita caracterizar los primeros Mapas TEC cercanos a Tiempo Real de la *Ionósfera* sobre el territorio de México, los cuales son generados por AzTEC, el primer sistema de creación de Mapas TEC perteneciente al LANCE que utiliza el código US-TEC RT, un software desarrollado por la NOAA para el cálculo del TEC y el mapeo tomográfico ionosférico, utilizando el modelo computacional MAGIC, que a su vez, utiliza el Filtro de Kalman para asimilar datos observacionales en Tiempo Real con el modelo de Ionósfera de Referencia Internacional de 1995 (IRI95, por su siglas en inglés); estimando el retardo de las señales, en el proceso de la interacción satélite-receptor.

⁵A saber, $\alpha = 0.94$ para la región del Ártico, $\alpha = 0.89$ para las latitudes ecuatoriales y $\alpha = 0.90$ para las latitudes mexicanas.

Capítulo 2

Formación y Cálculo de la Densidad de Electrones

El TEC es calculado tomando en cuenta los retrasos en las ondas radio en su camino hacia los receptores del sistema GPS, provenientes desde los transmisores de cada satélite que orbitan a 20,000 km de altitud y es el responsable del retraso de tiempo ionosférico. El TEC se da en unidades TEC (TECU¹, por sus siglas en inglés), este valor incluye los cambios a largo y corto plazo en el flujo de ionización solar, la actividad magnética, la estación, la hora del día, ubicación del usuario y la dirección de visualización [Klobuchar (1987)]. En el mundo de los sistemas GNSS, existen otras herramientas para calcular el TEC, además de los satélites NAVSTAR-GPS (comúnmente llamado GPS), como el sistema de satélites TOPEX/Poseidon (T/P) y Jason, con altímetros de doble frecuencia y la capacidad para registrar el retraso y la fase satelital del GPS. Este sistema puede proporcionar el Contenido de Electrones Ionosférico (IEC, por sus siglas en inglés) para altitudes que oscilan entre 65 hasta 1,336 km, mientras que el sistema GPS, contribuye en mediciones tanto de la *Ionósfera* como de la *Protonósfera*.

¹1 TECU = 10^{16} electrones \times m⁻².

2.1. Equilibrio de Fotoionización y Recombinación

2.1.1. Fotoionización

La *Ionósfera* surge desde la fotoionización de un gas neutro, produciendo pares libres de iones-electrones por la absorción de la radiación en el UV solar. Para los principales componentes atmosféricos como los son el N y el O en sus formas atómicas y moleculares, el umbral de ionización se encuentra en el rango de 1,216 a 800 Å, por lo tanto, la radiación con una longitud de onda menor puede conducir a la formación de iones y electrones en la atmósfera superior [Danilov (1970)]. Sin embargo, estos primeros iones no son necesariamente los principales constituyentes de la *Ionósfera*, debido a que existen otras reacciones secundarias entre estos y los gases neutros de la atmósfera. Esto se conoce como recombinación.

Los principales componentes atmosféricos de la fotoionización directa por radiación en el rango de 800 a 100 Å son:



En la parte baja de la atmósfera (≈ 10 km), la fotoionización de las moléculas de NO (Óxido de Nitrógeno) pueden desempeñar un papel importante, con bajo potencial de ionización de 9.25 eV, por la radiación en la línea fuerte de Lyman α (1,215.67 Å) del espectro solar:



Si la energía de un quantum de radiación ionizante es suficientemente grande, durante la ionización de las moléculas puede haber disociación simultánea (proceso de ionización disociativa), que conduce a la formación de un ion atómico y un átomo neutro:



2.1.2. Recombinación

El proceso inverso de la fotoionización, la recombinación, sucede cuando un e^- y un ion positivo (O^+), se unen para producir de nuevo un átomo neutro o ionizado en un estado menor, también llamada ‘recombinación radiativa’ (2.8). Este es el principal proceso por el cual los electrones se pierden en la parte alta de la *Ionósfera* ($\approx 1,000$ km).



Otro de los procesos de recombinación llamado ‘recombinación disociativo’, y de acuerdo con Brekke (2013) el más importante, ocurre en dos etapas y es mucho más eficiente. En la primer etapa, un O^+ (formado por la fotoionización), interactúa con numerosas moléculas neutras como el O_2 y el N_2 , reemplazándolo con un átomo de la molécula:



En la segunda etapa, el e^- se combina con un O_2^+ , obteniendo dos átomos neutros, y de nuevo, el e^- vuelve a unirse:



En la parte baja de la *Ionósfera* (≈ 50 km), los electrones también se pierden por un proceso de ‘acoplamiento’, en el que se adhieren a los átomos neutros para convertirse en un ion negativo (O^-). Al igual que un O^+ , el O^- es mucho más pesado que el e^- y no responde a las oscilaciones electromagnéticas de las ondas radio.

En el caso de la dispersión entre las ondas radio y el plasma de electrones de la *Ionósfera*, está relacionada con la oscilación del plasma, dado la frecuencia de un plasma de electrones:

$$w_{pe} = (n_{e0}e^2/\epsilon_0m_e) \quad (2.11)$$

donde n_{e0} es la densidad de electrones, e la carga, m masa del e^- y ϵ_0 la permitividad eléctrica en el vacío; por lo que

$$w^2 = w_{pe}^2, \quad (2.12)$$

describe la oscilación del plasma de electrones [Schunk & Nagy (2009)], razón por la cual las ondas radio se reflejan en la *Ionósfera*. Si la frecuencia de la onda electromagnética es mayor que la del plasma, esta la atravesará sin problema; si la frecuencia es igual a la del plasma, parte de la onda será reflejada, y si la frecuencia es menor, las ondas son rápidamente reflejadas.

2.2. Aproximaciones para el Cálculo de TEC

Los receptores GPS generan datos del tipo observable a partir de las frecuencias L1 (1,575.42 MHz) y L2 (1,227.60 MHz), considerando dos parámetros esenciales:

el retardo de los pseudo-rangos (ρ), que es la diferencia entre el tiempo de recepción de la señal en el receptor y de emisión en el satélite, escalados por la velocidad de la luz en el vacío [Kleusberg & Teunissen (1998)], y las fases de las portadoras (ϕ), que es la diferencia entre la fase que genera nuestro receptor en el momento de la recepción de la señal y la fase generada por el satélite en el momento de la transmisión. El retardo ionosférico I , proporcional al TEC presente en la trayectoria de las frecuencias específicas, L1 y L2, se expresa como:

$$I = \frac{40.3}{cf^2} \cdot TEC \quad (2.13)$$

donde $\frac{40.3}{f^2}$ es la cantidad de refracción, siendo f^2 la frecuencia de la señal, c es la velocidad de la luz (m/s) y el TEC es la integración de todos los electrones en un tubo vertical que abarca toda la *Ionósfera* en una sección de un metro al cuadrado.

1 TECU provoca retardos que en la frecuencia L1 equivalen a 0.163 m, y en la L2, equivale a 0.267 m. Por lo tanto, existe una diferencia de 0.104 m entre las frecuencias L2 y L1 con las que se calcula:

$$TEC = \frac{\rho_{L1} - \rho_{L2}}{0.104mTECU^{-1}} \quad (2.14)$$

donde los pseudorangos (ρ_{L1} y ρ_{L2}) son proporcionados por los receptores GPS en unidades de metros. El $vTEC$ se calcula:

$$vTEC = TEC \cdot \cos\left[\frac{R_e \cos(\theta)}{R_e + H}\right] \quad (2.15)$$

donde R_e es el radio de la Tierra (6,371.2 km), H es la altura de la *Ionósfera* respecto a la superficie terrestre (350 km) y θ corresponde al ángulo entre el satélite y el receptor dado en grados [Gatica-Acevedo et al. (2015), Warnant & Pottiaux (2000), Manucci et al. (1998) y Stankov et al. (2003)].

2.3. Afectaciones en Radiocomunicaciones

Dado el exponencial avance en el desarrollo de sistemas tecnológicos, existe un importante interés ante los efectos que genera el Clima Espacial en las frecuencias o bandas específicas con las que estos sistemas se manejan. Cada vez se reduce el énfasis al uso de sistemas que aun manejan bandas como la ELF y LF llamadas bandas de onda larga [Goodman (2005a)], sin embargo, la atención aumenta en las bandas de los sistemas modernos de comunicación y vigilancia, como la Frecuencia Alta (HF, por sus siglas en inglés) y en los sistemas satelitales, donde se manejan las bandas VHF, UHF y SHF (véase Tabla 2.1, la cual presenta las frecuencias correspondientes a estas bandas) para las comunicaciones, vigilancia, navegación, observación de la Tierra y aplicaciones científicas con una variedad de misiones (véase Figura 2.1).

Banda	Frecuencia	Longitud de Onda	Modos Primarios
ELF	<30 kHz	>100 km	GO y OT
VLF	3-30 kHz	100-10 km	GO y OT
LF	30-300 kHz	10-1 km	GO y OT
MF	300-3000 kHz	1000-100 m	OT y OI (<i>E</i>)
HF	3-30 MHz	100-10 m	OT y OI (<i>E</i> , <i>F1</i> y <i>F2</i>) y DE _s
VHF	30-300 MHz	10-1 m	LOS, DM y DE _s
UHF	300-3000 MHz	1000-100 m	LOS
SHF	3-30 GHz	100-10 mm	LOS y DT
EHF	30-300 GHz	10-1 mm	LOS

Tabla 2.1: Bandas de Radio y Modos Primarios de Propagación. Nota: GO = Guía de Onda, OT = Onda Terrestre, OI = Onda Ionosférica, Ligt-Of-Sight Propagation, DE_s = Dispersión Esporádica E, LOS = Propagación de Línea de Visión, DM = Dispersión de Meteoros y DT = Dispersión Troposférica. [Fuente: Goodman (2005a)].

2.3.1. Telecomunicaciones Terrestres

Se cree que el experimento clásico de Marconi en 1910, donde demostró la viabilidad de la comunicación a distancias globales, en realidad se realizó con señales en la banda de Frecuencia Media (MF, por sus siglas en inglés) y utilizando la parte

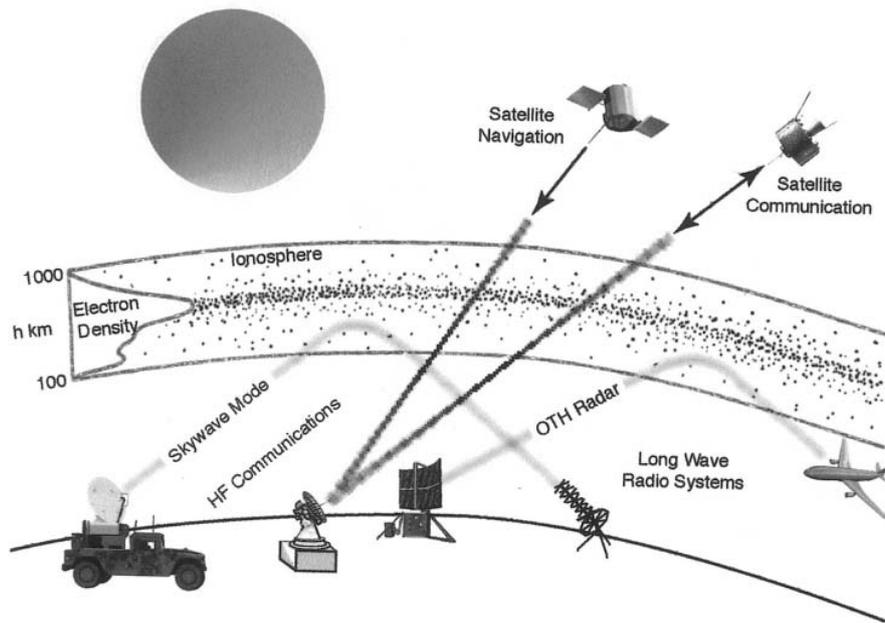


Figura 2.1: Caminos de las ondas radio en la superficie terrestre, rebote ionosférico y de la guía de ondas de la *Ionósfera* terrestre. [Extraída de: Goodman (2005a)].

de la banda de Frecuencia Baja (LF, por sus siglas en inglés). El éxito de Marconi condujo posteriormente a la noción de que las señales se refractaban a lo largo de la superficie terrestre desde los estratos atmosféricos superiores en lugar de difractarse. La banda donde el rebote de la *Ionósfera* es más eficiente es en la HF, ya que las propiedades ionosféricas permiten un mayor índice de reflexión en esta banda. A frecuencias más bajas (LF e inferiores), la interacción está restringida a alturas del orden de 100 km o menos, mientras que a frecuencias más altas (VHF y superiores), la ionosfera tiene una alta probabilidad de ser transparente y las señales se pierden en el espacio exterior [Daglis (2005)].

Una ventaja importante proporcionada por el canal de onda larga es su capacidad de penetración en el agua de mar y de la tierra, especialmente en la banda de la Frecuencia Extremadamente Baja (ELF, por sus siglas en inglés), usada en la navegación marítima.

2.3.2. Telecomunicaciones Tierra-Espacio

Las telecomunicaciones se han expandido de manera significativa desde la llegada de la era espacial. En general, se ha mejorado la cobertura de los sistemas terrestres y una mayor velocidad en la transmisión de datos. Además, los efectos ionosféricos asociados durante los eventos de Clima Espacial por largos periodos de tiempo en las frecuencias más bajas, han hecho que la aplicación de estos sistemas tengan un incremento exponencial, sin embargo, eso no significa que nos libremos por completo de los efectos en la *Ionósfera* y del Clima Espacial. En la Tabla 2.2, podemos encontrar una lista representativa de los efectos entre las frecuencias entre 100 MHz hasta 1 GHz, correspondientes a un sólo recorrido a través de la *Ionósfera* en un ángulo de elevación de 30 grados. Por ejemplo, a 1 GHz, 250 ns corresponde a un error de retardo de ruta de grupo de 76 m, esto genera un problema para algunos usuarios de sistemas GPS de frecuencia única que requieren radionavegación de alta precisión [Goodman (2005b)].

Efecto	100 MHz	1 Gz	Frecuencia de Dependencia
Rotación de Faraday	30 rotaciones	108 grados	f^2
Retraso Ionosférico	25 μ S	250 ns	f^2
Refracción	<1 grado	<0.6 Minutos	f^2
Absorption	5 dB	0.05 dB	f^2
Dispersión Temporal	0.4 pS/Hz	0.0004 pS/Hz	f^3

Tabla 2.2: Efectos Máximos Representativos en los Sistemas Tierra-Espacio (el CE = $10^{18}/\text{m}^2$ y la elevación = 30 grados). [Fuente: Goodman (2005c)].

2.3.3. Instrumentos para Determinar el Efecto del Clima Espacial

En la Tabla 2.3, se enlistan las disciplinas de telecomunicaciones que están influenciadas o incluso moduladas por la *Ionósfera* y las variaciones generadas por el Clima Espacial. Misiones militares como la advertencia de misiles y la difusión de

información e imágenes meteorológicas, así como la navegación y la amplia constelación de satélites GPS (véase Figura 2.2) de dos frecuencias también pueden incluirse en esta tabla.

Disciplinas de Telecomunicaciones
<ul style="list-style-type: none"> • Comunicaciones Globales y de Larga Distancia (HF y SATCOM) <ul style="list-style-type: none"> • Comunicaciones Tácticas (LOS, NVIS y SATCOM) • Radares de Búsqueda, Seguimiento y Control de Incendios <ul style="list-style-type: none"> • Señales de Inteligencia y Geolocalización de Objetivos

Tabla 2.3: Lista de disciplinas de telecomunicaciones, además de las militares, descritas por el C3I (Comando, Control, Comunicaciones e Inteligencia). Nota: el SATCOM son los satélites que se encuentran sobre el ecuador terrestre, orbitando a la misma velocidad angular de la Tierra, el NVIS es la onda del cielo de incidencia vertical y el LOS es la línea de visión. [Fuente: Goodman (2005c)].

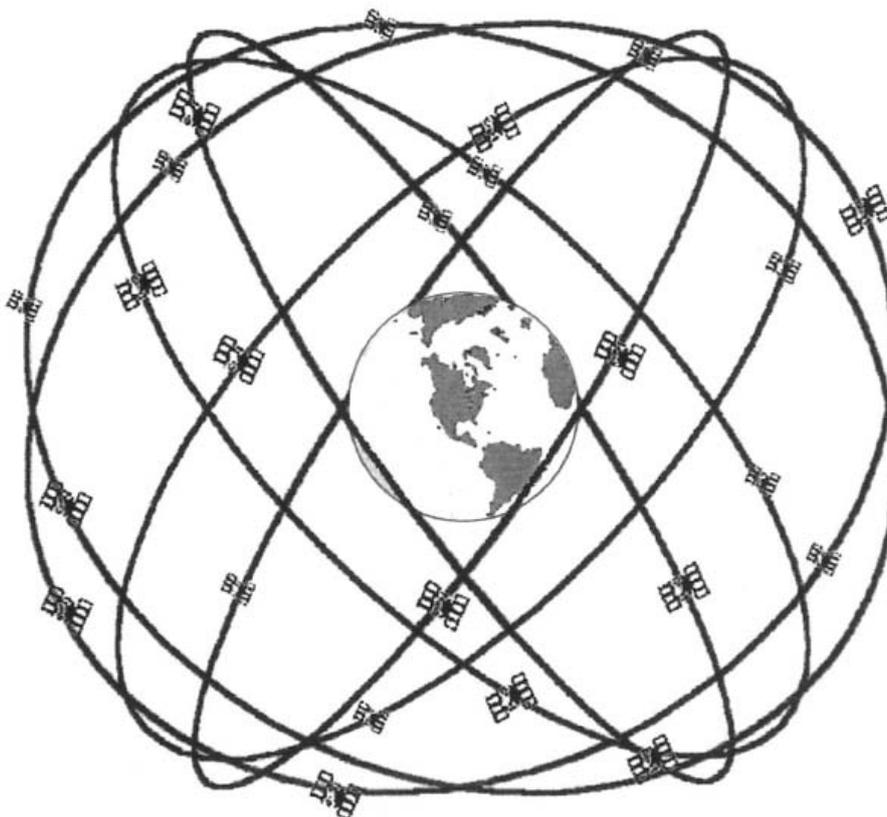


Figura 2.2: Constelación GPS de 24 satélites en 6 planos orbitales, con 4 satélites en cada plano a 20,200 km de altitud. Cada plano se encuentra en una inclinación de 55°. [Extraída de: Goodman (2005c)].

Los receptores GPS de doble frecuencia, fueron diseñados para eliminar el im-

pacto de los errores de retardo en la ruta de las ondas radio con la estimación del TEC, ya que las bandas L1 y L2 sufren diferentes cantidades de retraso para un nivel fijo del TEC, por lo que al medir la diferencia de retardo de tiempo entre las dos bandas, se puede restar el exceso de retraso de la ruta debido a la *Ionósfera* [Goodman (2005c)].

2.4. Agentes que Perturban la Ionósfera

2.4.1. Huracanes

Durante una investigación designada para explorar los diferentes aspectos de una posible conexión entre los cambios troposféricos e ionosféricos [Bauer (1958)], un interesante efecto fue notado durante los huracanes ocurridos entre 1954 y 1955 (Hazel, Connie, Diane e Ione) cerca de Washington, D. C. en EE. UU. al analizar sus datos meteorológicos y geofísicos.

La aparente asociación entre el paso de un huracán y el cambio en la densidad ionosférica, es debido a que un huracán representa una baja presión en el sistema, asociado con un área de convergencia de bajo nivel que se extiende sobre una parte importante del área cubierta (parte inferior), mientras que en la parte trasera hay una zona de divergencia (parte superior). Dines (1919) introdujo la idea de una compensación en el campo de la divergencia, de modo que las zonas de convergencia (divergencia) se superpongan sobre las zonas de divergencia (convergencia). De acuerdo con Dines, la compensación en el campo de divergencia describe el efecto de los cambios troposféricos en la *Ionósfera*, dado que la convergencia de bajo nivel está asociada con la divergencia en la *Tropósfera* superior y la *Estratósfera* inferior, por lo que se podría especular (suponiendo un modelo de divergencia de tres capas y acoplamiento dinámico) que esta divergencia debajo de la *Ionósfera* puede dar lugar a la convergencia y subsidencia (movimiento descendente) asociada en la *Ionósfera*, lo que conduciría a un aumento en la densidad de electrones.

2.4.2. Iluminación Solar

Cuando el espectro electromagnético solar entra a la atmósfera de la Tierra y llega a la superficie, se puede observar la absorción producida por la atmósfera, debido a que las emisiones en el visible son muy constantes en el tiempo, con variaciones de tan sólo 1%, salvo en momentos de fulguraciones solares. Las partes del espectro más relevantes para la *Ionósfera* son las que corresponden a los rayos X, y al EUV, que provienen de la cromósfera y corona del Sol. Cabe destacar que dentro del UV, la línea Lyman- α (121,6 nm) del Hidrógeno, es la más energética a diferencia de las otras longitudes próximas en el espectro. La potencia que emite el Sol en esta línea es similar a la que corresponde a todo el resto del espectro con longitudes de onda menor de 100 nm.

2.4.3. Fulguraciones Solares

Las fulguraciones solares (véase Figura 2.3), son fenómenos de estallidos repentinos asociados con aumentos significativos en la radiación de rayos gamma, rayos X fuertes, radiación en el EUV y radiación de microondas que ocurren cerca de una mancha solar en la cromósfera y se asocian mayormente con los campos magnéticos intensos de las manchas solares. Las fulguraciones consisten en una ráfaga de fotones a velocidad constante (c), afectando en gran medida al ambiente del sistema solar-terrestre con consecuencias inmediatas durante periodos que van desde los minutos hasta horas.

Los destellos de rayos X se clasifican en un rango de longitud de onda entre los 0.1 a 0.8×10^{-9} m; como la Clase A, con un nivel pico de flujo de energía de $\approx 10^{-8}$ W/m², y la Clase B, con un nivel pico de flujo de energía de $\approx 10^{-7}$ W/m², ambas catalogadas en Cander (2019) como fulguraciones tranquilas; la Clase C, con un nivel pico de flujo de energía entre 10^{-6} a 10^{-5} W/m², catalogan a las fulguraciones pequeñas; la Clase M, con un nivel pico de flujo de energía entre 10^{-5} a 10^{-4} W/m², catalogan a las fulguraciones fuertes, y finalmente la Clase X, con un nivel pico de

flujo de energía $>10^{-4}$ W/m², catalogan a las fulguraciones importantes.

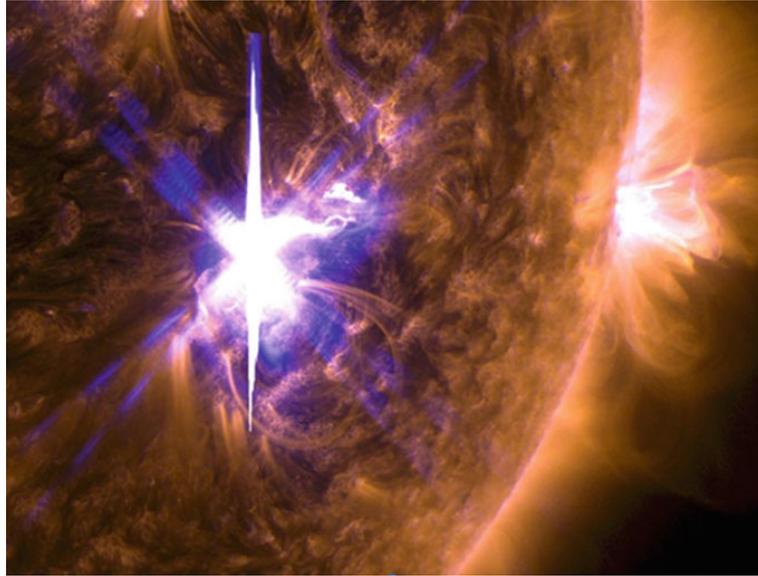


Figura 2.3: Fulguración solar de clase X9.3 que estalló desde el 06 de Septiembre de 2017 (izquierda) y una fulguración más pequeña de una región activa diferente (derecha), observadas por el Observatorio de Dinámica Solar de la NASA. [Extraída de: Cander (2019)].

El evento más grande de una fulguración que se tiene registro fue observado el 02 de Abril de 2001, el cual fue categorizado de clase X22 + (intensidad máxima de flujo de 22×10^{-4} W/m²), sin embargo no se acompañó de una tormenta geomagnética. Contrario a la fulguración del 13 y 14 de Marzo de 1989, un evento de clase X5 (intensidad máxima de flujo de 5×10^{-4} W/m²) que tuvo una alineación favorable hacia la Tierra y produjo la famosa Geo-Tormenta de Marzo de 1989, el cual causo efectos nocivos en las infraestructuras terrestres y espaciales, incluyendo la interrupción por 9 horas al sistema de energía eléctrica Hydro-Quebec en Canadá y los apagones eléctricos en grandes regiones de Suecia a las 07:42 Tiempo Universal Coordinado (UTC, por sus siglas en inglés) el 13 de Marzo de 1989.

2.4.4. Variaciones Geomagnéticas

De 20 a 40 horas después del estallido de una fulguración, una CMEs es emitidas desde el Sol hacia la atmósfera de la Tierra y provoca cambios repentinos en la

magnitud de su campo magnético: este efecto se conoce como un comienzo geomagnético repentino. Asociado con esta variación, hay fluctuaciones en la densidad de electrones en la *Ionósfera* provocando una oscilación característica en la frecuencia que refleja a las longitudes de onda en la banda HF [Atkinson & Edwards (1970)].

2.4.5. Rayos Cósmicos Galácticos

Las partículas primarias en los rayos cósmicos son principalmente protones de objetos astrofísicos distantes. Su rango de energía varía de ≈ 1 GeV hasta $\approx 10^{20}$ eV o más. Los rayos cósmicos de hasta $\approx 10^{15}$ eV son considerados de origen galácticos. Estudios indican que los remanentes de supernovas son aceleradores galácticos de rayos cósmicos hasta energías cercanas a la primer rodilla² ($\approx 3 \times 10^{15}$ eV), en el espectro de energía de los rayos cósmicos [Singh et al. (2010)]. Los rayos cósmicos secundarios [también conocidas como cascadas atmosféricas (air shower, en inglés)], son producidos en la atmósfera de la Tierra por la interacción de los rayos cósmicos primarios y los átomos del gas atmosférico.

²Entre los rangos del GeV y el PeV, hay una suave conexión con un exceso de rayos cósmicos llamado ‘primer rodilla’ (first knee, en inglés).

Capítulo 3

US-TEC en Tiempo Real (RT)

3.1. Introducción

Con la emergente constelación de satélites y la red de observaciones terrestres, en Noviembre de 2004 US-TEC es lanzado por el SEC como el primer producto de Clima Espacial en una versión de prueba operativa, utilizando técnicas de asimilación de datos con el Filtro de Kalman e impulsado por un esquema de datos proveídos en Tiempo Real de la red de estaciones GPS de doble frecuencia, las cuales utiliza para estimar el retraso de la señal GPS debido al contenido de electrones ionosférico entre el receptor GPS y el satélite.

Un mapa con el vTEC sobre los CONUS se genera cada 13 minutos y se actualiza en lapsos de 15 minutos, mostrando en TECUs, el comportamiento de la *Ionósfera* al calcular el TEC, generalmente en intervalos variables de aproximadamente 1 hasta 20 TECUs, con aumentos graduales por encima de este, también muestra la ubicación de los receptores GPS usados durante el ciclo de datos asimilados (véase Figura 3.1).

Los Mapas TEC que US-TEC produce, son generados desde el SEC, el cual opera 24/7 y cuya misión es caracterizar, además de proveer alertas y advertencias en Tiempo Real del ambiente espacial. El SEC fue el primer centro en adoptar técnicas de asimilación de datos para el Clima Espacial, colaborando con instituciones

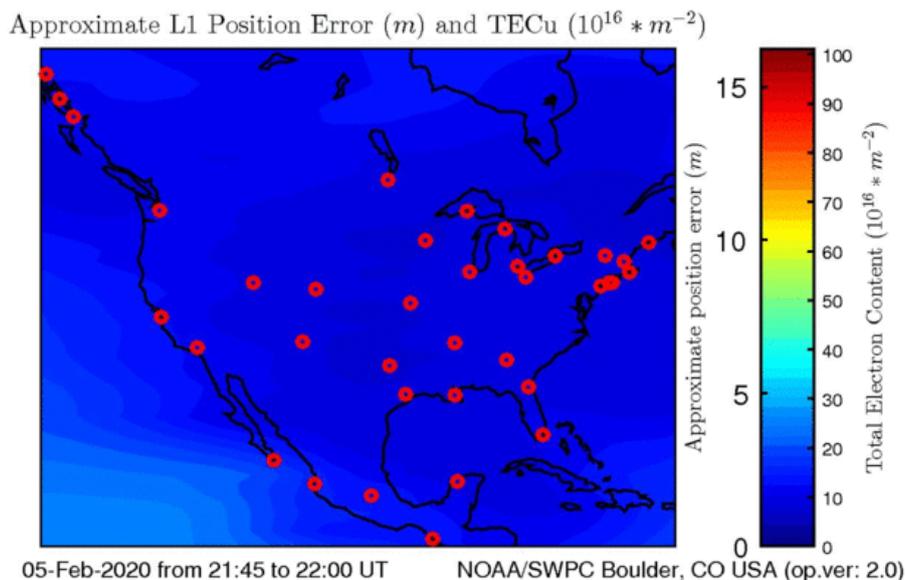


Figura 3.1: Mapa TEC generado por US-TEC. En el cuadro principal se observa el área territorial de los CONUS con la ubicación de las estaciones GPS usadas durante ese periodo. En la parte derecha del cuadro principal, se observa una barra de contorno de colores que indica el valor TECU que describe el comportamiento de la *Ionósfera* del cuadro principal, también, el error de posición aproximada (m) en el deslizamiento de las señales y finalmente en la parte inferior, se observan la información de los metadatos con la fecha seguido del inicio y termino del periodo en el que se adquirieron los datos, las siglas de las instituciones que integran al proyecto y el lugar en el que se desarrolla. [Extraída de: Center (2020)]

como la Encuesta Nacional Geodésica (NGS, por sus siglas en inglés) y el Instituto Cooperativo de Investigación de Ciencias Ambientales (CIRES, por sus siglas en inglés) de la Universidad de Colorado, los cuales desarrollaron un modelo regional de asimilación de datos para especificar el TEC sobre los CONUS [Fuller-Rowell et al. (2006)].

3.2. Fuentes de Datos

3.2.1. Streaming

El modelo es basado en la red de receptores GPS de doble frecuencia con base terrestre, operados por la Guardia Costera de los Estados Unidos para el Servicio Nacional de GPS Diferencial (NDGPS, por sus siglas en inglés), generando datos de

observación que constituyen a la base de datos perteneciente a la red de Estaciones de Referencia de Operación Continua (CORS, por sus siglas en inglés) con cerca de 400 estaciones GPS, de los cuales 60 envían datos en lapsos de 5 minutos al SEC, posteriores a su adquisición.

El código C/A es la base para este manejo de datos en los receptores del Servicio Estándar de Posicionamiento (SPS, por sus siglas en inglés), ya que el mensaje de navegación modula la señal L1 C/A, el cual consiste en una serie de datos que describen la órbita del satélite, las correcciones del reloj y otros parámetros del sistema, mediante mensajes de navegación que contienen una serie de datos que lleva marcado el momento de transmisión de cada subtrama y el momento en que son transmitidos por el satélite GPS (véase Figura 3.2). Una trama consta de 1,500 bits (dividido en 5 subtramas de 300 bits) y se transmite cada 30 segundos. Las correcciones del reloj se envían en la subtrama uno, y los datos de la órbita (efemérides) en las subtramas dos y tres. Las subtramas 4 y 5 se usan para transmitir los diferentes datos del sistema. En 25 tramas (125 subtramas) se envía el mensaje completo, que lleva un tiempo de 12.5 minutos [Kaplan & Hegarty (2006)].

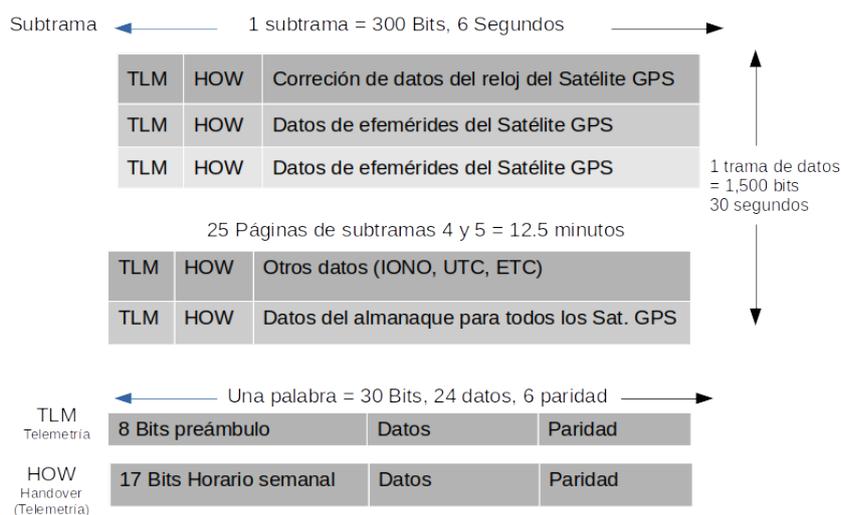


Figura 3.2: Formato de datos del sistema de navegación GPS.

