



# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA

## SURSUM VERSUS

---



**Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio**  
**Facultad de Informática Culiacán**  
**Posgrado en Ciencias de la Información**

**“Análisis multifactorial de las relaciones entre el Contenido Total de Electrones en la ionosfera y la actividad sísmica”**

**Tesis de doctorado**

M.C. ANGELA MELGAREJO MORALES

Directores:

Dr. Guadalupe Esteban Vázquez Becerra

Dr. Jesús Roberto Millán Almaraz

---



## Restricción de uso

UAS-Dirección General de Bibliotecas

Repositorio Institucional

Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial Compartir Igual, 4.0 Internacional.



# “Análisis multifactorial de las relaciones entre el Contenido Total de Electrones en la ionosfera y la actividad sísmica”

M.C. ANGELA MELGAREJO MORALES

Directores:

Dr. Gpe. Esteban Vázquez Becerra, Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio.

Dr. Jesús Roberto Millán-Almaraz, Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas.



Tesis de Doctorado

Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio

Facultad de Informática Culiacán

*Posgrado en Ciencias de la Información*

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA

Blvd. Universitarios y Av. de las Américas S/N Ciudad Universitaria

Teléfono +52 (667) 716 13 61

Culiacán, Sinaloa, México, Septiembre 2021

Elaborado en  $\LaTeX$ .

## Resumen

El pronóstico de terremotos, incluida la búsqueda de precursores, ha sido y continúa siendo un objetivo principal de la ciencia, en especial de la sismología. No obstante, gracias al desarrollo de diversas tecnologías y descubrimientos científicos este objetivo se ha vuelto multidisciplinario. A partir de entonces, el esfuerzo por descubrir factores que estén relacionados con la actividad sísmica paso a ser de interés internacional y con un mismo objetivo: el pronóstico de sismos a corto, medio y largo plazo. Actualmente, es posible observar y analizar diversos parámetros de la atmósfera terrestre. Entre estos encontramos el parámetro ionosférico TEC, el cual puede ser derivado a partir de las señales del Sistema de Posicionamiento Global (GPS). En el presente trabajo de investigación, se aplican distintos métodos de análisis al parámetro ionosférico TEC de un conjunto de eventos conformado por catorce días. Estos eventos pertenecen a períodos con actividad sísmica ( $M_w \geq 5.0$ ) y sin esta. Además, se examina el comportamiento y relación de diferentes índices geomagnéticos y solares, así como otros parámetros de interés. Con relación al TEC de los eventos con y sin sismo, la principal diferencia radica en la magnitud, siendo esta mayor para los eventos con sismo. No obstante, no es posible atribuir esto a la presencia del sismo. También, se encontró que la mayoría de los eventos bajo estudio presentan comportamientos geomagnéticos similares.

Palabras claves: precursores sísmicos, ionosfera, GPS, terremotos.

## Abstract

The forecasting of earthquakes, including the search for precursors, has been and continues to be a major goal of science, especially seismology. However, because of the development of various technologies and scientific discoveries this objective has become multidisciplinary. From then on, the effort to discover factors that are related to seismic activity became of international interest and with the same objective: the forecast of earthquakes in the short, medium and long term. Currently, it is possible to observe and analyze various parameters of the Earth's atmosphere. One of these parameters is the TEC, which can be derived from the Global Positioning System (GPS) signals. In this research work, different analysis methods are applied to the ionospheric parameter TEC of a set of events consisting of fourteen days. These events belong to periods with and without seismic activity ( $M_w \geq 5.0$ ). In addition, the behavior and relationship of different geomagnetic and solar indices, as well as other parameters of interest, are examined. Regarding the TEC of the events with and without an earthquake, the main difference lies in the magnitude, being this greater for the events with an earthquake. However, it is not possible to attribute this to the presence of the earthquake. Also, it was found that most of the events under study present similar geomagnetic behaviors.

Keywords: seismic precursors, ionosphere, GPS, earthquakes.

# Agradecimientos

A mi familia, por su amor y apoyo incondicional.

Al Dr. Guadalupe Esteban Vázquez Becerra y al Dr. Jesús Roberto Millán Almaraz por hacer esto posible y por su valiosa y agradable colaboración y enseñanza.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) de México por haberme otorgado una beca para realizar mis estudios de Maestría y Doctorado.

A mis profesores y amigos, por su contribución en forma de conocimiento y amistad.



# Índice general

Índice de figuras	IX
Índice de tablas	XIII
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Planteamiento del problema . . . . .	2
1.2. Justificación . . . . .	2
1.3. Objetivos . . . . .	2
1.3.1. General . . . . .	2
1.3.2. Específicos . . . . .	2
1.4. Hipótesis . . . . .	3
1.5. Antecedentes . . . . .	3
1.5.1. Sismicidad . . . . .	4
1.5.2. Deformaciones de la corteza terrestre . . . . .	4
1.5.3. Emisiones de gases . . . . .	4
1.5.4. Nivel del agua . . . . .	6
1.5.5. Temperatura del suelo y agua . . . . .	6
1.5.6. Actividad solar . . . . .	6
1.5.7. Perturbaciones sísmicas en el Contenido Total de Electrones . . . . .	7
1.5.8. Campo eléctrico y magnético . . . . .	9
1.5.9. Comportamiento animal . . . . .	9
<b>2. Marco teórico</b>	<b>11</b>
2.1. Tierra-Sol . . . . .	11
2.1.1. Litósfera . . . . .	11
2.1.2. Atmósfera . . . . .	15
2.1.3. Sol . . . . .	19
2.2. Sistema de Posicionamiento Global (GPS) . . . . .	21
2.2.1. La señal GPS . . . . .	22
2.3. Contenido Total de Electrones (TEC) . . . . .	26
<b>3. Materiales y métodos</b>	<b>33</b>
3.1. Eventos sísmicos y períodos sin sismo . . . . .	33
3.2. Datos satelitales . . . . .	35
3.3. Consulta índices solares y geomagnéticos . . . . .	40
3.4. Cálculo del TEC . . . . .	41
3.5. Tratamiento de los datos . . . . .	44
3.6. Máquina de Vectores de Soporte . . . . .	47

<b>4. Resultados y análisis</b>	<b>53</b>
4.1. Resultados estadísticos . . . . .	53
4.2. Resultados del tratamiento de los datos . . . . .	70
4.2.1. Filtro digital . . . . .	70
4.2.2. Correlación cruzada . . . . .	72
4.3. Resultados de la Máquina de Vectores de Soporte . . . . .	84
<b>5. Conclusiones</b>	<b>87</b>
5.1. Recomendaciones y/o trabajo futuro . . . . .	89
<b>Referencias bibliográficas</b>	<b>91</b>

# Índice de figuras

2.1.	Mapa de la Tierra que muestra los principales límites y contornos de placas divergentes, convergentes y transformantes de los continentes (Kusky, 2008). . . . .	12
2.2.	Ilustración de una falla normal en la que se está produciendo un terremoto (Gates y Ritchie, 2006). . . . .	13
2.3.	Los veinte terremotos más fuertes a la fecha. Fuente datos: U.S. Geological Survey (USGS). Año de consulta: 2019. . . . .	14
2.4.	Perfiles típicos de temperatura atmosférica neutra y densidad de plasma ionosférico con las diversas capas designadas. Fuente: Kelley y Heelis (1989). . . . .	16
2.5.	Boceto en corte del Sol que muestra su apariencia en diferentes longitudes de onda. Fuente: McNamara (1993). . . . .	21
2.6.	Geometría para el retardo de la trayectoria ionosférica (Hofmann-Wellenhof et al., 2007). . . . .	26
2.7.	Ilustración de la densidad de electrones en una trayectoria vertical (VTEC). Fuente: <a href="http://iono-gnss.kmitl.ac.th">http://iono-gnss.kmitl.ac.th</a> . . . . .	27
2.8.	Ilustración del TEC inclinado de un satélite a un receptor. Fuente: <a href="http://iono-gnss.kmitl.ac.th">http://iono-gnss.kmitl.ac.th</a> . . . . .	27
3.1.	Mapa del área de estudio (Estados resaltados en color), distribución de los eventos sísmicos de acuerdo a su magnitud y de las estaciones GPS seleccionadas (globos azules). . . . .	36
3.2.	Estación del año correspondiente con base al período de tiempo que conforma a los eventos en estudio. . . . .	37
3.3.	Series de tiempo de índices de actividad solar para el período en estudio: valores promedio mensuales del número de manchas solares (señalados en la figura como SSN), número de fulguraciones solares de clase M1 a X9 e índice F10.7 cm. Con flecha se señalan los meses pertenecientes a los eventos con sismo (roja) y sin (azul) de este trabajo. . . . .	38
3.4.	Con barras azules verticales se denotan los períodos de días correspondientes a los eventos sin sismo seleccionados para los años 2015 (superior izquierda), 2016 (superior derecha), 2017 (inferior izquierda) y 2018 (inferior derecha) (Tabla 3.1). Las líneas verticales con punto negro denotan terremotos ( $M_w \geq 5$ ) registrados en la costa del Pacífico mexicana. . . . .	39
3.5.	A) Eventos con sismo versus el máximo valor registrado para el índice Kp. B) Eventos sin sismo versus el máximo valor registrado para el índice Kp. . . . .	41

3.6. Espectro electromagnético de la señal VTEC en decibelios de todos los eventos bajo estudio. . . . .	44
3.7. Ejemplo del primer experimento aplicando correlación cruzada normalizada, los datos pertenecen al Evento 1 sin sismo. En general, una señal de un evento sin sismo contra todas las de un evento con sismo. . . . .	45
3.8. Correlación cruzada entre índices geomagnéticos y/o solares. El ejemplo muestra datos pertenecientes al Evento 3 con sismo. El eje Y muestra el coeficiente de correlación y el eje X el lag. . . . .	46
3.9. Ilustración de los procesos que comprenden al aprendizaje automático. Fuente: <a href="#">P. Kim (2017)</a> . . . . .	47
3.10. Comportamiento original de los datos con base al promedio de VTEC para el día 8 antes del terremoto ó 8 sin sismo contra el promedio del día -7 ó 7. . . . .	50
3.11. Comportamiento original de los datos con base al promedio de VTEC para el día -7 antes del terremoto y a la media cuadrática del mismo día. . . . .	50
3.12. Diagrama de la metodología aplicada. . . . .	51
4.1. VTEC en tiempo de los eventos con sismo y sin sismo. . . . .	53
4.2. Valores máximos de VTEC registrados en el período de días considerado por evento. . . . .	54
4.3. Promedio general de VTEC por evento con sismo y sin sismo. . . . .	55
4.4. Promedio y desviación estándar (I) de VTEC por día para los eventos con sismo. Campos vacíos sin disponibilidad. . . . .	56
4.5. Promedio y desviación estándar (I) de VTEC por día para los eventos sin sismo. Campos vacíos sin disponibilidad. . . . .	57
4.7. Mapa de VTEC de los eventos con sismo. . . . .	62
4.8. Mapa de VTEC de los eventos sin sismo. . . . .	62
4.6. Marcados en rojo (con sismo) y en azul (sin sismo) los períodos de tiempo que presentan incrementos en el promedio diario de VTEC con respecto al día anterior. De blanco los decrementos. . . . .	62
4.9. Valores máximos y mínimos (en el caso del índice Dst) obtenidos por evento para los parámetros Dst y VTEC. Líneas punteadas negras verticales representan valores de referencia. . . . .	63
4.10. Índices solares y geomagnéticos para el período correspondiente al evento con sismo número uno (Tabla 3.2). Las líneas punteadas horizontales representan las referencias establecidas para localizar posibles comportamientos perturbados de cada índice (Tabla 3.5). La línea negra vertical es la hora del sismo. . . . .	64
4.11. Índices solares y geomagnéticos para el período correspondiente al evento con sismo número quince (Tabla 3.2). Las líneas punteadas horizontales representan referencias establecidas para localizar posibles comportamientos perturbados de cada índice (Tabla 3.5). . . . .	65
4.12. Días del período por evento sísmico que presentan perturbaciones para los índices Kp, Dst (nT), Ap y F10.7 cm (s.f.u.) de los conjuntos con sismo y sin sismo. Las casillas coloreadas (con color) hacen referencia a los días perturbados. . . . .	67

4.13. Variaciones entre la mediana y el promedio de VTEC para los diferentes períodos de los eventos con sismo. . . . .	68
4.14. Variaciones entre la mediana y el promedio de VTEC para los eventos sin sismo. . . . .	69
4.15. Representación lineal de la señal VTEC con un filtro FIR de orden 16. . . . .	71
4.16. Representación lineal de la señal VTEC con un filtro IIR de orden 4. . . . .	71
4.17. Correlación cruzada entre índices geomagnéticos y/o solares pertenecientes al Evento 1 con sismo. El eje Y muestra el coeficiente de correlación y el eje X el lag (Tabla 3.2). . . . .	72
4.18. Correlación cruzada entre índices geomagnéticos y/o solares pertenecientes al Evento 13 sin sismo. El eje Y muestra el coeficiente de correlación y el eje X el lag (Tabla 3.1). . . . .	73
4.19. Por correlación entre índices se muestra el porcentaje de eventos asignados a las categorías definidas para la inclinación. Parte superior eventos con sismo y parte inferior eventos sin sismo. . . . .	75
4.20. Por correlación entre índices se muestra el porcentaje de eventos asignados a las categorías definidas para el sesgo. Parte superior eventos con sismo y parte inferior eventos sin sismo. . . . .	76
4.21. Por correlación entre índices se muestra el porcentaje de eventos asignados a las categorías definidas para el ajuste. Parte superior eventos con sismo y parte inferior eventos sin sismo. . . . .	77
4.22. Por correlación entre índices se muestra el porcentaje de eventos asignados a las categorías definidas para la simetría. Parte superior eventos con sismo y parte inferior eventos sin sismo. . . . .	79
4.23. Por correlación entre índices se muestra el porcentaje de eventos asignados a las categorías definidas para la curtosis. Parte superior eventos con sismo y parte inferior eventos sin sismo. . . . .	80
4.24. Correlación cruzada normalizada entre el índice Kp del evento sin sismo #1, #2, #3 y #4 y el índice Kp de los eventos con sismo. El eje Y muestra el coeficiente de correlación obtenido ( $r$ ) y el eje X el número de señal o evento. . . . .	81
4.25. Correlación cruzada normalizada entre el índice Dst del evento sin sismo #1, #2, #3 y #4 y el índice Dst de los eventos con sismo. El eje Y muestra el coeficiente de correlación obtenido ( $r$ ) y el eje X el número de señal o evento. . . . .	82
4.26. Correlación cruzada normalizada entre el índice Ap del evento sin sismo #1, #2, #3 y #4 y el índice Ap de los eventos con sismo. El eje Y muestra el coeficiente de correlación obtenido ( $r$ ) y el eje X el número de señal o evento. . . . .	83
4.27. Correlación cruzada normalizada entre el índice F10.7cm del evento sin sismo #1, #2, #3 y #4 y el índice F10.7cm de los eventos con sismo. El eje Y muestra el coeficiente de correlación obtenido ( $r$ ) y el eje X el número de señal o evento. . . . .	83
4.28. Correlación cruzada normalizada entre el índice R del evento sin sismo #1, #2, #3 y #4 y el índice R de los eventos con sismo. El eje Y muestra el coeficiente de correlación obtenido ( $r$ ) y el eje X el número de señal o evento. . . . .	84

4.29. Resultados obtenidos con un modelo generado por una SVM de tipo  
Gaussiano Medio (88.9%) para la clasificación de eventos con y sin  
actividad sísmica. . . . . 85

# Índice de tablas

2.1.	Altitudes de la ionosfera de acuerdo a diversos autores. . . . .	15
2.2.	Regiones y capas de la ionosfera de acuerdo a <a href="#">Pulinets y Boyarchuk (2004)</a> . . . . .	18
2.3.	Segmentos que componen al Sistema de Posicionamiento Global (GPS) ( <a href="#">Hernández et al., 2005</a> ; <a href="#">Hofmann-Wellenhof et al., 2007</a> ). . . . .	22
2.4.	Retardos ionosféricos en el cenit para valores máximos (diurnos) y mínimos (nocturnos) del TEC para distintas frecuencias. Fuente: <a href="#">Sardón et al. (1993)</a> . . . . .	28
2.5.	Índices solares. Fuente: <a href="#">Perrone y Franceschi (1998)</a> . . . . .	29
2.6.	Índices ionosféricos. Fuente: <a href="#">Perrone y Franceschi (1998)</a> . . . . .	30
2.7.	Índices geomagnéticos. Fuente: <a href="#">Perrone y Franceschi (1998)</a> . . . . .	31
2.8.	Precursores sísmicos clasificados por área científica. . . . .	32
3.1.	Eventos sin actividad sísmica. Estos eventos se registraron en los estados de Quintana Roo y/o Chihuahua en México durante el período de años 2015 - 2018. Los días/mes/año son: período de 14 días sin actividad sísmica registrada, mes y año correspondiente. . . . .	33
3.2.	Eventos sísmicos seleccionados. Estos eventos se registraron en diversos estados, sísmicamente activos, de México durante el período 2015 - 2019. El día/mes/año/hora/minuto son: tiempo de inicio del sismo (UTC); Latitud Norte y Longitud Oeste: las coordenadas geográficas del epicentro en grados. Con $P$ se denota la profundidad. Fecha de consulta: 19/05/2019. . . . .	34
3.3.	Coordenadas de los receptores GPS seleccionados. Fuente: UNAVCO ( <a href="https://www.unavco.org/instrumentation/networks/status/nota/gps">https://www.unavco.org/instrumentation/networks/status/nota/gps</a> ) y CORS ( <a href="https://www.ngs.noaa.gov/CORS_Map/">https://www.ngs.noaa.gov/CORS_Map/</a> ). Latitud Norte y Longitud Oeste en grados. . . . .	35
3.4.	Distribución de los eventos en estudio por año. . . . .	38
3.5.	Valores utilizados como referencia por diversos autores para identificar días con perturbaciones para diferentes índices solares-geomagnéticos (Ver Sección 2.1.2 y Tabla 2.7). . . . .	40
3.6.	Parámetros para el diseño de los filtros correspondientes a las Figuras 4.15 y 4.16, respectivamente. . . . .	45
3.7.	Conjunto de datos pertenecientes a la etapa de Entrenamiento y Prueba. 49	
3.8.	Características utilizadas para el diseño de la SVM. Estas se utilizaron para el período -8 al -1. Es decir, los días anteriores al terremoto ó en el caso de los eventos sin sismo, 8 días. . . . .	49

4.1. Cambios (incrementos + y decrementos -) en el promedio diario de VTEC en comparación al día anterior para eventos con sismo. La primer columna (E) muestra el evento. . . . .	57
4.2. Cambios (incrementos + y decrementos -) en el promedio diario de VTEC en comparación al día anterior para eventos sin sismo. La primer columna (E) muestra el evento. . . . .	58
4.3. Tipo de incremento en el promedio diario de VTEC de los eventos con sismo. . . . .	60
4.4. Tipo de decremento en el promedio diario de VTEC de los eventos con sismo. . . . .	60
4.5. Tipo de incremento en el promedio diario de VTEC de los eventos sin sismo. . . . .	61
4.6. Tipo de decremento en el promedio diario de VTEC de los eventos sin sismo. . . . .	61
4.7. Variaciones para los días antes, durante y después, en TECU, de los eventos con sismo y considerando la mediana y el promedio. . . . .	70
4.8. Variaciones para los días, en TECU, correspondientes a los eventos sin sismo y considerando la mediana y el promedio. . . . .	70
4.9. Ejemplo de la recopilación de los valores asignados por característica definida para evaluar la correlación cruzada entre índices, en este caso del Evento 1 con sismo. Se abrevió aproximadamente como “Aprox”. . . . .	74
4.10. Correlaciones cruzadas, por categoría, con la mayor diferencia entre eventos con y sin sismo. . . . .	81

# 1

## Introducción

Un terremoto es un fenómeno natural aleatorio o altamente no lineal y a la fecha no existe un sistema completo o modelo capaz de predecir el tiempo preciso de impacto y probabilidad, su ubicación exacta y su rango de magnitud específico (Allen, 1976). A lo largo del tiempo geológico la Tierra ha sufrido terremotos, los registros más antiguos de estos fenómenos se remontan al año 1831 a. de C. y pertenecen a la provincia de Shandong en China. No obstante, los primeros intentos de explicar el origen de los terremotos surgieron en partes del Mar Mediterráneo y los países circundantes, lo anterior como consecuencia de su alta actividad sísmica. Así mismo, algunos grandes filósofos griegos trataron de dar explicación a estos fenómenos; en la época de Tales de Mileto se creía que la Tierra flotaba en los océanos y que sus movimientos producían el temblor sísmico (Bolt, 1993). Anaxímenes consideraba que las rocas de la Tierra eran la causa de los temblores. Otra hipótesis, con base en ideas de Anaxágoras, consideraba el fuego como la causa de algunos terremotos. Con el tiempo, el avance de la ciencia permitió a sus practicantes empezar a considerar causas físicas como el origen de terremotos en lugar de causas divinas sugeridas por el folklore y el mito. Aristóteles relacionó a los terremotos con fenómenos físicos, como eventos atmosféricos, observados con frecuencia, como truenos y relámpagos, además de eventos subterráneos asociados con vapores ascendentes de la tierra y actividad volcánica. Por su parte, Séneca conjeturó que el temblor era consecuencia de la compresión de aire que se abría paso en los pasajes subterráneos. No fue hasta mediados del siglo XVIII cuando científicos e ingenieros, bajo la influencia de la mecánica Newtoniana, empezaron a publicar ensayos que asociaban a los terremotos con ondas que viajaban a través de las rocas en la Tierra. John Michell (1724 - 1793), uno de los primeros padres modernos de la sismología, creía que los terremotos eran ondas creadas por masas de rocas que se desplazaban por debajo de la superficie terrestre, logrando una clasificación cercana de lo que actualmente son los movimientos de los terremotos. Para Benjamin Franklin (1706 - 1790) la electricidad tenía un papel clave en la causa de los terremotos. A pesar del avance científico, para la época de 1750 aún se creía que los terremotos eran una señal del desagrado de la divinidad hacia los actos humanos. Los principios de la sismología moderna fueron establecidos por los estudios de campo de Robert Mallet (1810 - 1881), quien se propuso encontrar la naturaleza geológica de los terremotos, además de ser el primero en trabajar con terremotos artificiales. A partir de las teorías y trabajos de Mallet muchos países comenzaron a establecer organizaciones especiales con el mandato de realizar estudios de la tierra a través del mapeo de zonas geológicas, clasificación de fósiles y análisis de minerales (Bolt, 1993). Para la década de 1960, el surgimiento de la idea de pronosticar un terremoto fue el detonante de investigaciones que, hasta la fecha, han señalado la existencia de perturbaciones de naturaleza diversa que se presentan antes del impacto de un terremoto (Pulinets et al., 2016; Liu et al., 2016;

Huang et al., 2017; Barkat et al., 2018). Estas perturbaciones son conocidas como precursores sísmicos y su clasificación no es universal, ya que a la fecha no ha sido posible aislar un precursor confiable (Khan et al., 2010; M. Akhoondzadeh, 2013).

### 1.1. Planteamiento del problema

En los últimos quinientos años, más de siete millones de personas han muerto a causa de los terremotos, y muchos millones más han visto sus fuentes de alimentos y sus economías destruidas (Bolt, 1993). Para una población en constante crecimiento, el peligro que representan los terremotos a menudo ha sido la primera preocupación que motiva a científicos e ingenieros a estudiarlos. Para el caso de México, su geología refleja que gran parte de su territorio está sometido a enormes esfuerzos que causan, entre otros, grandes terremotos (Bolt, 2001). La principal causa del alto grado de sismicidad en México es el movimiento de las placas tectónicas: Norteamericana, Cocos, Rivera y del Pacífico, mismas que forman parte del Cinturón de Fuego del Pacífico (Núñez-Cornú y Ponce, 1989). Como consecuencia de esto, las zonas de mayor actividad sísmica en el país se encuentran en los estados de la costa del Pacífico: Jalisco, Michoacán, Guerrero, Oaxaca, Chiapas y en la península de Baja California. El campo de los precursores sísmicos requiere del desarrollo constante de métodos genéricos que permitan su distinción e identificación certera, al ser, el pronóstico de terremotos, uno de los grandes retos de la comunidad científica global.

### 1.2. Justificación

El pronóstico de un terremoto es un tema controversial (Geller et al., 1997; Brehm y Braile, 1998; Ellsworth et al., 1999; Kirschvink, 2000), ya que todavía existen dificultades para aceptar la presencia de algunos precursores (Oyama et al., 2016). De manera que, su estudio debe llevarse a cabo para explorar la posibilidad de pronosticar terremotos mientras exista la oportunidad. Así mismo, las investigaciones de este tipo pueden permitir a las autoridades prevenir o disminuir los daños a grandes sistemas, por ejemplo: plantas de energía nuclear, suministros de electricidad, hospitales, etcétera con la finalidad de reducir y/o evitar el número de damnificados y decesos.

### 1.3. Objetivos

#### 1.3.1. General

Aplicar distintos métodos de análisis a un conjunto definido de datos con la finalidad de buscar relaciones entre estos y el Contenido Total de Electrones (TEC) en la ionosfera durante diversos eventos sísmicos ( $M_w > 5$ ) registrados en México.

#### 1.3.2. Específicos

- (a) Identificar fenómenos de naturaleza diversa que ocurren en distintos tiempos antes de un terremoto.

- (b) Aplicar distintos métodos de análisis a un conjunto de datos y buscar una relación entre estos y el parámetro ionosférico VTEC.
- (c) Integrar las capacidades de las distintas metodologías en la detección de perturbaciones los días previos a un terremoto.
- (d) Clasificar resultados y establecer características en común entre el parámetro VTEC y eventos con sismo.

## 1.4. Hipótesis

Existe una relación entre el comportamiento del Contenido Total de Electrones en la ionosfera y la actividad sísmica de magnitud ligera a fuerte ( $M_w \geq 5$ ), visible a través de un análisis multifactorial con base en precursores sísmicos.

## 1.5. Antecedentes

Uno de los principales objetivos de la sismología es el pronóstico de terremotos, esto, a través de la interpretación y delimitación de diversos fenómenos físicos que preceden y caracterizan a ciertos terremotos. El pronóstico de un terremoto se puede clasificar en: largo plazo (décadas), mediano plazo (años), corto plazo (meses o semanas) e inminente (semanas a días e incluso horas). Las colecciones de documentaciones históricas sobre posibles precursores de terremotos se remontan a la antigüedad. Sin embargo, de acuerdo a [Huang et al. \(2017\)](#), los esfuerzos organizados para la previsión y pronóstico de terremotos comenzaron en Marzo de 1966, inmediatamente después de una secuencia de grandes terremotos en la zona de Xingtai, provincia de Hebei, a unos trescientos kilómetros al Suroeste de Pekín en China. Para este período los ajustes tectónicos, la sismicidad y la deformación de la corteza terrestre fueron los temas principales a investigar. Para la década de 1970, los sismólogos confiaban en que el pronóstico de terremotos a corto plazo se lograría en poco tiempo. Esta confianza surgió, en parte, como resultado del primer pronóstico exitoso de un terremoto ( $M_s = 7.3$ ) registrado en Haicheng, China el 4 de febrero de 1975 ([Adams, 1976](#)). Lo anterior fue posible gracias al análisis de observaciones geofísicas, *foreshocks* y de macro anomalías reportadas a las agencias sismológicas por parte de residentes locales. Sin embargo, la imposibilidad de pronosticar otro terremoto ( $M_s = 7.8$ ) registrado dieciocho meses después, en 1976, en Tangshan, China, fue un gran fracaso para el pronóstico de terremotos ([Cicerone et al., 2009](#)). Con base en las investigaciones que respaldan la existencia de precursores sísmicos, es posible señalar los siguientes fenómenos: variaciones de campos eléctricos, magnéticos y del Contenido Total de Electrones (TEC, por sus siglas en inglés), fenómenos térmicos y meteorológicos, comportamiento animal, registros históricos de terremotos, fenómenos geofísicos, cambios en el nivel del agua subterránea, emisiones de gases, cambios de temperatura, deformaciones superficiales y patrones de sismicidad anómalos ([Pulinets y Ouzounov, 2011](#); [Pulinets et al., 2016](#); [Grant et al., 2015](#); [Panakkat y Adeli, 2007](#); [Hayakawa, 2010](#); [Oyama et al., 2016](#); [Cicerone et al., 2009](#)), entre otros. Resultando en el reonomiento de diversos precursores sísmicos en la litósfera, la atmósfera y, específicamente, la ionósfera ([M. Akhoondzadeh y Saradjian, 2011](#)) abarcando, a su vez, distintas disciplinas (Tabla 2.8). De lo anterior, podemos destacar que el monitoreo de múltiples parámetros nos permite aumentar

la posibilidad del pronóstico de terremotos. Sin embargo, la selección de los mismos está limitada a su disponibilidad en diferentes regiones del mundo. En este sentido, [Pulinets et al. \(2016\)](#) señala que el monitoreo satelital tiene una ventaja ante las mediciones basadas en tierra. Finalmente, se espera que la integración de diferentes observaciones junto con el refinamiento de los métodos de análisis de datos mejore el conocimiento de las fases preparatorias de los terremotos, de sus posibles precursores y de su pronóstico exitoso.

A continuación se presenta una breve recopilación de los antecedentes de algunos precursores sísmicos:

### 1.5.1. Sismicidad

Muchos de los terremotos fuertes de la Tierra están precedidos, en cuestión de horas, días o semanas, por pequeños terremotos denominados *foreshocks*, los cuales se consideran una actividad sísmica premonitoria. A nivel global algunas de las recopilaciones más importantes de *foreshocks* fueron publicadas por [Reasenberg \(1999\)](#) y [Jones y Molnar \(1976\)](#). En sus resultados demostraron que el 44 % de los terremotos de magnitud (designada como “M”) superior a siete registrados durante el período de años 1950 a 1973, en nuestro planeta, presentaron al menos un *foreshock* ( $M > 4.5$ ) dentro de los cuarenta días al choque principal. Además, para el período 1977 a 1996 el 13 % de los terremotos ( $M > 6$ ) registrados tuvo al menos un *foreshock* ( $M > 5.0$ ) dentro de los diez días al terremoto principal. Un punto importante es denotar que la mayoría de los *foreshocks* de los estudios mencionados parecen presentarse dentro de los treinta días anteriores al terremoto, lo que coincide con otros precursores (por ejemplo, variaciones de gas radón, emisiones electromagnéticas, etcétera). Por lo cual, es posible que existan enlaces físicos en los mecanismos de generación de dichos precursores ([Cicerone et al., 2009](#)).

### 1.5.2. Deformaciones de la corteza terrestre

Existe un gran interés en buscar deformaciones superficiales (elevaciones, inclinaciones, cambios en la velocidad de deformación, etcétera) antes del impacto de un terremoto. Diversos terremotos corticales (es decir,  $< 60$  km de profundidad) de  $M > 6$  se han asociado con la presencia de deformaciones en la superficie de la tierra, y, en algunos casos, estas fueron precursoras de los terremotos ([Rikitake, 1976](#); [Lomnitz, 1994](#)). Por lo que, la cantidad de estaciones permanentes GPS de alta precisión esta aumentando en áreas sísmicamente activas con el objetivo de estudiar las deformaciones de la corteza terrestre antes del impacto de un terremoto. Adicionalmente, la detección remota a gran escala de deformaciones superficiales podría arrojar nuevas pistas para el pronóstico de terremotos ([Cicerone et al., 2009](#)).

### 1.5.3. Emisiones de gases

A finales de la década de 1960 y principios de 1970, informes, principalmente de Rusia y China, indicaron que las concentraciones de gas radón en la Tierra aparentemente cambiaron antes del impacto de terremotos cercanos ([Lomnitz, 1994](#)). El radón (Rn), elemento químico, es un gas natural radiactivo (ya que al descomponerse

emite partículas o rayos) que proviene de la desintegración del uranio 238 (elemento que se encuentra en la mayoría de los tipos de suelo y puede ser encontrado en gran parte de la naturaleza). Una concentración de gas radón esta presente en el suelo continuamente y este varía debido a los cambios ambientales. Lo anterior estimuló una serie de experimentos para monitorear cambios en el radón presente en el suelo y/o agua subterránea y estudiar su alcance como posible precursor de fenómenos naturales, tales como terremotos y erupciones volcánicas (Richon et al., 2003, 2010; Negarestani et al., 2002). La hipótesis plantea que la compresión en torno a una falla cercana a romperse podría producir emisiones de gas radón; por lo tanto, una mayor emisión de radón anticiparía la llegada de un terremoto. Esta hipótesis fue estudiada, midiendo las emisiones de gas radón cerca de fallas geológicas, durante los años 1970 y 1980 encontrando que los terremotos impactaban a menudo sin señal de radón. Así mismo, se detectaron emisiones de radón sin que fueran seguidas por un terremoto. Como consecuencia de la ausencia de resultados confiables la hipótesis fue rechazada por la mayoría de sismólogos. Sin embargo, en Igarashi et al. (1995) se argumentó que la concentración de gas radón aumentó en las aguas subterráneas cercanas al Sur de la Prefectura de Hyogo (Kobe, Japón) durante varios meses antes del gran terremoto ( $M_L = 7.2$ ) de Hanshin de 1995. En específico, a partir de finales de octubre de 1994 (el comienzo de la observación) hasta finales de diciembre del mismo año la concentración de radón aumentó en torno a cuatro veces, y, nueve días antes del terremoto, el radón alcanzó un registro de más de diez veces al comienzo de la observación, para posteriormente disminuir. Finalmente, de acuerdo a los autores es posible que estos cambios sean fenómenos precursores del desastroso terremoto. En otro estudio, se encontró un aumento en las concentraciones de radón-222 en los gases del suelo provenientes de agujeros poco profundos antes del impacto de terremotos locales de magnitud moderada (Rastogi et al., 1986, 1987). En Mancini et al. (2015) se investigó la ionización del aire a niveles ionosféricos provocada por la fuga de gases de la corteza terrestre a través del análisis de señales GNSS (Global Navigation Satellite Systems, por sus siglas en inglés). En concreto, los autores analizaron una serie larga de cinco años (2008 - 2012) de TEC ionosférico basado en GNSS encontrando que en determinados terremotos existe una inyección brusca de gas radón hacia la atmósfera, provocada por la aparición de grietas tectónicas que dejan evacuar el radón con gran intensidad. En general, diversos componentes químicos (iones, elementos traza, gases y/o gases radioactivos) del agua subterránea son estudiados como precursores sísmicos, tales como:  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  y  $CO_3^{2-}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ ,  $F^-$ ,  $S^{2-}$ , Mercurio (Hg), Hidrógeno ( $H_2$ ), Helio (He), Dióxido de Carbono ( $CO_2$ ), Metano ( $CH_4$ ) y Radón (Rn). De acuerdo a Huang et al. (2017), un registro, de los elementos anteriores, dos veces más alto o más bajo que su valor medio se considera una anomalía. Además, algunos componentes como el  $H_2$ ,  $CO_2$  y el Rn se miden en varios bordes de bloques tectónicos activos (por ejemplo, durante el terremoto de Ludian ( $M_s = 6.5$ ) de 2014 en China). Finalmente, estas variaciones, en especial las emisiones de radón, no solo dependen de los terremotos sino también de los efectos combinados de las mareas luni-solares, los vientos, la humedad, la temperatura, la presión atmosférica, la actividad volcánica y las radiaciones cósmicas; Por lo cual, estas perturbaciones deben filtrarse y eliminarse antes de esperar detectar variaciones debido a eventos telúricos (Nicolí et al., 2016; Pereira et al., 2011).

### 1.5.4. Nivel del agua

Los cambios en el nivel del agua subterránea antes del impacto de un terremoto se han reportado desde tiempos históricos (Martinelli, 2000). En general, estos cambios varían desde una caída máxima de quince metros hasta una elevación de ocho metros, siendo la mayoría de los cambios inferiores a un metro. De acuerdo a Cicerone et al. (2009), muchas de las características relacionadas a cambios en el agua subterránea, como el inicio de estos, el momento del mayor cambio y la dependencia de estos con la magnitud y distancia epicentral parecen ser similares a las características observadas en las variaciones de gas radón. El autor propone, como posible causa, que ambos fenómenos están asociados con cambios en la permeabilidad de las rocas y posiblemente porosidad durante los días, semanas y meses antes de que se inicie la ruptura de un terremoto. Sin embargo, la mayoría de los reportes relacionados a cambios en el nivel del agua subterránea carecen de un respaldo científico siendo, en su mayoría, de carácter anecdótico.

### 1.5.5. Temperatura del suelo y agua

Pocas observaciones de cambios de temperatura en la tierra antes de los terremotos han sido reportadas. Probablemente, esto es debido a la falta de experimentos para buscar tal efecto. De forma general, se ha informado de un aumento en la temperatura del suelo, siendo el mayor cambio de 6°C y, en su mayoría, los cambios fueron inferiores a 1°C (Cicerone et al., 2009). Además, se reportó que algunos de los cambios de temperatura en el agua subterránea fueron co-sísmicos, es decir, se registraron durante el impacto del terremoto, mientras que otros se registraron dentro de los diez días previos a este.

### 1.5.6. Actividad solar

La posibilidad de que efectos externos a la Tierra, como los solares, estén relacionados con el impacto de terremotos ha sido estudiada desde la década de 1970. De acuerdo a Laroocca (2016), al ser, el Sol, la principal fuente de energía cerca de la Tierra es probable la existencia de una conexión entre los diferentes elementos de la actividad solar y los procesos terrestres. Algunos de los efectos solares propuestos como desencadenantes de la actividad sísmica en la Tierra son: flujos de protones solares (Velinov, 1975), mareas solares y lunares (Jakubcova y Pick, 1987), viento solar de alta velocidad (Sytinskii, 1989), máximo de manchas solares (Simpson, 1967) y disminución de la actividad solar (Odintsov et al., 2007), entre otros. Con base en lo anterior, diversos artículos han sido publicados:

En Gousheva et al. (2003) se expone que la llegada a la Tierra de corrientes solares de alta velocidad está relacionada con una probabilidad significativamente mayor de impacto de un terremoto, argumentando que el posible mecanismo incluye la deposición de energía proveniente de viento solar en la ionosfera polar, donde impulsa convección ionosférica y electrojets aurorales, generando a su vez ondas de gravedad atmosféricas que interactúan con vientos neutrales y depositan su impulso en la atmósfera neutra, aumentando la transferencia de masas de aire y perturbando el equilibrio de presión en placas tectónicas. Cabe mencionar que las principales fuentes de viento solar de alta velocidad son las Eyecciones de Masa Coronal (CME, por sus siglas en inglés), las cuales tienen su máximo durante las etapas culminantes

de manchas solares, y los agujeros coronales, con un máximo en la fase descendente de la actividad solar. En [Sytinskii \(1997\)](#), con base en el estudio de varios terremotos fuertes, se expone que el mecanismo desencadenante del terremoto no es la fuerza de las mareas solares y lunares sino el cambio inducido por la energía solar en la circulación atmosférica, expresado en la reorganización a gran escala de los campos béricos, demostrando que la energía de estas perturbaciones es de al menos tres órdenes de magnitud mayor que la energía de un terremoto. Por su parte, [Odintsov et al. \(2007\)](#) observó que las variaciones en los eventos sísmicos muestran dos máximos, el primero coincide con el máximo de manchas solares registrado y el segundo se detecta en la etapa de disminución de la actividad solar, específicamente tres años después de su punto más alto. Con lo cual, el estudio pretende demostrar la posible dependencia entre los terremotos y la actividad solar. En específico, que la mayoría de los terremotos ocurren en la etapa de declive de la misma. Desde que se llevan registros relacionados a la actividad solar, el Sol ha presentado dos mínimos importantes estos son conocidos como mínimo de Dalton y mínimo de Maunder (Ver Sección 2.1.3). De acuerdo a [Tavares y Azevedo \(2011\)](#), durante estos mínimos solares se presentó una disminución en el número de eventos sísmicos registrados, resaltando la existencia e importancia de la relación Sol-Tierra. Además, menciona que durante los máximos solares los eventos sísmicos observados desde el año 1600 aumentaron más en el Pacífico, Arabia y Sudamérica. Sin embargo, en algunas placas tectónicas los eventos se mantuvieron constantes o no sucedieron en absoluto. Por lo tanto, el efecto que la tectónica de cada placa juega en los terremotos es de importancia. En [Vargas y Kastle \(2012\)](#) también se señala la existencia de una mayor actividad sísmica durante diversos máximos solares. Sus resultados, sin embargo, no son constantes para todas las partes de la Tierra y no se presentan durante todos los máximos solares ocurridos entre 1950 y 2005.

En el artículo de [Bijan et al. \(2013\)](#) se argumentó que durante los años 2012 – 2013 se presentaría un máximo de terremotos para las zonas de tensión en la Tierra, lo anterior con base a su pronóstico del máximo del ciclo solar 24. Si consideramos los eventos sísmicos ( $M_w \geq 5.1$ ) seleccionados en [Melgarejo-Morales et al. \(2020\)](#) se puede observar que la mayoría de los eventos pertenecen al año 2012 seguidos del año 2014, mientras que el año con menos eventos sísmicos, de la magnitud considerada, fue 2008. Sin embargo, el ciclo solar 24 alcanzó su mínimo en Diciembre de 2008 y su máximo en Abril de 2014. Por lo tanto, los máximos de terremotos para zonas de tensión se esperarían para 2014 y no 2012.

### 1.5.7. Perturbaciones sísmicas en el Contenido Total de Electrones

El TEC en la ionosfera terrestre, derivado de las mediciones de los receptores GPS locales es utilizado por [Liu et al. \(2001\)](#) para estudiar las variaciones en la concentración de electrones ionosféricos antes del terremoto de Chichi ( $M_L = 7.3$ ), el cual impactó el centro de Taiwan en 1999. En su estudio se encontró que el TEC disminuía en el período de la tarde de los días uno, tres y cuatro antes del terremoto. Posteriormente, [Liu et al. \(2004\)](#) confirmó la existencia de este fenómeno pre-sísmico a través del estudio de veinte terremotos de  $M \geq 6.0$  en Taiwán utilizando una mediana de quince días y el rango intercuartílico asociado (IQR, siglas en inglés).

Además, diversos estudios utilizan Mapas Ionosféricos Globales (GIM, por sus siglas en inglés) para estudiar las variaciones en el TEC antes de grandes terremotos (Ho et al., 2013; Zakharenkova y Shagimuratov, 2009). Por ejemplo, en Liu et al. (2009) se indica que el TEC sobre el epicentro, obtenido a partir de GIM, con frecuencia decrecía significativamente los días tres a cinco antes de 17 terremotos ( $M \geq 6.3$ ) registrados durante un período de diez años (1998 a 2008). También es posible observar como el TEC sobre el epicentro aumenta un día antes del terremoto de Haití ( $M = 7$ ) del 12 enero de 2010 (Liu et al., 2011).

Por su parte, usando datos del satélite DEMETER, destinado para estudiar variaciones ionosféricas relacionadas con terremotos, en Zhang et al. (2008) se reportan irregularidades ionosféricas posiblemente relacionadas con el terremoto de Wenchuan ( $M = 8.0$ , registrado el 12 de mayo de 2008) en China. De acuerdo a Huang et al. (2017), el terremoto de Wenchuan resaltó aún más la importancia de una discusión internacional con relación a la sismología, geología y geodinámica de terremotos fuertes, de su previsibilidad y cómo aprovechar al máximo el conocimiento y las técnicas actuales para reducir los desastres sísmicos. Así mismo, los resultados estadísticos obtenidos en M. Akhondzadeh et al. (2010) indican que los cambios positivos y negativos obtenidos a partir de los datos de DEMETER y TEC derivado de datos GPS, durante los días uno a cinco antes de los terremotos en estudio, en condiciones geomagnéticas silenciosas, posiblemente sean considerados como precursores sismo-ionosféricos. Lo anterior, es consistente con lo planteado en Pulinets y Davidenko (2014) y Pulinets et al. (2015) sobre la existencia de anomalías ionosféricas positivas y negativas posiblemente relacionadas al impacto de un terremoto.

Adicionalmente, en Romanovskaya et al. (2012) se realizó un análisis sobre las observaciones regulares de GPS para la búsqueda de precursores sismo-ionosféricos en el TEC, para esto se trazaron mapas de perturbaciones globales y regionales de TEC para los eventos sísmicos registrados durante 2005 y 2006 ( $M \geq 6$ ,  $D < 60$  km por profundidad del hipocentro y  $< 50$  grados por la latitud geomagnética del epicentro). En dicho estudio se analizó el TEC calculado a partir de uno a ocho días antes del terremoto, lo anterior con base en Pulinets y Boyarchuk (2004) donde se propone que las variaciones anómalas ionosféricas se observan de uno a quince días antes del choque sísmico. Por su parte, en el estudio de Tao et al. (2017) se presenta evidencia de perturbaciones ionosféricas pre sísmicas en el TEC con base en GIM y concentración plasmática (obtenida a través de datos del satélite DEMETER). Estas perturbaciones aparecen dos días antes del terremoto, excluyendo perturbaciones relacionadas a actividad geomagnética. En su estudio, el TEC en el epicentro disminuye anómalamente y conduce a una estructura asimétrica anómala con respecto al Ecuador magnético dos días antes del terremoto, destacando que dicha estructura asimétrica anómala desaparece después del terremoto.

