



**COORDINACIÓN DE GOBERNANZA DEL AGUA Y
FORTALECIMIENTO DE CAPACIDADES**

**SUBCOORDINACIÓN DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA**

T E S I S

**METODOLOGÍA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
ALERTAMIENTO POR RIESGOS ANTE FENÓMENOS
HIDROMETEOROLÓGICOS SEVEROS**

que para obtener el grado de

Maestro en Ciencias y Tecnología del Agua

p r e s e n t a

Fabián Salazar Vázquez

Tutor: M.C. Roberto Ramírez Villa

Jiutepec, Morelos

Año: 2023

F.C4.03.44.1



Con fundamento en los artículos 21 y 27 de la Ley Federal del Derecho de Autor y como titular de los derechos moral y patrimoniales de la obra titulada “METODOLOGÍA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ALERTAMIENTO POR RIESGOS ANTE FENÓMENOS HIDROMETEOROLÓGICOS SEVEROS”, otorgo de manera gratuita y permanente al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, autorización para que fijen la obra en cualquier medio, incluido el electrónico, y la divulguen entre su personal, estudiantes o terceras personas, sin que pueda percibir por tal divulgación una contraprestación.

NOMBRE Y FIRMA DEL ESTUDIANTE

Fabián Salazar Vázquez

Jiutepec, Morelos, agosto del 2023

F.C4.03.43.1



MAESTRÍA EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DEL AGUA
(HIDROMETEOROLOGÍA)

Comité tutorial integrado por:

M.C. Roberto Ramírez Villa

Dr. Roel Simuta Champo

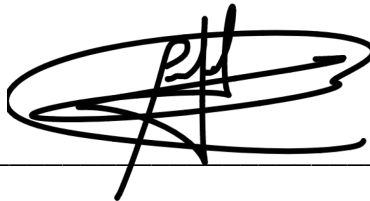
Dr. Indalecio Mendoza Uribe

Dr. Marco Rodrigo López López

Dra. Pamela Iskra Mejía Estrada

Director de tesis

M.C. Roberto Ramírez Villa



Jiutepec, Morelos, México, agosto, 2023

Instituto Mexicano de Tecnología de Agua



Agradecimiento

Esta tesis es el fruto de un largo proceso de aprendizaje, superación de barreras, conocimiento de mis límites y capacidades. Ha sido una dura prueba que finalmente he superado con éxito. Esto no habría sido posible sin el apoyo inquebrantable de mi familia.

Agradezco a mi padre, por siempre haberme apoyado durante su vida, por creer y depositar su confianza en mí, gracias por todo lo que me brindaste en vida; tus esfuerzos no serán en vano.

A mi madre, te agradezco el infinito amor que me tienes, así como tu apoyo y cariño en los momentos en que más los necesitaba. Eres mucho más de lo jamás pude haber pedido.

Diego y Paola, mis hermanos, por ser piezas fundamentales en mi vida. Gracias por quererme y esperar nuestro reencuentro con tantas ansías. Yo los apoyaré y amaré durante toda mi vida.

A Mermeid, mi futura esposa, te agradezco por todo el amor que me has dado y por ser una pieza fundamental para la conclusión satisfactoria de este trabajo. Te amo tanto que ni todas las palabras del mundo alcanzarían para expresarlo.

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mi tutor, Roberto Ramírez, quien desde el primer momento mostró un compromiso excepcional en guiarme a lo largo de esta investigación. Gracias por tus invaluable enseñanzas, apoyo y confianza.

También, quiero agradecer a mis sinodales: la Dra. Iskra, el Dr. Indalecio, el Dr. Roel y el Dr. Marco. Su compromiso, tiempo, consejos y comentarios fueron cruciales para el crecimiento y mejora de este trabajo a lo largo de las evaluaciones.

Agradezco a mis compañeros de maestría, con quienes juntos hemos construido nuestro camino a través de este proceso. Especialmente gracias a Gybrán, Estrellita y Flavio, este último, mi único compañero y amigo de hidrometeorología, quien me convenció de ingresar al posgrado y fue parte fundamental en el desarrollo de mi tesis.

