



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

ANÁLISIS GEO-ESTADÍSTICO DE LAS DESCARGAS
ELÉCTRICAS EN EL TERRITORIO NACIONAL
MEXICANO MEDIANTE DATOS SATELITALES

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIATURA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

P R E S E N T A :

DAVID TAMAYO TORRES

TUTOR

DR. ADOLFO MAGALDI HERMOSILLO



CIUDAD UNIVERSITARIA, Cd. Mx., 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A todos aquellos que observan y exploran sus alrededores. Sigamos avanzando y haciendo preguntas...

Agradecimientos

A mi madre y a mi padre. Por haber creado una hermosa familia y haber hecho de ella su proyecto de vida, por todas las enseñanzas que me han dejado, por el apoyo incondicional que me brindan diariamente y por la confianza que han forjado en mí. Los amo.

A mis hermanos, tíos y abuelos. Por la unión y el apoyo que existe en nuestra familia. Por sus valiosas historias, consejos y forma de ver el mundo.

A mis amigos. Los que siguen aquí y los que han partido, por haber ayudado a moldear mi personalidad y por todos los momentos que hemos compartido.

A mis profesores. Por fomentar el estudio y las prácticas de investigación, por todos los conocimientos que han sembrado en mí y por siempre buscar nuevos métodos de enseñanza.

Resumen

Los satélites geoestacionarios GOES-R, operativos desde enero del 2018 y compuestos por una serie de instrumentos y sensores de última generación, brindan una gran oportunidad para estudiar la atmósfera terrestre desde una nueva perspectiva. En particular el equipo GLM registra los eventos eléctricos atmosféricos ocurridos a lo largo del continente americano con una efectividad mayor al 70%. En este trabajo se analizó una serie de datos del producto FED (*flash extent density*, el cual muestra la mejor relación de cantidad/extensión de los destellos observados desde el satélite) generados con datos de primer y segundo nivel del GLM, entre los años 2018 y 2019 para todo el territorio mexicano, en donde se determinó que el municipio de Las Choapas (Veracruz) es la zona con mayor registro de descargas eléctricas del país. Asimismo se identificó que en los meses de verano se presenta la mayor acumulación (anual) de rayos en el país. Se realizó un análisis subregional de tormentas eléctricas que ayudó a definir seis distintas zonas de interés dentro de México, a partir de las cuales se estudiaron eventos eléctricos específicos por medio de la creación del Coeficiente de Desarrollo de Tormenta (CDT, que estudia la evolución temporal y de intensidad de las tormentas eléctricas), en donde se reporta que en el periodo de máximo desarrollo e intensidad de la tormenta, el coeficiente tiende a un valor de equilibrio (0.2). Se piensa que en un futuro, este análisis podría ayudar a crear modelos típicos de tormenta y generar pronósticos, así como alertas tempranas de actividad eléctrica en tiempo real.

Abstract

GOES-R's satellites, which are composed by a series of high-tech instruments and sensors, brings a new perspective of the world around us, and the Ground Lightning Mapper (GLM) sensor being one of them, records the occurrence of electric activity all around the Americas with a detection rate higher than 70%. The Flash Extent Density (FED) product data series from years 2018 to 2019, provided by the GLM's data, was analyzed for the whole Mexican territory. Las Choapas township, in Veracruz, was determined as the highest flash recorded region in the country. Furthermore, the summer period presented the highest flash accumulation during the year. A thunderstorm's sub-regional analysis helped define six highly interesting regions within the country's territory, in which specific storm events were studied by the creation of the Thunderstorm's Development Coefficient (CDT, which analyzes temporal and intensity evolution within a storm). We found out that during a period of maximum development and high intensity, CDT tends to an equilibrium value (0.2). It is thought that in a near future, this analysis could help create typical storm patterns and generate both real time forecasts and early warnings for thunderstorms.

Prólogo

La intensa y prolongada lluvia, acompañada de una iluminación repentina del cielo nocturno y el impactante estruendo precedente siempre llamó mi atención desde pequeño. El miedo que inicialmente experimentaba se convirtió en fascinación e intriga: esa luz, ese sonido...

Por fortuna y debido a una serie de eventos sin relación aparente, comencé a adentrarme en el mundo de la ciencia, lógicamente el asombro ante dicho fenómeno estuvo presente durante esta travesía y logró abrirme (literalmente) algunas puertas, especialmente aquellas que se encuentran en los cubículos (y laboratorios) de los doctores Adolfo Magaldi, Dara Salcedo, Fernando García y Guillermo Montero, grandes académicos y personas que me apoyaron en distintos pasos de este camino, a quienes tengo mucho que agradecer.

Mi tutor Adolfo y yo, queríamos profundizar en la idea de analizar las tormentas eléctricas de todo el país. Pasamos algunos días platicando sobre este concepto, pero yo no lograba percibir cuál sería mi verdadero aporte de continuar por este camino. Ahí fue cuando entré en razón: no se había estudiado este fenómeno (para todo México) con datos satelitales continuos y constantes, con una resolución tan detallada (8 km en el nadir), incluso se desconocían las zonas con mayor registro de rayos dentro del país, así como los patrones estacionales y horarios.

Con esto, parecía haber suficiente material para crear una tesis, sin embargo al observar la rapidez de los avances, opté por trabajar en un aporte extra (lo que termi-

nó prolongando por varios meses la finalización del proyecto): generar un coeficiente que evaluara la evolución (temporal y de intensidad) de las tormentas eléctricas. Si bien, la naturaleza del rayo es aleatoria (no conocemos con seguridad el camino que recorre), creíamos que era posible determinar el desarrollo de los rayos durante una tormenta, es decir, estudiarlos como grupo y no como evento.

En este proyecto, el lector encontrará una sencilla metodología para estudiar tormentas eléctricas (a partir de datos satelitales) mediante análisis de los estadísticos del producto FED a nivel nacional y regional, el cual muestra la relación de cantidad de destellos por pixel. Asimismo se expone el proceso que llevó a la creación del coeficiente de desarrollo (CDT), el cual analiza la evolución de tormentas eléctricas específicas.

Le invito a continuar leyendo este proyecto esperando que así como yo, aprenda algo nuevo sobre este fascinante tema.

Índice general

Agradecimientos	II
Resumen	III
Abstract	IV
Prólogo	V
1. Introducción	1
2. Objetivos y justificación	3
2.1. Objetivos	3
2.1.1. General	3
2.1.2. Particulares	3
2.2. Justificación	3
3. Marco Teórico	5
3.1. Principios físicos y atmosféricos de las descargas eléctricas	7
3.1.1. Modelo de las nubes tipo dipolo	8
3.2. Serie GOES-R	10
3.2.1. Instrumentos y sensores a bordo	11
3.2.2. Servicios auxiliares de GOES-R	11
3.3. Detección de descargas eléctricas mediante el sensor GLM	13
3.3.1. Enfoque de medición del GLM	14
3.3.2. Algoritmo de Clúster y Filtrado de Rayos	15

3.3.3. Productos de malla	20
4. Metodología	24
4.1. AWIPS en el producto de malla FED	24
4.2. Mapa de ocurrencia de destellos en el territorio nacional y mapa de calor temporal	25
4.3. Creación de nuevos subconjuntos	27
4.4. Comparación del KDE entre regiones de interés	29
4.5. Análisis local de tormentas y generación de su coeficiente de desarrollo	29
5. Resultados	33
5.1. MOD y MDC temporal de México	34
5.2. Análisis subregional	41
5.3. Análisis comparativo entre regiones de interés	48
5.4. Coeficiente de desarrollo de tormentas	53
6. Conclusiones	68
Referencias	70

Índice de figuras

3.1. Experimento del cometa de Benjamin Franklin	7
3.2. Esquema simplificado de la diferenciación de carga eléctrica en una nube de tormenta.	9
3.3. Cobertura geográfica de los satélites GOES-R	11
3.4. Instrumentos y sensores componentes de GOES-R	12
3.5. Segmento terrestre y sistema general de GOES-R	13
3.6. Sensor GLM	16
3.7. Primer periodo de integración del LCFA.	18
3.8. Segundo periodo de integración	19
3.9. Tercer periodo de integración	19
3.10. Cuarto periodo de integración	20
3.11. Quinto y último periodo de integración	21
3.12. Visualización simplificada de la generación del producto FED	22
3.13. Acumulación del producto FED en todo México durante el 22 de oc- tubre del 2019	23
4.1. Destellos sobre escala de color ABI en el sector CONUS	26
4.2. Conjunto de datos pertenecientes al territorio Mexicano dentro del sec- tor CONUS	27
4.3. Extensión de las 25 subregiones definidas para México.	28
5.1. Desarrollo temporal de un rayo	34
5.2. MOD del territorio nacional.	35

5.3. Ubicación de las tres zonas con mayor registro de FED del país	36
5.4. Mapa de calor temporal de los parámetros estadísticos de FED en el territorio mexicano	38
5.5. Valor diario de PER por subregión.	42
5.6. Promedio diario de FED por subregión	43
5.7. Valor máximo de FED registrado diariamente por subregión.	44
5.8. Desarrollo temporal de PER por subregión.	46
5.9. Desarrollo temporal del promedio horario de FED por subregión.	47
5.10. Desarrollo temporal del valor máximo registrado en cada subregión.	48
5.11. KDE del valor máximo de FED para las regiones de interés durante el verano del 2018.	49
5.12. KDE del valor máximo de FED para las regiones de interés durante la primavera del 2019.	50
5.13. KDE del promedio de FED para las regiones de interés durante el verano del 2018.	51
5.14. KDE del PER para las regiones de interés durante el verano del 2018.	52
5.15. Análisis CDT en la península de Yucatán	55
5.16. Análisis CDT en el centro de México	57
5.17. Análisis CDT en el sur de México	58
5.18. Análisis CDT para el norte de México	60
5.19. Análisis CDT para el Golfo de México	62
5.20. Análisis CDT en el Pacífico Mexicano	63

Capítulo 1

Introducción

Cada año, la caída de rayos provoca alrededor de 240,000 lesiones y poco más de 24,000 muertes a nivel mundial (Holle, 2015). Si bien, dichos valores han descendido (un orden de magnitud) en las últimas décadas debido a la migración de familias de zonas rurales a urbanas, en México para el año 2015 el porcentaje de población rural era de un 23 % (INEGI, 2016). Asimismo, se reportó que poco más de 7,300 personas fueron alcanzadas por rayos y murieron durante el periodo de 1979-2011 en México (Raga, De La Parra, y Kucienska, 2014), valores que vuelven aún más relevante al estudio de las tormentas eléctricas en el país.

Por otro lado, la caída de un rayo puede iniciar incendios forestales, así como generar daños en infraestructura eléctrica (Aich y cols., 2018).

Aunado a la importancia económica y social de los rayos, las descargas eléctricas atmosféricas producen óxidos de nitrógeno (Price, 2013) al atravesar la capa de aire, mismos que son tóxicos para el ambiente y los ecosistemas. Por lo tanto, y como un intento de comprender la relación entre los rayos y el clima, éstos fueron agregados al Sistema Global de Observación Climática (GCOS) como parte de la lista de variables climáticas esenciales (Global Climate Observing System, 2016). En donde dichas variables proveen de información necesaria para entender (y predecir) la evolución del clima.

Queda clara la importancia en el estudio de la actividad eléctrica, esto aunado a los nuevos datos satelitales provistos por sensores de última generación, implica que estamos en un momento clave para analizar e implementar nuestros descubrimientos en el área. Con una gran resolución espacial de 8 km (en el nadir) y latencia temporal de 20 segundos, la información generada por el equipo GLM provee de una visión completa y muy detallada de la actividad eléctrica en México.

Abordando una rama fascinante y relativamente nueva de las ciencias atmosféricas, el presente proyecto busca analizar las tormentas eléctricas ocurridas dentro del territorio mexicano con base en una metodología sencilla e instrumentos de vanguardia.

Capítulo 2

Objetivos y justificación

2.1. Objetivos

2.1.1. General

Conocer la distribución espacio-temporal de las tormentas eléctricas en México utilizando los datos obtenidos del equipo GLM que se encuentra a bordo de los satélites de la serie GOES-R.

2.1.2. Particulares

- Encontrar las zonas de mayor ocurrencia de rayos en México.
- Definir los distintos regímenes espacio-temporales de actividad eléctrica presentes en nuestro país.
- Crear un coeficiente que logre medir el desarrollo (temporal y de intensidad) de tormentas eléctricas específicas que ocurrieron en el territorio nacional.

2.2. Justificación

La tecnología avanza de manera rápida y constante, por lo que la ciencia debe evolucionar en sus técnicas a la par de dichos avances buscando describir de la mejor

manera a nuestro entorno. Esa es la premisa de la cual se basa el presente trabajo.

En la actualidad gracias a los avances en la computación y electrónica se ha mejorado sustancialmente el desarrollo de sistemas complejos para la observación de la Tierra. Respecto a dichos avances científicos y tecnológicos, la NASA junto con la NOAA han realizado un trabajo en conjunto sin precedentes que ha permitido el desarrollo de la constelación de satélites geoestacionarios ambientales denominados GOES. Hasta la fecha se han puesto en órbita 17 satélites de esta serie, los cuales han provisto de información atmosférica y oceánica de la mayoría del continente americano (latitudes entre los 54°S / °N) así como parte de los océanos Pacífico y Atlántico, facilitando así los pronósticos meteorológicos, la predicción y el análisis climático (Carlomusto, 2018). La cantidad de información que se genera diariamente del GOES-16 es enorme, proveniente de seis sensores distintos que operan en dicho satélite. En este trabajo únicamente será usado uno de ellos, el *Geostationary Lightning Mapper* (GLM). Se trata de un mapeador compuesto por fotomultiplicadores que registra las ondas electromagnéticas (en el espectro visible) procedentes de las descargas eléctricas atmosféricas y mediante algoritmos de filtrado, logra aislar a los eventos (rayos) con una efectividad mayor al 70 %.

El campo de la electricidad atmosférica es uno de los menos estudiados dentro de las ciencias de la Tierra, existen teorías sobre el desarrollo y la evolución de las tormentas eléctricas, sin embargo no se terminan de describir formalmente los mecanismos que intervienen en la generación de rayos. En este sentido, el GLM resulta clave para entender dicho fenómeno pues provee de información continua sobre descargas eléctricas a una escala espacial sin precedentes (8 km, con productos que incluso llegan a los 2 km de resolución). De tal manera, en este trabajo seremos capaces de determinar las regiones que registran más rayos dentro del país, así como su distribución espacial y temporal. Los resultados encontrados en el presente trabajo servirán como una buena base para los futuros estudios de este tipo.

Capítulo 3

Marco Teórico

Desde el surgimiento de las primeras sociedades y grupos de homínidos, los eventos de actividad eléctrica han llamado la atención de chicos y grandes. La luz cegadora de los relámpagos acompañado del sonido imponente de los truenos que retumban por algunos segundos mientras (usualmente) cae un aguacero, es una de las maravillas que se pueden observar desde casi cualquier lugar de nuestro planeta. Ha sido tal la fascinación por este fenómeno que civilizaciones antiguas como los griegos, nórdicos-escandinavos, pueblos nativos de Norteamérica, mayas y mexicas (por mencionar algunos) tenían deidades asociadas a la lluvia, al trueno o a los rayos: *Zeus*, *Thor*, *Pájaro del trueno*, *Chaac* y *Tláloc* respectivamente (Altshuler, 2017). De manera general, sus creencias aunque tenían diferencias, todas circundaban la explicación de que los rayos eran una especie de fuego/bólido (Aplicaciones Tecnológicas S. A., 2019), producto de la furia de alguno de sus dioses.

Cuando la explicación teológica no era suficiente para algunos individuos, la ciencia entró en acción. Sin embargo, un sinnúmero de interrogantes salen a escena cuando el humano comienza a estudiar dicho fenómeno eléctrico, un viaje que comenzó a mediados del siglo XVIII y continúa hasta ahora. Fue en 1752 cuando Benjamin Franklin se dio a la tarea de encontrar una relación entre los rayos y la electricidad, mediante su tan famoso experimento del cometa. En medio de una tormenta en Filadelfia y únicamente con un papalote creado a partir de un pañuelo e hilo de seda, una

cuerda de cáñamo, un tarro *Leyden* (aparato capaz de almacenar energía eléctrica), una llave de metal y un alambre afilado, Benjamin Franklin (acompañado de su hijo William) comprobó la naturaleza eléctrica de los rayos. Durante el experimento, Franklin amarró el alambre metálico a la punta superior del cometa (actuando como pararrayos), en la zona posterior sujetó la cuerda de cáñamo y aseguró la llave de metal. Finalmente agregó el hilo de seda a dicho arreglo (de esta manera el hilo de cáñamo mojado por la lluvia podría actuar como conductor a diferencia del hilo de seda que se mantendría seco desde el cobertizo donde era sujetado por Franklin). Al cabo de algunos minutos, notó que se erguían ciertos hilos de la cuerda de cáñamo y mientras Franklin acercaba la mano hacia la llave, las cargas negativas del metal se atraían a sus extremidades y pudo sentir una descarga en los dedos (The Franklin Institute, 2019). Fue en este momento donde el estadounidense descubriría la naturaleza eléctrica de los rayos. La descripción de los eventos fue escrita por Benjamin Franklin y publicada en la *Pennsylvania Gazette* el 19 de Octubre de 1752, en donde detalló lo sucedido y agregó las instrucciones para que cualquiera pudiese recrear el experimento. Un par de años después, perfeccionó el pararrayos, artefacto que protegería a las casas y edificaciones de esa época y que en la actualidad continúa siendo de gran importancia. En la figura 3.1 se muestra una representación de Benjamin Franklin y su hijo William llevando a cabo el experimento del cometa, la cual se encuentra en la Biblioteca del Congreso en Washington, D.C.

Independientemente de la relevancia de los resultados encontrados por Franklin en aquella época, éstos constituían apenas una primera aproximación sobre el estudio de la electrificación de las nubes de tormenta (Altshuler, 2017), así que la necesidad de continuar estudiando dicho fenómeno continuó latente.

No fue hasta mediados del siglo XX que se lograron determinar las zonas que ocupaban generalmente las cargas eléctricas dentro de la nube (Dobson, 1969). Actualmente sabemos que la nube de tormenta se encuentra fuertemente electrificada con zonas de carga positiva y negativa, las cuales se van reforzando a medida que el



Figura 3.1: Experimento del cometa de Benjamin Franklin pintado por Charles E. Mills (1856-1956). <https://tinyurl.com/y9u2pt3z>

proceso de convección lo permita. Se han elaborado varios modelos para explicar la diferenciación de carga dentro de las nubes. Si bien, es cierto que los procesos microfísicos dentro de las nubes no se conocen a fondo todavía, existe un modelo que es el más aceptado para explicar la diferenciación de carga dentro de las nubes, el cual se expondrá a continuación.

3.1. Principios físicos y atmosféricos de las descargas eléctricas

¿Por qué no todas las nubes son capaces de producir rayos?, ¿Qué sucede dentro de una nube de tormenta para que ésta se convierta en una del tipo eléctrica?, son algunas de las cuestiones que se discuten en las siguientes secciones.

Para poder estudiar a los rayos, es necesario comprender el proceso por el cual se genera la separación de cargas dentro de la nube y que logra intensificar el campo eléctrico atmosférico. El mecanismo de inducción de carga debido a la interacción entre graupel y gotas sobreenfriadas resulta la teoría más aceptada que responde a los cuestionamientos iniciales, en donde las partículas de hielo toman un papel fundamental.

A lo largo de los años, y desde un punto de vista funcional, se ha logrado comprender la naturaleza de los relámpagos: la superficie de la Tierra y la base de las nubes adquieren cargas eléctricas opuestas, lo que se conoce como efecto sombra, mientras que la atmósfera actúa de manera similar a un cuerpo aislante que se rehusa a una descarga eléctrica. Sin embargo, en el momento en que la diferencia de carga entre ambas superficies (nube y tierra) es suficientemente grande, la formación de un camino ionizado entre la nube y el suelo se vuelve posible y una descarga eléctrica ocurre mientras la base de la nube transfiere su carga (usualmente negativa) neutralizando la carga positiva del suelo. Las diferencias que podemos observar en la producción de rayos entre varios sistemas atmosféricos se basa principalmente en la composición y dinámica interna de las nubes. De manera particular, muy pocas veces los rayos pueden ser producidos por nubes que tengan una temperatura mayor a los 0° C, la presencia de partículas de hielo parece ser un factor imprescindible para el desarrollo de un campo eléctrico suficientemente grande para la generación de rayos y la convección es un proceso fundamental para su formación (Black y Hallett, 1998). Un hecho que parece ser reconocido (de manera general) es que la diferenciación de carga dentro de la nube suele estar acompañada de precipitación (Illingworth, 1978).

3.1.1. Modelo de las nubes tipo dipolo

Las gotas de lluvia que componen a la nube pueden colisionar y coalescer a temperaturas muy por debajo de los 0° C (gotas sobreenfriadas) sin llegar a congelarse (Black y Hallett, 1998), este fenómeno resulta fundamental para la separación de carga en las nubes. Las partículas de hielo aparecen de manera significativa pero a concentraciones variables (en el orden de decenas por litro) y su red cristalina depende de las condiciones de temperatura y presión en donde se formaron. Una vez que crecen lo suficiente para ser atraídos por la fuerza gravitatoria de la Tierra, las partículas de hielo pueden capturar gotas sobreenfriadas en su camino, mismas que se van congelando en su periferia generando partículas de *graupel*.

La superficie de una partícula de *graupel* es bastante compleja e irregular, con zonas de crecimiento y zonas de evaporación, por lo que al desplazarse por la nube y chocar con gotas de agua sobreenfriadas y partículas de hielo, se fomenta la separación de carga bajo una gama muy amplia de condiciones que aún no son completamente estudiadas ni comprendidas. De cualquier manera, debido a su masa, el *graupel* cae más rápido que otras partículas de agua pequeñas con carga opuesta, dando origen a una especie de dipolo dentro de la nube.