Estos informes sugieren que el estudio de la ionosfera como un precursor de terremotos tiene un potencial imprevisto para las aplicaciones, así como para la investigación básica (Devi et al., 2010), aunque algunos opinan que el TEC podría no ser práctico para predicciones a corto plazo (Astafyeva et al., 2011) y se mantienen escépticos acerca de dichos efectos precursores (Rishbeth, 2007). Además, a pesar de existir trabajos relacionados con la búsqueda de perturbaciones ionosféricas, los mecanismos físicos que podrían ser responsables de la modificación ionosférica previa al terremoto están lejos de ser entendidos (V. Kim et al., 2017). No obstante, de acuerdo a Liu et al. (2009) algunas de las observaciones en el TEC derivado de datos GPS pueden

ser causadas por el cambio del entorno electromagnético (es decir, radiaciones, campos eléctricos de baja frecuencia y campos magnéticos, etcétera) en torno al área del epicentro próximo durante el período de preparación del terremoto. Estos cambios en los campos eléctricos atmosféricos pueden ser causados por iones generados por la emisión de gas radón (Kamogawa, 2006). Además, otros posibles mecanismos para el transporte de energía desde la litósfera a la atmósfera son: la difusión de agujeros de electrones cargados positivamente desde la zona focal hasta la superficie del suelo y ondas de gravedad atmosférica que se propagan hasta la ionosfera, causando perturbaciones antes de los terremotos, sus fuentes posibles son oscilaciones terrestres de largo período ó perturbaciones térmicas (Kamogawa, 2006).

### 1.5.8. Campo eléctrico y magnético

La detección, a través de instrumentos terrestres y satelitales, de campos eléctricos y magnéticos anómalos antes del impacto de un terremoto fue reportada por Larkina et al. (1989), documentando que el satélite Intercosmos 19 detectó cambios en las emisiones ionosféricas ELF (del inglés, Extremely Low Frequency) y VLF (del inglés, Very Low Frequency) a 800 Hz y 4650 Hz desde 8 horas antes a 3 horas después de cada terremoto en su conjunto de datos. Además, en Zhima et al. (2012) se demuestra que posibles perturbaciones electromagnéticas ionosféricas se registraron 4 días antes del terremoto en estudio, lo anterior en el rango de frecuencias ELF y VLF. Por otra parte, en Cherniak et al. (2014) se analiza la correlación entre el índice geomagnético Kp y los parámetros que caracterizaron la actividad de las irregularidades de la ionosfera en los años 2010 a 2013. Finalmente, existen diversas observaciones importantes con base en instrumentos en tierra que apoyan la idea de que diversas señales eléctricas y magnéticas anómalas, dependiendo de la banda de frecuencia, pueden ser registradas antes del impacto de un terremoto (Cicerone et al., 2009).

### 1.5.9. Comportamiento animal

El terremoto de Kobe, registrado en el año 1995 y mencionado en la Sección 1.5.3, fue causado por el movimiento de la falla de Nojima en la isla de Awaji, Japón. Después del terremoto se solicitó a la gente de la zona que reportara fenómenos que habían sido observados antes de su impacto. El informe, recopilado por diversos medios de comunicación (carta, fax, teléfono e Internet), fue publicado como un libro: “1519 *Declaraciones: Precursores del terremoto de Hanshin*” (Wadatsumi, 1995). Mismo que contenía ilustraciones y fotografías de rayos sísmicos, lunas rojas y comportamiento inusual de animales y plantas. Con base en lo anterior, y en específico, la idea de pronosticar un terremoto, en determinadas áreas, con base en la observación de comportamientos inusuales en animales nació. De acuerdo a Kirschvink (2000), los animales que viven dentro de regiones sísmicamente activas son sometidos episódicamente a vibraciones intensas. Por lo tanto, la hipótesis señala que el comportamiento “inusual” podría fundamentarse en la percepción, por parte de los animales, de un incremento de señales electromagnéticas de baja frecuencia, lo que permitiría al animal anticipar el impacto de un terremoto y tratar de huir del área. No obstante, aunque informes anecdóticos y retrospectivos de comportamiento animal sugieren que si bien muchos organismos pueden ser capaces de detectar un

evento sísmico inminente, no se ha presentado ningún escenario plausible a través del cual se explique la evolución de tales comportamientos. Además, debido al constante crecimiento social, que exige a su vez, el aumento del desarrollo de infraestructura, la población animal resulta cada vez más aislada, lo que complica la explicación y observación de comportamientos anómalos. Finalmente, es posible encontrar reportes de comportamientos inusuales en animales, previos al impacto de un terremoto, en los trabajos de [Ikeya \(2003\)](#), [Hayakawa \(2013\)](#) y [Hayakawa et al. \(2016\)](#).

# 2

## Marco teórico

En esta sección se describen los conceptos teóricos que fundamentaron el desarrollo de la presente tesis. Lo anterior, con la finalidad de proporcionar al lector una óptima comprensión.

### 2.1. Tierra-Sol

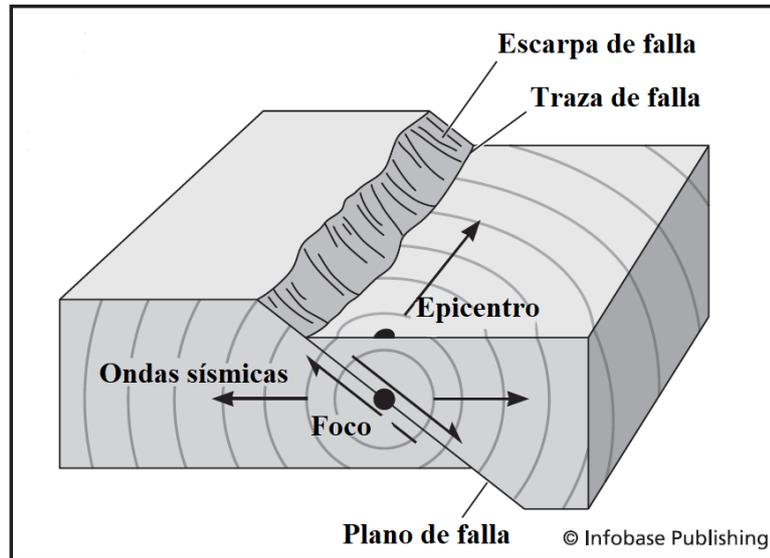
La principal fuente de energía cerca de la Tierra es el Sol, por lo tanto, es natural pensar en una conexión entre los diferentes elementos que componen la actividad solar (en el área denominada “SA”) y los procesos terrestres (Larocca, 2016). Dicha conexión es compleja e involucra diversos factores que deben ser considerados y estudiados de forma simultánea (Tavares y Azevedo, 2011) (Ver Sección 2.1.3). Además, diversas investigaciones señalan que el sistema magnetosfera-ionosfera y su interacción es fuertemente controlado por la actividad del Sol (Perrone y Franceschi, 1998; Hargreaves, 1992). Específicamente, la condición de la ionosfera, cuya existencia se debe principalmente a los rayos X y a la radiación ultravioleta emitida por el Sol (Ezquer y Radicella, 2008), está determinada, por el nivel de actividad solar y perturbaciones geomagnéticas.

#### 2.1.1. Litósfera

Los procesos internos y externos de la Tierra dieron origen a los grandes rasgos existentes en la superficie de esta, tales como: continentes, cuencas oceánicas y cordilleras. La estructura de la Tierra se clasifica, de acuerdo a su densidad ( $g/cm^3$ ), en tres capas: La corteza, compuesta principalmente por minerales ricos en silica (silicón y oxígeno), que tiene un espesor de entre 2 y 70 kilómetros y representa menos del 2% del volumen de la Tierra; El manto, compuesto de mineral de silicato rico en hierro y magnesio, que se extiende desde los  $\approx 70$  a los 2900 kilómetros de profundidad y que comprende el 82% del volumen de la Tierra; La tercer capa es el núcleo, compuesto principalmente de hierro en conjunto con otros metales pesados como el níquel, y se extiende desde los 2900 kilómetros hasta el centro de la Tierra a 6300 kilómetros, el núcleo representa el 16% del volumen de la Tierra y el 32% de su masa (Lillie, 1999). La litósfera terrestre se compone de siete placas litosféricas principales y varias menores (Figura 2.1). Estas placas no coinciden con los continentes ya que en una sola placa se agrupa parte continental y parte oceánica; su movimiento es de unos cuantos centímetros por año en relación de una con otra. Además, se cree que las placas litosféricas son impulsadas por corrientes de convección dentro del manto superior. En 1968 una red mundial de sismógrafos reveló que la mayoría de la actividad tectónica ocurre a lo largo de bandas angostas que deli-



de movimiento que tensione el material más allá de sus límites elásticos y el segundo factor específica que el material debe fallar por fractura frágil, la parte de la Tierra que cumple con estos criterios es la litósfera (Ver Sección 2.1.1). Los siguientes elementos nos permiten caracterizar un terremoto: El primero es su foco o hipocentro, que corresponde al punto real dentro de la Tierra donde la energía del terremoto fue liberada. El segundo es el epicentro, que es el punto en la superficie de la Tierra directamente sobre el foco del terremoto. Por último, la profundidad focal, la cual es la distancia desde el epicentro hacia el foco del terremoto (Figura 2.2).

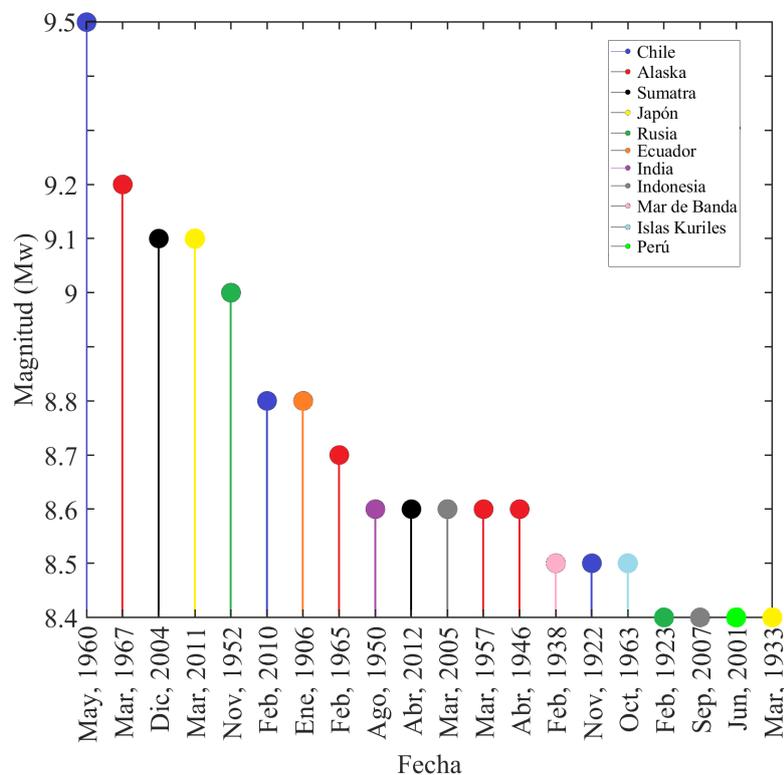


**Figura 2.2:** Ilustración de una falla normal en la que se está produciendo un terremoto (Gates y Ritchie, 2006).

Existen dos términos usados para describir la fuerza de un terremoto: el primero es la intensidad, la cual es cualitativa y describe la severidad del movimiento del suelo en una ubicación dada; El segundo es la magnitud, que es cuantitativa y esta relacionada con la cantidad de energía liberada por el terremoto. La magnitud se define con base en mediciones precisas de la amplitud de las ondas sísmicas, a distancias conocidas desde el epicentro, usando sismógrafos. Esta se expresa de acuerdo a una escala logarítmica por lo que un incremento en la magnitud en una unidad, corresponde a un aumento de diez veces en la amplitud de las ondas sísmicas. Para un terremoto dado solo existe una magnitud (las mediciones en diferentes estaciones sísmicas alrededor del mundo deberían producir aproximadamente la misma). Para un mismo terremoto, sin embargo, es posible observar un rango de intensidades distinto. A la fecha, todavía no se ha llegado a un acuerdo absoluto sobre el modo de medir la magnitud, no obstante, generalmente se admiten dos escalas, una que utiliza amplitudes de ondas internas ( $M_b$ ) y otra de ondas superficiales ( $M_s$ ). Otra escala de magnitud fue introducida por Kanamori (1977) con el fin de evitar el problema de la saturación de las escalas, y esta recibe el nombre de magnitud de momento ( $M_w$ ).

Es importante aclarar que no en todos los límites de los continentes se producen terremotos, es decir, existen límites activos y pasivos. Por ejemplo, el límite occidental de América es activo, el oriental no lo es. La distribución geográfica global de los terremotos puede clasificarse en las siguientes zonas activas: el Cinturón de

Fuego del Pacífico, que rodea a este océano, (en su parte oriental por los terremotos de Alaska, California, Nevada, México, Centroamérica y la cordillera Andina, desde Colombia hasta el Sur de Chile), en esta zona se han producido grandes terremotos. En América del Sur, los terremotos son superficiales en la zona costera y más profundos hacia el interior del continente. La segunda zona sísmica es la llamada “Mediterráneo-Himalaya”, que se extiende desde las Islas Azores hasta la costa del continente Asiático (terremotos del Sur de España, Norte de África, Italia, Grecia, Turquía, Persia, Himalaya, Norte de la India y China). La tercera región sísmica se compone por el complejo sistema de cordilleras submarinas que se extienden en los océanos. En la Figura 2.3 se presentan los veinte terremotos más fuertes a la fecha. De acuerdo a [Vallina y Mézcua \(1997\)](#), la mayor concentración de terremotos se encuentra en el borde del Océano Pacífico, tanto de Centro como de Sur América, en parte, por ser un borde de subducción en el cual la corteza oceánica se introduce por debajo de la continental. En el borde del Pacífico, la placa oceánica está dividida en dos placas más pequeñas: de Cocos al Norte y la placa de Nazca al Sur. Estas dos placas son empujadas contra el continente formando una zona de subducción y dando origen a la cordillera de los Andes, sísmica y volcánicamente activa (Figura 2.1). Específicamente, la zona sísmicamente activa de México abarca la costa del Pacífico, desde el estado de Jalisco hasta la frontera con Guatemala, zona limitada al Norte por una línea de terremotos que pasa por Guadalajara, Puebla y Veracruz. En México se han registrado grandes terremotos: en los años 1900 ( $M = 7.4$ ) y 1932 ( $M = 8.2$ ) cerca de Colima, 1931 ( $M = 7.8$ ), 1965 ( $M = 7.4$ ) y 1978 ( $M = 7.6$ ) en la región de Oaxaca y en 1973 ( $M = 7.6$ ) cerca de Veracruz.



**Figura 2.3:** Los veinte terremotos más fuertes a la fecha. Fuente datos: U.S. Geological Survey (USGS). Año de consulta: 2019.

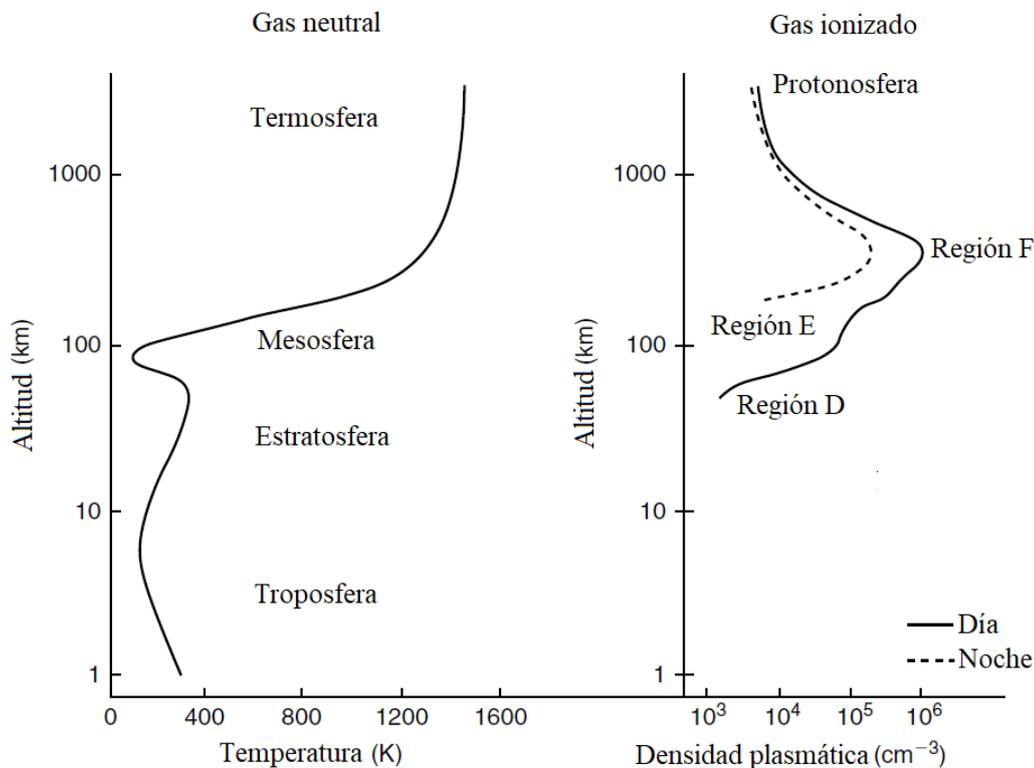
### 2.1.2. Atmósfera

La atmósfera terrestre consiste en una mezcla de gases que rodean al planeta, entre estos podemos encontrar: nitrógeno y oxígeno molecular, dióxido de carbono, vapor de agua y ozono. La energía de la atmósfera proviene principalmente del Sol, aunque las interacciones con la tierra y el océano también son importantes, siendo esta bombardeada continuamente por fotones solares en longitudes de onda infrarroja, visible y ultravioleta. Algunos fotones solares son esparcidos al espacio por los gases atmosféricos ó son reflejados a este por las nubes ó la superficie terrestre; otros son absorbidos por moléculas atmosféricas (especialmente vapor de agua y ozono) ó nubes, lo que provoca el calentamiento de partes de la atmósfera; y algunos más llegan a la superficie terrestre y la calientan (Andrews, 2000). Como otras atmósferas planetarias, la atmósfera de la Tierra figura de manera central en las transferencias de energía entre el Sol y la superficie del planeta y de una región del globo a otra (Salby et al., 1996). Una de las capas atmosféricas de gran importancia para la investigación de precursores de terremotos es la ionosfera. La ionosfera es una zona compuesta por regiones que se forman entre la mesosfera y la termosfera (Figura 2.4). En esta zona la cantidad de electrones e iones que interactúan eficazmente con los campos electromagnéticos son abundantes. Estos electrones e iones libres se producen mediante la ionización de las partículas neutras, tanto por la radiación ultravioleta extrema del Sol como por las colisiones con partículas energéticas que penetran en la atmósfera (Schunk y Nagy, 2000). Sin embargo, existen otras fuentes que pueden producir ionización, como son: los rayos cósmicos provenientes del Sol, rayos X solares, así como partículas energéticas que se precipitan en las regiones altas del planeta, las cuales tienen un carácter esporádico relacionado con la actividad solar (Pulinets y Boyarchuk, 2004). El hecho de que la ionosfera este compuesta por partículas de iones hace posible que al transmitir una señal electromagnética hacia ella esta sea reflejada o desviada de nuevo hacia la superficie terrestre. Lo anterior hace posible la comunicación a distancias continentales y el estudio de diversos fenómenos físicos. Además, la ionosfera se comporta como una interfase entre dos sistemas muy diferentes: el ambiente habitable y el ambiente espacial (Palacios et al., 2006). A lo largo de los años, diversos autores han establecido de forma distinta la altitud de la ionosfera (Tabla 2.1). Sin embargo, esta puede ser resumida en un rango que va desde los 50 hasta los 1000 kilómetros, es necesario mencionar que realmente no existe un límite superior estrictamente definido, la concentración de electrones tiende a disminuir a medida que aumenta la altitud (McNamara, 1993).

**Tabla 2.1:** Altitudes de la ionosfera de acuerdo a diversos autores.

Altitud (km)	Pico de concentración de electrones	Autor
70 a 1000	≈ 200 a 400 km	Carrano et al. (2009)
A partir de los 80	No Disponible	Palacios et al. (2006)
50 a 1000	250 a 400 km	Pulinets y Boyarchuk (2004)
60 a 3000	≈ 300 km	Schunk y Nagy (2000)

Al principio, los diferentes sondeos de radio de la ionosfera parecían indicar que esta se formaba en capas distintas. Sin embargo, hoy se conoce que este no es el caso y que en realidad son diferentes regiones (Figura 2.4). Mientras que el término capa se refiere a la ionización que sucede dentro de una región (Anderson y Fuller-Rowel, 1999). Estas regiones se denominan D, E y F y su nombre es atribuido al científico Sir Edward Victor Appleton (1892 - 1965), quien afirmó que en sus primeros trabajos escribió E por el campo eléctrico reflejado de la primera capa que él reconoció. Más tarde, cuando observó una segunda capa, en altitudes más altas, escribió F por el campo reflejado. Posteriormente, conjeturó que posiblemente exista otra capa a altitudes más bajas, por lo que decidió nombrar a las dos primeras capas “E” y “F” y a la posible capa inferior “D”, permitiendo así la designación alfabética de otras capas no descubiertas (Schunk y Nagy, 2000). A continuación se describen algunas de las características de dichas regiones de la ionosfera terrestre:



**Figura 2.4:** Perfiles típicos de temperatura atmosférica neutra y densidad de plasma ionosférico con las diversas capas designadas. Fuente: Kelley y Heelis (1989).

### Región D

La altura conocida de la cúspide de la región D es de 90 kilómetros (Figura 2.4). Sin embargo, durante los períodos de actividad solar intensa esta puede bajar a los 50 kilómetros. En relación a sus niveles de densidad electrónica, estos varían conforme a la altitud y a la hora del día; Para el mediodía, a los 40 kilómetros su densidad es de  $\approx 10 \text{ e/cm}^3$ , a los 60 km de  $100 \text{ e/cm}^3$ , a los 80 km de  $1000 \text{ e/cm}^3$  y a los 90 km  $\approx 15,000 \text{ e/cm}^3$ . Por el contrario, en la noche la densidad electrónica decae:  $10 \text{ e/cm}^3$  a los 85 km,  $100 \text{ e/cm}^3$  a los 88 km y  $1000 \text{ e/cm}^3$  a los 95 km, para posteriormente permanecer con valores similares hasta al menos los 140 km

de altitud. Al ser esta región la más cercana a la tierra la densidad de electrones libres es menor que en las demás regiones (Ezquer y Radicella, 2008). También, la región D está caracterizada por la composición iónica más compleja (Pulinets y Boyarchuk, 2004), ya que contiene los grupos más grandes de iones, tales como:  $H^+(H_2O)_n$ ,  $NO^+(H_2O)_n$ ,  $NO^+(CO_2)_n$ , etcétera. Además, es la única región de la ionosfera donde la concentración de iones positivos no es igual a la concentración de electrones, esto debido a la formación de iones negativos. En relación con las regiones atmosféricas, las alturas de la región D corresponden a la mesosfera, donde se observa una inversión de temperatura de 260 a 180 Kelvin a alturas correspondientes de 50 a 85 kilómetros, posteriormente la temperatura aumenta constantemente (Pulinets y Boyarchuk, 2004).

## Región E

Esta región de la ionosfera se encuentra entre los 90 y los 150 kilómetros de altitud (Ezquer y Radicella, 2008). Dentro de la región E se encuentra la capa E normal, producida por la radiación solar, y capas esporádicas, designadas  $E_s$  (Tabla 2.2). La región E de la ionosfera se formó bajo la acción de la radiación solar ultravioleta, específicamente, dentro de la banda de  $80 < \lambda < 102.8$  nm. Sus principales componentes ionizados son:  $O_2$  y  $N_2$  y sus iones principales:  $O_2^+$  y  $NO^+$ , que se forman a partir de  $O_2^+$  y  $N_2^+$  como resultado de reacciones iónico-moleculares. El principal mecanismo de la pérdida de partículas cargadas es la recombinación disociativa de los electrones con los iones moleculares (Pulinets y Boyarchuk, 2004). Durante el día, el comportamiento de la región E es muy regular y es controlado por el ángulo cenital del Sol. Mientras que, durante el atardecer y la noche su comportamiento es más complejo. Dentro de la región E pueden formarse capas muy finas. Esta formación se denomina capa E esporádica y se designa como  $E_s$ . La formación de estas capas es debido a la convergencia del flujo vertical de iones metálicos de larga vida. Experimentalmente fueron registrados los siguientes tipos de iones:  $Na^+(23^+)$ ,  $Mg^+(24^+)$ ,  $Mg^+(26^+)$ ,  $Mg^+(27^+)$ ,  $Al^+(27^+)$ ,  $Si^+(29^+)$ ,  $K^+(39^+)$ ,  $Ca^+(40^+)$ ,  $K^+(41^+)$ ,  $Ca^+(44^+)$ ,  $Ti^+(48^+)$ ,  $Fe^+(54^+)$ ,  $Mn^+(55^+)$ ,  $Fe^+(56^+)$ ,  $Fe^+(57^+)$ ,  $Fe^+(58^+)$ ,  $Ni^+(58^+)$ ,  $Co^+(59^+)$ ,  $Ni^+(60^+)$ ,  $Ni^+(61^+)$ ,  $Ni^+(62^+)$ ,  $Ni^+(64^+)$ ,  $Xn^+(66^+)$  y óxidos e hidratos de iones metálicos:  $AlO^+$ ,  $SiO^+$ ,  $MgO^+$ ,  $SiOH^+$ ,  $Na^+(H_2O)$ ,  $Na^+(H_2O_2)$ ,  $NaO^+$ ,  $NaOH^+$ , se cree que el origen de estos iones es de tipo meteorológico. Para la formación de la capa E esporádica ( $E_s$ ) los procesos de transporte iónico son muy importantes, ya que estos están conectados con vientos, mareas, ondas de gravedad y campos eléctricos (Pulinets y Boyarchuk, 2004).

## Región F

Esta región de la ionosfera engloba una altitud que va desde los 150 a los  $\approx 600$  kilómetros (McNamara, 1993). La formación de esta región se debe a la radiación ultravioleta solar dentro de la banda  $10 < \lambda < 90$  nm y sus principales componentes ionizados son:  $N_2$  y  $O$ , y, en menor medida:  $O_2$ . Los iones predominantes, que aparecen como resultado de las reacciones moleculares iónicas, son los mismos que en la región E, por ejemplo:  $NO^+$  y  $O_2^+$ . La región F de la ionosfera esta compuesta por dos capas: F1 y F2. La capa F1 aparece como un punto de flexión en el perfil vertical de la concentración de electrones entre las capas E y F2, a una altura de 160 a 200 km, apareciendo más a menudo cerca de los 180 km. Los procesos en ambas regiones,

E y F, son muy similares. Sin embargo, en las altitudes de la capa F1 es posible observar anisotropía de temperatura entre electrones e iones (una diferencia entre sus temperaturas). La probabilidad de aparición de las capas de la región F varía, la capa F1 es más probable durante condiciones diurnas de verano, y, durante la noche, lo es la cavidad entre las capas E y F2, que en la física ionosférica denominan “El Valle” (Pulinets y Boyarchuk, 2004; Ezquer y Radicella, 2008).

## Capa F2

Esta capa es la más ionizada y dinámica de la ionosfera. Incluye la pequeña parte de la ionosfera inferior, desde los 200 km hasta la máxima ionización, y toda la ionosfera superior, desde el pico hasta los 1000 a 2000 km. La capa F2 determina la propagación de las ondas decimétricas y realiza la principal contribución en todos los errores (retardo, distorsión de fase, centelleos) de sistemas de navegación, tales como: GPS y GLONASS. Es la más simple en lo que respecta a la consideración fotoquímica pero, la más compleja en comportamiento dinámico y termodinámico. Las principales especies ionizadas en esta capa son el oxígeno atómico, sin embargo,  $N_2$  y  $O_2$  también juegan papeles importantes en el proceso del intercambio átomo-ion, que conduce a la pérdida de electrones por la recombinación disociativa. El ion predominante en la capa F2 es el  $O^+$  y únicamente a altitudes superiores a los 700 km los iones ligeros  $He^+$  y  $H^+$  comienzan a exceder la concentración de  $O^+$ . La diferencia principal entre la capa F2 y las otras capas ionosféricas es que la velocidad de pérdida de ionización es proporcional a la concentración de iones cuando en otras capas esto es proporcional al cuadrado de la concentración. Finalmente, esta capa se forma durante el día, y durante la noche disminuye rápidamente, sin embargo, la densidad del plasma es soportada por la difusión ambipolar que conserva la forma y la altura máxima del pico, pero con una densidad disminuida (Pulinets y Boyarchuk, 2004).

**Tabla 2.2:** Regiones y capas de la ionosfera de acuerdo a Pulinets y Boyarchuk (2004).

Región	Rango aproximado de altura (km)	Capa	Rango aproximado de altura (km)	Densidad aproximada de electrones durante el día ( $m^{-3}$ )
C			65	$10^8$
D	50-90	D	70-90	$10^9$
E	90-140	E1	100-110	$10^{11}$
		E2	115	$10^{11}$
		$E_s$	110-120	Varía
F	140-350	F1, $F1\frac{1}{2}$	140-200	$2 \times 10^{11}$
		F2	200-350	$10^{12}$
Lado superior (topside)	350-1000			$10^{10} - 10^{11}$
Plasmasfera	> 1000			$10^9$

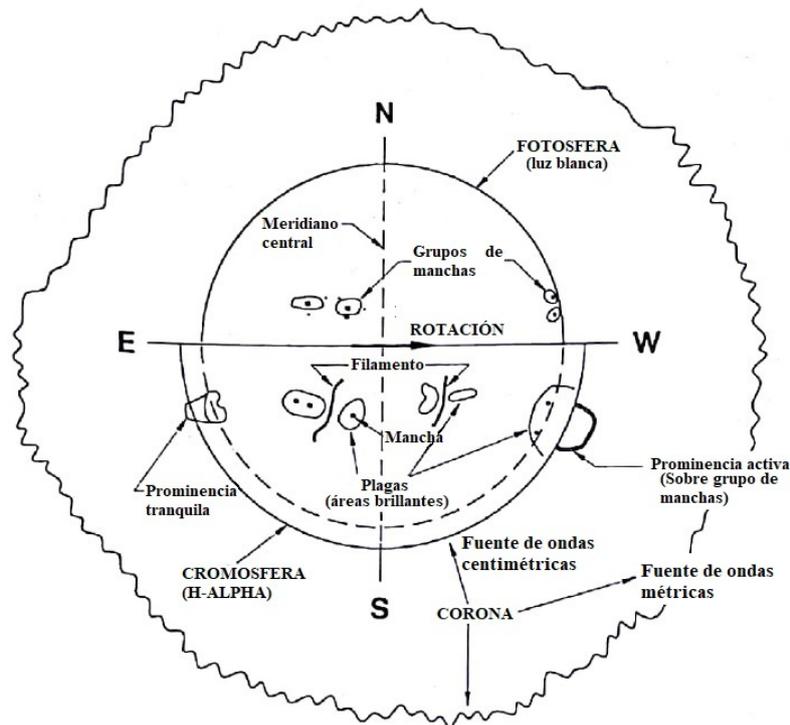
## Procesos y variaciones de la ionosfera

Adicionalmente a lo mencionado al principio de la Sección 2.1.2 y de forma general, la ionosfera se forma cuando la radiación de luz ultravioleta extrema (EUV, siglas en inglés) proveniente del Sol arranca electrones de los átomos neutros de la atmósfera terrestre. Entre los principales procesos que ocurren en la ionosfera se encuentran la recombinación y la ionización. El proceso en el que un fotón quita un electrón de un átomo neutro, creando así un ion cargado positivamente, se conoce como fotoionización. Por su parte, la recombinación es lo contrario a la fotoionización, con electrones cargados negativamente e iones cargados positivamente que se combinan nuevamente para producir átomos neutros. Existen dos tipos de recombinación, radiativa y disociativa. En la recombinación radiativa los electrones se combinan directamente con iones cargados positivamente, convirtiéndolos en átomos no neutros y perdiendo su propia libertad. El segundo tipo, la recombinación disociativa, es descrita en el Capítulo 3 de McNamara (1993). En cuanto a las variaciones de la ionosfera, estas tienen relación con el hecho de que al ser, la ionosfera, creada por el Sol esta variará con la hora del día, la estación y con la posición en la superficie de la Tierra. De tal forma que, existen variaciones regulares, estas tienen periodicidad, es decir, son sistemáticas. Como ejemplo de estas tenemos: la variación diurna (a lo largo del día), de día a día, mensual, estacional (a lo largo del año), semi-anual, anual y la relacionada al ciclo solar. También existen las variaciones irregulares, las cuales son perturbaciones ionosféricas.

### 2.1.3. Sol

El Sol es una estrella de masa ( $1.99 \times 10^{30}$  kg), radio ( $6.96 \times 10^5$  km) y luminosidad ( $3.9 \times 10^{26}$  watts) promedio cuya notable emisión constante de radiación, durante varios miles de millones de años, ha nutrido y apoyado la vida en la Tierra. El Sol está compuesto principalmente de hidrógeno y helio, con pequeñas cantidades de argón, calcio, carbono, hierro, magnesio, neón, níquel, nitrógeno, oxígeno, silicio y azufre. La energía del Sol se genera en lo más profundo de su núcleo, de aproximadamente 16 millones de Kelvin (K), mediante la fusión nuclear. Los núcleos de hidrógeno se unen formando helio y liberando enormes cantidades de energía. La energía del Sol (luz de todas las longitudes de onda) se difunde a través de él en forma de radiación. La atmósfera solar se compone de tres regiones: fotosfera, cromosfera y corona. La fotosfera es la superficie visible del Sol, una capa muy fina y “fría” que emite radiación visible. La temperatura en esta capa disminuye con la distancia radial, desde  $\approx 6000$  K en su límite hacia el Sol hasta un mínimo de  $\approx 4500$  K cerca del límite fotosfera-cromosfera. En la fotosfera los campos magnéticos están altamente concentrados en regiones pequeñas y grandes conocidas como manchas solares, estas se encuentran ampliamente distribuidas pero cubren solo un pequeño porcentaje de su superficie. A su vez, a medida que aumenta el número de manchas solares y aumenta su complejidad magnética, estas se convierten en fuentes probables de grandes emisiones de energía eruptiva conocidas como fulguraciones solares, las cuales presentan altas velocidades y van en todas las direcciones del espacio. La segunda región es la cromosfera, una capa también relativamente delgada en la que la temperatura aumenta rápidamente (de 4500 K a 25000 K) (Schunk y Nagy, 2000). La tercer región, o corona, contiene un plasma ionizado muy tenue y caliente ( $10^6$  K), tan caliente que escapa a la gravedad de la estrella y fluye hacia el espacio como viento solar

(Figura 2.5). El Sol emite energía en longitudes de onda invisibles de luz, como rayos gamma, rayos X, ultravioleta, infrarrojo, microondas y radio. Afortunadamente, el campo magnético y la atmósfera de la Tierra actúan como un escudo contra el flujo constante de radiación peligrosa emitida por el Sol. Típicamente, solo un “hilo” de viento solar logra ingresar a la Tierra, mientras este se desliza hacia los polos Norte y Sur produce radiantes pantallas de luz denominadas “Auroras”. Prácticamente todo lo relacionado con el Sol de relevancia para la ionosfera sigue un patrón ó ciclo de años; Por ejemplo, el número de manchas solares aumenta y disminuye aproximadamente cada 11 años, este período comprende un ciclo solar. Todos los ciclos solares son diferentes. A veces el máximo no se aleja mucho del mínimo, por ejemplo entre los años 1645 y 1715 no hubo prácticamente ninguna mancha solar por lo cual no existió evidencia de un ciclo solar. Este período se conoce como el mínimo de Maunder, en honor a Walter Maunder que, en la década de 1890, llamó la atención sobre este hecho, mismo que había sido ignorado durante los 200 años posteriores a las observaciones realizadas (McNamara, 1993). Por otra parte, tenemos el mínimo de Dalton, que fue un período de baja actividad solar que duró desde los años 1790 hasta 1820 y que coincidió con un período de temperaturas mundiales más bajas que el promedio. Sin embargo, a veces las explosiones magnéticas en el Sol (fulguraciones solares) crean tormentas en el viento solar (que es un flujo constante de gas caliente que emana de la corona) y, en raras ocasiones, estos fenómenos pueden interrumpir la radio, los teléfonos celulares y el GPS, ó incluso causar apagones en la Tierra. Un ejemplo relacionado a esto, es el denominado evento Carrington de 1859; el 01 de septiembre de 1859 el astrónomo Richard Carrington observó, por primera vez en la historia, un acontecimiento desconcertante en el Sol: un número de manchas solares sumamente grandes de las cuales emanó una intensa luz extraordinariamente brillante (lo que actualmente se conoce como fulguración solar) relacionando dicho fenómeno con los sucesos del 02 de septiembre de 1859 (una aurora boreal, visible en distintas partes del mundo, máquinas que funcionaban solas, sobrecargas eléctricas, brújulas que giraban incontrolablemente, etcétera). Hasta aquel momento se creía que la única fuerza que se comunicaba a través del espacio era la gravedad, sin embargo, el evento del 01 y 02 de septiembre de 1859 permitió entender que el Sol genera una energía magnética que puede alcanzar y perturbar el campo magnético de nuestro planeta. Cabe destacar que no se ha repetido una tormenta solar con una intensidad comparable a la de 1859.



**Figura 2.5:** Boceto en corte del Sol que muestra su apariencia en diferentes longitudes de onda. Fuente: [McNamara \(1993\)](#).

## 2.2. Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

El Sistema de Navegación por Satélite de la Marina (NAVSAT, por sus siglas en inglés), también llamado TRANSIT, fue el primer sistema de navegación por satélite en funcionar, motivo por el cual es considerado como predecesor inmediato de los actuales sistemas de posicionamiento. Este sistema fue concebido a finales de la década de 1950 y desarrollado en la década de 1960 por militares de EE. UU., entre las finalidades de este se encontraba la determinación de coordenadas y el tiempo de los buques en el mar, además de aplicaciones militares en tierra. El uso civil de este sistema de satélites fue eventualmente autorizado, utilizándose en todo el mundo tanto para la navegación como para la topografía ([Hofmann-Wellenhof et al., 2007](#)). Cabe señalar que desde finales del año 1996 el sistema TRANSIT ya no se encuentra en funcionamiento. El programa NAVSTAR GPS (Navigation System Timing And Ranging - Global Positioning System, por sus siglas en inglés) fue iniciado en diciembre de 1973. Años después, el 22 de febrero de 1978, se lanzó el primer satélite de este sistema, llegando a ser completamente operacional en 1993 con 24 satélites. Es importante mencionar que el programa NAVSTAR GPS fue desarrollado por el ejército estadounidense para superar las deficiencias de los primeros sistemas ([Huerta et al., 2005](#)). El equipo auxiliar de cada satélite, entre otros, consta de paneles solares para alimentación eléctrica y un sistema de propulsión para ajustes de órbita y control de estabilidad ([Hofmann-Wellenhof et al., 2007](#)). El sistema GPS fue concebido, al igual que su antecesor, el sistema TRANSIT, con fines militares, su objetivo es determinar coordenadas espaciales de puntos de interés con respecto a un sistema de referencia mundial a cualquier hora del día y en cualquier lugar del

planeta, ya sea de forma estática o dinámica. Para obtener las coordenadas espaciales, es decir la posición de los puntos de interés, el sistema se basa en la resolución de un problema geométrico que consiste en medir la distancia a un conjunto mínimo de cuatro satélites con coordenadas conocidas (a través de señales emitidas por los satélites y capturadas por receptores especiales en tierra). Hoy en día, el GPS es un sistema de radionavegación espacial destinado a diversas tareas, propiedad del Gobierno de los Estados Unidos de América y operado por su Fuerza Aérea con el objetivo de satisfacer las necesidades de defensa y seguridad nacional, comercial, civil y científicas. A su vez, el sistema GPS se compone de tres segmentos: el Segmento Espacial, el Segmento de Control y el Segmento del Usuario, detallados de forma concisa en la Tabla 2.3.

**Tabla 2.3:** Segmentos que componen al Sistema de Posicionamiento Global (GPS) (Hernández et al., 2005; Hofmann-Wellenhof et al., 2007).

Segmento	Funciones básicas	Composición
Espacial	Proporcionar referencia del tiempo atómico, generar señales de radio frecuencia pseudoaleatorias y almacenar y reenviar el mensaje de navegación, entre otros.	Constelación con un número suficiente de satélites para asegurar que, al menos, cuatro satélites sean simultáneamente visibles electrónicamente en cada sitio.
De Control	Rastrear los satélites GPS, monitorear sus transmisiones, realizar análisis y enviar comandos y datos a la constelación, entre otros.	Estación de Control Maestra, Estación de Control Maestra Alternativa, dieciséis Estaciones de Monitoreo y once antenas de mando y control.
Del Usuario	Acceso a todas las señales o servicios del sistema de acuerdo a su categoría (militar o civil y autorizado o no autorizado).	Puede ser clasificado en las siguientes categorías: usuarios, tipos de receptores y diversos servicios de información.

### 2.2.1. La señal GPS

Los satélites del sistema GPS transmiten la información que generan en dos frecuencias de señales de uso civil, L1 (1575.42 MHz) y L2 (1227.60 MHz), derivadas de una frecuencia fundamental (Ecuación 2.1) generada por relojes atómicos con una estabilidad del orden de  $10^{-13}$  (Hernández et al., 2005).

$$f_0 = 10.23 \text{ MHz} \quad (2.1)$$

De acuerdo a Carrano et al. (2009) un receptor GPS de doble frecuencia puede estimar el TEC a lo largo de la trayectoria de la señal, como consecuencia de la naturaleza dispersiva de la ionosfera terrestre.

#### Estructura de la señal

Sobre las frecuencias de señales del GPS (L1 y L2) se modulan los siguientes tipos de códigos PRN (Pseudorange Random Noise, por sus siglas en inglés) y mensajes de navegación:

- Código de Adquisición (C/A (t)), disponible para uso civil y designado como SSP. La secuencia se repite cada milisegundo y su velocidad o chip-rate es de un megabit por segundo (Mbps, por sus siglas en inglés), lo que supone una longitud de onda equivalente de 293.1 metros. Modulada únicamente sobre L1 y omitida intencionadamente de L2, omisión que permite negar la exactitud completa del sistema a los usuarios no militares (Hofmann-Wellenhof et al., 2007).
- Código de precisión (P (t)), reservado para uso militar y para usuarios civiles autorizados. El código P, designado como PPS, tiene una longitud de onda efectiva de aproximadamente 30 metros (velocidad (chip rate) de diez Mbps). Siendo modulado sobre ambas señales portadoras (L1 y L2). El acceso ilimitado al código P se permitió hasta que el sistema se declaró plenamente operativo. En la actualidad, el código P está codificado en el código Y para ponerlo a disposición de los usuarios autorizados. Además de los códigos PRN, se modula un mensaje de datos que consta de información de estado, sesgo de reloj satelital y efemérides de satélite sobre las portadores (L1 y L2) (Hofmann-Wellenhof et al., 2007).
- Mensaje de navegación (D (t)), se modula sobre ambas señales portadoras a 50 bits por segundo e incluye información sobre efemérides, relojes de los satélites, coeficientes del modelo ionosférico e información sobre el estatus de la constelación, entre otros (Hernández et al., 2005).

### Refracción ionosférica

La información que viaja en una señal satelital puede ser afectada por las siguientes fuentes de error:

- Efectos atmosféricos (ionosfera, troposfera).
- Efectos relacionados a la multitrayectoria.
- Errores de efemérides y de reloj.
- Errores debido a la relatividad.
- Errores aleatorios.
- Errores humanos (hardware).
- Disponibilidad Selectiva (SA, por sus siglas en inglés).

Después de la desactivación de la técnica de Disponibilidad Selectiva, la cual tenía como objetivo negar la precisión de navegación a los adversarios potenciales mediante la deterioración del reloj del satélite y a través de la manipulación de las efemérides (Hofmann-Wellenhof et al., 2007), la ionosfera, debido a su influencia en las señales de banda L (Ver Sección 2.2.1), se convirtió en la mayor fuente de error en la utilización de este sistema (M. Akhoondzadeh, 2013).

De acuerdo con Hofmann-Wellenhof et al. (2007), la serie:

$$n_{ph} = 1 + \frac{c_2}{f^2} + \frac{c_3}{f^3} + \frac{c_4}{f^4} + \dots \quad (2.2)$$

se aproxima al índice de refracción de fase. Los coeficientes  $c_2$ ,  $c_3$ ,  $c_4$  no dependen de la frecuencia sino de la cantidad  $N_e$ , la cual denota el número de electrones por metro cúbico (la densidad de los electrones) a lo largo de la trayectoria de propagación.