A todos mis amigos a los que, aunque mi memoria a veces me traicione, quiero expresar mi sincero agradecimiento. Gracias Fer, Mar, Kevin García, Kevin Cervantes, Jesús Apolinar, Karla Téllez, Samara Vela, Samara Hernández, Karla Remedios, Rafael, Jamila, Gilberto, Alex, Sergio, Addmosh, Inés, Nely, Abi, Mafara, Pablo. También, gracias al grupo de *pingüinos* por sus aportes, experiencia, risas y amistad.

Deseo agradecer a mi familia cercana, quienes siempre han creído en mí y me han brindado todo lo que está en sus manos para que pueda cumplir mis metas, con especial enfoque al grupo de *Farmacias Phi*, que me dejó grandes aprendizajes.

Me gustaría también agradecer al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, especialmente al posgrado, por recibirme en esta institución y asesorarme en los diversos trámites que eran requeridos, así como brindar el seguimiento adecuado que me permitió concluir exitosamente la maestría. Gracias, Belem, por tu valiosa ayuda. Muchas gracias a todos mis profesores de la maestría: el Dr. Santana, el Dr. Efraín, el Dr. Toño, el Dr. Martín, el Dr. Indalecio y el M.C. Roberto, cuyas enseñanzas formarán parte fundamental de mi crecimiento académico y profesional. Gracias por su paciencia y por sus conocimientos. Finalmente, deseo expresar mi agradecimiento al CONAHCYT por la beca que me permitió dedicarme de tiempo completo a esta maestría. Sin este apoyo financiero, hubiera sido imposible lograrlo.

Este trabajo está dedicado a las personas que más amo:
Francisco, Mónica, Diego, Paola y Mermeid.

Resumen

El riesgo se define como la probabilidad de que ocurran problemas graves en una comunidad o sociedad debido a fenómenos físicos que, al interactuar con condiciones vulnerables, causan daños en personas, economía y materiales, además de generar efectos negativos en el medio ambiente. Ante la falta de un pronóstico de riesgo en México, este trabajo propone una metodología para generar alertamientos basados en riesgo en función de la vulnerabilidad del sitio y del peligro asociado a las condiciones específicas de cada lugar e información histórica.

Con el fin de lograrlo, se eligieron 1430 ubicaciones que corresponden a estaciones climatológicas convencionales a lo largo de todo México. De estas ubicaciones, se extrajeron los datos de vulnerabilidad usando la información de vulnerabilidad ambiental, vulnerabilidad económica y vulnerabilidad social publicada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)¹. Además, para cada ubicación, se recopilaron y procesaron las variables meteorológicas (temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación acumulada en 24 horas) obtenidas de los resultados del Sistema de Pronóstico de Ensamble a Corto Plazo (SREF, por sus siglas en inglés). Con base en estas variables, se calcularon los niveles de peligro, que se asignaron mediante percentiles, estableciendo umbrales relativos a partir de observaciones históricas de las estaciones climáticas convencionales. Finalmente, se evaluó el riesgo mediante el producto de los valores de vulnerabilidad y peligro específicos para cada ubicación en particular.

Los resultados de esta metodología se presentan en forma de mapas de alertamientos, que indican el nivel de riesgo para cada ubicación. Estos niveles de riesgo se categorizan como bajo, medio, alto y muy alto. Se presentan tres casos de estudio para cada variable utilizada, enfocándose en eventos hidrometeorológicos significativos durante el periodo 2020-2022.

Este trabajo demuestra que la aplicación de un monitoreo dinámico mediante modelos de pronóstico numérico, la incorporación de datos históricos para establecer umbrales en el cálculo de peligro y la utilización de valores de vulnerabilidad actualizados, posibilita la generación de alertas de riesgo ante fenómenos hidrometeorológicos. Estas alertas podrían ayudar a disminuir los efectos producidos por diversos eventos hidrometeorológicos severos en el país.