Éste es precisamente el concepto más aceptado para la separación de cargas dentro de la nube: el modelo tipo dipolo, en donde existe una separación física de partículas cargadas opuestamente. Así podemos entender que las colisiones de gotas-hielo o de hielo-hielo son fundamentales para este mecanismo. Las partículas más grandes caen debido a la fuerza de la gravedad mientras las partículas más pequeñas no alcanzan a vencer las fuerzas viscosas de la atmósfera y se mueven (de manera browniana) debido a la dinámica propia del sistema, usualmente siguiendo a los flujos convectivos (ver la figura 3.2).

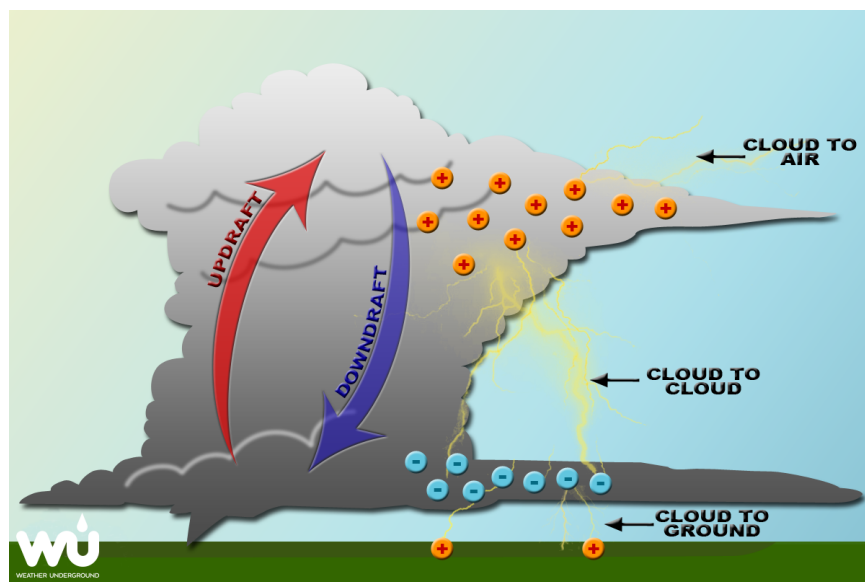


Figura 3.2: Esquema simplificado de la diferenciación de carga eléctrica en una nube de tormenta tipo dipolo. <https://tinyurl.com/y7xy6e2m>

De tal manera podemos definir que no cualquier nube presenta las condiciones fundamentales para generar descargas eléctricas que a manera de resumen son: presencia de gotas sobreenfriadas, partículas de hielo y *graupel*, así como flujos convectivos dentro del sistema para fomentar la interacción (choques, rozamiento) entre dichas partículas componentes.

3.2. Serie GOES-R

La constelación de Satélites Geoestacionarios Operacionales Ambientales (GOES por sus siglas en inglés) ha sido clave para la observación de los sistemas terrestres y solares por más de 40 años (Goodman, 2020), proveyendo de valiosa información sobre fenómenos ambientales de gran impacto como lo son las tormentas, erupciones volcánicas, huracanes e incendios, así como advertencias sobre actividad solar extrema. La serie R de satélites geo-estacionarios consta de cuatro nuevos satélites (GOES R, S, T, U). El primer satélite de esta serie (GOES-16) fue lanzado en noviembre del 2016 seguido por el GOES-17 en marzo del 2018 (para fines operativos, una vez en órbita la letra inicial designada se cambia por un número), GOES T y U serán puestos en órbita en los próximos años. La serie GOES-R tiene tres objetivos como misión: (1) mantener sistemas de advertencia continuos y confiables sobre fenómenos ambientales (tormentas, erupciones, huracanes e incendios), (2) monitorear las condiciones ambientales terrestres y espaciales, y (3) mejorar las observaciones atmosféricas y oceánicas así como la capacidad de disseminación de los datos (NASA, 2019).

GOES 16 y 17 se encuentran a 35,786 km sobre el ecuador. Juntos, son capaces de observar completamente a Estados Unidos y México, el centro y este del océano Pacífico, las áreas poniente y central del Atlántico, así como Centroamerica y Sudamérica. Ambos satélites (este y oeste, como se les denomina) están centrados a 75.2 °W y 137.2 °W respectivamente (NASA, 2019) (ver la figura 3.3).

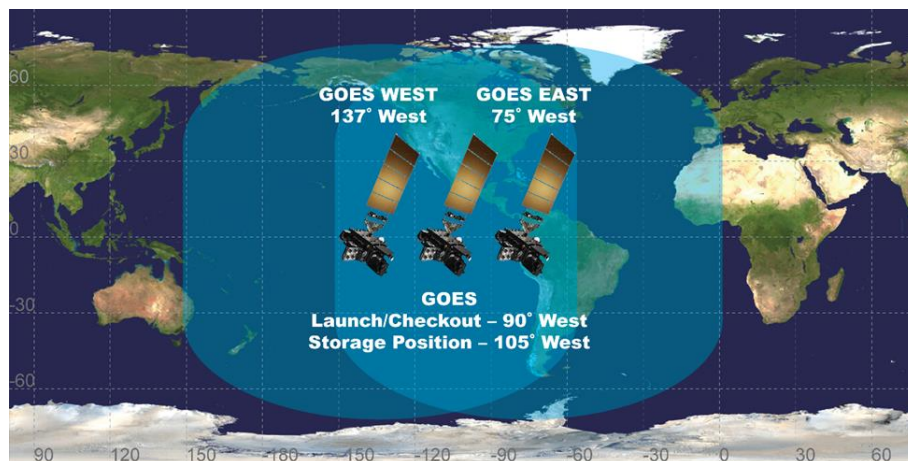


Figura 3.3: Cobertura geográfica de la constelación de satélites GOES-R. Obtenido de *The GOES R Series, 2019*.

3.2.1. Instrumentos y sensores a bordo

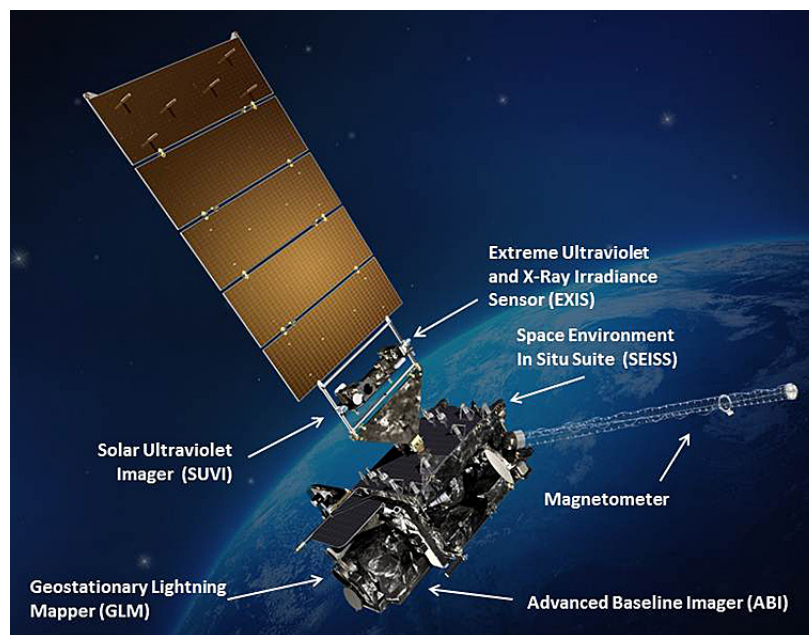
Seis nuevos instrumentos de tres distintas categorías fueron diseñados y puestos a bordo de los satélites de la serie GOES-R (ver tabla 3.1), los cuales proveen de mejoras sin precedentes sobre la resolución espectral, espacial y temporal (Sullivan, 2020). En la figura 3.4 se muestran los instrumentos componentes de GOES-R, que incluyen al ABI y GLM que observan la Tierra, SUVI y EXIS que apuntan al sol, así como el SEISS y el Magnetómetro que recaban información in-situ del clima espacial.

3.2.2. Servicios auxiliares de GOES-R

Adicionalmente de los instrumentos sensores de los satélites, GOES-R está equipado con antenas y transpondedores que proveen los servicios de comunicación y transmisión de datos, compuestos por: la Red de Transmisión de Información de Alta frecuencia y de Manejo de Información Meteorológica (HRIT/EMWIN), el Sistema de Colección de Datos (DCS), el sistema de Seguimiento Asistido de Búsqueda y Rescate de Satélites (SARSAT) y el Retransmisor de GOES (GRB) (Sullivan, 2020). Finalmente, los datos generados y retransmitidos por la constelación de satélites son recibidos en superficie por el segmento terrestre de GOES-R, el cual opera desde 3

Instrumento	Productos
Advanced Baseline Imager (ABI)	Detección de aerosoles a través del espesor óptico (AOD), COD, Imágenes de nubes y humedad, Tope de nube (altura, fase, temperatura y presión), Estimación de la intensidad de huracanes, Temperatura superficial del suelo, Temperatura superficial del mar, Tasa de precipitación / QPE, Cobertura de nieve, Detección y altura de ceniza volcánica, Agua total precipitable y Radiancia
Extreme Ultraviolet and X-ray Irradiance Sensors (EXIS)	Flujo Solar: EUV, Irradiancia de rayos-X
Solar Ultraviolet Imager (SUVI)	Imágenes Solares EUV
Space Environment In-Situ Suites (SEISS)	Protones solares y galácticos, Iones Pesados, Aniones y Cationes magnetosféricos de baja y alta energía
Magnetómetro (MAG)	Campo Geomagnético
Geostationary Lightning Mapper (GLM)	Rayos: eventos, grupos y destellos

Tabla 3.1: Instrumentos en GOES-R y sus productos generados.

Figura 3.4: Instrumentos y sensores componentes de GOES-R. Obtenido de *The GOES R Series*, 2019.

sitios en Estados Unidos: la Instalación de Operaciones de los Satélites de la NOAA (NSOF) en Suitland, Maryland. La Estación de Adquisición de Datos y Comandos (WCDAS) localizada en Wallops, Virginia y la Instalación de Respaldo Remota (RBU) en Fairmont, Virginia Occidental (NASA, 2019). Ver la figura 3.5 para una visión general del sistema GOES-R.



Figura 3.5: Segmento terrestre y sistema general de GOES-R. Obtenido de *The GOES R Series*, 2019.

3.3. Detección de descargas eléctricas mediante el sensor GLM

El trazador cartográfico de relámpagos geostacionario (GLM) representa el primer paso en una constelación de instrumentos operacionales que observan de manera remota y continua las descargas eléctricas en una escala continental (Rudlosky, Goodman, y Virts, 2020). Tiene como objetivos: (1) proveer mediciones continuas de rayos a una escala de *full disk*, (2) generar advertencias tempranas sobre tormentas y torna-

dos, y (3) acumular una base de datos histórica para estudiar cambios decadales en la actividad eléctrica atmosférica. El GLM monitorea de forma continua las emisiones de luz desde el tope de las nubes con una eficiencia promedio del 70% a lo largo del día. Sin embargo, en la noche la detección de eventos aumenta hasta un 90% ya que la luminosidad proveniente del sol deja de interferir en las mediciones (Bruning y cols., 2019). El sensor mide las descargas eléctricas totales (intra-nube, nube a tierra, o tierra a nube) sin lograr diferenciar entre los distintos tipos de rayos.

3.3.1. Enfoque de medición del GLM

Tecnológicamente, el GLM está compuesto por un CCD (sensor con células fotovoltaicas que convierten las señales de luz recibida en corriente eléctrica) que tiene la capacidad de registrar 500 cuadros por segundo, en donde los datos se distribuyen como señales en un arreglo de pixeles agrupados jerárquicamente en tres niveles (Bruning y cols., 2019). De tal manera, podemos entender al GLM como un generador de imágenes de 1372x1300 pixeles, con una serie de filtros ópticos capaces de detectar descargas eléctricas en el tope de las nubes tanto en el día como en la noche. Los datos tomados por el instrumento son pasados por un algoritmo de navegación que convierte los puntos x,y del plano focal del satélite en coordenadas de latitud y longitud (Rudlosky y cols., 2020). En el nadir, el GLM tiene una resolución espacial (nominal) de 8 km por pixel, creciendo hacia los extremos con valores de hasta 14 km por pixel. El instrumento calcula la luminosidad promedio de fondo (*background*) para cada pixel y cada 2 milisegundos (tiempo de integración) compara los nuevos datos contra los datos de fondo. Al lograr detectar que el valor de luminosidad rebasa cierto límite, este se cataloga como un evento. Una serie de filtros ayudan a separar los eventos reales de falsas alarmas para que finalmente el Algoritmo de Clúster y Filtrado de Rayos (LCFA) se encargue de generar los tres productos base (de nivel L2): eventos, grupos y destellos (Goodman, Mach, Koshak, y Blakeslee, 2012), los cuales se definen a continuación.

3.3.2. Algoritmo de Clúster y Filtrado de Rayos

Durante el día, la luminosidad proveniente del sol reflejada por la atmósfera, o la superficie terrestre puede llegar a ser incluso mayor que la producida por rayos, por lo que las señales de relámpagos suelen encontrarse sepultadas en los valores del *background*, así que es necesario implementar técnicas de filtrado para detectar eventos de actividad eléctrica. Estas técnicas de las que hablamos son precisamente las que se utilizan en el LCFA y que aprovechan las características espaciales, espectrales y temporales de los rayos (Goodman y cols., 2012). A continuación se exponen los cuatro filtros implementados en el LCFA.

- Filtrado espacial: Se generan imágenes instantáneas de fondo (IFOV) para cada elemento de la matriz del plano focal del GLM y se hacen coincidir con el área típica de una nube iluminada por un rayo (5-10 km). Dicha relación resulta en un muestreo óptimo de la escena del rayo en relación con la iluminación de fondo. De tal manera, cualquier dato superior a los 10 km es marcado como falsa alarma probable.
- Filtrado espectral: Se realiza un filtrado de interferencia con banda estrecha centrada en una línea de emisión correspondiente a la primer ionización del oxígeno en los 777.4 nm, la cual ocurre durante las descargas eléctricas, en donde se aísla y transmite dicha longitud de onda.
- Filtrado temporal: El GLM aprovecha la diferencia temporal entre los pulsos presentes en las descargas eléctricas (en el orden de milisegundos) y la señal del *background* que tiende a ser constante (en una escala de segundos). El tiempo de integración indica el tiempo que un pixel acumulará carga entre registros. La tasa de señal-ruido de los rayos aumenta a medida que el periodo de integración se acerca a la duración de los pulsos, sin embargo, cuando el periodo de integración se vuelve muy pequeño, se puede llegar a separar un solo destello en distintos pulsos (conduciendo a datos erróneos) y disminuyendo la tasa de señal-ruido. Así es como se adoptó un tiempo de integración de 2 milisegundos, para minimizar la separación de pulsos y maximizar la detección de los rayos.

- Sustracción de fondo: Este filtrado final es implementado para remover la paulatina variación del *background*. Se calcula la anomalía entre el fondo y la señal del plano focal (pixel a pixel). Cuando la diferencia entre ambas señales rebasa un valor límite dentro de un pixel, ese elemento se identifica como un potencial evento.

Procesamiento de las señales a bordo

El GLM es un generador de imágenes optimizado para detectar (y localizar) descargas eléctricas. El instrumento está compuesto por seis subsistemas: el sistema generador de imágenes, el plano focal, un procesador de señales en tiempo real, el sistema que formatea y procesa los eventos (RTEP), la fuente de alimentación y un sistema electrónico de circuitos. En la figura 3.6 se muestra un esquema del GLM.

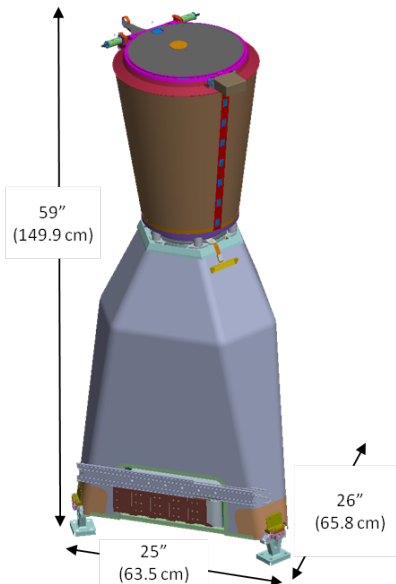


Figura 3.6: Sensor GLM. Obtenido de *The GOES R Series*, 2019.

Los sistemas procesadores de eventos (RTEPs) se encargan de extraer las señales de rayos (usualmente pequeñas) de un *background* intenso y paulatinamente cambiante debido al ángulo cenital del sol y el albedo de las nubes y superficie terrestre. Esto lo logran promediando pixel a pixel las salidas del plano focal (sobre algunos cuadros) para generar la imagen de fondo, misma que comparan con la última señal obtenida

para generar el valor de la anomalía, la cual consiste en valores que fluctúan alrededor del cero con picos ocasionales que denotan la presencia de descargas eléctricas (Goodman y cols., 2012).

Descripción del Algoritmo

El producto principal que genera el GLM no se trata de una imagen o colección de valores, sino de un *dataset* de rayos. Los datos satelitales de nivel cero (señales de luminosidad) deben ser decodificados, cuantificados y georeferenciados para generar los archivos de nivel uno (L1b). Estos a su vez son filtrados y agrupados entre sí para producir los archivos de salida finales (nivel dos). En otras palabras, el LCFA toma como entrada los archivos de nivel L1b para crear los productos de segundo nivel (L2), en donde se introducen por primera vez los conceptos de eventos, grupos y destellos.

- **Evento:** Ocurrencia de un pixel excediendo el valor límite impuesto por el *background* durante el tiempo de integración de 2 ms (Goodman y cols., 2012). Cada pixel (iluminado) en nivel L1b representa un evento en nivel L2. Los eventos son la unidad básica de datos del GLM.
- **Grupo:** Eventos que ocurren en el mismo periodo de integración y que se registran como pixeles adyacentes en el plano focal (Goodman y cols., 2012). Es muy probable que una descarga eléctrica ilumine más de un pixel durante un periodo de 2 ms, lo que resultaría en un grupo de dos o más eventos adyacentes (a un lado o en diagonal). La información de localización de un grupo es calculada en coordenadas terrestres de latitud y longitud. Un grupo puede estar compuesto por uno o más eventos, y por otro lado, si un evento puede asignarse a más de un grupo, todos aquellos grupos serán fusionados en uno solo.
- **Destello:** Conjunto de grupos que se encuentran temporalmente separados por no más de 330 ms y que circunden una distancia (euclidiana) igual o menor a 16.5 km (Goodman y cols., 2012). No existe un límite absoluto para definir a un

destello: mientras los grupos subsecuentes cumplan con los requisitos espacio-temporales, éstos serán incluidos en el mismo. La información de destellos no será movida a los archivos de salida hasta que dicho destello quede completado (ya no se le asignen más grupos).

Existen dos formatos en los archivos de salida: *netCDF4* y *McIDAS* cada cual con sus productos de eventos, grupos y destellos, los cuales son referenciados geográfica y temporalmente (Goodman y cols., 2012). Dichos productos se generan con base en relaciones estructurales de árbol, en donde los grupos son construidos a partir de los eventos y similarmente los destellos con base en los grupos. Aunados a dichos productos base, cada archivo contiene un centroide de latitud y longitud (en el arreglo bidimensional), el tiempo de inicio y finalización de destellos y un ID único para cada entidad guardada. En términos de propiedades físicas, también se incluyen la energía de radiación y el área ocupada por cada grupo y destello (Bruning y cols., 2019). A continuación se muestra gráficamente la construcción de eventos, grupos y destellos por parte del LCFA. Las siguientes figuras fueron tomadas de la documentación teórica base del algoritmo LCFA (Goodman y cols., 2012).

Tiempo = 0 ms: Los eventos 1, 2 y 3 ocurrieron durante el mismo periodo de integración. Al ser todos adyacentes, pertenecen al mismo grupo (a), mismo que es asignado a un único destello (A). Ver figura 3.7.

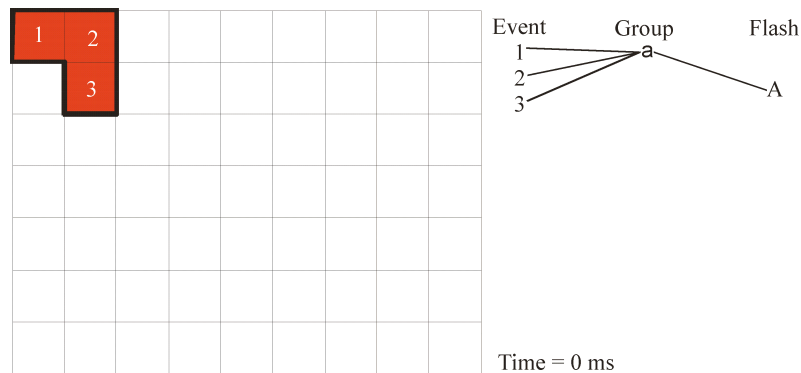


Figura 3.7: Primer periodo de integración. 3 eventos pertenecientes al mismo grupo y destello.

Tiempo = 100 ms: En este momento (100 ms después) ocurrieron los eventos 4, 5 y 6, los cuales son asignados a un nuevo grupo (b) y al encontrarse a menos de 16.5 km y dentro de los 330 ms, se añaden al mismo destello (A). Ver figura 3.8.