Usando una aproximación cortando la expansión de la serie después del término cuadrático, es decir:

$$n_{ph} = 1 + \frac{c_2}{f^2}, \quad (2.3)$$

diferenciando esta ecuación:

$$dn_{ph} = -\frac{2c_2}{f^3}df, \quad (2.4)$$

y sustituyendo las Ecuaciones (2.3) y (2.4) en  $n_{gr} = n_{ph} + f \frac{dn_{ph}}{df}$  se tiene:

$$n_{gr} = 1 + \frac{c_2}{f^2} - f \frac{2c_2}{f^3} \quad (2.5)$$

o bien:

$$n_{gr} = 1 - \frac{c_2}{f^2}. \quad (2.6)$$

Puede verse a partir de la Ecuación (2.6) que el grupo y los índices de refracción de fase se desvían de la unidad con signo opuesto. Con una estimación para  $c_2$  (Hofmann-Wellenhof et al., 2007):

$$c_2 = -40.3N_e [Hz^2], \quad (2.7)$$

la relación  $n_{gr} > n_{ph}$  y, por lo tanto,  $v_{gr} < v_{ph}$  sigue porque la densidad electrónica,  $N_e$ , siempre es positiva. Como consecuencia de las diferentes velocidades, se produce un retardo de grupo y un avance de fase. En otras palabras, los códigos de alcance GNSS se retrasan y las fases portadoras son avanzadas. Por lo tanto, los pseudorangos de los códigos medidos son demasiado largos y los pseudorangos de la fase de la portadora medidos son demasiado cortos en comparación con el intervalo geométrico entre el satélite y el receptor. La cantidad de la diferencia es la misma en ambos casos. De acuerdo con el principio de Fermat, el rango medido  $s$  es definido por:

$$s = \int n ds \quad (2.8)$$

donde la integral debe extenderse a lo largo de la trayectoria de la señal. El rango geométrico  $s_0$  a lo largo de la línea recta entre el satélite y el receptor puede obtenerse de manera análoga ajustando  $n = 1$ :

$$s_0 = \int ds_0. \quad (2.9)$$

La diferencia  $\Delta^{Iono}$  entre el rango medido y el geométrico se llama refracción ionosférica y se sigue de:

$$\Delta^{Iono} = \int n ds - \int ds_0, \quad (2.10)$$

la cual puede escribirse para un índice de refracción de fase  $n_{ph}$  de la Ecuación (2.3) como:

$$\Delta_{ph}^{Iono} = \int (1 + \frac{c_2}{f^2}) ds - \int ds_0 \quad (2.11)$$

y para un índice de refracción de grupo  $n_{gr}$  de la Ecuación (2.6) como:

$$\Delta_{gr}^{Iono} = \int (1 - \frac{c_2}{f^2}) ds - \int ds_0. \quad (2.12)$$

Una simplificación es obtenida al aproximar la integración para el primer término en las Ecuaciones (2.11) y (2.12) a lo largo del rango geométrico. En este caso,  $ds$  se convierte en  $ds_0$  y las fórmulas:

$$\Delta_{ph}^{Iono} = \int \frac{c_2}{f^2} ds_0, \quad \Delta_{gr}^{Iono} = - \int \frac{c_2}{f^2} ds_0 \quad (2.13)$$

se obtienen, las cuales también pueden ser escritas como:

$$\Delta_{ph}^{Iono} = - \frac{40.3}{f^2} \int N_e ds_0, \quad \Delta_{gr}^{Iono} = \frac{40.3}{f^2} \int N_e ds_0, \quad (2.14)$$

donde la Ecuación (2.7) ha sido sustituida. Definiendo el Contenido Total de Electrones (TEC) por:

$$TEC = \int N_e ds_0 \quad (2.15)$$

y sustituyendo TEC en la Ecuación (2.14) se tiene:

$$\Delta_{ph}^{Iono} = - \frac{40.3}{f^2} TEC, \quad \Delta_{gr}^{Iono} = \frac{40.3}{f^2} TEC \quad (2.16)$$

como el resultado final (en metros). Usualmente, el TEC esta dado en unidades de TEC (TECU, siglas en inglés), donde:

$$1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ electrones} \times m^2. \quad (2.17)$$

Obsérvese que el TEC introducido en la Ecuación (2.15) es el Contenido Total de Electrones a lo largo de la trayectoria del camino de la señal recta entre el satélite y el receptor. Se asume que la integral incluye los electrones en una columna con una sección transversal de  $1 \text{ m}^2$  que se extiende desde el receptor hasta el satélite. Usualmente, el Contenido Total de Electrones Vertical (VTEC) es modelado (Hofmann-Wellenhof et al., 2007). En un supuesto, esta cantidad se indica a veces como la sobrecarga total del contenido de electrones. Si el VTEC se introduce en la Ecuación (2.16), las cantidades aplican sólo para los satélites en el cenit.

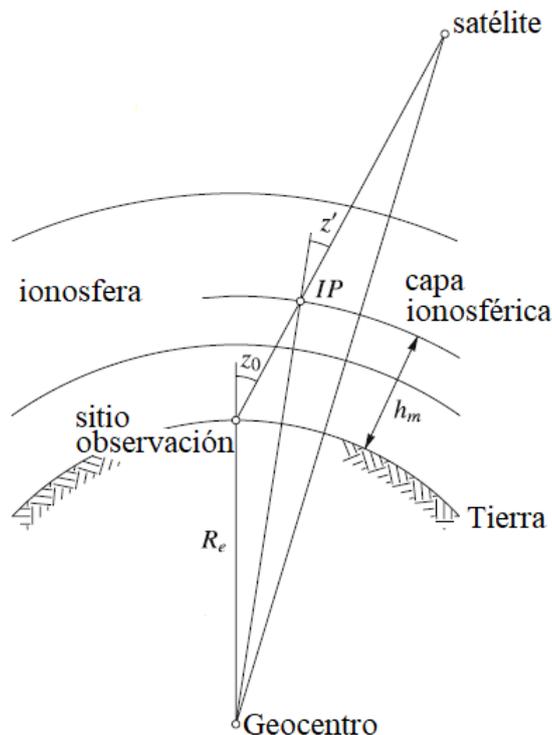
Para las líneas de visión arbitrarias (Figura 2.6), el ángulo cenital del satélite debe tenerse en cuenta por:

$$\Delta_{ph}^{Iono} = - \frac{1}{\cos z'} \frac{40.3}{f^2} VTEC, \quad \Delta_{gr}^{Iono} = \frac{1}{\cos z'} \frac{40.3}{f^2} VTEC \quad (2.18)$$

desde que la longitud de la trayectoria en la ionosfera varía con un ángulo de cenit cambiante. Estas dos cantidades difieren solamente con respecto al signo. Introduciendo la notación:

$$\Delta^{Iono} = \frac{1}{\cos z'} \frac{40.3}{f^2} VTEC \quad (2.19)$$

para la cantidad positiva de la influencia ionosférica, en un pseudorange medido, permite la omisión de los subíndices  $ph$  o  $gr$  pero requiere la consideración del signo correcto para los modelos apropiados. Esto significa que la influencia ionosférica



**Figura 2.6:** Geometría para el retardo de la trayectoria ionosférica (Hofmann-Wellenhof et al., 2007).

para el pseudorango de código es modelada por  $+\Delta^{Iono}$  y para el pseudorango de fase por  $-\Delta^{Iono}$ .

La Figura 2.6 representa un modelo de capa única con la suposición de que todos los electrones libres se concentran en una cáscara esférica infinitesimalmente delgada a la altura  $h_m$  y conteniendo el punto ionosférico  $IP$ . Donde la relación:

$$\sin z' = \frac{R_e}{R_e + h_m} \sin z_0 \quad (2.20)$$

es derivada, siendo  $R_e$  el radio medio de la Tierra,  $h_m$  es un valor medio para la altura de la ionosfera, y  $z'$  y  $z_0$  son los ángulos cenitales en el punto ionosférico y en el sitio de observación. El ángulo cenital  $z_0$  puede calcularse para una posición de satélite conocida y para las coordenadas aproximadas del sitio de observación. Para  $h_m$  un valor en el rango de 300 y 400 kilómetros es típico. La altura es sólo sensible para elevaciones de satélite bajas. Como se mostró en la Ecuación 2.16, el cambio de rango causado por la refracción ionosférica puede limitarse a la determinación del TEC. Sin embargo, el propio TEC es una cantidad bastante complicada (Hofmann-Wellenhof et al., 2007).

### 2.3. Contenido Total de Electrones (TEC)

La magnitud del error sistemático debido a la refracción ionosférica es directamente proporcional a una de las magnitudes físicas de la ionosfera más interesantes, el TEC. En otras palabras, al número de electrones libres presentes en una columna de sección unidad que se extiende desde una estación receptora en tierra hasta el satélite

considerado. Si la columna es vertical, se denomina Contenido Total de Electrones Vertical (VTEC) (Figura 2.7), si se considera una columna oblicua ó inclinada se tiene el Contenido Total de Electrones Oblicuo (STEC, por sus siglas en inglés) (Figura 2.8). Si el valor del TEC fuese constante o tuviese una variación regular, los efectos causados por la ionosfera serían de fácil determinación. Sin embargo, el problema principal es que el TEC varía en el tiempo y espacio, en razón del flujo de ionización solar, actividad magnética, ciclo de manchas solares, estación del año, hora del día, localización geográfica y dirección del rayo vectorial del satélite, entre otros, resultando difícil de corregir (Camargo, 1999; Ezquer y Radicella, 2008).

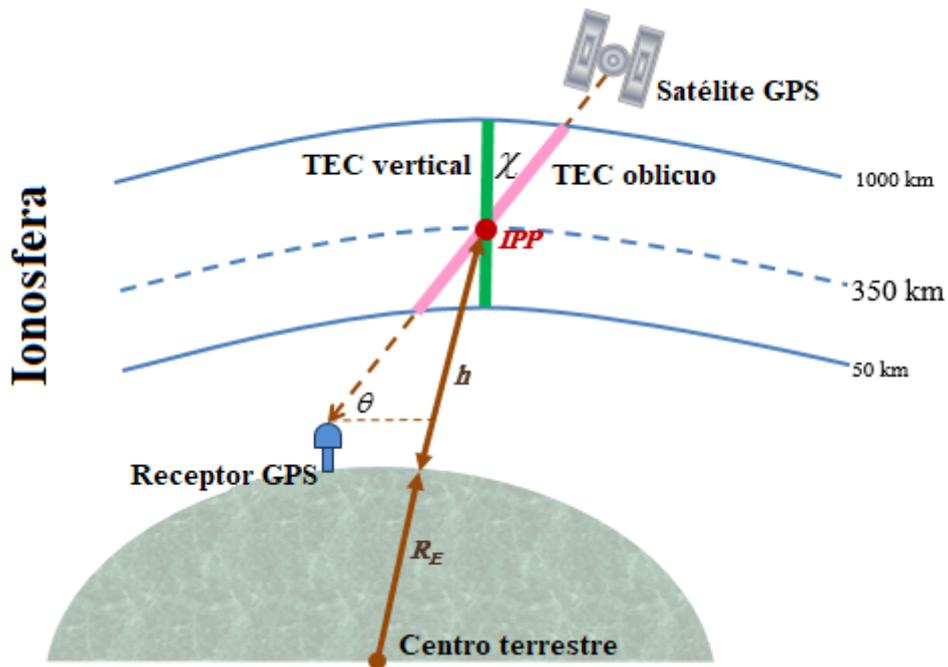


Figura 2.7: Ilustración de la densidad de electrones en una trayectoria vertical (VTEC). Fuente: <http://iono-gnss.kmitl.ac.th>.

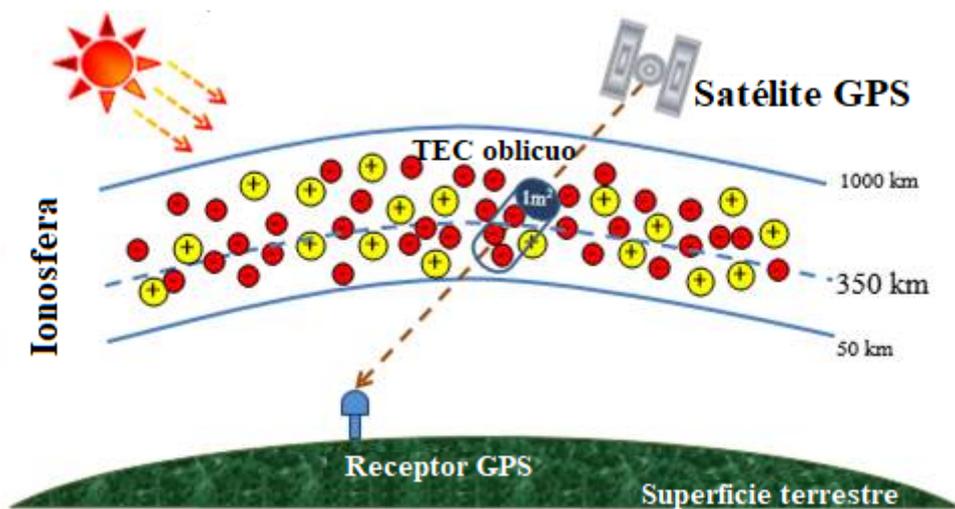


Figura 2.8: Ilustración del TEC inclinado de un satélite a un receptor. Fuente: <http://iono-gnss.kmitl.ac.th>.

Las mediciones del TEC se realizan por diferentes medios, tales como: ionosondas terrestres y mediciones GPS, entre otros. De acuerdo a [M. Akhoondzadeh y Saradjian \(2011\)](#), dichas mediciones favorecen el monitoreo de las perturbaciones ionosféricas que se consideran precursores sísmicos de corto plazo. Recientemente, la ampliación de la red de receptores GPS ha generado una cantidad creciente de datos con respecto al estado de la ionosfera y, de acuerdo a [Zakharenkova et al. \(2016\)](#), el TEC derivado de datos GPS proporciona muchas más ventajas para las investigaciones a escala global en comparación con los datos de ionosondas terrestres o satélites especializados. Los valores para el TEC suelen variar entre  $10^{16}$  y  $10^{19}$   $e/m^2$ , dependiendo la hora del día, la estación del año, la actividad solar, la actividad magnética, la altitud geomagnética, etcétera ([Sardón et al., 1993](#)). Sus valores mínimos se producen en la media noche, una posible causa de esto es la ausencia del Sol (Ver Sección 2.1.3), y sus valores máximos se producen en la media tarde. Finalmente, por la noche el TEC disminuye lentamente debido a la recombinación de los electrones y de los iones. La ionosfera produce varios efectos en las señales de radio que la atraviesan (Tabla 2.4), siendo la mayoría de ellos proporcionales al Contenido Electrónico Total. Por lo tanto, el TEC es una magnitud ionosférica de interés para los sistemas que usan señales transionosféricas ([Ezquer y Radicella, 2008](#)).

**Tabla 2.4:** Retardos ionosféricos en el cénit para valores máximos (diurnos) y mínimos (nocturnos) del TEC para distintas frecuencias. Fuente: [Sardón et al. \(1993\)](#).

Frecuencia	TEC diurno ( $10^{18} e/m^2$ )	TEC nocturno ( $10^{16} e/m^2$ )
100 MHz	4030 m	40.3 m
1227.6 MHz	26.7 m	26.7 cm
1575.42 MHz	16.2 m	16.2 cm
10 GHz	40 cm	4 mm
100 GHz	4 mm	0.04 mm

Con la intención de proveer información global o específica del estado físico del sistema magnetosfera-ionosfera, en una época determinada, diversos índices geofísicos fueron introducidos para diferentes objetivos ([Perrone y Franceschi, 1998](#)). Estos índices se clasifican en: solares, ionosféricos y geomagnéticos. A su vez, estos se presentan en las Tablas 2.5, 2.6 y 2.7, respectivamente.

**Tabla 2.5:** Índices solares. Fuente: Perrone y Franceschi (1998).

Índice	Método de derivación	Intervalo de tiempo	Disponibilidad
$R$ , fue introducido por Johann Rudolph Wolf en 1848 para cuantificar la actividad solar.	$R$ es definido como: $R = k(f + 10g)$ , donde $f$ es la cantidad total de manchas solares vistas, $g$ es el número de regiones alteradas y $k$ es una constante para el observatorio, relacionado con la sensibilidad del equipo de observación.	Diario.	Los datos están disponibles desde el año 1700 como medios anuales. Desde 1749 está disponible como media mensual y desde 1951 como valor diario.
$R_{12}$ , es la media móvil de 12 meses del número de manchas solares $R$ .	Para un mes $K$ dado, $R_{12}$ es definido como: $R_{12} = \frac{1}{12} \left[ \sum_{n-5}^{n+5} R_k + \frac{1}{12}(R_{n+6} + R_{n-6}) \right]$ . Donde $R_k$ es la media del número diario de manchas para el mes $K$ , $R_{n+6}$ y $R_{n-6}$ son los valores de $R$ relacionados con seis meses antes y después del mes $K$ .	Mensual.	Los datos están disponibles a partir de julio de 1749.
$F_{10.7}$ , es el flujo solar a 10.7 cm (2800 MHz), medido por primera vez por Arthur Covington a principios de 1947, altamente correlacionado con $R$ y particularmente valioso como una observación no afectada por el clima.	$F_{10.7}$ es medido al escanear el disco solar usando una antena angosta capaz de mapear las posiciones de regiones activas con cierto detalle.	Diario.	Los datos están disponibles a partir de 1947.
$EUV (\text{Å})$ , es el flujo de emisión solar en la banda ultravioleta extrema.	$EUV (\text{Å})$ ha sido medido recientemente con un espectrofotómetro ultravioleta extremo en satélite.	Diario.	Las mediciones están disponibles para el período de mediados de 1977 a 1980.

**Tabla 2.6:** Índices ionosféricos. Fuente: Perrone y Franceschi (1998).

Índice	Método de derivación	Intervalo de tiempo	Disponibilidad
$I_{F2}$ , se basa en la actividad solar y en la ionización de la capa F2.	El método para calcular $I_{F2}$ requiere la derivación de los coeficientes de regresión lineal entre las medianas mensuales de la $f_0F_2$ al mediodía en una estación dada y $R_3$ (media móvil de tres meses de $R$ ). El índice resultante es la mediana de los valores $I_{F2}$ calculados en las estaciones seleccionadas.	Mensual.	Los datos están disponibles desde 1938.
$IG$ , es similar a $I_{F2}$ y fue introducido para ser consistente con los mapas Atlas del CCIR.	$IG$ se calcula a partir de ecuaciones de regresión lineal que representan la relación entre las medianas mensuales de la $f_0F_2$ al mediodía en ubicaciones particulares y $R_{12}$ . El índice resultante es la mediana de los valores de $IG$ calculados en las ubicaciones seleccionadas.	Mensual.	Disponible desde 1943.
$A$ , fue desarrollado por los servicios espaciales y de radio del Servicio Australiano de predicción ionosférica (IPS, siglas en inglés) a fines de la década de 1950.	$A$ se basa en $R_{12}$ y en el promedio de las 24 medianas mensuales de $f_0F_2$ de varias estaciones. Para cada estación se hace una regresión lineal entre $S$ ( $\equiv R_{12}$ al principio) y $f_0F_2$ ignorando $R_{12} > 100$ .	Mensual.	
$T$ , fue desarrollado por Jack Turner a mediados de 1960 y ha sustituido al índice $A$ , en el cual se basa.	$T$ , derivado con un procedimiento similar al seguido por el índice $A$ , se basa en todos los valores de $f_0F_2$ de todas las horas locales y de todas las estaciones ionosféricas disponibles. Las estaciones se agrupan en muchos sectores para reducir el peso que se le da a los datos en las regiones ricas en estaciones. El índice $T$ mensual para una región del mundo es el promedio ponderado de los índices $T$ por hora de las estaciones en los sectores de la región.	Diario, mensual.	Los valores mensuales están disponibles desde 1957. $T$ diario también se da junto al pronóstico ionosférico diario para diferentes regiones relacionadas con la época actual.
$SSN_e$ , fue desarrollado a principios de 1970 por el Centro Meteorológico Global de la Fuerza Aérea de EE. UU. También se conoce como número efectivo de manchas solares.	$SSN_e$ se calcula mediante la siguiente relación: $SSN_e = \frac{\sum_{i=1}^N w_i (OBS_i - f_{0,i})}{\sum_{i=1}^N w_i (f_{100,i} - f_{0,i})}$ donde $w_i$ es un conjunto de factores de ponderación que dependen de la latitud y la hora local de observación, $OBS_i$ es el conjunto de $f_0F_2$ medido y $f_{0,i}$ , $f_{100,i}$ son los valores de $f_0F_2$ para $R = 0$ , $R = 100$ calculados a partir del modelo URSI para la ubicación, época y hora del día de la $i$ -ésima observación. Por lo tanto, el $SSN_e$ diario se genera automáticamente para la época actual utilizando observaciones $f_0F_2$ disponibles en tiempo casi real desde varias estaciones de latitudes medias.	Diario.	Disponibles a partir de 1998.
$MF_2$ , es un índice mensual presentado por Mikhailov y Mikhailov (1995).	$MF_2$ se obtiene considerando la dependencia de $f_0F_2$ del coseno del ángulo cenital solar en una ubicación dada: $f_0F_2/M = f(\cos \chi_L)$ donde $M$ es un factor magnético definido como: $M = (\cos \chi_{MC} / \cos \chi_L)^{0.25}$ , siendo $\chi_{MC}$ el ángulo cenital solar al punto conjugado magnéticamente en el mismo momento UT.	Mensual.	Disponible desde 1952.

A su vez, en geomagnetismo se han sugerido varios índices a lo largo de los años (Tabla 2.7) (Mayaud, 1980).

**Tabla 2.7:** Índices geomagnéticos. Fuente: Perrone y Franceschi (1998).

Índice	Método de derivación	Intervalo de tiempo	Disponibilidad
$K$ , fue desarrollado para diferenciar entre las variaciones geomagnéticas regulares e irregulares y es representativo de una sola estación.	$K$ se deriva del rango de amplitud del más perturbado de los dos elementos magnéticos (H, D) en un intervalo de tres horas. Se deben eliminar las variaciones diarias regulares debidas a los efectos día solar ( $S_r$ ), Lunar (L) y post-perturbación para calcular los rangos de amplitud. Los valores numéricos se asignan a los rangos de amplitudes, los números varían entre 0 y 9 sobre la base de una escala cuasi logarítmica.	Tres horas (UT).	Depende del observatorio.
$K_p$ , fue introducido para dar un índice planetario. Se obtiene promediando los índices $K$ de once observatorios.	$K_p$ se obtiene promediando los índices $K_s$ de los observatorios que contribuyen. El índice $K_s$ , basado en un procedimiento de estandarización, se introdujo para eliminar los efectos de la variación diurna y la dependencia estacional y latitudinal de los valores de $K$ .	Tres horas (UT).	Los datos están disponibles desde 1932 hasta el presente.
$A_p$ (nT), se introdujo para obtener un índice lineal de $K_p$ .	$A_p$ se deriva de la media aritmética de los ocho valores del índice $a_p$ .	Diario (UT).	Los datos están disponibles desde 1932 hasta el presente.
$aa$ , similar al índice $a_p$ pero con base en dos estaciones geomagnéticas.	El índice $aa$ se deriva utilizando los valores de escala $K$ realizados en los registros de dos estaciones antípodas (al principio Greenwich y Melbourne).	Tres horas (UT).	Los datos están disponibles desde 1868.
$K_m, K_n, K_s, a_m, a_n, a_s$ , este conjunto de índices se incluyeron para evitar los inconvenientes relacionados con $K_p$ y $A_p$ . Se basan en una elección adecuada de estaciones en ambos hemisferios.	Este conjunto de índices se deriva sobre la base de un tratamiento adecuado de los índices $K$ . Entonces, $K_m$ es el equivalente de $K_p$ . $K_n$ y $K_s$ son índices del hemisferio Norte y Sur, respectivamente. $a_m, a_n$ y $a_s$ se derivan usando una tabla de conversión.	Tres horas (UT).	Los datos están disponibles desde 1959.
$AE, AL, AU, AO$ (nT), se introdujeron para caracterizar las zonas aurorales y se denominan como índices de electrojet aurorales.	El índice $AE$ se deriva de la diferencia entre los índices $AU$ y $AL$ ( $AE = AU - AL$ ), mientras que el índice $AO$ es su media ( $AO = 1/2(AU + AL)$ ).	1 o 2.5 minutos.	Disponibles desde 1957 hasta el presente.
$PC$ , fue introducido para señalar el desarrollo de una subtormenta.	Los valores de $PC$ se calculan mediante: $PC = (\delta F - K)/\alpha$ , donde $\delta F$ es la actividad magnética y $K$ y $\alpha$ son los coeficientes de la regresión lineal.	15 minutos.	Los datos de $PC$ están disponibles desde 1975 hasta la fecha.
$D_{st}$ (nT), se desarrolló por primera vez para representar el comportamiento general de una tormenta geomagnética típica en Bombay, India.	$D_{st}$ se deriva utilizando el componente $H$ del campo geomagnético de una red de estaciones de baja latitud.	Cada hora (UT).	Disponibles desde 1957 en adelante.

Tabla 2.8: Precursores sísmicos clasificados por área científica.

Área	El valor b de la Relación de Frecuencia-Magnitud Gutenberg-Richter (FMR).	Factores	considerados	precursores	de	terremotos	Relación de velocidad sísmica ( $V_p/V_s$ ).
Sismología		Quietud sísmica.	Ventana sísmica.	Brecha sísmica.	Franja sísmica.	Tasa de sismicidad y ajustes tectónicos.	de velocidad sísmica ( $V_p/V_s$ ).
Geoquímica	Componentes químicos y los gases del agua subterránea.	Tipo de suelo en la zona de la falla.					
Geofísica	Número de manchas solares.	Viento solar de alta velocidad.	Flujos de protones solares.	Mareas solares y lunares.	Disminución de la actividad solar.		
Campo eléctrico	La intensidad del campo eléctrico terrestre.						
Campo magnético	Intensidad total (F) del campo magnético terrestre.	Componente horizontal (H).	Componente vertical (Z).	Declinación (I).			
Electromagnetismo	Señal electromagnética (DC, HF, DC-ULF, ELF y RF).	Señal Eléctrica Sísmica (SES).	Conductividad de los medios debajo de la tierra.				
Hidrología sísmica	Nivel del agua.	Temperatura.	Humedad.	Conductividad.			
Macro-anomalías	Observar los cambios de dirección de movimiento de las 5 estrellas: Venus, Júpiter, Mercurio, Marte, Saturno.	Anomalías en el comportamiento de los animales.	Anomalías en el comportamiento de las plantas.	Nivel del agua subterránea.	Cambio de color y olor de los manantiales y pozos de agua.		

# 3

## Materiales y métodos

En el presente capítulo se detallan los materiales y métodos que se utilizaron para elaborar la presente tesis.

### 3.1. Eventos sísmicos y períodos sin sismo

En México existen áreas definidas como altamente sísmicas, estas áreas son propensas a registrar eventos telúricos importantes y abarcan los estados de la costa del Pacífico (Ver Sección 2.1.1). No obstante, en México también existen zonas con escasa actividad sísmica, estas zonas abarcan los estados de Yucatán, *Quintana Roo*, parte de Campeche, Tamaulipas, Nuevo León, Coahuila y parte de *Chihuahua*, en su mayoría (CENAPRED, 2001). Con base en lo anterior se procedió a seleccionar treinta eventos sísmicos de magnitud ligera a fuerte ( $M_w \geq 5$ ) registrados en los años 2015 a 2019 en estados pertenecientes a zonas sísmicas de México y listados en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.1:** Eventos sin actividad sísmica. Estos eventos se registraron en los estados de Quintana Roo y/o Chihuahua en México durante el período de años 2015 - 2018. Los días/mes/año son: período de 14 días sin actividad sísmica registrada, mes y año correspondiente.

Evento	Días	Mes	Año	Estación
1	01-14	02	2018	UNPM
2	21-06	02/03	2018	UNPM
3	01-14	03	2018	UNPM
4	18-31	03	2018	UNPM
5	16-29	04	2018	UNPM
6	11-24	05	2018	UNPM
7	01-14	01	2017	UNPM
8	11-24	01	2017	TNCU
9	19-01	01/02	2017	UNPM
10	14-27	02	2017	TNCU
11	02-15	03	2017	UNPM
12	18-31	07	2017	UNPM
13	01-14	12	2017	TNCU
14	13-26	12	2017	UNPM
15	05-18	09	2016	UNPM
16	16-29	09	2016	TNCU
17	07-20	11	2016	TNCU
18	16-29	11	2016	UNPM
19	01-14	12	2016	TNCU
20	23-06	11/12	2015	UNPM

La mayoría de los eventos sísmicos de este estudio se registraron en los estados de: Chiapas con 17 eventos, seguido de Oaxaca con 7, Jalisco con 4 y Michoacán y Baja California Sur con 1, respectivamente (Tabla 3.2 y Figura 3.1). De forma similar, se procedió a reunir un conjunto de “eventos” con el mismo período de días pero registrados en estados no sísmicos de la República Mexicana (Tabla 3.1).

**Tabla 3.2:** Eventos sísmicos seleccionados. Estos eventos se registraron en diversos estados, sísmicamente activos, de México durante el período 2015 - 2019. El día/mes/año/hora/minuto son: tiempo de inicio del sismo (UTC); Latitud Norte y Longitud Oeste: las coordenadas geográficas del epicentro en grados. Con  $P$  se denota la profundidad. Fecha de consulta: 19/05/2019.

Evento	Día	Mes	Año	Hora	Min	Latitud	Longitud	Magnitud (SSN)	$P$ (km)	Estado
1	22	04	2019	20	15	16	-98.55	<b>5.5</b>	7	Oaxaca
2	21	01	2019	11	57	15.42	-94.94	<b>5.8</b>	35	Oaxaca
3	19	01	2018	16	17	26.66	-111.1	<b>6.3</b>	16	BCS
4	03	11	2017	11	52	18.710	-106.519	<b>5.6</b>	16.2	Jalisco
5	24	09	2017	10	06	15.082	-94.337	<b>5.8</b>	15.8	Chiapas
6	23	09	2017	14	31	16.4523	-94.9925	<b>5</b>	10	Oaxaca
7	23	09	2017	12	53	16.496	-95.146	<b>6.1</b>	22	Oaxaca
8	23	09	2017	10	38	15.2525	-94.586	<b>5.8</b>	35	Oaxaca
9	19	09	2017	07	53	14.7978	-94.4237	<b>5.6</b>	11.7	Chiapas
10	18	09	2017	14	19	15.2562	-94.7672	<b>5.8</b>	15	Oaxaca
11	12	09	2017	05	08	14.9832	-94.0102	<b>5.5</b>	24.6	Chiapas
12	11	09	2017	21	09	14.9798	-94.0588	<b>5.6</b>	16.1	Chiapas
13	10	09	2017	03	07	15.2315	-94.6388	<b>5.8</b>	19.7	Oaxaca
14	09	09	2017	04	54	14.7448	-94.0787	<b>5.6</b>	23.4	Chiapas
15	08	09	2017	04	49	14.761	-94.103	<b>8.2</b>	45.9	Chiapas
16	14	06	2017	07	29	14.7282	-92.3167	<b>6.9</b>	107.1	Chiapas
17	10	06	2017	18	47	13.9832	-93.2508	<b>5.5</b>	9.8	Chiapas
18	31	03	2017	09	58	15.592	-93.177	<b>5.3</b>	101.5	Chiapas
19	07	11	2016	03	50	15.87	-93.9617	<b>5</b>	94.9	Chiapas
20	30	07	2016	13	53	13.987	-91.7395	<b>5</b>	14.2	Chiapas
21	23	07	2016	08	51	14.466	-103.758	<b>5.4</b>	20	Michoacán
22	18	07	2016	19	02	14.5628	-92.5948	<b>5</b>	71.9	Chiapas
23	15	06	2016	13	46	13.9807	-91.8098	<b>5.3</b>	71.3	Chiapas
24	02	06	2016	02	23	18.1385	-105.698	<b>5.6</b>	6.2	Jalisco
25	23	05	2016	19	20	16.641	-94.0408	<b>5.3</b>	130.1	Chiapas
26	27	04	2016	12	51	14.2902	-93.3883	<b>6</b>	20	Chiapas
27	25	04	2016	07	07	14.535	-93.2128	<b>6</b>	10.4	Chiapas
28	15	04	2016	14	11	13.2542	-92.458	<b>6.1</b>	12	Chiapas
29	22	02	2015	14	23	18.643	-106.955	<b>6.2</b>	16	Jalisco
30	12	02	2015	15	50	19.160	-105.91	<b>5.5</b>	15	Jalisco

De tal forma que los datos en este estudio corresponden a dos conjuntos de eventos denominados “con sismo” ó “activo” y “sin sismo” ó “en calma”, mismos que están conformados por un período de 14 días, donde, en el caso del conjunto con sismo, el noveno día se registró un terremoto ( $M_w \geq 5$ ). El segundo conjunto se conforma por 20 eventos con el mismo período de días donde ninguno presenta un terremoto, es decir, son datos pertenecientes a áreas no sísmicas en México.

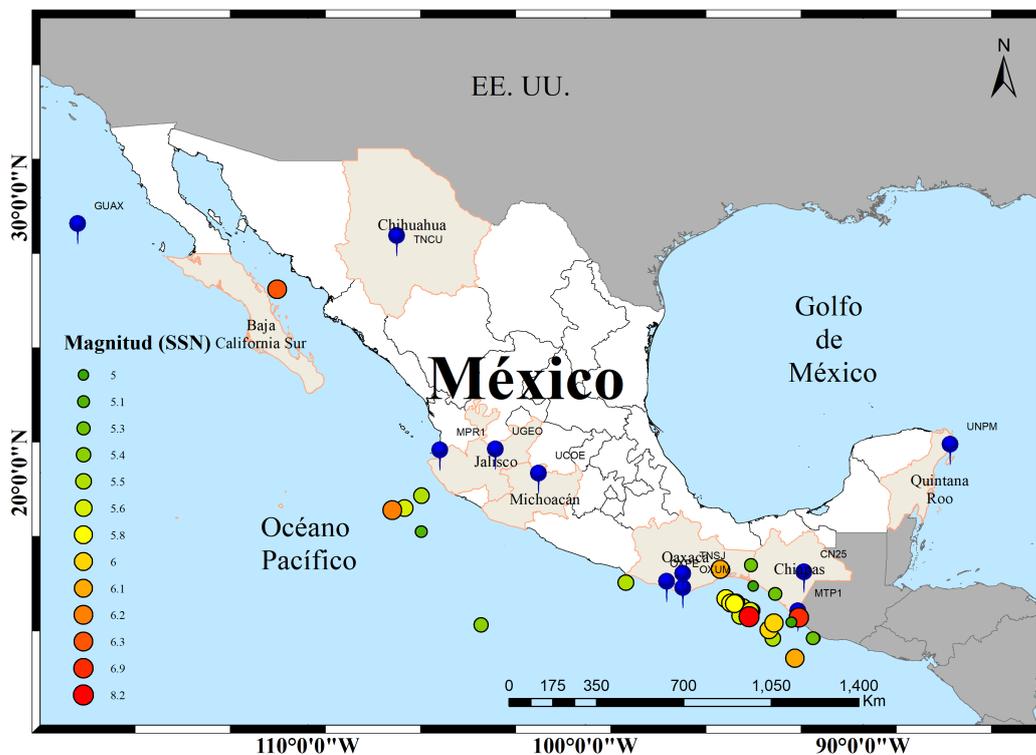
## 3.2. Datos satelitales

La selección de los eventos y de las estaciones GPS en el área de estudio estuvo sujeta a la disponibilidad de los datos. En general, se procedió a buscar redes GPS que operen con un alto nivel de rendimiento y confiabilidad, y que además sean de acceso libre. Entre las opciones figuraban redes como TLALOCNet, CORS y PBO, entre otras. Posteriormente, se buscó que estaciones de monitoreo GPS se encontraban dentro del área de estudio, en este caso, México. Obteniendo el siguiente listado: en el caso de Baja California se plantearon estaciones como GUAX (TLALOCNet), TNBA (TLALOCNet), PALX, PHJX, PJZX, PLPX, PLTX PSTX, PTEX, estas últimas de la red PBO; Del estado de Jalisco, las estaciones PENA, TNAM, TNCM, TNCT, TNLC, TNMS, TNTM y UGEO; De Michoacán, las estaciones TNCC, TNCN, TNIF, TNMO y UCOE; De Guerrero, la estación TNMQ; De Oaxaca, las estaciones OXPE, OXTH, OXUM, TNCY, TNPP, TNSJ y TNXX. Finalmente, del estado de Chiapas las estaciones TNPJ y MTP1. Una vez ubicadas las posibles estaciones de monitoreo, se procedió a revisar la disponibilidad por año, en este caso de estudio se buscaron datos de los años 2015 al 2019, y la frecuencia de los datos disponibles, el objetivo fueron datos a 1 Hz. Por ejemplo, en el caso del año 2016 y 2017, se encontraron datos, a dicha frecuencia, para Baja California, Michoacán, Jalisco y Oaxaca. No obstante, para el año 2018 únicamente para Michoacán y Oaxaca. Para el caso de la selección de los eventos sin actividad sísmica se plantearon los estados de Yucatán, Campeche y Quintana Roo y las estaciones CN24, CN26, UNPM y CNC0. Además, es preciso mencionar que los datos descargados tenían que corresponder con un rango de días definido por un evento sísmico o fecha particular. Después de revisar la disponibilidad, frecuencia de muestreo y calidad (ya que se descartaron aquellos datos que presentaron baja calidad, es decir, estaban incompletos) de las opciones previamente mencionadas, se procedió a delimitar los datos espaciales utilizados en el presente estudio, los cuales pertenecen a once diferentes estaciones GPS (OXPE, OXUM, TNSJ, MTP1, CN25, GUAX, UCOE, MPR1, UGEO, UNPM, TNCU). Una ilustración de las estaciones GPS elegidas en el área de estudio se observa, en forma de globos azules, en la Figura 3.1 y su localización geográfica en la Tabla 3.3.

**Tabla 3.3:** Coordenadas de los receptores GPS seleccionados. Fuente: UNAVCO (<https://www.unavco.org/instrumentation/networks/status/nota/gps>) y CORS ([https://www.ngs.noaa.gov/CORS\\_Map/](https://www.ngs.noaa.gov/CORS_Map/)). Latitud Norte y Longitud Oeste en grados.

Estación	Latitud	Longitud	Estado
OXPE	15.889	-97.075	Oaxaca
OXUM	15.662	-96.499	Oaxaca
TNSJ	16.172	-96.490	Oaxaca
MTP1	14.807	-92.354	Chiapas
CN25	16.232	-92.135	Chiapas
GUAX	28.884	-118.290	Baja California
UCOE	19.813	-101.694	Michoacán
MPR1	20.658	-105.247	Jalisco
UGEO	20.694	-103.251	Jalisco
UNPM	20.869	-86.868	Quintana Roo
TNCU	28.451	-106.794	Chihuahua

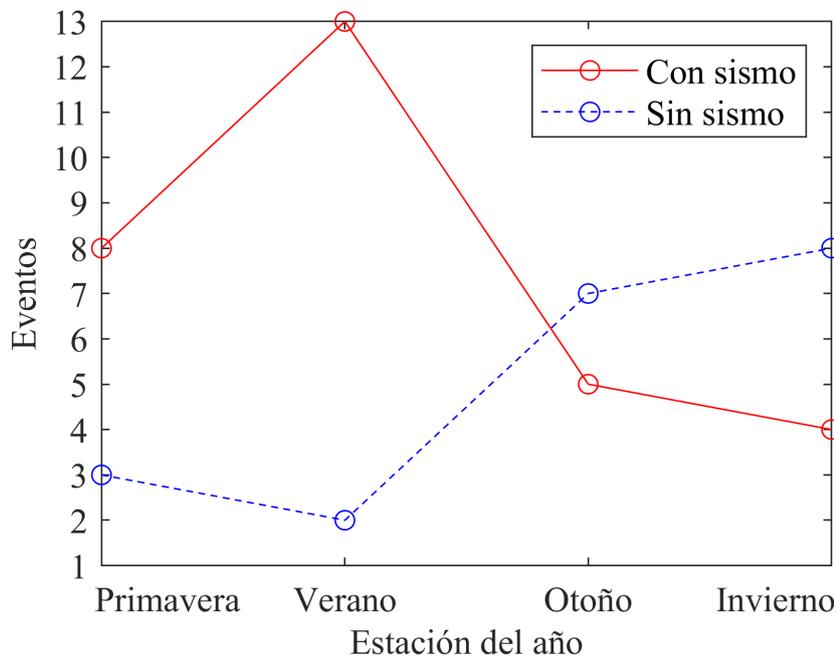
Como parte de la descarga y tratamiento de los datos espaciales se identificó el día del año GPS correspondiente al rango de días en estudio (catorce). Para esto fue necesario consultar el calendario GPS disponible en el portal del CORS (<https://www.ngs.noaa.gov/CORS/Gpscal.shtml>). Posteriormente, la descarga de los datos espaciales, archivos de observación (esta<sup>\*\*\*</sup>.o), navegación (brdc<sup>\*\*\*\*</sup>.n) y los sesgos de código diferencial de satélite (DCB (P1-C1, P1-P2), en inglés) fue realizada utilizando las herramientas ofrecidas por el administrador de la red geodésica correspondiente. En el caso de UNAVCO se utilizó la interfaz DAI v2 (actualmente DAI v3, <https://www.unavco.org/data/dai/>), la cual te permite descargar archivos espaciales dado un período de tiempo, facilitando la descarga. Para el caso de la RGNA (Red Geodésica Nacional Activa) ya se contaba con algunos datos. Sin embargo, fechas recientes pueden ser descargadas directamente de la página del INEGI (<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/drgna2.aspx>). Finalmente, los datos descargados cubren un período que va del año 2015 al 2019 y su frecuencia de muestreo corresponde a 1 Hz.



**Figura 3.1:** Mapa del área de estudio (Estados resaltados en color), distribución de los eventos sísmicos de acuerdo a su magnitud y de las estaciones GPS seleccionadas (globos azules).

En la Figura 3.1 es posible observar que la mayoría de los eventos con sismo se concentran en la parte Sureste de México (aproximadamente 25 de 30 eventos (83 %)). La mayoría de los eventos con sismo considerados en este estudio se registraron en el año 2017 (15 eventos). También, los eventos sin sismo cubren en su mayoría períodos pertenecientes al año 2017 (40 %, Tabla 3.4). Con relación a la magnitud de los eventos, el sismo de mayor magnitud del conjunto activo fue de  $M_w = 8.2$ ,

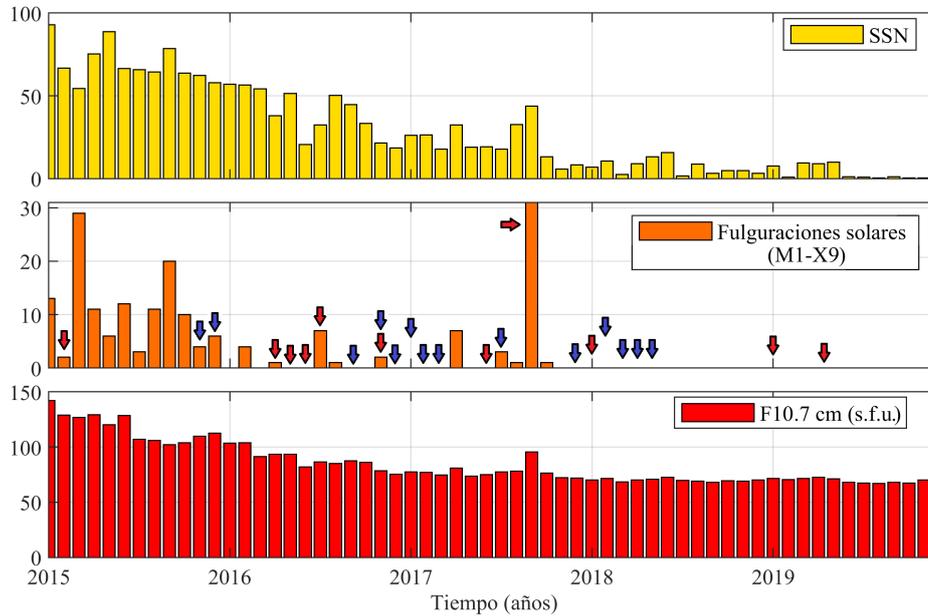
seguido de  $M_w = 6.9$ . Además, 12 eventos presentan  $M_w \leq 5.5$ . Por lo tanto, 18 eventos presentan  $M_w \geq 5.5$ . En la Sección 2.1.2 se mencionan las variaciones de la ionosfera, algunas de las cuales serán planteadas a continuación: para los eventos con sismo, 8 eventos se registraron en Primavera (1, 18 y del 23 al 28, 26.66%), 13 eventos ocurrieron en Verano (del 8 al 17 y del 20 al 22, 43.33%), 5 eventos ocurrieron en Otoño (del 4 a 7 y el 19, 16.66%) y por último 4 eventos se registraron en Invierno (2,3,29 y 30, 13.33%). Para los períodos sin sismo, 3 eventos en Primavera (4 al 6, 15%), 2 en Verano (12 y 15, 10%), 5 en Otoño (17 al 20 y el 13, 25%) y 8 se registraron en Invierno (1 al 3 y del 7 al 11, 40%). Por su parte, el evento 16 y 14 pertenecen a períodos de transición entre Verano-Otoño y Otoño-Invierno, respectivamente. No obstante, al registrar la mayoría de sus días del período en Otoño, serán considerados en esta estación. En resumen, la mayoría de los días que conforman a los eventos con sismo pertenecen a la temporada de Verano y la minoría a Invierno; Para los períodos de días de los eventos sin sismo fue en su mayoría Invierno y en menor frecuencia Verano. Lo anterior es visible en la Figura 3.2.



**Figura 3.2:** Estación del año correspondiente con base al período de tiempo que conforma a los eventos en estudio.

Continuando con las variaciones de la ionosfera, en la Figura 3.3 se presentan varios índices de energía solar, tales como: los valores promediados mensuales del número relativo de manchas solares (SSN) y del flujo de radio a 10.7 cm (F10.7 cm), además el número total de fulguraciones solares grandes (clase de rayos X > M1) y muy grandes (X > X9) registradas para dicho mes y año. Una fulguración solar es una liberación repentina, rápida e intensa de energía magnética proveniente de la superficie del Sol, estas ocurren a menudo cuando el Sol está activo, en los años cercanos al máximo solar. Alrededor del mínimo solar, las fulguraciones solares pueden ocurrir menos de una vez por semana e incluso pueden pasar meses sin que se presenten. Al analizar la Figura 3.3, se observa que la magnitud de los parámetros es mayor en el

año 2015 y tiende a disminuir conforme avanza hacia el año 2019, esto resulta más evidente en el parámetro SSN. Lo anterior se debe a que el ciclo solar 24 ( $\approx 2008$  a  $\approx 2019$ ) alcanzó su máximo en Abril de 2014.



**Figura 3.3:** Series de tiempo de índices de actividad solar para el período en estudio: valores promedio mensuales del número de manchas solares (señalados en la figura como SSN), número de fulguraciones solares de clase M1 a X9 e índice F10.7 cm. Con flecha se señalan los meses pertenecientes a los eventos con sismo (roja) y sin (azul) de este trabajo.