Los tipos de datos que lleva el satélite GPS para describir la órbita y otros parámetros del sistema son:

1. Efemérides: describe la órbita de un satélite GPS para secciones pequeñas en la órbita del satélite. Normalmente el receptor GPS recibe efemérides cada hora.

2. Almanaque: son datos aproximados de la órbita para todos los satélites GPS. Estos datos describen la órbita para largos periodos de tiempo y se envían a los receptores en un periodo de tiempo de 12.5 minutos. Los datos del almanaque incluyen un modelo de la *Ionósfera* que el receptor usa para aproximar el retraso cuando la señal pasa por este medio.

3.2.2. RINEX

RINEX en su versión 2.11, es un estándar desarrollado para almacenar todos los tipos de datos necesarios para todo tipo de posicionamiento y navegación GNSS. Este estándar proporciona medios para almacenar los datos transmitidos desde los satélites GPS, GLONASS (equivalente Ruso del GPS), GALILEO (equivalente europeo del GPS) y GEO/SBAS (satélites geoestacionarios y sistemas de aumento basados en satélites integrados por Norteamérica, Europa y Japón).

Observables

Las mediciones realizadas por los receptores GPS provenientes de los satélites GPS, son almacenados como datos de observación en archivos de tipo ASCII llamados 'RINEX', los cuales almacenan 3 cantidades fundamentales: Tiempo, Pseudorange y Fase. RINEX 2.11, permite un 4to observable: la intensidad de la señal (SNR: Relación Señal-Ruido).

Tiempo

El tiempo de la medición es el tiempo del receptor de las señales recibidas, lectura del receptor en el instante de validez de fase portadora y/o las mediciones

del código. Idéntico para todas las mediciones de fase y rango, y para todos los satélites observados en esa época (fecha y hora).

En el caso de la recepción de datos en Tiempo Real, el registro del encabezado puede indicar: TIME OF FIRST OBS (Tiempo de Primera Obs, en español), en el archivo de datos de observación.

Pseudo-rango

El pseudo-rango (ρ) es la distancia desde la antena receptora a la antena del satélite, incluyendo las compensaciones del reloj en el receptor y en el satélite (y otros sesgos, como los retrasos atmosféricos). Esta cantidad es igual al producto de la velocidad de la luz en el vacío (c) y la diferencia del tiempo de recepción (hora del receptor) y el tiempo de transmisión (hora del satélite). Siendo la distancia (d) desde la posición del satélite transmisor hasta la posición de la antena del receptor en el momento de la transmisión, donde δt es el desplazamiento del reloj del receptor y δt_s el desplazamiento del reloj del satélite.

$$\rho = d + c * (\delta t - \delta t_s + otros_sesgos) \quad (3.1)$$

Para que el ρ refleje el comportamiento real del receptor y los relojes satelitales, este se almacena en unidades de metros.

Fase

La fase (ϕ) es la fase portadora medida en ciclos completos (en realidad es una medida de la frecuencia de pulso entre la portadora recibida de la señal del satélite y una frecuencia de referencia generada por el receptor). La fase cambia en el mismo sentido que el rango (Doppler negativo). Las observaciones de fase entre épocas deben conectarse, incluyendo el número entero de ciclos [Gurtner (2007)].

Ajuste en Tiempo Real del Reloj del Receptor

Si el receptor o el software del convertidor ajusta las mediciones utilizando el reloj del receptor derivado del tiempo real $dT(r)$, se debe mantener la consistencia de las 3 cantidades: fase, pseudo-rango y época, es decir, se debe aplicar la corrección del reloj del receptor a los 3 observables:

$$\text{Tiempo}(\text{corr}) = \text{Tiempo}(r) - dT(r)$$

$$\rho(\text{corr}) = \rho(r) - dT(r) * c$$

$$\phi(\text{corr}) = \phi(r) - dT(r) * \text{frec}$$

Nombramiento Convencional del Archivo

Para datos rastreados a 15 minutos, el formato convenido para nombrar a los archivos es: **nnnndddhmm.yy**, donde los 4 caracteres ‘nnnn’ contendrán el nombre o nemotécnico de la antena receptora, los 3 caracteres ‘ddd’ ocuparán el número del día de observación (001-365), ‘h’ contendrá la hora de observación con las letras del abecedario (a = 1ra hora: 00h-01h, b = 2da hora: 02h-03h, c = 3ra hora: 03h-04h... hasta la x = 24va hora: 23h-24h. Sin contar la ñ del español), los 2 caracteres ‘mm’ contendrán el rango de los minutos durante la observación (00-45), los 2 caracteres ‘yy’ contendrán dos dígitos del año (18, 19, 20) y el último carácter ‘o’ significa que el archivo es del tipo *observable*.

Estructura y Descripción del Encabezado

En la Figura 3.3, se observa el encabezado de un archivo RINEX 2.11. Este encabezado debe contener obligatoriamente el mismo etiquetado para que los programas puedan decodificar los registros almacenados en los archivos observables.

Algunos registros se describen en la siguiente lista de etiquetas:

- RINEX VERSION / TYPE: será el primer registro e indicará la versión del RINEX y el tipo de archivo.

```

2.11      Observation data   Mixed      RINEX VERSION / TYPE
BNC 2.11.0      ustecdata      08-Jan-20 08:59    PGM / RUN BY / DATE
RTCM_3 132.247.71.27/TGIG      COMMENT
TGIG      MARKER NAME
          OBSERVER / AGENCY
          REC # / TYPE / VERS
          ANT # / TYPE
          APPROX POSITION XYZ
          ANTENNA: DELTA H/E/N
          WAVELENGTH FACT L1/2
          # / TYPES OF OBSERV
          TIME OF FIRST OBS
          END OF HEADER
          0.0000      0.0000      0.0000
          0.0000      0.0000      0.0000
1         1
8         C1      P1      L1      S1      C2      P2      L2      S2
2020      1         8         9         0      0.0000000      GPS

```

Figura 3.3: Visualización del encabezado de un archivo RINEX.

- PGM / RUN BY / DATE: indicará el programa con el que se obtienen los datos, el nombre del cliente o usuario y la información temporal del inicio de mezclado o recepción de los datos.
- MARKER NAME: indicará el nombre o nemotécnico del receptor.
- WAVELENGTH FACT L1/2: este registro predeterminado debe preceder a todos los registros que definen los factores de longitud de onda para satélites individuales.
- # / TYPES OF OBSERV: indicará el número de observación por receptor y los tipos de observaciones.
- TIME OF FIRST OBS: indicará el tiempo inicial de la observación, es aquí donde comienza el registro de las observaciones.
- END OF HEADER: indicará el fin del encabezado.

Sección de Datos Recopilados

En la Figura 3.4, se observa la sección de datos recopilados, en donde las primeras líneas serán metadatos que indicarán: época del registro (fecha y hora), número de satélites observados en esa época y la lista de identificadores de los satélites.

Después de los metadatos, sigue la sección de observaciones, el cual puede considerarse como una tabla ordenada de acuerdo a la cantidad de satélites en sus filas y los códigos de observación en sus columnas (indicados en la etiqueta # / TYPES

OF OBSERV de la sección del encabezado). Cada observación será un valor de ρ para la frecuencia L1 (C1), un valor de ρ para la frecuencia L2 (P2), un valor de ϕ (L1 y L2) y un valor de intensidad de señal (S1 y S2). Cabe mencionar que cada línea de texto no puede almacenar más de 5 de estas secuencias, ya que cada línea del archivo de datos de observación tiene solo 80 caracteres de longitud [Pestana (2015)].

```

20 01 08 09 00 1.0000000 0 8G 2G29G13G12G19G25G15G 5
23212781.246 0.000 121983987.093 45.000 0.000
23212783.626 95052469.244 30.250
23342848.926 0.000 122667463.690 45.000 0.000
23342853.726 95585084.744 29.250
22383017.192 0.000 117623552.196 43.500 0.000
22383021.672 91654732.495 29.500
21284272.640 0.000 111849714.712 50.000 0.000
21284276.380 87155557.399 38.750
24769696.456 0.000 130165654.211 40.500 0.000
24769699.296 101427791.885 22.500
21944142.694 0.000 115317237.228 45.500 0.000
21944149.874 89857618.026 33.750
22680842.170 0.000 119188625.462 45.750 0.000
22680845.390 92874264.702 31.000
20726076.782 0.000 108916269.631 48.000 0.000
20726081.242 84869837.049 38.000
20 01 08 09 00 2.0000000 0 8G 2G29G13G12G19G25G15G 5
23212890.566 0.000 121984562.412 45.000 0.000
23212892.686 95052917.538 30.250
23342277.726 0.000 122664463.861 45.000 0.000
23342282.746 95582747.225 28.500
22382624.552 0.000 117621486.552 43.250 0.000
22382628.712 91653122.898 30.250
21284651.980 0.000 111851707.419 50.000 0.000
21284655.320 87157110.157 39.000
24770195.856 0.000 130168279.222 40.750 0.000
24770198.876 101429837.351 22.500
21944112.534 0.000 115317076.978 45.750 0.000
21944119.894 89857493.148 33.750
22680239.190 0.000 119185461.818 45.500 0.000
22680243.170 92871799.527 31.000
20726437.762 0.000 108918167.755 48.000 0.000

```

Figura 3.4: Visualización de la sección de datos recopilados de un archivo RINEX.

3.3. Actualización Anual del Modelo IRI95

El Modelo de la Ionósfera Internacional de Referencia de 1995 (IRI95, por sus siglas en inglés), almacena los parámetros del modelo empírico de la *Ionósfera* (véase Figura 3.5) que MAGIC utiliza para proporcionar el modelo de propagación para el estado en el Filtro de Kalman.

Es importante destacar que la actualización de este modelo, debe realizarse a finales de cada año en los archivos del código MAGIC, alojado en el clúster del Centro de Supercómputo de Clima Espacial (CESCOM) del LANCE; ya que el cálculo del TEC, lo realiza de acuerdo a los índices solares y magnéticos que usa para

la generación de los Mapas TEC. La fecha exacta en que debe realizarse el cambio, está indicada en el encabezado del archivo *ig_rz.dat* de cada año. El protocolo de esta actualización, consiste en los siguientes pasos:

- Primero, se debe realizar una copia de seguridad del archivo de índices de la versión anterior, localizado en la ubicación: `~/software/magic/matlab/model/` e ingresarlo a la carpeta: `~/../model/iribackup/`, donde AzTEC tiene los archivos de sus índices de años anteriores.
- Después, se debe buscar en el sitio: irimodel.org, el archivo de índices *ig_rz.dat* y descargarlo en su última versión.
- Finalmente, el archivo de índices debe agregarse a la carpeta: `~/../model/`, como se muestra en la Figura 3.6.

```

1,28,2019,
1,1958,11,2019,
165.8,
164.8,164.5,165.8,166.8,167.3,167.8,167.7,166.5,165.5,164.2,162.4,161.3,
160.7,159.2,156.5,153.2,149.5,146.2,144.1,143.4,141.5,138.8,136.5,133.8,
131.1,129.2,128.2,127.3,125.3,122.3,117.4,111.0,105.7,101.4,97.1,92.3,
87.8,83.7,78.5,73.2,68.7,63.6,58.8,55.9,54.7,53.6,52.5,51.2,
49.3,46.2,43.1,41.4,40.5,39.7,38.5,36.9,34.5,32.0,30.4,28.8,
27.1,26.0,25.1,23.8,22.8,22.0,21.0,19.8,19.1,18.8,17.8,16.3,
14.9,13.5,12.5,11.7,10.5,9.9,10.2,10.7,11.1,11.3,11.6,12.3,
13.3,14.3,15.0,15.8,16.9,17.2,17.7,18.7,19.7,20.9,22.9,25.2,
27.8,31.1,34.1,36.6,39.8,44.5,50.3,56.5,63.6,70.3,75.3,79.2,
82.3,85.7,90.4,95.6,99.5,102.5,105.5,107.5,107.6,106.7,106.5,107.6,
109.0,109.1,108.8,109.0,109.0,109.1,108.6,107.6,108.3,109.6,110.2,110.5,
111.1,112.4,112.8,111.8,111.2,111.3,112.1,113.5,113.9,114.0,115.5,116.9,
118.0,118.3,118.3,119.3,120.5,120.9,119.4,116.9,114.0,110.5,106.2,101.5,
96.9,92.4,87.6,82.3,77.5,73.7,70.7,68.6,68.8,70.1,70.8,71.5,
72.8,75.4,78.4,80.9,81.7,80.5,78.9,77.0,73.3,68.7,65.7,62.8,
58.9,53.9,49.8,46.6,43.4,40.3,37.5,34.6,32.3,31.0,29.6,28.5,
28.0,27.7,26.4,25.3,25.7,26.6,26.9,26.3,24.8,23.3,21.8,20.2,
18.6,18.0,18.3,17.9,16.4,14.8,13.3,12.3,12.1,12.5,12.9,13.0,
12.5,11.5,10.0,9.0,8.5,8.1,8.5,10.1,11.7,12.5,13.5,15.2,
17.2,19.0,20.7,23.1,26.2,29.5,33.5,38.5,44.4,50.7,56.6,62.5,
68.8,74.5,80.0,86.4,92.8,99.6,106.6,112.6,118.7,124.0,127.6,131.1,
134.3,137.7,141.5,145.0,148.7,152.1,154.1,154.9,155.0,155.2,156.3,157.7,
158.7,159.4,159.5,158.6,157.1,155.9,155.1,154.4,153.9,153.8,153.5,152.3,
-:***- ig_rz-backup2019.dat Top L29 (Fundamental)

```

Figura 3.5: Modelo IRI95 del 2019. AzTEC guarda una copia del modelo durante la actualización.

Una vez que se finaliza este proceso, el Filtro de Kalman dispondrá del modelo empírico de la *Ionósfera* actualizado. En la Figura 3.7, se puede observar el comportamiento del modelo empírico durante los días 23 al 25 de Enero de 2018, proyectado gracias al análisis de los valores de TECUs en los Mapas TEC creados por AzTEC.

```

ustecmaps@sun:~/software/magic/matlab/model$ ls
@IRI2012.zip          ccir20.asc          iri_test-1.out      mexIRI2011.zip
Contents.m           ccir21.asc          iri_test.for        rtdata
aareadme.txt         ccir22.asc          iri_test.log        ursi11.asc
apf107.dat           cira86.for          iri_test.m          ursi12.asc
apf107.dat_old01042017 compmodel.asv       iri_test.out        ursi13.asc
ccir11.asc           compmodel.m         iri_web.for         ursi14.asc
ccir12.asc           compmodel01.asv    iri_web.m           ursi15.asc
ccir13.asc           compmodel01.m      iribackup           ursi16.asc
ccir14.asc           data                irif13.for          ursi17.asc
ccir15.asc           fort.7              iris13.for           ursi18.asc
ccir16.asc           ig_rz.dat           irit13.for          ursi19.asc
ccir17.asc           iri2007             libg2c.so.0         ursi20.asc
ccir18.asc           iri2007.rar         libg2c.so.0.0.0    ursi21.asc
ccir19.asc           iri_test-1.log      mexIRI2011.F        ursi22.asc
ustecmaps@sun:~/software/magic/matlab/model$ █

```

Figura 3.6: Ubicación del archivo de índices 'ig_rz.dat' del Modelo IRI95.

3.3.1. Modelo IRI95

A partir del 23 de Enero de 2018 a las 19:15 UTC, AzTEC genera los primeros Mapas TEC de la *Ionósfera* sobre México, pero es hasta el 25 de Enero de 2018 (a las 19:15 UTC) cuando se establece la conexión con la red de estaciones GPS. Este cambio se ve reflejado en la Figura 3.7, donde se observa el inicio del sistema utilizando sólo datos del modelo empírico IRI95 hasta la conexión de los datos en Tiempo Real. También, se puede observar el comportamiento semi-senoidal del Patrón Día/Noche, donde los valores TEC incrementan entre las 11:00 y las 03:00 UTC durante el día, y entre las 04:00 y las 10:00 UTC durante la noche, con una diferencia de -5 en el horario de verano y de -6 en el resto de los días.

3.4. Filtro de Kalman

Objeto de investigación y aplicación en las áreas de navegación autónoma y asistida, en 1960, R. E. Kalman publicó una solución recursiva al problema de filtrado de datos discretos: el Filtro de Kalman. El Filtro de Kalman es un algoritmo predictor-corrector que proporciona un poderoso medio computacional (recursivo) para estimar el estado pasado, presente y futuro de un proceso, incluso desconociendo la naturaleza precisa del sistema modelado, utilizando una forma de retroalimentación en forma de mediciones [Kalman (1960)].

Las ecuaciones del Filtro de Kalman se dividen en dos grupos: 1. Las ecuaciones

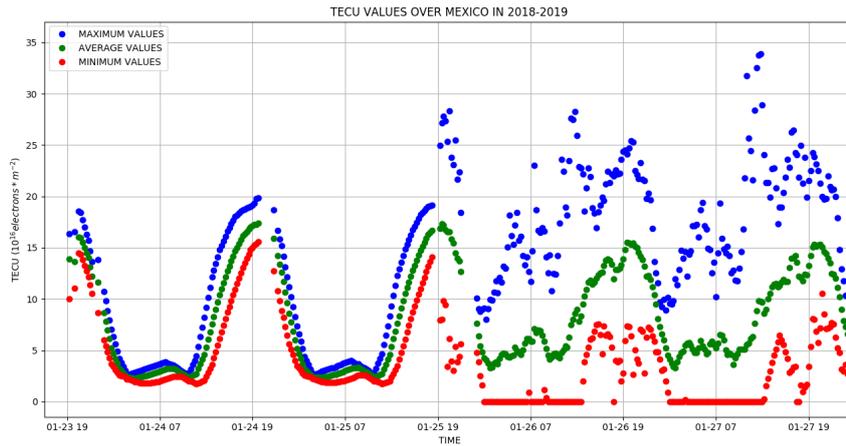


Figura 3.7: Gráfica de valores del TEC de los días 23 al 28 de Enero de 2018 en los mapas. En el eje X tenemos el tiempo de cada Mapa TEC al que se le calculó su valor máximo (azul), promedio (verde) y mínimos (rojo) generado cada 15 minutos; y en el eje Y, los valores de TECUs. Durante los días 23 al 25 de Enero, se puede observar el comportamiento del modelo empírico IRI95, luego, a partir de las 19:15 UTC del 25 de Enero de 2018, el comportamiento cambia debido a la conexión de los datos en Tiempo Real. [Imagen de Cortesía por el Dr. Victor De la Luz]

de actualización de tiempo (*time update equations*), son responsables de proyectar hacia adelante (temporalmente) el estado actual y las estimaciones de covarianza de error para obtener las estimaciones a priori para el siguiente paso de tiempo (predicción); 2. Las ecuaciones de actualización de medición (*measurement update equations*), son responsables de la retroalimentación, es decir, para incorporar una nueva medición a priori para obtener una estimación mejorada a posteriori (corrección) [Welch & Bishop (2006)] (véase Figura 3.8).

3.4.1. Implementación del Filtro de Kalman

El núcleo de procesamiento de US-TEC RT es MAGIC, el cual implementa el Filtro de Kalman, este proporciona un medio para actualizar de manera óptima una solución a un problema lineal de mínimos cuadrados combinando observaciones dependientes del tiempo y una estimación previa del modelo de solución. Las incógnitas, que en este caso representan el campo de densidad de electrones ionosféricos, se almacenan en el vector de estado x . Asociado con este vector hay una matriz de

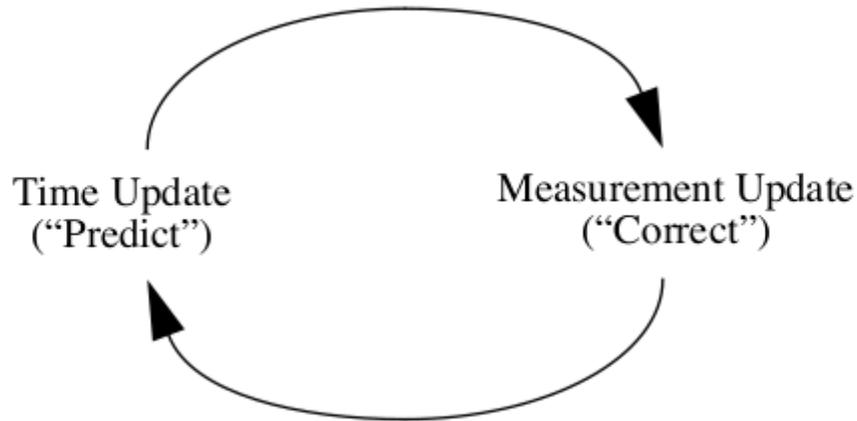


Figura 3.8: Ciclo del Filtro de Kalman. La actualización de tiempo proyecta la estimación del estado actual por adelantado. La actualización de la medición ajusta la estimación proyectada por una medición real en el momento. [Extraída de: Welch & Bishop (2006)]

covarianza P , que el Filtro de Kalman actualiza para cada iteración. P representa la incertidumbre en el estado.

Primero, el vector de estado x se proyecta hacia el futuro (el superíndice negativo implica valores anteriores) en:

$$x = Ax^- + B. \quad (3.2)$$

Las matrices A y B se generan a partir de las estimaciones de modelos anteriores del campo de densidad de electrones M , de la siguiente forma:

$$A_{ij} = (1 - \alpha)G_{ij}M_i^-/M_j^+ \quad (3.3)$$

$$B_i = \alpha M_j^+ \quad (3.4)$$

donde la matriz G representa la correlación entre los vóxeles (unidad cúbica que compone a un objeto tridimensional) vecinos en el área de la imagen y está definida por una función gaussiana. El parámetro α es una constante entre '0' y '1'. Con

‘0’, los gradientes espacio/temporales relativos en el modelo definen la proyección hacia adelante, y con ‘1’, la proyección hacia adelante del estado se convierte en la estimación del modelo. Típicamente α se establece en un valor de ‘0.1’, estableciendo que los gradientes espaciales y temporales relativos en el modelo dominen en la proyección del estado. El objetivo es proporcionar una forma de *regularización matemática* (proceso de introducir información adicional para solucionar un problema mal definido) que sea insensible a los errores sistemáticos en el modelo de fondo.

La siguiente etapa es la actualización del Filtro de Kalman, que consiste en proyectar la matriz de covarianza de error:

$$P = AP^-A^T + Q \quad (3.5)$$

donde la matriz Q de ruido de proceso, es definido como:

$$q = (M^+ + Ax^-)/2 \quad (3.6)$$

$$Q_{ij} = kG_{ij}q_iq_j \quad (3.7)$$

donde k es una constante, y G , como antes, define la correlación entre términos separados espacialmente. La matriz Q define la varianza como una fracción constante de un promedio del modelo de fondo y las estimaciones de estado proyectadas.

Dado un conjunto de observaciones integrales de línea, z , con covarianza R , e integrales de ruta definidas por H , la ganancia de Kalman viene dada por:

$$K = PH^t(HPH^T + R)^{-1} \quad (3.8)$$

Finalmente, usando la ganancia de Kalman, el vector de estado y su covarianza se actualizan:

$$x^+ = x + K(z - Hx) \quad (3.9)$$

$$P^+ = (I - KH)P. \quad (3.10)$$

3.4.2. Asimilación de Observaciones GPS

La fase observable ϕ_i , en la frecuencia i , se puede escribir como:

$$\phi_i = \rho/\lambda - I/\lambda_i f_i^2 - T/\lambda_i - n_i \quad (3.11)$$

Los cuatro términos aquí representan distancia geométrica, *Ionósfera*, *Troposfera* y la ambigüedad entera. Varias combinaciones lineales de las dos frecuencias son de utilidad en el procesamiento de datos GPS. La combinación libre de geometría, L4, viene dada por:

$$\phi_1 \lambda_1 - \phi_2 \lambda_2 = -I(1/f_1^2 - 1/f_2^2) - (\lambda_1 n_1 - \lambda_2 n_2) \quad (3.12)$$

L4 proporciona una estimación del sTEC ionosférico a lo largo de la ruta del receptor de satélite dentro de una constante desconocida. Cuando se calibra para las observaciones del código P, se obtiene una estimación del sTEC sujeto a sesgos de reloj del satélite/receptor y la ruta múltiple. Dada una estimación de los sesgos del reloj del satélite, los sesgos del receptor pueden resolverse en el Filtro de Kalman. Con suficientes observaciones, el error en la calibración de la ϕ al ρ debido a la ruta múltiple es despreciable [Spencer et al. (2004)].

3.5. MAGIC

La obtención de imágenes del campo de densidad de electrones ionosféricos de la Tierra se ha venido estudiando durante varios años. En los primeros trabajos

aplicaron métodos tomográficos a los datos obtenidos de los satélites, los cuales permitieron generar reconstrucciones bidimensionales. El más reciente, utiliza un enfoque del Filtro de Kalman, combinando datos de varias fuentes con estimaciones previas del modelo para obtener inversiones en cuatro dimensiones.

Este método utiliza diversos enfoques para encontrar una solución óptima a un ‘problema de mínimos cuadrados lineales’ poco restringido, un enfoque del método tomográfico que regulariza el ‘problema del inverso’, a menudo tomando la forma de relaciones de continuidad que definen la suavidad o la entropía de la solución en un rango de píxeles vecinos y el enfoque de los métodos de asimilación de datos, cuya regularización se proporciona en forma de una estimación previa del modelo de la solución junto con una estimación de su covarianza.

3.5.1. MAGIC/US-TEC RT

En MAGIC y US-TEC RT, el Filtro de Kalman de ambos códigos, utiliza el Modelo IRI95 para propagar el estado y su matriz de covarianza asociada al siguiente conjunto de observaciones, cada 15 minutos. La propagación directa del estado se construye a partir de una combinación lineal ponderada de los gradientes espaciales/temporales relativos y una estimación absoluta de IRI95 [Billitza (1997)]. MAGIC, con su configuración operativa US-TEC RT, donde el 90 % de la propagación del estado se basa en el cambio predicho por IRI95 y el 10 % de este estado propagado consiste en la predicción de climatología directamente de IRI95, el cual supone que las correlaciones entre las cuadrículas vecinas en las direcciones de latitud y longitud, donde la cantidad de correlación disminuye con la distancia, sobre la base de una función Gaussiana. No se supone covarianza, por lo tanto no hay correlación en la dirección radial. Los errores del modelo también se incluyen en la propagación de la covarianza del estado.

Entre US-TEC RT y MAGIC, las principales diferencias son: MAGIC/US-TEC RT es un sistema que opera con datos obtenidos en Tiempo Real y MAGIC puede

aplicarse a conjuntos de datos anteriores. Además, al ser la versión de análisis, el número de estaciones disponibles para MAGIC puede ajustarse [Minter et al. (2007)].

3.5.2. Interpolación

Generar una tomografía ionosférica, utiliza un enfoque basado en el mapeo de la densidad de electrones como un vector de estado en un espacio definido por conjuntos de Funciones Ortonormales Empíricas (EOF, por sus siglas en inglés). Estos conjuntos básicos consisten en armónicos esféricos para las variaciones de superficie y un conjunto de EOF para el perfil radial, obtenidas del Modelo IRI95 (véase Figura 3.10). El mapeo mejora significativamente la capacidad del Filtro de Kalman para las variaciones de imagen en el perfil de densidad electrónica [Araujo-Pradere et al. (2007)]. En consecuencia, la ionosfera se construye a partir de un conjunto de EOF que son discretos en latitud y longitud.

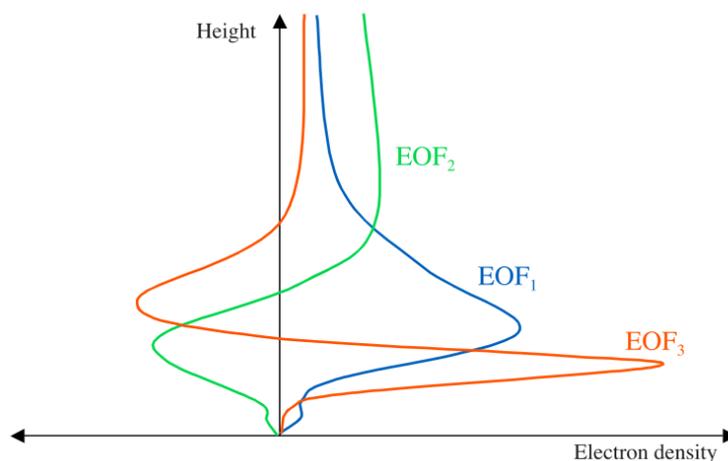


Figura 3.9: Ejemplo de EOF. Estos EOF se generaron aplicando una descomposición de valores singulares a un conjunto de perfiles de modelo generados por IRI95. El término dominante EOF_1 , representa un perfil ionosférico medio. Del EOF_2 al EOF_3 , disminuyen gradualmente en importancia, permitiendo que el perfil se aparte de la media. Por lo general de 2 a 3 EOF son suficientes cuando se utilizan solo datos basados en Tierra. [Extraída de: Fuller-Rowell et al. (2006)]

La asignación del problema implica la asignación de todos los términos en el Filtro de Kalman como:

$$x \rightarrow M^T x \quad (3.13)$$

Proyección hacia adelante del mapa, A

$$A \rightarrow M^T A M \quad (3.14)$$

Mapa de covarianza de error, P

$$P \rightarrow M^T P M \quad (3.15)$$

Ruido del proceso de erro de mapa, Q

$$Q \rightarrow M^T Q M \quad (3.16)$$

Matriz de observación del mapa, H

$$H \rightarrow H M \quad (3.17)$$

La detección de deslizamiento de ciclo y la nivelación de ϕ a ρ , deben realizarse para todos los datos disponibles durante las últimas horas para cada actualización del Filtro de Kalman. Los datos son procesados mediante un formato de almacenado que el Filtro de Kalman puede leer, obteniendo como uno de los productos de salida por parte del software, archivos ASCII con el vTEC y el sTEC de cada satélite en una matriz bidimensional de valores (en unidades de 0.1 TEC) para una cuadrícula de puntos en todo el territorio continental de los EE. UU. [Fuller-Rowell et al. (2006) y Mitchell & Spencer (2002)].

Análisis de TEC Diferencial

Si los datos GPS son adquiridos continuamente por el enlace receptor-satélite sin deslizamientos de ciclo (interrupción en el enganche del receptor en las señales

```

99905 -1300 -1290 -1280 -1270 -1260 -1250 -1240 -1230 -1220 ...
200 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ...
210 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ...
220 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ...
230 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ...
240 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ...
250 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ...
260 0 0 0 0 0 0 0 0 432 ...
270 516 504 493 481 470 459 449 439 429 ...
280 513 501 489 478 467 456 445 435 425 ...
...
...
...
99906 -1300 -1290 -1280 -1270 -1260 -1250 -1240 -1230 -1220 ...
200 253 249 245 241 238 234 230 227 224 ...
210 241 237 234 231 227 224 221 218 216 ...

```

Figura 3.10: Ejemplo de datos STEC en ASCII. [Extraída de: Mitchell & Spencer (2002)]

de radio del satélite), las estimaciones del TEC diferencial de una época a otra, se pueden determinar con una precisión de menos de 0.01 TECUs. Este cálculo es útil para estimar la incertidumbre en los mapas de trayectoria vertical e inclinada de US-TEC RT. Al integrarse a través de mapas de inversión en dos momentos diferentes, la diferencia en el TEC inclinado se puede comparar con la diferencia directa de TEC derivada del archivo de datos RINEX original.

La diferencia TEC (ϵ) entre observaciones y US-TEC, se puede expresar como:

$$\epsilon = \delta(\Delta\phi_{GPS}) - \delta(\Delta\phi_{USTEC}) \quad (3.18)$$

en unidades TEC, donde $\Delta\phi$ es la combinación de la fase diferencial entre frecuencias duales: L1 y L2; como se expresa en unidades TEC y $\delta(\Delta\phi)$ es la diferencia en la fase diferencial entre dos épocas a lo largo del enlace satélite-receptor.

Estimación del Error

La estimación del TEC es relativa, de modo que a medida que la diferencia de tiempo entre ambas señales tiende a cero, la diferencia de TEC [$\delta(\Delta\phi)$] tenderá a cero y la diferencia de TEC (ϵ) también tenderá a cero.

Debido a ello, la estimación del error final del nivel de saturación (la cual refleja una estimación promedio del día), no se producirá saturación, implicando que los

valores están sesgados sistemáticamente a unas pocas horas, por lo que no pueden estimarse con este método, ya que para una separación de tiempo pequeña, las diferencias TEC en la inversión $\delta(\Delta\phi_{USTEC})$ se correlacionarán (es decir, la *Ionósfera* puede ser sistemáticamente baja o alta para ambas señales), por lo tanto los errores se cancelarán.

3.6. Otras Aproximaciones Usadas para el Cálculo de TEC en Tiempo Real

3.6.1. ROB-TEC

Con la densa red GNSS permanente de EUREF, el ROB (Observatorio Real de Bélgica o Royal Observatory of Belgium, en inglés) aprovecha los retrasos medidos durante la transmisión de sus señales para monitorear la *Ionósfera* sobre Europa, generando productos derivados de este. Uno de los principales son los mapas ROB-TEC cercanos al tiempo real, los cuales se publican cada 15 minutos con una resolución espacial de 0.5° de longitud x 0.5° de latitud y con una latencia de ≈ 3 minutos, utilizando el modelo del software ROB-IONO para generar los mapas.