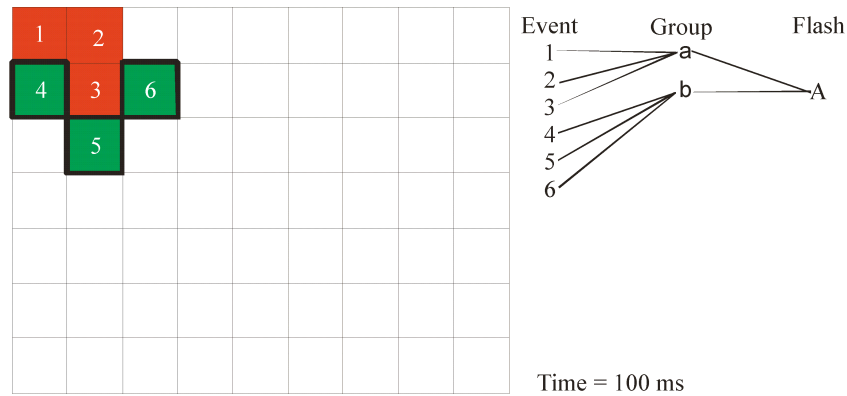


Figura 3.8: Segundo periodo de integración, seis eventos pertenecientes a dos grupos pero al mismo destello.

Tiempo = 350 ms: Nos encontramos a 350 ms del primer grupo pero a solo 220 ms del segundo. En este periodo, ocurrieron los eventos 7, 8, 9 y 10. Los eventos 7 y 8 se encuentran adyacentes por lo que son asignados al mismo grupo (c) y los eventos 9 y 10 están a un lado del otro pero separados de 7 y 8, por lo que corresponden a un nuevo grupo (d). El grupo (c) será enviado al destello (A) ya que cumple las condiciones espacio-temporales para ello. Si bien, el grupo (d) se encuentra dentro de la ventana temporal, no se ubica dentro del radio de 16.5 km, así que se crea un nuevo destello (B). Ver la figura 3.9.

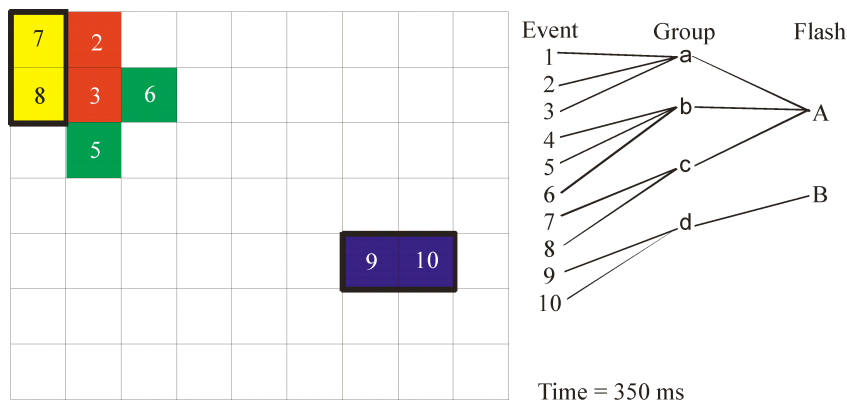


Figura 3.9: Tercer periodo de integración, diez eventos pertenecientes a cuatro grupos y dos destellos.

Tiempo = 400 ms: 50 ms después de los últimos grupos ocurrieron otros dos eventos (11 y 12), y como no son adyacentes cada uno se asigna a un grupo distinto (e, f respectivamente). Estos dos grupos se encuentran a menos de 16.5 km del último grupo y ocurrieron en un periodo menor de 330 ms por lo que se asignan al mismo destello pasado (B). Ver la figura 3.10.

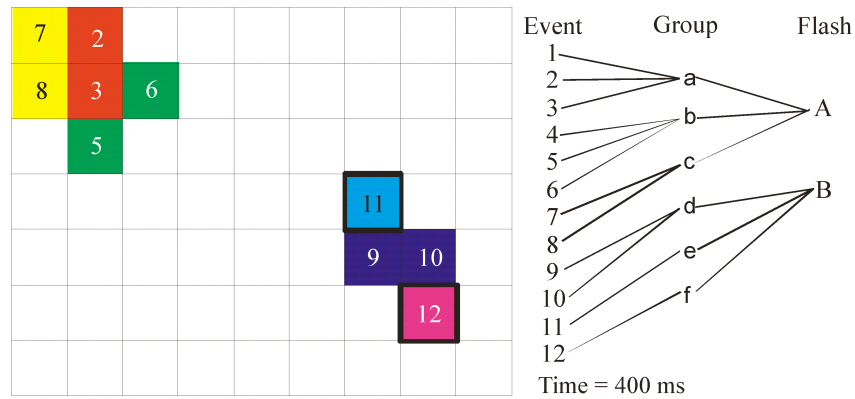


Figura 3.10: Cuarto periodo de integración, doce eventos componiendo seis grupos y dos destellos.

Tiempo = 750 ms: A 350 ms del periodo pasado, ocurren 2 eventos más (13 y 14) y al no estar adyacentes, se asignan a nuevos grupos (g, h respectivamente). El primer grupo (g) se traslapa con los eventos del destello inicial (A) pero ya han pasado 400 ms desde el último grupo asociado a dicho destello, por lo que el grupo (g) pertenecerá a uno nuevo (C). Finalmente el grupo (h) no se encuentra dentro del radio de 16.5 km de ningún destello, por lo que se asigna a uno nuevo (D). Ver la figura 3.11.

3.3.3. Productos de malla

Durante las secciones pasadas hemos discutido la naturaleza de los datos de actividad eléctrica: una gran cantidad de información en periodos muy cortos y consecutivos (recordemos que el periodo de integración del sensor es de 2 ms generando 3 archivos por minuto). Es por esto que los datos satelitales de rayos se consideran de muy alta frecuencia (VHF). Dada la gran cantidad de información presente, es común que en los arreglos VHF se observe una superposición de puntos cuando se llevan los datos de

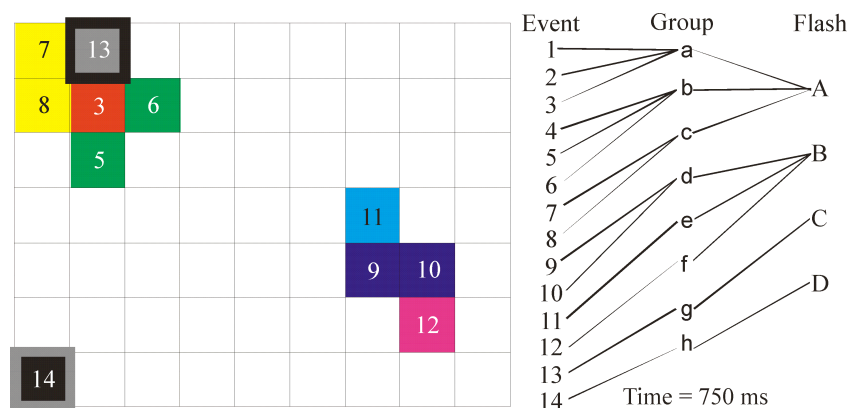


Figura 3.11: Último periodo de integración, finalizando con catorce eventos, ocho grupos y cuatro destellos.

nuestro espacio tetradimensional a un arreglo bidimensional para su estudio (Bruning y cols., 2019). Esta condición nos conduce a buscar métodos que logren ser capaces de aprovechar dicha naturaleza de los datos. Durante este trabajo, me referiré a esos métodos como productos de malla, los cuales toman algunas variables de los datos de segundo nivel (L2) para generar nuevas salidas de información sobre un espacio bidimensional georreferenciado.

Los datos de nivel L2 (eventos, grupos y destellos) se producen en forma de puntos, lo que inherentemente denota una anomalía expresada en una pérdida en la información espacial. Los productos de malla actúan sobre dicho problema diseminando la naturaleza discreta de la información, ya que renavegan los datos de latitud y longitud de los eventos registrados por el GLM sobre una nueva malla (Rudlosky y cols., 2020). Anteriormente se comentó que los elementos de la malla base del GLM (L2) se componen por 8 km (en cada lado) en el nadir, aumentando hacia los extremos a 14 km (en cada lado). En el caso de los productos de malla, los eventos son reubicados en una nueva matriz con dimensiones de 2x2 km por pixel siguiendo el arreglo original del sensor ABI.

Para la generación de los productos de malla, los centroides de los eventos de nivel L2 se reconstruyen en forma de polígonos, los cuales son partidos por la nueva

mallas y llevan a la acumulación de destellos en cada una de sus particiones. Todos los destellos ocurridos en 1 minuto son la base para la creación de los productos de malla. Hasta el momento de la escritura de este proyecto, existen tres distintos productos: *flash extent density* (FED), *average flash area* (AFA) y *total optical energy* (TOE). En la figura 3.12 se muestra un esquema general sobre la creación del producto FED con base en los datos de nivel dos (L2) del sensor GLM.

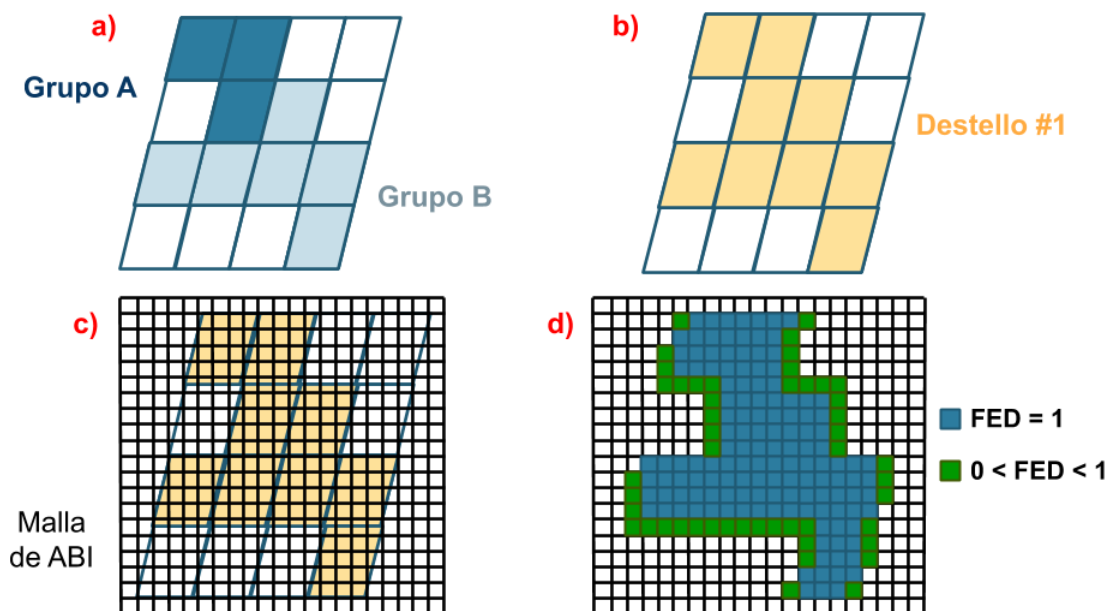


Figura 3.12: Visualización simplificada de la generación del producto FED. (a) Se registran dos grupos adyacentes, (b) mismos que componen a un solo destello. (c) Se sobrepone una nueva malla con dimensiones iguales a la de los productos del sensor ABI, en donde se acumula y calcula cada partición del polígono (destello), (d) los valores de FED se redondean aritméticamente al entero más cercano. <https://tinyurl.com/y7qk3q3v>

Uno de los primeros esfuerzos para generar un producto de malla fue la creación del FED, definido en 2005 por Lojou y Cummins como un proceso de contabilizar todos los destellos que pasen a través de un elemento de matriz durante un periodo de tiempo subjetivo al usuario (Lojou y Cummins, 2005).

Particularmente, la generación de productos de malla reduce el tamaño de los archivos de salida, así como reestablece la información espacial. El FED es el producto

que mejor muestra la relación de cantidad/extensión de los destellos del GLM, por lo tanto es el producto de malla más utilizado para estudiar cuantitativamente la actividad eléctrica (Rudlosky, 2018).

En la figura 3.13 se muestra el acumulado total del 22 de Octubre del 2019 del producto FED para toda la República Mexicana, en donde podemos observar que la mayor actividad eléctrica atmosférica se dio en el Golfo de México así como en el estado de Veracruz.

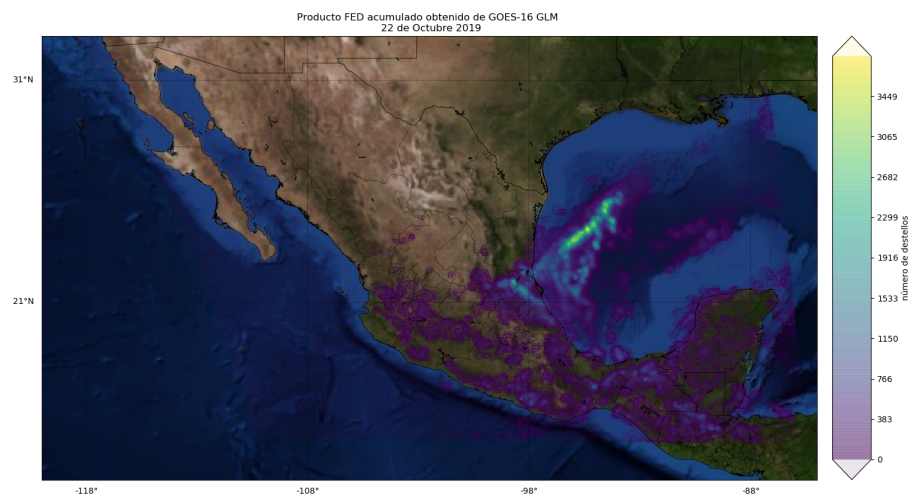


Figura 3.13: Acumulación del producto FED en toda la República Mexicana durante el 22 de octubre del 2019.

En las próximas secciones, se trabajará con el producto FED y algunos de sus estadísticos para definir las zonas de mayor actividad eléctrica en el país durante los años 2018 y 2019, así como encontrar los patrones temporales que rigen en la actividad eléctrica atmosférica.

Capítulo 4

Metodología

El presente trabajo se llevó a cabo siguiendo una serie de pasos secuenciales que se exponen de manera general a continuación: Descarga de los datos de producto de malla (FED) desde el *Advanced Weather Interactive Processing System* (AWIPS), lo que condujo a la edición y visualización de los archivos para ser compatibles con paqueterías de Python, de esta manera se logró trabajar con los datos para generar las primeras gráficas de ocurrencia de rayos en todo el país. Dicha información fue de vital importancia para generar el modelo de desarrollo de las tormentas eléctricas (CDT). A continuación, se detallan todos los procesos llevados a cabo en cada parte del trabajo.

4.1. AWIPS en el producto de malla FED

Los datos de FED pueden ser adquiridos en tiempo real o desde un archivo histórico. La primera es provista por los servidores de UNIDATA y Texas Tech, pero tiene el detalle de que únicamente se puede acceder a los archivos del día actual así como los catorce días previos. Por lo tanto, todas las semanas y meses pasados resultan inaccesibles. La solución a dicha irregularidad se genera con la descarga de los datos desde el archivo histórico de la Universidad de Maryland, en donde los ficheros tienen un formato compatible con AWIPS, el cual es un paquete meteorológico diseñado para el display, la decodificación y el análisis de datos científicos. AWIPS hace uso

de una arquitectura orientada en servicios para requerir, procesar y otorgar datos meteorológicos en tiempo real para sus usuarios.

La primera tarea consistió en descargar los datos de la segunda mitad del año 2018 y de los primeros nueve meses del 2019 pertenecientes al satélite GOES 16, desde los servidores de la Universidad de Maryland (como se comentó recientemente). Se modificaron dichos archivos AWIPS a través de programas de acción automática (de mi autoría) para que pudiesen ser tratados como aquellos de formato netCDF y reconocidos como tal por módulos de Python.

4.2. Mapa de ocurrencia de destellos en el territorio nacional y mapa de calor temporal

Por efecto del objetivo general, es preciso tener un panorama completo sobre el comportamiento de las tormentas eléctricas (y consecuentemente de sus descargas). Por tal, el siguiente paso lógico consistía en recopilar la información de todo un año de los datos para el territorio nacional en su totalidad, así sería capaz de generar un mapa de ocurrencia de destellos (MOD), lo que conduciría a determinar las zonas de mayor ocurrencia de descargas, las temporadas de máximos y mínimos en actividad eléctrica y sus patrones horarios.

Los datos del producto FED se encuentran definidos en el sector de barrido *Continental U.S.* (CONUS) como se aprecia en la figura 4.1, la cual cubre en su totalidad a México, los países del Caribe y Estados Unidos. Como el objetivo del presente trabajo solo involucra al territorio mexicano, se optó por recortar los archivos para optimizar los procesos computacionales, ésto se realizó con programas generados en Python. La zona morada en la figura 4.2 representa al nuevo conjunto de datos con los que se trabajó a lo largo del proyecto, de tal manera se logró reducir el tamaño de cada archivo en un 62 % resultando en más rápidos y eficientes procesos al analizar la información.

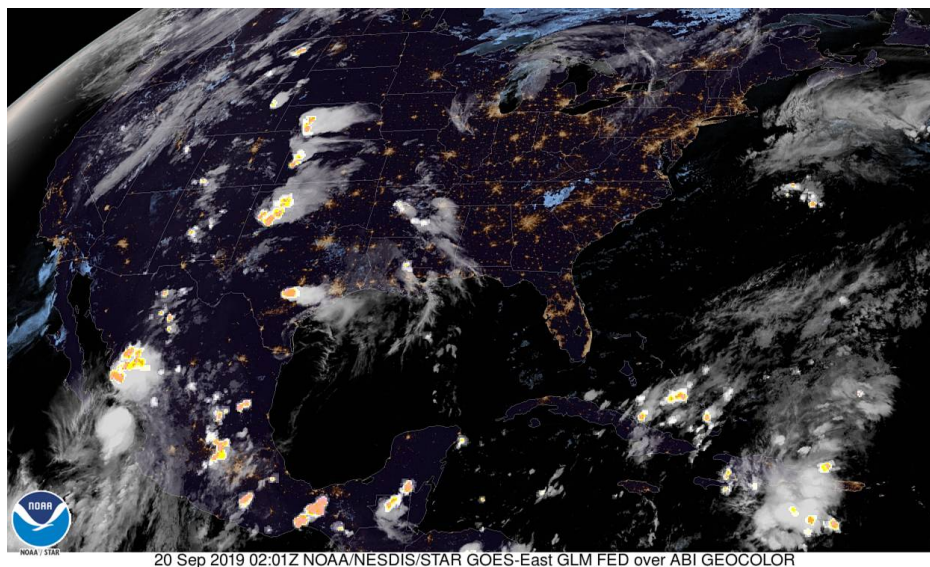


Figura 4.1: Instantánea del total de destellos sobre escala de color ABI en el sector CONUS. <https://tinyurl.com/ybfjjz6s>

La información con la que se cuenta para la realización del presente proyecto, se encuentra empaquetada en archivos correspondientes a cada minuto, por lo que su análisis se realizó con bucles generados en programas de Python. En cada uno de dichos ciclos se abre un fichero para extraer la información del producto *Flash extent density* (FED), con la cual se realizan los siguientes cinco procesos, antes de pasar al siguiente archivo: (1) se calcula el valor máximo nacional de FED, (2) se realiza el acumulado total de FED (sumatoria), se obtienen dos distintos promedios: (3) basado en todos los elementos (conjunto total de México) y (4) calculado únicamente respecto a los pixeles que tienen registro de descargas eléctricas, y finalmente (5) se cuantifica el FED acumulado de cada elemento de la matriz. Este último proceso conduce a los datos de salida que son utilizados para generar el MOD de México.

Todos los datos de salida se agrupan componiendo un *dataframe* (colección tabulada de datos) que se encuentra indexado por cada minuto del año, de tal manera se tienen una serie de estadísticos de FED (máximo, sumatoria, promedio y promedio de eventos registrados) a través del tiempo. Dichas variables son las utilizadas para

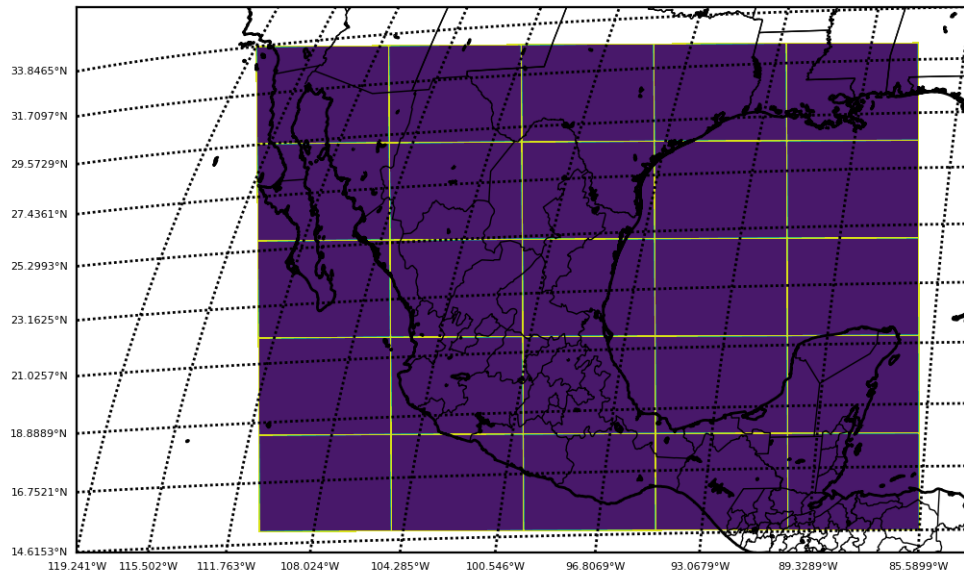


Figura 4.2: Conjunto de datos pertenecientes al territorio nacional (en recuadro morado) dentro del sector CONUS.

generar los mapas de calor (MDC) temporales. Así como el MOD muestra la extensión espacial de las descargas eléctricas, los MDC indican su variación y desarrollo temporal.