¹ <https://datos.gob.mx/busca/dataset/vulnerabilidad-social-economica-y-ambiental-por-municipio>
Recuperado el 8 de mayo de 2022

ÍNDICE

Resumen

1	Introducción	1
2	Planteamiento del problema.....	4
2.1	Presentación del problema.....	4
2.1.1	Deastres en México.....	7
2.2	Objetivo general.....	9
2.3	Objetivos específicos.....	10
2.4	Hipótesis.....	11
2.5	Justificación.....	11
2.6	Zona de estudio: México.....	12
2.6.1	Orografía	13
2.6.2	Hidrografía.....	14
2.6.3	Clima.....	16
3	Antecedentes.....	17
3.1	Antecedentes internacionales.....	17
3.2	Antecedentes nacionales.....	19
4	Marco teórico	21
4.1	Definición de vulnerabilidad, peligro y riesgo.....	21
4.2	Fenómenos hidrometeorológicos de México.....	23
4.2.1	Frentes fríos.....	24
4.2.2	Ondas del este.....	24
4.2.3	Ciclones tropicales.....	24
4.2.4	Otros fenómenos importantes.....	25
4.3	Modelos numéricos de la atmósfera.....	26
4.4	Uso de umbrales basados en percentiles.....	27
5	Datos y métodos.....	30
5.1	Datos.....	30
5.1.1	Sistema de Pronóstico de Ensamble a Corto Plazo....	30
5.1.1.1	Resolución y dominio del modelo.....	31
5.1.1.2	Disponibilidad y acceso.....	32

5.1.2 Datos de estaciones meteorológicas.....	33
5.1.3 Datos vectoriales de vulnerabilidad.....	35
5.2 Metodología.....	40
5.2.1 Equipo utilizado.....	41
5.2.2 Extracción de variables meteorológicas.....	41
5.2.3 Cálculo de umbrales de peligro.....	43
5.2.4 Cálculo de vulnerabilidad.....	44
5.2.5 Cálculo de peligro.....	46
5.2.6 Cálculo de riesgo.....	47
5.2.7 Representación gráfica.....	48
6 Resultados.....	49
6.1 Riesgo por precipitación.....	49
21 de agosto de 2021 – Huracán “Grace”.....	49
12 de mayo de 2021 – frente frío No. 56.....	51
21 de junio de 2022 – Tormenta tropical “Celia”	53
6.2 Riesgo por temperatura alta.....	55
9 de mayo de 2022 – Cuarta ola de calor 2022.....	55
17 de abril de 2022 – Segunda ola de calor 2022.....	56
23 de abril de 2020.....	57
6.3 Riesgo por temperatura baja.....	58
14 de febrero de 2021 – Frente frío No. 35.....	58
1 de enero de 2021 – Frente frío No. 24.....	59
4 de febrero de 2022 – Frente frío No. 28.....	60
7 Discusión, conclusiones y limitaciones.....	62
7.1 Discusión.....	62
7.2 Conclusiones.....	65
7.3 Limitaciones.....	67
8 Recomendaciones.....	68
9 Referencias.....	69
Glosario.....	77
Anexos.....	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mapa de declaratorias del período 2000-2023 y gráfico de pasteles de la clasificación de las declaratorias.	9
Figura 2 Mapa de relieve del INEGI.	13
Figura 3 Mapa del clima de México.	16
Figura 4 Esquema de los dominios del modelo SREF. Con la línea punteada se delimita el dominio computacional, la línea sólida dominio de la salida y con una línea roja los subdominios.....	32
Figura 5 Estaciones climáticas convencionales seleccionadas.....	34
Figura 6 Diagrama de flujo de la metodología utilizada	41
Figura 7 Trayectoria huracán "Grace" de la fecha 13 de agosto de 2021 a 21 de agosto de 2021. ..	50
Figura 8 Comparativo del mapa de riesgo por precipitación acumulada de 24 horas (a) y del mapa de la precipitación observada (b) para el día 21 de agosto de 2021.	51
Figura 9 Comparativo del mapa de riesgo por precipitación acumulada de 24 horas (a) y del mapa de la precipitación observada (b) para el día 12 de mayo de 2021.	52
Figura 10 Trayectoria tormenta tropical "Celia" del día 16 al 28 de junio de 2022..	53
Figura 11 Comparativo del mapa de riesgo por precipitación acumulada de 24 horas (a) y del mapa de la precipitación observada (b) para el día 22 de junio de 2022.	54
Figura 12 Comparativo del mapa de riesgo por temperaturas (a) y del mapa de temperatura máxima observada (b) para el día 09 de mayo de 2022.	54
Figura 13 Comparativo del mapa de riesgo por temperaturas (a) y del mapa de temperatura máxima observada (b) para el día 17 de mayo de 2022.	54
Figura 14 Comparativo del mapa de riesgo por temperaturas (a) y del mapa de temperatura máxima observada (b) para el día 23 de abril de 2020.....	54
Figura 15 Comparativo del mapa de riesgo por temperaturas bajas (a) y del mapa de temperatura mínima observada diaria (b) para el día 14 de febrero de 2021.	54
Figura 16 Comparativo del mapa de riesgo por temperaturas bajas (a) y del mapa de temperatura mínima observada diaria (b) para el día 1 de enero de 2021.	54
Figura 17 Comparativo del mapa de riesgo por temperaturas bajas (a) y del mapa de temperatura mínima observada diaria (b) para el día 4 de febrero de 2022.	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Colores correspondientes a alertas del sistema desarrollado por inaRisk.	18
Tabla 2 Índices climáticos del HadEX2 que utilizan percentiles para su cálculo.	28
Tabla 3 Factores utilizados para el cálculo de vulnerabilidad.....	37
Tabla 4 Grado de vulnerabilidad según su valor cuantitativo.....	44
Tabla 5 Valores de los pesos usados para cálculo de vulnerabilidad.....	45
Tabla 6 Tabla de niveles de alerta de peligro y el valor asociado al mismo.....	46
Tabla 7 Grado de riesgo según su valor cuantitativo.....	47
Tabla 8 Método simplificado para cálculo de riesgo.	48