El STEC entre un satélite (i) y un receptor (p) se puede recuperar utilizando la combinación de medidas de un código sin geometría en dos frecuencias diferentes. Para las mediciones usadas en la constelación GPS, la estimación se realiza a partir de los códigos P(Y) en L1 y L2 [Hernández-Pajares et al. (2007) y Bergeot et al. (2011)] de la siguiente forma:

$$(sTEC)_p^i = \frac{f_1^2 \cdot f_2^2}{40.3(f_1^2 - f_2^2)} \times \{[(\tilde{P}_2)_p^i - (\tilde{P}_1)_p^i] - c \cdot [DCB_p + DCB^i]\}, \quad (3.19)$$

donde el sTEC depende de las dos frecuencias portadoras GPS f_1 y f_2 , los códigos observables de fase suavizada \tilde{P}_2 y \tilde{P}_1 , el DCB del satélite i y del receptor p . El DCB

es la diferencia entre el retraso del hardware de la señal P_1 y P_2 . Los DCB del satélite, representan los retardos de la señal dependientes de la frecuencia en el hardware del satélite, mientras que los DCB de los receptores representan los retardos de señal dependientes de la frecuencia en la estación terrestre (antena y receptor). Es importante mencionar que los DCB de satélite y receptor son los principales errores en la estimación del sTEC utilizando datos GPS con un efecto combinado del orden de 10 nS. Si no se tiene en cuenta, los DCB provocarían errores superiores a 20 TECU en la estimación del sTEC. Por lo tanto, es necesario estimarlos con precisión y reducir la correlación con la estimación de sTEC en la ecuación [Bergeot et al. (2014)].

Para la entrega de mapas ROB-TEC sobre Europa, el software ROB-IONO divide el procesamiento en dos pasos:

1. Estima el DCB del receptor con una estrategia rápida de post-procesamiento, utilizando un modelo ionosférico a priori basado en datos observados que toma de los archivos IONEX [Schaer et al. (1998)] rápidos, distribuidos por CODE. Este modelo se utiliza para extraer el vTEC para un par receptor-satélite dado una hipótesis de capa delgada ionosférica. El vTEC es proyectado como sTEC con la siguiente función de mapeo:

$$(vTEC)_p^i = (sTEC)_p^i \times \sqrt{1 - \left(\frac{R_e}{R_e + H} \times \cos\theta\right)^2} \quad (3.20)$$

donde R_e es el radio de la Tierra, H es la altura de la capa delgada que representa la *Ionósfera* (450 km) y θ es la elevación del satélite i con respecto al receptor p .

2. Estimar el VTEC cercano al tiempo real usando la red GNSS permanente de EUREF cada 30 segundos durante un lapso de 15 minutos, considerando ninguna interrupción en la transferencia de datos. Luego, la mediana de los VTEC se estima para sub-intervalos de 5 minutos junto con sus desviaciones estándar. Esto permite reducir la redundancia de datos a lo largo de la ruta del satélite y optimizar la distribución de datos VTEC para la interpolación. El resultado son $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ de

VTEC y cuadrículas de variabilidad VTEC extendidas que van desde los -15° a 25° de longitud y de 35° a 62° de latitud proyectados en formato de imágenes (véase Figura 3.11) e IONEX cada 15 minutos.

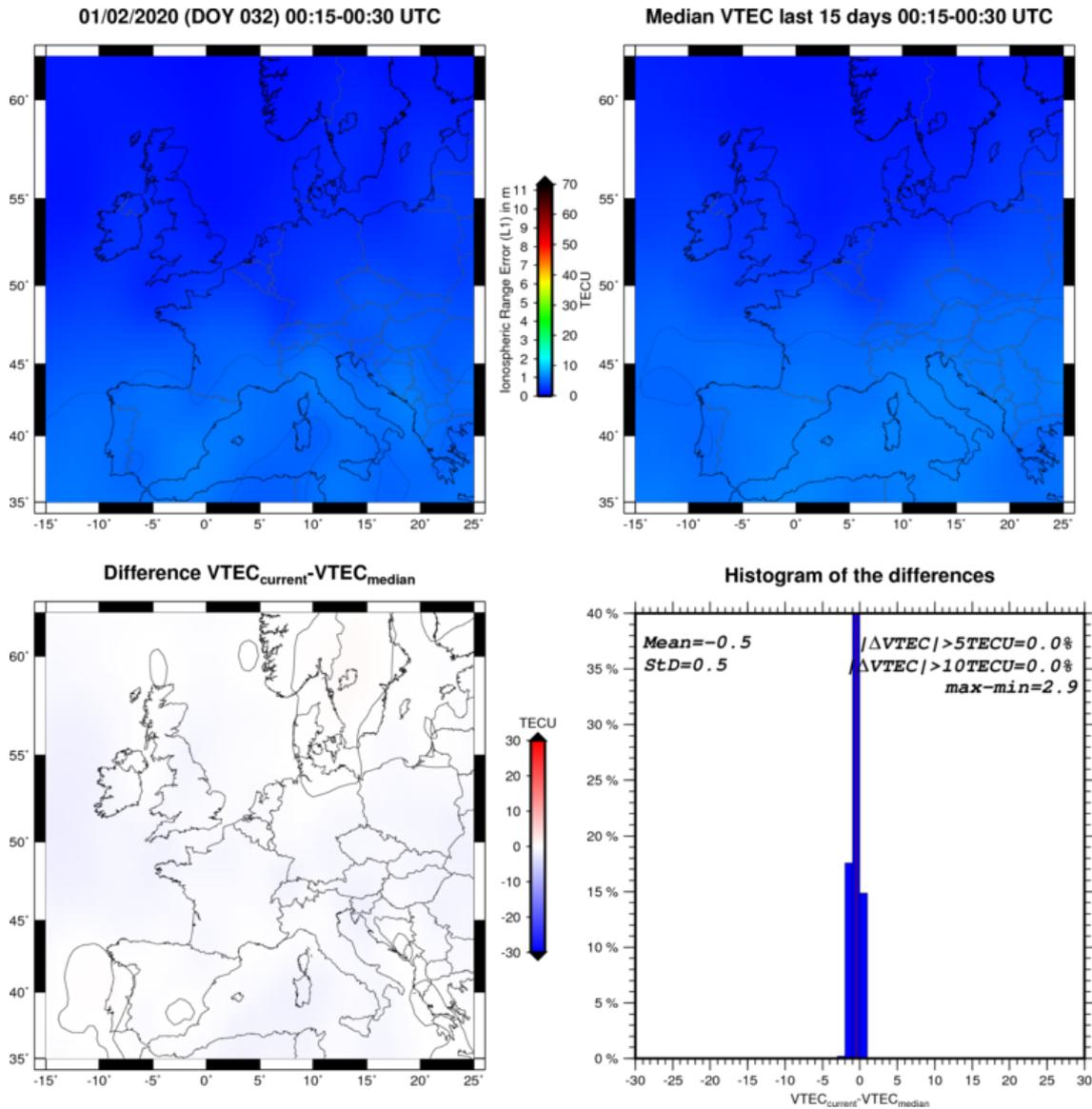


Figura 3.11: (Arriba izquierda) Mapa ROB-TEC. (Arriba Derecha) Mediana VTEC de 15 días pasados. (Abajo izquierda) Diferencia de mapas superiores. (Abajo derecha) Porcentajes de diferencia de rangos entre los mapas superiores y estadísticas.

3.6.2. My-Iono Service

En el 2015, la ANGKASA (Agencia Nacional Espacial de Malasia o National Space Agency of Malaysia) en colaboración con la UTM (Universidad Tecnológica

de Malasia o Universiti Teknologi Malaysia), ha desarrollado durante 10 años (2004 a 2013) el primer sistema de monitoreo ionosférico y del clima espacial cercano a tiempo real para Malasia: My-Iono. Basado en un sistema que ejecuta un algoritmo llamado EIX (Índice de Ionósfera Ecuatorial o Equatorial Ionosphere Index) el cual calcula los índices ecuatoriales de la *Ionósfera* utilizando datos empíricos GPS de TEC, obtenidos de la red NRC-net de 78 estaciones My-RTKnet al rededor de Malasia. El servicio de My-Iono consiste en generar mapas TEC verticales con una latencia de ≈ 2 minutos sobre Malasia e información sobre el estado ionosférico actual.

El diseño y arquitectura de My-Iono se integra de 4 sub-sistemas principales [véase Figura 3.12]: 1. recopilación de datos desde el NRC-net; 2. Centro de procesamiento My-Iono y mapeo ionosférico cercano a tiempo real; 3. basados de datos y 4. publicación del producto en la web de My-Iono.

El desarrollo de My-Iono consta de 3 pasos:

- I. Derivación TEC cercano a tiempo real. El valor TEC cercano a tiempo real se deriva de las mediciones GPS de doble frecuencia de cada estación CORS (Estación de Referencia de Operación Continua o Continuously Operating Reference Station) de Malasia. Se registran las lecturas TEC en tiempo real de CORS.
- II. Umbral de perturbación ionosférica. Se utilizan dos tipos de umbrales 1. el límite anual que adquirió datos empíricos del año 2004 al 2013; 2. el límite de umbral mensual de funcionamiento. El TEC_{lim} denota un límite umbral empíricamente definido de perturbación ionosférica adecuado para Malasia.
- III. Formulación del índice de ionósfera ecuatorial (EIX). El EIX se calcula en función del gradiente (Norte-Sur) mediante el uso de regresión lineal de la variación espacial regional $vTEC$ que se puede expresar matemáticamente como:

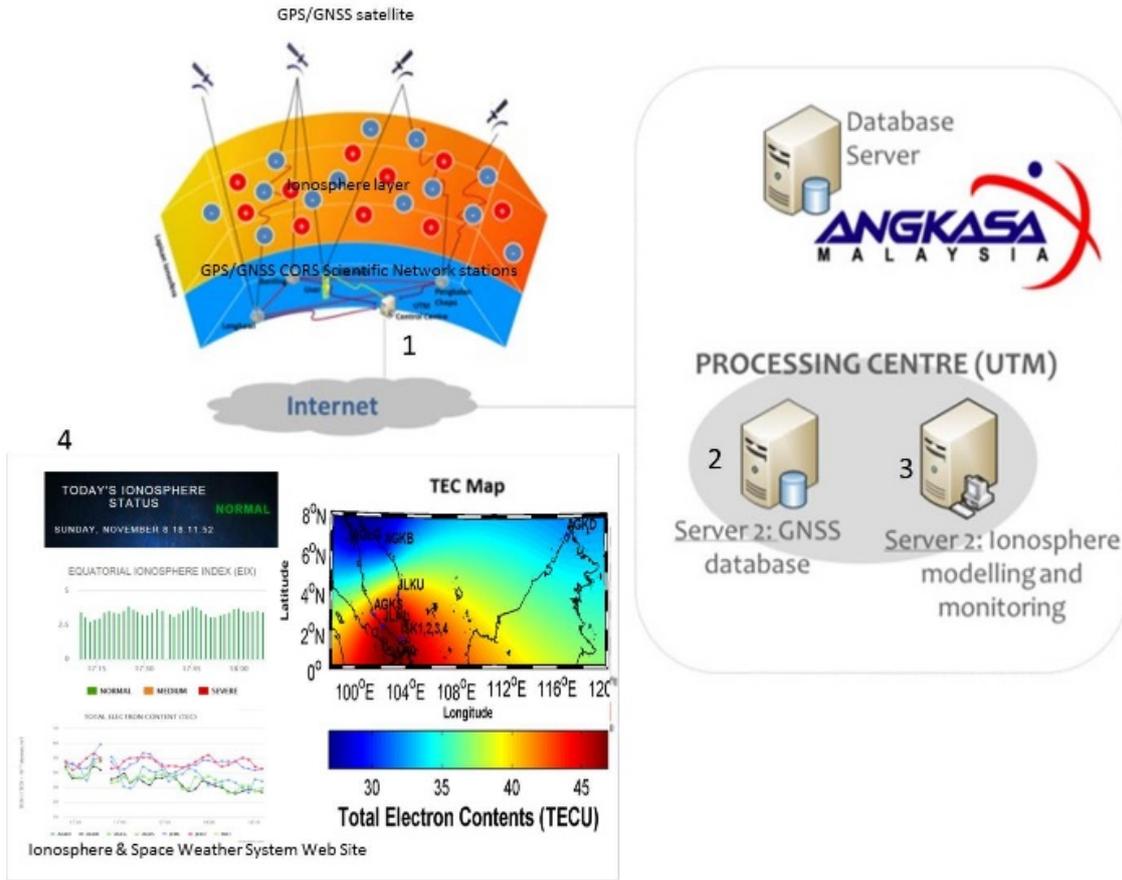


Figura 3.12: Servicio de My-Iono y distribución de sus 4 sub-sistemas. [Extraída de: Bhoo-Pathy et al. (2019)]

$$vTEC_{j(\overline{Northing})}^{t0} = \alpha + (\beta \times (\overline{Northing})) \quad (3.21)$$

donde α y β :

$$\alpha = \overline{vTEC} - (\beta \times (\overline{Northing})) \quad (3.22)$$

$$\beta_n = \frac{\sum_{j=1}^n (Northing_j - \overline{Northing})(vTEC_j - \overline{vTEC})}{\sum_{j=1}^n (Northing_j - \overline{Northing})^2} \quad (3.23)$$

donde n es el número de cuadrícula de línea en dirección latitudinal, j es cuadrícula de puntos en la línea n , $\overline{Northing}$ es el valor promedio de $Northing_j$, $vTEC_j$ es el VTEC para cada cuadrícula de puntos en la línea n , \overline{vTEC} es el valor promedio

de $vTEC_j$ en la línea n , $vTEC_{j(\overline{N}orthing)}^{t0}$ es la media VTEC sobre la región, y β_n es la pendiente \overline{vTEC} para cada línea. A partir de la ecuación 3.23, el EIX puede calcularse con la siguiente expresión matemática:

$$EIX = [(vTEC_{j(\overline{N}orthing)}^{t0}) \times (\frac{1}{vTEC_{lim}}) \times 10] \quad (3.24)$$

donde $vTEC_{lim}$ es el doble del promedio vTEC durante 10 años de datos empíricos de TEC. En este proyecto, el vTEC promedio del pos-procesamiento bernés de 10 años es 74.4 TECU. El EIX se escala de 1 a 10 (véase Figura 3.13) para actuar como indicador que describa las condiciones de la *Ionósfera* en el área [Bhoo-Pathy et al. (2019)].



Figura 3.13: Escalas: Normal, Medio y Severo de EIX para el servicio My-Iono que informa el estado ionosférico actual sobre Malasia. [Extraída de: Bhoo-Pathy et al. (2019)]

Capítulo 4

Instrumentación

En este capítulo, se describen las redes de instrumentación desarrolladas como fuentes de datos para el estudio y monitoreo de los procesos en la Tierra y atmosféricos, la cual está constituida por la red de receptores/estaciones GPS del SSN y la TLALOCNet, cuyas observaciones generan mediciones espaciales y temporales precisas para estimar el retraso durante la transmisión de los sistemas GNSS [SSN (2020) y UNAVCO (2020a)].

4.1. Red de Estaciones del SSN

Desde 1992, el Instituto de Geofísica de la UNAM comenzó a establecer una red GPS en México, la cual sigue en crecimiento continuo y modificándose de acuerdo al desarrollo y crecimiento del sistema GPS. Debido a que desde un inicio sólo se contemplaban estaciones temporales, no fue hasta 1997 cuando se instaló la primer estación permanente, localiza en el poblado de Cayaco, Guerrero. En la actualidad, la red de banda ancha del SSN está distribuida en toda la República Mexicana para el monitoreo continuo de los fenómenos sísmicos. Está integrada por 63 Observatorios Sismológicos Estándar (véase Figura 4.1), además, cuenta con 43 sistemas GNSS para el monitoreo del desplazamiento. Los observatorios se localizan primordialmente en las costas del océano Pacífico, golfo de México y eje neovolcánico [Pérez-Campos

et al. (2018)].

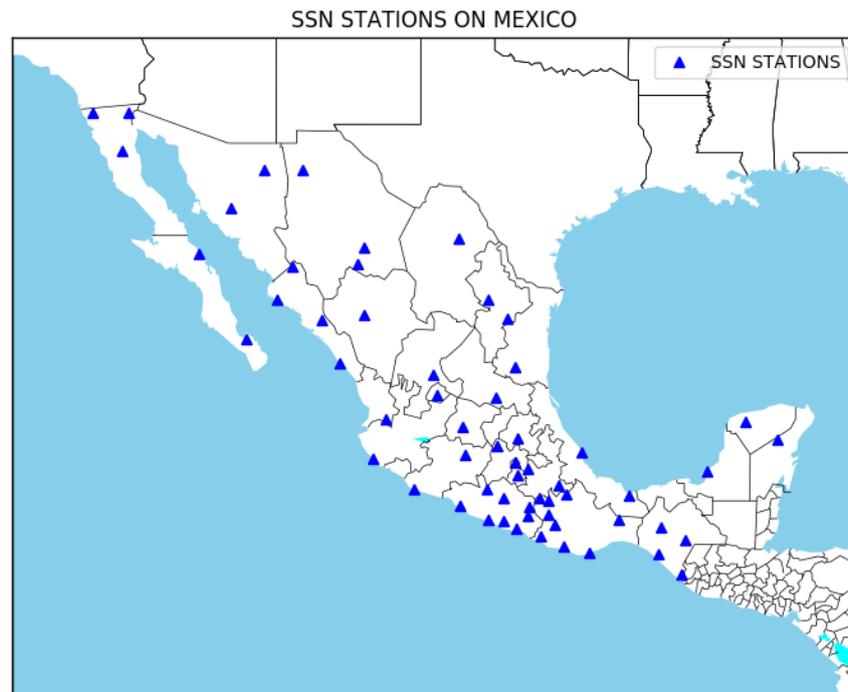


Figura 4.1: Red de estaciones GPS del SSN.

El GNSS tiene la capacidad de proporcionar una localización espacial y temporal precisa (desplazamiento), recibiendo radio señales de las diferentes constelaciones satelitales en los receptores, por medio de las antenas de alta precisión, para el cálculo de estas posiciones.

La parte de conversión analógica/digital se realiza a través de los digitalizadores de 24 bits y 6 canales digitales, con capacidad de muestreo y procesamiento digital de la señal, considerando como mínimo doble frecuencias.

Todos los observatorios, además, cuentan con un reloj GPS, independiente del sistema GNSS, que permite obtener una referencia de tiempo con precisión, el cual es almacenado junto con la información sísmica.

En la Tabla A.1 (Apéndice A), se enlistan todas las estaciones GPS pertenecientes al SSN.

4.2. Red de Estaciones de la TLALOCNet

La UNAVCO, financiado por la NSF (Fundación Nacional de Ciencia o National Foundation of Science), desarrolla en México una red de GPSs de transmisión continua en tiempo real, de baja latencia y un conjunto de sensores meteorológicos para la investigación atmosférica, climática y sismotectónica en las Américas: TLALOCNet, con una densidad de 36 estaciones con receptores GPS modernos (véase 4.2), sensores meteorológicos y recintos para llevar la red completa a los estándares de las otras redes GPS de geodesia tectónica [Cabral-Cano et al. (2018)].



Figura 4.2: Red de estaciones GPS de TLALOCNet.

Los datos de TLALOCNet están disponibles de forma abierta y gratuita a través de los servicios web de UNAVCO. En la Tabla A.2 (Apéndice A) se enlistan todas las estaciones GPS pertenecientes a TLALOCNet.

Capítulo 5

AzTEC

En este capítulo, se describe el primer producto de Clima Espacial que estima el retraso de las señales GPS mediante el cálculo del TEC, el cual utiliza los datos observacionales en Tiempo Real de la red de estaciones GPS en México. Varios estudios han demostrado que el TEC depende en gran medida de la actividad solar [da Rosa et al. (1973), Soicher (1988) y Jakowski et al. (1991)], por lo tanto, el monitoreo ionosférico con Mapas TEC cercanos a Tiempo Real, nos permite contar con una herramienta para observar el comportamiento en el ambiente atmosférico sobre nuestro país.

AzTEC utiliza un modelo basado en la asimilación de datos observacionales en Tiempo Real, el cual acopla a US-TEC RT con la red de estaciones GPS de doble frecuencia del SSN y de TLALOCNet en México, obteniendo los datos observacionales en Tiempo Real, los cuales son almacenados en los archivos RINEX y procesados en un tiempo no mayor a 10 minutos. En lapsos de 15 minutos, AzTEC publica un Mapa TEC con las condiciones del TEC en ese momento de la *Ionósfera* sobre el territorio de México. La implementación del código para desarrollar AzTEC y toda la cadena de procesamiento de datos, fue desarrollado por el Dr. Victor De la Luz [De la Luz et al. (2018)], encargado del Centro de Supercómputo de Clima Espacial (CESCOM) del LANCE, con el apoyo del equipo de trabajo de estudios ionosféricos:

el Dr. Mario Rodríguez, académico de la ENES Morelia, UNAM y la Dra. Esmeralda Romero, académica de la UANL.

5.1. Modificaciones adhoc en US-TEC RT

US-TEC RT, está conformado por un conjunto de subrutinas¹ que constituyen a MAGIC, cuya asimilación de datos es realizada por el Filtro de Kalman.

En la Figura 5.1, se observan las subrutinas que MAGIC utiliza para su ejecución. A continuación, se describe la gestión del código al inicializar el proceso:

```

ustecnaps@sun:~/software/matlab$ ls
#defgrid.m#      ddiff.m          iridemo.m        sitedemo.m
#plotsciemex.m# defgrid.asv      libg2c           slanttec.m
#rt.m#          defgrid.m        matrix.txt       startup.m
Contents.m      defgrid.m_old    multipath.m      startup.m~
animsect.m     errorstat.m      name.sh          storn.m
batchdd.m      example.m        packing.m        svtest.m
batchgps.m     ftp.aiub.unibe.ch pathdef.m        testgeo.m
batchigs.m     ftp.unibe.ch     pathdef.m_old   trough.n
batchlon.m     geodesy.noaa.gov plotsciemex.m   untitled.fig
batchngs.m     getcors.m        prueba           us.m
chapman.m      getkp.m          rt.m            usdd.m
complan.m     gulpath.m        rtdata          world.m
data          iono.m           scheme.m        www.veso.unam.mx
ustecnaps@sun:~/software/matlab$

```

Figura 5.1: Lista de subrutinas que constituyen a MAGIC, el cual fue escrito en el lenguaje de programación MATLAB.

Primero, la subrutina *rt.m* es el punto de entrada al cálculo del TEC en tiempo real (véase Figura 5.2), en él, el parámetro `RT.RINEXPath` indica el camino a la ubicación de los archivos observables RINEX, para AzTEC, se modificó a la ubicación de los archivos que almacenan los datos de la red de estaciones de México en tiempo real, ubicados en el clúster del CESCO. Es importante mencionar que el Repositorio Institucional de Clima Espacial (RICE) también maneja una copia de estos datos a manera de respaldo.

Luego, con el parámetro `Param.Grid`, el cual llama a la subrutina *defgrid.m*, para utilizar los datos geodésicos con la información de las cuadrículas y dimensiones globales. Desde `Param Grid` se llama al parámetro `CHILAQUIL_3D` (véase Figura

¹Las subrutinas son secuencias de instrucciones que se invocan desde un programa para ejecutar una tarea.

```

% Path of current RINEX files
%RT.RINEXPath = './rtdata/';
RT.RINEXPath = '/vol1/ssn/rt/'

% FTP path and name of SP3 orbit files (see filename)
%RT.SP3Path = 'igsb.jpl.nasa.gov/igsb/product/{GPSW}/igu{GPSW}{GPSD}_{HH}.sp3.Z';
RT.SP3Path = 'garner.ucsd.edu/pub/products/{GPSW}/igu{GPSW}{GPSD}_{HH}.sp3.Z';
% RT.SP3Path = 'lox.ucsd.edu/pub/products/{GPSW}/igu{GPSW}{GPSD}_{HH}.sp3.Z';

% HTTP path and name of satellite biases (see filename)
%RT.BiasPath = 'www.aiub.unibe.ch/download/CODE/{YYYY}/P1P2{YY}{MM}_ALL.DCB.Z';
RT.BiasPath = 'ftp.aiub.unibe.ch/CODE/{YYYY}/P1P2{YY}{MM}_ALL.DCB.Z';
% Kalman filter processing parameters (see structures)
Param.OutPath = './data/{YYYY}/{DD}{MON}{HRMN}/{DD}{MON}{HRMN}';
%Param.Grid = defgrid('CHILAQUIL_3D'); % Define integration grid
Param.Grid = defgrid('CHILAQUIL_3D'); % Define integration grid
Param.Grid = intgrid(Param.Grid); % Initialise the grid
Param.Time = nowut+RT.dt; % Define start time and interval, ignored
Param.NumEOF = 3; % Number of EOF's
Param.PowEOF = 0.1; % Power law for EOF singular weights

```

Figura 5.2: Código que inicia todo el proceso para el cálculo del TEC en los mapas. En él, existen parámetros que se configuraron para la creación de los Mapas TEC en México.

5.3), el cual contiene la definición de la cuadrícula (malla de resolución) del territorio de México en la estructura global.

```

elseif strcmp(ID,'3D_US_CALI') % High res 3D grid for US
    Grid.RadMin = Re+80E3; Grid.RadMax = Re+1400E3; Grid.RadInc = 25E3;
    Grid.LatMin = 25*p; Grid.LatMax = 52*p; Grid.LatInc = .5*p;
    Grid.LonMin = -140*p; Grid.LonMax = -100*p; Grid.LonInc = .5*p;
elseif strcmp(ID,'3D_US_UH') % Ultra-high res 3D grid for US
    Grid.RadMin = Re+80E3; Grid.RadMax = Re+1400E3; Grid.RadInc = 25E3;
    Grid.LatMin = 10*p; Grid.LatMax = 60*p; Grid.LatInc = 1.0*p;
    Grid.LonMin = -150*p; Grid.LonMax = -50*p; Grid.LonInc = 2.0*p;
elseif strcmp(ID,'3D_US_TEC') % Ultra-high res 3D grid for US
    Grid.RadMin = Re+80E3; Grid.RadMax = Re+1400E3; Grid.RadInc = 25E3;
    Grid.LatMin = 10*p; Grid.LatMax = 60*p; Grid.LatInc = 1.0*p;
    Grid.LonMin = -150*p; Grid.LonMax = -50*p; Grid.LonInc = 2.0*p;
% elseif strcmp(ID,'3D_US_CALI') % Ultra-high res 3D grid for US
% Grid.RadMin = Re+80E3; Grid.RadMax = Re+1400E3; Grid.RadInc = 8E3;
% Grid.LatMin = 10*p; Grid.LatMax = 60*p; Grid.LatInc = 1.0*p;
% Grid.LonMin = -130*p; Grid.LonMax = -90*p; Grid.LonInc = 1.0*p;
elseif strcmp(ID,'3D_US_COSMIC') % Ultra-high res 3D grid for US
    Grid.RadMin = Re+80E3; Grid.RadMax = Re+1700E3; Grid.RadInc = 25E3;
    Grid.LatMin = 10*p; Grid.LatMax = 60*p; Grid.LatInc = 1.0*p;
    Grid.LonMin = -140*p; Grid.LonMax = -60*p; Grid.LonInc = 4.0*p;
elseif strcmp(ID,'CHILAQUIL_3D') % Ultra-high res 3D grid for US
    Grid.RadMin = Re+80E3; Grid.RadMax = Re+1400E3; Grid.RadInc = 25E3;
    Grid.LatMin = 10*p; Grid.LatMax = 35.5*p; Grid.LatInc = 1.5*p;
    Grid.LonMin = -120*p; Grid.LonMax = -84*p; Grid.LonInc = 4.0*p;

```

Figura 5.3: Esta subrutina posee las configuraciones de las mallas de resolución espacial para cada región del planeta.

Después, en el parámetro Param.NumEOF, debe de indicarse el número de EOF obtenidas del Modelo IRI95. Fuller-Rowell et al. (2006) indica que entre 2 a 3 EOF son suficientes cuando se utilizan solo datos basados en Tierra.

En la Figura 5.4, se observa el parámetro Param.Model.Type, el cual no tiene modificaciones, pero es importante mencionar que es aquí donde se indica que el Modelo IRI95, será usado para el Filtro de Kalman.

En el parámetro RT.Levels, se indica el intervalo del escalado de contorno de

colores que contendrán los valores de TECUs, indicando el comportamiento de la *Ionósfera* en los mapas.

Finalmente en las variables `RT.Lat` y `RT.Lon`, se definen las coordenadas para la cuadrícula del sTEC.

```

Param.Bias.P = 5; % Bias error, TECU
Param.Bias.Q = 5; % Bias prediction error, TECU
Param.Model.Type = 'IRI95'; % Model type for filter
Param.Truth = []; % Truth model to replace input data, [] none

% Set plotting options
Lat = Param.Grid.LatAxis;
Lon = Param.Grid.LonAxis;
RT.Camera = [Lat(1),Lat(end),Lon(1),Lon(end)]; % Plotting camera settings, see earth.m
RT.Levels = [0:1:60]; % Non-linear contour levels, TECU
RT.dlevels = [-10:3:10]; % IRI difference levels (TECU)
RT.elevels = [0:0.1:2]; % Error levels (TECU)

% Set vertex coordinates for slant TEC product
RT.Lat = [10:2.5:35]; % Vertex latitudes (degrees)
RT.Lon = [-120:1.4:-85]; % Vertex longitudes (degrees)
RT.GridLat = [10:1.25:35]; % Vertex latitudes (degrees)
RT.GridLon = [-120:1.4:-85]; % Vertex longitudes (degrees)
%size(RT.GridLon)
-----
diary(filename('./data/{TIME}.log',nowut)); % Enable log file
try
    rtprocess; % Start real-time process

```

Figura 5.4: Algunos parámetros del código `rt.m` son fundamentales para la creación de los Mapas TEC. En esta sección del código, se encuentran los parámetros de la 2da malla de interpolación que AzTEC usa para mapear el TEC calculado de la 1er interpolación.

5.2. Configuraciones para México

Sergeeva et al. (2018) describe que la resolución espacial para generar el mapeo TEC global usada por el IGS es de 5° de longitud por 1.5° de latitud, además, Takahashi et al. (2016) sugiere cubrir mayormente las regiones, dependiendo de la densidad de estaciones GPS sobre estas. Al recurrir a un mayor número de observaciones en una región determinada, el mapeo TEC aumenta, mejorando la precisión de los valores del TEC, y por ende, la resolución espacial y temporal de los mismos.

Actualmente, las dimensiones de la cuadrícula que fueron modificadas como parte de la 2da malla de resolución para el territorio de México son: **-120° a -84° de longitud** y de **10° a 35.5° de latitud**, con vértices cada **4° de longitud** por **1.5° de latitud**. Para esta malla, se consideró que debido al número esparcido de observadores (estaciones) en las regiones noroeste, noreste y occidente del país; era indispensable contar con una cuadrícula que permitiera abarcar el mayor número

de observadores, así mismo, considerando a la región sureste, donde se observa un reducido número de observadores (véase Figura 5.5).

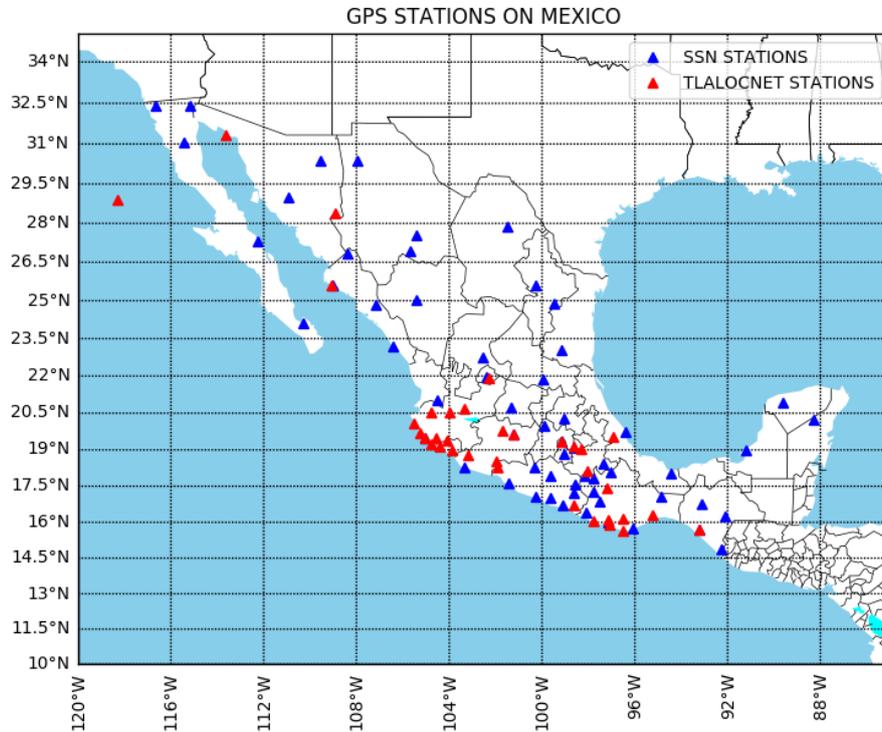


Figura 5.5: Mapa de México con la 2da malla de resolución que usa AzTEC para realizar la primera interpolación en el cálculo del TEC y la localización de las estaciones GPS en el país.

Es importante mencionar que los primeros mapas generados por AzTEC, creados del 23 de Enero de 2018 al 28 de Mayo de 2019, tenían una cobertura de -120° a -85° longitudinalmente y de 10° a 35° latitudinalmente, con vértices cada 1° de longitud por 1° de latitud. Tras el análisis realizado a los Mapas TEC luego de las modificaciones realizadas y tomando en cuenta la entrada al mínimo de actividad Solar [Zharkova (2015)], se estableció que el intervalo del escalado de contorno de colores de los valores de TECUs, sería de 0 a 60 TECUs, modificando a la configuración anterior de 0 a 80 TECUs.