4.3. Creación de nuevos subconjuntos

Como se logrará apreciar en el siguiente capítulo, existe una gran variabilidad (espacial y temporal) en la ocurrencia de rayos en nuestro país, por lo que no basta con plantear a todo el territorio mexicano como única unidad base de estudio del fenómeno. Es necesario analizar el desarrollo de las tormentas eléctricas en distintas regiones de México, así que se dividió a todo el país en 25 subceldas de igual tamaño tratando de mantener características similares del territorio perteneciente a cada subconjunto (elevaciones en el terreno y regiones climáticas), la figura 4.3 muestra la extensión de dichas subregiones.

El análisis de los subconjuntos mostró algunas regiones con patrones interesantes, por ejemplo: la acumulación total, la máxima ocurrencia, las horas de registro o

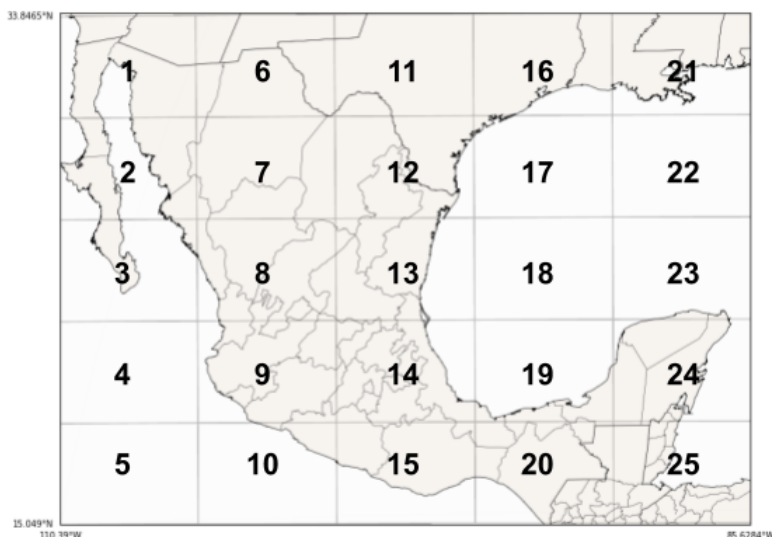


Figura 4.3: Extensión de las 25 subregiones definidas para México.

incluso la ausencia de actividad. Estos registros me llevaron a realizar análisis comparativos entre dichas regiones de interés, en donde se definieron 6 con base en sus características distintivas e hipótesis personal de valoración del FED. Las regiones definidas se muestran en la tabla 4.1.

Regiones de interés		
Región	Celda	Condiciones climáticas (INEGI, 2020)
Pacífico	4	TSM cálida
Norte	7	Seco cálido
Centro-Este	14	Templado semicálido/subhúmedo
Golfo de México	18	TSM templada
Sur	20	Semicálido subhúmedo / Templado húmedo
Península de Yucatán	24	Cálido subhúmedo

Tabla 4.1: Regiones de interés con su posición relativa en el mapa y régimen climático.

4.4. Comparación del KDE entre regiones de interés

La naturaleza misma de los datos permitió realizar dos comparaciones geo-estadísticas entre las seis diferentes regiones de interés.

Los análisis consistieron en encontrar el *Kernel Density Estimation* (KDE) de cada una de las regiones, para así realizar una comparación visual en donde se mostrasen las zonas más importantes en términos componentes de los estadísticos de FED. Se evaluaron las seis subregiones anteriormente definidas, respecto al valor máximo de FED, el valor promedio de FED y el promedio de eventos registrados (PER).

El análisis KDE es un método estadístico no-paramétrico que estima la función de densidad de probabilidad de cualquier variable. Para este análisis, se utilizó un kernel de tipo Gaussiano ya que fue el método que mejor suavizaba y estimaba la distribución de los datos.

Los dos análisis que se realizaron tenían como objetivo: (1) definir las regiones con registro máximo de FED durante el verano del 2018 y la primavera del 2019, y (2) para los meses de verano, determinar las regiones que presentaron la mayor intensidad y extensión en sus registros.

4.5. Análisis local de tormentas y generación de su coeficiente de desarrollo

Como objeto final del proyecto se tuvo la idea de crear un coeficiente, el cual se encontrara presente durante la duración total de una tormenta a la vez que indicase el desarrollo en su actividad eléctrica. Se buscaba generar un índice capaz de sintetizar la información de las variables y estadísticos de FED más importantes, que fomentara una fácil visualización e interpretación de su desarrollo y que tuviera la capacidad de

ser replicado e implementado para cualquier región con acceso a los datos satelitales de GOES-R.

El Coeficiente de Desarrollo de Tormentas (CDT) representa la versión final de la visión recién comentada. Se trata de un valor adimensional que varía en el tiempo a razón de la evolución de la tormenta en cuestión. Para su creación, se introduce una nueva variable que no había sido utilizada en este proyecto pero que también se encuentra registrada en los archivos originales (netCDF) del sensor GLM, se denomina *ventana de FED* y al igual que el producto FED, se encuentra registrada cada minuto para cada uno de los píxeles. Ésta nueva variable representa el valor acumulado de FED durante los últimos cinco minutos incluyendo el minuto en cuestión. El CDT es producto de la razón que existe entre el valor promedio de FED y el de su ventana. La ecuación 4.1 muestra la ecuación matemática para la creación del CDT. Nótese a la letra m como subíndice, lo que indica la existencia de un nuevo coeficiente para cada minuto siempre que existan registros de FED, (CDT se indefine cuando el promedio de la ventana de $FED = 0$, es decir que ya no hay registros de actividad eléctrica) de ahí la palabra *Tormenta* en el nombre del coeficiente.

$$CDT_m = \frac{F\bar{E}D_m}{\sum_{i=1}^5 F\bar{E}D_{m-i}} \quad (4.1)$$

El Coeficiente de Desarrollo de Tormentas se genera apartir de los siguientes pasos:

1. Se presenta el día del año que se busca estudiar. De manera visual, el programa genera un mapa de México con el acumulado de FED de dicho día, que ayuda para determinar la región por analizar.
2. Se define la extensión espacial de la tormenta. El programa funciona únicamente con polígonos de cuatro lados, ya sea con dos o cuatro de ellos de igual dimensión lineal.

3. El programa genera una estructura tabular (dataframe) con las variables necesarias para la creación del CDT por cada uno de los minutos que duró la tormenta: fecha, hora, FED acumulado, promedio de FED y ventana de FED.
4. El programa después genera una línea de tiempo del día en cuestión en donde se muestra la acumulación total de FED (de cada minuto) para que el usuario determine manualmente la hora de inicio y final de la tormenta. Existen ocasiones en donde la tormenta eléctrica se encuentra aún en desarrollo cuando el día termina, por lo que se precisa volver a correr el programa agregando la siguiente fecha para así definir su desarrollo total.
5. Se define al CDT apartir de la ecuación 4.1 y automáticamente se agrega esta columna al dataframe existente. Asimismo, se produce una media móvil para el coeficiente que ayuda a suavizar sus registros.
6. El programa después crea otra columna en donde se calculan las horas que han pasado desde el inicio de la tormenta.
7. Por último, se generan tres gráficos: una línea de tiempo desde el inicio hasta el final de la tormenta donde aparecen el CDT, su media móvil y el acumulado de FED por minuto, y dos gráficos de dispersión entre el CDT y el acumulado, así como entre la media móvil del coeficiente y el acumulado, ambas tendiendo como base la hora en que se encuentra el desarrollo de la tormenta.

Durante este proyecto, únicamente se realizó el análisis de 6 distintas tormentas en diversas regiones de México (que corresponden a las zonas de mayor interés definidas anteriormente), todas ocurridas durante el verano del 2018. La infraestructura computacional se encuentra disponible para futuros proyectos y estudios de tormentas en otros lugares del país así como en diferentes estaciones y años.

Por otro lado, es necesario mencionar que la comparación del promedio de FED contra su ventana presenta un detalle. El valor promedio de FED cambia apartir del subconjunto en cuestión de donde se evalúa. Es decir, se contabilizan todos los

pixeles presentes en la tormenta y en caso de no definir correctamente su extensión, se pueden obtener CDT's con un margen de error significativo. En la próxima sección se abordará este tema con mayor profundidad.

Capítulo 5

Resultados

A manera de resumen, las descargas eléctricas son producto de una acumulación excesiva del potencial eléctrico presente en el campo electromagnético atmosférico: se trata de un fenómeno que ocurre en una escala temporal de milisegundos por lo que nuestros ojos no son capaces de observar su desarrollo (movimiento de los trazadores) pero sí su expresión final, la cual resulta en una iluminación del cielo a partir de un canal que se bifurca estocásticamente. El sensor GLM detecta el cambio en la luminosidad (de fondo) durante cada periodo de integración y registra dichos pulsos como eventos que preceden la creación de los grupos y consecuentemente de los destellos, como se muestra en la figura 5.1, la cual fue tomada y posteriormente editada de (Goodman y cols., 2013). Por lo tanto, el sensor registra la ocurrencia de una descarga eléctrica con base en la relación evento-grupo-destello que va construyendo. Así es como existe la posibilidad de que un solo rayo esté compuesto por múltiples destellos (recordar las definiciones), de tal modo es preciso mencionar que el producto FED (el cual trabaja a partir de los destellos) no representa una relación directa de uno a uno con el total de rayos, sin embargo sí ejemplifica una proporcionalidad con los mismos.

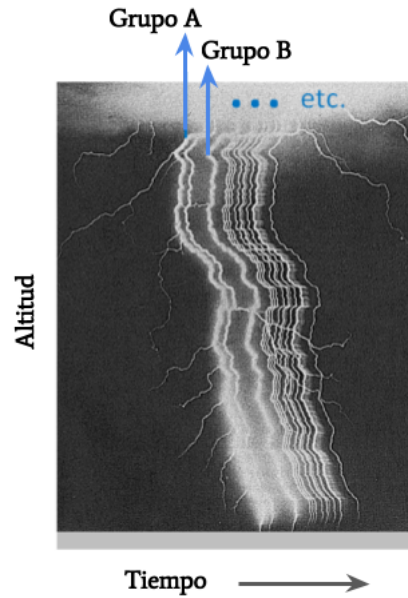


Figura 5.1: Serie de instantáneas que ejemplifican el desarrollo temporal de un rayo.

5.1. MOD y MDC temporal de México

Para que un rayo logre ser generado, se precisa de un espacio tridimensional donde el desarrollo del campo electro-magnético permita el crecimiento (en magnitud) del potencial eléctrico. Y como se mencionó en el marco teórico, la existencia de una nube que sea capaz de aumentar dicho potencial a través del tiempo es indispensable. De tal modo, los lugares que favorezcan el desarrollo de nubes (convectivas) serán algunas de las zonas con mayor registro de descargas eléctricas.

El MOD del territorio mexicano visible en la figura 5.2 muestra el total de destellos registrados durante los años 2018-2019. Se logran definir unas cuantas zonas de interés dentro del país: las correspondientes a la Sierra Madre Oriental (SMOr) y Sierra Madre Occidental (SMOc), especialmente en los estados de Nayarit y Sinaloa (estados pertenecientes a la zona del monzón de Norteamérica) (Adams y Comrie, 1997), que presentan registros de descargas eléctricas prominentes, ya que otro de los procesos de formación de nubes se debe al cambio en la orografía, en donde las masas de aire son elevadas debido al cambio abrupto en la pendiente del terreno y bajo condiciones particulares de presión y temperatura se desarrollan nubes con la capacidad

de diferenciar cargas que aumentan el potencial eléctrico. Esta es una de las razones por la que la cadena montañosa de los Himalayas es una de las regiones con mayor ocurrencia de rayos a nivel mundial. Caso contrario ocurre en el Norte Central de México (Chihuahua, Coahuila, Durango y Zacatecas) así como en Baja California y Baja California Sur, donde los registros de actividad eléctrica son muy bajos durante todo el año. En el sur del país, encontramos el foco máximo de actividad eléctrica: a lo largo del Istmo de Tehuantepec está la región con mayor registro de destellos en donde se incluyen los estados de Veracruz, Oaxaca, Tabasco y Chiapas. Asimismo, la península de Yucatán representa otra región con alto número de descargas.

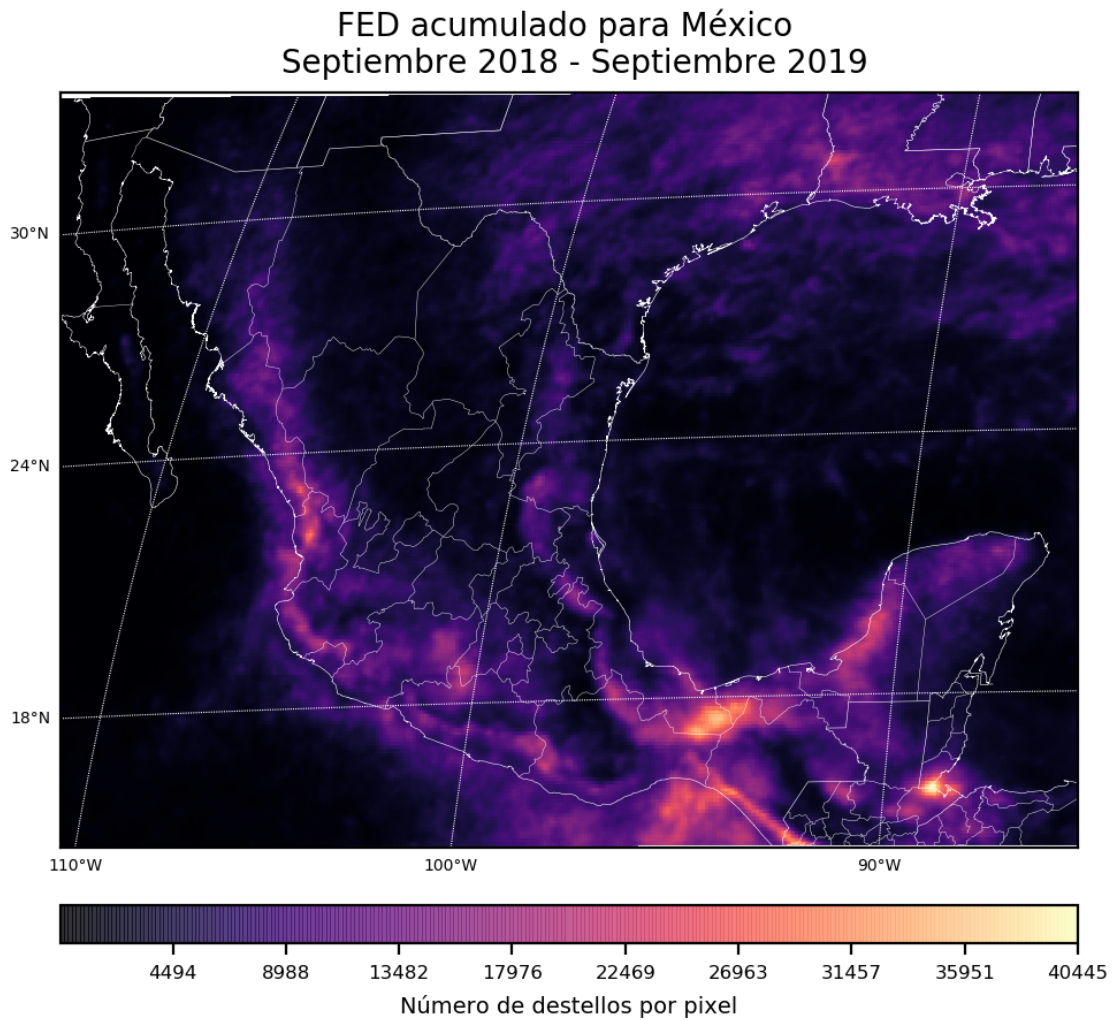


Figura 5.2: MOD del territorio nacional.

La tabla 5.1 contiene a las 3 regiones con mayor número de registros de FED con base en el MOD de México, cabe mencionar que la máxima ocurrencia de destellos se presentó en Belice, sin embargo se omitió mostrarlo en la tabla debido a que no pertenece al territorio mexicano.

Zonas de mayor registro de FED en México					
	Estado	Municipio	Número de destellos	Latitud (°N)	Longitud (°W)
1	Veracruz	Las Choapas	35508	17.4842	93.9507
2	Veracruz	Uxpanapa	34885	17.2375	94.4593
3	Oaxaca	Santa María Chimalapa	34220	17.1566	94.3238

Tabla 5.1: Las tres zonas con el mayor registro de FED dentro del país durante los años 2018 y 2019.

Asimismo, en la figura 5.3 se muestra la ubicación espacial de las tres regiones con mayor ocurrencia de FED dentro de México. Nótese la cercanía entre ellas.

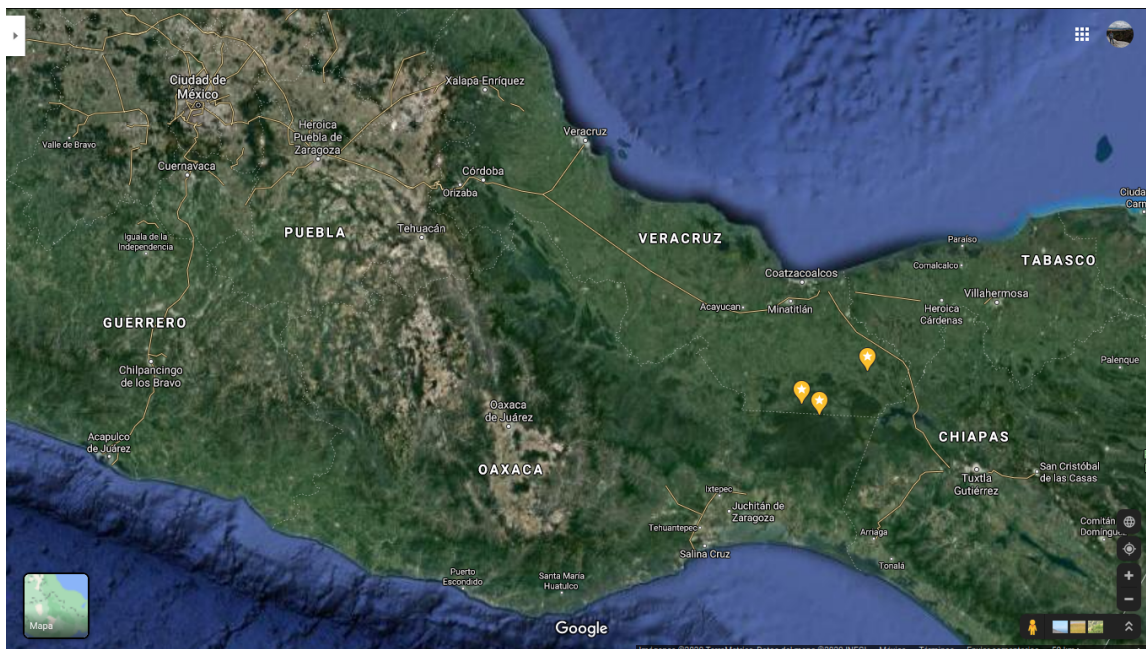


Figura 5.3: Ubicación de las tres zonas con mayor registro de FED del país durante los años 2018 y 2019. Generada con el servicio de Google Maps.

Asimismo, el MOD nos muestra otro detalle importante en el territorio marítimo

mexicano: el Pacífico sur y central de México presenta un peculiar modelo de descargas las cuales se manifiestan en la zona más cercana a las costas (Nayarit, Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas), a diferencia del Golfo de México, cuyo patrón de descargas eléctricas es bastante más disperso con registros que abarcan una gran superficie del Golfo. No existe mucha información que explique este fenómeno, sin embargo en mi opinión la respuesta podría estar en analizar el patrón de descargas eléctricas en los huracanes y tormentas tropicales que azotan a estas regiones, lo cual no se realiza durante este proyecto.

Por otra parte, el MOD de México muestra una mayor ocurrencia de descargas eléctricas en el territorio continental que en el marítimo, hecho que también se expone en (Williams, 2005). Se atribuye el predominio de los rayos continentales debido al contraste que existe en las propiedades de ambas superficies: terrestre y oceánica. La primera con una menor capacidad calorífica y con su naturaleza inmóvil, se calienta más rápido que el mar, provocando una mayor inestabilidad en la atmósfera baja y así favoreciendo movimientos verticales del aire, vitales para la convección profunda y separación de cargas (Williams y Stanfill, 2002).

El MOD brinda un buen despliegue visual para realizar un análisis geográfico y espacial de las descargas eléctricas en México, sin embargo imposibilita un análisis temporal de dicho fenómeno, razón por la cual se generó un objeto de visualización que lograra mostrar la variabilidad temporal en las descargas eléctricas. La figura 5.4 representa cuatro distintos parámetros estadísticos del producto FED: su registro máximo, el valor promedio, el promedio de eventos registrados (PER, acotado a los eventos de actividad eléctrica) y su acumulación temporal.