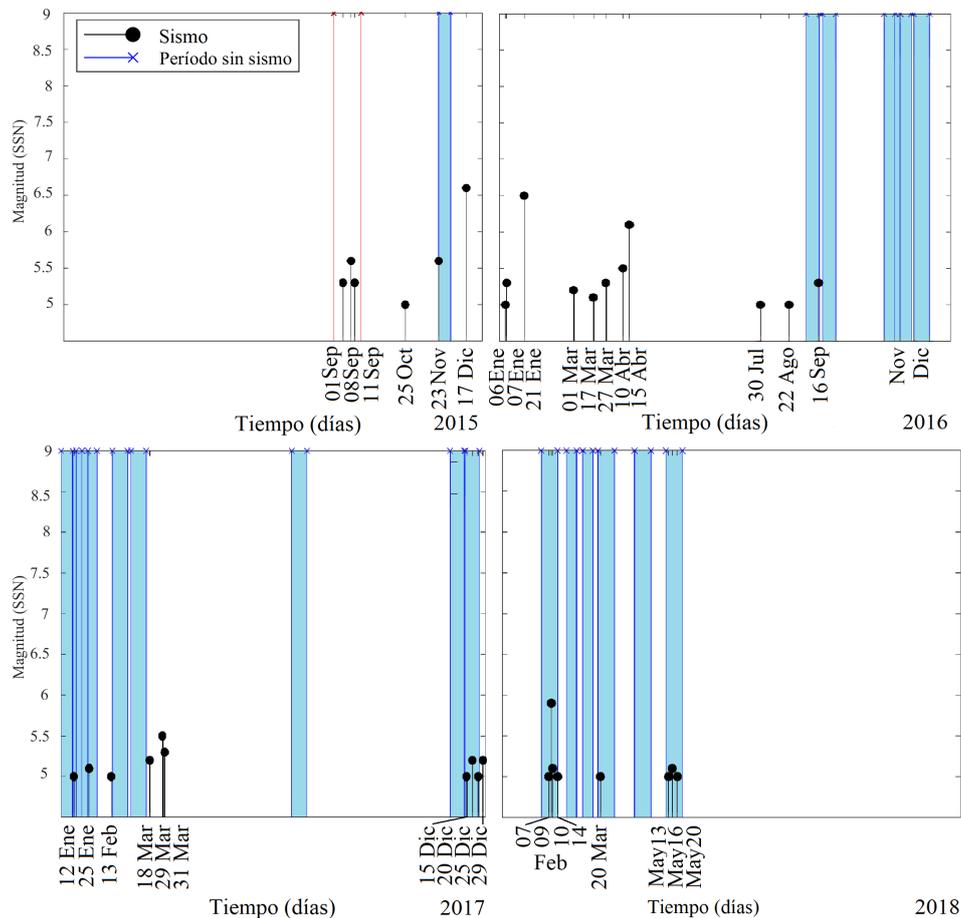
Con relación a la variación diurna, los terremotos que se registraron durante la noche, de acuerdo a su tiempo universal, son 13 (5, 8, 9, 11, 13 al 16, 18, 19, 21, 24 y 27). Los terremotos diurnos son, por lo tanto, 17 (1 a 4, 6, 7, 10, 12, 17, 20, 22, 23, 25, 26 y 28 al 30). Para el caso de los eventos en calma al no existir el fenómeno implícito (terremoto) no es posible definir lo anterior.

**Tabla 3.4:** Distribución de los eventos en estudio por año.

	2019	2018	2017	2016	2015	Total
Con sismo (activo)	2	1	15	10	2	30
Sin sismo (calma)	0	6	8	5	1	20

Como se mencionó anteriormente en México existen estados donde la actividad sísmica es escasa o nula, en este sentido se procedió a revisar las estaciones GPS establecidas en dichos estados y la disponibilidad de datos en las mismas. Los estados seleccionados para extraer períodos de días sin actividad sísmica, y, por lo tanto, pertenecientes a zonas donde la actividad sísmica es escasa o nula, son Quintana Roo y Chihuahua (Tabla 3.1). Además, se consideró la actividad sísmica de estados

adyacentes priorizando aquellos períodos que no coinciden en tiempo con actividad sísmica presentada en estados sísmicamente activos (Oaxaca, Chiapas, Baja California, Michoacán, Jalisco). Con el objetivo de ilustrar lo anterior, se tiene la Figura 3.4 (esquina superior izquierda) donde se aprecia entre líneas rojas verticales que durante el mes de Septiembre de 2015 se registraron, al menos, 3 eventos ( $M_w \geq 5$ ) sísmicos en algún estado de la costa del Pacífico en México y también se denotan en barras azules verticales los períodos sin sismo definidos por año (Tabla 3.1). Al definir períodos sin actividad sísmica utilizando datos de estaciones ubicadas en Quintana Roo y Chihuahua lo que se buscó, precisamente, fue evitar elegir períodos como el señalado con líneas verticales rojas (Figura 3.4), lo anterior con la finalidad de evitar días que coincidieran con algún evento sísmico registrado en dicho período pero en otra zona y de esta forma asegurar los períodos sin sismo y reducir posibles afectaciones en el VTEC. En general, de los años 2015 a 2018 ningún sismo, de magnitud superior a 5.0 y de acuerdo al catálogo del Servicio Sismológico Nacional (SSN) de México, se registró en los estados elegidos para obtener los períodos en calma y los sismos señalados en la Figura 3.4 no forman parte del conjunto de sismos bajo estudio (Tabla 3.2).



**Figura 3.4:** Con barras azules verticales se denotan los períodos de días correspondientes a los eventos sin sismo seleccionados para los años 2015 (superior izquierda), 2016 (superior derecha), 2017 (inferior izquierda) y 2018 (inferior derecha) (Tabla 3.1). Las líneas verticales con punto negro denotan terremotos ( $M_w \geq 5$ ) registrados en la costa del Pacífico mexicana.

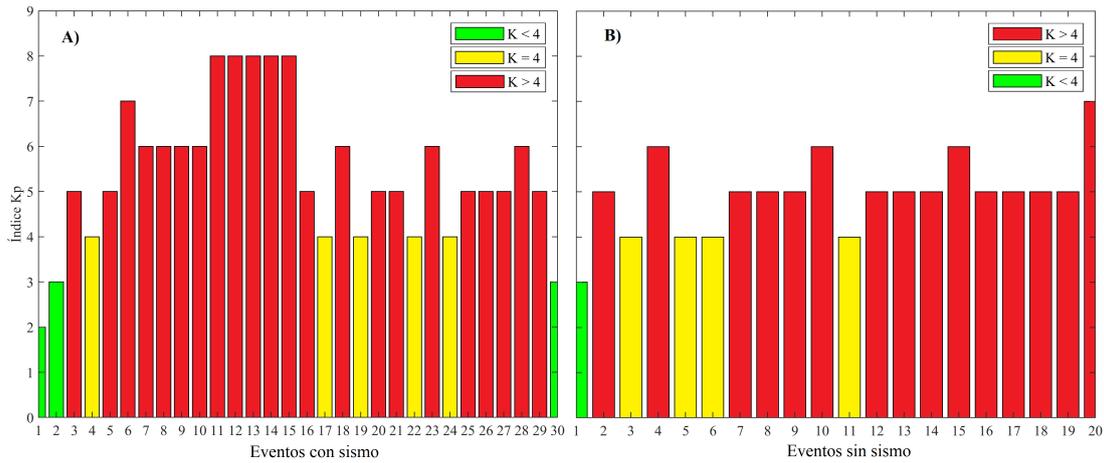
### 3.3. Consulta índices solares y geomagnéticos

La siguiente etapa consistió en la consulta y registro de varios índices geomagnéticos y solares para el rango de días de cada uno de los eventos en estudio. Estos son mencionados y utilizados en la literatura a la hora de discernir entre efectos ocasionados por Clima Espacial y por terremotos. Por lo tanto, con esta finalidad se consultó el explorador de datos OMNIWeb de la NASA (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>) y diversas páginas dedicadas al Clima Espacial (<https://www.spaceweather.gc.ca/solarflux/sx-5-en.php>, <https://www.spaceweatherlive.com/>, <https://www.ngdc.noaa.gov/>). En este sentido, este trabajo analiza el flujo de radio solar a 10.7 cm (2800 MHz) “F10.7 cm”, el cual es un indicador de la actividad solar, siendo uno de los registros más antiguos. Las emisiones de radio F10.7 cm se originan en lo alto de la cromosfera y bajo en la corona de la atmósfera solar. Se mide en unidades de flujo solar (denominadas “s.f.u”, en inglés), variando desde 50 hasta más de 300 s.f.u. en el transcurso de un ciclo solar. También, se incluyen el número total diario y la media mensual de manchas solares (R, SSN, respectivamente) como un registro directo, a largo plazo, de la evolución del ciclo solar y de una posible influencia del Sol sobre el medio terrestre. Además, se incluye el índice geomagnético Kp el cual es un indicador de perturbaciones en el campo magnético de la Tierra y cuantifica las perturbaciones con un número entero en el rango de 0 a 9. La evidente relación entre los índices Kp y Ap se debe a que Ap se introdujo para obtener un índice lineal de Kp. Así mismo, se analiza el índice Dst (Disturbance Storm Time, en inglés), el cual es un índice de actividad magnética derivado de una red de observatorios geomagnéticos casi-ecuatoriales que mide la intensidad del electrochorro ecuatorial simétrico globalmente (“Corriente de anillo ecuatorial”) (Información extraída de NOAA).

**Tabla 3.5:** Valores utilizados como referencia por diversos autores para identificar días con perturbaciones para diferentes índices solares-geomagnéticos (Ver Sección 2.1.2 y Tabla 2.7).

Dst (nT)	Kp	Ap	F10.7 cm (s.f.u)	Autor
Condiciones	tranquilas:			
	$\leq 2+$			Omondi et al. (2019).
$> -20$		$< 20$	$< 120$	H. M. Akhoondzadeh (2019).
$> -20$	$< 2.5$			M. Akhoondzadeh y Saradjian (2011).
$\geq -20$	$\leq 3$		$< 100$	Sotomayor-Beltran (2019).
$<  -20 $				Şentürk y Çepni (2018).
Condiciones	perturbadas:			
$< -40$	$> 3$		$> 120$	Thomas et al. (2017).
	$> 4$			V. Kim et al. (2017).
		$\geq 30$		Fuying et al. (2011).
				ESA ( <a href="https://space-env.esa.int/">https://space-env.esa.int/</a> )
En este	trabajo:			
$< -20$	$> 3$	$> 20$	$> 120$	

Con el objetivo de evaluar la magnitud de estos índices, y considerando la Tabla 3.5, se establecieron los siguientes valores de referencia: para el índice Dst los días que sobrepasen los  $-20$  nT ( $< -20$  nT, por debajo de la línea azul punteada de la Figura 4.10) serán considerados días perturbados; en el caso del índice Kp serán los valores mayores a 3 ( $K_p > 3$ , línea verde punteada en Figura 4.10); para el índice Ap los días que presenten valores superiores a 20 ( $A_p > 20$ , por encima de la línea roja punteada de la Figura 4.10); Finalmente, para F10.7 cm se estableció un valor por encima de las 120 s.f.u. A su vez, se extrajeron los valores máximos registrados para el índice Kp durante el total de días correspondiente a cada evento bajo estudio (Figura 3.5).



**Figura 3.5:** A) Eventos con sismo versus el máximo valor registrado para el índice Kp. B) Eventos sin sismo versus el máximo valor registrado para el índice Kp.

### 3.4. Cálculo del TEC

El TEC se puede obtener a través de la medida de los códigos de pseudorange o por las mediciones de fase de la señal del GPS (Hofmann-Wellenhof et al., 2007). En el caso de las mediciones de fase, esta puede ser modelada por:

$$\Phi = \left( \left( \frac{\rho}{\lambda} \right) + f \right) (\Delta\rho + N - \left( \frac{\Delta^{iono}}{\lambda} \right)) \quad (3.1)$$

Donde:

- $\rho$ : Es el rango geométrico entre el satélite y el receptor.
- $f$ : Es la frecuencia.
- $\lambda$ : Es la longitud de onda y  $N$  es el número de ciclos.
- $\Delta^{iono}$ : Es el retraso ionosférico.

Una ecuación equivalente sería:

$$R = \rho + c\Delta\rho + \Delta^{trop} \quad (3.2)$$

Donde:

- $c$ : Es la velocidad de la luz en el vacío.
- $\Delta^{trop}$ : Es el retraso troposférico.

El número de ciclos  $N$  inicial entre el satélite y el receptor es desconocido, por lo tanto esta ambigüedad de fase  $N$  permanecerá constante mientras no exista pérdida de señal. El grupo y la fase de índices de refracción para una onda electromagnética que se propaga en el espacio con frecuencia  $f$  y un grupo de ondas con frecuencias ligeramente diferentes pueden ser aproximadas por  $n_{gr} = 1 - (\frac{c^2}{f^2})$  y  $n_{ph} = 1 + (\frac{c^2}{f^2})$  y en términos de orden superior (Hofmann-Wellenhof et al., 2007),

Donde:

- $c = -40.3N_e$ .
- $TEC = \int N_e ds_0$ .
- $N_e$ : Es la concentración de electrones.
- $TEC$ : Es el Contenido Total de Electrones.

La dispersión, o tiempo de retardo entre señales de diferente frecuencia, proporciona una medida de la integral de TEC a lo largo de la trayectoria de propagación. La medida del rango esta definida por  $s = \int nds$  y el rango geométrico por  $s_0 = \int ds_0$ . La diferencia entre ambos representa la refracción ionosférica, que es equivalente a  $\Delta^{iono} = s - s_0$ . Por lo tanto, de los modelos matemáticos anteriores es posible obtener los siguientes retrasos en metros:  $\Delta_{gr}^{iono} = (\frac{40.3}{f^2})TEC$  y  $\Delta_{ph}^{iono} = (\frac{40.3}{f^2})TEC$  (Hofmann-Wellenhof et al., 2007).

Las ecuaciones de observación del GPS para el código de pseudorango son:

$$R_1 = \rho + c\Delta_\rho + \Delta_{f1}^{iono} + \Delta^{trop} + b_{f1}^S + b_{f1}^R + m_{R1} + \epsilon_{R1} \quad (3.3)$$

$$R_2 = \rho + c\Delta_\rho + \varkappa\Delta_{f1}^{iono} + \Delta^{trop} + b_{f2}^S + b_{f2}^R + m_{R2} + \epsilon_{R2} \quad (3.4)$$

Donde:

- $b_{f1}^S$  y  $b_{f2}^S$ : Son el retraso satélital.
- $b_{f1}^R$  y  $b_{f2}^R$ : Son el retraso del receptor.
- $m_{R1}$  y  $m_{R2}$ : Son los efectos de la multitrayectoria.
- $\epsilon_{R1}$  y  $\epsilon_{R2}$ : El ruido del receptor.

Todos obtenidos por el código de pseudorango observado y por:

$$\varkappa = (\frac{f1}{f2})^2 \quad (3.5)$$

Al combinar las ecuaciones anteriores y utilizando los pseudorangos observados se obtiene una expresión concisa, pero con ruido, para el cálculo del TEC:

$$TEC_R = 9.52(R_2 - R_1) \quad (3.6)$$

Las ecuaciones de observación del GPS a través de la medición de la señal de fase son:

$$\lambda_1\Phi_1 = \rho + c\Delta_\rho + \lambda_1N_1 - \Delta_{f1}^{iono} + \Delta^{trop} + b_{f1}^{S,\Phi} + b_{f1}^{R,\Phi} + m_{\Phi1} + \epsilon_{\Phi1} \quad (3.7)$$

$$\lambda_2\Phi_2 = \rho + c\Delta_\rho + \lambda_2N_2 - \Delta_{f1}^{iono} + \Delta^{trop} + b_{f2}^{S,\Phi} + b_{f2}^{R,\Phi} + m_{\Phi2} + \epsilon_{\Phi2} \quad (3.8)$$

Donde:

- $N_1$  y  $N_2$ : Ambigüedades desconocidas de la fase portadora.
- $b_{f1}^{S,\Phi}$  y  $b_{f2}^{S,\Phi}$ : Retraso satélital.
- $b_{f1}^{R,\Phi}$  y  $b_{f2}^{R,\Phi}$ : Retraso del receptor.

- $m_{\Phi_1}$  y  $m_{\Phi_2}$ : Efectos de multitrayectoria.
- $\epsilon_{\Phi_1}$  y  $\epsilon_{\Phi_2}$ : Ruido del receptor.

Dichos términos se derivan de las observaciones de la fase, en donde:

- $b^S = b_{f_1}^{S,\Phi} - b_{f_2}^{S,\Phi}$ : Es el retraso diferencial del satélite.
- $b^R = b_{f_1}^{R,\Phi} - b_{f_2}^{R,\Phi}$ : Es el retraso diferencial del receptor.
- $b^R + b^S$ : Es el retraso total satélite-receptor.

Al combinar las ecuaciones anteriores, el TEC, utilizando la fase de la señal observada, es igual a:

$$TEC_{\Phi} = 9.52(\lambda_1\Phi_1 - \lambda_2\Phi_2) \quad (3.9)$$

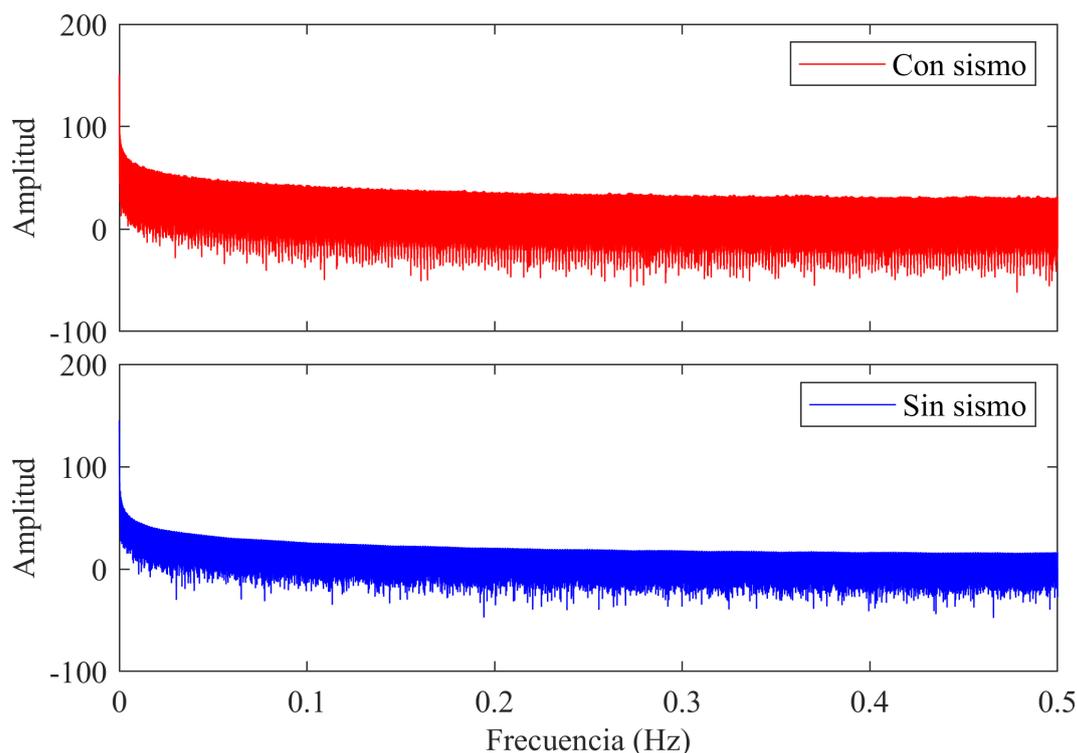
Como se mencionó al principio de esta sección la frecuencia dual del sistema GPS permite medir la diferencia de fase de dos señales (L1 y L2) de diferente frecuencia en cada satélite, este proceso es equivalente al cálculo del TEC. Actualmente es posible disponer de diversos programas informáticos dedicados a esta tarea, por ejemplo: “IONOLAB-TEC” (Sezen et al., 2013), “TayAbsTEC” (Mylnikova et al., 2015; Yasyukevich, Mylnikova, y Polyakova, 2015; Yasyukevich, Mylnikova, Kunitsyn, y Padokhin, 2015) y “RINEX\_HO” (Marques et al., 2011), esta última fue la herramienta utilizada en el presente trabajo para el cálculo del VTEC, parámetro ionosférico que se analizó (Ver Sección 2.3). “RINEX\_HO” trabaja con base en la siguiente ecuación:

$$TEC = \frac{f_{L1}^2 f_{L2}^2}{40.3(f_{L2}^2 - f_{L1}^2)} [PR_{L1} - PR_{L2} - c(DCB_r + DCB_s) + \epsilon L1L2] \quad (3.10)$$

Donde  $f_{Li}$  ( $i = 1, 2$ ) es la frecuencia del GPS,  $DCB_r$  y  $DCB_s$  (en unidades de segundos) son, respectivamente, la polarización del código diferencial del receptor y del satélite, es decir, los retrasos de hardware entre las dos frecuencias. La velocidad de la luz en el vacío está representada por  $c$ , y  $\epsilon L1L2$  representa todos los efectos residuales remanentes sin modelar. Para calcular el TEC con base en la Ecuación 3.10, es posible utilizar los pseudorángos suavizados por la fase. Sin embargo, en el caso de “RINEX\_HO” el algoritmo de pseudo-cambio suavizado se implementó siguiendo las ecuaciones descritas en Jin (1996) y Teunissen (1991). En específico, se calculó el Contenido Total de Electrones Vertical (VTEC) para un período total de 14 días; 8 días antes del evento sísmico, el día del evento y los 5 días posteriores a este. En el caso de los eventos sin sismo el período también permanece de 14 días.

### 3.5. Tratamiento de los datos

Como parte de los métodos aplicados se utilizaron estadísticas básicas, tales como  $\bar{x}$ ,  $\sigma$ ,  $\sigma^2$ , las cuáles se analizan en la Sección 4. Además, se obtuvo el espectro electromagnético de las señales TEC correspondientes a los eventos con y sin sismo. Un análisis de Fourier (FFT, siglas en inglés) convierte una señal de su dominio original (tiempo) a una representación en el dominio de frecuencia y viceversa (Figura 3.6). Para este caso el número de puntos correspondientes a la longitud de la señal, por evento, es de 1,209,600 ya que la frecuencia de muestreo es de 1 Hz y el período de tiempo son 14 días.



**Figura 3.6:** Espectro electromagnético de la señal VTEC en decibelios de todos los eventos bajo estudio.

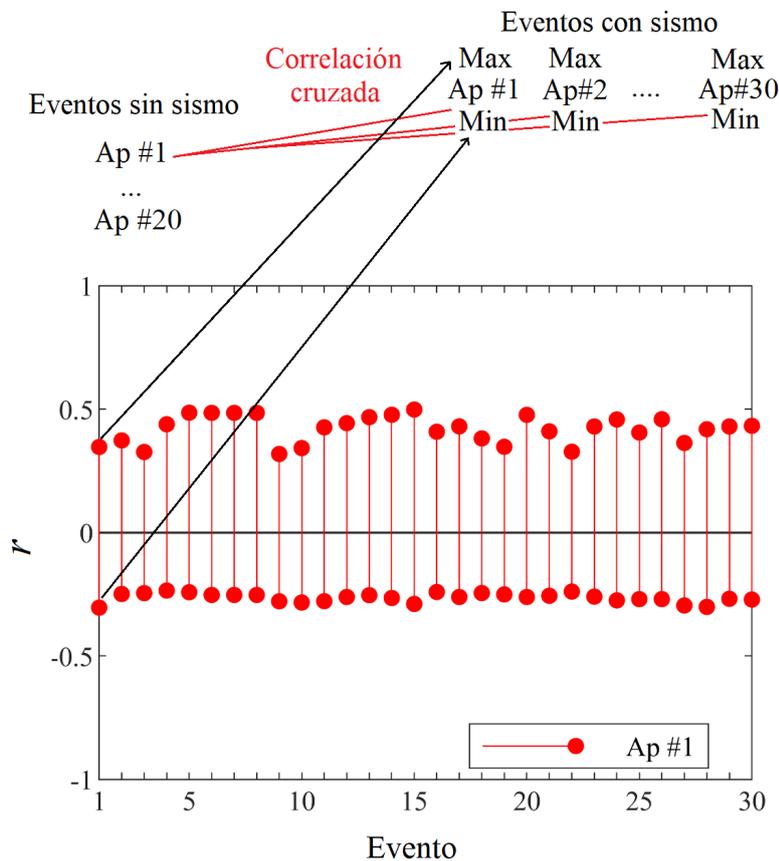
El término filtro digital se usa para describir un sistema invariante en el tiempo que genera una conformación espectral o un filtrado selectivo de frecuencia. El filtrado se utiliza en el procesamiento de señales digitales de diversas formas; Por ejemplo, para eliminar ruido indeseable de señales deseables, para detectar señales en radar, sonar y comunicaciones, para la ecualización de canales de comunicación y para realizar análisis espectral de señales, entre otras (Proakis y Manolakis, 2006). Por lo tanto, en este estudio se aplicaron filtros digitales de respuesta finita al impulso (FIR, por sus siglas en inglés) y de respuesta infinita al impulso (IIR, por sus siglas en inglés) a la señal TEC. En ambos casos se realizaron pruebas. En estas el diseño del filtro se modificó con la finalidad de obtener resultados prácticos; Por ejemplo, se aplicaron diversas frecuencias de corte, diferentes tipos de orden (4, 8 y 16), filtros pasa alta, pasa banda, Butterworth, Chebyshev tipo II, Chebyshev inverso, entre otros.

**Tabla 3.6:** Parámetros para el diseño de los filtros correspondientes a las Figuras 4.15 y 4.16, respectivamente.

	Frecuencia muestreo	Frecuencia corte	Orden filtro	Tipo filtro
FIR	1 s	.05 Hz	16	Pasa alta
IIR	1 s	.05 Hz	4	Pasa alta, Butterworth

Continuando con el tratamiento de los datos se procedió a normalizar. El objetivo de la normalización de datos es que la señal de interés conserve sus mismas características (por ejemplo, la forma) pero en un rango de valores determinado, en nuestro caso de 0 a 1. Por lo tanto, la normalización se aplicó como un método para observar el comportamiento de los datos.

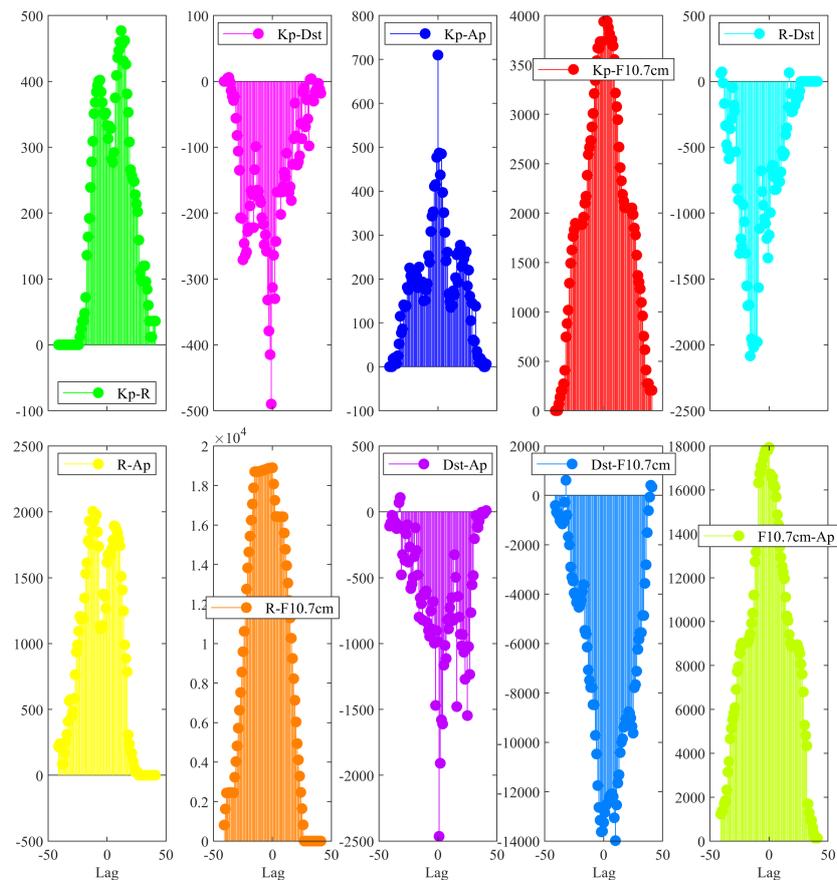
$$R_{xy}(m) = E\{x_{n+m}y_n^*\} = E\{x_n y_{n-m}^*\}, \quad -\infty < n < \infty \quad (3.11)$$



**Figura 3.7:** Ejemplo del primer experimento aplicando correlación cruzada normalizada, los datos pertenecen al Evento 1 sin sismo. En general, una señal de un evento sin sismo contra todas las de un evento con sismo.

Otro método aplicado fue la correlación cruzada (Ecuación 3.11, donde \* denota conjugación compleja y E es el operador de valor esperado). Esta nos permite iden-

tificar si existe una relación entre dos señales, para este caso particular las señales corresponden a diferentes índices geomagnéticos y solares. En este trabajo la correlación cruzada se aplicó de dos formas distintas: la primera, entre el mismo tipo de índice y, la segunda, entre índices diferentes. En ambos experimentos el resultado genera nuevas señales. Como ejemplo tenemos la Figura 3.7 donde se aplicó una correlación cruzada entre un índice de un evento sin sismo y el mismo índice por el total de eventos con sismo, resultando en 30 nuevas señales por evento sin sismo ( $20 \times 30$ ), de estas nuevas señales, y con la finalidad de evaluarlas, se obtuvo el coeficiente de correlación máximo y mínimo, de igual forma para el resto de eventos sin sismo e índices.



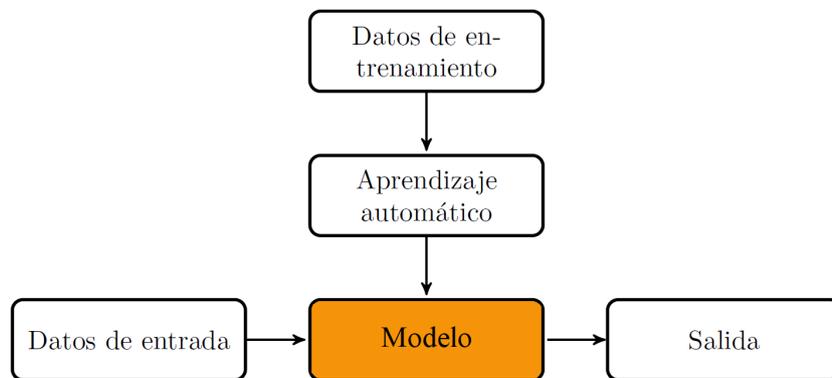
**Figura 3.8:** Correlación cruzada entre índices geomagnéticos y/o solares. El ejemplo muestra datos pertenecientes al Evento 3 con sismo. El eje Y muestra el coeficiente de correlación y el eje X el lag.

En ambos experimentos la longitud de la señal de entrada corresponde a todo el período de días en estudio. Con relación al experimento dos, la correlación cruzada se aplicó entre índices pertenecientes al mismo tipo de evento (Figura 3.8). En este caso, para describir los resultados obtenidos se seleccionaron las siguientes características: ajuste, este especifica la cantidad de datos en un punto determinado; simetría; curtosis, interpretado como las características de la cresta con relación a una curva de campana estándar (alto y fino, unimodal o no unimodal); inclinación, la desviación de la simetría horizontal, y el sesgo, con relación al nivel de simetría.

A lo largo de los años se han desarrollado diversos tipos de técnicas computacionales de aprendizaje automático o, en inglés, *Machine Learning*, esto para resolver problemas de distinta índole. Estas técnicas pueden ser clasificadas, con base en su método de entrenamiento, en tres tipos: aprendizaje supervisado, aprendizaje sin supervisión y aprendizaje reforzado.

### 3.6. Máquina de Vectores de Soporte

El aprendizaje automático es una técnica de modelado que involucra datos, su idea principal es lograr un modelo utilizando información, tal como: documentos, audio, imágenes, etcétera. El problema de clasificación se centra en encontrar las clases a las que pertenecen los datos, por lo tanto el modelo es el producto final del aprendizaje automático (P. Kim, 2017). En la Figura 3.9 se ilustran los procesos pertenecientes al aprendizaje automático, el flujo vertical de la figura indica el proceso de aprendizaje y el modelo entrenado se describe como el flujo horizontal.



**Figura 3.9:** Ilustración de los procesos que comprenden al aprendizaje automático. Fuente: P. Kim (2017).

En este trabajo se aplicó un entrenamiento de aprendizaje supervisado a un conjunto de datos, ya que sus dos usos más comunes son la clasificación y la regresión. A decir verdad, la clasificación puede ser la aplicación más predominante del aprendizaje automático. En específico, la técnica aplicada se denomina en español “Máquina de Vectores de Soporte” o en inglés “Support Vector Machine” (SVM, por sus siglas). SVM es una de las técnicas de aprendizaje automático más utilizadas para la clasificación binaria (Borges, 1998; Platt, 1998). Una SVM puede ser interpretada de la siguiente forma: Dado  $N$  vectores  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , donde cada vector  $x_j$  posee  $m$  características  $\{a_{j1}, a_{j2}, \dots, a_{jm}\}$  y pertenece a una o dos clases  $C_1$  o  $C_2$ . En esta los datos proporcionados son linealmente separables si es posible encontrar un hiperplano en el espacio de características que pueda separar entre las instancias de la clase  $C_1$  y las instancias de la clase  $C_2$ . Si los datos proporcionados no son separables linealmente en el espacio de características de  $m$  dimensiones es posible mapearlos en un espacio dimensional superior, en el que los datos proporcionados se vuelven separables linealmente. El principal objetivo de una SVM es encontrar un hiperplano que clasifique todos los vectores de entrenamiento en las dos clases. Pueden existir muchos hiperplanos que separen las instancias de las dos clases, no

obstante se desea que el hiperplano elegido maximice el margen entre las dos clases. Dicho lo anterior, una SVM,  $S(x)$ , es una función linealmente discriminante de la forma,

$$S(\mathbf{x}) = \mathbf{w}^T \mathbf{x} + b \quad (3.12)$$

Donde  $\mathbf{x}$  es un vector de características,  $\mathbf{w}$  un vector de ponderación de  $m$ -dimensiones y el escalar  $b$  un sesgo. El vector de peso es ortogonal al hiperplano y controla su dirección, mientras que el sesgo controla su posición. Ahora, si se asigna un vector de características  $\tilde{\mathbf{x}}$ , entonces  $S(\tilde{\mathbf{x}}) = \mathbf{w}^T \tilde{\mathbf{x}} + b$  para cumplir:

1.  $S(\tilde{\mathbf{x}}) = \mathbf{w}^T \tilde{\mathbf{x}} + b > 0$  si  $\tilde{\mathbf{x}}$  es una instancia en  $C_1$ .
2.  $S(\tilde{\mathbf{x}}) = \mathbf{w}^T \tilde{\mathbf{x}} + b < 0$  si  $\tilde{\mathbf{x}}$  es una instancia en  $C_2$ .

La etapa de entrenamiento de una SVM incluye ajustar el peso y el sesgo, de modo que todas las instancias de  $C_1$  se encuentren en un lado del hiperplano y las instancias de  $C_2$  se encuentren en el otro lado de este. Con respecto al hiperplano, su elección óptima es estar lo más lejos posible de las instancias más cercanas de ambas clases ( $C_1$  y  $C_2$ ). Los vectores de características más cercanos al hiperplano de ambas clases se denominan vectores de soporte. En lo ideal, el objetivo principal de una SVM es maximizar el margen, que es la distancia entre el hiperplano y los vectores de soporte, de ambas clases, más cercanos a este, de tal forma que las instancias de las clases  $C_1$  y  $C_2$  estén igualmente separadas del hiperplano (P. Kim, 2017). En este trabajo se utilizó MATLAB®, que es una plataforma de programación y computación numérica dedicada a analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos, entre otros, para definir un modelo de clasificación SVM (descrito anteriormente). En específico, a través de la aplicación “Classification Learner” disponible a partir de la versión R2015a. No obstante, esta aplicación te permite realizar un entrenamiento automatizado para aplicar otros modelos de clasificación, estos incluyen: Árboles de Decisión (DTs, siglas en inglés), Análisis Discriminantes, Regresión Logística, K vecinos más cercanos (kNN, siglas en inglés), Clasificadores Naive Bayes y Clasificadores de Conjuntos (del inglés Ensemble Classifiers), entre otros. Actualmente los procesos físicos de los terremotos no se conocen con claridad, por lo tanto el aprendizaje automático es una forma práctica de aplicar métodos estadísticos matemáticos al pronóstico de terremotos. Una SVM no solo tiene una base teórica estricta sino también una fuerte capacidad de generalización (pronóstico), lo que puede resolver problemas prácticos de muestras pequeñas y no lineales (Jiang et al., 2009). Para las SVM, y para cualquier modelo de clasificación supervisado, es necesario proporcionar un conjunto conocido de datos de entrada (Selección y recopilación de parámetros y características competentes) y asignar etiquetas o clases (Con sismo - Sin sismo) de tal forma que se utilizan los datos para entrenar un modelo que genera predicciones para la respuesta a nuevos datos. Con respecto a los datos, es preciso destacar lo siguiente: existen diferentes estudios que informan sobre alteraciones significativas en el TEC 9 días antes de un terremoto (Arikan et al., 2016; Karatay et al., 2010, 2009; Necat Deviren et al., 2014). Nuevamente, en Le et al. (2011) se reveló que las perturbaciones de TEC se concentran principalmente de 1 a 9 días antes de terremotos fuertes, destacando que es más probable observar estas perturbaciones antes de un terremoto que en días sísmicamente inactivos. Lo anterior toma relevancia al tener en cuenta el período de días bajo estudio seleccionado en el presente trabajo (Ver Sección 3), el cual es de 14 días, de los cuales 8

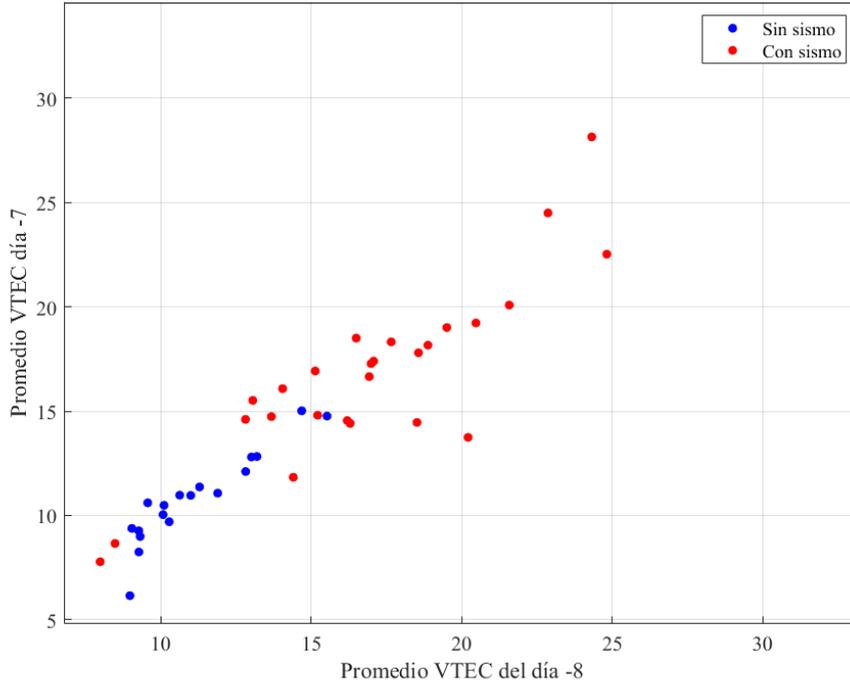
pertenecen al período que antecede al terremoto. Por lo tanto, y de acuerdo a los estudios antes mencionados, de existir, la probabilidad de detectar una diferencia entre los eventos con sismo y sin este, para ese período de días en específico, es favorable. En la Tabla 3.7 es posible observar la distribución de los datos utilizados para entrenar y probar el modelo de clasificación SVM obtenido en este trabajo. Las características son la parte más importante de un problema de clasificación. Por lo tanto, para cada ventana de tiempo se calculó un conjunto de 17 características estadísticas potencialmente relevantes (por ejemplo, media, varianza, curtosis, simetría, etcétera), estas se encuentran en la Tabla 3.8.

**Tabla 3.7:** Conjunto de datos pertenecientes a la etapa de Entrenamiento y Prueba.

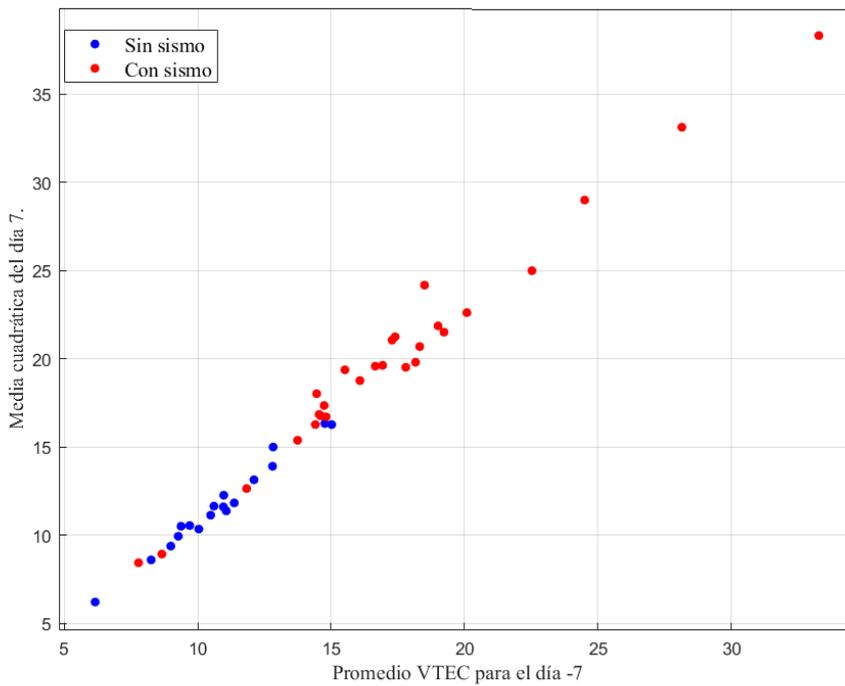
Conjunto	Fecha		Número de días	Número de terremotos
	Inicio	Final		
Entrenamiento	Febrero 2015	Septiembre 2017	320	25
Prueba	Julio 2016	Septiembre 2017	80	5

**Tabla 3.8:** Características utilizadas para el diseño de la SVM. Estas se utilizaron para el período -8 al -1. Es decir, los días anteriores al terremoto ó en el caso de los eventos sin sismo, 8 días.

Característica	Descripción
1	$\overline{VTEC}$ de los días anteriores al terremoto.
2	$\sigma$ de los días anteriores al terremoto.
3	$\sigma^2$ de los días anteriores al terremoto.
4	Máximo de VTEC registrado por día para el período que antecede al terremoto.
5	Mínimo de VTEC registrado por día para el período que antecede al terremoto.
6	Si $D_{st} > -50$ nT $\Rightarrow 1$ .
7	F10.7 cm $> 120$ s.f.u. $\Rightarrow 1$ .
8	R, número de manchas solares por día, para el período que antecede al terremoto.
10	Error Cuadrático Medio (ECM) del VTEC por día, para el período que antecede al terremoto.
11	Fulguraciones solares. Si presentó $\Rightarrow 1$ .
12	Valor máximo de F10.7 cm por día.
13	Valor mínimo de F10.7 cm por día.
13	Valor máximo de Kp del período.
14	Cambios en el promedio diario de VTEC (Tabla 4.1 y 4.2).
15	Estación del año a la que pertenece el período de días del evento.
16	Simetría.
17	Curtosis.



**Figura 3.10:** Comportamiento original de los datos con base al promedio de VTEC para el día 8 antes del terremoto ó 8 sin sismo contra el promedio del día -7 ó 7.



**Figura 3.11:** Comportamiento original de los datos con base al promedio de VTEC para el día -7 antes del terremoto y a la media cuadrática del mismo día.

Finalmente, en la Figura 3.12 se presenta un diagrama de la metodología aplicada.

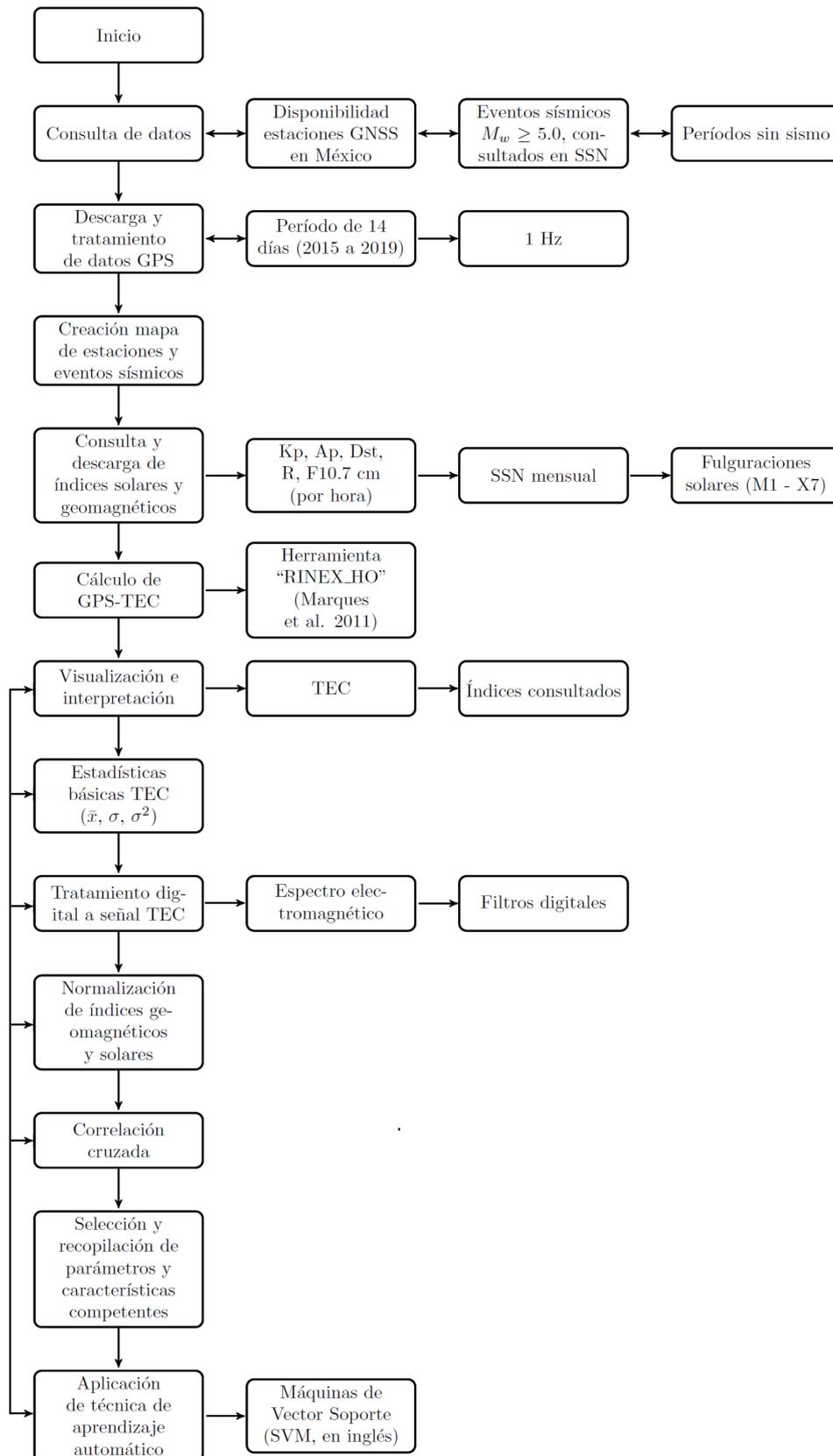


Figura 3.12: Diagrama de la metodología aplicada.