5.3. Pre-procesamiento de datos

El núcleo computacional de AzTEC es impulsado por US-TEC RT, el cual utiliza el modelo MAGIC para el mapeo tomográfico ionosférico. MAGIC usa el Filtro de Kalman como algoritmo para la asimilación de datos y el Modelo IRI95. La estructura, el proceso de adquisición y cálculo de los datos, se definen a continuación:

Primero, desde las estaciones GPS del SSN y TLALOCNet, se envían los datos a través de protocolo usado para la transferencia de datos GPS por internet llamado Red de Transporte de Formato RTCM a través del Protocolo de Internet (NTRIP, por sus siglas en inglés) basado en el Protocolo de Transferencia de Hipertexto (HTTP, por sus siglas en inglés), que utiliza el formato estándar de la Comisión Técnica de Radio de Servicios Marítimos (RTCM, por sus siglas en inglés) al Repositorio Institucional de Clima Espacial (RICE), el cual pertenece al LANCE (véase Figura 5.6).

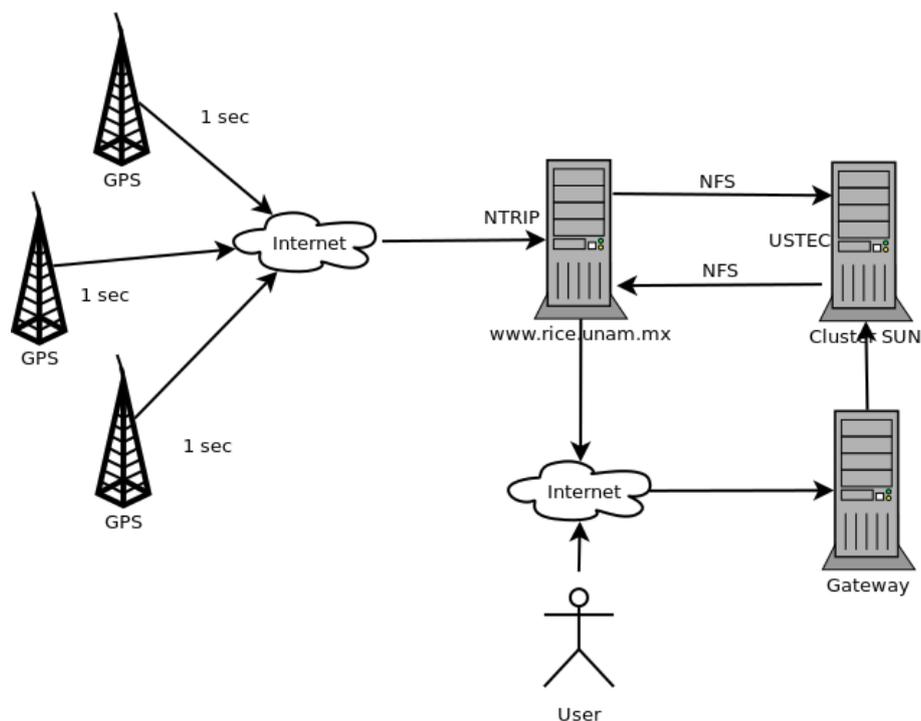


Figura 5.6: Diagrama de representación en el transporte de los datos observacionales recolectados por las estaciones GPS hasta la creación de los Mapas TEC enviado al servidor web por RICE. [Extraída de: De la Luz et al. (2018)]

Posteriormente, los datos de todas las estaciones son adquiridos por el programa BKG Ntrip Client (BNC) [UNAVCO (2020b)] y almacenados en archivos RINEX en su versión 2.11 con una frecuencia de muestreo de 1 Hz (cada 1 segundo) en cadencias de 15 minutos y envía una copia mediante el protocolo de Sistema de Archivos de Red (NFS, por sus siglas en inglés) al clúster del CESCO. El envío de estos datos se realiza en ≈ 3 minutos (véase Figura 5.7).

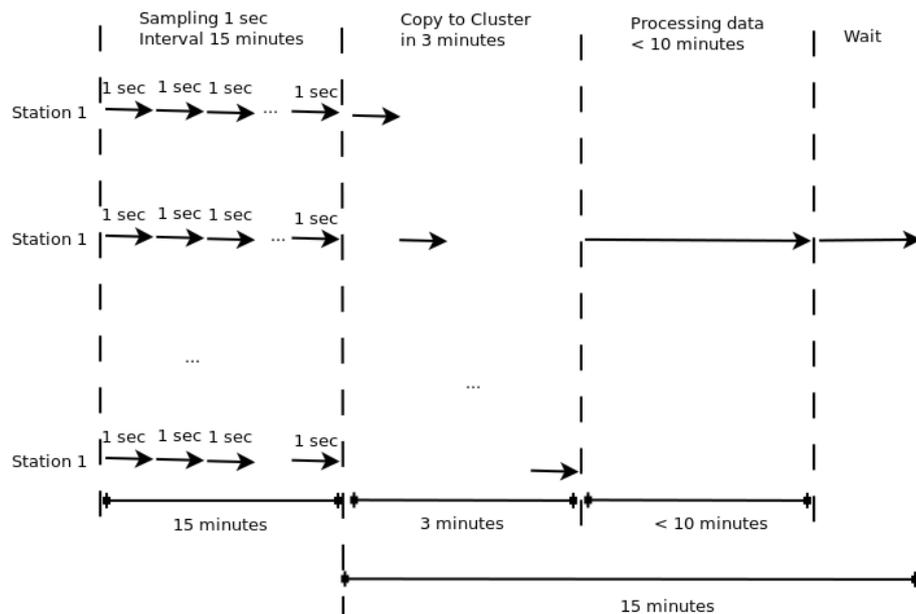


Figura 5.7: Diagrama de la distribución temporal realizado durante la recolección y procesamiento de los datos durante la cadencia de 15 minutos que AzTEC tarda para generar un Mapa TEC. [Extraída de: De la Luz et al. (2018)]

Después, los datos son analizados y procesados en el clúster con ayuda de US-TEC RT en un periodo no mayor a 10 minutos, generando un Mapa TEC, el cual es almacenado y enviado mediante una copia por NFS al RICE (véase Figura 5.8).

Finalmente, el RICE copia el mapa en el servidor web para su visualización sobre Google Maps en el sitio: www.rice.unam.mx:8080/aztec/, mientras que ya se encuentra recibiendo los nuevos datos, dejando un periodo de ≈ 2 minutos para realizar algún cambio en el programa y posteriormente el ciclo nuevamente vuelve a ejecutarse. Además, todos los datos generados son almacenados en la bóveda del RICE cada 4 horas.

Un Mapa TEC es generado en un lapso de 15 minutos [véase Figura 5.9 (c)], en

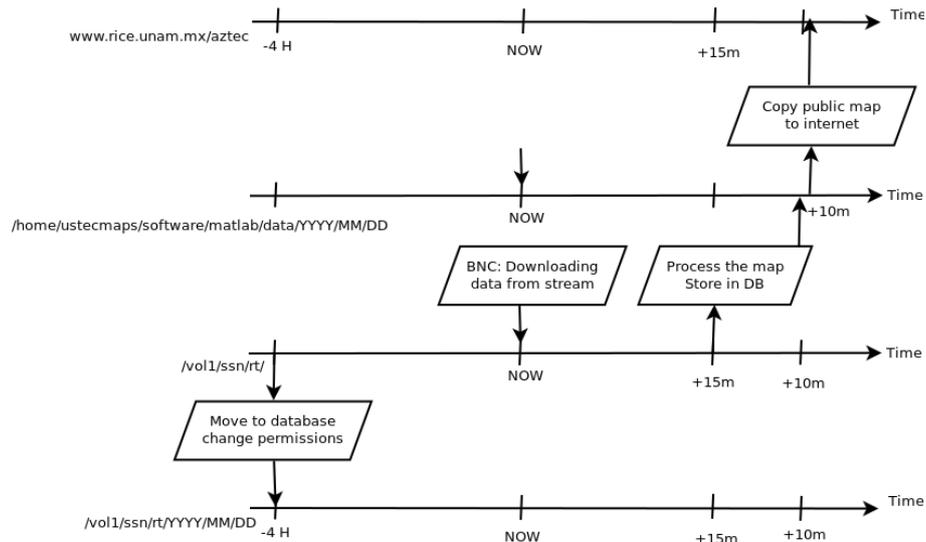


Figura 5.8: Diagrama de la distribución temporal en la obtención de los datos observacionales en tiempo real en el clúster por el programa BNC, creación de los mapas, publicación en el servidor web y el backup de los datos en la boveda de RICE. [Extraída de: De la Luz et al. (2018)]

el cual se observa un cuadro principal con las dimensiones territoriales de México, el posicionamiento de las estaciones GPS de las que se adquirieron los datos para ese periodo y el intervalo variable con un contorno de colores indicando los valores de TECUs que describen las condiciones de la *Ionósfera* sobre el área. A este le acompañan un mapa con el Análisis Diferencial TEC [véase Figura 5.9 (a)] que estima la incertidumbre en los mapas de trayectoria vertical e inclinada y un mapa de Error de Posición Aproximada [véase Figura 5.9 (b)] que estima el deslizamiento de las señales, sin embargo, debido a que la separación de tiempo de las señales son pequeñas, los errores se cancelan.

5.4. Comparación con US-TEC

Con la red de estaciones GPS extendida en el territorio mexicano, el poder computacional de US-TEC RT y la infraestructura gestionada desde el CESCO; AzTEC ofrece una potente herramienta que nos permite obtener el TEC en la *Ionósfera* sobre latitudes de gran interés para el estudio y monitoreo de la zona cercana a

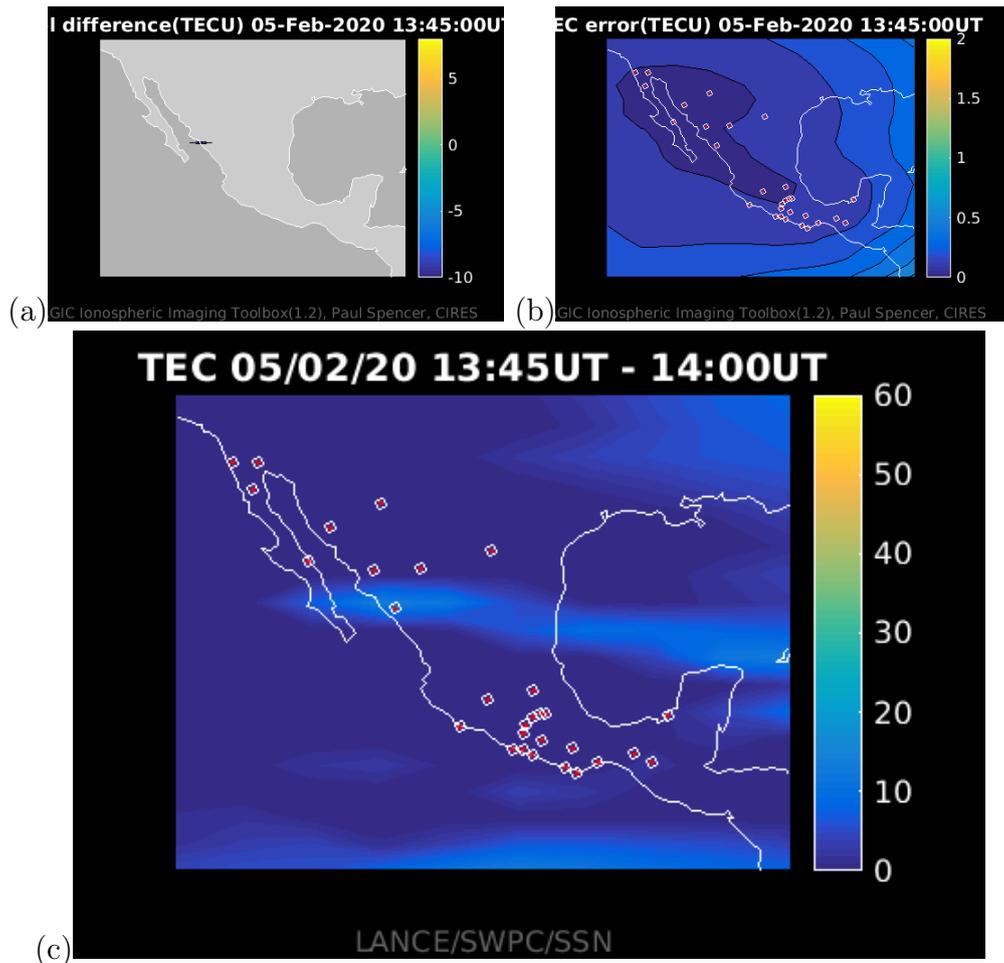


Figura 5.9: (a) Mapa con el Análisis Diferencial TEC en el cálculo de las observaciones y el modelo. (b) Mapa del Error de Posición Aproximada (m) en el deslizamiento de las señales. (c) Mapa TEC generado por AzTEC. En el cuadro principal se observan las dimensiones del territorio con la ubicación de las estaciones GPS usadas para ese periodo; en la parte superior del cuadro, se sitúan los metadatos con la fecha, seguido del periodo inicial y final en el que se adquirieron los datos; a la derecha del cuadro, se observa una barra de contorno de colores que indica los valores de TECUs en el cuadro principal y finalmente en la parte inferior, las siglas de las instituciones que integran al proyecto.

la línea ecuatorial y de la zona por donde atraviesa la línea subtropical de Cáncer, en el cual se observan importantes variaciones de la EIA².

²Anomalía Ecuatorial Ionosférica

Capítulo 6

Análisis de Valores del TEC

En este capítulo, se describe la primer metodología para la validación de los Mapas TEC, creados con datos observacionales en Tiempo Real en México. Desarrollar esta metodología requirió del análisis a los valores de unidades TEC (TECU) que se encuentran en las matrices de datos que contienen los archivos de texto (txt) de cada Mapa TEC, almacenados en la base de datos de AzTEC.

En la Figura 6.1, se observa que estos datos se encuentran organizados mediante coordenadas longitudinales (filas) y latitudinales (columnas), representando los vértices de un Mapa TEC, congruente a la cantidad de vértices que nos provee la configuración en la malla de resolución (ó cuadrícula de vértices) de US-TEC RT.

17.488	16.132	13.983	13.788	16.142	20.089	37.213	46.848	53.774	56.316
14.479	11.621	10.182	12.552	16.521	21.29	25.328	30.889	39.353	47.712
17.527	12.09	11.626	10.919	11.435	8.3933	2.222	3.8158	20.343	41.357
20.415	15.607	14.199	12.449	12.88	11.945	6.4967	1.7357	9.7068	27.97
24.574	17.426	15.56	8.3745	0.27814	0	3.3153	15.235	25.362	28.755
25.911	19.863	23.995	17.687	1.0775	0	7.7368	10.051	11.053	11.676
19.926	6.9062	2.9364	0	0	0	11.474	12.406	45.653	86.941
12.851	0	0	0	0	1.2969	15.64	13.418	12.047	0.50459
13.712	0	0	0	0	5.3613	16.885	21.041	27.08	22.014
15.832	0.5608	0	0	0	8.0719	9.7498	0	0	22.647
20.013	10.236	18.043	19.411	8.8848	7.0566	24.95	20.993	3.4447	2.3023
12.902	0	0	3.5441	9.4789	7.0158	8.9389	3.4537	0	0
7.0832	0.20104	1.0981	10.326	16.611	18.491	26.258	27.872	20.133	14.199
25.514	9.0449	0	0.88015	22.895	26.563	21.678	25.746	23.597	14.655
0	0	3.0388	8.9427	14.818	12.96	10.346	10.729	7.0162	0
0	0	0	3.0583	11.479	13.466	12.88	11.445	5.6459	0
0	0	0	2.845	12.406	16.28	14.691	7.2775	0	0
0	0	2.2642	9.2735	16.418	19.265	16.519	8.0989	0.49951	0

Figura 6.1: Matriz de valores TECUs guardados en un archivo con formato 'txt' generados por AzTEC. En el eje 'horizontal' tenemos las coordenadas longitudinales y en el eje 'vertical' las coordenadas latitudinales sobre el territorio mexicano.

6.1. Análisis de Valores del TEC con Malla de Vértices

El primer paso para la realización de nuestro análisis, fue crear máscaras de vértices que nos permitieran filtrar únicamente los valores de TECUs dentro del territorio de México, de forma que podamos localizarlos cuando se realice la exploración de los mismos, debido a que no tenemos certeza de estos valores al no haber receptores GPS que pudieran proveernos de información fuera del territorio.

En el **Apéndice B** pueden encontrarse las coordenadas geográficas de las máscaras de las dos mallas de resolución que hasta el momento han sido parte de las configuraciones de US-TEC para la creación de los Mapas TEC. En las Figuras 6.2 (a) y (b), se muestran las máscaras creadas para la 1ra y 2da malla de resolución.

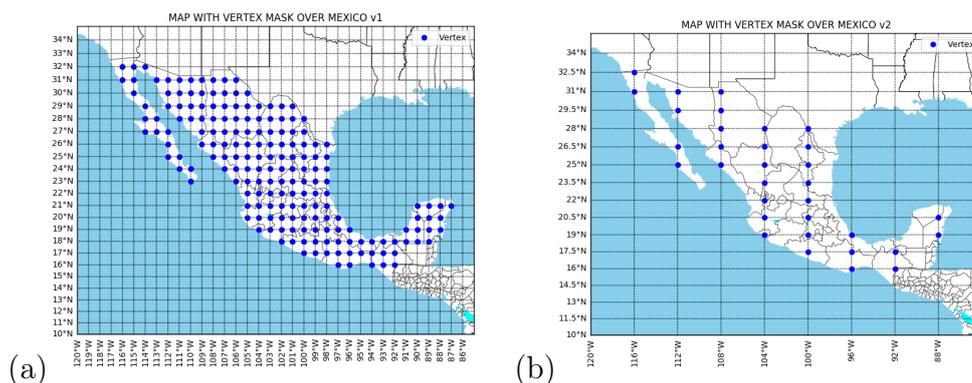


Figura 6.2: Mapas con las máscaras de vértices sobre México, creadas para la exploración y extracción de los valores de TECUs, dentro de los archivos txt de cada Mapa TEC. (a) Máscara de vértices de la 1er malla de resolución. (b) Máscara de vértices de la 2da malla de resolución.

6.1.1. Máximos, Promedios y Mínimos de los Valores TEC

Con la creación de las máscaras de vértices, se procedió a recopilar los datos con la ayuda de scripts que accesaban a los archivos txt de cada mapa, disponibles desde el 24 de Enero de 2018 al 31 de Diciembre de 2019. A los valores de TECUs obtenidos de cada mapa, se les calculó sus máximos, promedios y mínimos, posteriormente, se

les graficó en una línea temporal para su análisis.

En la Figura 6.3, se muestra la gráfica con el comportamiento TEC calculado con datos observacionales en Tiempo Real de la *Ionósfera* sobre el territorio mexicano, siendo el primer análisis en su tipo, realizado a estas latitudes del continente americano.

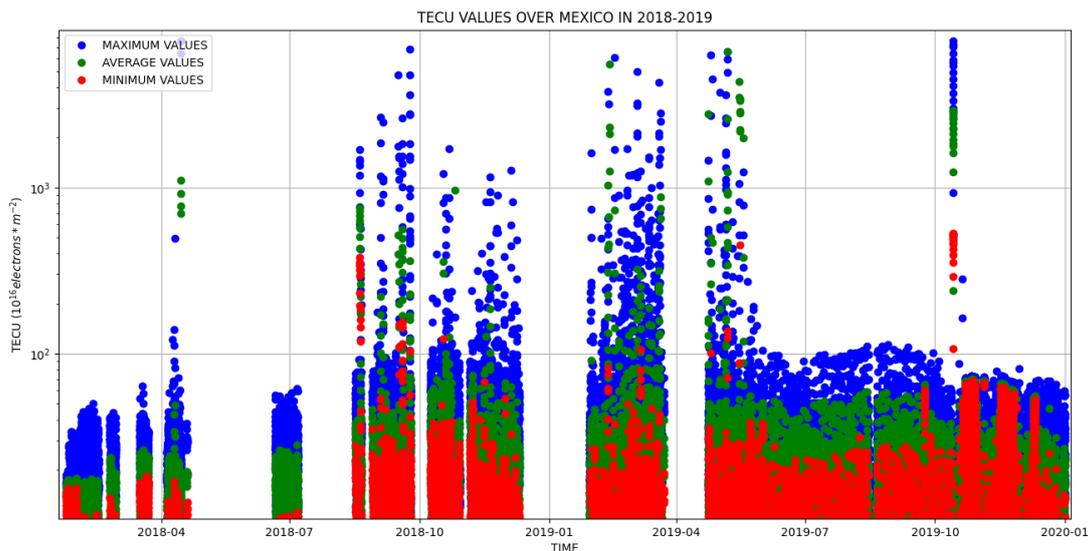


Figura 6.3: Gráfica de valores máximos (azúl), promedio (verde) y mínimos (rojo) de TECUs de cada Mapa TEC sobre México durante 2018 y 2019. El eje X corresponde a una línea temporal, indicando fecha y hora en que fueron creados los mapas. El eje Y corresponde a los valores de TECUs de los mapas.

6.2. Susceptibilidad de AzTEC

La visualización de los valores de TECUs, permitió inicializar el análisis, en el cual, una de las primeras observaciones se encontró, fue que habían valores máximos de TECUs muy altos. Esto motivó a realizar una serie de pruebas bajo la hipótesis de que estos incrementos tan altos de valores de TECUs, eran generados por problemas por la inestabilidad de la red de internet, la cual estaba pasando por un proceso de pruebas con la fibra óptica, lo que provocaba que se dejaran de recibir datos observacionales en el sistema y propiciando el reinicio de US-TEC.

Esto motivó a realizar una bitácora con la fecha y hora de cada reinicio (véase

la Tabla A.3 del Apéndice A), el cual nos permitió comprobar que después de un reinicio, comenzaban a presentarse incrementos muy altos en los valores de TECUs, así mismo, estos incrementos podían verse también reflejados en los Mapas TEC. Por otro lado, se observó que el sistema requería de lapsos de ≈ 4 horas para estabilizarse (véase Figura 6.4).

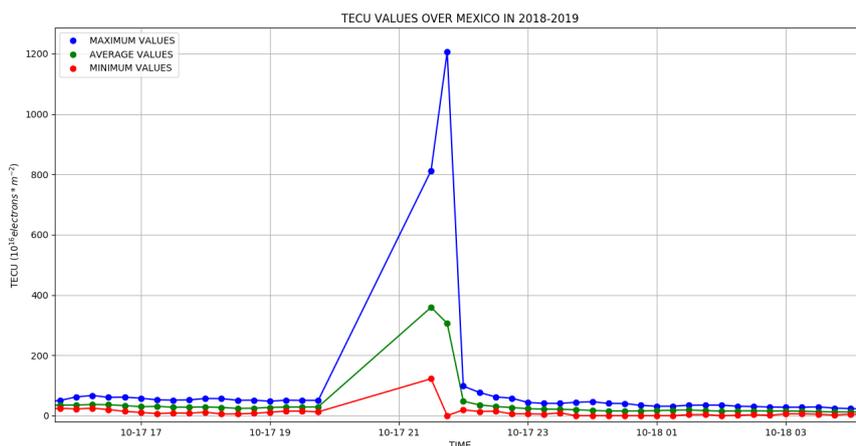


Figura 6.4: Comportamiento del TEC durante el periodo de una prueba realizada al programa correspondiente a un reinicio 22:00 UTC del día 17 de Octubre de 2018. En esta gráfica el valor TECU máximo llegó hasta los 800 y fue disminuyendo gradualmente hasta valores por debajo de 60 TECU en un lapso de ≈ 4 horas.

6.3. Valores Mínimos en Cero

Otra prueba realizada, estuvo enfocada al observar que en el cálculo de los valores mínimos, muchos indicaban ceros de TECUs. Tras realizar un análisis a los valores máximos y promedios de TECUs, se observó que los mínimos no mostraban los mismos patrones que el resto. Por ello, con la intención de averiguar su origen, primero se procedió a identificar si estos valores de ceros, provenían de vértices cercanos a las estaciones GPS, considerando, que el ruido en la electrónica de los receptores, silenciaría la adquisición de los datos provenientes de los transmisores satelitales.

Primero, se creó una máscara de vértices que permitiera obtener los valores de TECUs, únicamente sobre las regiones donde se sitúan las estaciones. Luego,

utilizando una ventana de 6 días, se compararon estos valores con los valores de TECUs de todo el territorio. En la Figura 6.5, se muestra el comportamiento de los valores máximos, promedios y mínimos de TECUs, luego de calcular la diferencia entre estos valores.

Durante los días 01 al 06 de Julio de 2018, no se observó diferencias significativas en el comportamiento de los valores mínimos de TECUs, además, se observó que los valores máximos cercanos o encima a estos, son más precisos.

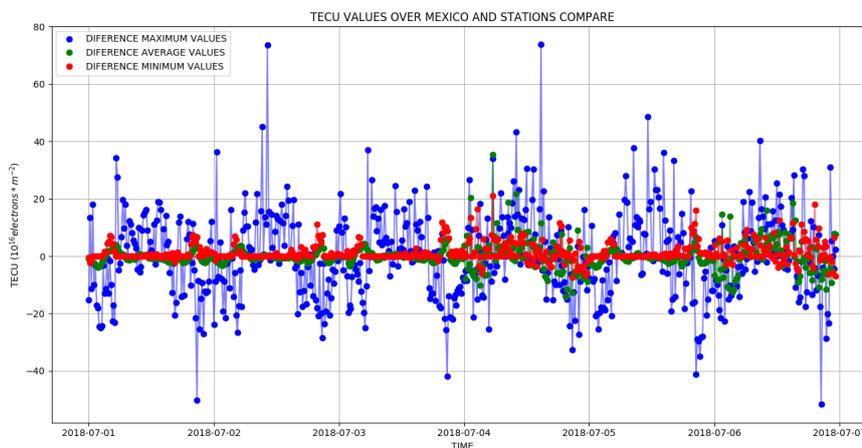


Figura 6.5: Gráfica comparativa de los valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de los vértices sobre los receptores GPS y de todo el territorio, durante los días 01 al 06 de Julio de 2018.

6.3.1. Calidad de Datos

Otro de los análisis realizados fue comprobar si la calidad de los datos observacionales en los archivos RINEX, afectaban en el cálculo de los valores de TECUs. Primero, se calcularon los valores máximos, promedios y mínimos de TECUs por día, donde se observaron caídas en los valores máximos en los días 2 y 7 de Agosto (véase Figura 6.6). Cabe resaltar que aquí los valores mínimos de TECUs, no registró diferencia en su comportamiento.

Luego, se procedió a analizar todos los valores de TECUs durante una ventana de 7 días, del 02 al 08 de Agosto, donde en efecto, se encontró que entre las 17:00 y 18:00 horas UTC, en los días 02 y 07 de Agosto, los picos de valores máximos de

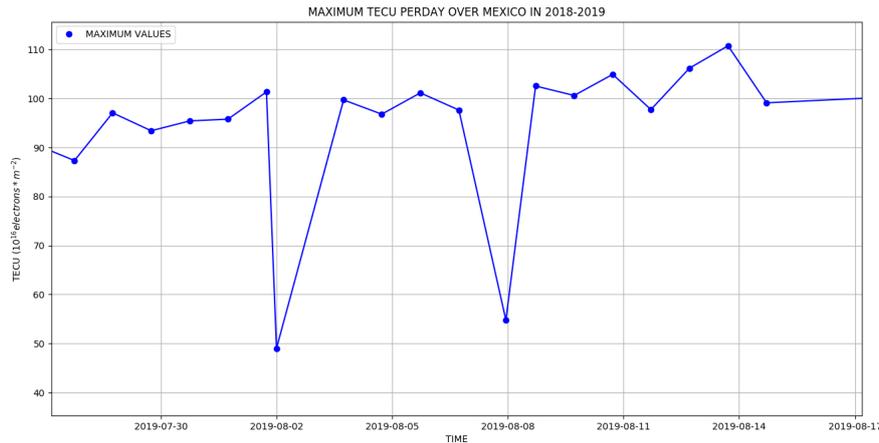


Figura 6.6: Gráfica de valores máximos de TECUs por día, en una ventana de 20 días desde el 27 de Julio al 17 de Agosto de 2019. En los día 02 y 07 de Agosto, se observan caídas de los valores máximos de TECUs.

TECUs observados en los demás días, no concordaban con los picos observados en estos dos días a esas horas, las cuales representan al medio día tiempo de la Ciudad de México (véase Figura 6.7).

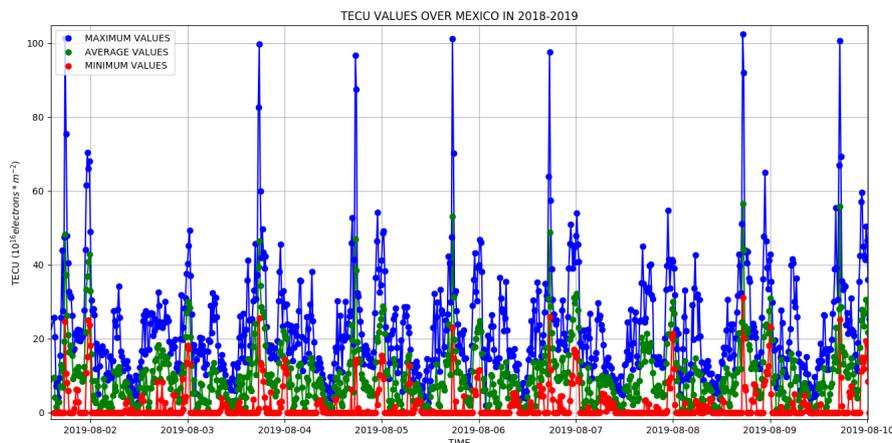


Figura 6.7: Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos TECU del 02 al 09 de Agosto de 2019. Los picos en los valores máximos entre las 17:00 y 18:00 UTC, representan al medio día en México (entre las 12:00 y 13:00 horas LTC).

Posteriormente, se revisaron los archivos RINEX de dos estaciones distintas (una del SSN y una de TLALOCNet), pertenecientes al mismo periodo, donde en efecto, en las Figuras 6.8 (a) y (b), se observa que en ambos archivos hacen falta hasta 4 minutos de datos, confirmando que los valores de TECUs son sensibles a la falta de datos observacionales en los archivos RINEX.

24578187.938	100643531.099	21.250		
19 08 02 17 23	50.0000000	0	9G29G25G 5G 2G24G12G19G	6G17
24704198.156	0.000	129821452.662	38.250	0.000
24704204.976	101159600.702	19.000		
23388247.784	0.000	122906112.392	41.000	0.000
23388255.524	95771007.340	23.000		
23175878.666	0.000	121790069.839	44.750	0.000
23175882.506	94901378.376	30.500		
20681208.564	0.000	108680520.568	48.500	0.000
20681209.604	84686116.657	43.000		
22356790.692	0.000	117485737.816	44.500	0.000
22356797.532	91547333.490	34.250		
20604532.424	0.000	108277572.462	51.000	0.000
20604535.644	84372152.252	39.750		
23274493.646	0.000	122308257.670	41.250	0.000
23274494.786	95305148.923	27.000		
21961243.334	0.000	115406968.256	47.000	0.000
21961249.004	89927645.613	34.750		
24578561.218	0.000	129161200.649	40.250	0.000
24578566.598	100645081.528	21.250		
19 08 02 17 27	33.0000000	0	9G29G25G 5G 2G24G12G19G	6G17
24609726.136	0.000	129324991.129	41.750	0.000
24609732.596	100772747.951	20.000		
23253145.106	0.000	122196141.215	41.500	0.000
23253151.506	95217783.286	23.000		
23039681.488	0.000	121074352.600	44.250	0.000
23039685.988	94343676.945	29.000		
20702515.142	0.000	108792485.809	49.250	0.000
20702514.822	84773362.316	42.500		
22449494.692	0.000	117972901.594	44.750	0.000
22449502.532	91926941.503	33.250		
(a) :%%- spig214r15.19o 79% L10113 (Fundamental)				
23207955.406	0.000	121958608.157	34.750	0.000
23207942.426	95032694.725	18.500		
19 08 02 17 23	49.0000000	0	8G 2G 5G 6G12G17G19G24G28	
21482471.638	0.000	112891178.028	45.750	0.000
21482459.218	87967156.665	36.750		
21561513.238	0.000	113306520.532	50.000	0.000
21561503.578	88290825.138	36.500		
22351798.132	0.000	117459491.744	45.750	0.000
22351791.112	91526876.227	33.500		
22191738.912	0.000	116618398.561	47.000	0.000
22191728.772	90871485.217	33.500		
23471554.184	0.000	123343836.195	43.000	0.000
23471544.584	96112075.285	23.000		
22672276.710	0.000	119143613.151	44.500	0.000
22672266.170	92839175.101	30.750		
23251514.966	0.000	122187540.308	42.250	0.000
23251506.666	95211070.604	28.500		
23208483.526	0.000	121961387.353	34.500	0.000
23208471.586	95034860.363	18.250		
19 08 02 17 27	24.0000000	0	8G 2G 5G 6G12G17G19G24G28	
21520492.178	0.000	113090977.727	46.500	0.000
21520479.538	88122844.728	36.750		
21447319.718	0.000	112706436.542	48.250	0.000
21447310.718	87823227.373	36.500		
22453137.652	0.000	117992027.477	48.000	0.000
22453129.292	91941838.976	33.750		
22074889.154	0.000	116004347.509	48.000	0.000
22074878.974	90393003.976	33.500		
23493868.444	0.000	123461100.897	41.250	0.000
23493860.724	96203450.212	22.500		
22701666.050	0.000	119298051.121	45.750	0.000
22701654.650	92959516.261	30.500		
(b) :%%- oxpe214r15.19o 78% L9032 (Fundamental)				

Figura 6.8: Archivos RINEX del día 02 de Agosto de 2019 a las 17:15 UTC pertenecientes a la base de datos de AzTEC. (a) Archivo RINEX de la estación SPIG en la ciudad de San Pedro Martir, Baja California, perteneciente a la red de estaciones del SSN. (b) RINEX de la estación OXPE en la ciudad de Puerto Escondido, Oaxaca, perteneciente a la red de estaciones de TLALOCNet.