La ocurrencia de descargas eléctricas varía tanto en el espacio como en el tiempo, hecho que se observa en las figuras 5.2 y 5.4 respectivamente, donde la última muestra el comportamiento temporal de los cuatro estadísticos de FED mencionados anteriormente. El promedio de eventos registrados (PER) es uno de los más signifi-

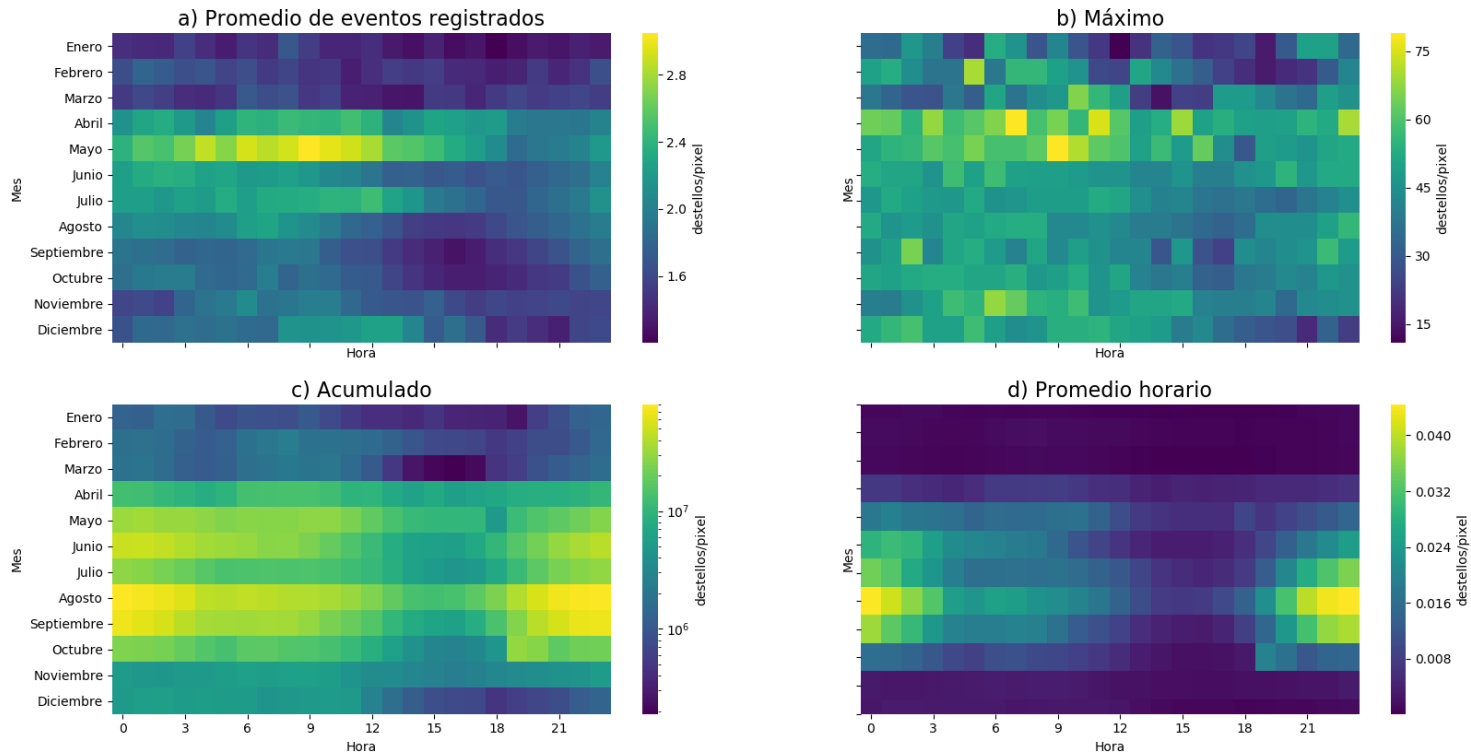


Figura 5.4: Mapa de calor temporal de los parámetros estadísticos del producto FED para todo el territorio mexicano. a) FED promedio de los eventos registrados. b) Máximo valor alcanzado de FED. c) Acumulación del producto FED. d) Promedio horario.

cativos para nuestro proyecto ya que representa el valor promedio de la ocurrencia de destellos por pixel únicamente tomando en cuenta aquellos que tienen registro de actividad eléctrica.

El producto FED se dedica a contabilizar el número de destellos por unidad de área en un periodo de tiempo determinado, que en nuestro caso lo definimos como un valor de densidad por minuto. Por lo tanto, FED está en función de la cantidad de destellos, el número de pixeles y el tiempo. Al calcular el valor de FED en distintos momentos del día, también estamos evaluando (de manera cualitativa) la intensidad de la actividad eléctrica en ese periodo, ya que un valor grande de FED involucra un alto número de destellos, lo que es efecto de un intenso potencial eléctrico atmosférico. Se trata de una medida puntual asociada a cada pixel como unidad base. De manera análoga se puede entender al PER, pero como una medida superficial: en donde evaluamos el valor de FED sobre un área compuesta por pixeles y delimitada por la extensión de la tormenta. De tal manera, el estadístico PER representa la intensidad que exhibe dicha tormenta.

Por otro lado, se presenta al valor máximo de FED el cual corresponde al registro de mayor magnitud en un periodo determinado (el base está definido cada minuto). El presente estadístico denota los puntos (espaciales y temporales) donde se alcanzó el nivel más alto de destellos.

Por último tenemos a dos estadísticos emparentados entre sí: el acumulado y el promedio de FED. La definición de un promedio representa el valor característico (esperado) de una serie de datos y se obtiene de la división entre la suma total de los valores asociados a cada uno de sus elementos y el número total de dichos elementos. En este caso, está dado por la cantidad total de destellos (acumulado de FED) partido entre el número de pixeles. De tal manera, ambos estadísticos son proporcionales entre sí a través del número de pixeles.

La figura 5.4 muestra la relación temporal hora-mes de los estadísticos de FED analizados en todo México, con el objetivo de determinar los horarios y las estaciones en donde las descargas eléctricas se presentan. El PER (figura 5.4.a) indica que en el mes de Mayo las tormentas tienen un mayor registro de destellos y consecuentemente son más intensas en un horario de las 6:00 - 12:00 UTC, asimismo se observa que en los meses de invierno, México tiene muy poca actividad eléctrica atmosférica.

El máximo valor de FED (figura 5.4.b) muestra nuevamente que los registros más bajos ocurrieron en la temporada de invierno, y los más altos se dieron en Abril y Mayo, sin embargo, en esta gráfica es más difícil encontrar patrones ya que el potencial para que un rayo sea muy fuerte está presente en todo momento: una descarga eléctrica poderosa puede caer sin importar el día ni la hora.

El tercer estadístico de FED es el acumulado total (figura 5.4.c), en donde nuevamente se observa que los meses de Enero, Febrero y Marzo tienen muy poca actividad eléctrica, sin embargo en este caso los valores más altos de acumulación están en los meses de Agosto y Septiembre de las 22:00 - 3:00 UTC (16:00 - 21:00 Tiempo Central), en este periodo ocurren la mayor cantidad de descargas eléctricas en todo México. El último estadístico corresponde al promedio de FED (figura 5.4.d), en donde se observa el mismo patrón que la acumulación: los valores más grandes se encuentran en la misma temporada y horario que el acumulado (Agosto y Septiembre en la tarde-noche) y los mínimos en los meses de invierno. Los cuatro estadísticos, si bien tienen sus peculiaridades, comparten sus valores mínimos en la temporada de invierno.

Queda claro que existe una alta variabilidad de ocurrencia de rayos en términos espaciales y temporales en el territorio mexicano. Si bien son reconocibles algunos patrones a lo largo del país, estudiar a los rayos con el territorio mexicano como única unidad base no es suficiente para alcanzar los objetivos del proyecto. Por tal motivo, y siguiendo los detalles expuestos en la sección 4.3 de la metodología, se estudió

el desarrollo de las descargas eléctricas por subregiones, analizando de manera más particular la extensión espacio-temporal de este fenómeno.

5.2. Análisis subregional

En la sección anterior, se mostró la alta variabilidad en la ocurrencia de descargas eléctricas en nuestro país, por lo que resulta preciso estudiar a dicho fenómeno por medio de subregiones que comparten ciertos regímenes o características geográficas para así analizar el desarrollo de la actividad eléctrica de una manera más precisa. Dos distintos objetos de visualización se generaron para mostrar la variabilidad de la que tanto se ha hablado. El primero está representado por figuras que muestran líneas de tiempo por subregión para cada estadístico de FED, por lo que cada uno de ellos determina la fórmula necesaria para evaluar los registros diariamente: el valor máximo de FED compara todos los registros para salvar el más grande del día, y en el caso de PER y promedio de FED se calcula la media diaria de cada estadístico. El segundo objeto mencionado está representado por MDC temporales que muestran el patrón de ocurrencia hora-mes de los estadísticos de FED en cada subregión de México. Estas figuras se generaron agrupando los registros por mes y calculando los valores de sus componentes horarios. A continuación se analizan y discuten los resultados obtenidos de dichas figuras.

Series de tiempo

Las siguientes figuras (5.5, 5.6 y 5.7), exponen el cambio temporal en una escala diaria de cada uno de los estadísticos de FED por subregión.

Se calculó la evolución diaria del estadístico PER en cada una de las subregiones creadas para México, los resultados son mostrados en la figura 5.5. El valor máximo registrado se presentó en el primer cuadrante correspondiente a Baja California y el noroeste de Sonora (así como los estados de California y Arizona en Estados Unidos) durante septiembre del 2018, lo que nos indica la tormenta eléctrica más intensa (en

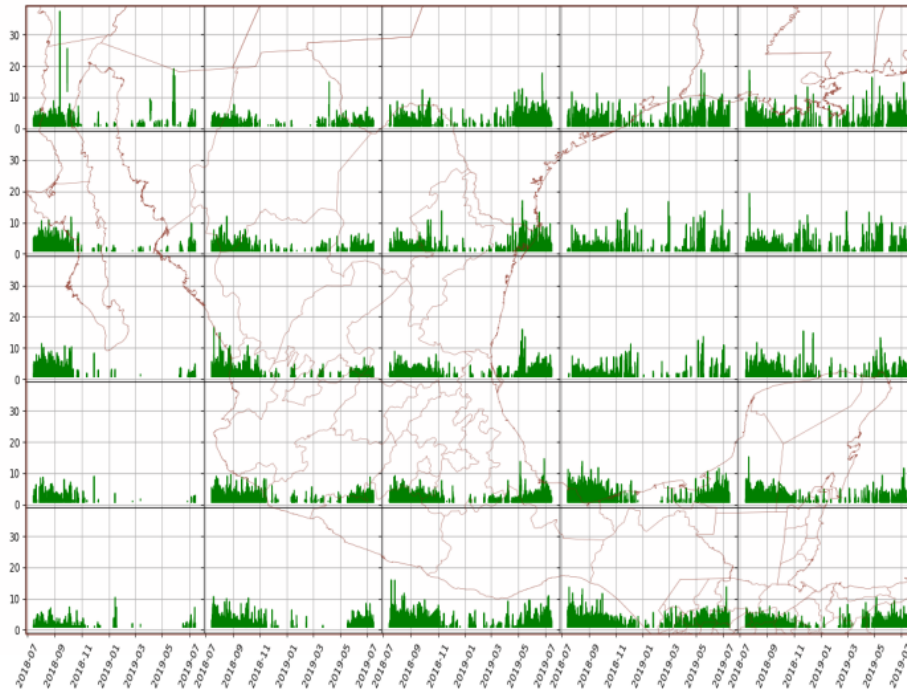


Figura 5.5: Valor diario de PER por subregión.

términos de cantidad de descargas eléctricas) del año, un evento que podría parecer anormal respecto al comportamiento de la región y del país, pero que debido a sus características y periodo en el que ocurre, corresponde a un evento típico como los observados durante el Monzón de Norteamérica, en donde existen tormentas poco frecuentes pero debido a la inestabilidad de la región, llegan a ser bastante intensas (Adams y Comrie, 1997). En términos generales, se observan patrones ondulatorios durante todo el año en el norte, centro y sureste de México, con máximos en el verano y mínimos en invierno. En el caso de los subconjuntos pertenecientes al Pacífico, se aprecia que la mitad del año (de diciembre a mayo) no hay registro de actividad eléctrica, muy distinto del modelo que aparece en los subconjuntos del Golfo de México y Sur de Estados Unidos, en donde los valores de PER son constantes y de magnitud considerable, lo que nos indica tormentas moderadas pero constantes a lo largo del año.

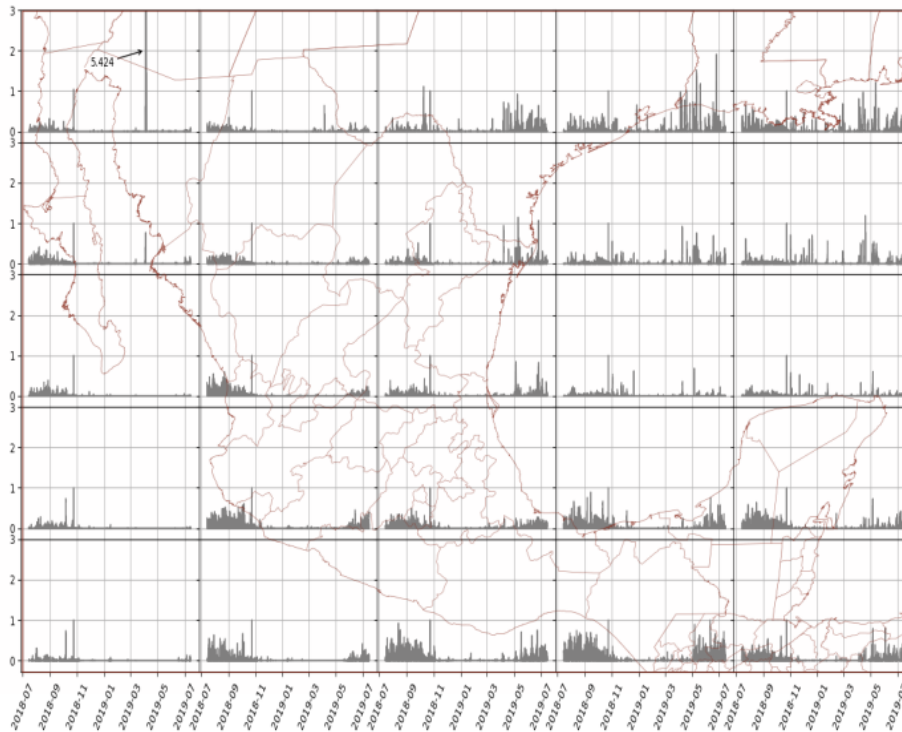


Figura 5.6: Promedio diario de FED por subregión

La serie de tiempo sobre el valor promedio de FED para cada subconjunto se muestra en la figura 5.6. Las subregiones pertenecientes al sur de México presentan los valores más altos y constantes durante el verano del 2018 y los correspondientes al sur de Estados Unidos predominan en la primavera e inicio del verano de 2019. El Pacífico y norte del país presentan valores muy bajos durante todo el año, sin embargo el valor más grande se encuentra nuevamente en el noroeste de México, esta vez con la excepción de que dicho registro se da en el mes de abril del 2019. Un detalle importante se deriva de observar tanto la gráfica de PER como la actual. Ambos estadísticos son un promedio de FED, en donde el primero actúa sobre los pixeles que tuvieron registro de actividad a diferencia del segundo, que se calcula con base en todos los pixeles componentes de cada subregión (hayan o no tenido un registro). Por lo tanto, para que el nivel de PER sea muy alto, se necesitan valores de FED muy grandes presentes en pocos pixeles (una tormenta intensa y espacialmente pequeña).

Contrariamente, si hay registro de FED en muchos pixeles (sin prestar demasiada importancia en la magnitud de dichos valores), el promedio de FED alcanzará valores más altos, en otras palabras: las tormentas más extensas (especialmente) predominan en los valores más altos del promedio y las más pequeñas e intensas predominan en los valores de PER.

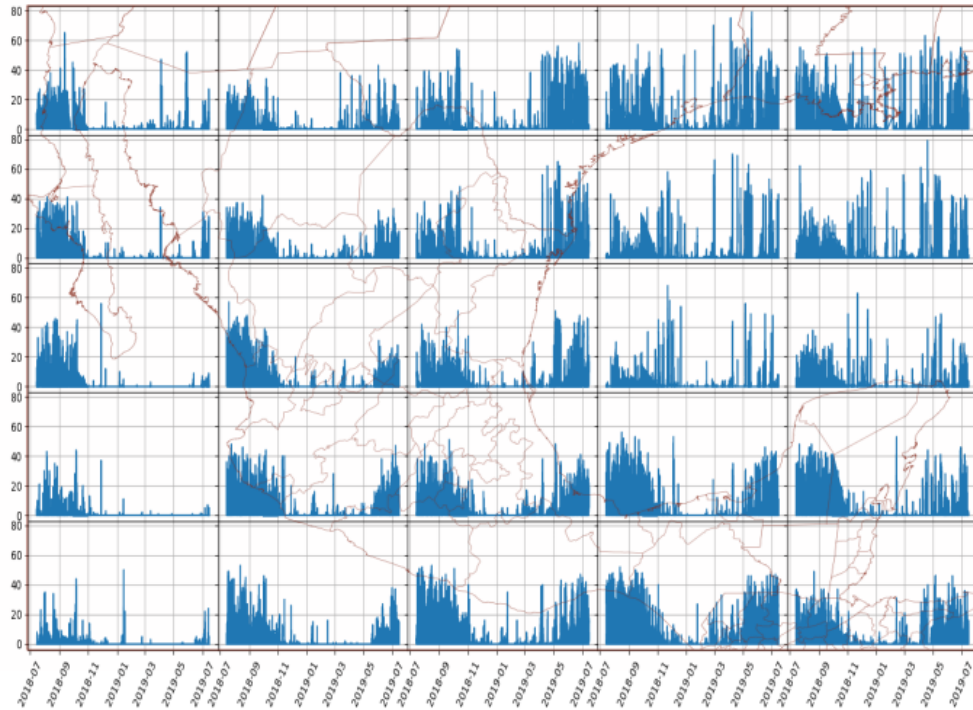


Figura 5.7: Valor máximo de FED registrado diariamente por subregión.

En la figura 5.7 observamos el desarrollo temporal de cada subregión sobre el estadístico más impredecible de FED, su valor máximo. El patrón ondulatorio que se mencionó anteriormente vuelve a estar presente y es más contundente en el norte, centro y sureste de México, con valores muy grandes en el verano y mínimos en invierno. Un modelo bastante más caótico está presente en el Golfo de México y sur de Estados Unidos. Los valores más grandes predominan en la región noreste del mapa durante el verano del 2019. La región del pacífico es nuevamente la menos activa.

Como se ha comentado anteriormente, el valor máximo de FED se puede presentar durante cualquier temporada y horario, hecho que se corrobora una vez más con esta figura. Existen registros con magnitudes grandes durante todo el año (en el Golfo de México y sur de Estados Unidos), que nos indican la presencia constante de una gran magnitud en el potencial eléctrico para generar descargas de intensidad considerable.

Las series de tiempo recién expuestas muestran los valores más importantes de cada estadístico a través de escalas diarias o mensuales en algunos casos, sin embargo no tienen suficiente definición para indicar los patrones horarios que dictan las descargas eléctricas en cada subregión de México, por lo tanto se calcularon las componentes horarias de la variación temporal de dichos estadísticos para ser visualizados nuevamente en forma de mapas de calor.

Mapas de calor temporales

Los mismos estadísticos se presentan a continuación, pero esta vez en forma de mapas de calor para indicar las componentes horarias de cada mes en donde su presencia es mayor a través del país.

Los valores más grandes de PER se muestran en la figura 5.8 con color amarillo decreciendo a menores magnitudes representadas por tonalidades cada vez más oscuras. Sin embargo, los elementos de color blanco denotan los periodos con ausencia de destellos, comunes en la región oeste y centro de México. La temporada invernal vuelve a hacerse presente en las ya mencionadas subregiones con periodos de ausencia de actividad eléctrica, aunque resulta interesante observar que en las zonas marítimas, los periodos de ausencia ocurren a todas horas contrario a los subconjuntos que pertenecen al territorio continental cuyos periodos de ausencia se observan alrededor del medio día (UTC) en los meses de invierno. El valor más grande de PER, se presenta en dos regiones diferentes (2 y 17) correspondientes al sur de Sonora y Baja California, así como el norte del Golfo de México durante los meses de abril y febrero con un horario de 4:00 y 7:00 UTC respectivamente indicando a estas como las zonas y periodos en donde se presentó la mayor intensidad eléctrica del año. Las regiones

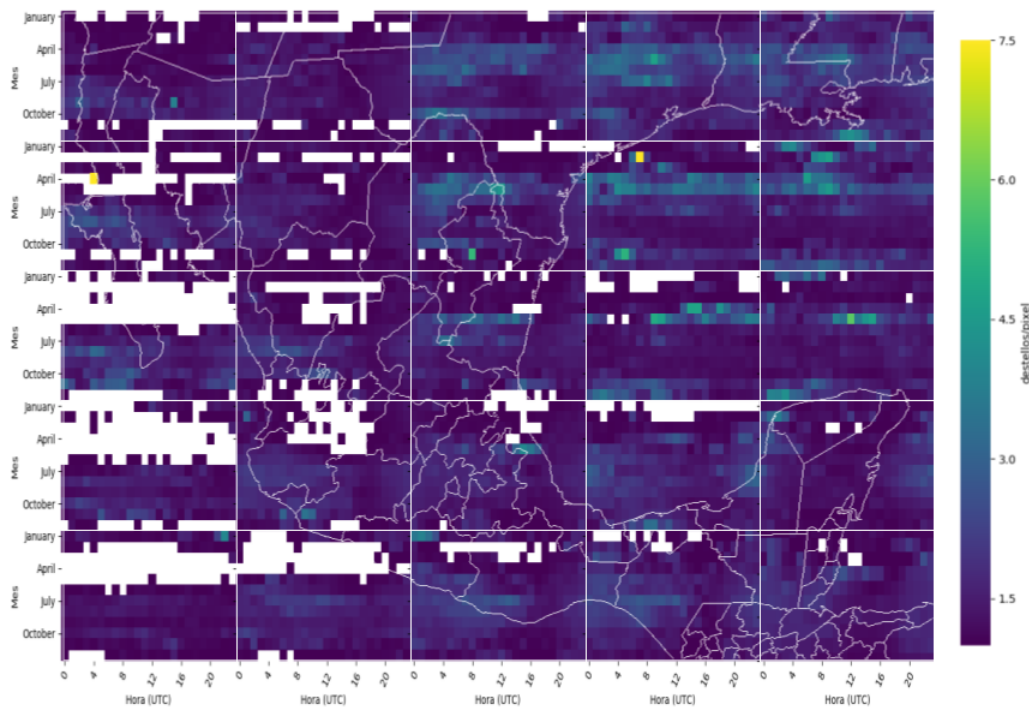


Figura 5.8: Desarrollo temporal de PER por subregión.

del sur de México, el Golfo y sur de Estados Unidos presentan sus registros de PER de magnitud baja pero constantes durante la primavera y verano.