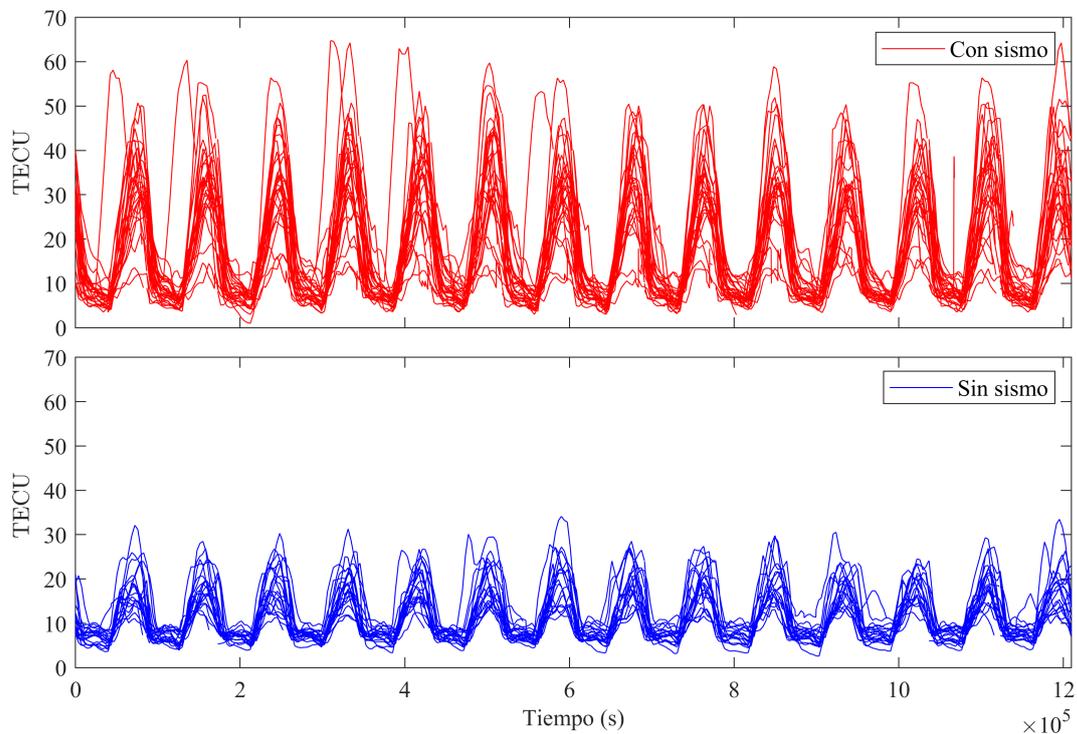
Al final de la Sección 3.4 se comentó sobre la existencia de diferentes programas dedicados al cálculo del TEC. No obstante, también es posible consultar valores TEC a partir de la técnica de Mapas Ionosféricos Globales (GIM). Los GIM son desarrollados por diferentes centros de análisis del Servicio Internacional GNSS (IGS, por sus siglas en inglés) con base en datos experimentales pertenecientes a receptores de su misma red, con la finalidad de construir mapas globales de VTEC. Estos productos finales, en formato IONEX (del término en inglés “IONosphere Map Exchange”), están disponibles de forma gratuita en <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/ionex>. Con base en lo anterior, se desarrolló un programa en el lenguaje Python denominado “IONEX READER”, el cual tiene como objetivo la extracción de valores TEC de archivos tipo IONEX con diferente resolución temporal y para diferentes puntos de observación. Este programa es de acceso libre y está disponible únicamente para uso educativo, académico y de investigación sin fines comerciales en el portal electrónico del Servicio de Clima Espacial de México (SCiESMEX). Finalmente, “IONEX READER” formó parte de los resultados obtenidos durante una estancia de investigación en SCiESMEX/LANCE (Laboratorio Nacional de Clima Espacial) y puede ser descargado a través de su portal electrónico <http://www.sciesmex.unam.mx/integrantes/maria-sergeeva/ionexreader/>.

# 4

## Resultados y análisis

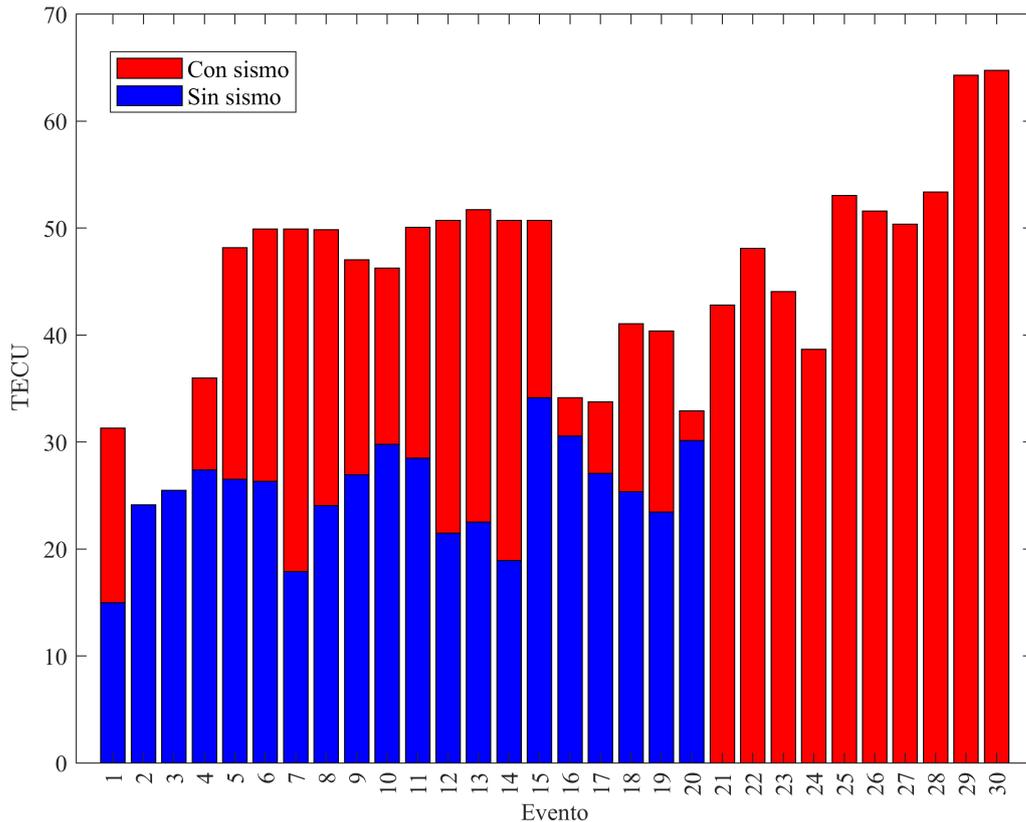
### 4.1. Resultados estadísticos

La primer etapa consistió en analizar el comportamiento normal de los dos conjuntos de datos, es decir, en tiempo y con estadísticas básicas. Una de las principales diferencias entre los conjuntos en estudio radica en la magnitud de VTEC reflejado, siendo este mayor en los períodos con sismo donde fácilmente se alcanzan las 40 unidades de TEC (TECU), no es el caso para los eventos sin sismo donde la mayoría se encuentran por debajo de las 30 TECU (Figura 4.1).



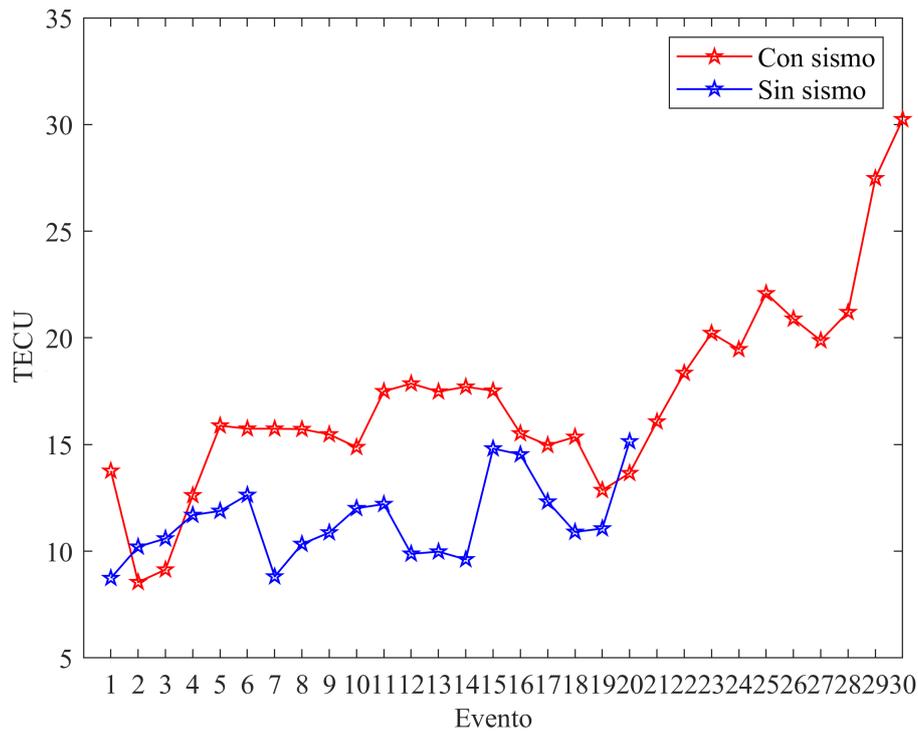
**Figura 4.1:** VTEC en tiempo de los eventos con sismo y sin sismo.

Además, los valores máximos registrados en todo el período de días de cada uno de los eventos con sismo y sin sismo se muestran en la Figura 4.2, donde es posible observar, para este caso de estudio, que los eventos con sismo presentan en su mayoría valores máximos de VTEC superiores a los eventos sin sismo. No obstante, lo anterior no implica necesariamente que los eventos telúricos sean directamente responsables de los valores superiores registrados en el VTEC, ya que la ionosfera es un medio que se ve fácilmente afectado por factores externos.



**Figura 4.2:** Valores máximos de VTEC registrados en el período de días considerado por evento.

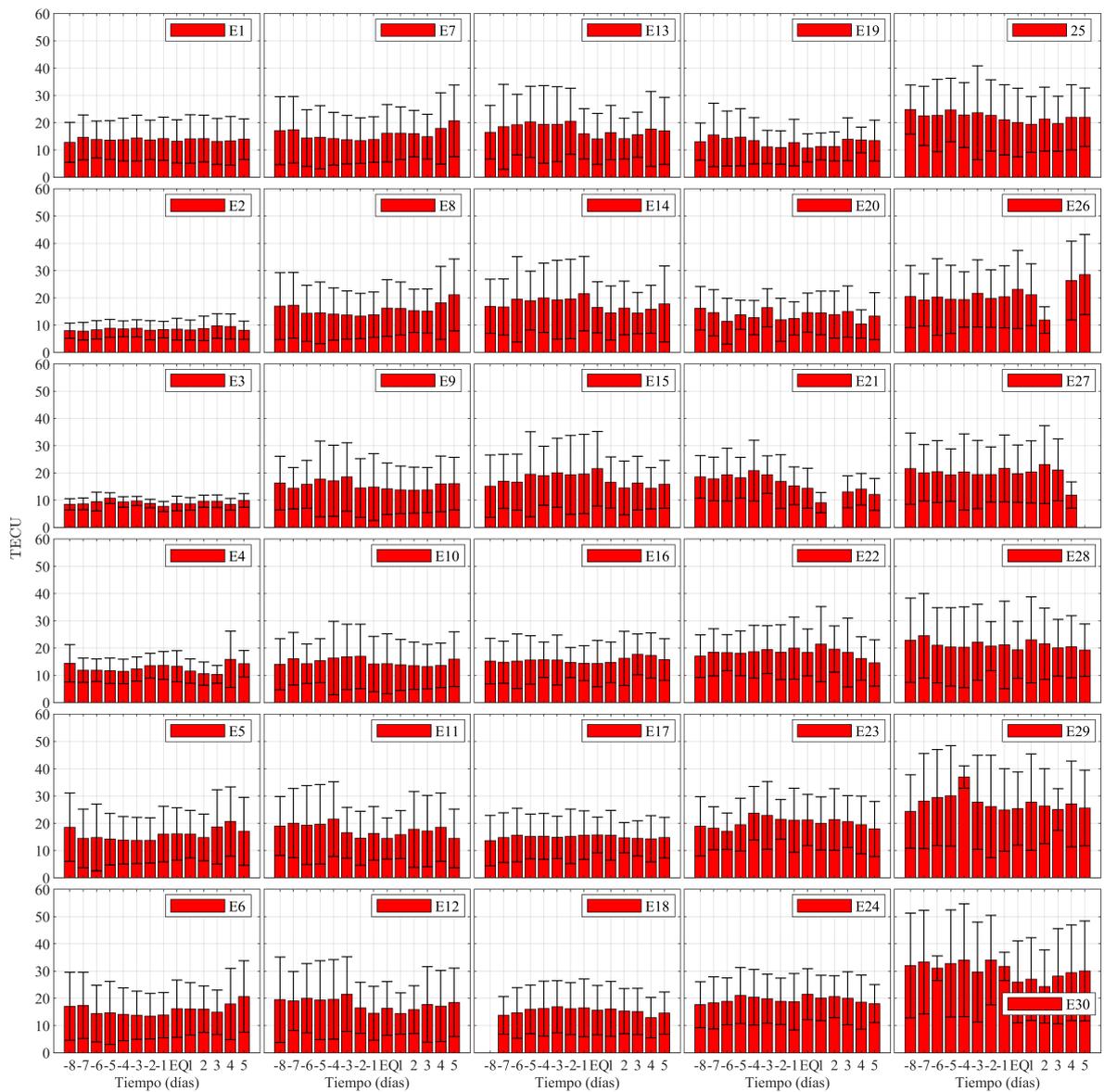
Continuando con la primera etapa se promedió el VTEC de todo el período de días de cada evento (Figura 4.3). De lo anterior, es posible observar que los últimos eventos con sismo, a partir del Evento 22, presentan valores superiores en su promedio los cuales corresponden a los años 2015 y 2016. En relación a los valores continuos evidentes en los eventos con sismo (por ejemplo del Evento 6 al 8), estos se deben a la proximidad de sus fechas (pertenecen al mismo mes y año) (Tabla 3.2). En general, los eventos sin sismo son inferiores en su promedio de VTEC. No obstante, es posible observar que los eventos con sismo 2 y 3 se posicionan por debajo de la mayoría de los eventos sin sismo, siendo estos los eventos con sismo con el menor promedio.



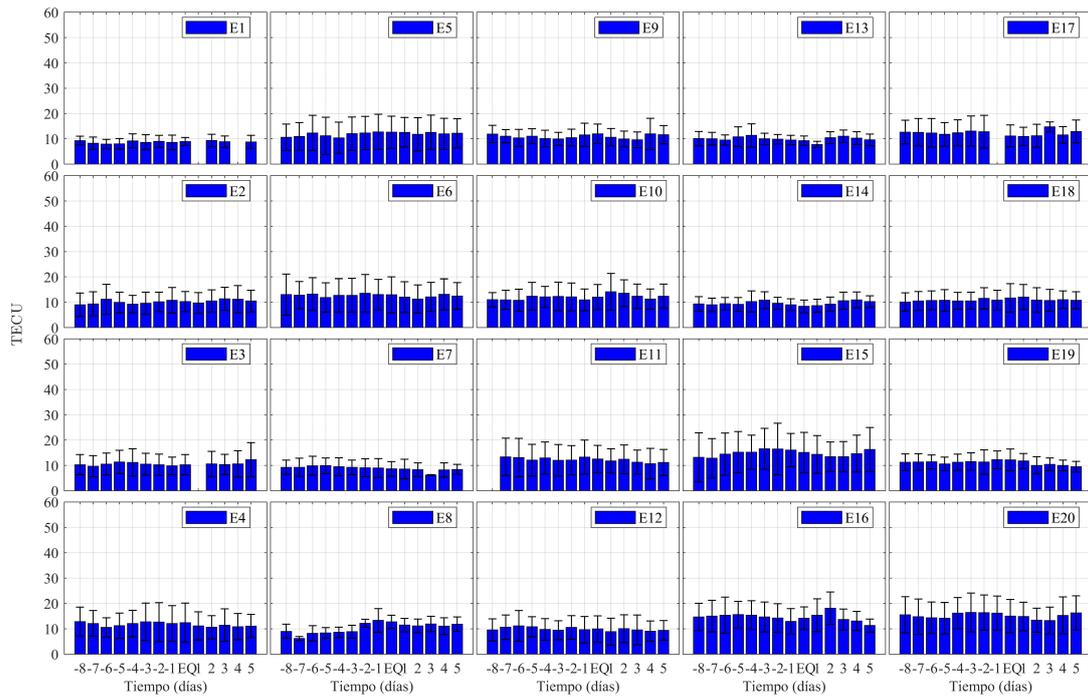
**Figura 4.3:** Promedio general de VTEC por evento con sismo y sin sismo.

De acuerdo a [Sergeeva et al. \(2018\)](#) existe un patrón anual en el comportamiento del VTEC en México, el cual indica que los valores máximos de VTEC se presentan durante los meses de Abril y usualmente Octubre. De forma inversa, los valores de VTEC mínimos usualmente se observan durante los meses de Diciembre, Enero y Julio. Sin embargo, el TEC es un parámetro que puede verse afectado fácilmente. Considerando lo anterior, y con la finalidad de conocer si los valores máximos y mínimos de VTEC se ajustan con tal patrón se analiza la Figura 4.2. De los eventos con sismo, 4 ocurren durante el período de Abril y Octubre (1, 26, 27 y 28) y los 5 máximos valores de VTEC registrados pertenecen a los eventos 30, 29, 28, 25 y 13, en orden. Por lo tanto, únicamente la magnitud del Evento 28 tendría relación con la estación del año (25%). Con respecto al mínimo, los Eventos 2, 3, 20, 21 y 22 ocurren en los meses de Diciembre, Enero y Julio, y de acuerdo a la Figura 4.2 los mínimos máximos corresponden a los eventos 2, 3, 1, 20, 17, en orden. Tal que, 3 eventos (2, 3, 20 ó un 60%) se comportan de acuerdo al patrón antes indicado. Para los eventos sin sismo, los eventos 7, 8, 9, 12, 13, 14 y 19 pertenecen al período Diciembre, Enero y Julio, el de mínimo VTEC, por lo tanto, 6 eventos coinciden con el mínimo (7, 8, 12, 13, 14 y 19, 85%). Además, para el máximo, únicamente el Evento 5 pertenece a Abril, no hay ninguno para el mes de Octubre, por lo tanto, no concuerda con los mínimos máximos visibles en la Figura 4.2. A continuación se presentan los cinco primeros eventos con el valor máximo y el mínimo valor máximo de VTEC registrado, máximo con sismo 2, 3, 1, 20 y 17, mínimo máximo con sismo 30, 29, 28, 25 y 13. Máximo sin sismo 15, 16, 20, 10 y 11, Mínimo máximo sin sismo 1, 7, 14, 12 y 13 4.2.

En relación al promedio por día tenemos las Figuras 4.4 y 4.5, donde también se observa la desviación estándar.



**Figura 4.4:** Promedio y desviación estándar (I) de VTEC por día para los eventos con sismo. Campos vacíos sin disponibilidad.



**Figura 4.5:** Promedio y desviación estándar (I) de VTEC por día para los eventos sin sismo. Campos vacíos sin disponibilidad.

**Tabla 4.1:** Cambios (incrementos + y decrementos -) en el promedio diario de VTEC en comparación al día anterior para eventos con sismo. La primer columna (E) muestra el evento.

E	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	EQ	1	2	3	4	5
1	12.82	+1.79	-0.77	-0.21	+0.17	+0.56	-0.68	+0.46	-0.96	+0.89	+0.11	-1.07	+0.26	+0.60
2	7.99	-0.21	+0.49	+0.57	-0.20	+0.20	-0.69	+0.20	+0.20	-0.32	+0.59	+0.88	-0.21	-1.37
3	8.49	+0.17	+0.84	+1.24	-1.40	+0.35	-0.91	-1.09	+1.09	-0.13	+0.99	-0.01	-1.12	+1.42
4	14.41	-2.58	+0.01	-0.17	-0.22	+0.86	+1.25	+0.07	-0.30	-1.77	-0.96	-0.26	+5.53	-1.62
5	18.52	-4.06	+0.34	-0.63	-0.37	-0.10	+0.05	+2.27	+0.07	-0.06	-1.23	+3.90	+1.94	-3.57
6	17.08	+0.32	-3.01	+0.27	-0.52	-0.36	-0.34	+0.39	+2.33	-0.03	-0.12	-1.14	+3.05	+2.74
7	17.08	+0.32	-3.01	+0.27	-0.52	-0.36	-0.34	+0.39	+2.33	-0.03	-0.12	-1.14	+3.05	+2.74
8	16.99	+0.29	-2.94	+0.14	-0.41	-0.34	-0.39	+0.46	+2.47	-0.16	-0.83	-0.12	+2.99	+2.93
9	16.30	-1.89	+1.42	+1.94	-0.62	+1.37	-4.06	+0.34	-0.63	-0.37	-0.10	+0.05	+2.27	+0.07
10	14.05	+2.03	-1.82	+1.13	+0.91	+0.47	+0.17	-2.78	+0.10	-0.43	-0.26	-0.38	+0.46	+2.28
11	19.01	+1.03	-0.71	+0.30	+1.93	-5.03	-2.04	+1.81	-1.89	+1.42	+1.94	-0.62	+1.37	-4.06
12	19.51	-0.50	+1.03	-0.71	+0.30	+1.93	-5.03	-2.04	+1.81	-1.89	+1.42	+1.94	-0.62	+1.37
13	16.50	+2.00	+0.78	+1.01	-0.92	+0.05	+1.10	-4.59	-1.88	+2.32	-2.18	+1.41	+2.10	-0.71
14	16.93	-0.28	+2.85	-0.50	+1.03	-0.71	+0.30	+1.93	-5.03	-2.04	+1.81	-1.89	+1.42	+1.94
15	15.14	+1.79	-0.28	+2.85	-0.50	+1.03	-0.71	+0.30	+1.93	-5.03	-2.04	+1.81	-1.89	+1.42
16	15.22	-0.41	+0.39	+0.44	+0.09	-0.11	-0.90	-0.27	-0.14	+0.44	+1.47	+1.46	-0.40	-1.52
17	13.68	+1.06	+0.91	-0.48	+0.05	-0.41	+0.39	+0.44	+0.09	-0.11	-0.90	-0.27	-0.14	+0.44
18	NaN	NaN	+0.88	+1.33	+0.28	+0.65	-0.70	+0.31	-0.85	+0.49	-0.82	-0.12	-2.28	+1.67
19	13.06	+2.45	-1.31	+0.51	-1.28	-2.33	-0.24	+1.87	-1.96	+0.54	0	+2.60	-0.22	-0.24
20	16.20	-1.65	-3.11	+2.35	-1.03	+3.64	-4.45	+0.52	+2.14	-0.12	-0.62	+1.12	-4.56	+2.88
21	18.56	-0.77	+1.56	-1.16	+2.66	-1.48	-2.54	-1.57	-0.90	-5.28	NaN	NaN	+0.99	-1.94
22	17.04	+1.41	-0.15	-0.22	+0.58	+0.75	-0.94	+1.51	-1.57	+2.99	-1.78	-1.24	-2.19	-1.65
23	18.88	-0.71	-1.11	+2.44	+4.15	-0.77	-1.46	-0.31	+0.10	-1.26	+1.41	-0.74	-1.17	-1.50
24	17.66	+0.67	+0.53	+2.20	-0.67	-0.56	-0.95	-0.14	+2.83	-1.47	+0.52	-0.58	-1.43	-0.55
25	24.82	-2.29	+0.13	+2.02	-1.87	+0.84	-0.97	-1.60	-1.02	-0.66	+1.91	-1.68	+2.34	+0.03
26	20.47	-1.24	+1.12	-0.93	-0.02	+2.24	-1.91	+0.66	+2.70	-1.95	-9.25	NaN	NaN	+2.22
27	21.58	-1.49	+0.38	-1.24	+1.12	-0.93	-0.02	+2.24	-1.91	+0.66	+2.70	-1.95	-9.25	NaN
28	22.86	+1.64	-3.48	-0.63	-0.10	+1.84	-1.42	+0.43	-1.78	+3.66	-1.45	-1.49	+0.38	-1.24
29	24.32	+3.83	+1.25	+0.65	+6.92	-9.23	-1.56	-1.29	+0.52	+2.32	-1.43	-1.23	+2.03	-1.47
30	32.02	+1.26	-2.22	+1.72	+1.22	-4.38	+4.38	-2.30	-5.69	+1.03	-2.73	+3.83	+1.25	+0.65

**Tabla 4.2:** Cambios (incrementos + y decrementos -) en el promedio diario de VTEC en comparación al día anterior para eventos sin sismo. La primer columna (E) muestra el evento.

E	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	"EQ"	1	2	3	4	5
1	9.28	-1.03	-0.30	+0.08	+1.15	-0.54	+0.42	-0.49	+0.39	NaN	NaN	-0.51	NaN	NaN
2	9.05	+0.33	+1.81	-1.29	-0.65	+0.36	+0.54	+0.66	-0.53	-0.59	+0.82	+0.86	-0.20	-0.67
3	10.29	-0.59	+0.82	+0.86	-0.20	-0.67	-0.27	-0.40	+0.43	NaN	NaN	-0.19	+0.22	+1.71
4	12.82	-0.72	-1.58	+0.68	+0.88	+0.66	-0.12	-0.53	+0.34	-1.28	-0.52	+0.78	-0.57	+0.26
5	10.63	+0.34	+1.36	-1.10	-0.83	+1.64	+0.23	+0.48	-0.15	-0.01	-0.79	+0.75	-0.59	+0.21
6	13.02	-0.21	+0.40	-1.33	+0.84	+0.04	+0.81	-0.54	-0.08	-0.91	-0.72	+0.83	+1.03	-0.68
7	9.27	0	+0.59	+0.02	-0.38	-0.29	-0.09	-0.15	-0.33	-0.07	-0.27	-2.07	+1.99	+0.20
8	8.98	-2.83	+2.05	+0.17	+0.26	+0.23	+3.32	+1.11	-0.55	-1.31	-0.28	+0.74	-0.85	+0.74
9	11.90	-0.82	-0.71	+0.68	-0.95	-0.14	+0.47	+1.14	+0.45	-1.36	-0.69	-0.35	+2.34	-0.32
10	11.00	-0.04	-0.18	+1.56	-0.25	+0.20	-0.16	-1.20	+1.10	+2.10	-0.59	-1.15	-1.10	+1.14
11	NaN	NaN	-0.25	-1.07	+0.83	-0.91	+0.08	+1.19	-0.73	-0.76	+0.64	-1.13	-0.59	+0.44
12	9.57	+1.04	+0.57	-0.36	-1.08	-0.30	+1.09	-0.89	+0.33	-1.10	+1.15	-0.44	-0.50	+0.31
13	10.08	-0.04	-0.50	+1.29	+0.55	-1.38	-0.16	-0.29	-0.27	-1.50	+2.67	+0.60	-0.75	-0.72
14	9.32	-0.33	+0.43	-0.28	+1.17	+0.51	-1.26	-0.54	-0.62	+0.27	+0.55	+1.34	+0.36	-0.70
15	13.20	-0.37	+1.66	+0.75	-0.05	+1.37	-0.06	-0.43	-0.95	-0.77	-0.90	+0.02	+1.18	+1.67
16	14.69	+0.33	+0.37	+0.19	-0.23	-0.68	-0.43	-1.30	+1.21	+1.19	+2.75	-4.43	-0.60	-1.80
17	12.68	-0.08	-0.27	-0.54	+0.57	+0.72	-0.28	NaN	NaN	-0.24	+0.32	+3.47	-3.16	+1.37
18	10.11	+0.37	+0.24	+0.06	-0.24	-0.01	+0.98	-0.65	+0.84	+0.35	-1.19	-0.15	+0.29	-0.22
19	11.29	+0.07	+0.04	-0.80	+0.66	+0.23	-0.18	+0.91	-0.03	-0.43	-1.74	+0.39	-0.42	-0.53
20	15.53	-0.76	-0.44	-0.13	+1.98	+0.25	-0.04	-0.17	-1.20	-0.14	-1.47	-0.15	+2.05	+0.98

De las Figuras 4.4 y 4.5 en conjunto con la Tabla 4.1 y 4.2 se pueden analizar las siguientes preguntas: ¿Cómo cambia el promedio de VTEC antes, durante y después de un terremoto? ¿Este cambio es similar para los períodos sin sismo?. Con relación a la magnitud de las variaciones, sean estas consecutivas o no, tenemos lo siguiente: Para el período que antecede al terremoto (-7 al -1) los días con incrementos y decrementos son uniformes, es decir, existen 15 eventos (del 5 al 8, 12, 16, 19 al 21 y del 23 al 28) donde predominan los días, por evento, con decrementos y de forma contraria, 15 eventos donde predominan los días con incrementos. Con respecto a la máxima cantidad de días con incrementos y decrementos por evento, esta es de 5 días. No obstante, el promedio de días con incrementos, por evento, es de 3.5, lo que significa que la mayoría de los eventos con sismo, para el período antes del terremoto, presentan incrementos de 3 a 4 días; para conocer el tipo de incremento se tiene la Tabla 4.3. Al ser semejantes, lo anterior también se adapta al promedio de días con decrementos. Con respecto a su magnitud, el máximo incremento presentado fue de 6.92 TECU y el máximo decremento de 9.23 TECU. Para el caso del mínimo incremento y decremento, estos fueron de 0.39 y 0.48 TECU, respectivamente. Además, para el día del sismo sucede algo similar, los días con incrementos y decrementos, por evento, son uniformes. El máximo incremento corresponde a 2.83 TECU (Evento 24) y el máximo decremento a 5.69 TECU (Evento 30). Continuando, tenemos los días después del terremoto. Para este período predominan los decrementos, tal que 21 de 30 eventos presentan, en su mayoría, días con decrementos, esto se vuelve notorio en este período. Lo anterior genera la siguiente pregunta ¿El promedio de VTEC de los eventos bajo estudio tiende a decrecer después de un terremoto?. El máximo incremento presentado fue de 5.53 TECU (Evento 4) y el máximo decremento fue de 9.25 TECU (Evento 26), nuevamente se observa que las pérdidas de VTEC son mayores. El promedio de días con incrementos para este período es de 2.13, es decir, incrementos de 1 a 2 días. Para el caso de los decrementos, el promedio es de 2.86 días, por lo tanto los decrementos ocurren de 2 a 3 días (Tabla 4.3). En el caso de los eventos sin sismo, se analizan dos situaciones: la primera considerando un período general de 14 días y la segunda considerando un antes, durante y después, como

se muestra en la Tabla 4.2. En la primera situación, 15 de 20 eventos presentan, en su mayoría, días con decrementos, por lo tanto estos predominan. Únicamente, 5 eventos tuvieron, en su mayoría, días con incrementos. El incremento máximo fue de 3.47 TECU y el decremento de 4.43 TECU. Por otra parte, para el período asignado como antes (-7 al -1), la mayoría de los eventos sin sismo presentan más días con decrementos (13 de 20 eventos). Por su parte, el promedio de días con incrementos es de 3.4, es decir, la mayoría de los eventos presentan 3 días de incrementos. En el caso de los decrementos, el promedio es de 3.6 días, por lo tanto, la mayoría de los eventos presentan 4 días de decrementos. El máximo incremento registrado fue de 3.32 TECU y el máximo decremento de 2.83 TECU, ambos del Evento 8. Para el período asignado como durante ó “EQ” predominan los decrementos, siendo el máximo registrado de 1.20 TECU (Evento 20) y el máximo incremento de 1.21 TECU (Evento 16). De igual forma, para el período asignado como después la mayoría de los días de los eventos sin sismo presentan decrementos. En promedio los incrementos ocurren de 2 días por evento, para el caso de los decrementos el promedio es de 2.7, lo que significa que estos ocurren entre 2 y 3 días. El máximo incremento registrado es de 3.47 TECU y el máximo decremento de 4.43 TECU, Evento 16 y 17, respectivamente. Finalmente, al considerar los valores absolutos del máximo incremento y máximo decremento del promedio de VTEC en TECU, para antes, durante y después, de los eventos con sismo, se tiene lo siguiente:  $|6.92|$  y  $|9.23|$ ,  $|2.83|$  y  $|5.69|$ ,  $|5.53|$  y  $|9.25|$ , respectivamente. Lo anterior, además de señalar variaciones altas indica que los máximos decrementos del promedio de VTEC, por período, tienden a presentar mayor magnitud. Para el caso de los eventos sin sismo se tiene lo siguiente:  $|3.32|$  y  $|2.83|$ ,  $|1.21|$  y  $|1.20|$ ,  $|3.47|$  y  $|4.43|$ , en estos casos la variación del promedio de VTEC es baja y la tendencia diferente; Los períodos antes y durante actúan de forma contraria, es decir, los incrementos presentan una mayor magnitud. No obstante, el período posterior no cumple dicha tendencia.

Con el objetivo de analizar el tipo de variación presente en el promedio diario de VTEC (Figuras 4.4 y 4.5) se formularon las siguientes sentencias: Variación tipo  $V_1$ , donde  $G_1 = X_1 < X_2$  y es representada por bloques no sucesivos (individuales) en la Figura 4.6. Como ejemplo de variación  $V_1$  tenemos el promedio de VTEC de los días -6 al -5 y -4 al -3 del evento con sismo número 20, donde:  $X_1 = 11.44$  TECU  $<$   $X_2 = 13.79$  TECU y  $X_1 = 12.76$  TECU  $<$   $X_2 = 16.40$  TECU, respectivamente. En general,  $V_1$  representa variaciones de un día a otro (no continuas). Variación tipo  $V_2$ , donde  $V_2 = X_1 < X_2 < X_3$  y es representada por dos bloques sucesivos en la Figura 4.6, como ejemplo tenemos el promedio diario de VTEC del evento con sismo 1, donde:  $X_1 = 13.63$  TECU,  $X_2 = 13.79$  TECU y  $X_3 = 14.35$  TECU, pertenecientes a los días -5 a -3 antes del sismo. Por lo tanto,  $V_2$  representa variaciones de tres días continuos. También variación tipo  $V_3$ , donde  $V_3 = X_1 < X_2 < X_3 < X_4$ , como ejemplo el promedio del evento con sismo 16, donde:  $X_1 = 14.80$  TECU,  $X_2 = 15.19$  TECU,  $X_3 = 15.63$  TECU y  $X_4 = 15.72$  TECU, de los días -7 al -4 antes del sismo, esta variación corresponde a tres bloques sucesivos y representa una variación de cuatro días consecutivos (Figura 4.6). Adicionalmente, variaciones de tipo  $V_4$ , donde  $V_4 = X_1 < X_2 < X_3 < X_4 < X_5$  y como ejemplo tenemos el Evento 29 con sismo, donde:  $X_1 = 24.31$  TECU,  $X_2 = 28.14$  TECU,  $X_3 = 29.39$  TECU,  $X_4 = 30.04$  TECU y  $X_5 = 36.96$  TECU de los días -8 al -4 antes del sismo,  $V_4$  se identifica como cuatro bloques sucesivos en la Figura 4.6 y representa una variación de cinco días consecutivos. Como variación entendemos los incrementos ( $<$ ) y/o decrementos ( $>$ )

de forma  $V_1$  a  $V_4$  en el promedio diario de VTEC de los eventos con y sin sismo con respecto al día anterior. Por lo tanto, aplicando dichas sentencias o lógica se puede interpretar la Figura 4.6, tal que:

**Tabla 4.3:** Tipo de incremento en el promedio diario de VTEC de los eventos con sismo.

	Antes (-8 al -1)	Día del sismo	Después (1 al 5)
$V_1$	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 25, 26, 27, 28, 30 (83.33 %).	* 2, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 15, 17, 20, 23, 24, 26, 29 (50 %).	3, 4, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 28, 29, 30 (66.66 %).
$V_2$	1, 2, 5, 9, 11, 12, 13, 14, 17, 22, 23, 25, 30 (43.33 %).	No aplica.	1, 2, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 25, 27 (43.33 %).
$V_3$	3, 4, 13, 16, 24 (16.66 %).	No aplica.	16, 9, 30 (10 %).
$V_4$	29, 18, 10 (10 %).	No aplica.	No aplica.

**Tabla 4.4:** Tipo de decremento en el promedio diario de VTEC de los eventos con sismo.

	Antes (-8 al -1)	Día del sismo	Después (1 al 5)
$V_1$	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 25, 26, 27, 28, 30 (90 %).	1, 4, 9, 11, 13, 14, 16, 18, 19, 21, 22, 25, 27, 28, 30 (50 %).	1, 2, 3, 4, 5, 11, 12, 13, 14, 15, 19, 20, 21, 23, 24, 25, 28, 29, 30 (63.33 %).
$V_2$	1, 3, 4, 11, 12, 20, 22, 23, 25, 26, 27 (36.66 %).	No aplica.	2, 3, 5, 9, 15, 16, 19, 20, 26, 27, 28, 29 (40 %).
$V_3$	5, 6, 7, 8, 16, 19, 21, 23, 28, 29 (33.33 %).	No aplica.	4, 6, 7, 8, 10, 18, 23, 24 (26.66 %).
$V_4$	24 (3.33 %)	No aplica.	17, 22 (6.66 %).

En relación a los días anteriores al sismo, un 83.33 % de los eventos presenta incrementos de un día a otro ( $V_1$ ) y solamente tres eventos presentan incrementos de cinco días consecutivos ( $V_4$ ), siendo este tipo de incrementos, junto con los de tipo  $V_3$ , los menos frecuentes. El 50 % de los eventos presentó un incremento, con relación al día anterior, el día del sismo. Además, son menos frecuentes (63.33 %) los incrementos de un día a otro ( $V_1$ ) en los días posteriores al sismo sin registrarse incrementos de tipo  $V_4$  (Tabla 4.3). En relación a los decrementos de tipo  $V_1$  y  $V_2$  estos se presentan de forma similar que en los incrementos para los días antes, durante (Día del sismo) y después del sismo. Las variaciones de tipo  $V_3$  ocurren con más frecuencia (33.33 % vs 16.66 %) en los decrementos para los días anteriores al sismo. No ocurre lo mismo para  $V_4$ . Para los días posteriores al sismo, las variaciones de tipo  $V_3$  y  $V_4$  son más frecuentes en los decrementos.

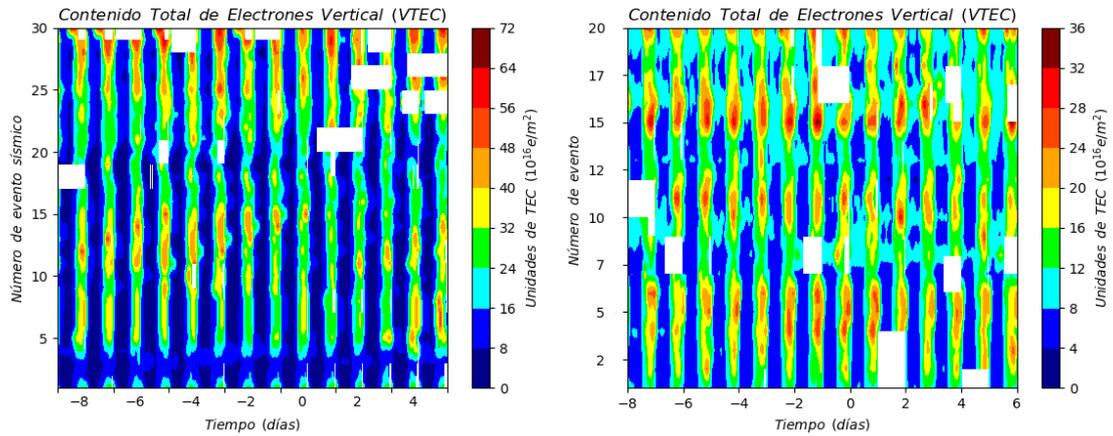
**Tabla 4.5:** Tipo de incremento en el promedio diario de VTEC de los eventos sin sismo.

	Antes (-8 al -1)	Durante ("EQ")	Después (1 al 5)
$V_1$	1, 6, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 18, 19 (50 %).	1, 3, 4, 9, 10, 12, 16, 18 (40 %).	4, 5, 8, 9, 10, 11, 12, 17, 18, 19 (50 %).
$V_2$	1, 2, 3, 5, 7, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 19, 20 (70 %).	No aplica.	2, 3, 6, 7, 13, 16, 17, 20 (40 %).
$V_3$	2, 4, 5, 6, 16, 18 (30 %).	No aplica.	15 (5 %).
$V_4$	(0 %).	No aplica.	14 (5 %).
Caso particular	8 (5 %).		

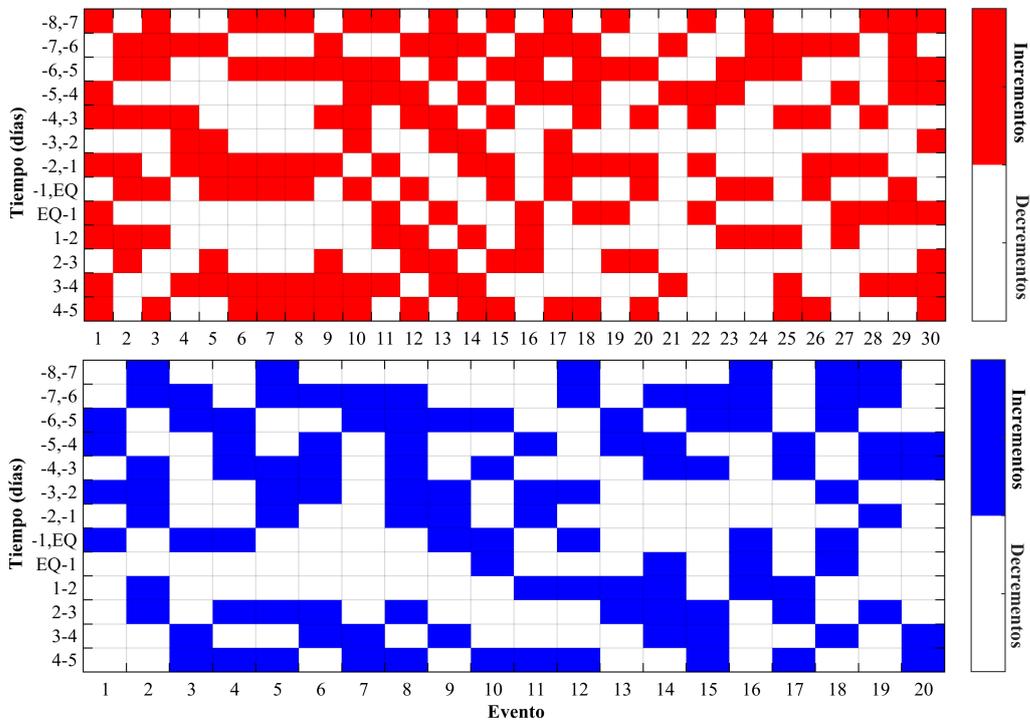
**Tabla 4.6:** Tipo de decremento en el promedio diario de VTEC de los eventos sin sismo.

	Antes (-8 al -1)	Durante ("EQ")	Después (1 al 5)
$V_1$	1, 3, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 14, 15, 17, 18, 19 (65 %).	2, 5, 6, 7, 8, 11, 13, 14, 15, 19, 20 (55 %).	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 14, 17, 18 (70 %).
$V_2$	1, 2, 4, 5, 9, 10, 13, 14, 15, 11, 18, 20 (60 %).	No aplica.	2, 4, 5, 6, 8, 9, 11, 12, 13, 15, 18, 19 (60 %).
$V_3$	12, 13, 17, 20 (20 %).	No aplica.	7, 9, 10, 16, 20 (25 %).
$V_4$	3, 7, 16 (15 %).	No aplica.	No aplica.
Caso particular	(0 %).		1 (5 %).