Capítulo 7

Resultados

Después de realizar la exploración y preparación de los valores del TEC, el análisis en la calidad de sus datos, y su recopilación, bajo el filtrado a los valores de interés. En este capítulo, se presentan los resultados que permitieron validar los cambios en el comportamiento de los Mapas TEC creados por AzTEC, al modificar la malla de resolución en las configuraciones del software US-TEC RT. Estos resultados han sido determinados tras una serie de técnicas basadas en datos, utilizando herramientas que permitieron su análisis y visualización.

Primero, se presenta el comportamiento del TEC en México con datos de los Mapas TEC cercanos a Tiempo Real; segundo, se presenta la variación del TEC en México, comparando sus valores en el cambio de la malla de resolución; tercero, se presenta la variación del TEC en México comparando los periodos de Otoño 2018 (1er malla) y 2019 (2da malla), tras el cambio de la malla de resolución; cuarto, se presenta la variación del TEC en México durante el periodo de Invierno 2018-2019; quinto, se presenta la desviación estándar de los valores de TECUs (Sigma σ) tras el cambio de la malla de resolución; finalmente, se presenta el comportamiento del TEC en las 8 regiones del territorio de México, las cuales se describen en la sección 7.2.

7.1. Variación Estacional del TEC en México

Hasta el 31 de Diciembre de 2019, la base de datos de AzTEC dispone de más de 40,600 Mapas TEC, los cuales han sido utilizados para el desarrollo del análisis que permitió observar el comportamiento del TEC en los siguientes periodos temporales:

- Variación del TEC en el 2018 y 2019: 24 de Enero de 2018 al 31 de Diciembre de 2019.
- Variación del TEC en el Cambio de la Malla de Resolución: 24 de Enero al 28 de Mayo de 2019 y del 29 de Mayo al 31 de Diciembre de 2019.
- Variación TEC en los Periodos de Otoño 2018 y 2019: 23 de Septiembre al 21 de Diciembre de 2018 y del 21 de Septiembre al 22 de Diciembre de 2019.
- Invierno 2018-2019: del 22 de Diciembre de 2018 al 20 de Marzo de 2019.

Cabe resaltar que para el periodo de Primavera 2019, ha sido considerado entre los días 21 de Marzo al 28 de Mayo de 2019 (68 días), debido a que el 28 de Mayo a las 22:15 UTC, se realizaron modificaciones en la configuración de AzTEC para efectos en la resolución de los vértices de interpolación.

De acuerdo a algunos modelos predictivos como el de Zharkova (2015), los años 2018 y 2019 pertenecen a la transición en el cambio de los ciclos solares 24 y 25, por lo que el actual análisis, pertenece a un periodo de mínimo solar. Este comportamiento puede observarse en la Figura 7.1, mostrando una gráfica con la evolución de los ciclos solares de acuerdo al promedio mensual de manchas solares.

7.1.1. Variación del TEC Durante el 2018 y 2019

Para observar la variación del TEC en la *Ionósfera* sobre México, primero se realizó un análisis a los valores de TECUs de todos los Mapas TEC creados desde el 24 de Enero de 2018 hasta el 31 de Diciembre de 2019, donde a los valores máximos,

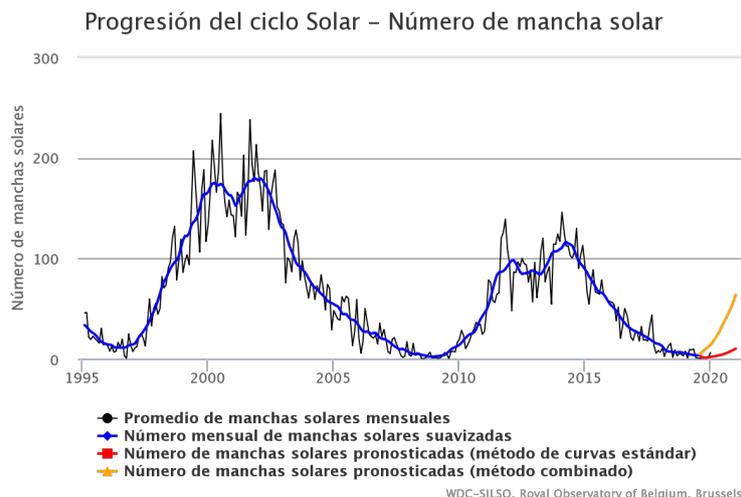


Figura 7.1: Durante el 2018, Junio presentó un promedio mensual de 15.6 manchas solares y durante el 2019, Mayo presentó un promedio mensual de 9.9 manchas solares. [Extraído de: Vancanneyt, S. and de Bont, M. (2020)]

promedios y mínimos de TECUs (véase Figura 7.2), se les realizaron histogramas que muestran el comportamiento del TEC en un periodo de quietud en el Sol. Es importante mencionar que los valores muy altos de TECUs en los histogramas son errores del cálculo.

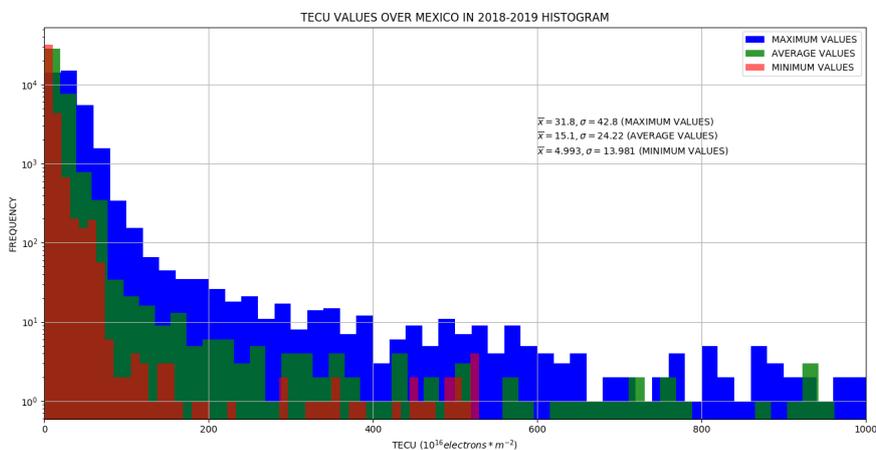


Figura 7.2: Histograma azul: creado con los valores máximos de TECUs (se le obtuvo una Media de 31.787 TECUs y una Sigma de 42.8 TECUs). Histograma verde: creado con los valores promedios de TECUs (se le obtuvo una Media de 15.081 TECUs y una Sigma de 24.22 TECUs). Histograma rojo: creado con los valores mínimos de TECUs (se le obtuvo una Media de 4.996 TECUs y una Sigma de 13.981 TECUs). Todos los valores de TECUs pertenecen a los Mapas TEC creados durante el 2018 y 2019. En los tres histogramas, los valores muy altos de TECUs son errores del cálculo.

7.1.2. Variación del TEC por el Cambio en la Resolución de la Malla

Para este análisis, el cambio de la malla consta de dos etapas: la primer etapa, comprende los periodos de Primavera 2018 (20 de Marzo al 21 de Junio), Verano 2018 (21 de Junio al 22 de Septiembre), Otoño 2018 (23 de Septiembre al 21 de Diciembre), Invierno 2018-2019 (22 de Diciembre de 2018 al 20 de Marzo) y Primavera 2019 (21 de Marzo al 28 de Mayo). La segunda etapa, comprende los periodos de Verano 2019 (21 de Junio al 20 de Septiembre) y Otoño 2019 (21 de Septiembre al 22 de Diciembre).

El cambio de la resolución, puede verse proyectada en la Figura 7.3, donde la gráfica con el histograma azul, representa a los 18,302 valores máximos de TECUs de la 1er malla, y el histograma naranja, representa a los 18,654 valores máximos de TECUs de la 2da malla, en un corte de hasta 100 TECUs. De acuerdo a Takahashi et al. (2016), cuando la malla de resolución cubre gran parte del territorio que contiene a un mayor número de observadores (estaciones GPS), este mejora la precisión en el cálculo del TEC y reduce el número de interpolaciones que disminuyen el error numérico. Por ello, en el histograma de la 2da malla, se puede observar una disminución de ruido en los valores de TECUs de los mapas, así mismo, en la Figura 7.4 se observa una mejor estructura con los valores promedios, sin embargo, no ocurre lo mismo con los valores mínimos de la Figura 7.5, donde se observa un comportamiento similar entre los histogramas de la 1era y 2da malla, tampoco mejoró el problema de los ceros, ya que se esperaba que los valores mínimos presentaran valores de TECUs más altos, por el contrario, en la distribución de valores entre 0 y 0.3 TECUs, aumentaron de $\approx 6,200$ a $\approx 11,900$ valores.

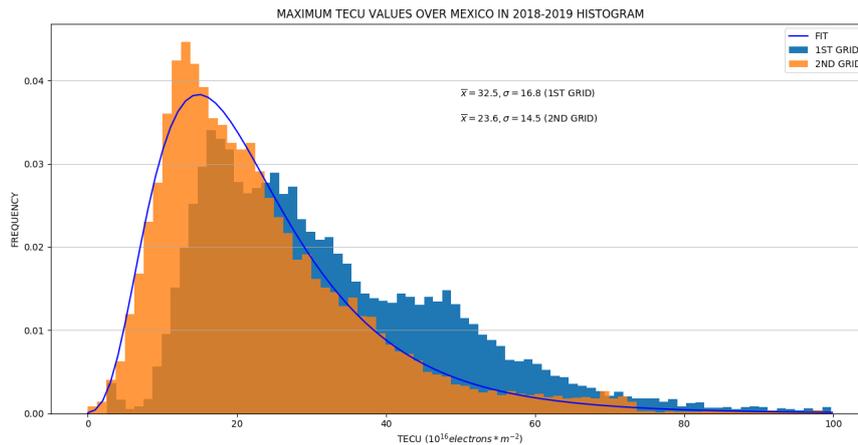


Figura 7.3: Histograma azul: creado con los valores máximos de TECUs de los Mapas TEC durante el 24 de Enero de 2018 al 28 de Mayo de 2019, obteniendo una Media de 32.5 TECUs y una Sigma de 16.8 TECUs. Histograma naranja: creado con los valores máximos de TECUs de los Mapas TEC durante el 29 de Mayo al 31 de Diciembre de 2019, obteniendo una Media de 23.6 TECUs y una Sigma de 14.5 TECUs.

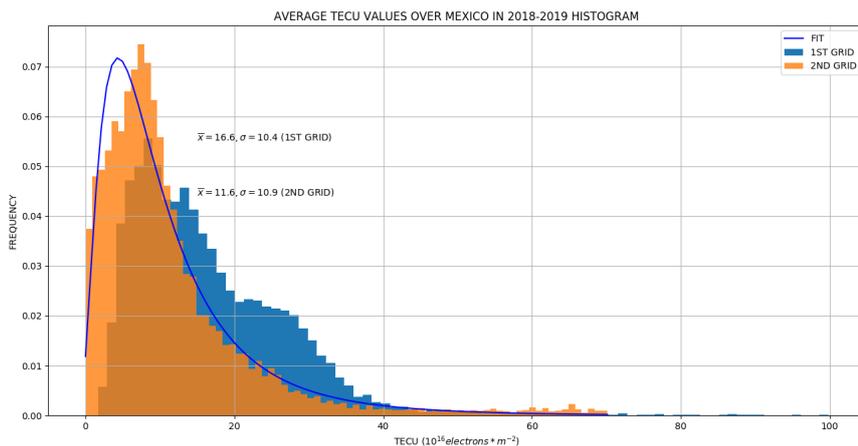


Figura 7.4: Histograma azul: creado con los valores promedios de TECUs de los Mapas TEC durante el 24 de Enero de 2018 al 28 de Mayo de 2019, obteniendo una Media de 16.6 TECUs y una Sigma de 10.4 TECUs. Histograma naranja: creado con los valores promedios de TECUs de los Mapas TEC durante el 29 de Mayo al 31 de Diciembre de 2019, obteniendo una Media de 11.6 TECUs y una Sigma de 10.9 TECUs.

7.1.3. Variación del TEC en los Periodos de Otoño 2018 y 2019

Después de analizar a los periodos que fueron participes de la transición en el cambio de la malla, se procedió a realizar una comparación con los periodos de

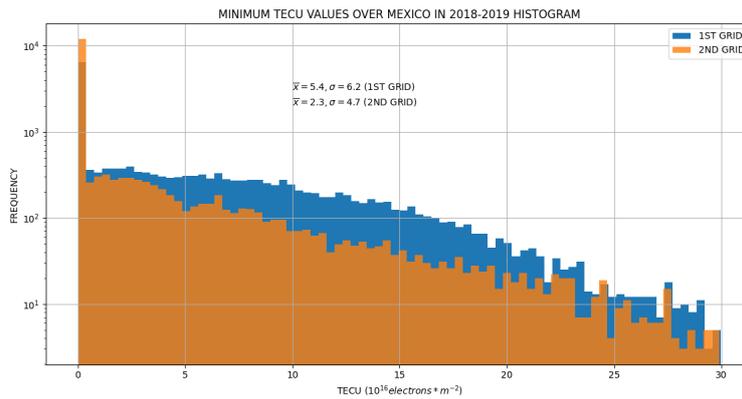


Figura 7.5: Histograma azul: creado con los valores mínimos de TECUs de los Mapas TEC durante el 24 de Enero de 2018 al 28 de Mayo de 2019, obteniendo una Media de 5.92 TECUs y una Sigma de 10.7 TECUs. Histograma naranja: creado con los valores mínimos de TECUs de los Mapas TEC durante el 29 de Mayo al 31 de Diciembre de 2019, obteniendo una Media de 4.08 TECUs y una Sigma de 16.56 TECUs.

Otoño 2018 y 2019. En la Figura 7.6, se muestran las gráficas con los histogramas de los valores máximos de TECUs de ambos periodos, donde la gráfica azul claro, representa a los 4,451 datos de los máximos de TECUs de la 1er malla, y la gráfica rojo claro, representa a los 7,749 datos de los máximos de TECUs de la 2da malla, en un corte de hasta 100 TECUs.

El periodo de Otoño 2019, correspondiente a la 2da malla, muestra una mejora en las distribuciones de los valores máximos y promedios (véase Figura 7.7) al disminuir el ruido mostrado en los Mapas TEC del periodo de Otoño 2018 (1er malla), sin embargo, analizando los histograma con los valores mínimos de la Figura 7.8, no se observaron cambios en la distribución de los valores mínimos de TECUs, tampoco mejoró el problema de los ceros, ya que se esperaba que los valores mínimos presentaran valores de TECUs más altos, por el contrario, en la distribución de valores entre 0 y 0.5 TECUs, aumentaron de $\approx 1,400$ a $\approx 4,800$ valores.

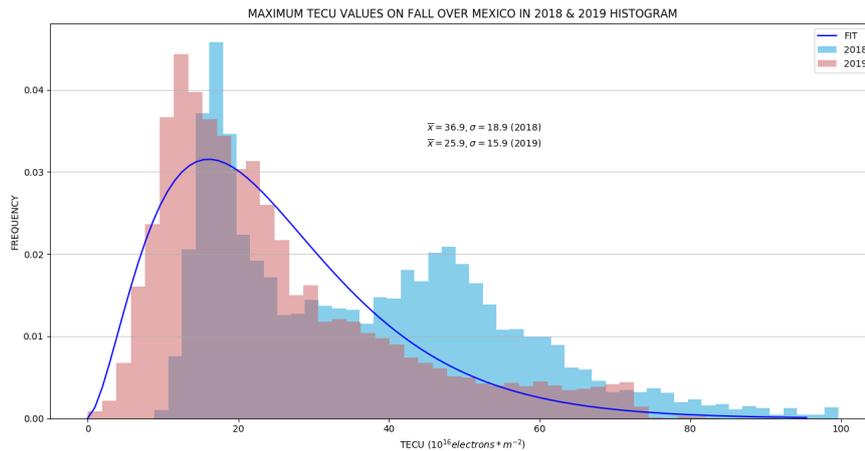


Figura 7.6: Histograma azul claro: creado con los valores máximos de TECUs de los Mapas TEC durante el periodo de Otoño 2018 (23 de Septiembre al 21 de Diciembre de 2018), obteniendo una Media de 36.9 TECUs y una Sigma de 18.9 TECUs. Histograma rojo claro: creado con los valores máximos de TECUs de los Mapas TEC durante el periodo de Otoño 2019 (21 de Septiembre al 22 de Diciembre de 2019), obteniendo una Media de 25.9 TECUs y una Sigma de 15.9 TECUs.

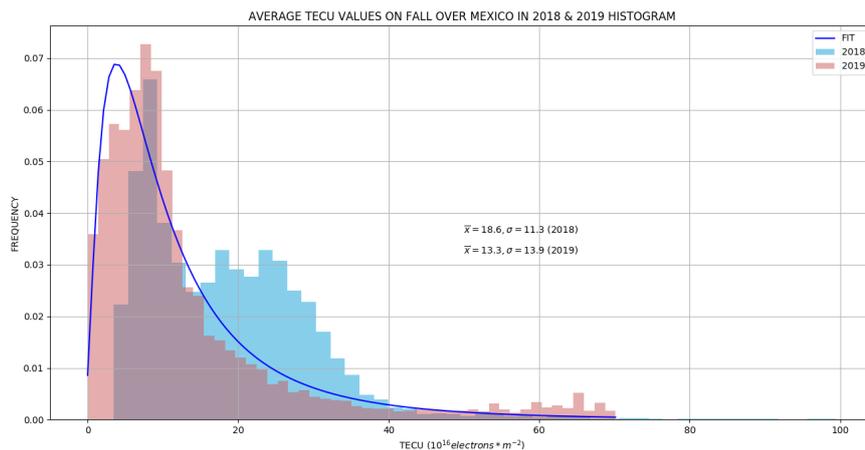


Figura 7.7: Histograma azul claro: creado con los valores promedios de TECUs de los Mapas TEC durante el periodo de Otoño 2018 (23 de Septiembre de 2018 al 21 de Diciembre de 2018), obteniendo una Media de 18.6 TECUs y una Sigma de 11.3 TECUs. Histograma rojo claro: creado con los valores promedios de TECUs de los Mapas TEC durante el periodo de Otoño 2019 (21 de Septiembre al 22 de Diciembre de 2019), obteniendo una Media de 13.3 TECUs y una Sigma de 13.9 TECUs.

7.1.4. Variación del TEC del Periodo Invierno 2018-2019

Finalmente, en la Figura 7.9, se muestran los histogramas con los valores máximos, promedios y mínimos TECU del periodo de Invierno 2018-2019, correspondientes a los días entre el 22 de Diciembre de 2018 al 20 de Marzo de 2019. Este periodo,

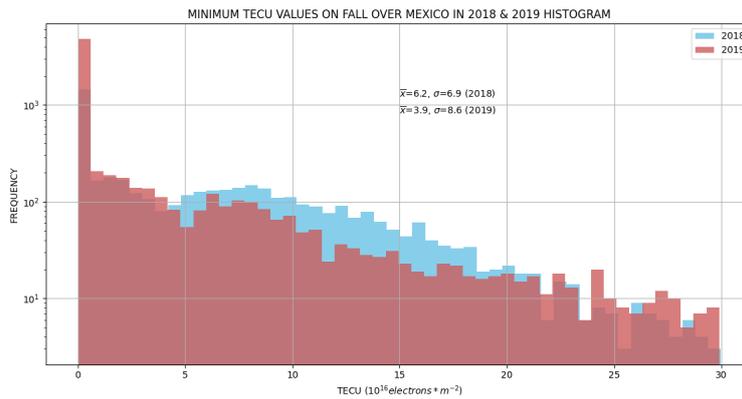


Figura 7.8: Histograma azul claro: creado con los valores mínimos de TECUs de los Mapas TEC durante el periodo de Otoño 2018 (23 de Septiembre de 2018 al 21 de Diciembre de 2018), obteniendo una Media de 6.2 TECUs y una Sigma de 6.9 TECUs. Histograma rojo claro: creado con los valores mínimos de TECUs de los Mapas TEC durante el periodo de Otoño 2019 (21 de Septiembre al 22 de Diciembre de 2019), obteniendo una Media de 3.9 TECUs y una Sigma de 8.6 TECUs.

evalúa a los mapas que aún eran generados con la primer malla de resolución.

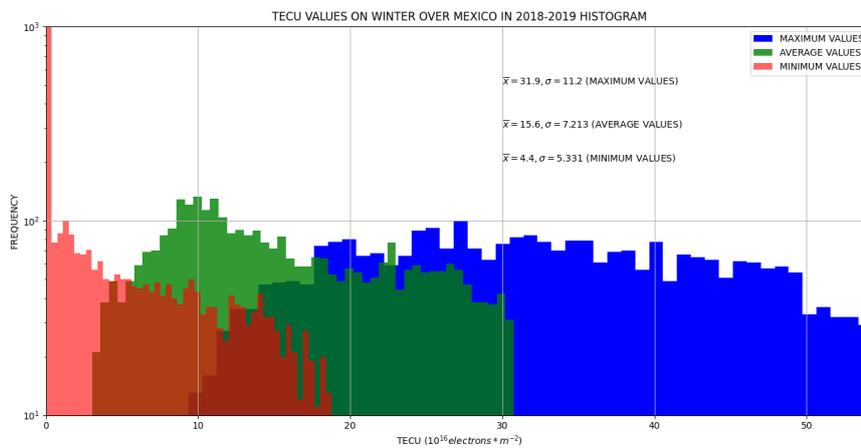


Figura 7.9: Histograma azul: creado con los valores máximos de TECUs (se obtuvo una Media de 31.9 TECUs y una Sigma de 11.2 TECUs). Histograma verde: creado con los valores promedios de TECUs (se obtuvo una Media de 15.6 TECUs y una Sigma de 7.213 TECUs). Histograma rojo: creado con los valores mínimos de TECUs (se obtuvo una Media de 4.4 TECUs y una Sigma de 5.331 TECUs).

7.1.5. Evaluación de Sigmas

Finalmente, luego del análisis realizado a los periodos antes descritos, en la gráfica de la Figura 7.10, se muestran las *Sigmas* evaluados en los histogramas de los valores

máximos, promedios y mínimos de TECUs, enlistados en la Tabla 7.1.

Periodos	Sigma de Máximos	Sigma de Promedios	Sigma de Mínimos
Todos	42.8	24.2	13.98
Periodo de 1er Malla	16.8	10.4	6.2
Periodo de 2da Malla	14.5	10.9	4.7
Otoño 2018	18.9	11.3	6.9
Otoño 2019	15.9	13.9	8.6
Invierno 2018-2019	11.2	7.2	5.3

Tabla 7.1: *Sigmas* de los valores de TECUs máximos, promedios y mínimos durante el 2018 y 2019, de la 1er y 2da malla de resolución y de los periodos estacionales: Otoño 2018 y Otoño 2019 e Invierno 2018-2019.

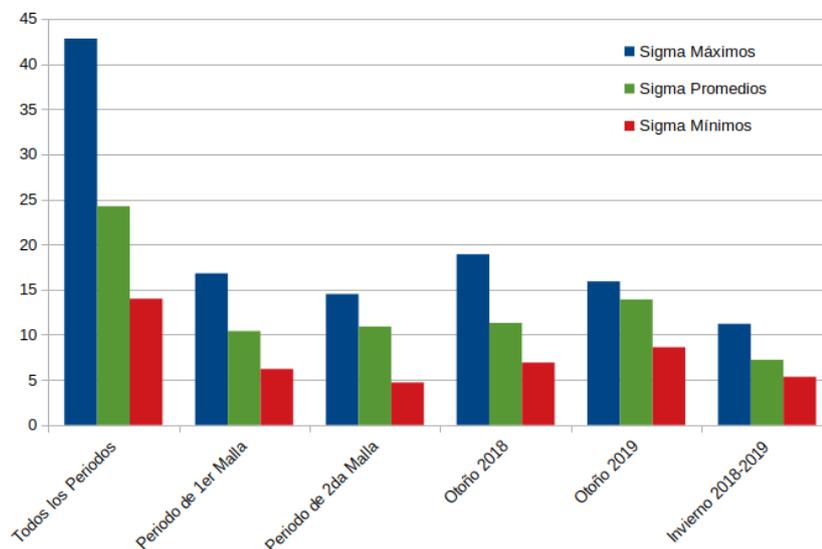


Figura 7.10: Gráficas de *Sigmas* de los valores de TECUs máximos (azúl), promedios (verde) y mínimos (rojo) durante el 2018 y 2019, de la 1er y 2da malla de resolución y de los periodos estacionales: Otoño 2018 y Otoño 2019 e Invierno 2018-2019.

7.2. Análisis por Estado

Durante el análisis de la variación en el cambio de las mallas de resolución en AzTEC, donde se observó una considerable reducción del error numérico en los valores de TECUs de los mapas; a continuación, se presenta una comparación del comportamiento TEC en cada uno de los estados que representarán a las 8 regiones del país, con la finalidad de observar la variación de los valores de TECUs, de acuerdo

a la posición latitudinal de cada estado, en las diferentes regiones del territorio de México.

Para el desarrollo de este análisis, se implementaron máscaras de vértices individuales que permitieron analizar el comportamiento del TEC en la *Ionósfera* en cada estado del territorio mexicano, filtrando los valores de TECUs sobre estas regiones, los cuales, se encuentran almacenados dentro de los archivos txt de cada Mapa TEC.

Debido al cambio de las mallas, en algunos estados no existen vértices que se posicionen sobre su territorio, por ello, en esta sección, se mostrarán los estados representativos de cada región que sí los contengan durante una ventana de 7 días, de manera que se logre mostrar una comparación ilustrativa en el comportamiento del TEC sobre cada región del país. En el Apéndice C, pueden encontrarse el resto de los estados correspondientes a todas las regiones.

Región Noroeste: Sonora

Sonora (véase Figura 7.11) presenta una interesante variación de valores máximos de hasta 36 TECUs en su periodo diurno y con incrementos de hasta 23 TECUs en su periodo nocturno. Cabe resaltar que en su territorio se posiciona una baja pero importante densidad de estaciones GPS (con una media de 3 estaciones activas por mapa), y sobre este, la zona Subtropical de Cancer, región de importante interés debido al efecto ionosférico de la anomalía ecuatorial [Schunk & Nagy (2009)]. Es la primera vez que se hace un análisis del TEC sobre esta región, no obstante, verificarlo requiere trabajo a futuro (descrito en la sección 8.2).

Región Noreste: Nuevo León

En el territorio de Nuevo León (véase Figura 7.12), la cantidad de estaciones GPS es muy baja, ubicándose únicamente una sola estación en su territorio. El estado presenta valores máximos de hasta 48 TECUs.

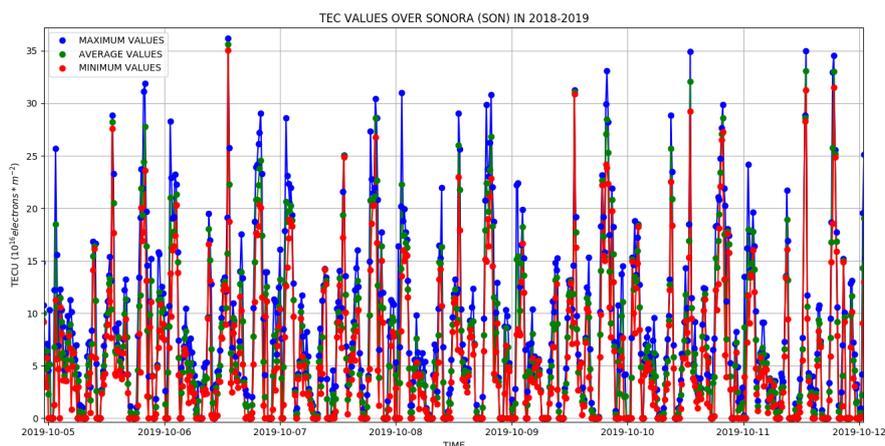


Figura 7.11: Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Sonora durante los días 05 al 11 de Octubre de 2019.

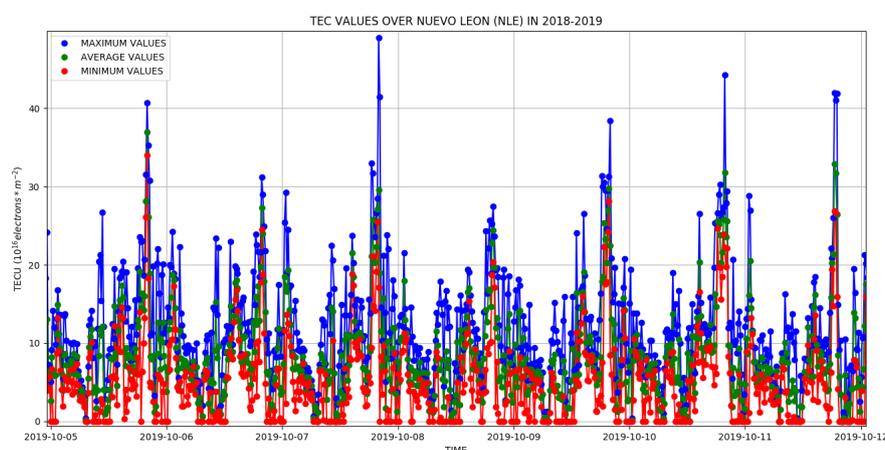


Figura 7.12: Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Nuevo León durante los días 05 al 11 de Octubre de 2019.

Región Occidente: Jalisco

El estado de Jalisco (véase Figura 7.13) presenta valores máximos de hasta 44 TECUs y al igual que Nuevo León, su territorio posee una sola estación GPS.

Región Oriente: Veracruz

Veracruz (véase Figura 7.14) es el estado que presenta los valores más altos durante este periodo, con máximos de hasta 54 TECUs. En él, solo se posiciona una estación GPS.

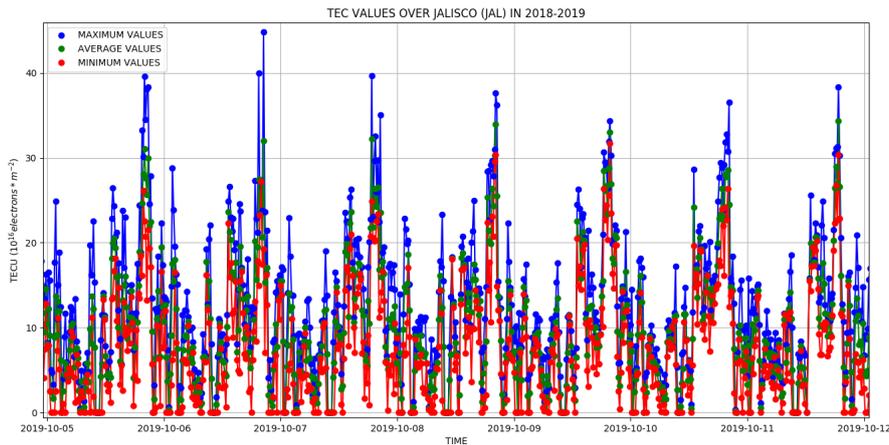


Figura 7.13: Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Jalisco durante los días 05 al 09 de Octubre de 2019, obteniendo valores máximos de hasta 44 TECUs y mínimos de 0 TECU.

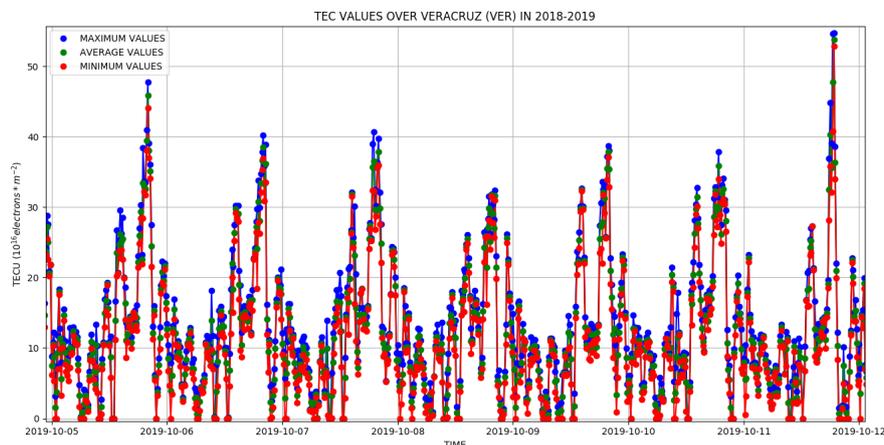


Figura 7.14: Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Veracruz durante los días 05 al 11 de Octubre de 2019.