En la figura 5.9 se logran visualizar patrones temporales y regionales respecto a la máxima valoración del promedio de FED. Los valores más altos se registraron en el sur de México durante el verano, en el periodo correspondiente de las 23:00 a las 2:00 UTC indicando la zona, temporada y horario con tormentas más fuertes y espacialmente extensas. Este mismo modelo se logra apreciar en algunas otras subregiones del país: la península de Yucatán, centro, oeste y norte-central de México. Por otro lado, en las subregiones del Golfo, Pacífico y noroeste de México se observa una ausencia de periodos claros con grandes valores, indicando el desarrollo tormentas espacialmente pequeñas con un régimen temporal constante. De manera contraria, en los subconjuntos correspondientes al sur de Estados Unidos y noreste de México, existe un patrón desordenado (temporalmente) con valores altos en distintos horarios

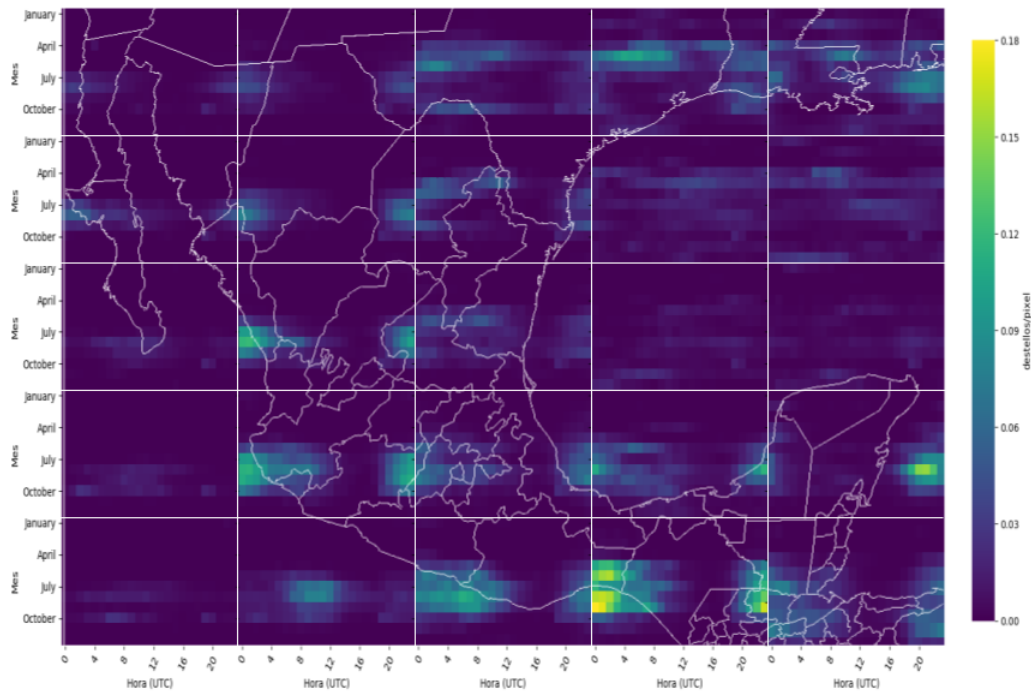


Figura 5.9: Desarrollo temporal del promedio horario de FED por subregión.

del día y sin periodos máximos aparentes.

Por último, el desarrollo temporal por subregión sobre el valor máximo de FED se muestra en la figura 5.10. Se aprecia que el noreste del mapa es la zona con el máximo valor de FED registrado durante los primeros meses de la primavera alrededor de las 6:00 UTC. En esta figura resulta difícil encontrar regímenes y patrones en la ocurrencia de descargas eléctricas; de las pocas conclusiones que se pueden obtener de aquí es que la temporada de invierno (nuevamente) tiene poca actividad, especialmente en el Pacífico, noroeste y centro de México. Una vez más, éste estadístico muestra la estocasticidad de las descargas eléctricas al no lograr definir periodos precisos de actividad intensa, una descarga puede ocurrir invariablemente del lugar y temporada, siempre que existan condiciones necesarias para su generación.

Las figuras anteriores, nos indicaron zonas de bastante interés ya sea por su gran

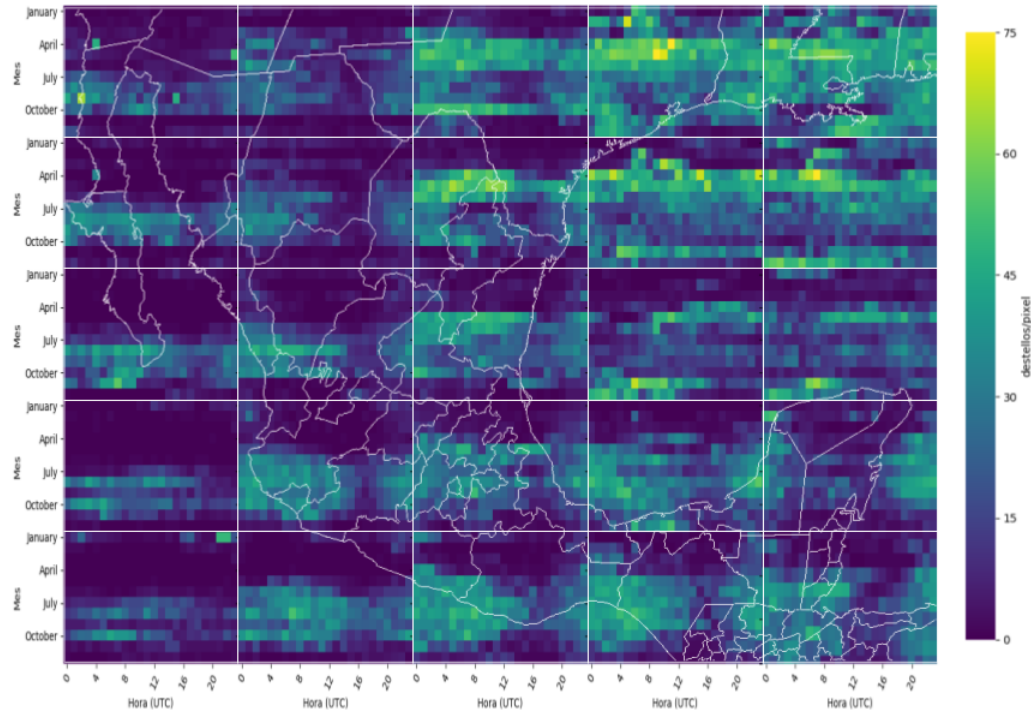


Figura 5.10: Desarrollo temporal del valor máximo registrado en cada subregión.

actividad eléctrica, por sus patrones de ocurrencia o por su falta de registros. Dichas regiones se agruparon para ser visualizadas en nuevos objetos que permitieran un análisis comparativo entre ellas con la finalidad de definir sus regímenes particulares de actividad eléctrica basados en encontrar su función de densidad de probabilidad. En la siguiente sección se realizan dichos análisis.

5.3. Análisis comparativo entre regiones de interés

El norte y centro de México debido a su baja actividad eléctrica, el sur de México y la península de Yucatán, por sus altos y constantes registros de actividad, así como las zonas centrales del océano Pacífico y Golfo de México por su gran variabilidad eléctrica fueron las regiones que se eligieron estudiar. Las figuras 5.11 y 5.12 muestran el *Kernel Density Estimation* (KDE) de cada subregión durante el verano del 2018 y

la primavera del 2019, respectivamente.

Se estimaron las funciones de densidad de probabilidad para cada región de interés a partir del método KDE. Podemos definir al *Kernel Density Estimation* como el proceso por el cual se estima una función de densidad de probabilidad (PDF) usando una función de kernel $K(u)$, existen distintos tipos de kernel, pero en este caso se utilizó el gaussiano (donde se traza una curva normal centrada en cada uno de los datos), ya que fue el que mejor modeló las curvas. Finalmente el KDE suma las $K(u)$ de cada uno de los datos para generar la envolvente que describe el PDF del conjunto.

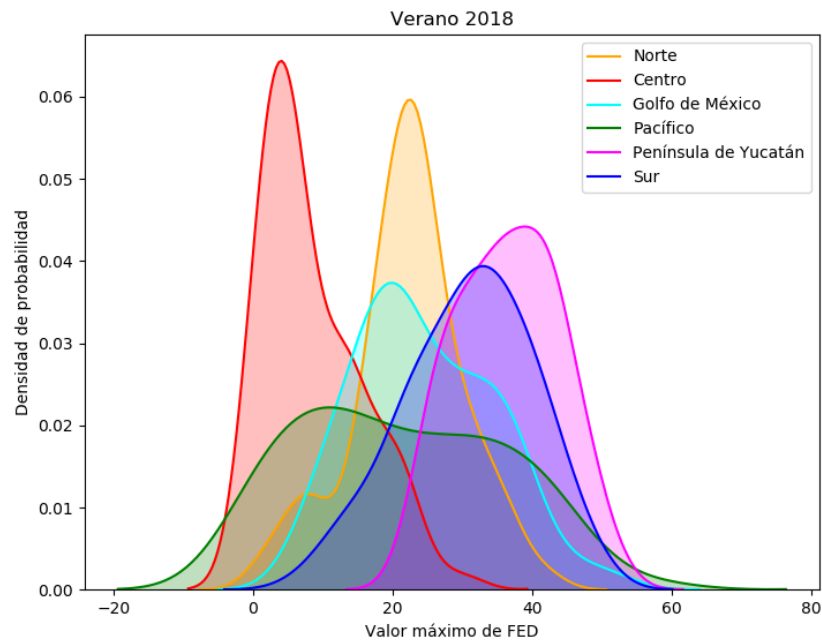


Figura 5.11: KDE del valor máximo de FED para las regiones de interés durante el verano del 2018.

Durante el verano (figura 5.11) se observa que la Península de Yucatán (rosa) presenta los registros más grandes de todo el país respecto al valor máximo de FED (41 destellos por pixel) seguido muy de cerca por el sur de México (34 destellos por pixel). Las regiones marinas (verde y azul cielo), parecen presentar un patrón bimodal con registros de magnitud intermedia, lo que indica la ocurrencia tanto de tormentas

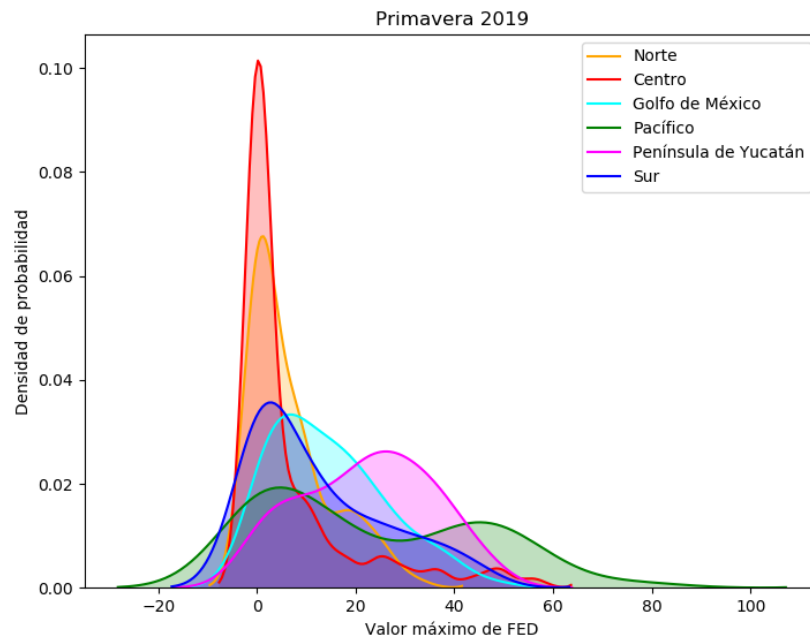


Figura 5.12: KDE del valor máximo de FED para las regiones de interés durante la primavera del 2019.

con zonas intensas como de baja intensidad. Por último, las regiones del centro (rojo) y norte (naranja) de México presentan las curvas más altas, lo que significa que la mayoría de sus datos se encuentran alrededor de dichos valores (6 y 22 destellos por pixel respectivamente), siendo el centro de México la región cuyos valores máximos en sus tormentas presentan la menor magnitud de FED.

En cuanto a la primavera (figura 5.12, los modelos cambian notablemente. La región del Pacífico presenta los valores máximos de FED si bien está compuesto nuevamente por un patrón bimodal centrado en valores bajos (4 destellos por pixel) y altos (44 destellos por pixel). La gran sorpresa es la región del sur de México con valores muy bajos de FED, indicando poca actividad y descargas eléctricas. La actividad eléctrica en el norte del país, así como en la Península de Yucatán también disminuye considerablemente en estos meses. Esta figura nos indica un cambio en el régimen de tormentas en México, el sur del país y la península de Yucatán disminuyen en sus valores máximos de FED marcando a la primavera como una temporada muy distinta

a la observada durante el verano.

Durante el verano, las regiones del sur de México y la península de Yucatán presentan la mayor cantidad de destellos, sin embargo en la primavera, la costa del Pacífico tiene los valores de FED más altos del país.

Se ha comentado que de los estadísticos de FED, el valor máximo es el que menos información genera, sin embargo, en este caso resultó importante para definir las regiones más activas (eléctricamente) en dos periodos distintos del año. Otro análisis que se buscó realizar tiene que ver con el valor promedio de FED y el estadístico PER, con el objetivo de determinar las regiones que presentan a las tormentas más extensas e intensas durante la temporada de verano, como se logra apreciar en las figuras 5.13 y 5.14 a continuación.

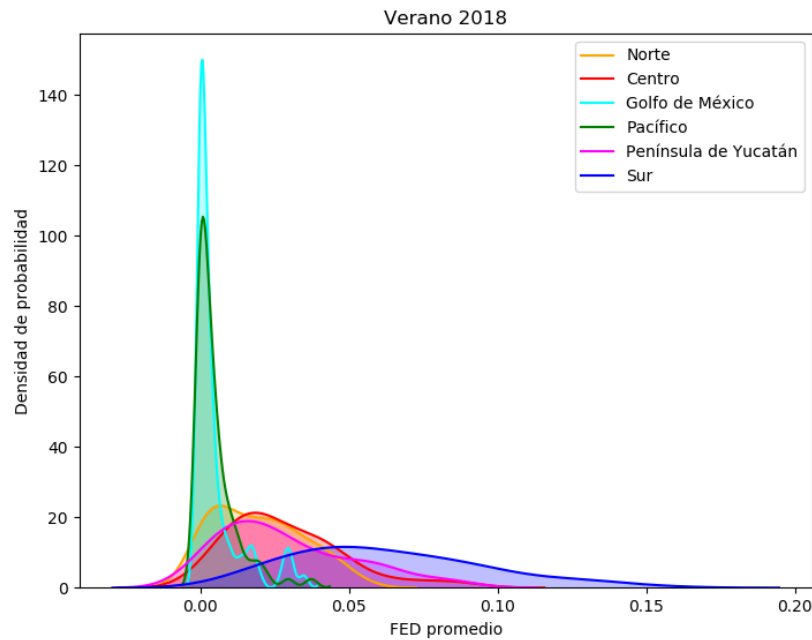


Figura 5.13: KDE del promedio de FED para las regiones de interés durante el verano del 2018.

Al determinar las KDE para el promedio de FED (figura 5.13), encontramos las regiones con mayor actividad eléctrica y que tienen a las tormentas más extensas.

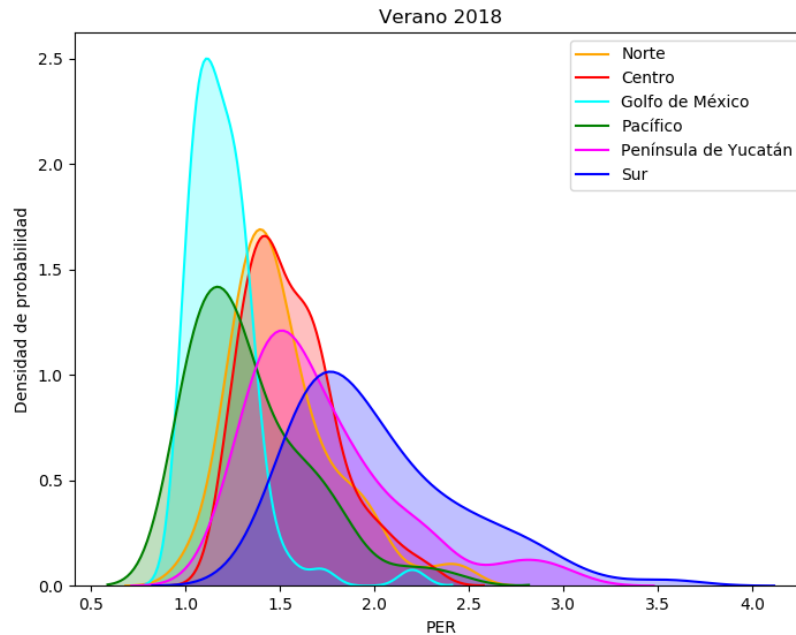


Figura 5.14: KDE del PER para las regiones de interés durante el verano del 2018.

En primera instancia, los patrones presentes de cada subregión son muy diferentes a los del valor máximo de FED. En este caso las zonas marinas (Pacífico en verde y Golfo de México en azul cielo) presentan los valores más bajos del promedio de FED, fungiendo como más evidencia de que hay mayor actividad eléctrica en territorio continental. El sur del país lidera en términos de actividad y extensión de sus tormentas. Las regiones del norte y centro de México, así como la Península de Yucatán comparten el modelo en sus curvas KDE, lo que indica tormentas de similares características durante este periodo.

Finalmente, las KDE del estadístico PER se muestran en la figura 5.14. La mayor intensidad en la actividad eléctrica del país se encuentra en el sur del mismo (azul oscuro) seguido por la península de Yucatán (rosa). Las curvas del norte y centro del país (naranja y rojo respectivamente) son nuevamente muy similares. Los valores más bajos de PER se observan en las regiones del Pacífico y Golfo de México.

En este caso, la estimación del KDE determinó que durante el verano, las regiones marinas presentan los valores más bajos de intensidad y extensión en sus tormentas, caso contrario al sur de México, en donde se registraron las tormentas más intensas y extensas del país. El régimen observado en el centro es bastante similar al del norte.

5.4. Coeficiente de desarrollo de tormentas

Por el momento, he analizado el fenómeno de las descargas eléctricas desde una escala nacional hasta una subregional, explorando los patrones estacionales, horarios e incluso geográficos que rigen en la ocurrencia de tormentas eléctricas en nuestro país. Pero tal como se expuso en los objetivos, así como en la metodología del proyecto, se buscaba crear un valor adimensional que tuviera la capacidad de determinar el desarrollo eléctrico presente en una tormenta, idea que se consolidó en la creación del Coeficiente de Desarrollo de Tormentas (CDT) y su consecuente implementación en distintos eventos eléctricos ocurridos en México. Se generó un nuevo producto que actúa únicamente durante las tormentas eléctricas, si bien no se logró automatizar este proceso por completo, sus resultados fueron muy valiosos para este proyecto. El primer paso consistió en definir las tormentas que se iban a estudiar, la elección de dichas tormentas se realizó con dos restricciones espacio-temporales, la primera siendo que su ocurrencia se diera en alguno de los meses de verano (julio, agosto y septiembre) ya que es la temporada con mayor registro de descargas eléctricas en todo el país. La segunda restricción impone que la ubicación de las tormentas se encontrara dentro o adyacente a alguna de las regiones de interés (norte, centro y sur de México, así como las regiones del Golfo, Pacífico y la península de Yucatán). Dichas restricciones fueron impuestas para este proyecto aunque es importante mencionar que cualquier tormenta puede ser analizada con este método mientras existan los datos necesarios para crear su CDT.

Seis tormentas fueron analizadas, cada una correspondiendo a una región distinta dentro del territorio mexicano. La extensión espacial de la actividad eléctrica de la

tormenta, así como su línea de desarrollo temporal y su valor (por minuto) de CDT se muestran como objetos de visualización para cada una de las tormentas. Información adicional como su duración, sus zonas de mayor registro y los periodos de máxima actividad eléctrica también son proporcionados. Cabe mencionar que el FED acumulado (presente gráficamente en la línea de desarrollo temporal de cada tormenta) se calcula para cada minuto.

La primer tormenta se muestra en la figura 5.15. Ocurrió en la Península de Yucatán durante los días 28 y 29 de julio del 2018 con una duración de 13 horas, comenzando a las 16:00 UTC para finalizar el día posterior a las 5:00 UTC. La tormenta presentó tres distintas zonas de máxima actividad (con aproximadamente 1400 destellos en cada una de ellas), dos en el estado de Quintana Roo y la última en Campeche. Aproximadamente, 430 km lineales representan la extensión de los registros de la actividad eléctrica. Asimismo se encontró que la séptima hora (desde el inicio de la tormenta) presentó el máximo desarrollo eléctrico, teniendo el registro más grande de acumulación de FED con 17380 destellos en un minuto.