De la Tabla 4.5 y Tabla 4.6, pertenecientes a los eventos sin sismo, se puede inferir lo siguiente: los incrementos de tipo  $V_2$  predominan (70 %) para los días -8 al -1, seguido por incrementos de tipo  $V_1$  (50 %). Lo anterior es contrario en los eventos con sismo, donde  $V_1$  predomina (83.33 %) seguido por  $V_2$  (43.33 %). Con respecto al período Durante ("EQ"), 40 % de los eventos sin sismo presentaron incrementos de tipo  $V_1$  (valor cercano al 50 % registrado para los eventos con sismo). Además, para los días 1 al 5 predominan los incrementos de tipo  $V_1$  seguidos de  $V_2$ . Con relación a los incrementos de tipo  $V_3$  y  $V_4$  en general estos son poco frecuentes ( $\leq 30\%$ ). Para los días -8 al -1 los decrementos de tipo  $V_1$  y  $V_2$  son similares (65 % y 60 %, respectivamente) y se presentan decrementos de tipo  $V_4$  (15 % vs 0 % en incrementos). Los decrementos e incrementos para el período Durante ("EQ") permanecen similares (55 % y 40 %, respectivamente). Para los días 1 al 5 los decrementos de tipo  $V_1$  y  $V_2$  son más comunes (70 % y 60 %, respectivamente) en comparación con los incrementos (50 % y 40 %).

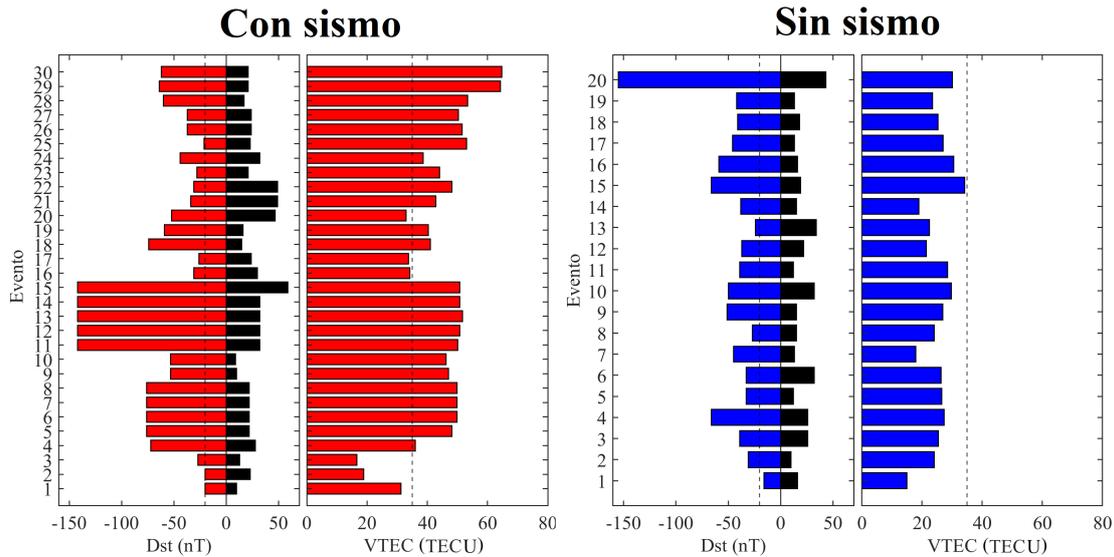


**Figura 4.7:** Mapa de VTEC de los eventos con sismo. **Figura 4.8:** Mapa de VTEC de los eventos sin sismo.



**Figura 4.6:** Marcados en rojo (con sismo) y en azul (sin sismo) los períodos de tiempo que presentan incrementos en el promedio diario de VTEC con respecto al día anterior. De blanco los decrementos.

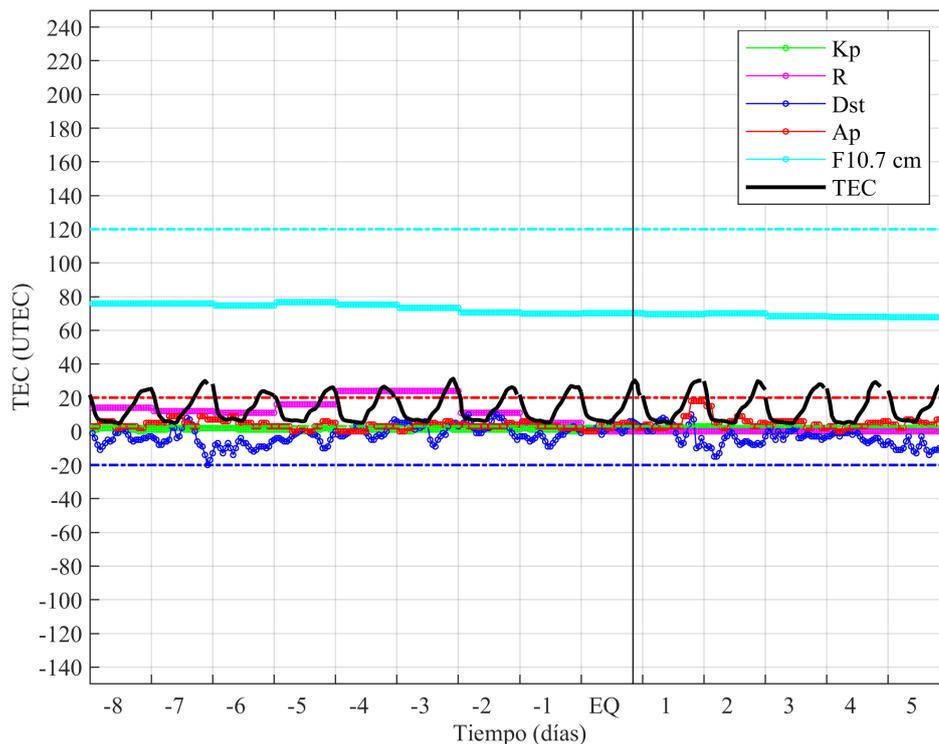
En la Figura 4.8 y 4.7 se observan los mapas de VTEC de los eventos con sismo y sin este. La primera observación es referente a la magnitud (72 vs 36 TECU), así como una tendencia de aumento de VTEC para los eventos del año 2015 (Figura 4.7). Los últimos eventos con sismo presentan, a lo largo de su período de días, una mayor concentración de VTEC. Los espacios en blanco de las Figuras 4.7 y 4.8 representan ausencia de datos (NaN).



**Figura 4.9:** Valores máximos y mínimos (en el caso del índice Dst) obtenidos por evento para los parámetros Dst y VTEC. Líneas punteadas negras representan valores de referencia.

En la Figura 4.9 se ilustran los valores máximos por evento de VTEC e índice geomagnético Dst (en este caso también el mínimo) para los eventos sin sismo (en azul a la derecha) y los eventos con sismo (de rojo a la izquierda); Las líneas punteadas negras verticales marcan  $-20$  nT para el caso del índice Dst y  $30$  TECU para VTEC. Al analizar la Figura 4.9 lo primero a denotar es que la mayoría de los eventos en ambos conjuntos sobrepasan el valor de referencia ( $< -20$  nT, establecido considerando los valores de la Tabla 3.5). Por lo tanto, ambos conjuntos presentan eventos con condiciones geomagnéticas perturbadas, sin embargo, los valores de VTEC de los eventos con sismo presentan una mayor magnitud (considérese la situación de los eventos 1 y 2). Por otra parte, si aumentamos el valor de referencia a  $Dst \leq -50$  nT (tormenta moderada (Loewe y Pröls, 1997)) la cantidad de eventos que alcanzan y/o sobrepasan dicha referencia para el conjunto sin sismo son 5 (Eventos 4, 9, 15, 16 y 20), lo que equivale a un 25 % del conjunto con valores por encima de los  $-50$  nT. Para el caso de los eventos con sismo, el conjunto está formado por 30 eventos, sin embargo, y si se observa la Tabla 3.2, las fechas correspondientes a los eventos 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 y 15 pertenecen al mismo período de días (sismos que ocurrieron el mismo día o en días cercanos), por este motivo presentan los mismos valores máximos (Figura 4.9). De tal forma que, si consideramos  $Dst \leq -50$  nT en el conjunto con sismo, se tienen dos situaciones: la primera es no hacer ninguna exclusión, de modo que 18 eventos son  $\leq -50$  nT (60 % del conjunto), la segunda situación es considerar solo un evento de aquellos que presenten el mismo máximo, tal que 10 eventos (33.33 % del conjunto) sobrepasan los  $-50$  nT. Con relación a los eventos que no sobrepasaron los  $-20$  nT, para el caso del conjunto sin sismo solo un evento (el Evento 1 con  $-16$  nT), lo que equivale a 5 % del conjunto, su VTEC fue de  $14.98$  TECU. Para el caso del conjunto con sismo y considerando el umbral definido en este trabajo para el índice Dst (Tabla 3.5), dos eventos (los Eventos 1 y 2, con  $-20$  nT), lo que equivale al 6.66 % del conjunto, sin embargo, el VTEC de estos dos eventos es superior ( $31.29$  y  $18.83$  TECU, respectivamente), siendo el evento 1 el

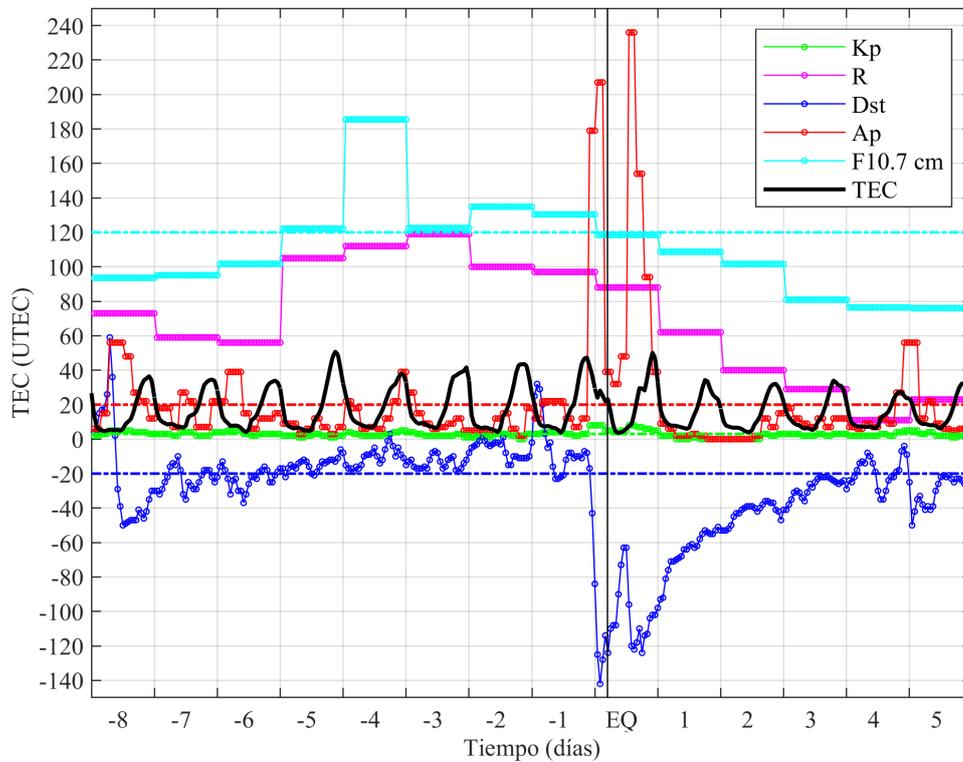
que más VTEC presenta (Figura 4.9). Cabe destacar que este comportamiento no se presentó de forma inversa, es decir, el evento sin sismo, para esta situación, no presentó mayor actividad en su índice Dst ni mayor VTEC, situación que no ocurre con el evento con sismo 1. En general, 19 eventos sin sismo sobrepasan el umbral  $Dst < -20$  nT (95 % del conjunto) y 28 eventos para el caso del conjunto con sismo (93.33 % del conjunto). En relación al VTEC, y considerando que el máximo valor registrado en el conjunto sin sismo fue de 34.13 TECU (Evento 15), se colocó una línea punteada vertical en 30 TECU para los eventos con sismo (Figura 4.9), de forma que es posible observar que 24 eventos (80 %) sobrepasan, incluso el máximo de 34.13 TECU del conjunto sin sismo, las 30 TECU.



**Figura 4.10:** Índices solares y geomagnéticos para el período correspondiente al evento con sismo número uno (Tabla 3.2). Las líneas punteadas horizontales representan las referencias establecidas para localizar posibles comportamientos perturbados de cada índice (Tabla 3.5). La línea negra vertical es la hora del sismo.

Con relación al uso de diversos índices solares y geomagnéticos, estos han sido utilizados como herramientas para poder distinguir entre perturbaciones ionosféricas relacionadas a actividades magnetosféricas y solares de perturbaciones posiblemente relacionadas a un terremoto (como ejemplo los trabajos de la Tabla 3.5). En este sentido, este trabajo analiza el flujo de radio solar F10.7, R, SSN, Kp-Ap y Dst (Ver Sección 3.3). En la Figura 4.10 se presenta el comportamiento de los índices mencionados anteriormente y del VTEC para un evento del conjunto con sismo, en específico el evento uno (Tabla 3.2). Con esto se pretende ilustrar condiciones geomagnéticas no perturbadas ya que es posible observar que durante todo el período de días considerado, catorce días, ningún índice supera los valores de referencia fijados. En relación a su VTEC, es posible observar un comportamiento uniforme.

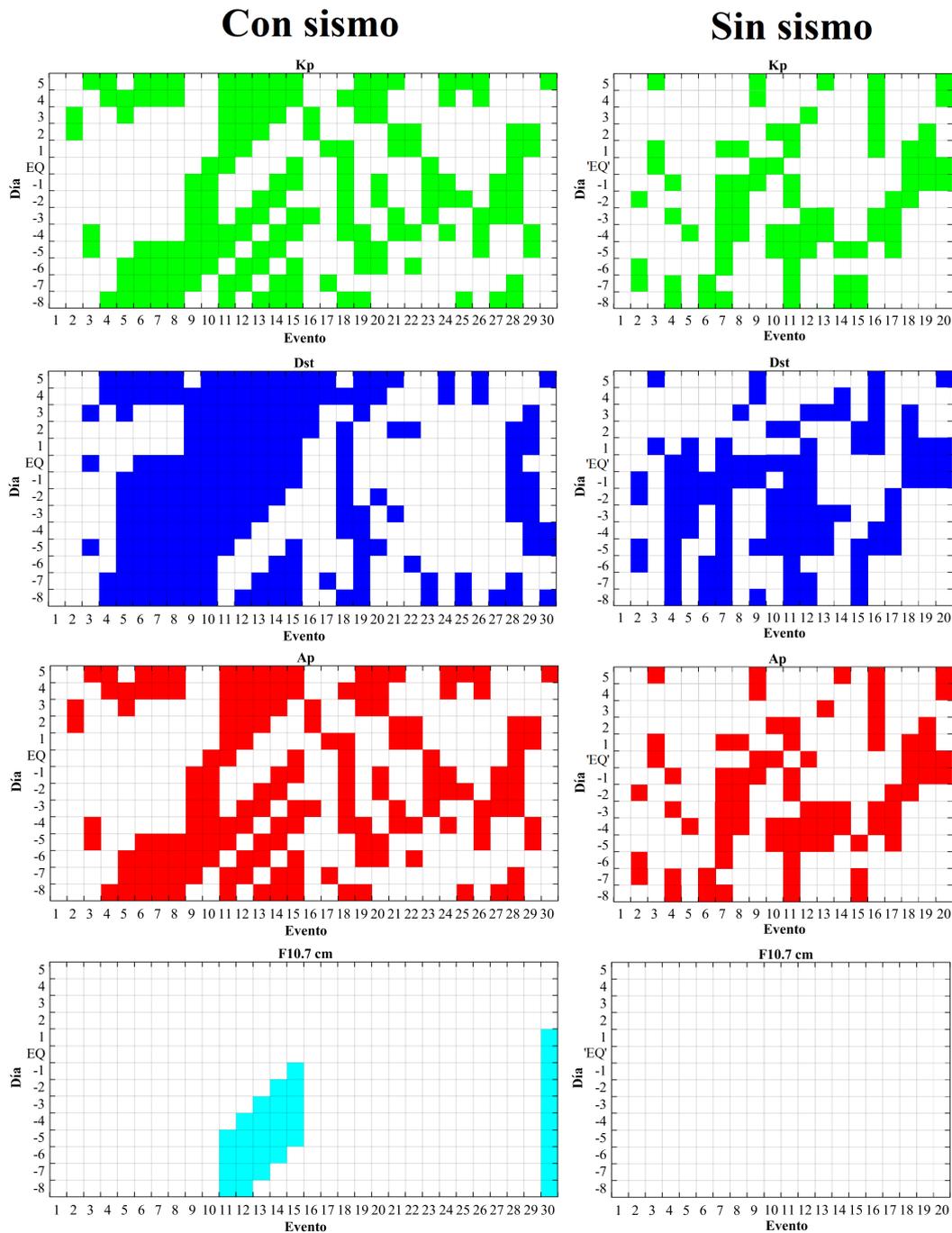
Caso contrario, tenemos el evento con sismo número quince (Figura 4.11) el cual presenta perturbaciones en todos los índices consultados para la mayoría de los días del período analizado.



**Figura 4.11:** Índices solares y geomagnéticos para el período correspondiente al evento con sismo número quince (Tabla 3.2). Las líneas punteadas horizontales representan referencias establecidas para localizar posibles comportamientos perturbados de cada índice (Tabla 3.5).

Con la intención de optimizar la detección de períodos con perturbaciones y sin estas, se diseñó la Figura 4.12, la cual ilustra por índice, los días del período en estudio que presentaron valores perturbados, lo anterior con base a las referencias previamente establecidas. Consideremos como ejemplo los casos anteriormente mencionados, el evento uno con sismo no presentó ninguna perturbación por lo tanto es posible observar en la Figura 4.12 que ninguna casilla o recuadro se encuentra coloreada para dicho evento, lo anterior por cada índice. En el caso del evento con sismo quince, si observamos el índice solar F10.7 cm denotamos que las casillas correspondientes a los días -5 al -1 (antes del terremoto) se encuentran coloreadas haciendo referencia a los días que presentaron más de 120 s.f.u. en la Figura 4.11 base. Por lo tanto, en la Figura 4.12 las casillas coloreadas representan los días perturbados, por evento, con base en la referencia establecida de cada índice solar-geomagnético. Analizando la Figura 4.12 es posible inferir que el índice solar F10.7 cm (de color cian) fue el que menos perturbaciones presentó durante el período de días de los eventos con sismo bajo estudio y que la mayoría de las perturbaciones que presentó se concentran en un período que comprende a los eventos sísmicos 11 al 15 (08 de septiembre al 12 de septiembre de 2017). En este caso particular, estas perturbaciones solares-terrestres

intensas fueron causadas por la región solar activa “AR2673” que produjo múltiples erupciones solares de clase X en el intervalo de días del 04 al 10 de septiembre de 2017, incluida una fulguración solar fuerte (X9.3) registrada el día 06 de septiembre de 2017 (11:53 UT) (Figura 3.3), posteriormente comenzó una tormenta geomagnética severa (tipo G4, el 7 y 8 de septiembre de 2017) con índice  $A_p = 96$  y también se presentó una segunda fulguración solar fuerte (X8.2) el 10 de septiembre de 2017, lo anterior concerniente al ciclo solar 24. Resulta interesante denotar que después de la fulguración principal (X9.3) ocurrió un fuerte terremoto ( $M_w = 8.2$ , Evento 15 de la Tabla 3.2) el día 08 de septiembre de 2017 a las 04:49 UT, con epicentro en la costa del Pacífico de Oaxaca; este fue el terremoto más fuerte en México desde el año 1932. Once días después, el 19 de septiembre (18:14 UT) se registró otro terremoto ( $M_w = 7.1$ ) con epicentro en la frontera de Puebla y Morelos en México (Dorman et al., 2019; Gonzalez-Esparza et al., 2018). Procediendo con el análisis de la Figura 4.12 se observa que los eventos que van del 5 al 15 (11 eventos en total) presentan la mayor acumulación de días perturbados con respecto al índice Dst y al umbral previamente definido. En estos eventos al menos un 78 % (11 días) del período de días bajo estudio esta perturbado. Además, su registro fue en el año 2017 mismo que presenta la mayor cantidad de eventos sísmicos ( $M \geq 5$ ) en este estudio (15 de 30). En general, los eventos 5 al 15, 18, 19, 28 y 29 presentan al menos 8 días (57 % del período de días) con valores que exceden el umbral definido para el índice Dst. Con respecto al comportamiento de los días perturbados para el período de los eventos sísmicos en estudio se tiene lo siguiente: el índice Dst es el más recurrente (46 %), seguido de  $K_p$  y  $A_p$  con 38 %, siendo F10.7 cm (8 %) el menos probable para el período en estudio. Con relación a los eventos sin sismo (Figura 4.12) el comportamiento de los días perturbados es similar al conjunto activo: los días perturbados en el índice Dst son más recurrentes (38 %), seguido de  $K_p$ - $A_p$  (28 %). Las diferencias más notorias con relación a los días perturbados de los diferentes índices solares-geomagnéticos entre eventos con sismo y sin este se da para  $K_p$  (38 % vs 28 %, respectivamente), es decir, es 10 % más probable observar valores que sobrepasen el umbral de  $K_p$  en el conjunto de los eventos con sismo bajo estudio. Además, el conjunto de eventos con sismo presenta perturbaciones en el índice solar F10.7 cm, cosa que no ocurre para ningún evento sin sismo (8.0 % vs 0 %, respectivamente). Finalmente, los días que exceden el umbral establecido para Dst son 8.4 % más recurrentes en los eventos con sismo (46 % vs 38 %).

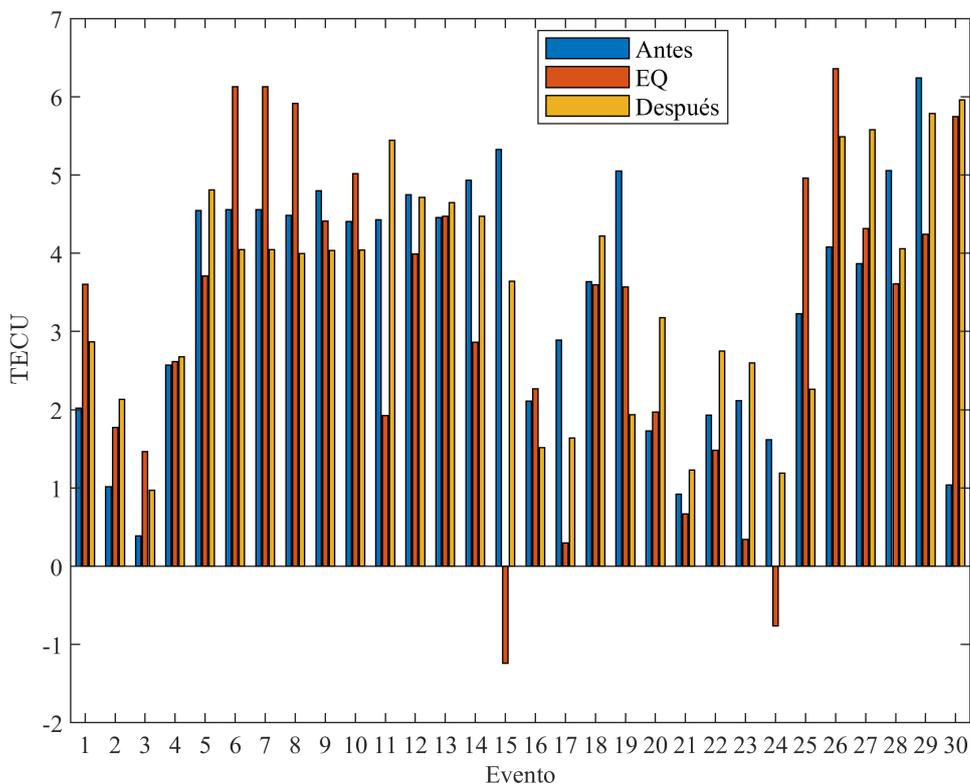


**Figura 4.12:** Días del período por evento sísmico que presentan perturbaciones para los índices Kp, Dst (nT), Ap y F10.7 cm (s.f.u.) de los conjuntos con sismo y sin sismo. Las casillas coloreadas (con color) hacen referencia a los días perturbados.

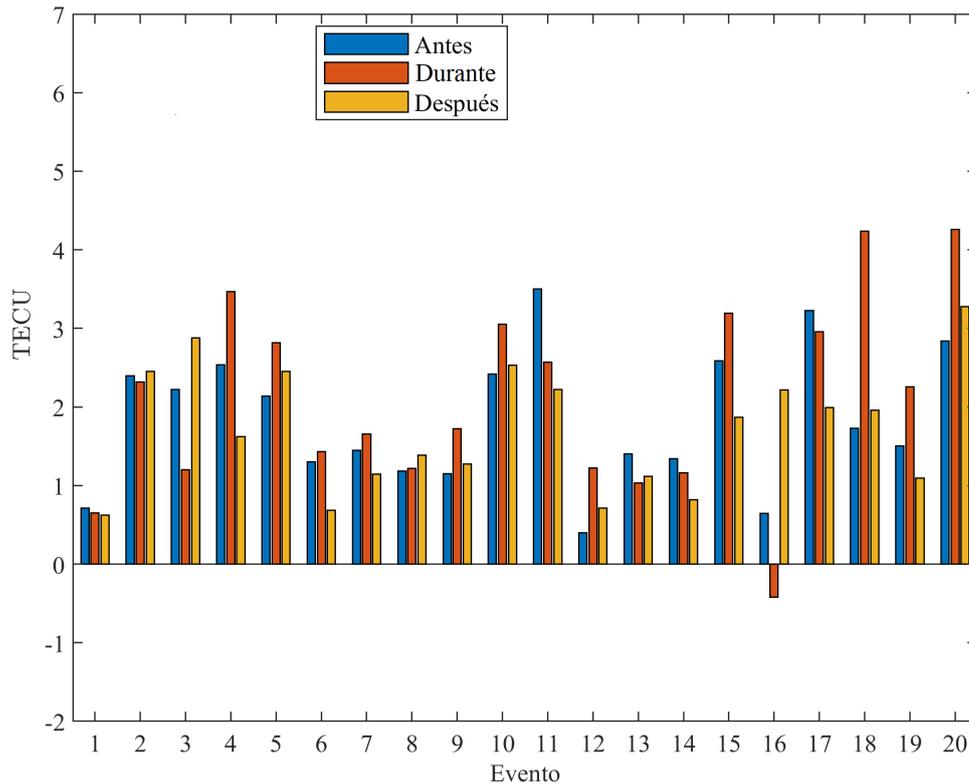
En el Capítulo 3.2 se hizo mención al ciclo solar que corresponde con el período de tiempo seleccionado en este estudio. Dentro de la muestra de eventos con sismo el año que más eventos presentó fue 2017, con 15 (Tabla 3.4). Específicamente, en el mes de Septiembre de dicho año se registraron 11 de estos eventos. En dicho mes el Sol presentó un total de 31 fulguraciones solares (Figura 3.3), 27 de clase M y 4 de clase X, entre el 04 y 10 de Septiembre, por lo tanto, es improbable que toda la agrupación de eventos de Septiembre 2017 sea consecuencia o tenga relación directa

con dichas fulguraciones, ya que estas abarcaron un período reducido de días y los eventos sísmicos van desde el 08 al 24 de Septiembre. Continuando con el análisis de la Figura 3.3, de los 30 eventos con sismo 20 (66 %) ocurrieron el mismo mes que una fulguración de tipo M1-X7. Por el contrario, de los 20 eventos sin sismo únicamente 4 eventos (20 %, 12, 17, 18 y 20) pertenecen a períodos con fulguraciones.

Dado que la fluctuación de los parámetros ionosféricos no suele seguir una función de distribución normal, algunos investigadores utilizan el valor de la mediana para distinguir perturbaciones sísmicas de las variaciones de fondo (Pulinets y Boyarchuk, 2004; Liu et al., 2004). A su vez, la mediana en conjunto con el promedio permiten distinguir la variabilidad en los datos, de forma que, cuando la mediana y el promedio se encuentran prácticamente iguales no existe variación importante en los datos, conforme incrementa esta variación la separación entre la mediana y el promedio incrementará. Dicho lo anterior, se analizó la mediana y el promedio de los eventos con la finalidad de obtener sus variaciones (Figuras 4.13 y 4.14).



**Figura 4.13:** Variaciones entre la mediana y el promedio de VTEC para los diferentes períodos de los eventos con sismo.



**Figura 4.14:** Variaciones entre la mediana y el promedio de VTEC para los eventos sin sismo.

La Figura 4.13 nos permite observar que las variaciones grandes ( $>4$  TECU) ocurren con más frecuencia en los eventos con sismo. También, observamos dos eventos con variaciones negativas (15 y 24), esto es producto de una mediana mayor que el promedio. Con lo que respecta al período antes del terremoto (de azul), sobresale la variación correspondiente al Evento 3, ya que es la que menor magnitud presenta de todos los eventos. Por el contrario, los eventos 15, 19 y 29 son los que presentan mayor variación. Para el día del terremoto (en naranja), los eventos 17 y 23 son los que menor variación presentan. No es el caso de los eventos 6, 7, 8 y 26 que presentan las variaciones más sobresalientes. Para los días posteriores al sismo (de amarillo), sobresalen los eventos 11, 26, 27, 29 y 30. Con relación a los eventos sin sismo (Figura 4.14), se pueden resaltar las siguientes variaciones: para el período denominado antes tenemos los eventos 11 y 17; para el período durante, los eventos 4, 18 y 20; y para el resto del período, también el Evento 20. Lo anterior solo hace referencia a las barras más evidentes de las Figuras 4.13 y 4.14, sin embargo, el análisis del comportamiento de todas las variaciones se encuentra agrupado en las Tablas 4.7 y 4.8. El TEC se ve afectado por condiciones geomagnéticas y solares, esto resulta en cambios en su magnitud. No obstante, es posible que al registrarse un evento de clima espacial el TEC no sufra una amplificación. Al hablar de variaciones nos referimos a posibles valores de VTEC que no tienen un comportamiento semejante para su respectivo período, estas variaciones pueden ser consecuencia de efectos geomagnéticos-solares. Lo anterior, expone la siguiente pregunta ¿Es posible que las variaciones entre el promedio y la mediana reflejen los eventos con perturbaciones de clima espacial? Para el caso de los eventos con sismo, los eventos 1 y 2 no presentan perturbaciones

en Dst y Kp (Figura 4.12) y los mismos presentan variaciones mínimas y medianas (Tabla 4.7). A su vez, la mayoría de los eventos perturbados presentan grandes variaciones (50 % vs 63 %). Anteriormente, se demostró que el 93.33 % de los eventos con sismo sobrepasan, a diferente grado, el umbral definido para Dst y los eventos, únicos, con variación Mínima fueron 13 (43 %), Mediana, 18 (60 %) y Grande, 19 (63 %), es decir, la mayoría presenta de variaciones medianas a grandes, siendo la última mayor. Sin embargo, ocurre todo lo contrario para los eventos sin sismo, donde prácticamente no existen eventos con variaciones Grandes 2 (10 %), Medianas 11 (55 %) y Mínimas 15 (75 %) y sí se consideran los eventos contaminados para Dst (4, 7, 11, 12) estos no pertenecen a la categoría de variación Grande (Tabla 4.8). Es decir, de existir una relación entre los días perturbados y las variaciones de tipo Grande ( $> 4$  TECU) entre la mediana y el promedio de VTEC (como se puede observar con los eventos con sismo) esta no funciona de la misma manera para los eventos sin sismo. Por lo tanto, de forma general no es posible que las variaciones entre el promedio y la mediana reflejen a los eventos, con y sin sismo, con perturbaciones de clima espacial.

**Tabla 4.7:** Variaciones para los días antes, durante y después, en TECU, de los eventos con sismo y considerando la mediana y el promedio.

Período / Tipo	Mínima ( $\leq 2$ )	Mediana ( $> 2$ ó $\leq 4$ )	Grande ( $> 4$ )
Antes	2, 3, 20, 21, 22, 24, 30	1, 4, 16, 17, 18, 25, 23, 27	5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 19, 26, 28, 29
Durante (EQ)	2, 3, 11, 15, 17, 20, 21, 22, 23, 24	1, 4, 5, 12, 14, 16, 18, 19, 28	6, 7, 8, 9, 10, 13, 25, 26, 27, 29, 30
Después	3, 16, 17, 19, 21, 24	1, 2, 4, 8, 15, 20, 22, 23, 25	5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 18, 26, 27, 28, 29, 30

**Tabla 4.8:** Variaciones para los días, en TECU, correspondientes a los eventos sin sismo y considerando la mediana y el promedio.

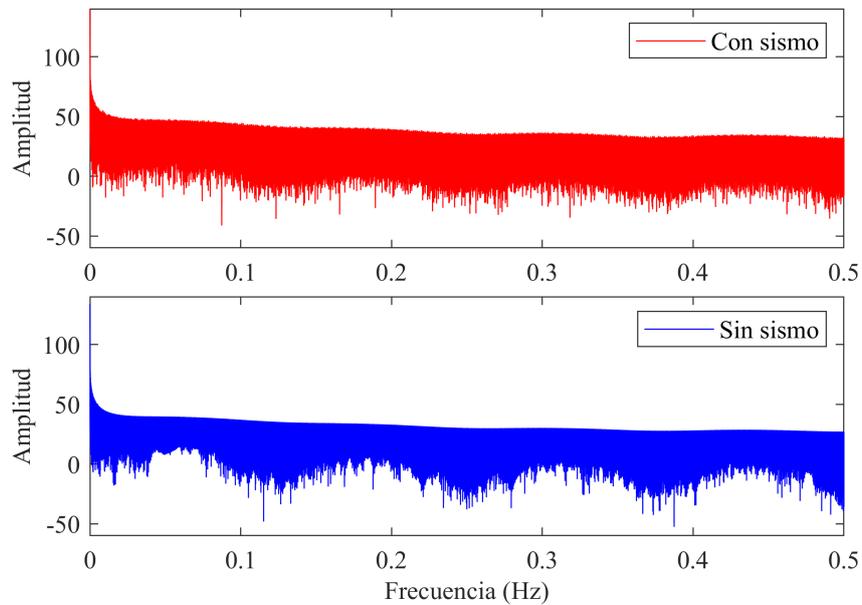
Período / Tipo	Mínima ( $\leq 2$ )	Mediana ( $> 2$ ó $\leq 4$ )	Grande ( $> 4$ )
Antes	1, 6, 7, 8, 9, 12, 13, 14, 16, 18, 19	2, 3, 4, 5, 10, 11, 15, 17, 20	
Durante	1, 3, 6, 7, 8, 9, 12, 13, 14, 16	2, 4, 5, 10, 11, 15, 17, 19	18, 20
Después	1, 4, 6, 7, 8, 9, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 19	2, 3, 5, 10, 11, 16, 20	

## 4.2. Resultados del tratamiento de los datos

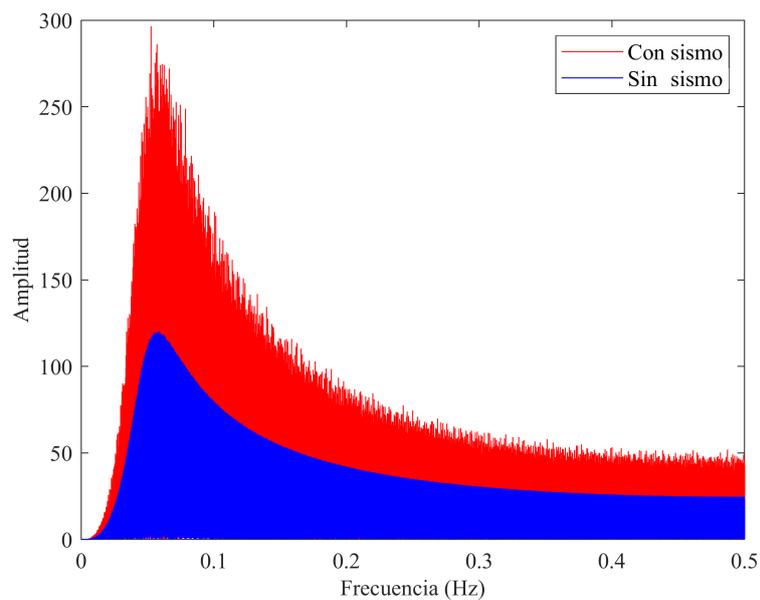
### 4.2.1. Filtro digital

Otro punto de este trabajo fue la aplicación de filtros digitales a la señal TEC. Con respecto a esto, no se obtuvieron buenos resultados al utilizar filtros de tipo

pasa banda. Los mejores resultados se obtuvieron aplicando filtros de tipo pasa alta (Figuras 4.15 y 4.16). En específico, en la Figura 4.16 es posible observar como la señal sin sismo esta prácticamente limpia ó “lisa”, ambas señales fueron tratadas de la misma forma, situación que no se presenta con la señal con sismo, cuya superficie mantiene irregularidades, además de la evidente amplitud superior. Otra diferencia entre las señales es visible, con los filtros seleccionados, en la Figura 4.15 donde la señal sin sismo presenta un comportamiento senoidal más marcado.



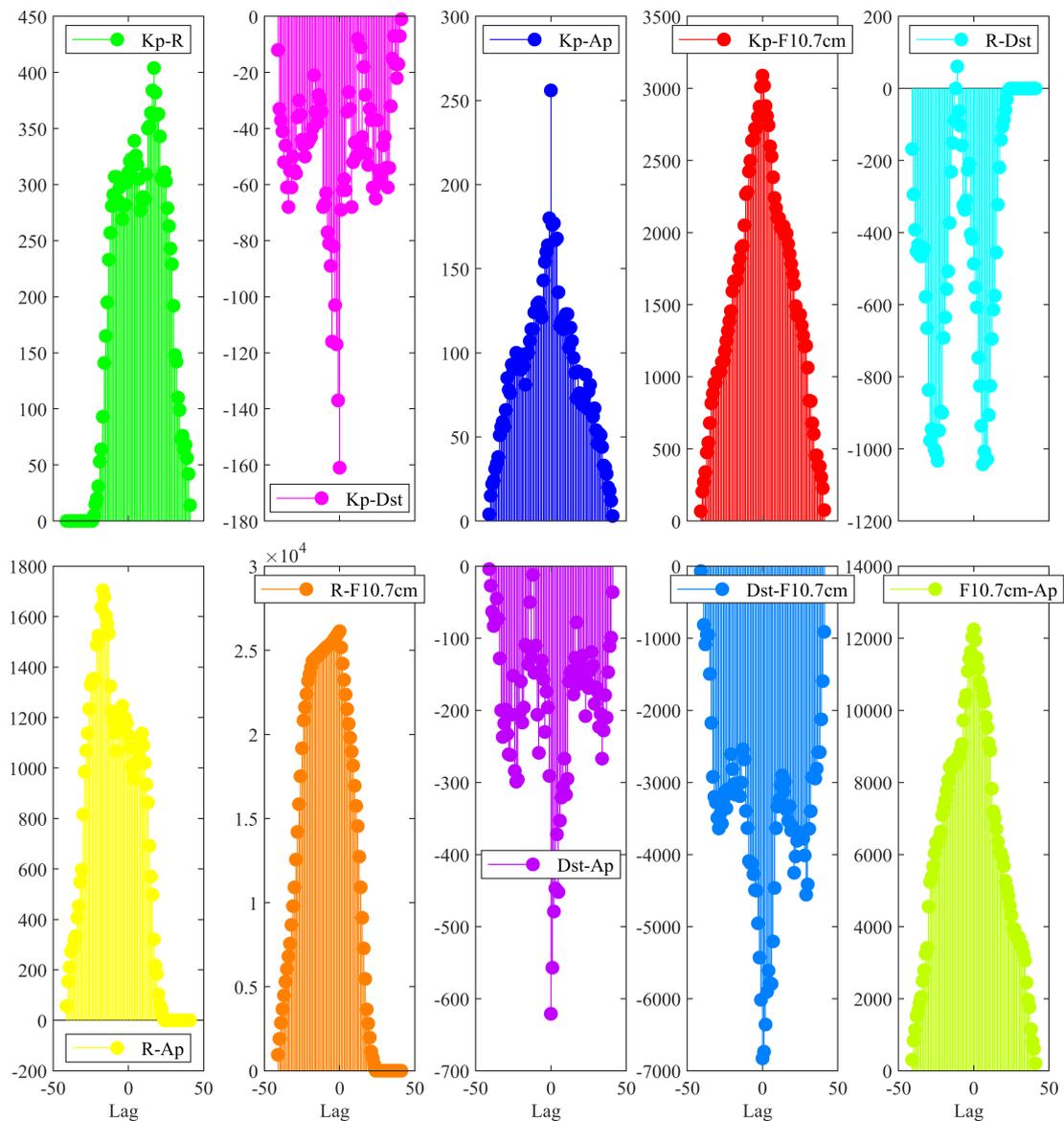
**Figura 4.15:** Representación lineal de la señal VTEC con un filtro FIR de orden 16.



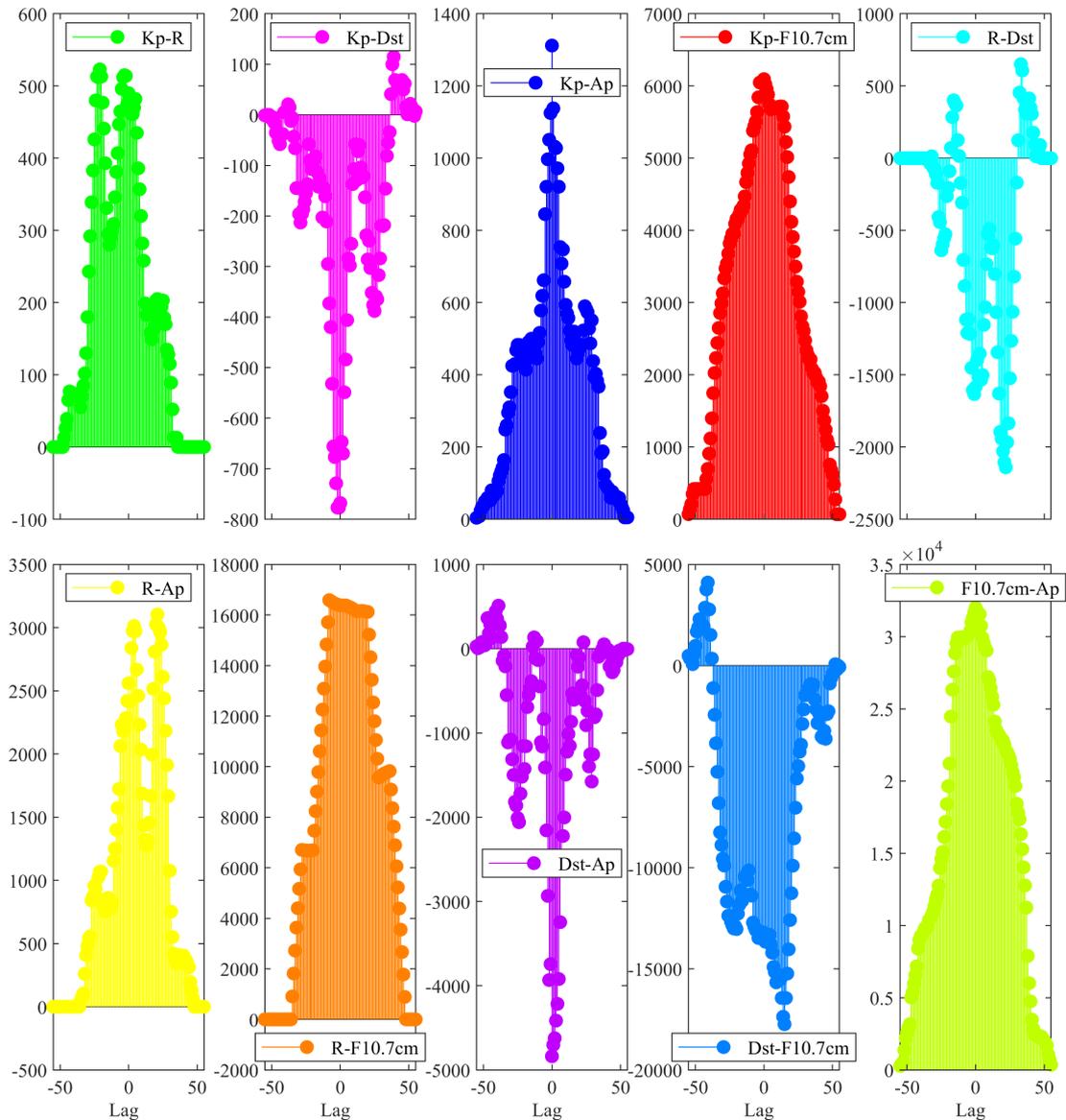
**Figura 4.16:** Representación lineal de la señal VTEC con un filtro IIR de orden 4.

A partir de este punto, resulta evidente que agregar todas las Tablas y Figuras relacionadas a los resultados presentados a continuación sería poco eficiente, dada su magnitud. Sin embargo, éstas formaron parte de los resultados y análisis presentados. Por lo tanto, todas las Figuras del Capítulo 4 se encuentran disponibles, para su consulta, en línea, en el siguiente enlace: <https://drive.google.com/drive/folders/1YnsLkTBEqKtwnsBR2osqomIRpmae9HS1?usp=sharing>.

#### 4.2.2. Correlación cruzada



**Figura 4.17:** Correlación cruzada entre índices geomagnéticos y/o solares pertenecientes al Evento 1 con sismo. El eje Y muestra el coeficiente de correlación y el eje X el lag (Tabla 3.2).