Región Centronorte: Zacatecas

Zacatecas (véase Figura 7.15) presenta valores máximos de hasta 49 TECUs, posee unicamente una estación GPS y sobre el estado, atraviesa la línea del Tropicó de Cáncer, región que indica los puntos ubicados más hacia el norte de un observador en la Tierra, cuando encuentra que el Sol se posiciona encima de él.

Región Centrosur: Estado de México

Los valores máximos del Estado de México (véase Figura 7.16), presentan una interesante variación de hasta 50 TECUs. Aquí, la densidad de estaciones GPS

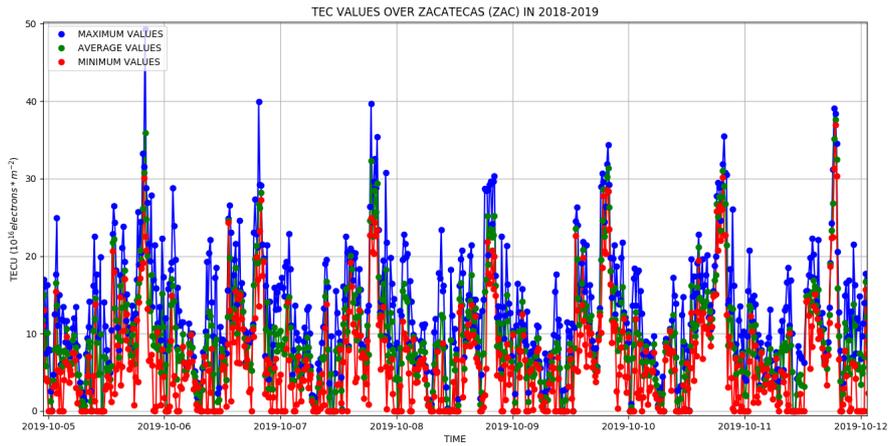


Figura 7.15: Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Zacatecas durante los días 05 al 11 de Octubre de 2019.

es regular, con hasta 3 estaciones en su territorio, y algunas más, de los estados aledaños.

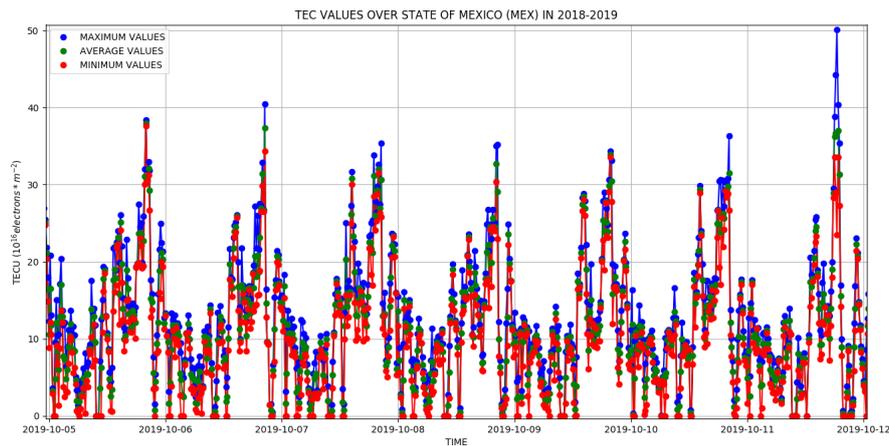


Figura 7.16: Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el Estado de México durante los días 05 al 11 de Octubre de 2019.

Región Suroeste: Chiapas

La región suroeste de México presenta la mayor densidad de estaciones en todo el territorio, siendo Oaxaca y Chiapas, los estados más importantes. Chiapas (véase Figura 7.17) presenta valores máximos de hasta 42 TECUs.

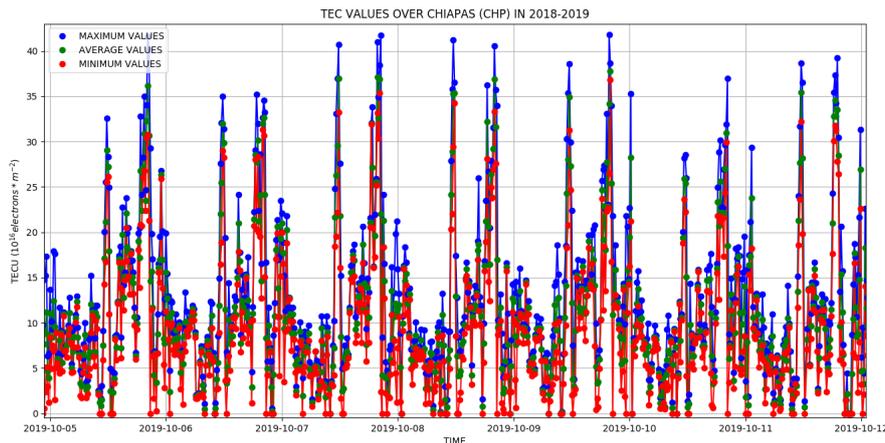


Figura 7.17: Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Chiapas durante los días 05 al 11 de Octubre de 2019.

Región Sureste: Quintana Roo

El estado de Quintana Roo (véase Figura 7.18), posee una baja densidad de estaciones GPS, ya que su territorio cuenta con una sola estación, mostrando valores máximos de hasta 52 TECUs.

Finalmente, Quintana Roo representa a la última región que constituye parte de la región sur del país, finalmente se puede observar un incremento de valores máximos de TECUs al compararlo con el resto de los estados, lo que podemos interpretar como la variación del comportamiento del TEC sobre el territorio mexicano, en una ventana representativa del periodo Otoño 2019, además, como se ha mencionado antes, Chiapas y Sonora son los estados que más poseen estaciones GPS en sus territorios, mostrando en sus gráficas, valores máximos que llegan hasta los 36 y 42 TECUs, respectivamente. Si a los valores de los estados con mayor densidad de estaciones, se compara con el resto de los estados, observamos una diferencia de 12 TECUs entre las regiones cercanas a las que representan Sonora y Nuevo León y de 10 TECUs a las regiones cercanas representadas por Chiapas y Quintana Roo, obteniendo una diferencia de aproximadamente 6 TECUs entre las latitudes de Chiapas y Sonora.

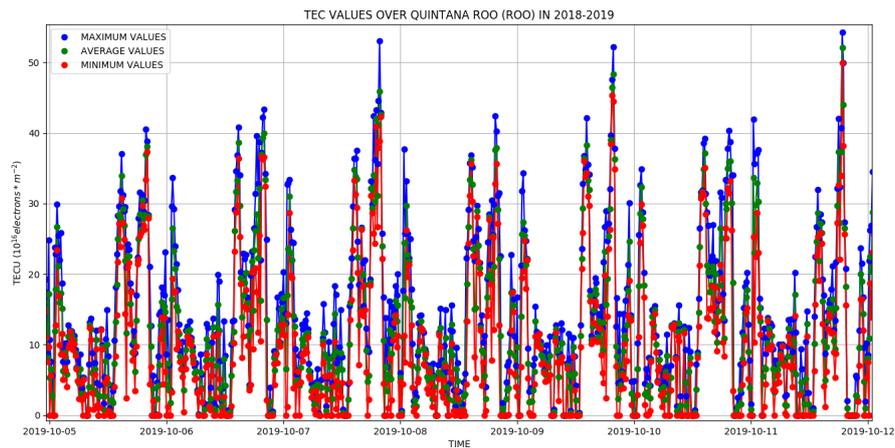


Figura 7.18: Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Quintana Roo durante los días 05 al 11 de Octubre de 2019.

7.3. Impacto de la Resolución Espacial

El ciclo solar 24, finaliza a la par de los inicios en las operaciones de AzTEC, y con él, la primer versión de Mapas TEC con valores caracterizados del TEC, en la *Ionósfera* sobre el territorio de México.

En la Figuras 7.19 (a), (b), (c) y (d), se muestran los Mapas TEC de la misma época pero distinto año, sobre las mallas de resolución, respectivamente, mostrando comportamientos más estables, tras los cambios en la resolución espacial, reduciendo el ruido generado por el error numérico de las interpolaciones.

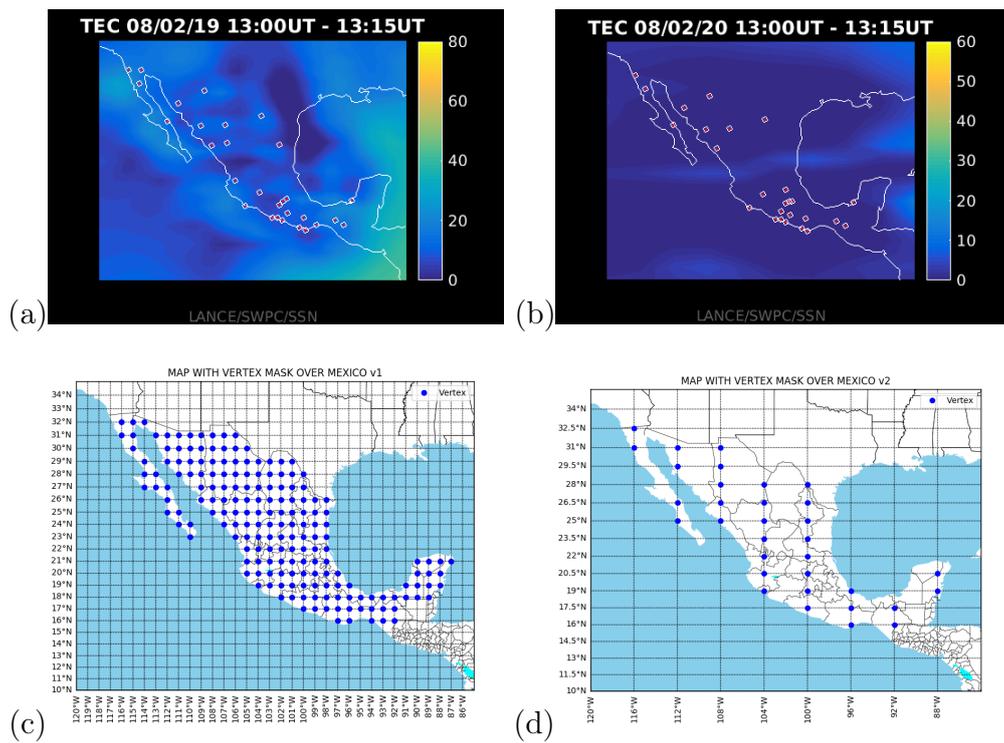


Figura 7.19: (a) Mapa TEC sobre México del día 08 de Febrero de 2019 a las 13:00 UTC, antes de las modificaciones en la resolución de la malla, en un rango de 0 a 80 TECU. (b) Mapa TEC del día 08 de Septiembre de 2020 a las 13:00 UTC, después de los cambios en la resolución de la malla, en un rango de 0 a 60 TECUs.

Capítulo 8

Conclusiones y Trabajo a Futuro

8.1. Conclusiones

AzTEC es el primer proyecto para el Clima Espacial que genera mapas con las condiciones ionosféricas cercano a Tiempo Real sobre el territorio de México; utilizando un esquema basado en la asimilación de datos entre un modelo ionosférico empírico y los datos observacionales en Tiempo Real, gracias al streaming proporcionado por la red de estaciones GPS del SSN y de TLALOCNet usando el código US-TEC RT, una poderosa herramienta computacional que utiliza el algoritmo del Filtro de Kalman para la estimación del TEC y el modelo MAGIC para la creación de Mapas TEC sobre el territorio mexicano.

Durante el 2018 al 2019, fueron generados cerca de 40,600 Mapas TEC, a los que se les obtuvieron $\approx 3,800,000$ valores de TECUs, los cuales fueron analizados mediante técnicas analíticas, logrando el desarrollo de una metodología que permite caracterizar y validar los valores del TEC en cada mapa.

Durante el análisis, encontramos que el TEC está influenciado por la resolución de la malla y por la cantidad de datos que contengan los archivos RINEX, además, se observó que cuando el sistema se reinicia, los mapas necesitan un lapso de ≈ 4 horas para estabilizarse, y en un análisis por cada estado del país, el primero que se

hace de este tipo, encontramos que el TEC aumenta en los estados posicionados al suroeste y sureste de México, y en donde la densidad de estaciones GPS es menor.

Finalmente, durante el desarrollo de esta tesis, he aprendido a potenciar la implementación de herramientas computacionales para el procesamiento y análisis de grandes cantidades de datos, adquiriendo los conocimientos, la experiencia y la disciplina necesaria para continuar con los retos de mis siguientes proyectos.

8.2. Trabajo a Futuro

Usando la metodología aquí desarrollada, se propone continuar con los cambios en la resolución de la malla, considerando realizar la cantidad de modificaciones necesarias que permitan encontrar los valores óptimos para la creación de Mapas TEC más confiables.

Con los resultados obtenidos en el análisis de la variación estacional del TEC en México, se puede optimizar el código de US-TEC agregando una función que permita cambiar de manera automática la escala valores de TECUs en los Mapas TEC. Esto con la finalidad de tener el rango de valores ideales para cada periodo estacional y evitar modificarlos manualmente.

Debido a que AzTEC inició sus operaciones a la par que finalizaba el ciclo solar 24, es importante analizar para cada periodo estacional el comportamiento de los Mapas TEC en el próximo ciclo. Este será el primer análisis de la variación del TEC en México durante un ciclo solar completo con Mapas TEC usando datos en Tiempo Real.

AzTEC inició una serie de pruebas comparando los Mapas TEC utilizando datos en Tiempo Real con el de otros métodos. Debido a que durante el cálculo del TEC, la asimilación de los datos es realizada con todas las estaciones; una de las propuestas del grupo de colaboradores del LANCE, fue realizar pruebas con una sola estación, utilizando únicamente los datos de la estación GPS ubicada en Coeneo, Michoacán

(UCOE = 19.8132, -101.6944). Esto con la finalidad de comparar los valores del TEC calculados con otros códigos.

Finalmente, en el análisis de los valores de TECUs por estados, se encontró que en la región por donde atraviesa la zona Subtropical de Cáncer (Baja California, Sonora, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas), el comportamiento del TEC presenta una mayor actividad durante la noche, a diferencia de las regiones centro y sur de nuestro país. Continuar con un análisis más detallado sobre esta región, podría confirmar si los mapas creados con AzTEC han logrado observar la característica anomalía ecuatorial ionosférica. Los resultados de estas pruebas, serían las primeras en su tipo, ya que no existen estudios previos en esta región.

Apéndice A

Tablas y Códigos

A.1. Tablas

A.1.1. Red de Estaciones GPS del Servicio Sismológico Nacional (SSN)

A.1.2. Red de Estaciones GPS de TLALOCNet

A.1.3. Bitácora de Reinicios de AzTEC

Mnemónico	Nombre	Latitud	Longitud
TJIG	Tijuana, BCN	23.433376	-116.67625
MBIG	Mexicali, BCN	32.407183	-115.19814
SPIG	San Pedro Mártir, BCN	31.04597	-115.466025
NZIG	Nacozari, SON	30.37305	-109.554158
CGIG	Casas Grandes, CHI	30.365044	-107.977352
HSIG	Hermosillo, SON	29.019754	-110.94928
SRIG	Santa Rosalía, BCS	27.319827	-112.241057
MCIG	Múzquiz, COA	27.877093	-101.483627
BCIG	La Boquilla, CHI	27.544763	-105.412656
HPIG	Hidalgo del Parral, CHI	26.936794	-105.664017
CSIG	Choix (Presa Huites), SIN	26.8362	-108.3712
TSIG	Topolobampo, SIN	25.6048	-109.0465
MNIG	Monterrey, NLE	25.6093	-100.2852
PDIG	Papasquiario, DGO	25.04023	-105.395923
LNIG	Linares, NLE	24.898167	-99.465617
SSIG	Sanalona, SIN	24.8165	-107.1448
LPIG	La Paz, BCS	24.100999	-110.309311
MAIG	Mazatlán, SIN	23.183967	-106.425517
CTIG	Gómez Farías, TAM	23.066908	-99.169127
ZAIG	Zacatecas, ZAC	22.7692	-102.567
AAIG	Aguascalientes, AGS	21.968457	-102.3802
RPIG	Río Verde, SLP	21.88492	-99.982753
ANIG	Ahuacatlán, NAY	21.053822	-104.520706
MYIG	Mérida, YUC	20.948069	-89.639614
IGIG	Irapuato, GTO	20.753042	-101.327803
DHIG	Demacú, HGO	20.3003	-99.035468
TEIG	Tepich, ROO	20.226	-88.276
ACIG	Acambay, DIF	19.9845	-99.8823
LVIG	Laguna Verde, VER	19.72622	-96.4185

MOIG	Morelia, MIC	19.646812	-101.227135
CJIG	Chamela, JAL	19.49943	-105.043867
CUIG	El Pozo, DIF	19.329	-99.178
PPIG	Popocatepetl, PUE	19.06705	-98.628148
SCIG	Sabancuy, CAM	18.967037	-91.186588
YAIG	Yautepec, MOR	18.862517	-99.066987
TPIG	Tehuacán, PUE	18.42021	-97.361985
PLIG	Platanillo, GRO	18.392194	-99.502368
MMIG	Maruata, MIC	18.288528	-103.345565
ARIG	Arcelia, GRO	18.280492	-100.347494
TOIG	Toxpalán, OAX	18.0956833	-97.0646133
TUIG	Tuzandepetl, VER	18.03375	-94.42254
MEIG	Mezcala, GRO	17.925167	-99.619758
FTIG	Fresnillo de Trujano, OAX	17.907928	-98.132664
HLIG	Huajuapán de León, OAX	17.829967	-97.803575
ZIIG	Zihuatanejo, GRO	17.606869	-101.4644987
TLIG	Tlapa, GRO	17.562652	-98.5665
TXIG	Tlaxiaco, OAX	17.2532217	-97.7676667
MGIG	Malinaltepec, GRO	17.233614	-98.633759
CMIG	Matías Romero, OAX	17.091	-94.8838
OXIG	Oaxaca, OAX	17.072548	-96.7329
CAIG	El Cayaco, GRO	17.048585	-100.267253
DAIG	Dos Arroyos, GRO	17.021298	-99.650691
YOIG	Yosondúa, OAX	16.856545	-97.54565
TGIG	Tuxtla Gutierrez, CHP	16.77821	-93.122278
CRIG	Cruz Grande, GRO	16.736338	-99.131171
PNIG	Pinotepa, OAX	16.3928	-98.127372
CCIG	Comitán, CHP	16.2818	-92.1368
PEIG	Puerto Escondido, OAX	15.998617	-97.1472
HUIG	Huatulco, OAX	15.76922	-96.10835
PCIG	Pijijiapan, CHP	15.70462	-93.21895
THIG	Tapachula, CHP	14.8823	-92.2958

Tabla A.1: Red de 61 estaciones GPS enviando Datos a 1 Hz perteneciente al SSN.

Mnemónico	Nombre	Latitud	Longitud
TNPP	Puerto Peñasco, SON	31.3355	-113.6316
GUAX	Isla Guadalupe, BCN	28.8841	-118.2897
YESX	Yecora, SON	28.3783	-108.9196
TNTB	Topolobampo, SIN	25.6059	-109.0527
UAGU	Aguascalientes, AGS	21.9185	-102.315
UGEO	UGEO (Guadalajara), JAL	20.6938	-103.3511
TNAM	Ameca, JAL	20.5356	-103.9668
TNMS	Mascota, JAL	20.5348	-104.7967
PZUL	Playa Azul, MIC	20.064	-105.5077
UCOE	Coeneo, MIC	19.8132	-101.6944
TNCT	Chalacatepec, JAL	19.6811	-105.2588
TNMO	Morelia	19.6488	-101.2278
UXAL	Jalapa, VER	19.5164	-96.9248
TNLC	La Concepción, JAL	19.5061	-104.5492
TNCM	Chamela, JAL	19.4981	-105.0448
PENA	Pena Colorada, JAL	19.3905	-104.1015
TNGF	Geofísica, DIF	19.3269	-99.176
TNTM	Tamarindo, JAL	19.2391	-104.7899
TNMZ	Manzanillo, COL	19.1236	-104.4015
TNAL	Altzomoni, MEX	19.1187	-98.6552
UTON	Tonantzintla, PUE	19.0334	-98.3162
TECO	Tecoman, COL	18.9846	-103.861
TNCC	Coalcoman, MIC	18.7911	-103.173
TNCN	Las Cañas, MIC	18.5538	-101.9708
TNIF	Presa Infiernillo, GRO	18.2715	-101.8956
TNAT	Acatlan, PUE	18.1302	-98.0411
TNNX	Nochixtlan, OAX	17.4076	-97.2239
TNMQ	Marquelia, GRO	16.7103	-98.6116
OXTH	Tehuantepec, OAX	16.2863	-95.2408
TNSJ	San Jose Pacifico, OAX	16.1724	-96.4895
TNNP	Nopala, OAX	16.1205	-97.1419
TNCY	Coyuche, OAX	16.0585	-97.7592
OXPE	Puerto Escondido, OAX	15.8887	-97.0753
TNPJ	Pijijiapan, CHP	15.7046	-93.2189
OXUM	Puerto Angel, OAX	15.6622	-96.499

Tabla A.2: Red de 36 estaciones GPS enviando datos a 1 Hz perteneciente a TLA-LOCNet.

Fecha	Hora de Reinicio	Fecha	Hora de Reinicio
11/10/2018	00:37 (UTC)	24/04/2019	17:15 (UTC)
11/10/2018	22:30 (UTC)	29/04/2019	16:30 (UTC)
15/10/2018	20:00 (UTC)	08/05/2019	15:15 (UTC)
16/10/2018	21:45 (UTC)	09/05/2019	17:45 (UTC)
17/10/2018	20:35 (UTC)	09/05/2019	22:15 (UTC)
18/10/2018	20:35 (UTC)	13/05/2019	18:15 (UTC)
19/10/2018	20:28 (UTC)	17/05/2019	17:45 (UTC)
22/10/2018	19:30 (UTC)	17/05/2019	23:00 (UTC)
23/10/2018	21:22 (UTC)	20/05/2019	20:00 (UTC)
25/10/2018	23:00 (UTC)	20/05/2019	20:45 (UTC)
07/11/2018	21:51 (UTC)	21/05/2019	17:30 (UTC)
08/11/2018	21:08 (UTC)	22/05/2019	18:15 (UTC)
12/11/2018	20:08 (UTC)	23/05/2019	21:00 (UTC)
16/11/2018	20:15 (UTC)	28/05/2019	17:45 (UTC)
20/11/2018	20:00 (UTC)	28/05/2019	21:45 (UTC)
28/11/2018	18:27 (UTC)	28/05/2019	22:15 (UTC)
29/11/2018	22:02 (UTC)	31/05/2019	17:15 (UTC)
14/02/2019	23:58 (UTC)	31/05/2019	20:00 (UTC)
18/02/2019	22:30 (UTC)	03/06/2019	19:00 (UTC)
08/03/2019	21:55 (UTC)	04/06/2019	21:00 (UTC)
27/03/2019	20:16 (UTC)	17/10/2019	17:15 (UTC)
28/03/2019	20:30 (UTC)		

Tabla A.3: Bitácora de reinicio de AzTEC durante el 2018 y 2019.

Apéndice B

Coordenadas y Máscaras de Vértices

B.1. Coordenadas Geográficas para la Proyección de Vértices sobre el Territorio de México [Lat, Lon]: 1ra Configuración

[32, -115], [32, -114], [32, -113], [31, -116], [31, -115], [31, -113], [31, -112], [31, -111], [31, -110], [31, -109], [31, -108], [31, -107], [31, -106], [30, -115], [30, -112], [30, -111], [30, -110], [30, -109], [30, -108], [30, -107], [30, -106], [30, -105] [29, -114], [29, -112], [29, -111], [29, -110], [29, -109], [29, -108], [29, -107], [29, -106], [29, -105], [29, -104], [29, -103], [29, -102], [29, -101], [28, -114], [28, -113], [28, -111], [28, -110], [28, -109], [28, -108], [28, -107], [28, -106], [28, -105], [28, -104], [28, -103], [28, -102], [28, -101], [28, -100], [27, -114], [27, -113], [27, -112], [27, -109], [27, -108], [27, -107], [27, -106], [27, -105], [27, -104], [27, -103], [27, -102], [27, -101], [27, -100], [26, -112], [26, -109], [26, -108], [26, -107], [26, -106], [26, -105], [26, -104], [26, -103], [26, -102], [26, -101], [26, -100], [26, -99], [26, -98], [25, -112], [25, -111], [25, -108], [25, -107], [25, -106], [25, -105], [25, -104], [25, -103], [25, -102], [25, -101], [25, -100], [25, -99], [25, -98], [24, -110], [24, -107], [24, -106], [24, -105], [24, -104], [24, -103], [24, -102], [24, -101], [24, -100], [24, -99], [24, -98], [23, -110], [23, -106], [23, -105], [23, -104], [23,

-103], [23, -102], [23, -101], [23, -100], [23, -99], [23, -98], [22, -105], [22, -104], [22, -103], [22, -102], [22, -101], [22, -100], [22, -99], [22, -98], [21, -105], [21, -104], [21, -103], [21, -102], [21, -101], [21, -100], [21, -99], [21, -98], [21, -90], [21, -89], [21, -88], [21, -87], [20, -105], [20, -104], [20, -103], [20, -102], [20, -101], [20, -100], [20, -99], [20, -98], [20, -97], [20, -90], [20, -89], [20, -88], [19, -104], [19, -103], [19, -102], [19, -101], [19, -100], [19, -99], [19, -98], [19, -97], [19, -96], [19, -91], [19, -90], [19, -89], [19, -88], [18, -102], [18, -101], [18, -100], [18, -99], [18, -98], [18, -97], [18, -96], [18, -95], [18, -94], [18, -93], [18, -92], [18, -91], [18, -90], [18, -89], [17, -100], [17, -99], [17, -98], [17, -97], [17, -96], [17, -95], [17, -94], [17, -93], [17, -92], [16, -97], [16, -96], [16, -94], [16, -93], [16, -92].

183 Vértices sobre el territorio de México.

B.2. Coordenadas Geográficas para la Proyección de Vértices sobre el Territorio de México [Lat, Lon]: 2da Configuración

[35.5, -116], [31, -116], [31, -112], [31, -108], [29.5, -112], [29.5, -108], [28, -108], [28, -104], [28, -100], [26.5, -112], [26.5, -108], [26.5, -104], [26.5, -100], [25, -112], [25, -108], [25, -104], [25, -100], [23.5, -104], [23.5, -100], [22, -104], [22, -100], [20.5, -104], [20.5, -100], [20.5, -88], [19, -104], [19, -100], [19, -96], [19, -88], [17.5, -100], [17.5, -96], [17.5, -92], [16, -96], [16, -92]

33 Vértices sobre el territorio de México.

B.3. Coordenadas Geográficas para la Proyección de las Estaciones GPS en México [Lat, Lon]

[32, -116], [32, -115], [32, -114], [31, -116], [31, -115], [31, -113], [31, -110], [31, -109], [31, -108], [30, -110], [30, -109], [30, -108], [29, -111], [29, -109], [28, -109], [28, -106], [28, -105], [27, -109], [27, -108], [27, -106], [27, -105], [26, -109], [26, -100], [25, -107], [25, -106], [25, -105], [25, -100], [25, -99], [24, -110], [23, -106], [23, -103], [23, -102], [23, -99], [22, -103], [22, -102], [22, -100], [21, -105], [21, -104], [21, -103], [21, -101], [21, -90], [20, -105], [20, -104], [20, -103], [20, -102], [20, -101], [20, -100], [20, -99], [20, -97], [20, -88], [19, -104], [19, -103], [19, -102], [19, -99], [19, -98], [19, -97], [19, -91], [18, -102], [18, -101], [18, -100], [18, -99], [18, -98], [18, -97], [18, -95], [18, -94], [17, -100], [17, -99], [17, -98], [17, -97], [17, -95], [17, -93], [16, -97], [16, -96], [16, -93], [16, -92].

B.4. Máscaras de Vértices de cada Estado del Territorio de México para el Análisis de los Valores TECU en los Archivos ‘txt’ [x, y]:

- **Aguascalientes (tecvalues-ags.py):** [17, 12], [18, 12].
- **Baja California Norte (tecvalues-bcn.py):** [4, 21], [4, 22], [5, 20], [5, 21], [6, 19], [7, 18]. 2da Configuración: [1, 14], [1, 15].
- **Baja California Sur (tecvalues-bcs.py):** [6, 17], [6, 18], [7, 17], [8, 15], [8, 16], [8, 17], [9, 14], [9, 15], [10, 13], [10, 14]. 2da Configuración: [2, 10], [2, 11].
- **Campeche (tecvalues-cam.py):** [29, 8], [29, 9], [30, 8], [30, 9], [30, 10].
- **Chiapas (tecvalues-chp.py):** [26, 6], [27, 6], [27, 7], [28, 6], [28, 7]. 2da Configuración: [7, 13], [7, 14].

- **Chihuahua (tecvalues-chi.py):** [11, 18], [12, 17], [12, 18], [12, 19], [12, 20], [12, 21], [13, 16], [13, 17], [13, 18], [13, 19], [13, 20], [13, 21], [14, 17], [14, 18], [14, 19], [14, 20], [14, 21], [15, 17], [15, 18], [15, 19], [15, 20], [16, 17], [16, 18], [16, 19]. 2da Configuración: [3, 12], [3, 13], [3, 14], [4, 12].
- **Coahuila (tecvalues-coa.py):** [17, 15], [17, 16], [17, 17], [17, 18], [17, 19], [18, 16], [18, 17], [18, 18], [18, 19], [19, 15], [19, 16], [19, 17], [19, 18], [19, 19], [20, 18]. 2da Configuración: [4, 12], [5, 12].
- **Colima (tecvalues-col.py):** [16, 9], [17, 9]*. 2da Configuración: [4, 6], [4, 7]*.
- **Durango (tecvalues-dur.py):** [13, 15], [14, 15], [14, 16], [15, 13], [15, 14], [15, 16], [16, 14], [16, 15], [16, 16] 2da Configuración: [4, 10], [4, 11]
- **Guanajuato (tecvalues-gto.py):** [18, 11], [19, 11].
- **Guerrero (tecvalues-gro.py):** [18, 8], [19, 8], [20, 7], [20, 7], [21, 7], [21, 8]. 2da Configuración: [5, 5], [5, 6].
- **Hidalgo (tecvalues-hgo.py):** [21, 10], [21, 11].
- **Jalisco (tecvalues-jal.py):** [15, 10], [16, 10], [16, 11], [16, 12], [17, 11], [18, 11]. 2da Configuración: [4, 7], [4, 8].
- **Estado de México (tecvalues-mex.py):** [20, 9], [20, 10], [21, 10]. 2da Configuración: [5, 6], [5, 7]*
- **Michoacán (tecvalues-mic.py):** [17, 9], [17, 10], [18, 9], [18, 10], [19, 9], [19, 10].
- **Morelos (tecvalues-mor.py):** [21, 8], [21, 9].
- **Nayarit (tecvalues-nay.py):** [15, 11], [15, 12].

- **Nuevo León (tecvalues-nle.py):** [20, 14], [20, 15], [20, 16], [20, 17], [21, 16].
2da Configuración: [5, 9], [5, 10], [5, 11]
- **Oaxaca (tecvalues-oax.py):**[22, 7], [22, 8], [23, 6], [23, 7], [23, 8], [24, 6],
[24, 7], [24, 8], [25, 7], [26, 7]. 2da Configuración: [6, 5], [6, 6].
- **Puebla (tecvalues-pue.py):** [22, 9], [22, 10].
- **Querétaro (tevalues-qro.py):** [20, 10], [20, 11]. 2da Configuración: [5, 7],
[5, 8]*.
- **Quintana Roo (tevalues-roo.py):** [31, 8], [31, 9], [32, 9], [32, 10], [33, 11].
2da Configuración: [8, 6], [8, 7].
- **San Luis Potosí (tecvalues-slp.py):** [18, 13], [19, 12], [19, 13], [19, 14], [20,
12], [20, 13], [21, 12]. 2da Configuración: [5, 8], [5, 9]*.
- **Sinaloa (tecvalues-sin.py):** [11, 16], [12, 15], [12, 16], [13, 14], [14, 13], [14,
14]. 2da Configuración: [3, 10], [3, 11].
- **Sonora (tecvalues-son.py):** [5, 22], [6, 22], [7, 21], [8, 19], [8, 20], [8, 21], [9,
18], [9, 19], [9, 20], [9, 21], [10, 18], [10, 19], [10, 20], [10, 21], [11, 17], [11, 19],
[11, 20], [11, 21]. 2da Configuración: [2, 13], [2, 14].
- **Tabasco (tecvalues-tab.py):** [26, 8], [27, 8], [28, 8].
- **Tamaulipas (tecvalues-tam.py):** [21, 13], [21, 14], [21, 15], [22, 13], [22, 14],
[22, 15], [22, 16].
- **Veracruz (tecvalues-ver.py):** [22, 11], [22, 12], [23, 9], [23, 10], [24, 9], [25,
8]. 2da Configuración: [6, 5]*, [6, 6].
- **Tamaulipas (tecvalues-yuc.py):** [30, 11], [31, 10], [31, 11], [32, 11].
- **Zacatécas (tecvalues-zac.py):** [16, 13], [17, 12], [17, 13], [17, 14], [18, 14],
[18, 15]. 2da Configuración: [4, 8]*, [4, 9].