En la gráfica 5.15.c se representa la línea temporal de la tormenta. Los registros del FED acumulado se observan de naranja y los valores del CDT se encuentran en verde. Es posible encontrar un patrón especial en esta gráfica: cuando los valores del acumulado son muy grandes, el CDT tiende a un valor de equilibrio en 0.2. Un número bastante extraño que parece contribuir con poca información sobre la tormenta, pero al generar una nueva gráfica (5.15.a) observamos que ese número no es precisamente una coincidencia.

Para entender la naturaleza del *valor de equilibrio* es necesario recordar la metodología en la generación del CDT, donde a cada minuto se evalúa el promedio de FED sobre su ventana, es decir que se divide el valor medio de FED del minuto n , entre la suma de los valores medios de FED de los minutos n hasta $n-5$. El CDT se define precisamente por lo ocurrido en los cinco minutos anteriores al registro, por lo

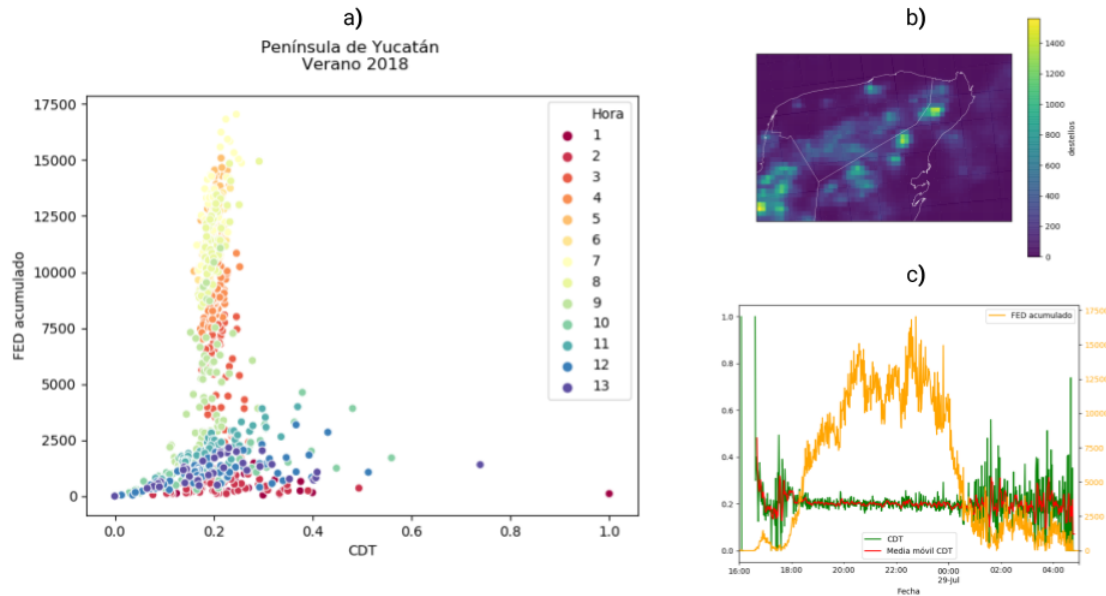


Figura 5.15: Península de Yucatán. (a) Valor acumulado de destellos y su relación con el CDT impuesta por la hora de desarrollo desde el inicio de la tormenta, (b) extensión espacial alcanzada por la actividad eléctrica y (c) línea temporal del desarrollo de la tormenta, mostrando el FED acumulado y su valor de CDT para cada minuto.

que evaluar al coeficiente en el inicio y final de la tormenta arrojará tendencias muy distintas entre sí. Dicha razón fue determinante al tomar la decisión de agrupar los registros por hora de desarrollo.

Regresando a la tormenta (figura 5.15.a), ahora es más claro entender la distribución normal presente en el registro del CDT. La agrupación de los datos por horas de desarrollo nos muestra un resumen tanto de su temporalidad como de su intensidad. Los colores más rojizos pertenecen a las primeras horas de la tormenta, en este caso el máximo desarrollo eléctrico se alcanza a la mitad de su duración, por lo que durante las horas precedentes, la actividad eléctrica va aumentando de manera paulatina (acumulación del FED) propiciando que el CDT tienda a valores mayores que el de equilibrio: la tormenta al encontrarse en aumento, indica que cualquier minuto por analizar (usualmente) será más grande que el promedio de los cinco minutos anteriores (ventana de FED), razón especialmente cierta durante las primeras tres

horas de desarrollo. En el periodo intermedio de la tormenta, observamos que el FED acumulado es mucho más constante con altos valores de intensidad, característica que se traduce en índices de CDT muy cercanos al de equilibrio. Por último, los colores verdiazulados nos indican el periodo final de la tormenta, el cual se observa mucho más caótico con valores de CDT muy variables (más pequeños y más grandes que el de equilibrio). El FED acumulado es bastante más bajo y si bien existen dos pequeñas subidas, la tormenta se encuentra cada vez menos intensa, dicha razón determina valores de CDT menores al de equilibrio.

La siguiente tormenta que se analizó corresponde al centro de México, figura 5.16, durante los días 27 y 28 de agosto del 2018, con duración de 14 horas, comenzando a las 18:00 UTC con término a las 8:00 UTC del día siguiente. Se trata de una tormenta mucho menos intensa que la anterior, con dos zonas de mayor actividad eléctrica, al norte del Estado de México y en la frontera noreste de Morelos y Puebla, cada una con aproximadamente 450 destellos. La extensión lineal de su actividad eléctrica se aproxima a los 180 km. Durante la séptima hora de desarrollo se presentó su mayor registro de FED acumulado con 6100 destellos en un minuto.

La naturaleza misma de esta tormenta es evidentemente distinta a la analizada anteriormente en la península de Yucatán como se observa en la línea temporal del gráfico 5.16.c, la huella del desarrollo eléctrico aumenta y desciende drásticamente alcanzando su valor máximo durante la séptima hora. A diferencia de la tormenta anterior, no se observa un periodo regular con registros altos de FED acumulado, en este caso apenas se alcanza el máximo valor y la tormenta comienza a disminuir en intensidad. Otro detalle importante yace en la magnitud del FED acumulado, con 6100 destellos en un minuto correspondiendo a casi la tercera parte del registro máximo encontrado en Yucatán (17380 destellos/minuto).

El patrón horario de la tormenta (5.16.a) muestra nuevamente una tendencia normal pero con una mayor cantidad de valores grandes de CDT. Si bien, la mayoría de

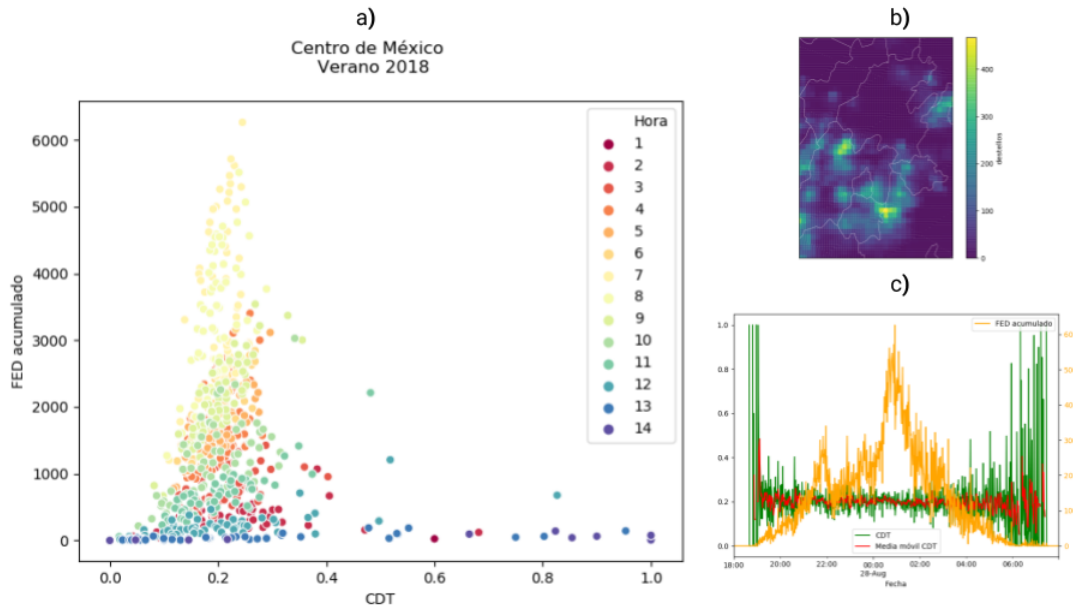


Figura 5.16: Centro de México. (a) Valor acumulado de destellos y su relación con el CDT impuesta por la hora de desarrollo desde el inicio de la tormenta, (b) extensión espacial alcanzada por la actividad eléctrica y (c) línea temporal del desarrollo de la tormenta, mostrando el FED acumulado y su valor de CDT para cada minuto.

los registros se encuentran alrededor del valor de equilibrio, en este caso su dispersión es mayor: las últimas cuatro horas de la tormenta son bastante caóticas, con bajos valores de acumulación y alta variación en la magnitud de los CDT. A su vez, se mencionó que es importante prestar atención a los valores del acumulado de FED, los registros del periodo intermedio de la tormenta se encuentran en un intervalo más ancho alrededor del valor de equilibrio de CDT, su dispersión es mayor en comparación con la tormenta de la península de Yucatán.

A continuación, se presenta la tormenta más intensa y larga de las seis analizadas. Ocurrió en el sur de México, la zona de mayor actividad eléctrica del país durante los años 2018 y 2019. La tormenta duró 22 horas comenzando el 19 de agosto del 2018 a las 17:00 UTC, para finalizar el día siguiente a las 15:00 UTC. Una única zona presentó la máxima actividad eléctrica con poco más de 2200 destellos totales, ubicada en Veracruz, adyacente a la frontera con los estados de Tabasco y Chiapas.

La extensión de su actividad eléctrica se registró durante 300 km lineales. Finalmente, hasta la novena hora se presentó la máxima acumulación de FED con 26000 destellos en un minuto.

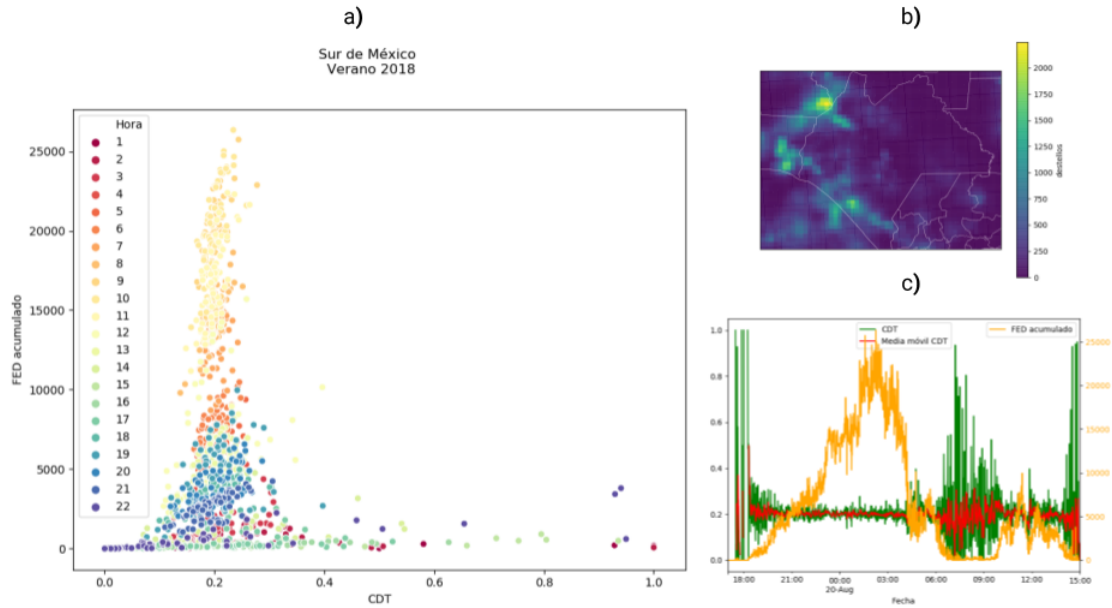


Figura 5.17: Sur de México. (a) Valor acumulado de destellos y su relación con el CDT impuesta por la hora de desarrollo desde el inicio de la tormenta, (b) extensión espacial alcanzada por la actividad eléctrica y (c) línea temporal del desarrollo de la tormenta, mostrando el FED acumulado y su valor de CDT para cada minuto.

Una tormenta tan grande e intensa presenta algunos detalles considerables; la línea temporal (5.17.c) se vuelve demasiado caótica en el último tercio de la tormenta, y como hemos estado observando en los análisis pasados, cuando el acumulado de FED es muy bajo, el CDT se dispara a valores alejados (en ambas direcciones) del equilibrio. Esta tormenta tiene algunas características tanto como la de Yucatán como la del centro del país: presenta valores altos de acumulación de FED y decae en intensidad abruptamente en un periodo muy corto de tiempo (similar a la primer tormenta) pero no tiene un amplio periodo de alta (y constante) magnitud de FED acumulado, así como presenta mucha actividad eléctrica posterior al evento principal, lo que denota en datos dispersos (como en la segunda tormenta).

En este caso también debemos considerar la duración de la tormenta, casi un día completo de registros de actividad eléctrica con solo un par de horas de calma durante el tercer cuarto de su desarrollo, periodo en donde se genera el caos en el CDT. El gráfico 5.17.a presenta el patrón horario de la tormenta, en donde se vuelve a observar lo ya comentado: la primera y segunda hora (tonos rojizos) con valores mayores al de equilibrio y baja acumulación de FED, que son precedidos por altos valores de FED determinando magnitudes cercanas a la del equilibrio del CDT. La novena hora (periodo de máxima acumulación de la tormenta) registra valores de CDT un poco mayores a 0.2; una peculiaridad que también comenzaba a lucir en la tormenta de Yucatán (figura 5.15), no se logra comprender este fenómeno por completo, parece que únicamente se observa cuando las registros de FED son muy altos y constantes por algunos minutos durante su periodo de máximo desarrollo, ambos eventos comparten valores máximos de acumulación superiores a los 15000 destellos por minuto. Es necesario estudiar más tormentas para comprender lo que sucede. Asimismo, durante dicho periodo se presentó un aumento considerable respecto a su tasa de crecimiento: se alcanzó un valor de $T_{max} = 92 \frac{\text{destellos}}{\text{minuto}}$, muy por encima de la tasa media de crecimiento (primeras ocho horas) $T_{avg} = 43.3 \frac{\text{destellos}}{\text{minuto}}$.

La siguiente tormenta tuvo lugar en el norte del país, figura 5.18. Con una duración de 16 horas, inició el 9 de Agosto del 2018 a las 18:00 UTC para finalizar el día siguiente a las 10:00 UTC. Se presentó una única zona de máxima actividad eléctrica al noreste de Sinaloa con poco más de 1120 destellos totales. La extensión de su actividad eléctrica principal fue de 120 km lineales, la décima hora de su desarrollo presentó el máximo registro de FED acumulado con 5600 destellos en un minuto.

Si bien la mayor parte de la actividad eléctrica ocurrió en la frontera norte entre Sinaloa y Durango, también existieron registros constantes de menor magnitud en gran parte del estado de Chihuahua. Con base única en la información de FED, es difícil definir si dicha actividad en Chihuahua también pertenece al sistema convectivo de la

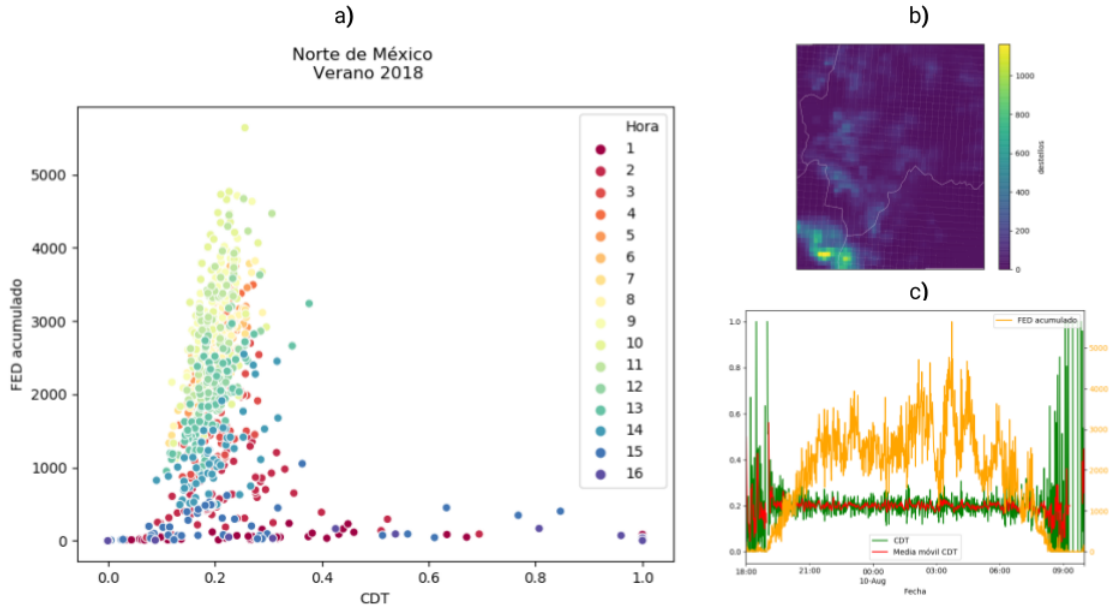


Figura 5.18: Norte de México. (a) Valor acumulado de destellos y su relación con el CDT impuesta por la hora de desarrollo desde el inicio de la tormenta, (b) extensión espacial alcanzada por la actividad eléctrica y (c) línea temporal del desarrollo de la tormenta, mostrando el FED acumulado y su valor de CDT para cada minuto.

tormenta principal, otro detalle que presenta este análisis. La línea temporal (5.18.c) muestra una tormenta prolongada, con actividad eléctrica alta y constante (respecto al régimen del norte de México). La máxima acumulación de FED se presentó durante la segunda mitad de la tormenta. Su tasa media de crecimiento fue relativamente baja, $T_{avg} = 8.5 \frac{\text{destellos}}{\text{minuto}}$, aunque logró aumentar considerablemente en la décima hora de su desarrollo (periodo de máxima actividad) a una tasa de $T_{max} = 58 \frac{\text{destellos}}{\text{minuto}}$.

El patrón horario de la tormenta (5.18.a) expone a simple vista una gran dispersión de datos tanto en las primeras horas (rojo) como en las finales (azul). Desde la quinta hasta la décimo-tercer hora, los datos viven alrededor del valor de equilibrio. En ésta tormenta, volvemos a observar un patrón horario similar al encontrado para el centro de México, ya que ambas tormentas comparten valores de acumulación muy similares (5600 y 6100 como sus máximos, respectivamente), la gran diferencia yace en la hora de máximo desarrollo (décima y séptima en cada caso).

Podrán notar, que las tormentas recién analizadas pertenecen al territorio continental mexicano, y comparten un cierto modo de agrupación en su patrón horario (aunque queda claro que presentan características muy distintas entre sí). También recordarán que las regiones de interés propuestas anteriormente incluían un par de zonas oceánicas. Ya se había argumentado que la cantidad de rayos que caen sobre el mar es considerablemente menor a lo que sucede en tierra, por lo que me pareció muy importante poder analizar tormentas que ocurrieran en territorio marítimo para definir las propiedades que presentan las tormentas eléctricas en dichas zonas.

Por lo tanto, la siguiente tormenta ocurrió en el Golfo de México (figura 5.19), con una duración de 15 horas, comenzando el 3 de Septiembre del 2018 a las 07:00 UTC para finalizar a las 22:00 UTC. Se observó una zona de máxima actividad eléctrica con un registro de 53 destellos totales. Su extensión lineal fue de 172 kilómetros. Si bien, no hay una continuidad en los registros, parece que la cuarta hora de su desarrollo presentó la máxima acumulación de FED con 800 destellos en un minuto.