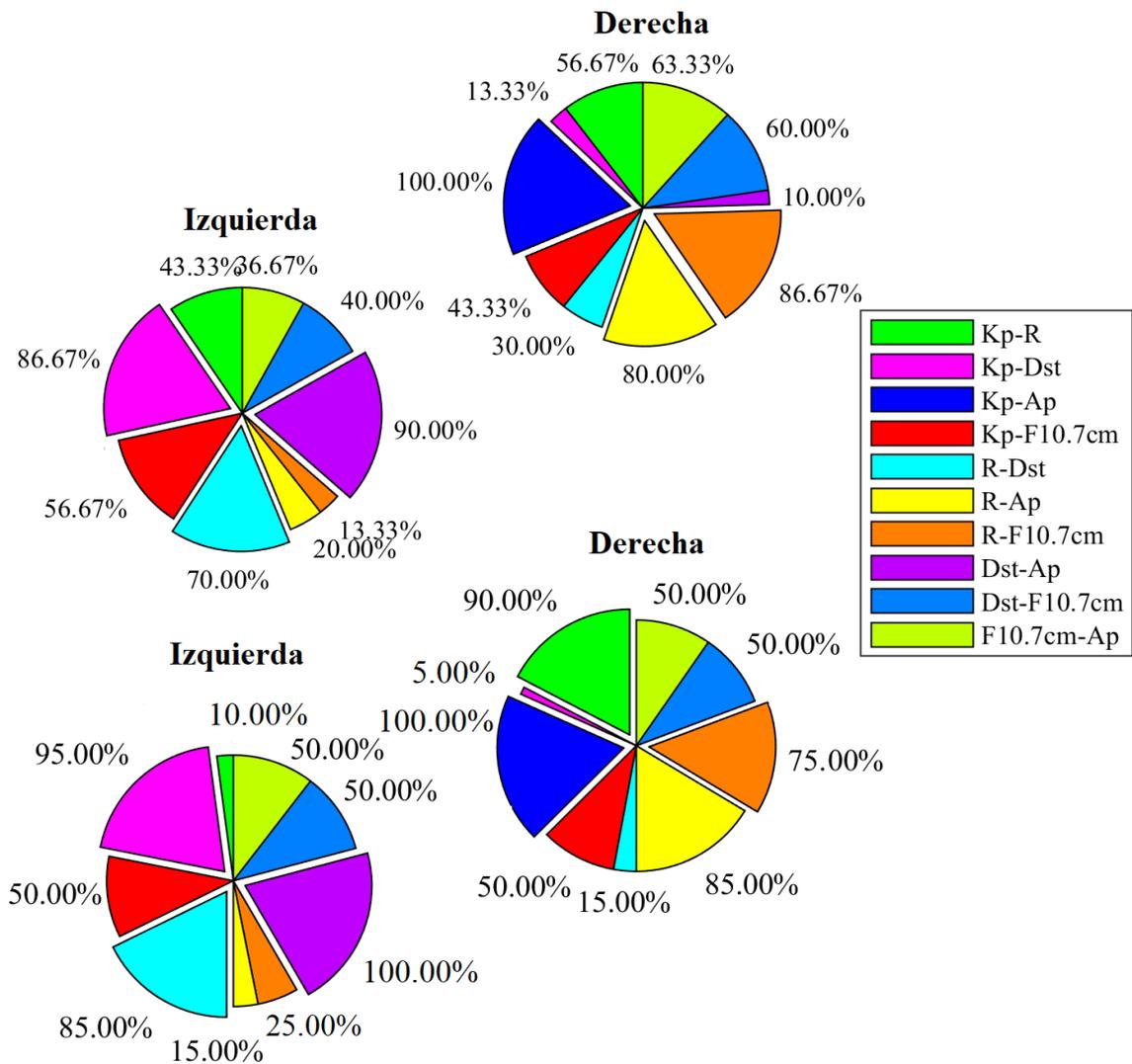
**Figura 4.18:** Correlación cruzada entre índices geomagnéticos y/o solares pertenecientes al Evento 13 sin sismo. El eje Y muestra el coeficiente de correlación y el eje X el lag (Tabla 3.1).

Una vez obtenidas las correlaciones cruzadas entre índices para los eventos con y sin sismo (como ejemplo se presentan la Figuras 3.8, 4.17 y 4.18). Se procedió a extraer y organizar información que permitiera su análisis y comparación. Algunas de estas características ayudan a la clasificación de objetivos, por ejemplo, si la distribución de una clase se encuentra sesgada hacia un lado (digamos, a la izquierda) y la distribución de otra clase está sesgada al otro lado (es decir, a la derecha), éstas pueden clasificarse en función del sesgo. También, la diferente asimetría de las distribuciones dentro de las clases ayuda a explicar las características de los datos. Por lo tanto, la asimetría es una medida útil para lograr los objetivos de clasificación (Suthaharan, 2015). Además, se consideró el ajuste, curtosis e inclinación. Para calcular el nivel de sesgo se hicieron las siguientes condiciones: si su valor es menor a  $-1$  ó mayor

que 1, entonces los datos se encuentran muy sesgados. De otra forma, si su valor se encuentra entre  $-1$  y  $-0.5$  ó entre  $0.5$  y  $1$ , entonces los datos están moderadamente sesgados. Con respecto a la inclinación, si su valor es mayor a  $0$ , es decir, es positivo, se declara como positivamente sesgada a la derecha, si de lo contrario, es un valor inferior a  $0$  ó negativo, entonces los datos están sesgados negativamente ó hacia la izquierda. Para determinar el ajuste se consideró la longitud de la señal, la cual es de  $336$  puntos. Por lo tanto, si el punto más alto de la distribución es igual a la longitud de la señal el ajuste se encuentra en  $0$ , si el punto más alto es superior entonces el mejor ajuste se encuentra después de  $0$  y si este es inferior, entonces está antes de  $0$ . En el caso de la asimetría, esta sería aproximadamente simétrica si su valor es mayor a  $-0.5$  y menor que  $0.5$ , si su valor es igual a  $0$  entonces es perfectamente simétrica, de lo contrario es asimétrica. Además, para determinar el tipo de curtosis y sus excesos se establecieron las siguientes condiciones: si su valor es igual a  $3$  esta se asigna de tipo Mesocúrtica, si su valor es menor a  $3$  entonces será de tipo Platicúrtica y, si el valor de curtosis es mayor a  $3$  entonces corresponde a un comportamiento Leptocúrtico. Establecidas las categorías, se procedió a organizar los resultados de cada correlación, de los eventos con y sin sismo, como se muestra en la Tabla 4.9. Además, para su posterior análisis y comparación se diseñaron las Figuras 4.19, 4.20, 4.21, 4.22 y 4.23.

**Tabla 4.9:** Ejemplo de la recopilación de los valores asignados por característica definida para evaluar la correlación cruzada entre índices, en este caso del Evento 1 con sismo. Se abrevió aproximadamente como “Aprox”.

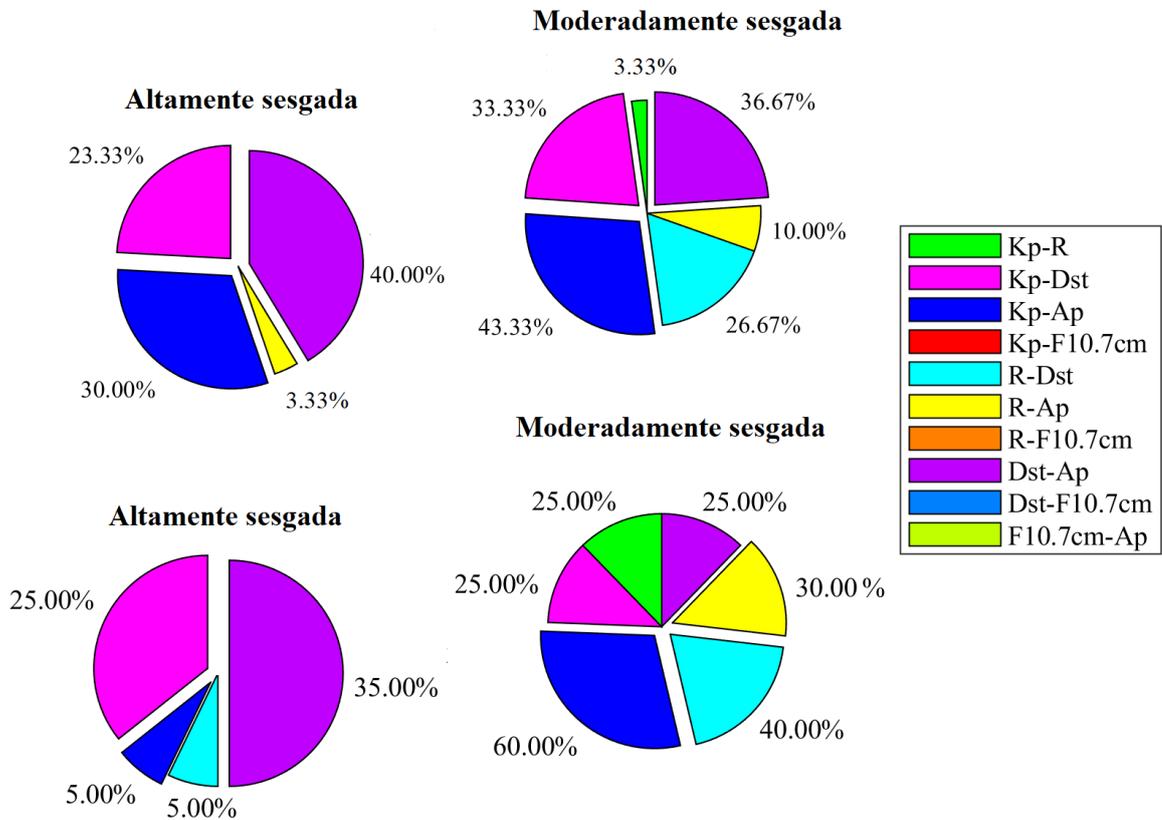
Evento / Correlación	Inclinación	Mejor ajuste	Simetría	Nivel de Curtosis
Evento 1 con sismo				
Kp - R	Izquierda	Después de 0	Aprox. simétrica	1.40
Kp- Dst	Izquierda	Antes de 0	No simétrica	5.35
Kp - Ap	Derecha	En 0	Aprox. simétrica	3.01
Kp - F10.7 cm	Izquierda	En 0	Aprox. simétrica	1.96
R- Dst	Izquierda	Después de 0	Aprox. simétrica	1.72
R - Ap	Izquierda	Antes de 0	Aprox. simétrica	1.45
R- F10.7 cm	Izquierda	En 0	Aprox. simétrica	1.30
Dst - Ap	Izquierda	Después de 0	No simétrica	4.95
Dst - F10.7 cm	Izquierda	En 0	Aprox. simétrica	3.44
F10.7 cm - Ap	Izquierda	En 0	Aprox. simétrica	1.90



**Figura 4.19:** Por correlación entre índices se muestra el porcentaje de eventos asignados a las categorías definidas para la inclinación. Parte superior eventos con sismo y parte inferior eventos sin sismo.

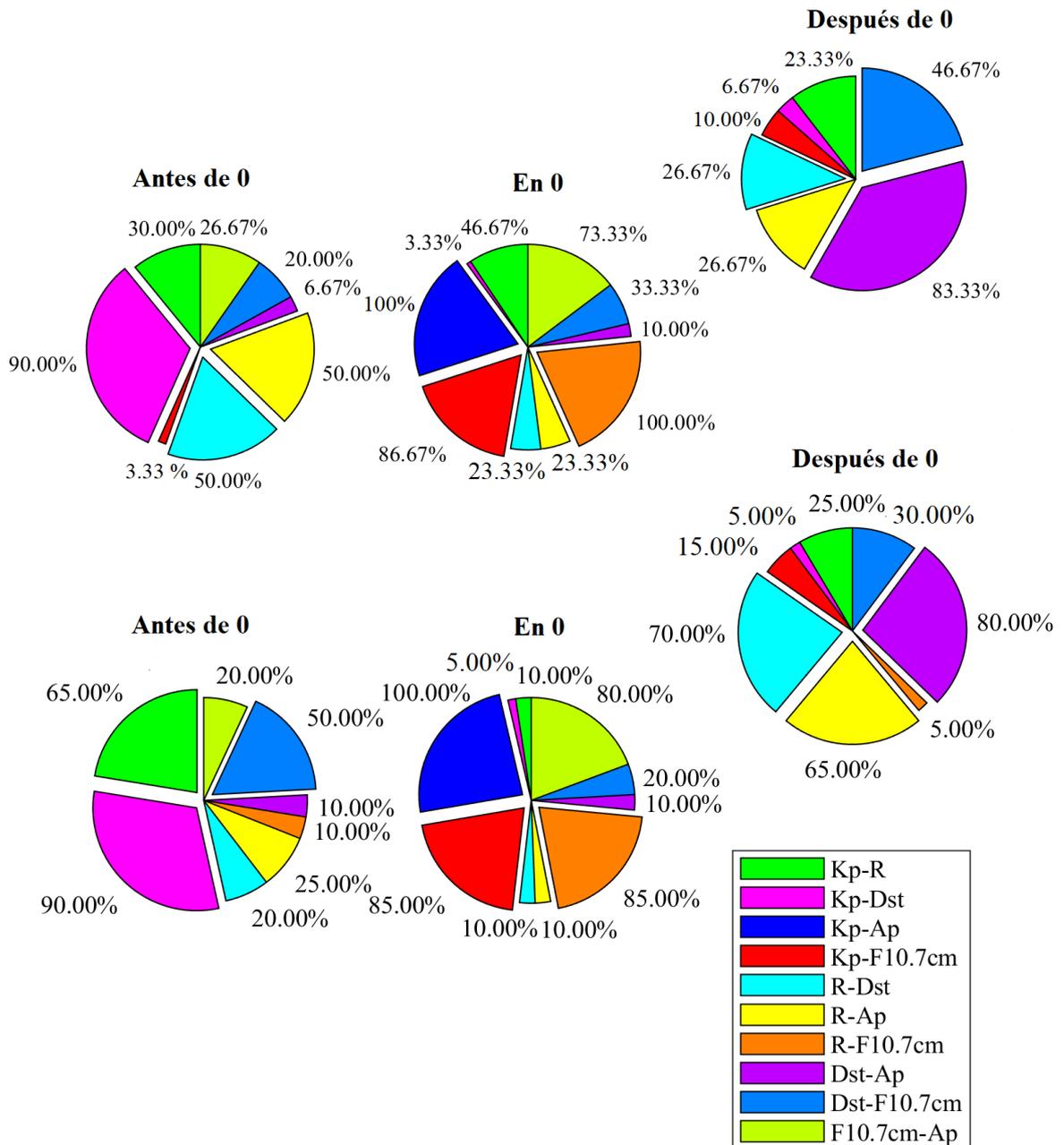
La Figura 4.19 presenta el porcentaje de eventos por correlación que pertenece a cada etiqueta asignada para evaluar la inclinación (Izquierda – Derecha). Para el caso de inclinación hacia la izquierda, las correlaciones Kp–Dst (86.67 % vs 95 %), R–Dst (70 % vs 85 %) y Dst–Ap(90 % vs 100 %) presentan mayor porcentaje de eventos con dicha característica, tanto para eventos con y sin sismo. Para el caso de inclinación hacia la derecha, son las correlaciones Kp–Ap (100 % vs 100 %), Kp–F10.7cm (43.33 % vs 50 %), R–Ap (80 % vs 85 %). Por lo tanto, su comportamiento es semejante. Además, un mismo porcentaje de eventos sin sismo presenta inclinación a la izquierda (50 %) y derecha (50 %) para las correlaciones Dst–F10.7cm y F10.7cm–Ap. Este tipo de comportamiento no se presenta para dichas correlaciones de los eventos con sismo. No obstante, el tener un comportamiento análogo en las correlaciones podría sugerir que la inclinación no representa ninguna particularidad de los datos que permita una buena distinción entre estos. No obstante, y de forma particular para los eventos con sismo, podemos destacar lo siguiente: el evento 9 y

10 (2 de 30 eventos) presentan el mismo tipo de inclinación para todas sus correlaciones. Todas las correlaciones (100 %) del evento 25 están inclinadas a la derecha. Lo anterior es similar para el evento 2 (90 %) y 23.



**Figura 4.20:** Por correlación entre índices se muestra el porcentaje de eventos asignados a las categorías definidas para el sesgo. Parte superior eventos con sismo y parte inferior eventos sin sismo.

También, en la Figura 4.20 se observa el nivel de inclinación, o sesgo, que presentaron las correlaciones. Esto tiene relación con lo anteriormente descrito. Por lo tanto, no solo se analiza la inclinación de la distribución sino también su nivel (alto ó moderado). Es preciso mencionar que los porcentajes faltantes entre las correlaciones se deben a que ciertos eventos no pertenecen a las categorías asignadas, por lo tanto, su nivel de sesgo fue indefinido. Con respecto a correlaciones altamente sesgadas, para los eventos con sismo Dst–Ap es la que representa un porcentaje alto (40 %). Para el caso de los eventos sin sismo, es Dst–Ap con 35 %. Con inclinación moderadamente sesgada tenemos Kp–Ap (43.33 %) y Kp–Ap (60 %), con y sin sismo, respectivamente. Al ser, en su mayoría, los máximos porcentajes inferiores a 50 la mayoría de las correlaciones para los eventos con y sin sismo son aproximadamente simétricas (Figura 4.22).



**Figura 4.21:** Por correlación entre índices se muestra el porcentaje de eventos asignados a las categorías definidas para el ajuste. Parte superior eventos con sismo y parte inferior eventos sin sismo.

Para eventos con sismo y con relación al ajuste obtenido de sus correlaciones (Figura 4.21 superior), se puede observar lo siguiente. Para Antes de 0:

- La ausencia de la correlación Kp–Ap.
- La ausencia de la correlación R–F10.7 cm.
- El 90 % de los eventos presentan un ajuste Antes de 0 por correlación Kp–Dst.
- La correlación con menor porcentaje en ajuste Antes de 0 corresponde a Kp–F10.7 cm con 3.33 %.
- El 50 % de los eventos presentan ajuste Antes de 0 para las correlaciones R–Dst y R–Ap.

- En general, 3 de 10 correlaciones (Kp–Dst, R–Dst, R–Ap) presentan su mayor porcentaje en ajuste Antes de 0.

Para el caso de ajuste En 0 (Figura 4.21 superior):

- Todos los eventos (100 %) para las correlaciones R–F10.7 cm y Kp–Ap presentan su ajuste en 0.
- La correlación con menor porcentaje en ajuste en 0 corresponde a Kp–Dst con 3.33 %.
- Las correlaciones R–Dst y R–Ap comparten el mismo porcentaje de eventos (23.33 %) con ajuste en 0.
- Las correlaciones F10.7cm–Ap y Kp–F10.7cm presentan el segundo (73.33 %) y el tercer (86.67 %) mayor porcentaje, respectivamente, de eventos con ajuste en 0.
- En general, 5 de 10 correlaciones (Kp–Ap, Kp–R, F10.7 cm–Ap, R–F10.7cm y Kp–F10.7cm) presentan su mayor porcentaje en ajuste en 0.

Para el caso de ajuste Después de 0:

- El 83.33 % de los eventos presenta su ajuste después de 0 en correlación Dst–Ap.
- El 6.67 % de los eventos presenta su ajuste después de 0 por correlación Kp–Dst.
- El 46.67 % de los eventos presentan su ajuste después de 0 para la correlación Dst–F10.7cm.
- Las correlaciones Kp–Ap, R–F10.7cm y F10.7cm–Ap no presentan su ajuste después de 0 para ningún evento. Por lo tanto, el ajuste de estas correlaciones permanece entre Antes de 0 y En 0, predominando En 0.
- En general, 2 de 10 correlaciones (Dst–Ap y Dst–F10.7cm) presentan su mayor porcentaje de ajuste después de 0.

El mejor ajuste de una distribución de datos es la posición donde la curva tiene su máximo. En consecuencia, mientras la correlación cruzada mueve una señal frente a otra, el máximo ajuste nos indica la posición donde la similitud de las señales es mejor. Para eventos sin sismo y con relación al ajuste obtenido de sus correlaciones se puede deducir lo siguiente:

Para ajuste Antes de 0 (Figura 4.21 inferior):

- El 90 % de los eventos presentan su ajuste Antes de 0 por correlación Kp–Dst.
- Las correlaciones Kp–Ap y Kp–F10.7cm no presentan eventos con ajuste Antes de 0.
- Las correlaciones Kp–Dst y R–F10.7cm presentan el mismo porcentaje (10 %) de eventos con ajuste Antes de 0.
- Las correlaciones Kp–R y Dst–F10.7cm presentan el segundo (65 %) y el tercer (50 %) mayor porcentaje, respectivamente, de eventos con ajuste Antes de 0.

Para ajuste En 0 (Figura 4.21 inferior):

- Todos los eventos (100 %) para la correlación Kp–Ap presentan su ajuste en 0.
- Las correlaciones R–Dst, R–Ap, Kp–R y Dst–Ap presentan el mismo porcentaje (10 %) de eventos con ajuste en 0.
- Las correlaciones R–10.7 cm y Kp–F10.7cm presentan el mismo porcentaje (85 %) de eventos con su ajuste en 0.
- Las correlaciones Kp–Ap, R–F10.7cm y Kp–F10.7 cm presentan el primer (100 %), segundo (90 %) y tercer (86.67 %) porcentaje más alto, respectiva-

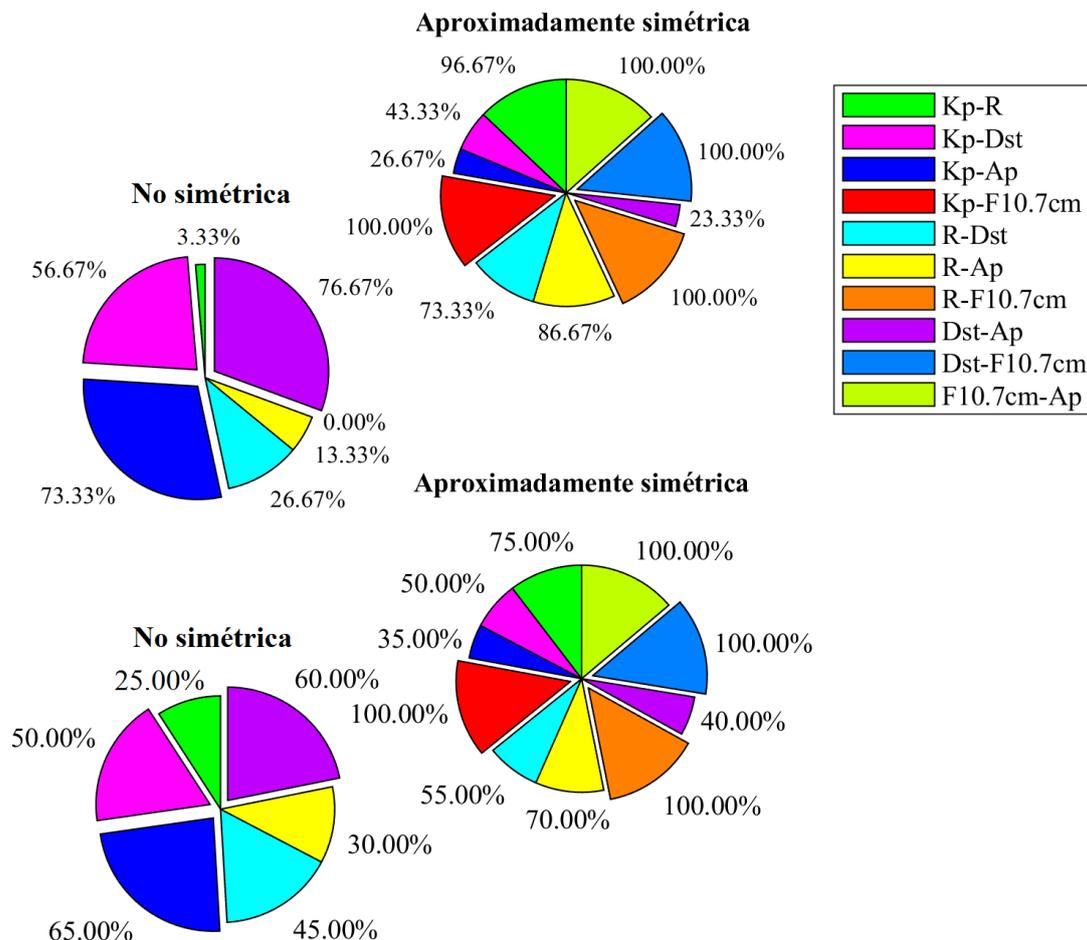
mente, de eventos con ajuste en 0.

- Todas las correlaciones tienen al menos un evento con ajuste en 0.
- La correlación con menor porcentaje de ajuste en 0 corresponde a Kp–Dst con 5 %.

Para ajuste Después de 0 (Figura 4.21 inferior):

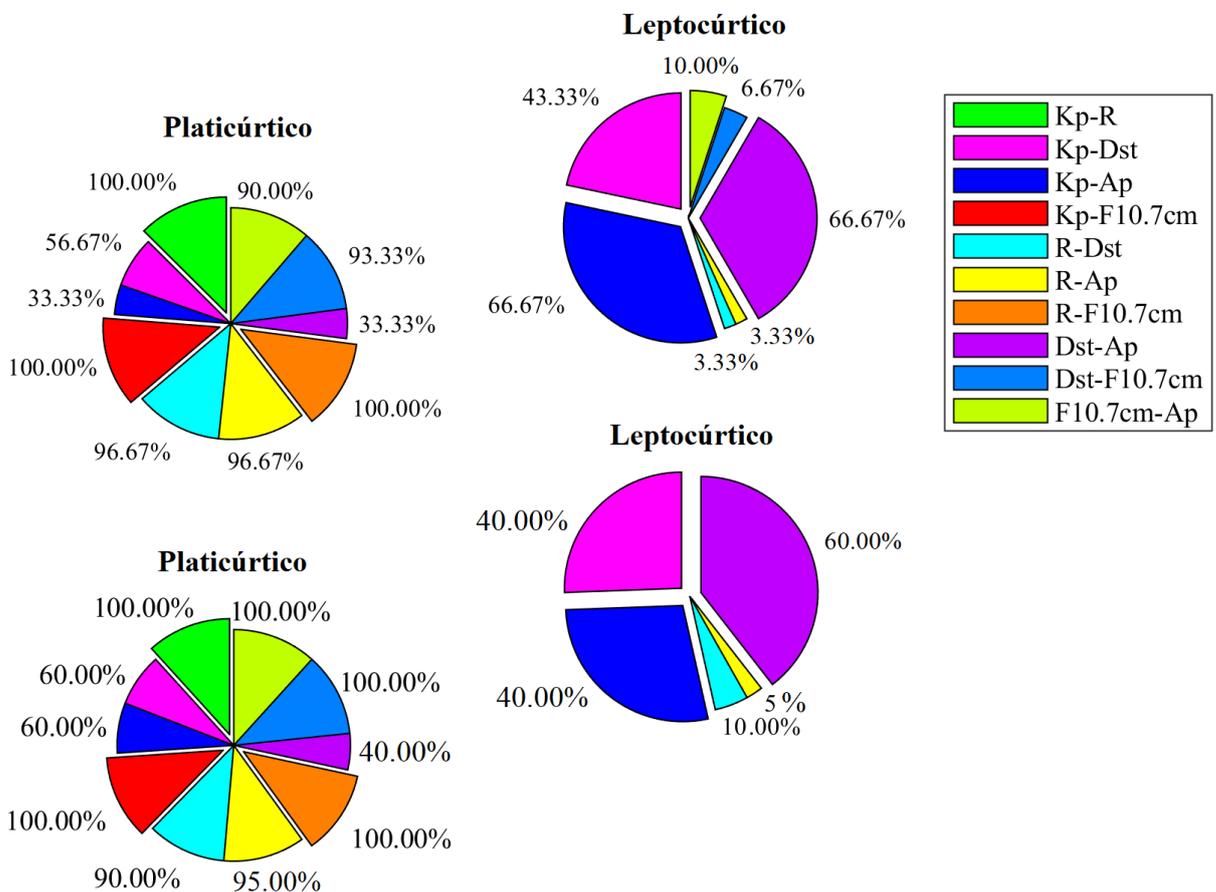
- Los mayores porcentajes de eventos con ajuste después de 0 pertenecen a la correlación Dst–Ap con 80 %, seguido de R–Dst con 70 %.
- La ausencia de correlaciones Kp–Ap y F10.7cm–Ap para el ajuste después de 0.

De modo que, y de forma particular, la mayoría de las correlaciones presentan su mejor ajuste en 0. Ningún evento presenta todas sus correlaciones con ajuste en 0, ni antes, ni después. No obstante, para el evento 30, 9 de sus 10 (90 %) correlaciones tienen ajuste en 0. Además, los eventos 28 y 29 presentan 40 % de sus correlaciones con mejor ajuste después de 0. Los eventos que presentan al menos 70 % de sus correlaciones con ajuste en 0 son del 5 al 8, 22 y 30 (6 de 30 eventos). El evento 4 es el único que presenta la mayoría de sus correlaciones con ajuste antes de 0.



**Figura 4.22:** Por correlación entre índices se muestra el porcentaje de eventos asignados a las categorías definidas para la simetría. Parte superior eventos con sismo y parte inferior eventos sin sismo.

En cuanto a la simetría (Figura 4.22), se obtuvieron los siguientes resultados: Para las correlaciones Kp–F10.7cm, R–F10.7cm, Dst–F10.7cm, F10.7cm–Ap todos los eventos (100 %) fueron aproximadamente simétricos, esto para eventos con y sin sismo. De modo que son similares en cuanto a su simetría. Del resto de correlaciones, las que presentan mayor diferencia, por la cantidad de eventos que cumplen esa propiedad, son: para “No simétrica” Kp–Ap (73.33 % vs 65 %) y Dst–Ap (76.67 % vs 60 %), con y sin sismo, respectivamente. Para la categoría de “Aproximadamente simétrica” tenemos las correlaciones Kp–R (96.67 % vs 75 %), R–Dst (73.33 % vs 55 %) y R–Ap (86.67 % vs 70 %), con y sin sismo, respectivamente. Finalmente, la correlación Kp–Dst se comporta de forma similar para ambas categorías y para los dos tipos de eventos. En específico, ningún evento presenta total simetría. Por lo tanto, no existe un evento donde todas sus correlaciones sean simétricas. Únicamente aproximadamente simétrica, y en ese aspecto destacan las correlaciones de los eventos 1, 9, 10, 14, 15, 17, 22, 23, 25, 26, 27, 29 (80 % de sus correlaciones son aproximadamente simétricas). Para los eventos con sismo la categoría aproximadamente simétrica predomina.



**Figura 4.23:** Por correlación entre índices se muestra el porcentaje de eventos asignados a las categorías definidas para la curtosis. Parte superior eventos con sismo y parte inferior eventos sin sismo.

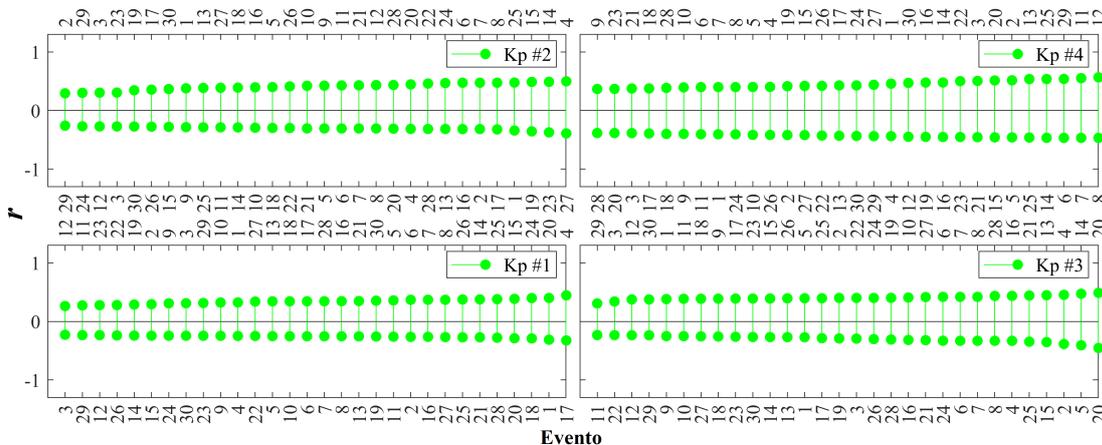
Con relación a la curtosis de las correlaciones de ambos eventos, en la Figura 4.23 es posible observar como la mayoría presenta comportamientos similares. En es-

te sentido, las correlaciones Kp–R (100 %), Kp–F10.7cm (100 %), R–Ap (96.67 %), R–F10.7cm (100 %) se encuentran, prácticamente, para todos los eventos, en la categoría de Platicúrtico. Siendo la correlación con mayor diferencia R–Dst (96.66 % vs 90 %) y Kp–Dst (56.67 % vs 60 %), ambas para la categoría de Platicúrtico y, para Leptocúrtico la correlación Kp–Ap (66.67 % vs 40 %, eventos con y sin sismo, respectivamente). Por otra parte, es preciso mencionar que entre los índices Kp y R podría existir una buena correlación para el período de observación. También, en las correlaciones pertenecientes a los eventos sin sismo (por ejemplo, la Figura 4.18) se observaron comportamientos nuevos (en comparación con los eventos con sismo). Por último, en la Tabla 4.10 se muestran las correlaciones cruzadas que obtuvieron, con base a su porcentaje de eventos, la mayor diferencia, por categoría, para eventos con sismo y sin sismo.

**Tabla 4.10:** Correlaciones cruzadas, por categoría, con la mayor diferencia entre eventos con y sin sismo.

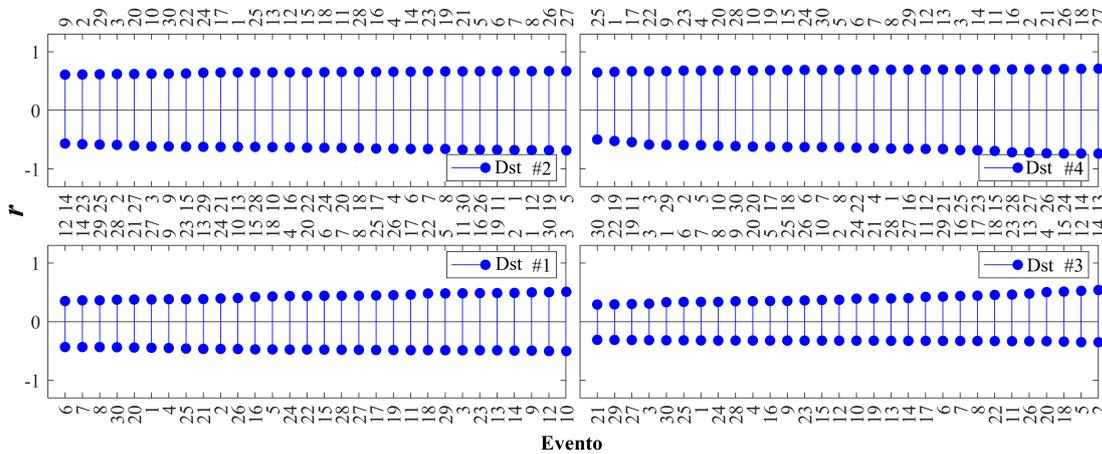
Inclinación	Sesgo	Ajuste	Asimetría	Curtosis
Kp–R	Kp–R	Kp–R	Kp–R	Kp–Ap
Dst–Ap	R–Ap	R–Dst	Kp–Ap	R–Dst
	Dst–Ap	R–Ap	R–Dst	Kp–Dst
		R–F10.7cm	Dst–Ap	
		Dst–F10.7cm		

Continuando con los resultados, tenemos la correlación entre el mismo tipo de índice (Figura 3.7). Para este análisis se normalizaron y ordenaron las correlaciones, de modo que los coeficientes de correlación ( $r$ ) más y menos cercanos a 0 sean fácilmente detectables. En concreto las Figuras 4.24, 4.25, 4.26, 4.27 y 4.28 presentan la correlación cruzada normalizada obtenida entre una señal sin sismo explícito (como se mencionó en la Sección 3) contra todas las señales de los eventos con sismo (Tablas 3.2 y 3.1). Es decir, todas las señales pertenecientes al conjunto con sismo se correlacionaron de forma cruzada con cada una de las señales del conjunto sin sismo.



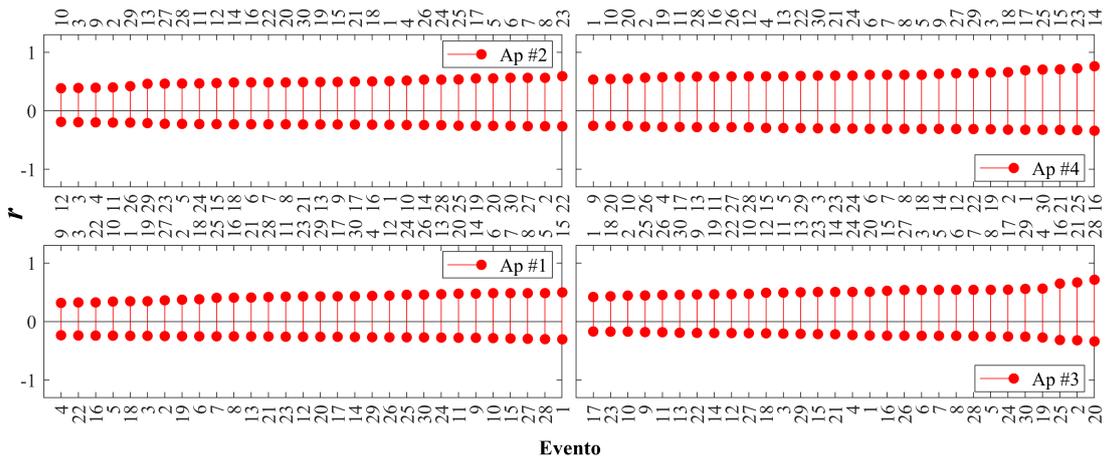
**Figura 4.24:** Correlación cruzada normalizada entre el índice Kp del evento sin sismo #1, #2, #3 y #4 y el índice Kp de los eventos con sismo. El eje Y muestra el coeficiente de correlación obtenido ( $r$ ) y el eje X el número de señal o evento.

Para este análisis se consideran las señales más recurrentes por correlación, en específico cinco señales o eventos. Para el caso del índice Kp (Figura 4.24), las señales más recurrentes fueron 4, 21, 23, 28 y 30 (5). En el caso de la correlación negativa, fueron 1, 4, 17, 21, 22, 24, 27 y 28 (8). En ambos casos encontramos las señales 4, 21 y 28 (3). Estos eventos al estar más cerca de 0, son los que presentaron mayor diferencia entre sí para el índice Kp. Con respecto a sus coeficientes de correlación ( $r$ ), el máximo positivo fue de 0.5868 y el mínimo positivo de 0.2629. En el caso de las correlaciones negativas, fueron los valores -0.2283 y -0.5821. En promedio, todas las correlaciones del índice Kp obtuvieron una  $r$  de 0.4114 y -0.3837.



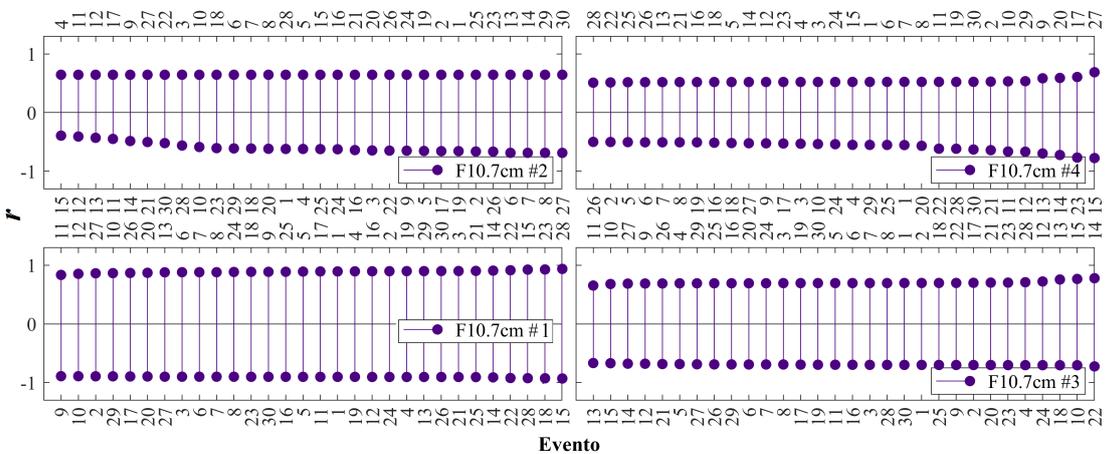
**Figura 4.25:** Correlación cruzada normalizada entre el índice Dst del evento sin sismo #1, #2, #3 y #4 y el índice Dst de los eventos con sismo. El eje Y muestra el coeficiente de correlación obtenido ( $r$ ) y el eje X el número de señal o evento.

Para el caso del índice Dst (Figura 4.25), las señales más recurrentes y cercanas a cero fueron 1, 2, 3, 19, 20, 21, 22, 25 y 28 (9). Para las correlaciones negativas las señales corresponden a la 4, 19, 25, 27 y 29 (5). En común se encuentra la señal 19 (1). El valor  $r$  máximo positivo es de 0.7328 y el mínimo positivo de 0.2572. En el caso de  $r$  negativo fue -0.2866 y -0.7452. En promedio todas las correlaciones del índice Dst obtuvieron una  $r$  de 0.5106 y -0.5041.



**Figura 4.26:** Correlación cruzada normalizada entre el índice Ap del evento sin sismo #1, #2, #3 y #4 y el índice Ap de los eventos con sismo. El eje Y muestra el coeficiente de correlación obtenido ( $r$ ) y el eje X el número de señal o evento.

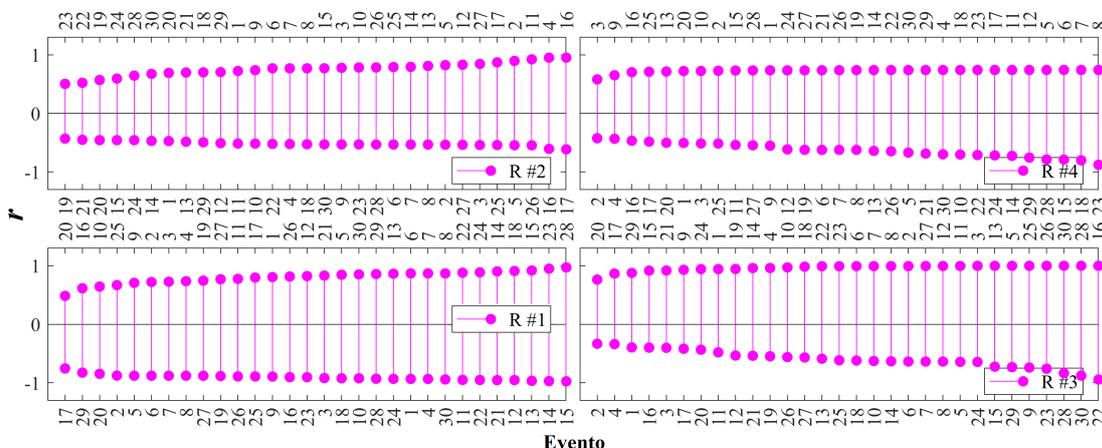
En el caso del índice Ap, las señales más recurrentes en el experimento fueron las siguientes: 3, 9, 10, 13, 21, 26, 27 (7). Para el caso de  $r$  negativa: 3, 4, 6, 7, 11, 12, 14, 15 y 26 (9). En común se encuentran las señales o eventos 3 y 26 (2). El máximo valor positivo de  $r$  fue 0.5991 y el mínimo de 0.3183. Para el caso de  $r$  negativa fue -0.1704 y -0.4374. En promedio todas las correlaciones del índice Ap obtuvieron una  $r$  de 0.4678 y -0.2764.



**Figura 4.27:** Correlación cruzada normalizada entre el índice F10.7cm del evento sin sismo #1, #2, #3 y #4 y el índice F10.7cm de los eventos con sismo. El eje Y muestra el coeficiente de correlación obtenido ( $r$ ) y el eje X el número de señal o evento.

De la Figura 4.27 se observa claramente como el índice F10.7 cm no muestra una diferencia significativa entre ambas señales. En relación con el coeficiente de correlación positiva, las señales 9, 10, 11, 12, 26, 27, 15 y 27 (8) son las más cercanas a cero. Para el caso de  $r$  negativa son las señales 9, 10, 11, 12, 13 y 14 (6). Por consiguiente, las señales en común son las siguientes: 9, 10, 11, 12 y 27 (5). El valor positivo máximo de  $r$  fue 0.9274 y el mínimo de 0.4298. En relación a  $r$  negativa

este fue de -0.3930 y -0.9004. En promedio todas las correlaciones del índice F10.7 cm obtuvieron una  $r$  de 0.7698 y -0.7214.

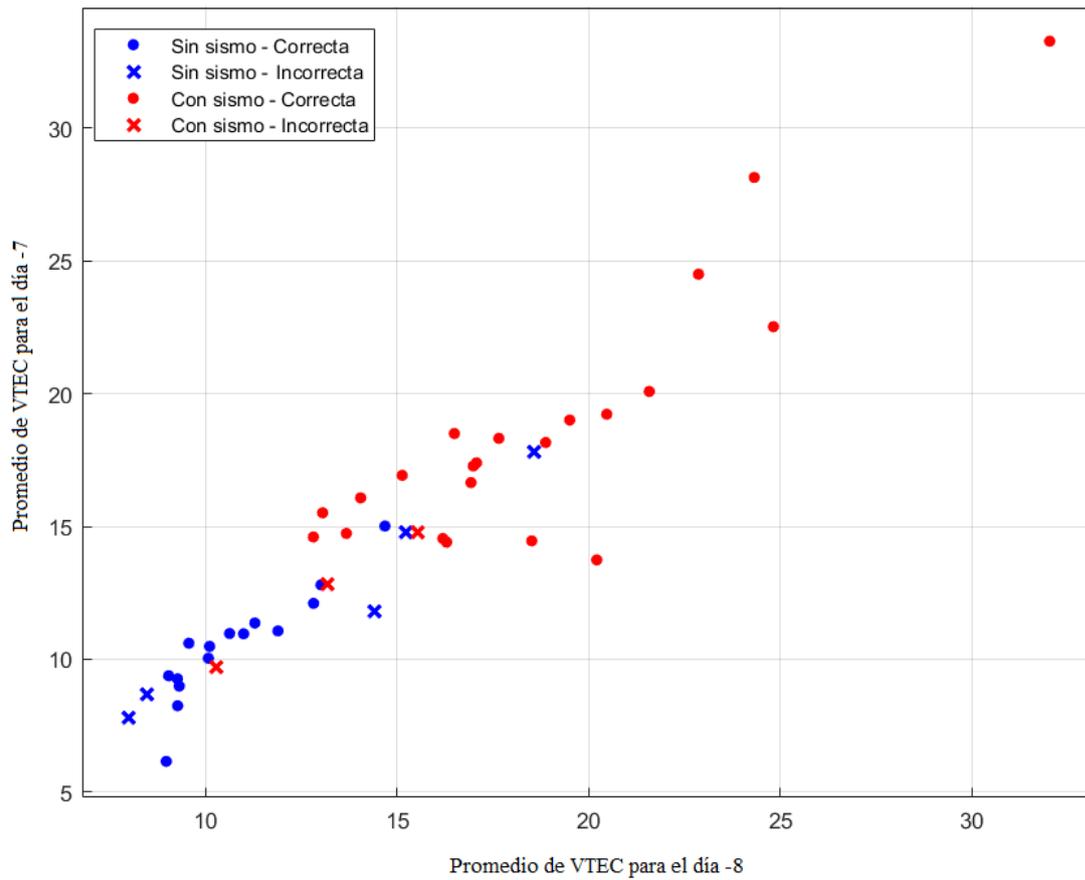


**Figura 4.28:** Correlación cruzada normalizada entre el índice R del evento sin sismo #1, #2, #3 y #4 y el índice R de los eventos con sismo. El eje Y muestra el coeficiente de correlación obtenido ( $r$ ) y el eje X el número de señal o evento.