** Vértice cercano al estado analizado, agregado para realizar la comparación de sus máximos, promedios y mínimos, ya que sobre el estado solo se posiciona un vértice.*

Apéndice C

Comportamiento del TEC por Estado

C.0.1. Región Noroeste

Baja California

Las dimensiones territoriales de Baja California (véase Figura C.1) permitieron la utilización de las dos máscaras de vértices de ambas configuraciones, ya que aquí sí se posicionan vértices que permiten el análisis en los archivos txt sobre esta región, obteniendo los valores de TECUs durante todo el 2018 y 2019.

Baja California Sur

Al igual que su homónimo, pero hacia el sur, Baja California Sur (véase Figura C.2) posee vértices en ambas configuraciones, lo que permitió obtener los valores de TECUs que permitirían observar el comportamiento TEC de la *Ionósfera* desde el 2018 al 2019 sobre esta región.

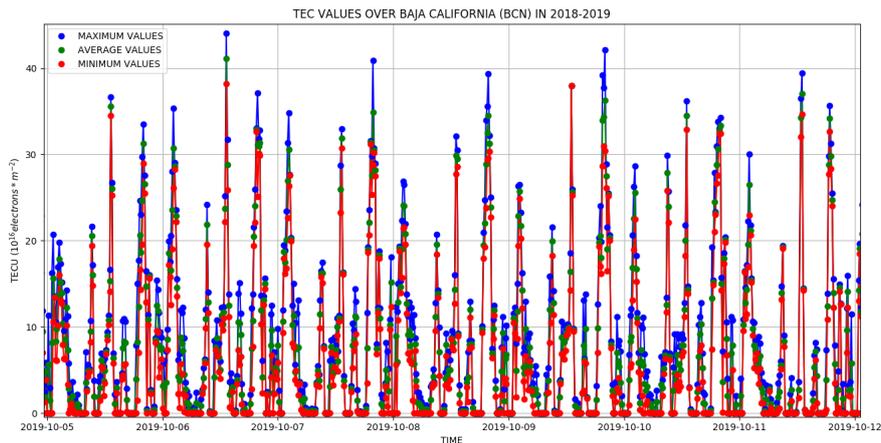


Figura C.1: Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Baja California durante los días 05 al 09 de Octubre de 2019, obteniendo valores máximos de hasta 44 TECUs y valores mínimos de 0 TECUs.

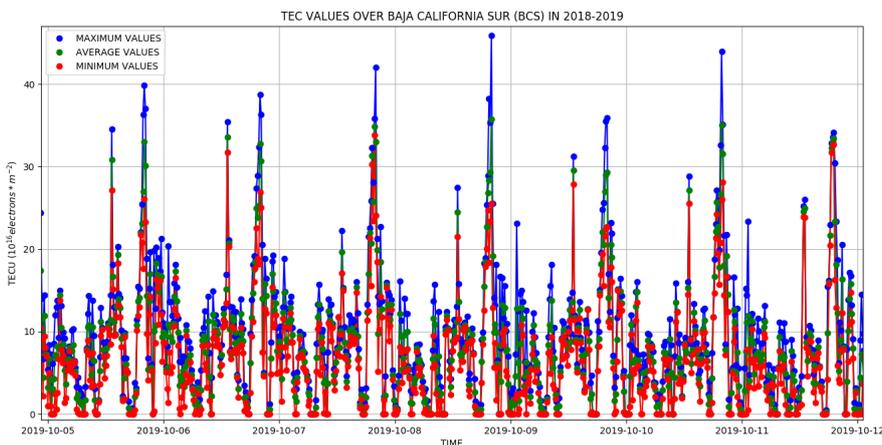


Figura C.2: Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Baja California Sur durante los días 05 al 09 de Octubre de 2019, obteniendo valores máximos de hasta 46 TECUs y mínimos de 0 TECUs.

Chihuahua

Las dimensiones territoriales de Chihuahua (véase Figura C.3) permitieron la utilización de las dos máscaras de vértices de ambas configuraciones, debido a que aquí sí se posicionan vértices que permiten el análisis en los archivos txt sobre esta región, obteniendo los valores de TECUs durante todo el 2018 y 2019.

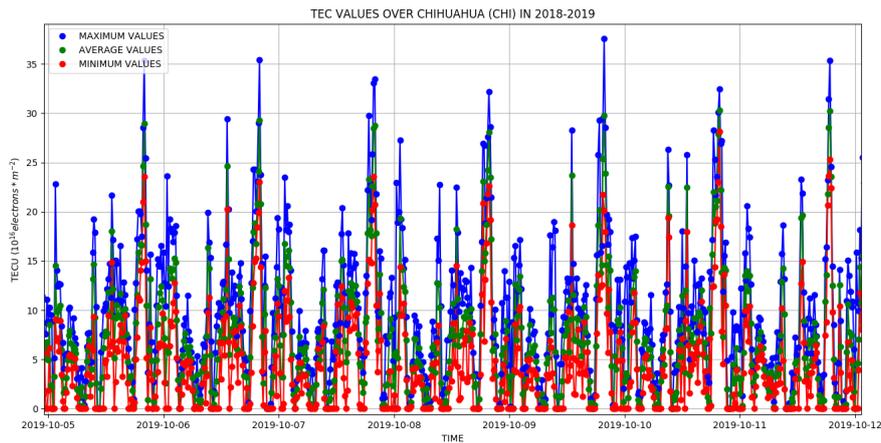


Figura C.3: Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Chihuahua durante los días 05 al 09 de Octubre de 2019, obteniendo valores máximos de hasta 37 TECUs y mínimos de 0 TECUs.

Durango

Las dimensiones territoriales de Durango (véase Figura C.4) permitieron el uso de las dos máscaras de vértices de ambas mallas de resolución para el análisis sobre el estado, obteniendo los valores de TECUs durante todo el 2018 y 2019.

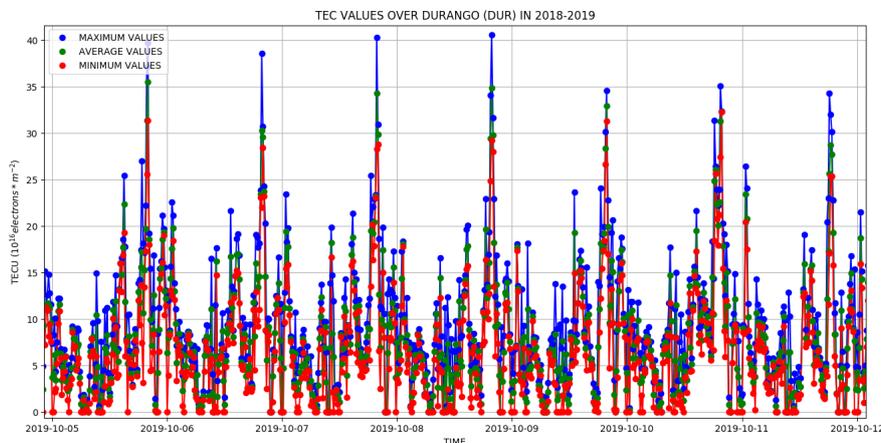


Figura C.4: Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Durango durante los días 05 al 09 de Octubre de 2019, obteniendo valores máximos de hasta 40 TECUs y mínimos de 0 TECUs.

Sinaloa

En Sinaloa (véase Figura C.5), gracias a su extensión territorial permitió el uso de ambas máscaras de vértices de ambas configuraciones en AzTEC, lo que favoreció

al análisis de los valores de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado los días 05 al 09 de Octubre de 2019.

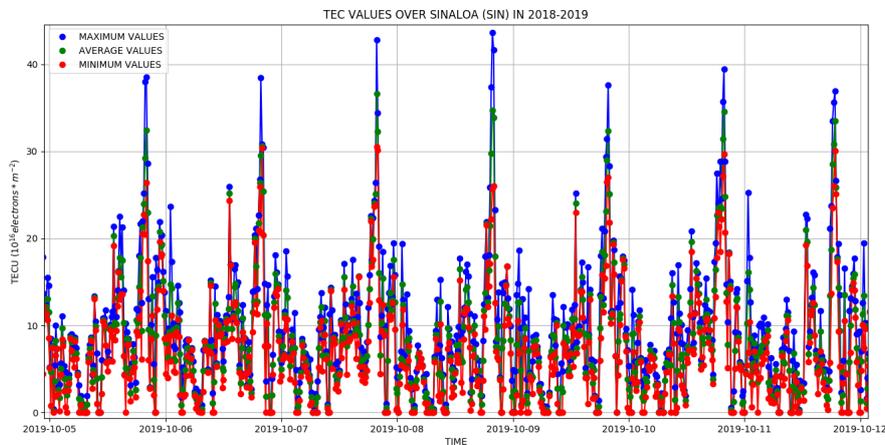


Figura C.5: Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Sinaloa durante los días 05 al 09 de Octubre de 2019, obteniendo valores máximos de hasta 43 TECUs y mínimos de 0 TECUs.

C.0.2. Región Noreste

Coahuila

Las dimensiones territoriales de Coahuila (véase Figura C.6) permitieron el uso de las dos máscaras de vértices de ambas configuraciones para el análisis de los valores de TECUs sobre esta región, obteniendo los valores de TECUs durante todo el 2018 y 2019.

Tamaulipas

Tamaulipas (véase Figura C.7) únicamente posee una máscara de vértices de las configuraciones usadas en AzTEC para el análisis de los valores de TECUs sobre esta región, por lo que se utilizaron los días 07 al 11 de Septiembre de 2018.

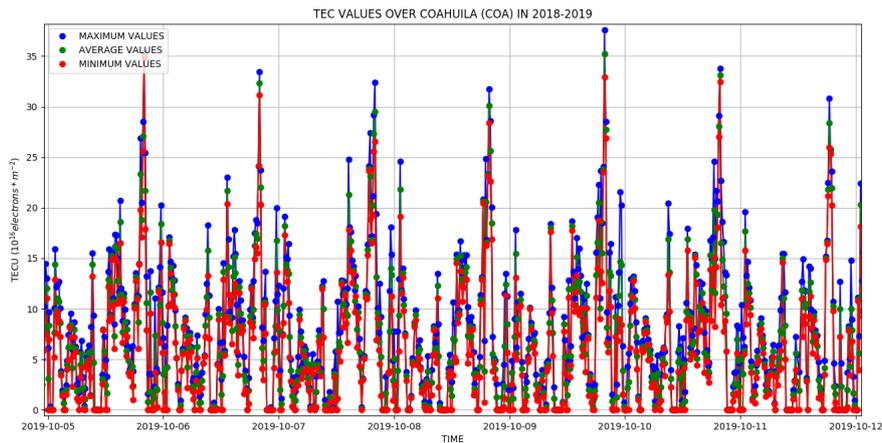


Figura C.6: Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Coahuila durante los días 05 al 09 de Octubre de 2019, obteniendo valores máximos de hasta 37 TECUs y mínimos de 0 TECUs.

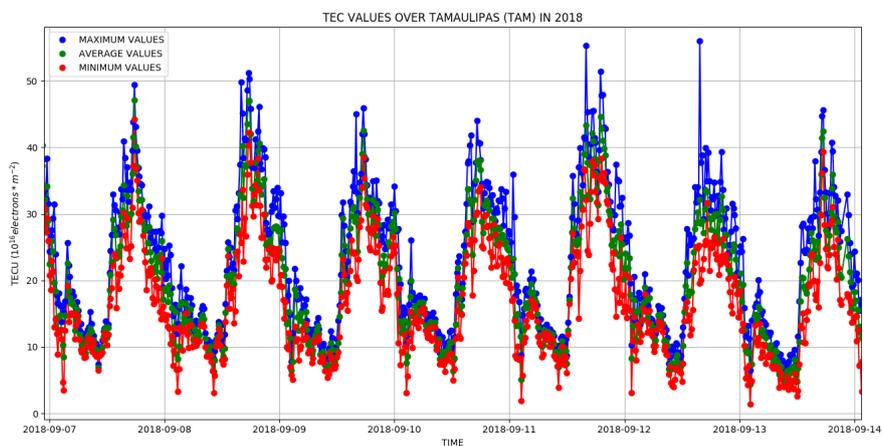


Figura C.7: Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Tamaulipas durante los días 07 al 11 de Septiembre de 2018, obteniendo valores máximos de hasta 55 TECUs y mínimos de hasta 1 TECUs.

C.0.3. Región Occidente

Michoacán

Michoacán (véase Figura C.8) únicamente posee una máscara de vértices de las configuraciones usadas en AzTEC para el análisis de los valores de TECUs sobre el estado, por lo que se utilizaron los días 07 al 11 de Septiembre de 2018.

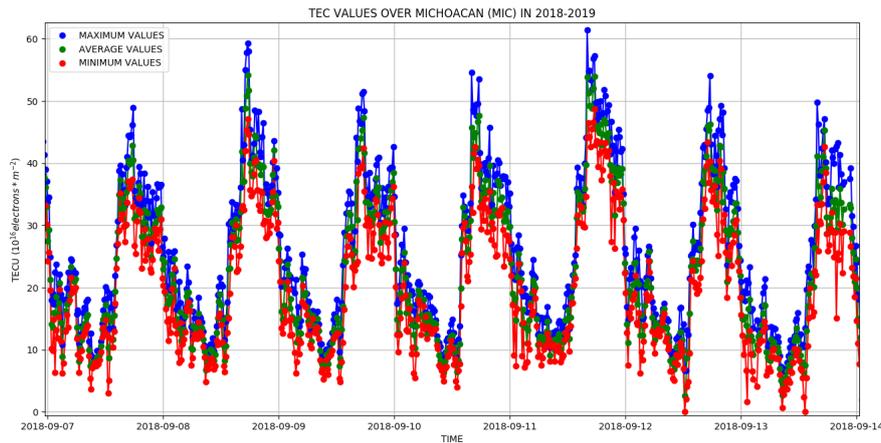


Figura C.8: Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Michoacán durante los días 07 al 11 de Septiembre de 2018, obteniendo valores máximos de hasta 61 TECUs y mínimos de 3 TECUs.

Nayarit

Nayarit (véase Figura C.9) posee una máscara de vértices de las configuraciones usadas en AzTEC, la cual permitió la realización del análisis de los valores de TECUs sobre el estado durante los días 07 al 11 de Septiembre de 2018.

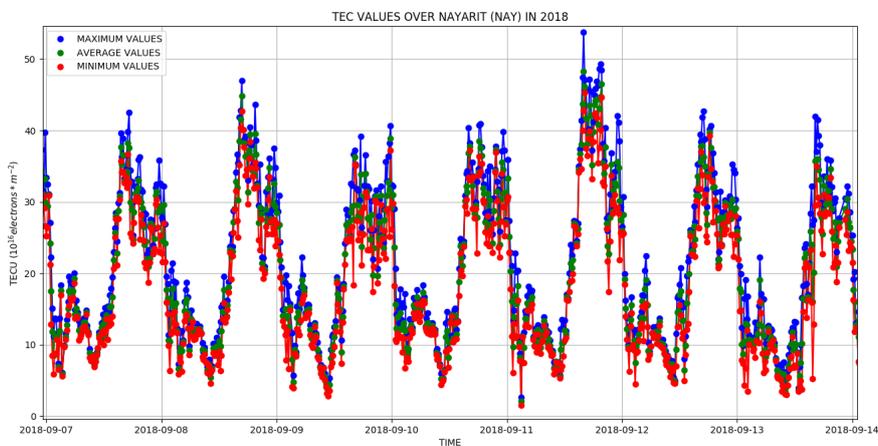


Figura C.9: Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Nayarit durante los días 07 al 11 de Septiembre de 2018, obteniendo valores máximos de hasta 53 TECUs y mínimos de 1 TECUs.

Colima

Para el estado de Colima (véase Figura C.10), debido a que en ambas configuraciones existe un único vértice que se posiciona sobre el estado, se utilizó el vértice

más cercano para realizar el análisis de sus valores de TECUs, permitiendo el uso de ambas máscaras de vértices de ambas configuraciones, obteniendo los valores de TECUs durante todo el 2018 y 2019.

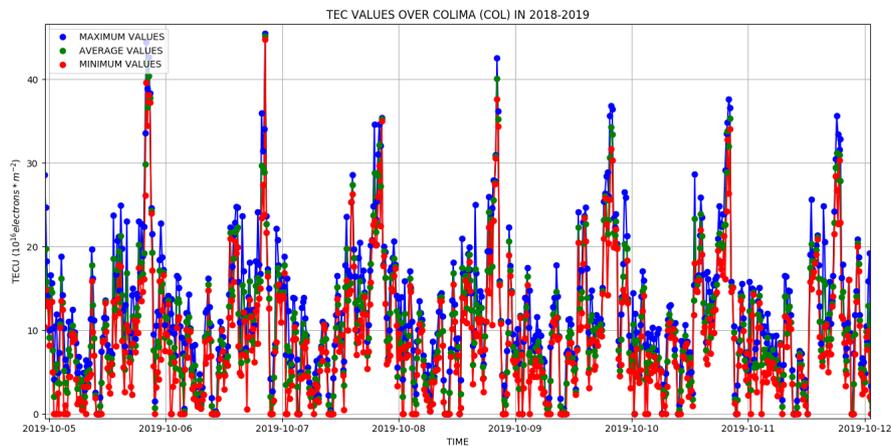


Figura C.10: Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Colima durante los días 05 al 09 de Octubre de 2019, obteniendo valores máximos de hasta 45 TECUs y mínimos de 0 TECUs.

C.0.4. Región Oriente

Puebla

Puebla (véase Figura C.11) únicamente posee una máscara de vértices de las configuraciones usadas en AzTEC para el análisis de los valores de TECUs sobre el estado, por lo que se utilizaron los días 07 al 11 de Septiembre de 2018.

Hidalgo

Para el estado de Hidalgo (véase Figura C.12), situado en la región centro del territorio mexicano, únicamente posee una máscara de vértices de la primer configuración, para el cual se utilizaron los días 07 al 11 de Septiembre de 2018.

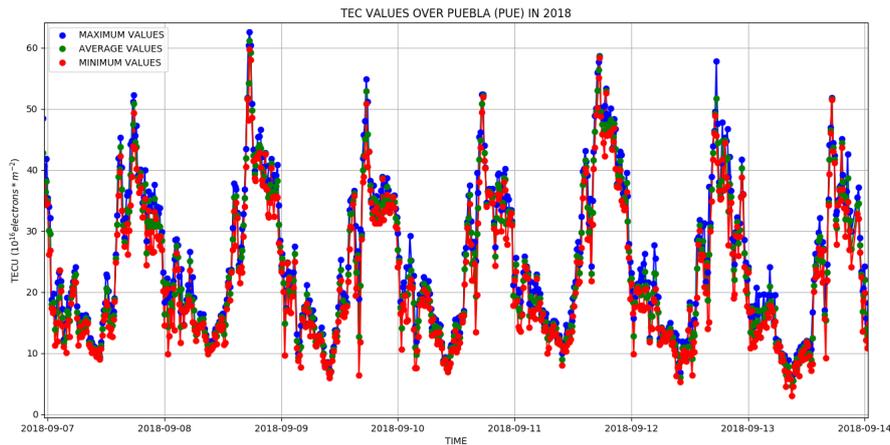


Figura C.11: Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Puebla durante los días 07 al 11 de Septiembre de 2018, obteniendo valores máximos de hasta 62 TECUs y mínimos de 7 TECUs.

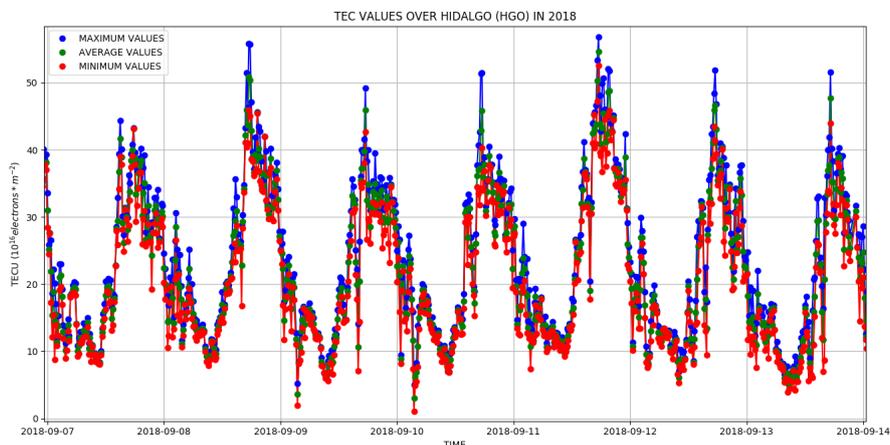


Figura C.12: Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Hidalgo durante los días 07 al 11 de Septiembre de 2018, obteniendo valores con un máximo de hasta 56 TECUs y mínimos de 1 TECUs.

C.0.5. Región Centronorte

Aguascalientes

Para el caso de Aguascalientes (véase Figura C.13), debido a sus dimensiones territoriales y a las modificaciones realizadas en la configuración de AzTEC en el ‘grid’ (malla) de la resolución espacial de los Mapas TEC el día 28 de Mayo de 2019, no posee vértices sobre esta región con la 2da Configuración, por lo que se usaron los días del 07 al 11 de Septiembre de 2018.

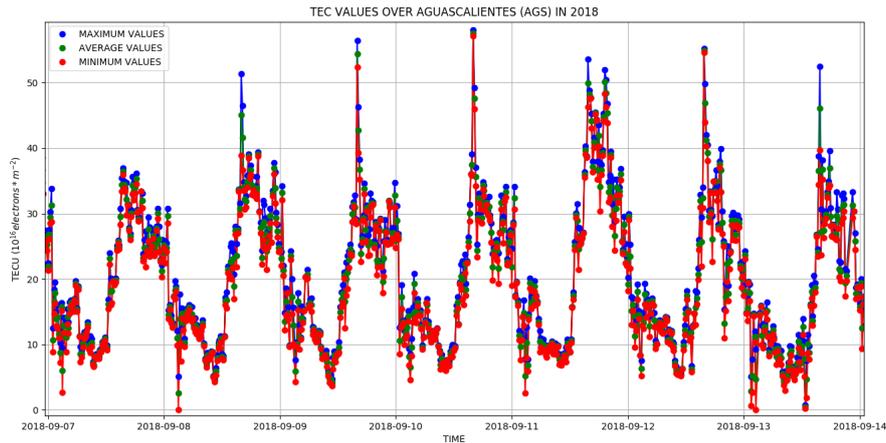


Figura C.13: Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Aguascalientes durante los días 07 al 11 de Septiembre de 2018, obteniendo valores máximos hasta 58 TECUs y mínimos de 0 TECUs.

Guanajuato

Guanajuato (véase Figura C.14) únicamente posee una máscara de vértices de la primer configuración, para el cual se utilizaron los días 07 al 11 de Septiembre de 2018.

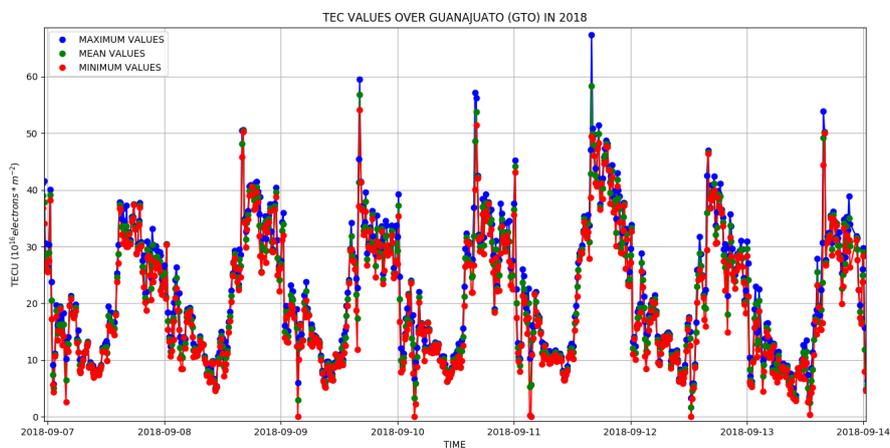


Figura C.14: Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECU de la *Ionósfera* sobre el estado de Guanajuato durante los días 07 al 11 de Septiembre de 2018, obteniendo valores con un máximo de hasta 67 TECUs y mínimos de 0 TECUs.

San Luis Potosí

La extensión territorial de San Luis Potosí (véase Figura C.15), permitió que las dos máscaras de vértices de ambas configuraciones hayan sido utilizadas para el análisis de los valores de TECUs sobre el estado. Obteniendo la proyección del comportamiento TEC de la *Ionósfera* durante todo el 2018 y 2019.

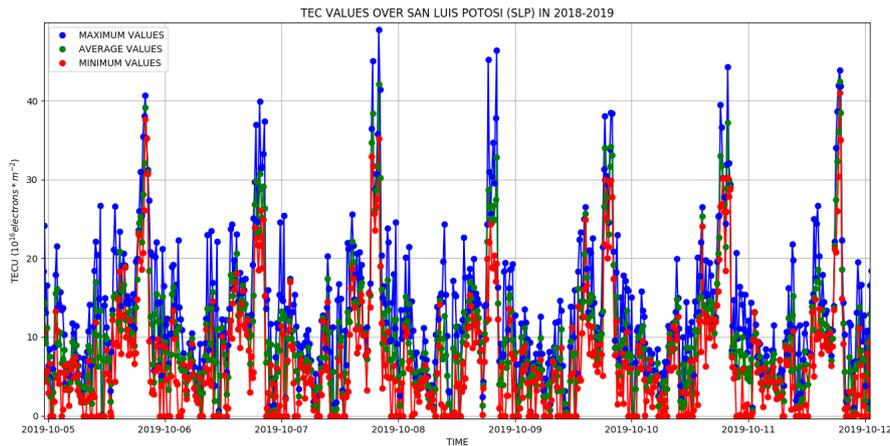


Figura C.15: Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de San Luis Potosí durante los días 05 al 09 de Octubre de 2019, obteniendo valores máximos de hasta 48 TECUs y mínimos de 0 TECUs.

Querétaro

El estado de Querétaro (véase Figura C.16) posee una extensión territorial que permitió la utilización de las dos máscaras de vértices de ambas configuraciones, ya a que aquí sí se posicionan vértices que permiten el análisis en los archivos txt sobre esta región, obteniendo los valores de TECUs durante todo el 2018 y 2019.

C.0.6. Región Centrosur

Morelos

Guanajuato (véase Figura C.17), situado en la región centro del territorio mexicano, únicamente posee una máscara de vértices de la primer configuración, para el cual se utilizaron los días 07 al 11 de Septiembre de 2018.

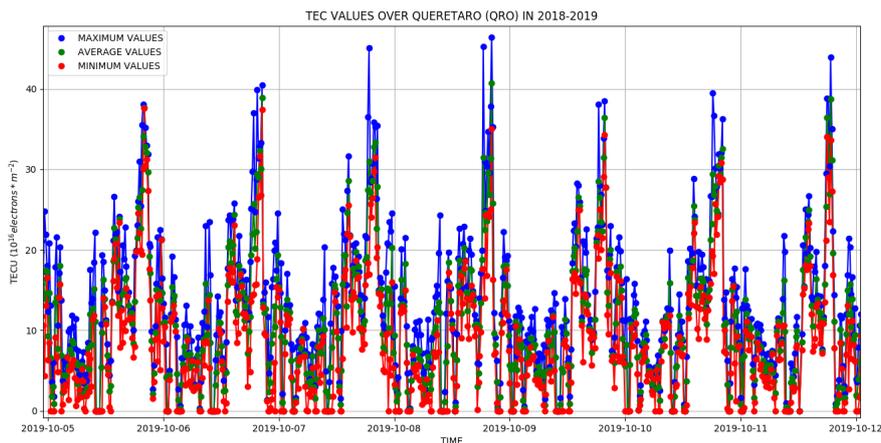


Figura C.16: Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Querétaro durante los días 05 al 09 de Octubre de 2019, obteniendo valores máximos de hasta 44 TECUs y mínimos de 0 TECUs.

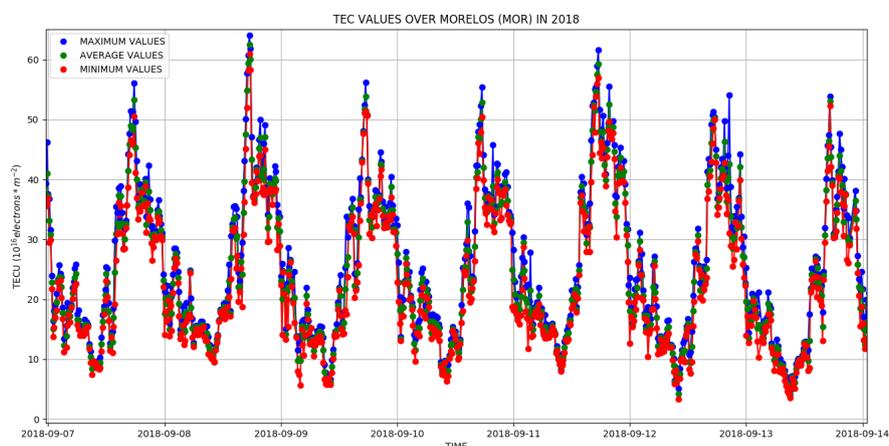


Figura C.17: Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Morelos durante los días 07 al 11 de Septiembre de 2018, obteniendo valores con un máximo de hasta 63 TECUs y mínimos de 6 TECUs.

C.0.7. Región Suroeste

Guerrero

El estado de Guerrero (véase Figura C.18), situado al suroeste del territorio mexicano, gracias a su extensión territorial permitió el uso de ambas máscaras de vértices de ambas configuraciones en AzTEC, lo que favoreció al análisis de los valores de TECUs de la *Ionósfera* sobre esta región los días 05 al 09 de Octubre de 2019.

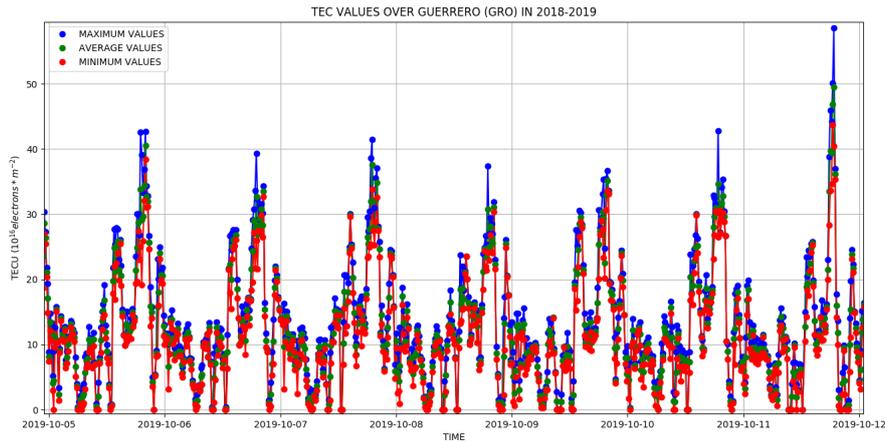


Figura C.18: Gráfica de valores máximos, media y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Guerrero durante los días 05 al 09 de Octubre de 2019, obteniendo valores máximos de hasta 42 TECUs y mínimos de 0 TECUs.

Oaxáca

Oaxáca (véase Figura C.19), dotado de una interesante extensión territorial y de una densa red de estaciones GPS debido a los constantes eventos sismológicos en el estado, cuenta con el análisis con ambas máscaras de vértices de ambas configuraciones lo que favoreció a la obtención los valores de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado durante todo el 2018 y 2019.

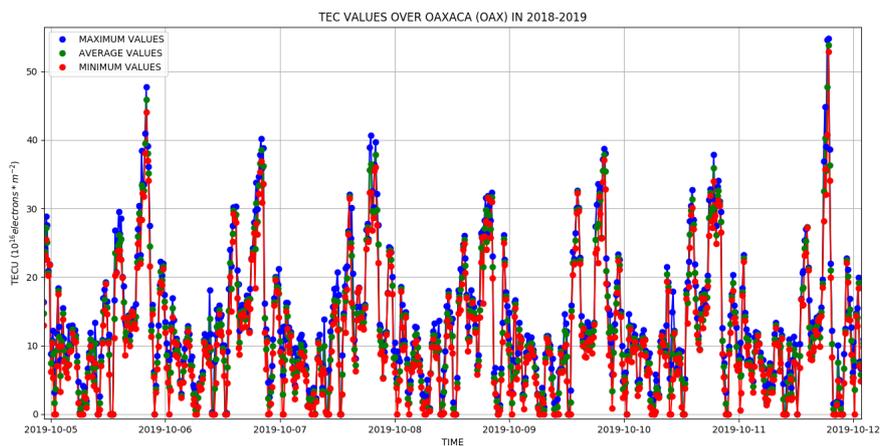


Figura C.19: Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Oaxáca durante los días 05 al 09 de Octubre de 2019, obteniendo valores máximos de hasta 46 TECUs y mínimos de 0 TECUs.

C.0.8. Región Sureste

Tabasco

Tabasco (véase Figura C.20) únicamente posee una máscara de vértices de las configuraciones usadas en AzTEC para el análisis de los valores de TECUs sobre el estado, por lo que se utilizaron los días 07 al 11 de Septiembre de 2018.