Magnitudes muy bajas del FED acumulado fueron registradas a lo largo del evento, con la zona de actividad máxima presentando únicamente 53 destellos totales, representa una tormenta muy interesante en términos comparativos. Su duración fue similar a la de cualquier otra tormenta típica, sin embargo su línea temporal (5.19.c) muestra un patrón único y difícil de comprender. Los registros de FED acumulado son discretos y de baja magnitud: no existe un real (y visible) desarrollo de la tormenta. Dichas propiedades determinan que los valores del CDT sean tan caóticos, al no existir continuidad en la tormenta, el cálculo del coeficiente se trunca (recordemos que su función depende de los cinco minutos anteriores al minuto por analizar) y salta entre todas las magnitudes que podría adoptar en el espectro de sus valores. En términos de su patrón horario (5.19.a), no se observa una secuencia entre dichos valores (a diferencia de como se aprecia en las tormentas continentales): se alcanza el valor máximo de CDT (1.0) en muchos instantes de la tormenta y no es posible

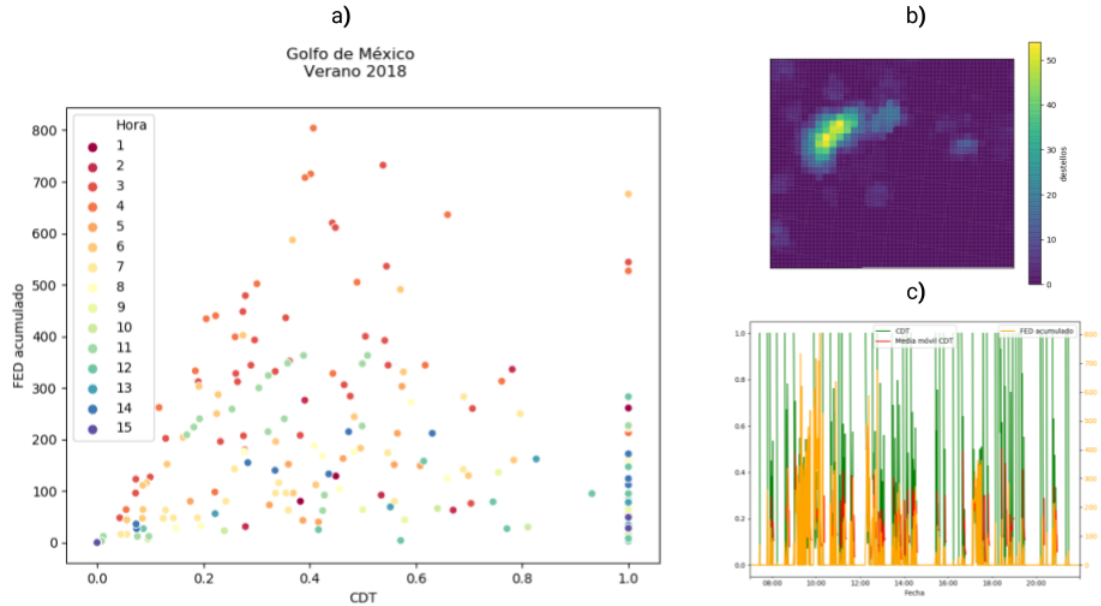


Figura 5.19: Golfo de México. (a) Valor acumulado de destellos y su relación con el CDT impuesta por la hora de desarrollo desde el inicio de la tormenta, (b) extensión espacial alcanzada por la actividad eléctrica y (c) línea temporal del desarrollo de la tormenta, mostrando el FED acumulado y su valor de CDT para cada minuto.

reconocer su valor de equilibrio. Bajos valores de acumulación, acompañados de una larga duración, así como un desarrollo carente de continuidad, imposibilitan el análisis de tormentas como ésta a partir de su coeficiente de desarrollo.

La última tormenta, tuvo lugar en el oceano Pacífico a unos cuantos kilómetros de las costas de Jalisco y Nayarit (figura 5.20), registró una duración de 19 horas comenzando el 29 de Agosto del 2018 a las 00:00 UTC para finalizar más tarde ese día a las 19:00 UTC. Dos zonas de máxima actividad eléctrica con 690 destellos totales fueron observadas. La extensión de dicha actividad se registró a lo largo de 370 km lineales. No fue hasta la doceava hora de su desarrollo que se presentó la máxima acumulación de FED con 8100 destellos en un minuto.

La línea temporal (5.20.c) muestra un desarrollo similar al de las tormentas continentales, (al menos en términos de continuidad en sus registros). Esta tormenta en

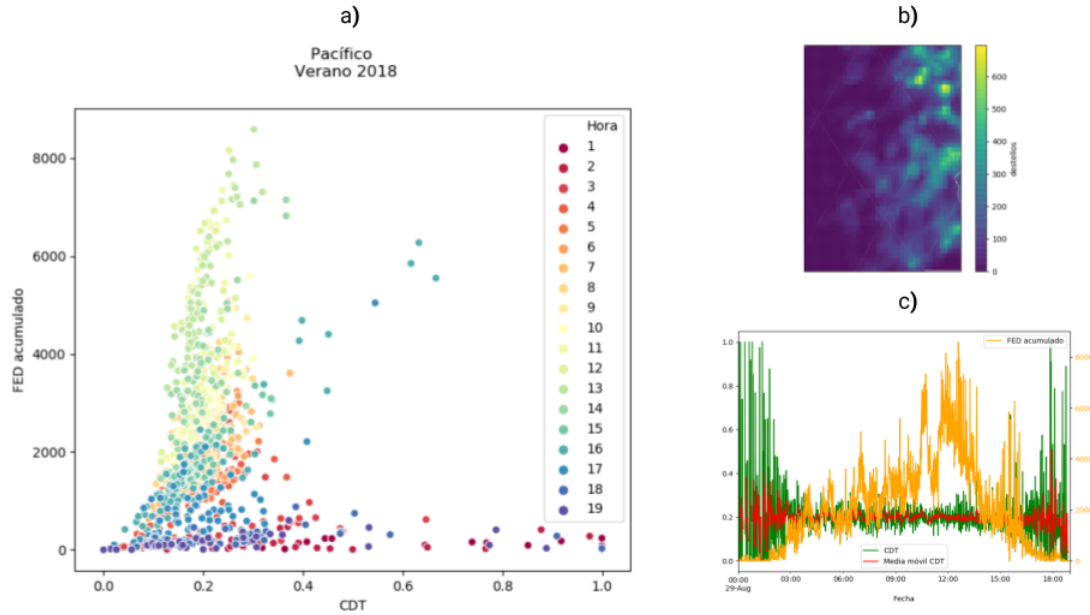


Figura 5.20: Pacífico. (a) Valor acumulado de destellos y su relación con el CDT impuesta por la hora de desarrollo desde el inicio de la tormenta, (b) extensión espacial alcanzada por la actividad eléctrica y (c) línea temporal del desarrollo de la tormenta, mostrando el FED acumulado y su valor de CDT para cada minuto.

particular, presenta una considerable diferencia con las anteriores, visible tanto en su línea temporal como en su patrón horario: alrededor de la décimo-sexta hora (cuando la tormenta ya se encontraba decreciendo en su desarrollo), se manifiesta un aumento muy rápido en su intensidad, lo que lleva al CDT a alcanzar magnitudes superiores a su valor de equilibrio (registros azules en el gráfico 5.20.a). Enfocándonos únicamente en el patrón horario de la tormenta, observamos que el máximo desarrollo se presenta hasta la segunda mitad de su duración (tonos verde claro). Su patrón horario está más asemejado a las tormentas continentales que a las oceánicas (analizadas en este proyecto), y la razón de ésta observación parece ser la magnitud del FED acumulado que se alcanza en la tormenta. En la primer sección de los resultados, se comentaba que los registros de rayos en las zonas oceánicas son mucho menores que los observados en tierra (Williams, 2005), y el MOD de México (figura 5.2) expone claramente este hecho, sin embargo dicho mapa también muestra que la mayor cantidad de rayos que ocurren en el Pacífico se registran en las costas, y la tormenta recién analizada

pertenece a estos registros.

Si bien, hay muchas semejanzas con los patrones horarios de las tormentas continentales sería muy interesante analizar más tormentas oceánicas a lo largo de los años y en distintas estaciones para generar un modelo típico de tormenta que nos defina sus propiedades características. Dichos estudios se salen de los objetivos iniciales planteados para el presente proyecto, sin mencionar que se necesita una serie de datos que cubra más de dos años de información (como la que se utilizó en este proyecto), para que los resultados y análisis sean significativos para la actualidad.

Seis tormentas en distintas regiones del país fueron analizadas, ocurridas durante el verano del 2018, cuatro en territorio continental y dos más en zonas oceánicas. Para cada una se mostró su extensión espacial, patrón horario y línea temporal de desarrollo, asimismo se añadieron algunas características y propiedades observadas durante sus análisis. A continuación en la tabla 5.2, a manera de resumen, se encuentra listada la información más destacada de cada una de las tormentas.

Región	Máximo FED acumulado	Duración	Extensión lineal	Hora de máximo desarrollo	T_{avg} [$\frac{\text{destellos}}{\text{minuto}}$]	T_{max} [$\frac{\text{destellos}}{\text{minuto}}$]
Golfo de México	800	15 hrs	172 km	4ta	N/D	N/D
Norte	5600	16 hrs	120 km	10ma	8.5	58
Centro	6100	14 hrs	180 km	7ma	12.7	50
Pacífico	8100	19 hrs	370 km	12va	10.4	65
Península de Yucatán	17380	13 hrs	430 km	7ma	36	83
Sur	26000	22 hrs	300 km	9na	43.3	92

Tabla 5.2: Comparación de las características de las tormentas analizadas. T_{avg} se refiere a la tasa media de crecimiento, T_{max} representa la tasa máxima de crecimiento (calculada en la hora de máximo desarrollo).

Las tormentas fueron listadas en orden ascendente respecto a su valor máximo de

FED acumulado. Como primer conclusión, la duración de una tormenta no resulta mayor a medida que su valor de FED acumulado aumente, si bien la tormenta del sur fue tanto la más intensa como la más duradera, las demás no cumplen dicha relación. Por otro lado, respecto a su extensión lineal, las tres menos intensas están debajo de los 200 km a diferencia de las de mayor intensidad cuya extensión es superior a los 300 km, ésta puede ser un hallazgo que valga la pena profundizar en futuros trabajos. Por último se encuentran las tasas de crecimiento media (T_{avg}) y máxima (T_{max}). Para su cálculo es imperativo que la línea temporal sea continua, por eso la tormenta registrada en el Golfo de México no presenta valores ya que se desconoce su desarrollo a través del tiempo. Respecto a las demás tormentas, se aprecia una relación donde la T_{avg} aumenta a medida que el valor máximo de FED acumulado es más grande, la única excepción se presenta en el Pacífico, esto puede llevar a otro interesante trabajo futuro, en donde se estudien las diferencias y similitudes en las características entre tormentas continentales y oceánicas. Por último, las dos tormentas más intensas también cuentan con las mayores tasas de crecimiento (tanto máximo como medio).

Es importante tener presente que en esta última sección de resultados se estudiaron únicamente eventos específicos a una región y estación, así como la elección de las mismas fue aleatoria (después de cumplir con las dos restricciones espacio-temporales), por lo que ni su patrón horario ni su línea temporal representan el modelo de tormenta típica en su región. Para encontrar dicho modelo es necesario analizar muchos más eventos para encontrar un régimen temporal y de desarrollo significativo, que englobe a la mayoría de las tormentas.

Regresando a la evolución temporal de las tormentas, hablaremos un poco más sobre el CDT, este valor que constantemente permuta a razón del desarrollo que presenta una tormenta. Como se ha estado mencionando, su cálculo está determinado únicamente por el promedio de FED y su relación con la ventana de 5 minutos anteriores, sin embargo en este proyecto se analizó más allá, buscando la conexión existente entre el CDT y la intensidad de la tormenta (FED acumulado) con el objetivo de en-

contrar un patrón que mostrase su evolución (temporal y de intensidad). Después de algunos intentos iniciales, observé que la forma más fácil de entender la importancia del CDT requería de segmentar la duración total de la tormenta en sus componentes horarias, olvidándonos así de variables externas a la tormenta (zonas horarias, hora de ocurrencia, etc.). De tal manera, estudiaríamos a la tormenta de inicio a fin sin importar su duración ni los lugares por donde se extendiese.

Después de observar a las seis tormentas, rescato los dos aportes que considero más importantes del análisis de CDT.

1. **Valor de equilibrio.** Matemáticamente, el cálculo del CDT tiende a 0.2 cuando el minuto por analizar tiene un valor semejante a cada uno de los cinco minutos anteriores (cuando no son cero). Esta condición únicamente se cumple cuando se tiene un periodo extenso en donde el desarrollo de la tormenta es constante, periodo que usualmente ocurre después de la cuarta hora de inicio. Si bien, la tormenta aún no llega a su máxima intensidad, el CDT ronda al valor de equilibrio temprano. Aunque por otro lado, también se observó que a mayor intensidad, el CDT está más cercano a 0.2. En otras palabras, la tormenta tarda alrededor de 4 horas en encontrar un desarrollo constante, lo que genera que el coeficiente esté próximo al valor de equilibrio, pero a medida que su intensidad aumenta, el CDT tiende aún más al equilibrio. También se encontró un fenómeno en la tormenta del sur de México, donde los valores de CDT comenzaban a alejarse del equilibrio durante su máximo desarrollo, lo que me genera personalmente más dudas que respuestas, aunque me queda claro que es necesario analizar muchas más tormentas para clarificar lo que sucede.
2. **Aplicaciones a futuro.** Imaginemos ser capaces de predecir el momento en que una tormenta va a alcanzar su máxima intensidad, esta habilidad podría ser capaz de salvar vidas, así como prever accidentes eléctricos e incluso incendios. Con el análisis de CDT, pienso que es posible lograrlo. Hemos visto a lo largo del proyecto que se pueden definir las zonas que tienen mayor actividad

eléctrica, así como determinar los patrones horarios y de temporalidad de las tormentas eléctricas en México. Analizando un gran número de eventos por región podríamos generar un modelo típico de tormenta (línea temporal, patrón horario y evolución espacial), el cual sea la base para determinar en tiempo real el desarrollo de un evento convectivo y determinar con cierto grado de confianza el efecto que puede llegar a tener, en términos de su duración e intensidad, en dicha zona.

Capítulo 6

Conclusiones

Las tormentas eléctricas son un fenómeno que puede ocurrir en cualquier lugar del mundo, si bien hay zonas en donde se favorece su formación. Como se mencionó a lo largo del proyecto, tanto las regiones con mayor potencial convectivo, así como aquellas que presentan terreno con gran altitud son sólo algunas en donde los registros predominan. En términos espaciales, el Mapa de Ocurrencia de Destellos (MOD) de México determinó que en la región comprendida por el Istmo de Tehuantepec, en el sur del país, se da la mayor ocurrencia de rayos, específicamente en el municipio de las Choapas, Veracruz con un total de 35508 destellos a lo largo del año (un promedio de 97.2 destellos al día). Asimismo, las regiones de la península de Yucatán, así como los estados de Nayarit y Sinaloa también presentan registros considerables. Por otro lado, se generó más evidencia que confirma que el territorio continental tiene mucha más actividad eléctrica que el oceánico. En cuanto a la temporalidad y los horarios de dicha actividad, se determinó que en los meses de verano (julio, agosto y septiembre) y que alrededor de la media noche (horario UTC) se registra la mayor actividad eléctrica en el país. Se calcularon cuatro estadísticos de FED (valor máximo, sumatoria, promedio y PER) que ayudaron a definir dichas condiciones espacio-temporales de las tormentas eléctricas registradas en el país. En donde se encontró que los meses de invierno son los menos activos.

Respecto a los estadísticos, se habló del comportamiento caótico intrínseco al va-

lor máximo de FED, ya que las condiciones que determinan la intensidad de un rayo pueden estar disponibles en cualquier momento, así como se mencionó el gran aporte que significó la creación del PER, ya que se pudo usar para representar la intensidad de las tormentas.

Durante el análisis, comenzamos estudiando desde lo general hasta lo particular, teniendo presente que la ocurrencia de tormentas eléctricas está sujeta por los procesos de generación de nubes, mismos que cambian entre regiones, por lo que era necesario analizar el fenómeno en escalas (espacio-temporales) cada vez menores. Se generaron subconjuntos que ayudaron a determinar las 6 regiones características que generaban mayor interés sobre las demás.

Con análisis de KDE, se definió que durante la primavera, la costa del Pacífico registra los valores más altos de FED en todo el país, régimen que cambia completamente en los meses de verano, ya que las zonas de la península de Yucatán y el sur de México dominan en el número máximo de destellos. Asimismo, se encontró que en términos de intensidad y extensión de sus tormentas eléctricas, el territorio continental supera considerablemente a las regiones marinas, con el sur de México siendo la región más activa y con los registros más altos de dichas variables.

La técnica de análisis de tormenta a partir de su coeficiente de desarrollo (CDT) resultó ser muy útil para estudiar eventos de intensidad considerable, aquellos eventos con ausencia de continuidad temporal no pueden ser estudiados con dicho método. En nuestro caso, la tormenta del Golfo de México fue la única que no pudo ser analizada, en todas las demás se observó que su desarrollo llegó a un equilibrio después de la cuarta hora de inicio y aproximadamente durante el periodo medio de su duración. Se determinó que a medida que la tormenta se desarrolla, su valor de CDT tiende a un punto de equilibrio que se iguala a 0.2, de tal manera que a mayor intensidad, el CDT se acerca más a dicho valor de equilibrio. Se encontró que la tormenta más intensa (sur de México) presenta elementos tanto del centro del país como de la

península de Yucatán, por lo que su régimen de desarrollo parece estar compuesto por ambas regiones. Por otro lado, se encontró que la tormenta del Pacífico se encuentra mucho más aparentada con las tormentas continentales que con las oceánicas.

Por último, no se observó una relación entre el periodo de máximo desarrollo de una tormenta con su duración. Parece existir un patrón en donde la extensión lineal es superior a los 200 km cuando la tormenta tiene una alta acumulación de FED en su periodo de máximo desarrollo (superior a los 8100 destellos por minuto) pero se precisan de más datos y análisis de eventos.

El presente proyecto es una pequeña muestra de los análisis que son posibles de realizar con datos satelitales y sus productos. Se necesitan más estudios para tener una mayor referencia de la actividad eléctrica en México. Espero que en los próximos años se tenga una base de datos tan grande que permita realizar un estudio climatológico de tormentas eléctricas en el país, en donde se proyecte el cambio observado y esperado en la tendencia de la ocurrencia de dichas tormentas. Asimismo, el análisis de CDT puede aplicarse en modelos que determinen la temporalidad y desarrollo horario de las tormentas ocurridas en una misma región para producir patrones típicos y significativos que generen pronósticos en tiempo real.

Referencias

- Adams, D. K., y Comrie, A. C. (1997). The North American Monsoon. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(10), 2197–2213. doi: 10.1175/1520-0477(1997)078<2197:TNAM>2.0.CO;2
- Aich, V., Holzworth, R., Goodman, S. J., Kuleshov, Y., Price, C. G., y Williams, E. (2018). Lightning: A New Essential Climate Variable. *Eos*, 99(September 2018), 1–7. doi: 10.1029/2018eo104583
- Altshuler, J. (2017). *El fuego del cielo. Mito y realidad en torno al rayo* (1.^a ed.). Fondo de Cultura Económica.

- Aplicaciones Tecnológicas S. A. (2019). *Mitos y curiosidades sobre el rayo*.
- Black, R., y Hallett, J. (1998). The Mystery of Cloud Electrification. *The Scientific Research Society*.
- Bruning, E. C., Tillier, C. E., Edgington, S. F., Rudlosky, S. D., Zajic, J., Gravelle, C., ... Meyer, T. C. (2019). Meteorological Imagery for the Geostationary Lightning Mapper.
doi: 10.1029/2019JD030874
- Carlomusto, M. (2018). GOES-R Series Product Definition and Users' Guide. , 5, 68. Descargado de
- Dobson, G. M. B. (1969). *Exploring the Atmosphere* (2nd ed.). Oxford, United Kingdom: Oxford University Press.
- Global Climate Observing System. (2016). The Global observing system for climate: Implementation needs.
doi: 10.13140/RG.2.2.23178.26566
- Goodman, S. J. (2020). GOES-R Series Introduction. *The GOES-R Series*, 1–3. doi: 10.1016/b978-0-12-814327-8.00001-9
- Goodman, S. J., Blakeslee, R. J., Koshak, W. J., Mach, D., Bailey, J., Buechler, D., ... Stano, G. T. (2013). The GOES-R Geostationary Lightning Mapper (GLM). *Atmospheric Research*, 125-126, 34–49. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.01.006> doi: 10.1016/j.atmosres.2013.01.006
- Goodman, S. J., Mach, D., Koshak, W. J., y Blakeslee, R. J. (2012). GLM Lightning Cluster-Filter Algorithm. , 1–67.
- Holle, R. L. (2015). Annual Rates of Lightning Fatalities by Country. *20th International Lightning Detection Conference*(January), 1–14. Descargado de http://es.vaisala.com/Vaisala Documents/Scientific papers/Annual_rates_of_lightning_fatalities_by_country.pdf
- Illingworth, A. (1978). Charging up a thunderstorm. *New Scientist*, 78, 504–506.
- INEGI. (2016). *Tabulados de la encuesta intercensal 2015*.
- INEGI. (2020). *Climatología*. Descargado de

- <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/>
- Lojou, J.-Y., y Cummins, K. L. (2005). *On the representation of two- and three-dimensional total lightning information*.
- NASA. (2019). GOES-R Series Data Book. , A(September).
- Price, C. G. (2013). Lightning Applications in Weather and Climate Research. *Surveys in Geophysics*, 34(6), 755–767. doi: 10.1007/s10712-012-9218-7
- Raga, G. B., De La Parra, M. G., y Kucienska, B. (2014). Deaths by lightning in Mexico (1979-2011): Threat or vulnerability? *Weather, Climate, and Society*, 6(4), 434–444. doi: 10.1175/WCAS-D-13-00049.1
- Rudlosky, S. D. (2018). *GLM Quick Brief: Flash Extent Density* (Inf. Téc.).
- Rudlosky, S. D., Goodman, S. J., y Virts, K. S. (2020). *Lightning Detection: GOES-R Series Geostationary Lightning Mapper* (Vol. 16) (n.º 2018). Elsevier Inc. Descargado de <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814327-8.00016-0> doi: 10.1016/b978-0-12-814327-8.00016-0
- Sullivan, P. C. (2020). GOES-R Series Spacecraft and Instruments. *The GOES-R Series*, 13–21. doi: 10.1016/b978-0-12-814327-8.00003-2
- The Franklin Institute. (2019). *Benjamin Franklin and the kite experiment*. Descargado de <https://www.fi.edu/benjamin-franklin/kite-key-experiment>
- Williams, E. (2005). Lightning and climate: A review. *Atmospheric Research*, 76(1-4), 272–287. doi: 10.1016/j.atmosres.2004.11.014
- Williams, E., y Stanfill, S. (2002). The physical origin of the land-ocean contrast in lightning activity. *Comptes Rendus Physique*, 3(10), 1277–1292. doi: 10.1016/S1631-0705(02)01407-X