En cuanto al índice solar R (Figura 4.28), las señales más recurrentes fueron: 3, 9, 10, 16, 19, 20, 25 y 29 (8). Para  $r$  negativo, las señales: 2, 3, 4, 17, 19, 20, 25 (7). Las señales en común, por lo tanto, fueron la 3, 19, 20 y 25 (4). Con respecto a  $r$  positivo, el valor máximo fue de 0.9187 y el mínimo de 0.4376. Para  $r$  negativo, los valores -0.3328 y -0.8790. En promedio todas las correlaciones del índice F10.7 cm obtuvieron una  $r$  de 0.6768 y -0.5956.

### 4.3. Resultados de la Máquina de Vectores de Soporte

Con relación al modelo SVM, se obtuvieron los siguientes resultados: La primer prueba con todos los clasificadores de la Tabla 3.8 obtuvo los siguientes porcentajes por ejecución: 1ra ejecución (88.9%) y 2da ejecución (88%) (Figura 4.29). No obstante, se realizó otra prueba considerando únicamente valores estadísticos básicos pero descriptivos, omitiendo aquellos pertenecientes a las correlaciones. Los resultados mejoraron a 1 (92%) y 2 (91.7%), lo cual implica menos del 4% de diferencia. El tipo de SVM que obtuvo los mejores resultados fue Gaussiano Medio y SVM lineal. En general, resulta factible el uso de técnicas de aprendizaje automático para clasificar entre períodos con y sin sismo, una aplicación a lo anterior podría ser un monitoreo real de los parámetros seleccionados en áreas de interés.



**Figura 4.29:** Resultados obtenidos con un modelo generado por una SVM de tipo Gaussiano Medio (88.9%) para la clasificación de eventos con y sin actividad sísmica.



# 5

## Conclusiones

- 1) Los eventos del conjunto denominado sin sismo presentan menor magnitud en relación a su VTEC, lo anterior en comparación con los eventos del conjunto con sismo. Esta diferencia es considerable para la mayoría de los eventos. Con relación a sus períodos de años, los eventos sin sismo pertenecen al período 2015 – 2018 y los eventos con sismo al período 2015 – 2019. Por lo tanto, su posible variación temporal no sería cuantiosa. Además, con respecto a sus valores máximos y promedio en la mayoría de los eventos la magnitud es superior en el conjunto con sismo. Lo mismo ocurre al analizar los mapas de TEC, la magnitud es una de las diferencias más evidentes.
- 2) Con respecto al comportamiento diario del promedio de VTEC, ya sea en forma de incremento o decremento, se obtuvo lo siguiente: La mayor diferencia ( $\geq 25\%$ ) entre incrementos y decrementos de ambos conjuntos se da para el período anterior al sismo o del día -8 al -1 y para comportamientos de tipo  $V_1$  y  $V_2$  (Ver Sección 4.1). De tal forma que, los incrementos no continuos ( $V_1$ ) son más recurrentes para los eventos con sismo (83.33 % vs 50 %). Es decir, existe una mayor variación (incremento – decremento o viceversa) en el promedio de VTEC de los días -8 al -1 para el conjunto de eventos con sismo, esto también se refleja en los decrementos donde  $V_1$  predomina (90 % vs 65 %). Lo anterior podría indicar que los cambios en VTEC posiblemente relacionados a un fenómeno (en este caso asumimos un terremoto) sean variaciones no prolongadas. Sin embargo, es posible que esta diferencia entre conjuntos sea consecuencia de una variación natural de la ionosfera o de condiciones geomagnéticas – solares especiales. Finalmente, los demás períodos (durante y después) permanecen similares en ambos conjuntos.
- 3) Para los eventos con sismo bajo estudio y para el período de días correspondiente a antes y durante el terremoto no existe una tendencia de incremento ni decremento en el promedio de VTEC, ya que ambos se presentan de forma similar. No obstante, para el período posterior al terremoto, en los eventos con sismo, sí predominan los días con decrementos (21 de 30 eventos). Además, al considerar los valores absolutos del máximo incremento y decremento de todos los días, por período (antes, durante y después), de los eventos con sismo, la magnitud de los decrementos tiende a ser mayor para todos los períodos. En el caso de los eventos sin sismo, en todos los períodos, predominaron los decrementos. Sin embargo, y al considerar los valores absolutos del máximo incremento y decremento, se observa que la magnitud de los incrementos es mayor para los períodos antes y durante. Lo anterior no ocurre para el período posterior. Por lo tanto, el período denominado “Después” ó posterior, de los eventos con y sin sismo, se comporta diferente a los otros períodos.
- 4) En relación a su condición geomagnética y al definir un valor de referencia Dst

$\leq -20$  nT la mayoría de los eventos de ambos conjuntos cruzan este umbral. En específico, 28 de 30 eventos con sismo (93.33 %) y 19 de 20 eventos sin sismo (95 %). Por lo tanto, ningún conjunto se encuentra en un período idílicamente no perturbado. Además, si elevamos la referencia a  $\text{Dst} \leq -50$  nT se tiene que 10 de 30 (33 %) - 18 de 30 (60 %) de los eventos del conjunto con sismos y 5 de 20 (25 %) eventos del conjunto sin sismo alcanzan y/o sobrepasan  $\text{Dst} \leq -50$  nT, lo que indica que una mayor cantidad de eventos pertenecientes al conjunto con sismo sobrepasan el umbral  $\text{Dst} \leq -50$  nT.

- 5) El 46 % del total de días de los eventos con sismo presentan valores que exceden el umbral definido para el índice Dst frente al 38 % de los eventos sin sismo. De entre los índices considerados en este trabajo el menos recurrente, tanto para eventos con sismo como sin este, fue el índice solar F10.7 cm (8 % vs 0 %, respectivamente). Con respecto al punto 3), es posible señalar eventos que se encuentran muy “contaminados” en el sentido de perturbaciones solares-magnéticas. Al considerar un período de perturbación (se excede el umbral) de por lo menos 8 días (57 % del período de días en estudio) por evento, se extraen los siguientes eventos para el conjunto con sismo: 7 eventos (11 al 15 y 18 y 28, 23 %) para índices Kp-Ap, para Dst 15 eventos (5 al 15, 18,19, 28 y 29, 50 %) y para F10.7cm 1 evento (30, 3 %). Para eventos sin sismo: Kp-Ap con 2 eventos (7, 11, 10 %), Dst con 4 eventos (4, 7, 11 y 12, 20 %,) y F10.7 cm con ningún evento.
- 6) Considerando los eventos estudiados en este trabajo, es más probable que un evento con sismo coincida en mes con alguna fulguración solar de tipo M1-X7 (66 % eventos con sismo vs 20 % sin sismo).
- 7) Las variaciones de más de 4 TECU, entre la mediana y el promedio, ocurren con más frecuencia en los eventos con sismo. Lo anterior, es infrecuente en los eventos sin sismo. Por lo tanto, de existir una relación entre los días perturbados (por variaciones en índices geomagnéticos y solares) y las variaciones de tipo Grande ( $> 4$  TECU) esta no funciona de la misma manera para los eventos sin sismo. Por lo tanto, de forma general no es posible que las variaciones entre el promedio y la mediana reflejen a los eventos, con y sin sismo, con perturbaciones de clima espacial.
- 8) La aplicación de filtros digitales a la señal TEC permitió resaltar características relacionadas a la tendencia, amplitud y ruido. En específico, la diferencia de amplitud entre ambas señales resultó evidente, siendo esta mayor en los eventos con sismo. Además, cuando se aplicaron filtros de tipo FIR a la señal TEC los mejores resultados se obtuvieron siempre en pasa alta y a partir del orden 16. Por debajo de dicho orden y con pasa banda se obtuvieron señales distorsionadas e incompletas. Para los filtros tipo IIR, se obtuvieron mejores resultados utilizando un filtro tipo Butterworth que tipo Chebyshev, también pasa alta. Además, para este caso el orden que mejor funcionó fue 4, siendo el orden 8 el límite para evitar la pérdida de la señal. Este tipo de filtro ayudó a eliminar el ruido “base” de ambas señales.
- 9) No existe ninguna correlación evidente entre los eventos con y sin sismo tras analizar las características seleccionadas para evaluar una correlación cruzada entre índices geomagnéticos y solares de distinto índole. Además, ninguna correlación entre índices, de ningún evento con y sin sismo, presenta total simetría. Sin embargo, es posible destacar algunas características de las co-

rrelaciones que presentan algún tipo de diferencia, con respecto de un tipo de evento a otro. Finalmente, existió una buena correlación entre Kp y R durante todo el período de observación. Sin embargo, lo anterior puede ser consecuencia de los efectos de la actividad solar sobre las tormentas geomagnéticas.

- 10) Considerando el promedio de los coeficientes de correlación ( $r$ ), el índice F10.7 cm, de los eventos con y sin sismo, obtuvo el valor más alto (0.7698 y -0.7214), seguido de R (0.6768 y -0.5956), Dst (0.5106 y -0.5041), Kp (0.4114 y -0.3837) y Ap (0.4678 y -0.2764). Por lo tanto, Ap–Kp y Dst resultan parámetros óptimos para diferenciar entre los períodos con y sin sismo utilizados en este trabajo.
- 11) El uso de una SVM permitió la aplicación de diferentes tipos de datos para una determinada tarea. En este caso, catalogar distintos parámetros, entre ellos el VTEC, pertenecientes a eventos con y sin sismo. Lo anterior facilitó el manejo de cantidades importantes de información. Además, permitió establecer el tipo de relación que tenían las diferentes variables de cada tipo de evento.

Finalmente, es importante mencionar que a la fecha no es evidente que exista una relación entre los sismos y las variaciones de TEC. No obstante, de existir es necesario aplicar nuevos métodos. Por lo tanto, más estudios son requeridos para poder acercarse a un pronóstico exitoso de terremotos.

## 5.1. Recomendaciones y/o trabajo futuro

Durante el desarrollo de esta tesis han surgido algunas líneas de investigación que se encuentran en espera de ser atendidas a futuro por el autor y/o por investigadores relacionados al tema abordado, esto con la finalidad de dar continuidad a este trabajo y contribuir al conocimiento, búsqueda e investigación de precursores sísmicos. Estas líneas pueden resumirse en los siguientes puntos:

- i) Utilizando el modelo de aprendizaje automático continuar realizando pruebas con diferentes eventos.
- ii) Trabajar con conjuntos de datos que pertenezcan a la misma región local, ya que observaciones previas podrían sugerir que las condiciones de la ionosfera en México pueden variar significativamente en distancias relativamente cortas.



# Referencias bibliográficas

- Adams, R. D. (1976). The Haicheng, China, earthquake of 4 February 1975; the first successfully predicted major earthquake. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 4(5), 423-437. Descargado de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/eqe.4290040502> doi: 10.1002/eqe.4290040502
- Akhoondzadeh, H. M. (2019). Kalman filter and Neural Network methods for detecting irregular variations of TEC around the time of powerful Mexico (Mw=8.2) earthquake of September 08, 2017. *Journal of the Earth and Space Physics*, 44(4), 87-97. doi: <https://doi.org/10.22059/jesphys.2018.258251.1007007>
- Akhoondzadeh, M. (2013). Genetic algorithm for TEC seismo-ionospheric anomalies detection around the time of the Solomon (Mw=8.0) earthquake of 06 February 2013. *Advances in Space Research*, 52(4), 581 - 590. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S027311771300224X> doi: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.04.012>
- Akhoondzadeh, M., Parrot, M., y Saradjian, M. R. (2010). Electron and ion density variations before strong earthquakes (M>6.0) using DEMETER and GPS data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(1), 7-18. Descargado de <https://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/10/7/2010/> doi: 10.5194/nhess-10-7-2010
- Akhoondzadeh, M., y Saradjian, M. (2011). TEC variations analysis concerning Haiti (January 12, 2010) and Samoa (September 29, 2009) earthquakes. *Advances in Space Research*, 47(1), 94 - 104. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117710005090> doi: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.07.024>
- Akyol, A. A., Arikan, O., y Arikan, F. (2020). A machine learning-based detection of earthquake precursors using ionospheric data. *Radio Science*, 55(11), 1-21. doi: 10.1029/2019RS006931
- Allen, C. R. (1976). Responsibilities in earthquake prediction: To the Seismological Society of America, delivered in Edmonton, Alberta, May 12, 1976. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 66(6), 2069. Descargado de <http://dx.doi.org/>
- Anderson, J. D., y Fuller-Rowel, T. J. (1999). The Ionosphere. *Space Environment Topics*, 14.
- Andrews, D. G. (2000). *An introduction to atmospheric physics*. Cambridge University Press. doi: 10.1017/CBO9780511800771

- Arikan, F., Shukurov, S., Tuna, H., Arikan, O., y Gulyaeva, T. (2016). Performance of gps slant total electron content and iri-plas-stec for days with ionospheric disturbance. *Geodesy and Geodynamics*, 7(1), 1-10. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674984716000112> (Special Issue: GNSS Applications in Geodesy and Geodynamics) doi: <https://doi.org/10.1016/j.geog.2015.12.009>
- Astafyeva, E., Lognonné, P., y Rolland, L. (2011). First ionospheric images of the seismic fault slip on the example of the Tohoku-oki earthquake. *Geophysical Research Letters*, 38(22). Descargado de <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2011GL049623> doi: 10.1029/2011GL049623
- Barkat, A., Ali, A., Rehman, K., Awais, M., Tariq, M. A., Ahmed, J., ... Iqbal, T. (2018, 01 de Dec). Multi-precursory Analysis of Phalla Earthquake (July 2015; Mw 5.1) Near Islamabad, Pakistan. *Pure and Applied Geophysics*, 175(12), 4289–4304. Descargado de <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1927-5> doi: 10.1007/s00024-018-1927-5
- Bijan, N., Saied, P., y Mollaei, S. (2013). The effect of solar cycle's activities on earthquake: a conceptual idea for forecasting. *Disaster Advances*, 6(4), 14 - 21.
- Bolt, A. B. (1993). *Earthquakes and Geological Discovery*. Scientific American Library. Descargado de <https://books.google.com.mx/books?id=rwNnQgAACAAJ>
- Bolt, A. B. (2001). The Nature of Earthquake Ground Motion. En F. Naeim (Ed.), *The seismic design handbook* (pp. 1–45). Boston, MA: Springer US. Descargado de [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1693-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1693-4_1) doi: 10.1007/978-1-4615-1693-4\_1
- Brehm, D. J., y Braile, L. W. (1998, 04). Intermediate-term earthquake prediction using precursory events in the New Madrid Seismic Zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88(2), 564-580.
- Burges, C. J. (1998). A tutorial on support vector machines for pattern recognition. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 2(2), 121-167. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1023/A%3A1009715923555> doi: 10.1023/A:1009715923555
- Camargo, P. O. (1999). Modelo regional da ionosfera para uso em posicionamento com receptores GPS de uma frequência. *Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná*, 191.
- Carrano, C. S., Anghel, A., Quinn, R. A., y Groves, K. M. (2009). Kalman filter estimation of plasmaspheric Total Electron Content using GPS. *Radio Science*, 44.
- CENAPRED. (2001). *Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México*. Descargado 2020-11-08, de [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiOi7Tk7\\_PsAhViAp0JHVJTCzgQFjAAegQIBRAC&url=http%3A%2F%2Fwww.cenapred.gob.mx%2Fes%2FPublicaciones%2Farchivos%](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiOi7Tk7_PsAhViAp0JHVJTCzgQFjAAegQIBRAC&url=http%3A%2F%2Fwww.cenapred.gob.mx%2Fes%2FPublicaciones%2Farchivos%2F)

2F36-DIAGNOSTICCODEPELIGROSEIDENTIFICACINDERIESGOSDEDESASTRESENMXICO  
 .PDF&usg=AOvVawOmz1Zd0HmshIUelmn\_KzW1

- Cherniak, I., Zakharenkova, I., y Krankowski, A. (2014). Approaches for modeling ionosphere irregularities based on the TEC rate index. *Earth, Planets and Space*, 66(1), 165. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1186/s40623-014-0165-z> doi: 10.1186/s40623-014-0165-z
- Cicerone, R. D., Ebel, J. E., y Britton, J. (2009). A systematic compilation of earthquake precursors. *Tectonophysics*, 476(3), 371 - 396. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040195109003254> doi: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.06.008>
- Devi, M., Barbara, A. K., Depueva, A. H., Ruzhin, Y. Y., y Depuev, V. (2010). Anomalous total electron content (TEC) and atmospheric refractivity prior to the very strong China earthquake of May 2008. *International Journal of Remote Sensing*, 31(13), 3589-3599. Descargado de <https://doi.org/10.1080/01431161003727663> doi: 10.1080/01431161003727663
- Dorman, L., Tassev, Y., Velinov, P. I. Y., Mishev, A., Tomova, D., y Mateev, L. (2019, feb). Investigation of exceptional solar activity in september 2017: GLE 72 and unusual forbush decrease in GCR. *Journal of Physics: Conference Series*, 1181, 012070. Descargado de <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1181/1/012070> doi: 10.1088/1742-6596/1181/1/012070
- Ellsworth, W. L., Matthews, M. V., Nadeau, R. M., Nishenko, S. P., Reasenber, P. A., y Simpson, R. W. (1999). A Physically-Based Earthquake Recurrence Model for Estimation of Long-Term Earthquake Probabilities. *U. S. Geological Survey Open-File Report*, 99(522), 23.
- Şentürk, E., y Çepni, M. S. (2018). Ionospheric temporal variations over the region of Turkey: a study based on long-time TEC observations. *Acta Geod Geophys*, 53, 623-637. doi: <https://doi.org/10.1007/s40328-018-0233-0>
- Ezquer, R. G., y Radicella, S. M. (2008). Ionosfera de bajas latitudes: efectos sobre señales de satélites recibidas en Tucumán. *Física de la Tierra*, 20, 61-81.
- Fuying, Z., Yun, W., Yiyan, Z., y Jian, L. (2011). A statistical investigation of pre-earthquake ionospheric TEC anomalies. *Geodesy and Geodynamics*, 2(1), 61-65. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674984715301579> doi: <https://doi.org/10.3724/SP.J.1246.2011.00061>
- Gates, A., y Ritchie, D. (2006). *Encyclopedia of earthquakes and volcanoes*. Facts on File. Descargado de <https://books.google.com.mx/books?id=b1sXfJCiCHQC>
- Geller, R. J., Jackson, D. D., Kagan, Y. Y., y Mulargia, F. (1997). Earthquakes Cannot Be Predicted. *Science*, 275(5306), 1616-1616. Descargado de <http://science.sciencemag.org/content/275/5306/1616> doi: 10.1126/science.275.5306.1616
- Gibson, E. (1973). *The quiet sun* (n.º n.º 303). National Aeronautics and Space Administration, Scientific and Technical Information Office. Descargado de <https://books.google.com.mx/books?id=aCqxAAAAIAAJ>

- Gonzalez-Esparza, J. A., Sergeeva, M. A., Corona-Romero, P., Mejia-Ambriz, J. C., Gonzalez, L. X., De la Luz, V., ... Romero-Hernández, E. (2018). Space weather events, hurricanes, and earthquakes in Mexico in September 2017. *Space Weather*, 16(12), 2038-2051. Descargado de <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2018SW001995> doi: <https://doi.org/10.1029/2018SW001995>
- Gousheva, M. N., Georgieva, K. Y., Kirov, B. B., y Antanasov, D. (2003, Nov). On the relation between solar activity and seismicity. , 236-240. doi: 10.1109/RAST.2003.1303913
- Grant, R. A., Raulin, J. P., y Freund, F. T. (2015). Changes in animal activity prior to a major (M=7) earthquake in the Peruvian Andes. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 85-86, 69 – 77. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474706515000236> (Earthquakes Precursors and Earthquake Prediction: Recent Advances) doi: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.02.012>
- Hargreaves, J. K. (1992). *The Solar-Terrestrial Environment: An Introduction to Geospace - the Science of the Terrestrial Upper Atmosphere, Ionosphere, and Magnetosphere*. Cambridge University Press. doi: 10.1017/CBO9780511628924
- Hayakawa, M. (2010). The use of subionospheric VLF/LF propagation for the study of lower ionospheric perturbations associated with earthquakes. *AIP Conference Proceedings*, 1286(1), 223-269. doi: 10.1063/13512884
- Hayakawa, M. (2013, 04). Possible Electromagnetic Effects on Abnormal Animal Behavior Before an Earthquake. *Animals*, 3, 2135-. doi: 10.3390/ani3010019
- Hayakawa, M., Yamauchi, H., Ohtani, N., Ohta, M., Tosa, S., Asano, T., ... Eftaxias, K. (2016). On the Precursory Abnormal Animal Behavior and Electromagnetic Effects for the Kobe Earthquake (M 6) on April 12, 2013. *Open Journal of Earthquake Research*, 5, 165-171. doi: 10.4236/ojer.2016.53013
- Hernández, M., Juan, J., y Sanz, J. (2005). *Procesado de Datos GPS: código y fase. Algoritmos, Técnicas y Recetas*. gAGE/UPC. Descargado de [http://gage.es/sites/default/files/TEACHING\\_MATERIAL/GPS\\_BOOK/CASTELLANO/PDGPS/LIBRO\\_PDGPS\\_gAGE\\_NAV\\_08.pdf](http://gage.es/sites/default/files/TEACHING_MATERIAL/GPS_BOOK/CASTELLANO/PDGPS/LIBRO_PDGPS_gAGE_NAV_08.pdf); [http://gage.es/sites/default/files/TEACHING\\_MATERIAL/GPS\\_BOOK](http://gage.es/sites/default/files/TEACHING_MATERIAL/GPS_BOOK)
- Ho, Y.-Y., Jhuang, H.-K., Su, Y.-C., y Liu, J.-Y. (2013). Seismo-ionospheric anomalies in total electron content of the GIM and electron density of DEMETER before the 27 February 2010 M8.8 Chile earthquake. *Advances in Space Research*, 51(12), 2309 - 2315. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117713000872> doi: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.02.006>
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., y Wasle, E. (2007). *GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer Vienna. Descargado de [https://books.google.com.mx/books?id=Np7y43HU\\_m8C](https://books.google.com.mx/books?id=Np7y43HU_m8C)

- Huang, F., Li, M., Ma, Y., Han, Y., Tian, L., Yan, W., y Li, X. (2017). Studies on earthquake precursors in China: A review for recent 50 years. *Geodesy and Geodynamics*, 8(1), 1 - 12. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674984716301574> doi: <https://doi.org/10.1016/j.geog.2016.12.002>
- Huerta, E., Mangiaterra, A., y Noguera, G. (2005). *GPS Posicionamiento satelital*. Universidad Nacional de Rosario: UNR.
- Igarashi, G., Saeki, S., Takahata, N., Sumikawa, K., Tasaka, S., Sasaki, Y., . . . Sano, Y. (1995). Ground-Water Radon Anomaly Before the Kobe Earthquake in Japan. *Science, New Series*, 269(5220).
- Ikeya, M. (2003, 01). Earthquakes and Animals: From Folk Legends to Science. *Carbonates and Evaporites*, 18.
- Jakubcova, I., y Pick, M. (1987). Correlation between solar motion, earthquakes and other geophysical phenomena. *Annals Geophysics (B)*, 5, 135-142.
- Jiang, C., Wei, X., Cui, X., y You, D. (2009, junio). Application of support vector machine to synthetic earthquake prediction. *Earthquake Science*, 22(3), 315-320. doi: 10.1007/s11589-009-0315-8
- Jin, X. X. (1996). *Theory of carrier adjusted dgps positioning approach and some experimental results : e-book* (Tesis Doctoral no publicada). Delft University of Technology. (PhD Thesis Technical University of Delft, summaries in English and Dutch)
- Jones, L., y Molnar, P. (1976). Frequency of foreshocks. *Nature*(262), 677-679. doi: 10.1038/262677a0
- Kamogawa, M. (2006). Preseismic lithosphere atmosphere ionosphere coupling. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 87, 417-424.
- Kanamori, H. (1977). The energy release in great earthquakes. *Journal of Geophysical Research (1896-1977)*, 82(20), 2981-2987. Descargado de <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/JB082i020p02981> doi: 10.1029/JB082i020p02981
- Karatay, S., Arikan, F., y Arikan, O. (2009). Investigation of hourly and daily patterns for lithosphere-ionosphere coupling before strong earthquakes. , 670-674. doi: 10.1109/RAST.2009.5158274
- Karatay, S., Arikan, F., y Arikan, O. (2010). Investigation of total electron content variability due to seismic and geomagnetic disturbances in the ionosphere. *Radio Science*, 45(5). Descargado de <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2009RS004313> doi: <https://doi.org/10.1029/2009RS004313>
- Kelley, M., y Heelis, R. (1989). *The earth's ionosphere: Plasma physics and electrodynamics*. Academic Press. Descargado de <https://books.google.com.mx/books?id=-1eIoCUUZuoC>

- Khan, P. A., Sharad C. Tripathi, Azad A. Mansoori, Purushottam Bhawre, y P.K.Purohit and A.K.Gwal. (2010). Scientific efforts in the direction of successful Earthquake Prediction. *International Journal Of Geomatics and Geosciences*, 1(3).
- Kim, P. (2017). *Matlab deep learning: With machine learning, neural networks and artificial intelligence* (1st ed.). USA: Apress.
- Kim, V., Hegai, V. V., Liu, J. Y., Ryu, K., y Chung, J.-K. (2017). Time-Varying Seismogenic Coulomb Electric Fields as a Probable Source for Pre-Earthquake Variation in the Ionospheric F2-Layer. *Journal of Astronomy and Space Sciences*, 34(4), 251-256. Descargado de <http://janss.kr/journalarticle.php?code=56925>
- Kirschvink, J. L. (2000). Earthquake Prediction by Animals: Evolution and Sensory Perception. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(2).
- Kusky, T. (2008). *Earthquakes: Plate tectonics and earthquake hazards*. Facts On File. Descargado de <https://books.google.com.mx/books?id=J6Aj6TbSHMwC>
- Larkina, V., Migulin, V., Molchanov, O., Kharkov, I., Inchin, A., y Schvetcova, V. (1989). Some statistical results on very low frequency radiowave emissions in the upper ionosphere over earthquake zones. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 57(1), 100 - 109. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0031920189902197> doi: [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(89\)90219-7](https://doi.org/10.1016/0031-9201(89)90219-7)
- Larocca, P. A. (2016). Application of the Cross Wavelet Transform to Solar Activity and Major Earthquakes Occurred in Chile. *International Journal of Geosciences*, 7, 1310-1317. doi: 10.4236/ijg.2016.711095
- Le, H., Liu, J. Y., y Liu, L. (2011). A statistical analysis of ionospheric anomalies before 736 m6.0+ earthquakes during 2002–2010. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 116(A2). Descargado de <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2010JA015781> doi: <https://doi.org/10.1029/2010JA015781>
- Lillie, R. (1999). *Whole Earth Geophysics: An Introductory Textbook for Geologists and Geophysicists*. Prentice Hall. Descargado de <https://books.google.com.mx/books?id=DcQRAQAIAAJ>
- Liu, J. Y., Chen, Y. I., Chen, C. H., Liu, C. Y., Chen, C. Y., Nishihashi, M., ... Lin, C. H. (2009). Seismoionospheric GPS total electron content anomalies observed before the 12 may 2008 Mw7.9 Wenchuan earthquake. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 114(A4). Descargado de <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2008JA013698> doi: 10.1029/2008JA013698
- Liu, J. Y., Chen, Y. I., Chuo, Y. J., y Tsai, H. F. (2001). Variations of ionospheric total electron content during the Chi-Chi Earthquake. *Geophysical Research Letters*, 28(7), 1383–1386. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1029/2000GL012511> doi: 10.1029/2000GL012511

- Liu, J. Y., Chuo, Y. J., Shan, S. J., Tsai, Y. B., Chen, Y. I., Pulinets, S. A., y Yu, S. B. (2004). Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous gps tec measurements. *Annales Geophysicae*, 22(5), 1585–1593. Descargado de <https://www.ann-geophys.net/22/1585/2004/> doi: 10.5194/angeo-22-1585-2004
- Liu, J. Y., Le, H., Chen, Y. I., Chen, C. H., Liu, L., Wan, W., ... Chen, M. Q. (2011). Observations and simulations of seismoionospheric GPS total electron content anomalies before the 12 January 2010 M7 Haiti earthquake. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 116(A4). Descargado de <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2010JA015704> doi: 10.1029/2010JA015704
- Liu, J.-Y., Tsai, Y.-B., Chen, C.-H., Chen, Y.-I., y Yen, H.-Y. (2016). Integrated Search for Taiwan Earthquake Precursors (iSTEP). *IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials*, 136(5), 214-220. doi: 10.1541/ieejfms.136.214
- Loewe, C. A., y Prölss, G. W. (1997). Classification and mean behavior of magnetic storms. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 102(A7), 14209-14213. Descargado de <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/96JA04020> doi: 10.1029/96JA04020
- Lomnitz, C. (1994). *Fundamentals of Earthquake Prediction*. Wiley. Descargado de <https://books.google.com.mx/books?id=Nr4SAQAAIAAJ>
- Mancini, F., Galeandro, A., Giglio, M. D., y Barbarella, M. (2015). Ionospheric activity and possible connection with seismicity: Contribution from the analysis of long time series of GNSS signals. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 85–86, 106 - 113. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474706514000643> (Earthquakes Precursors and Earthquake Prediction: Recent Advances) doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2014.10.005>
- Marques, H. A., Monico, J. F. G., y Aquino, M. (2011, 01 de Jul). Rinex\_ho: second- and third-order ionospheric corrections for rinex observation files. *GPS Solutions*, 15(3), 305–314. Descargado de <https://doi.org/10.1007/s10291-011-0220-1> doi: 10.1007/s10291-011-0220-1
- Martinelli, G. (2000, 09). Contributions to a History of Earthquake Prediction Research. *Seismological Research Letters*, 71(5), 583-588. Descargado de <https://doi.org/10.1785/gssrl.71.5.583> doi: 10.1785/gssrl.71.5.583
- Mayaud, P. N. (1980). *Derivation, Meaning, and Use of Geomagnetic Indices* (Vol. 22). doi: 10.1029/GM022
- McNamara, L. (1993). *Radio amateurs guide to the ionosphere*. Krieger Pub. Descargado de <https://books.google.com.mx/books?id=rDgyAAAACAAJ>
- Melgarejo-Morales, A., Vazquez-Becerra, G. E., Millan-Almaraz, J. R., Pérez-Enríquez, R., Martínez-Félix, C. A., y Gaxiola-Camacho, J. R. (2020, 02 de 09). Examination of seismo-ionospheric anomalies before earthquakes of Mw >5.1 for the period 2008 - 2015 in Oaxaca, Mexico using GPS-TEC. *Acta Geophysica*, 68, 1229–1244. Descargado de <https://doi.org/10.1007/s11600-020-00470-9>

- Mikhailov, A. V., y Mikhailov, V. V. (1995, febrero). A new ionospheric index MF2. *Advances in Space Research*, 15(2), 93-97. doi: 10.1016/S0273-1177(99)80029-5
- Mylnikova, A., Yasyukevich, Y., Kunitsyn, V., y Padokhin, A. (2015). Variability of gps/glonass differential code biases. *Results in Physics*, 5, 9 - 10. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211379714000588> doi: <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2014.11.002>
- Necat Deviren, M., Gulyaeva, T., Sezen, U., Arikan, F., y Arikan, O. (2014, enero). Detection of Seismic Precursors Using Distance Metrics Between GPS-TEC and IRI-Plas. , 40, C4.1-11-14.
- Negarestani, A., Setayeshi, S., Ghannadi-Maragheh, M., y Akashe, B. (2002). Layered neural networks based analysis of radon concentration and environmental parameters in earthquake prediction. *Journal of Environmental Radioactivity*, 62(3), 225 - 233. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X01001655> doi: [https://doi.org/10.1016/S0265-931X\(01\)00165-5](https://doi.org/10.1016/S0265-931X(01)00165-5)
- Núñez-Cornú, F., y Ponce, L. (1989). Zonas sísmicas de Oaxaca, México: Sismos máximos y tiempos de recurrencia para el período 1542-1988. *Revista de la Unión Geofísica Mexicana*, 28(4), 587-641.
- Nicolí, L., Biffi, S., Caccia, L., Cavallucci, M., Gullá, D., Lupo, G., ... Zucchetti, M. (2016). The Tellus project, A study of seismic precursors. *International Journal of Ecosystems and Ecology Sciences (IJEES)*, 6(1), 33 - 38.
- Oceanic and Atmospheric Administration and National Aeronautics and Space Administration and United States Air Force, N. (1976). U.S. Standar Atmosphere 1976.
- Odintsov, S. D., Ivanov Kholodnyi, G. S., y Georgieva, K. (2007, 01 de Apr). Solar activity and global seismicity of the earth. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 71(4), 593-595. Descargado de <https://doi.org/10.3103/S1062873807040466> doi: 10.3103/S1062873807040466
- Omondi, G. E., Baki, P., y Ndinya, B. O. (2019). Total electron content and scintillations over Maseno, Kenya, during high solar activity year. *Acta Geophys*, 67, 1661-1670. doi: <https://doi.org/10.1007/s11600-019-00354-7>
- Oyama, K., Devi, M., Ryu, K., Chen, C., Liu, J., Liu, H., ... Kodama, T. (2016, 1 de 12). Modifications of the ionosphere prior to large earthquakes: report from the Ionosphere Precursor Study Group. *Geoscience Letters*, 3(1). doi: 10.1186/s40562-016-0038-3
- Palacios, J. C., Olarte, C., Granados, C., Devia, A., y Villalobos, J. (2006). Monitoreo de la Ionosfera Colombiana por medio de un Sistema de Posicionamiento Global (GPS). *Revista Colombiana de Física*, 38(4).
- Panakkat, A., y Adeli, H. (2007). Neural network models for earthquake magnitude prediction using multiple seismicity indicators. *International Journal of Neural Systems*, 17(01), 13-33. Descargado de <https://doi.org/10.1142/S0129065707000890> (PMID: 17393560) doi: 10.1142/S0129065707000890

- Pereira, A. J. S. C., Barbosa, S. M., Neves, L. J. P. F., y Aumento, F. (2011). Soil-gas radon monitoring in an active granite quarry from central Portugal. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(7), 1845–1849. Descargado de <https://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/11/1845/2011/> doi: 10.5194/nhess-11-1845-2011
- Perrone, L., y Franceschi, G. D. (1998). Solar, ionospheric and geomagnetic indices. *Annals of Geophysics*, 41(5-6). Descargado de <https://www.annalsofgeophysics.eu/index.php/annals/article/view/3824> doi: 10.4401/ag-3824
- Platt, J. (1998, January). Fast training of support vector machines using sequential minimal optimization. En *Advances in kernel methods - support vector learning* (Advances in Kernel Methods - Support Vector Learning ed.). MIT Press. Descargado de <https://www.microsoft.com/en-us/research/publication/fast-training-of-support-vector-machines-using-sequential-minimal-optimization/>
- Proakis, J. G., y Manolakis, D. K. (2006). *Digital signal processing (4th edition)* (4.<sup>a</sup> ed.). Prentice Hall.
- Pulinets, S., y Davidenko, D. (2014). Ionospheric precursors of earthquakes and Global Electric Circuit. *Advances in Space Research*, 53(5), 709 - 723. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117713008326> doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2013.12.035>
- Pulinets, S., y Ouzounov, D. (2011). Lithosphere–Atmosphere–Ionosphere Coupling (LAIC) model – An unified concept for earthquake precursors validation. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(4), 371 - 382. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1367912010000830> doi: <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.03.005>
- Pulinets, S., Ouzounov, D., Davydenko, D., y Petrukhin, A. (2016). Multiparameter monitoring of short-term earthquake precursors and its physical basis. Implementation in the Kamchatka region. *E3S Web Conf.*, 11, 19. Descargado de <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20161100019> doi: 10.1051/e3sconf/20161100019
- Pulinets, S. A., y Boyarchuk, K. A. (2004). *Ionospheric Precursors of Earthquakes*. Berlin, Springer.
- Pulinets, S. A., Ouzounov, D. P., Karelin, A. V., y Davidenko, D. V. (2015). Physical bases of the generation of short-term earthquake precursors: A complex model of ionization-induced geophysical processes in the lithosphere-atmosphere-ionosphere-magnetosphere system. *Geomagnetism and Aeronomy*, 55, 521-538. doi: <https://doi.org/10.1134/S0016793215040131>
- Rastogi, B., Chadha, R., y Raju, I. (1986). Seismicity near Bhatsa reservoir, Maharashtra, India. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 44(2), 179 - 199. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0031920186900440> doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0031-9201\(86\)90044-0](http://dx.doi.org/10.1016/0031-9201(86)90044-0)

- Rastogi, B., Rao, C. R., Chadha, R., y Gupta, H. (1987). Precursory phenomena in the microearthquake sequence near the Osmansagar reservoir, Hyderabad, India. *Tectonophysics*, 138(1), 17 - 24. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0040195187900618> (Earthquake Prediction) doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951\(87\)90061-8](http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951(87)90061-8)
- Reasenber, P. A. (1999). Foreshock occurrence before large earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104 (B3), 4755-4768. Descargado de <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/1998JB900089> doi: 10.1029/1998JB900089
- Richon, P., Klinger, Y., Tapponnier, P., Li, C. X., Woerd, J. V. D., y Perrier, F. (2010). Measuring radon flux across active faults: Relevance of excavating and possibility of satellite discharges. *Radiation Measurements*, 45, 211-218.
- Richon, P., Sabroux, J. C., Halbwachs, M., Vandemeulebrouck, J., Poussié, N., Tabbagh, J., y Punongbayan, R. (2003). Radon anomaly in the soil of Taal volcano, the Philippines: A likely precursor of the M 7.1 Mindoro earthquake (1994). *Geophysical Research Letters*, 30(9), 34-4.
- Rikitake, T. (1976). *Earthquake prediction*. Elsevier.
- Rishbeth, H. (2007). Do earthquake precursors really exist? *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 88(29), 296-296. Descargado de <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2007E0290008> doi: 10.1029/2007E0290008
- Romanovskaya, Y. V., Namgaladze, A. A., Zolotov, O. V., Starikova, N. A., y Lopatiy, V. Z. (2012). Searching for seismo-ionospheric earthquakes precursors: Total electron content disturbances before 2005-2006 seismic events. *Proceedings of the MSTU*, 15(2), 477-481. Descargado de [http://vestnik.mstu.edu.ru/v15\\_2\\_n48/articles/477\\_481\\_romano.pdf](http://vestnik.mstu.edu.ru/v15_2_n48/articles/477_481_romano.pdf)
- Salby, M., L, S., Pielke, R., Pielke, R., y Dmowska, R. (1996). *Fundamentals of atmospheric physics*. Elsevier Science. Descargado de [https://books.google.com.mx/books?id=xWQOG-\\_UTBoC](https://books.google.com.mx/books?id=xWQOG-_UTBoC)
- Sardón, E., Rius, A., y Zarraoa, N. (1993). Estimación del contenido total de electrones en la ionosfera usando datos del sistema de posicionamiento global. *Física de la Tierra*(5), 167-182. Descargado de <http://hdl.handle.net/10261/6637>
- Schunk, R. W., y Nagy, A. F. (2000). *Ionospheres: physics, plasma physics, and chemistry* (1.<sup>a</sup> ed.; J. T. Houghton, M. J. Rycroft, y A. J. Dessler, Eds.). Cambridge: Cambridge. Descargado de <http://books.google.com/books?hl=en&lr={&}id=sCJ8xJGRNYIC{&}oi=fnd{&}pg=PR7{&}dq=Ionospheres:+Physics,+Plasma+Physics,+and+Chemistry{&}ots=UP{&}saCb2gc{&}sig=5YjxD4n3qK7fW3S9AkNN8uAntNk>
- Sergeeva, M., Maltseva, O., Gonzalez-Esparza, A., Mejia-Ambriz, J., De la Luz, V., Corona-Romero, P., ... Aguilar-Rodriguez, E. (2018, 03). Tec behavior over the mexican region. *Annals of Geophysics*, 61. doi: 10.4401/ag-7465

- Sezen, U., Arıkan, F., Arıkan, O., Ugurlu, O., y Sadeghimorad, A. (2013). Online, automatic, near-real time estimation of gps-tec : Ionolab-tec. *Space Weather*, 11(5), 297-305. Descargado de <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/swe.20054> doi: <https://doi.org/10.1002/swe.20054>
- Simpson, J. F. (1967). Solar activity as a triggering mechanism for earthquakes. *Earth and Planetary Science Letters*, 3, 417 - 425. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0012821X67900714> doi: [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(67\)90071-4](https://doi.org/10.1016/0012-821X(67)90071-4)
- Sotomayor-Beltran, C. (2019). Ionospheric anomalies preceding the low-latitude earthquake that occurred on April 16, 2016 in Ecuador. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 182, 61-66. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364682618303754> doi: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.11.003>
- Suthaharan, S. (2015). *Machine learning models and algorithms for big data classification: Thinking with examples for effective learning* (1st ed.). Springer Publishing Company, Incorporated.
- Sytinskii, A. D. (1989). Correlation of earthquakes with Solar Activity. *Izvestiya, earth Physics*, 25, 86-98.
- Sytinskii, A. D. (1997). Influence of interplanetary disturbances on the seismicity and atmosphere of the Earth. *Geomagnetism and Aeronomy*, 37(2), 138-141.
- Tao, D., Cao, J., Battiston, R., Li, L., Ma, Y., Liu, W., ... Dunlop, M. W. (2017). Seismo-ionospheric anomalies in ionospheric TEC and plasma density before the 17 July 2006 M 7.7 south of Java earthquake. *Annales Geophysicae*, 35(3), 589-598. Descargado de <https://www.ann-geophys.net/35/589/2017/> doi: 10.5194/angeo-35-589-2017
- Tavares, M., y Azevedo, A. (2011). Influences of solar cycles on earthquakes. *Natural Science*, 3, 436-443. doi: 10.4236/ns.2011.36060
- Teunissen, P. J. (1991). The GPS phase-adjusted pseudorange. *Proceedings of the second international workshop on high precision navigation*, 115-125.
- Thomas, J. N., Huard, J., y Masci, F. (2017). A statistical study of global ionospheric map total electron content changes prior to occurrences of M >6.0 earthquakes during 2000-2014. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122(2), 2151-2161. Descargado de <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2016JA023652> doi: <https://doi.org/10.1002/2016JA023652>
- Vallina, A., y Mézcua, J. (1997). *Fundamentos de sismología*. UCA Editores. Descargado de <https://books.google.com.mx/books?id=t9wbtwAACAAJ>
- Vargas, C., y Kastle, E. (2012). Does the sun trigger earthquakes? *Natural Science*, 4, 595 - 600. doi: <https://doi.org/10.4236/ns.2012.428079>
- Velinov, P. I. Y. (1975). The effect of solar activity on geophysical processes. *Bulg. Geofiz. Spis.; (Bulgaria)*, 1, 51-77.

- Wadatsumi, K. (1995). Precursory Earthquake Information 1519 prior to Hanshin Earthquake. *Tokyo Pub.*
- Yasyukevich, Y., Mylnikova, A., Kunitsyn, V., y Padokhin, A. (2015). Influence of GPS/GLONASS differential code biases on the determination accuracy of the absolute total electron content in the ionosphere. *Geomagn. Aeron.*, *55*, 763 - 769. doi: <https://doi.org/10.1134/S001679321506016X>
- Yasyukevich, Y., Mylnikova, A., y Polyakova, A. (2015). Estimating the total electron content absolute value from the gps/lonass data. *Results in Physics*, *5*, 32 - 33. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211379714000679> doi: <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2014.12.006>
- Zakharenkova, I. E., y Shagimuratov, I. I. (2009, April). Using of global and regional ionospheric maps to study of the preseismic ionosphere modification. , 1-5. doi: 10.1049/cp.2009.0025
- Zakharenkova, I. E., Shagimuratov, I. I., y Tepenitsyna, N. Y. (2016). Gps tec anomalies observed prior to the peru earthquake of 26 september 2005.
- Zhang, X., Qian, J., Wang, Y., Zhao, X., Ouyang, X., y Zhao, S. (2008). Spectral features of geomagnetic low point displacement and its mechanism. *Acta Seismologica Sinica*, *21*, 474–484. Descargado de <https://doi.org/10.1007/s11589-008-0474-z> doi: 10.1007/s11589-008-0474-z
- Zhima, Z., Xuhui, S., Xuemin, Z., Jinbin, C., Jianping, H., Xinyan, O., ... Lu, B. (2012). Possible Ionospheric Electromagnetic Perturbations Induced by the Ms7.1 Yushu Earthquake. *Earth, Moon, and Planets*, *108*, 231-241. Descargado de <https://doi.org/10.1007/s11038-012-9393-z> doi: 10.1007/s11038-012-9393-z