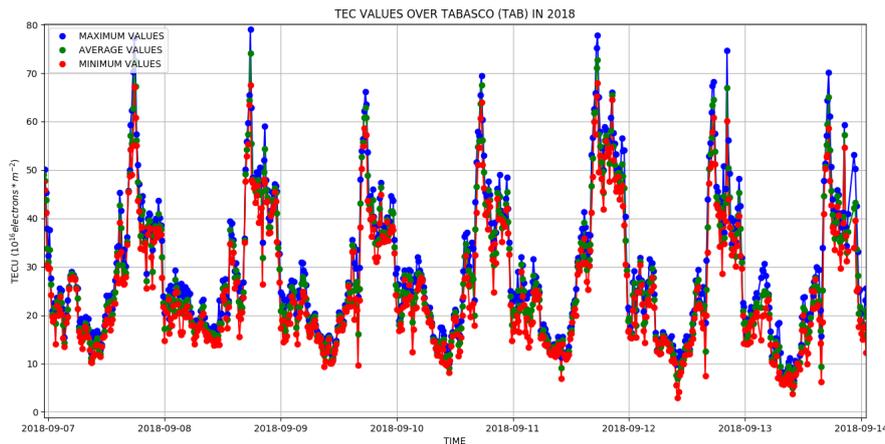


Figura C.20: Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Tabasco durante los días 07 al 11 de Septiembre de 2018, obteniendo valores máximos de hasta 79 TECUs y mínimos de 8 TECUs.

Campeche

Sobre Campeche (véase Figura C.21) únicamente se desarrolló una máscara de vértices de la primer configuración y se utilizaron los días 07 al 11 de Septiembre de 2018.

Yucatán

El estado de Yucatán (véase Figura C.22), debido a sus dimensiones territoriales no posee vértices en la segunda configuración en la resolución de la malla de AzTEC, por lo que se usaron los días del 07 al 11 de Septiembre de 2018 para analizar el comportamiento TEC de la *Ionósfera* sobre esta región.

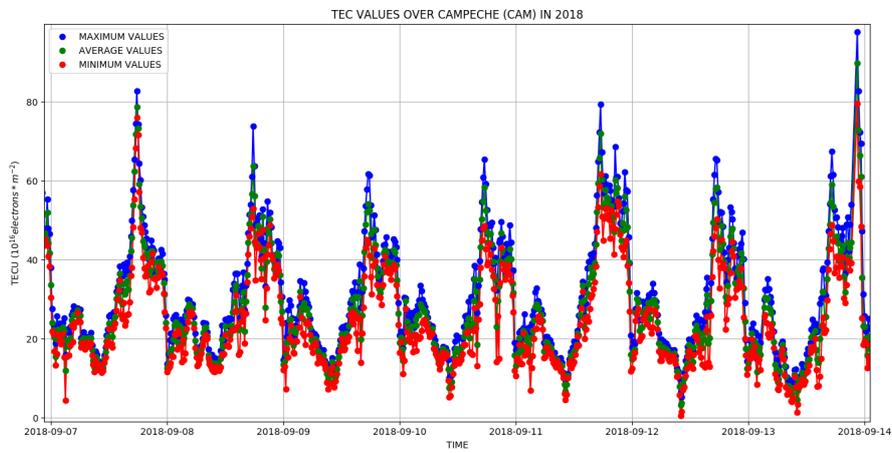


Figura C.21: Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Campeche durante los días 07 al 11 de Septiembre de 2018, obteniendo valores máximos de hasta 82 TECUs y un mínimo de 0 TECUs.

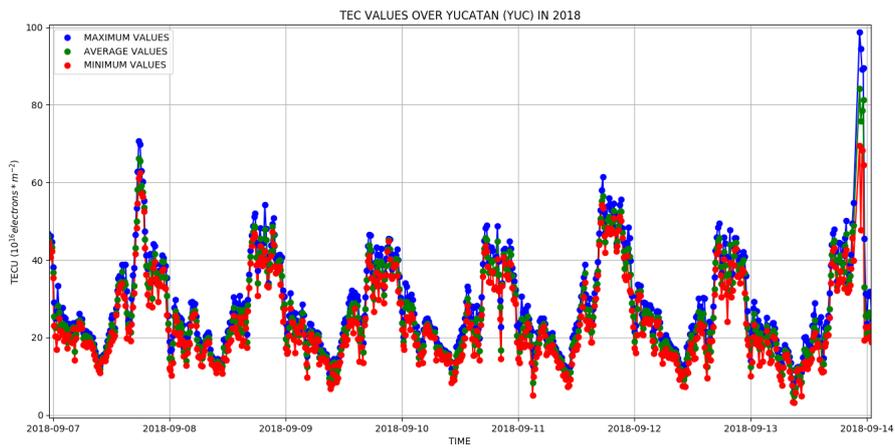


Figura C.22: Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Yucatán durante los días 07 al 11 de Septiembre de 2018, obteniendo valores Máximos de hasta 70 TECUs y Mínimos de 5 TECUs.

Índice de figuras

1.1. Perfil estándar de la <i>Ionósfera</i> . En el eje X, tenemos la temperatura en Kelvin, en el eje Y izquierdo, tenemos la altura de la atmósfera y en el eje Y derecho, la presión en estas regiones. [Extraída de: Liou (2002)]	4
1.2. Modelo ionosférico 2012. En el eje x tenemos la densidad de electrones en metros cúbicos y en el eje y, la altitud de las distintas regiones de la <i>Ionósfera</i> . [Extraída de: Yiğit (2018)]	5
1.3. Patrón del plasma en latitudes bajas debido a una acción combinada de una deriva $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ hacia arriba cerca del ecuador magnético y una difusión hacia abajo a lo largo del campo magnético (\mathbf{B}). [Extraída de: Schunk & Nagy (2009)].	9
1.4. El espectro electromagnético. Las escalas logarítmicas para Frecuencia, Longitud de Onda y Energía se muestran juntas con el nombre de varias regiones generales. [Extraída de: Newman (2008)].	11
1.5. (a) Mapa de estaciones terrestres del IGS. [Fuente: Copyright 2020 IGS (2020)] (b) Mapa TEC Global del día 17 de Marzo de 2015 a las 18:00 Tiempo Universal (UT) con información TEC de 2 horas [Extraídos de: Wilken et al. (2018)].	15

2.1. Caminos de las ondas radio en la superficie terrestre, rebote ionosférico y de la guía de ondas de la *Ionósfera* terrestre. [Extraída de: Goodman (2005a)]. 25

2.2. Constelación GPS de 24 satélites en 6 planos orbitales, con 4 satélites en cada plano a 20,200 km de altitud. Cada plano se encuentra en una inclinación de 55°. [Extraída de: Goodman (2005c)]. 27

2.3. Fulguración solar de clase X9.3 que estalló desde el 06 de Septiembre de 2017 (izquierda) y una fulguración más pequeña de una región activa diferente (derecha), observadas por el Observatorio de Dinámica Solar de la NASA. [Extraída de: Cander (2019)]. 30

3.1. Mapa TEC generado por US-TEC. En el cuadro principal se observa el área territorial de los CONUS con la ubicación de las estaciones GPS usadas durante ese periodo. En la parte derecha del cuadro principal, se observa una barra de contorno de colores que indica el valor TECU que describe el comportamiento de la *Ionósfera* del cuadro principal, también, el error de posición aproximada (m) en el deslizamiento de las señales y finalmente en la parte inferior, se observan la información de los metadatos con la fecha seguido del inicio y termino del periodo en el que se adquirieron los datos, las siglas de las instituciones que integran al proyecto y el lugar en el que se desarrolla. [Extraída de: Center (2020)] 33

3.2. Formato de datos del sistema de navegación GPS. 34

3.3. Visualización del encabezado de un archivo RINEX. 38

3.4. Visualización de la sección de datos recopilados de un archivo RINEX. 39

3.5. Modelo IRI95 del 2019. AzTEC guarda una copia del modelo durante la actualización. 40

3.6. Ubicación del archivo de índices 'ig_rz.dat' del Modelo IRI95. 41

3.7. Gráfica de valores del TEC de los días 23 al 28 de Enero de 2018 en los mapas. En el eje X tenemos el tiempo de cada Mapa TEC al que se le calculó su valor máximo (azul), promedio (verde) y mínimos (rojo) generado cada 15 minutos; y en el eje Y, los valores de TECUs. Durante los días 23 al 25 de Enero, se puede observar el comportamiento del modelo empírico IRI95, luego, a partir de las 19:15 UTC del 25 de Enero de 2018, el comportamiento cambia debido a la conexión de los datos en Tiempo Real. [Imagen de Cortesía por el Dr. Victor De la Luz] 42

3.8. Ciclo del Filtro de Kalman. La actualización de tiempo proyecta la estimación del estado actual por adelantado. La actualización de la medición ajusta la estimación proyectada por una medición real en el momento. [Extraída de: Welch & Bishop (2006)] 43

3.9. Ejemplo de EOF. Estos EOF se generaron aplicando una descomposición de valores singulares a un conjunto de perfiles de modelo generados por IRI95. El término dominante EOF₁, representa un perfil ionosférico medio. Del EOF₂ al EOF₃, disminuyen gradualmente en importancia, permitiendo que el perfil se aparte de la media. Por lo general de 2 a 3 EOF son suficientes cuando se utilizan solo datos basados en Tierra. [Extraída de: Fuller-Rowell et al. (2006)] 47

3.10. Ejemplo de datos STEC en ASCII. [Extraída de: Mitchell & Spencer (2002)] 49

3.11. (Arriba izquierda) Mapa ROB-TEC. (Arriba Derecha) Mediana VTEC de 15 días pasados. (Abajo izquierda) Diferencia de mapas superiores. (Abajo derecha) Porcentajes de diferencia de rangos entre los mapas superiores y estadísticas. 52

3.12. Servicio de My-Iono y distribución de sus 4 sub-sistemas. [Extraída de: Bhoo-Pathy et al. (2019)] 54

3.13. Escalas: Normal, Medio y Severo de EIX para el servicio My-Iono que informa el estado ionosférico actual sobre Malasia. [Extraída de: Bhoo-Pathy et al. (2019) 55

4.1. Red de estaciones GPS del SSN. 57

4.2. Red de estaciones GPS de TLALOCNet. 58

5.1. Lista de subrutinas que constituyen a MAGIC, el cual fue escrito en el lenguaje de programación MATLAB. 60

5.2. Código que inicia todo el proceso para el cálculo del TEC en los mapas. En él, existen parámetros que se configuraron para la creación de los Mapas TEC en México. 61

5.3. Esta subrutina posee las configuraciones de las mallas de resolución espacial para cada región del planeta. 61

5.4. Algunos parámetros del código *rt.m* son fundamentales para la creación de los Mapas TEC. En esta sección del código, se encuentran los parámetros de la 2da malla de interpolación que AzTEC usa para mapear el TEC calculado de la 1er interpolación. 62

5.5. Mapa de México con la 2da malla de resolución que usa AzTEC para realizar la primer interpolación en el cálculo del TEC y la localización de las estaciones GPS en el país. 63

5.6. Diagrama de representación en el transporte de los datos observacionales recolectados por las estaciones GPS hasta la creación de los Mapas TEC enviado al servidor web por RICE. [Extraída de: De la Luz et al. (2018)] 64

5.7. Diagrama de la distribución temporal realizado durante la recolección y procesamiento de los datos durante la cadencia de 15 minutos que AzTEC tarda para generar un Mapa TEC. [Extraída de: De la Luz et al. (2018)] 65

5.8. Diagrama de la distribución temporal en la obtención de los datos observacionales en tiempo real en el clúster por el programa BNC, creación de los mapas, publicación en el servidor web y el backup de los datos en la boveda de RICE. [Extraída de: De la Luz et al. (2018)] 66

5.9. (a) Mapa con el Análisis Diferencial TEC en el cálculo de las observaciones y el modelo. (b) Mapa del Error de Posición Aproximada (m) en el deslizamiento de las señales. (c) Mapa TEC generado por AzTEC. En el cuadro principal se observan las dimensiones del territorio con la ubicación de las estaciones GPS usadas para ese periodo; en la parte superior del cuadro, se sitúan los metadatos con la fecha, seguido del periodo inicial y final en el que se adquirieron los datos; a la derecha del cuadro, se observa una barra de contorno de colores que indica los valores de TECUs en el cuadro principal y finalmente en la parte inferior, las siglas de las instituciones que integran al proyecto. . 67

5.10. Base de datos de AzTEC con los Mapas TEC, Mapa del Análisis Diferencia, Mapa del Error de Estimación y Archivos de Texto (txt) en cada carpeta, creadas cada que inician las 00:00 UTC. Cada paquete de mapas y archivo de texto, se crean en lapsos de 15 minutos. 68

6.1. Matriz de valores TECUs guardados en un archivo con formato 'txt' generados por AzTEC. En el eje 'horizontal' tenemos las coordenadas longitudinales y en el eje 'vertical' las coordenadas latitudinales sobre el territorio mexicano. 69

6.2. Mapas con las máscaras de vértices sobre México, creadas para la exploración y extracción de los valores de TECUs, dentro de los archivos txt de cada Mapa TEC. (a) Máscara de vértices de la 1er malla de resolución. (b) Máscara de vértices de la 2da malla de resolución. . . 70

6.3. Gráfica de valores máximos (azúl), promedio (verde) y mínimos (rojo) de TECUs de cada Mapa TEC sobre México durante 2018 y 2019. El eje X corresponde a una línea temporal, indicando fecha y hora en que fueron creados los mapas. El eje Y corresponde a los valores de TECUs de los mapas. 71

6.4. Comportamiento del TEC durante el periodo de una prueba realizada al programa correspondiente a un reinicio 22:00 UTC del día 17 de Octubre de 2018. En esta gráfica el valor TECU máximo llegó hasta los 800 y fue disminuyendo gradualmente hasta valores por debajo de 60 TECU en un lapso de ≈ 4 horas. 72

6.5. Gráfica comparativa de los valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de los vértices sobre los receptores GPS y de todo el territorio, durante los días 01 al 06 de Julio de 2018. 73

6.6. Gráfica de valores máximos de TECUs por día, en una ventana de 20 días desde el 27 de Julio al 17 de Agosto de 2019. En los día 02 y 07 de Agosto, se observan caídas de los valores máximos de TECUs. . . . 74

6.7. Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos TECU del 02 al 09 de Agosto de 2019. Los picos en los valores máximos entre las 17:00 y 18:00 UTC, representan al medio día en México (entre las 12:00 y 13:00 horas LTC). 74

6.8. Archivos RINEX del día 02 de Agosto de 2019 a las 17:15 UTC pertenecientes a la base de datos de AzTEC. (a) Archivo RINEX de la estación SPIG en la ciudad de San Pedro Martir, Baja California, perteneciente a la red de estaciones del SSN. (b) RINEX de la estación OXPE en la ciudad de Puerto Escondido, Oaxaca, perteneciente a la red de estaciones de TLALOCNet. 75

- 7.1. Durante el 2018, Junio presentó un promedio mensual de 15.6 manchas solares y durante el 2019, Mayo presentó un promedio mensual de 9.9 manchas solares. [Extraído de: Vancanneyt, S. and de Bont, M. (2020)] 78
- 7.2. Histograma azul: creado con los valores máximos de TECUs (se le obtuvo una Media de 31.787 TECUs y una Sigma de 42.8 TECUs). Histograma verde: creado con los valores promedios de TECUs (se le obtuvo una Media de 15.081 TECUs y una Sigma de 24.22 TECUs). Histograma rojo: creado con los valores mínimos de TECUs (se le obtuvo una Media de 4.996 TECUs y una Sigma de 13.981 TECUs). Todos los valores de TECUs pertenecen a los Mapas TEC creados durante el 2018 y 2019. En los tres histogramas, los valores muy altos de TECUs son errores del cálculo. 78
- 7.3. Histograma azul: creado con los valores máximos de TECUs de los Mapas TEC durante el 24 de Enero de 2018 al 28 de Mayo de 2019, obteniendo una Media de 32.5 TECUs y una Sigma de 16.8 TECUs. Histograma naranja: creado con los valores máximos de TECUs de los Mapas TEC durante el 29 de Mayo al 31 de Diciembre de 2019, obteniendo una Media de 23.6 TECUs y una Sigma de 14.5 TECUs. . 80
- 7.4. Histograma azul: creado con los valores promedios de TECUs de los Mapas TEC durante el 24 de Enero de 2018 al 28 de Mayo de 2019, obteniendo una Media de 16.6 TECUs y una Sigma de 10.4 TECUs. Histograma naranja: creado con los valores promedios de TECUs de los Mapas TEC durante el 29 de Mayo al 31 de Diciembre de 2019, obteniendo una Media de 11.6 TECUs y una Sigma de 10.9 TECUs. . 80

- 7.5. Histograma azul: creado con los valores mínimos de TECUs de los Mapas TEC durante el 24 de Enero de 2018 al 28 de Mayo de 2019, obteniendo una Media de 5.92 TECUs y una Sigma de 10.7 TECUs. Histograma naranja: creado con los valores mínimos de TECUs de los Mapas TEC durante el 29 de Mayo al 31 de Diciembre de 2019, obteniendo una Media de 4.08 TECUs y una Sigma de 16.56 TECUs. 81
- 7.6. Histograma azul claro: creado con los valores máximos de TECUs de los Mapas TEC durante el periodo de Otoño 2018 (23 de Septiembre al 21 de Diciembre de 2018), obteniendo una Media de 36.9 TECUs y una Sigma de 18.9 TECUs. Histograma rojo claro: creado con los valores máximos de TECUs de los Mapas TEC durante el periodo de Otoño 2019 (21 de Septiembre al 22 de Diciembre de 2019), obteniendo una Media de 25.9 TECUs y una Sigma de 15.9 TECUs. 82
- 7.7. Histograma azul claro: creado con los valores promedios de TECUs de los Mapas TEC durante el periodo de Otoño 2018 (23 de Septiembre de 2018 al 21 de Diciembre de 2018), obteniendo una Media de 18.6 TECUs y una Sigma de 11.3 TECUs. Histograma rojo claro: creado con los valores promedios de TECUs de los Mapas TEC durante el periodo de Otoño 2019 (21 de Septiembre al 22 de Diciembre de 2019), obteniendo una Media de 13.3 TECUs y una Sigma de 13.9 TECUs. 82
- 7.8. Histograma azul claro: creado con los valores mínimos de TECUs de los Mapas TEC durante el periodo de Otoño 2018 (23 de Septiembre de 2018 al 21 de Diciembre de 2018), obteniendo una Media de 6.2 TECUs y una Sigma de 6.9 TECUs. Histograma rojo claro: creado con los valores mínimos de TECUs de los Mapas TEC durante el periodo de Otoño 2019 (21 de Septiembre al 22 de Diciembre de 2019), obteniendo una Media de 3.9 TECUs y una Sigma de 8.6 TECUs. 83

7.9. Histograma azul: creado con los valores máximos de TECUs (se obtuvo una Media de 31.9 TECUs y una Sigma de 11.2 TECUs). Histograma verde: creado con los valores promedios de TECUs (se obtuvo una Media de 15.6 TECUs y una Sigma de 7.213 TECUs). Histograma rojo: creado con los valores mínimos de TECUs (se obtuvo una Media de 4.4 TECUs y una Sigma de 5.331 TECUs). 83

7.10. Gráficas de *Sigmas* de los valores de TECUs máximos (azúl), promedios (verde) y mínimos (rojo) durante el 2018 y 2019, de la 1er y 2da malla de resolución y de los periodos estacionales: Otoño 2018 y Otoño 2019 e Invierno 2018-2019. 84

7.11. Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Sonora durante los días 05 al 11 de Octubre de 2019. 86

7.12. Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Nuevo León durante los días 05 al 11 de Octubre de 2019. 86

7.13. Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Jalisco durante los días 05 al 09 de Octubre de 2019, obteniendo valores máximos de hasta 44 TECUs y mínimos de 0 TECU. 87

7.14. Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Veracruz durante los días 05 al 11 de Octubre de 2019. 87

7.15. Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Zacatecas durante los días 05 al 11 de Octubre de 2019. 88

7.16. Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el Estado de México durante los días 05 al 11 de Octubre de 2019. 88

7.17. Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Chiapas durante los días 05 al 11 de Octubre de 2019. 89

7.18. Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Quintana Roo durante los días 05 al 11 de Octubre de 2019. 90

7.19. (a) Mapa TEC sobre México del día 08 de Febrero de 2019 a las 13:00 UTC, antes de las modificaciones en la resolución de la malla, en un rango de 0 a 80 TECU. (b) Mapa TEC del día 08 de Septiembre de 2020 a las 13:00 UTC, después de los cambios en la resolución de la malla, en un rango de 0 a 60 TECUs. 91

C.1. Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Baja California durante los días 05 al 09 de Octubre de 2019, obteniendo valores máximos de hasta 44 TECUs y valores mínimos de 0 TECUs. 107

C.2. Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Baja California Sur durante los días 05 al 09 de Octubre de 2019, obteniendo valores máximos de hasta 46 TECUs y mínimos de 0 TECUs. 107

C.3. Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Chihuahua durante los días 05 al 09 de Octubre de 2019, obteniendo valores máximos de hasta 37 TECUs y mínimos de 0 TECUs. 108

C.4. Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Durango durante los días 05 al 09 de Octubre de 2019, obteniendo valores máximos de hasta 40 TECUs y mínimos de 0 TECUs. 108

C.5. Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Sinaloa durante los días 05 al 09 de Octubre de 2019, obteniendo valores máximos de hasta 43 TECUs y mínimos de 0 TECUs. 109

C.6. Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Coahuila durante los días 05 al 09 de Octubre de 2019, obteniendo valores máximos de hasta 37 TECUs y mínimos de 0 TECUs. 110

C.7. Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Tamaulipas durante los días 07 al 11 de Septiembre de 2018, obteniendo valores máximos de hasta 55 TECUs y mínimos de hasta 1 TECUs. 110

C.8. Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Michoacán durante los días 07 al 11 de Septiembre de 2018, obteniendo valores máximos de hasta 61 TECUs y mínimos de 3 TECUs. 111

C.9. Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Nayarit durante los días 07 al 11 de Septiembre de 2018, obteniendo valores máximos de hasta 53 TECUs y mínimos de 1 TECUs. 111

C.10. Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Colima durante los días 05 al 09 de Octubre de 2019, obteniendo valores máximos de hasta 45 TECUs y mínimos de 0 TECUs. 112

C.11. Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Puebla durante los días 07 al 11 de Septiembre de 2018, obteniendo valores máximos de hasta 62 TECUs y mínimos de 7 TECUs. 113

C.12. Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Hidalgo durante los días 07 al 11 de Septiembre de 2018, obteniendo valores con un máximo de hasta 56 TECUs y mínimos de 1 TECUs. 113

C.13. Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Aguascalientes durante los días 07 al 11 de Septiembre de 2018, obteniendo valores máximos hasta 58 TECUs y mínimos de 0 TECUs. 114

C.14. Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECU de la *Ionósfera* sobre el estado de Guanajuato durante los días 07 al 11 de Septiembre de 2018, obteniendo valores con un máximo de hasta 67 TECUs y mínimos de 0 TECUs. 114

C.15. Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de San Luis Potosí durante los días 05 al 09 de Octubre de 2019, obteniendo valores máximos de hasta 48 TECUs y mínimos de 0 TECUs. 115

C.16. Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Querétaro durante los días 05 al 09 de Octubre de 2019, obteniendo valores máximos de hasta 44 TECUs y mínimos de 0 TECUs. 116

C.17. Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Morelos durante los días 07 al 11 de Septiembre de 2018, obteniendo valores con un máximo de hasta 63 TECUs y mínimos de 6 TECUs. 116

C.18. Gráfica de valores máximos, media y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Guerrero durante los días 05 al 09 de Octubre de 2019, obteniendo valores máximos de hasta 42 TECUs y mínimos de 0 TECUs. 117

C.19. Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Oaxaca durante los días 05 al 09 de Octubre de 2019, obteniendo valores máximos de hasta 46 TECUs y mínimos de 0 TECUs. 117

C.20. Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Tabasco durante los días 07 al 11 de Septiembre de 2018, obteniendo valores máximos de hasta 79 TECUs y mínimos de 8 TECUs. 118

C.21. Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Campeche durante los días 07 al 11 de Septiembre de 2018, obteniendo valores máximos de hasta 82 TECUs y un mínimo de 0 TECUs. 119

C.22. Gráfica de valores máximos, promedios y mínimos de TECUs de la *Ionósfera* sobre el estado de Yucatán durante los días 07 al 11 de Septiembre de 2018, obteniendo valores Máximos de hasta 70 TECUs y Mínimos de 5 TECUs. 119

Índice de tablas

1.1. Regiones y Densidad Electrónica Aproximada Durante el Día de la <i>Ionósfera</i> . [Fuente: Dieminger et al. (1996)]	6
2.1. Bandas de Radio y Modos Primarios de Propagación. Nota: GO = Guía de Onda, OT = Onda Terrestre, OI = Onda Ionosférica, Ligt-Of-Sight Propagation, DE_s = Dispersión Esporádica E, LOS = Propagación de Línea de Visión, DM = Dispersión de Meteoros y DT = Dispersión Troposférica. [Fuente: Goodman (2005a)].	24
2.2. Efectos Máximos Representativos en los Sistemas Tierra-Espacio (el $CE = 10^{18}/m^2$ y la elevación = 30 grados). [Fuente: Goodman (2005c)].	26
2.3. Lista de disciplinas de telecomunicaciones, además de las militares, descritas por el C3I (Comando, Control, Comunicaciones e Inteligencia). Nota: el SATCOM son los satélites que se encuentran sobre el ecuador terrestre, orbitando a la misma velocidad angular de la Tierra, el NVIS es la onda del cielo de incidencia vertical y el LOS es la línea de visión. [Fuente: Goodman (2005c)].	27
7.1. <i>Sigmas</i> de los valores de TECUs máximos, promedios y mínimos durante el 2018 y 2019, de la 1er y 2da malla de resolución y de los periodos estacionales: Otoño 2018 y Otoño 2019 e Invierno 2018-2019.	84
A.1. Red de 61 estaciones GPS enviando Datos a 1 Hz perteneciente al SSN.	97

A.2. Red de 36 estaciones GPS enviando datos a 1 Hz perteneciente a TLALOCNet.	98
A.3. Bitácora de reinicio de AzTEC durante el 2018 y 2019.	99

Bibliografía

- Araujo-Pradere, E. A., Fuller-Rowell, T. J., Spencer, P. S. J., & Minter, C. F. 2007, Radio Science, 42.
- Atkinson, P. A., & Edwards, S. J. 1970, Contemporary Physics, 11.
- Baker, D. N., & Lanzerotti, L. J. 2016, American Journal of Physics, 84.
- Banks, P. M., & Kockarts, G. 1973, Aeronomy: Part B, 1st edn. (Academic Press)
- Bauer, S. 1958, Journal of Geophysical Research, 63.
- Bergeot, N., Bruyninx, C., Defraigne, P., et al. 2011, GPS Solutions, 15.
- Bergeot, N., Chevalier, J. M., Bruyninx, C., et al. 2014, SWSC, 4.
- Bhoo-Pathy, N., Musa, T., Asillam, M. F., Wan-Aris, W., & Khamdan, S. 2019, Journal of Physics: Conference Series, 1152.
- Billitza, D. 1997, Advances in Space Research, 20.
- Brekke, A. 2013, Physics of the Upper Polar Atmosphere, 2nd edn. (Springer)
- Buonsanto, M. J. 1999, Kluwer Academic Publishers, 88.
- Cabral-Cano, E., Pérez-Campos, X., Márquez-Azúa, B., et al. 2018, Seismological Research Letters, 89.
- Cander, L. R. 2019, Ionospheric Space Weather, 1st edn. (Springer)

Center, S. W. P. 2020, U.S. Total Electron Content

Copyright 2020 IGS. 2020, Network, <http://www.igs.org/network><http://www.igs.org/network>

CRECTEALC. 2020, Centro Regional de Enseñanza de Ciencia y Tecnología del
Espacio para América Latina y el Caribe

da Rosa, A., Waldman, H., Bendito, J., & Garriott, O. K. 1973, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 35.

Daglis, I. A. 2005, *Effects of Space Weather on Technology Infrastructure*, 1st edn.
(Kluwer Academic Publishers)

Danilov, A. D. 1970, *Chemistry of the Ionosphere*, 1st edn. (Plenum Press)

Davies, K. 2008, *Ionospheric Radio*, 2nd edn. (The Institution of Engineering and
Technology)

De la Luz, V., Gonzalez-Esparza, A., Sergeeva, M., et al. 2018, *Annales Geophysicae*,
36.

Dieminger, W., Hartmann, G., & Leitinger, R. 1996, *The Upper Atmosphere: Data
Analysis and Interpretation*, 1st edn. (Springer)

Dines, W. H. 1919, *Met. Office*, 13.

Fuller-Rowell, T. J., Araujo-Pradere, E., Minter, C., et al. 2006, *Radio Science*, 41.

Fuller-Rowell, T. J., & Schrijver, C. J. 2009, *On the ionosphere and chromosphere*,
1st edn. (Cambridge University Press)

Gatica-Acevedo, V. J., Sánchez-Meraz, M., & Sosa-Paz, C. 2015, *Científica*, 19.

Ghoddousi-Fard, R., Héroux, P., Danskin, D., & Boteler, D. 2011, *The International
Journal of Research and Applications - Space Weather*, 9.

- Gonzalez-Esparza, J. A., De la Luz, V., Corona-Romero, P., et al. 2017, *Space Weather*, 15.
- Goodman, J. M. 2005a, *Space Weather Telecommunications*, 1st edn. (Springer)
- . 2005b, *Space Weather Telecommunications*, 1st edn. (Springer)
- . 2005c, *Space Weather Telecommunications*, 1st edn. (Springer)
- Gurtner, W. 2007, *RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.11*.
- Hernández-Pajares, M., Juan, J. M., Sanz, J., & Orús, R. 2007, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112.
- Hernández-Pajares, M., Juan, J. M., Sanz, J., et al. 2009, Springer, 83.
- Hudson, H. S. 2011, *Space Science*, 41.
- Jakowski, N., Fichtelmann, B., & Jungstand, A. 1991, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 53.
- Kalman, R. E. 1960, 82.
- Kaplan, E. D., & Hegarty, C. J. 2006, *Understanding GPS: principles and applications*, 2nd edn. (Artech House)
- Kleusberg, A., & Teunissen, P. J. G. 1998, *GPS for Geodesy*, 2nd edn. (Springer.)
- Klobuchar, J. A. 1987, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-23.
- Krisp, J. M., Meng, L., Pail, R., & Stilla, U. 2013, *Earth Observation of Global Changes (EOGC)*, 1st edn. (Springer)
- Lilensten, J. 2007, *Space Weather*, 1st edn. (Springer)

- Liou, K. N. 2002, *An Introduction to Atmospheric Radiation*, 2nd edn. (Academic Press)
- Liu, W., & Fujimoto, M. 2011, *The Dynamic Magnetosphere*, Vol. 3ra Edición (Springer)
- Manucci, A. J., Wilson, D. N., H., H. C., & Lindqwister, U. J. 1998, *Radio Science*, 33.
- Minter, C. F., Robertson, D. S., Spencer, P. S. J., et al. 2007, *RADIO SCIENCE*, 42.
- Mitchell, C., & Spencer, P. 2002, *Proceedings of the Ionospheric Effects Symposium*.
- Newman, J. 2008, *Physics of the Life Sciences*, 1st edn. (Springer)
- Pestana, A. 2015, *Reading RINEX 2.11 Observation Data Files.*, doi: <http://doi.org/10.13140/RG.2.1.4888.4087.10.13140/RG.2.1.4888.4087>.
- Pérez-Campos, X., Espíndola, V. H., Pérez, J., et al. 2018, *Seismological Research Letters*, 89.
- Romero-Hernandez, E., Gonzalez-Esparza, J. A., Rodriguez-Martinez, M., et al. 2017, *Advances in Space Research*, 60.
- Schaer, S., Beutler, G., & Rothacher, M. 1998, *IGS AC Workshops*.
- Schunk, R. W., & Nagy, A. F. 2009, *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry*, 2nd edn. (Cambridge University Press)
- Sergeeva, M., Maltseva, O., Gonzalez-Esparza, A., et al. 2018, *Annals of Geophysics*, 61.
- Singh, A. K., Siingh, D., & Singh, R. P. 2010, *Survey in Geophysics*
- Soicher, H. 1988, *Radio Science*

Spencer, P. S. J., Robertson, D. S., & Mader, G. L. 2004, Record - IEE PLANS, Position Location and Navigation Symposium.

SSN. 2020, Servicio Sismológico Nacional, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, México, doi: <http://doi.org/https://doi.org/10.21766/SSNMX/SN/MX>.<https://doi.org/10.21766/SSNMX/>

Stankov, S. M., Warnant, R., & Jodogne, J. C. 2003, *Acto Geod.*, 38.

Takahashi, H., Wrasse, C., Denardini, C., et al. 2016, *Space Weather*, 14.

UNAVCO. 2020a, TLALOCNet (Trans-boundary, Land and Atmosphere Long-term Observational and Collaborative Network)

—. 2020b, BKG Ntrip Client (BNC) | Software.

Vancanneyt, S. and de Bont, M. 2020, Solar Cycle Progression, 1985-2020, <https://www.spaceweatherlive.com><https://www.spaceweatherlive.com>

Warnant, R., & Pottiaux, E. 2000, *Earth Planets Space*, 52.

Welch, G., & Bishop, G. 2006, *Proc. Siggraph Course*, 8.

Wilken, V., Kriegel, M., & Jakowski, N. and Berdermann, J. 2018, *SWSC*, 8.

Wilkinson, J. 2012, *New Eyes on the Sun*, 1st edn. (Springer)

Yiğit, E. 2018, *Atmospheric and Space Sciences: Ionospheres and Plasma Environments*, 2nd edn. (Springer)

Zharkova, V. V. 2015, *Scientific Reports*, 5.