1 Introducción

Los fenómenos hidrometeorológicos severos pueden representar una amenaza significativa para la sociedad y su funcionamiento si se presentan las condiciones propicias. Estos eventos pueden generar efectos adversos generalizados en términos humanos, materiales, económicos y ambientales. La frecuencia y magnitud de estos fenómenos ha aumentado en las últimas décadas debido al cambio climático y la variabilidad climática, como así lo menciona el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el cambio climático (IPCC, 2023). Ante este escenario, es crucial contar con sistemas de alertamiento que puedan funcionar como herramienta complementaria en la prevención y mitigación de los impactos de estos fenómenos, tomando en consideración las condiciones de vulnerabilidad, peligro y climáticas específicas para cada lugar.

Los sistemas de alerta temprana son un conjunto de herramientas, procesos y mecanismos cuyo objetivo principal es proporcionar información anticipada sobre posibles riesgos y amenazas. De acuerdo con el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2022), estos sistemas incluyen cuatro componentes: la identificación de riesgos; la medición y monitoreo del fenómeno perturbador; difusión de alertas públicas con información clara y precisa; y planes de respuesta o de contingencia ante el impacto del fenómeno perturbador.

Es importante destacar que, en Europa, los sistemas de alertamiento temprana han demostrado su eficacia al salvar vidas, prevenir pérdidas económicas significativas y generar beneficios sustanciales (Hallegatte, 2012).

En México, existen diversos sistemas de alerta temprana como el Servicio Sismológico Nacional, el Sistema de Alerta Sísmica Mexicano, el Sistema de Alerta Temprana para Ciclones Tropicales, el Sistema Nacional de Alerta de Tsunamis, el Sistema de Alerta Temprana de Incendios en México y el Servicio Meteorológico Nacional. Estos sistemas cubren diferentes fenómenos, tienen diversas coberturas y momentos de aviso.

A nivel internacional, se han utilizado los sistemas de alerta temprana en diferentes lugares del mundo, como los mencionados por Intrieri et al. (2012), Rahman et al. (2012), Campino et al. (2016), Susandi et al. (2018), Ujjwal et al. (2019), Hofmann y Schüttrumpf

(2019). Estos sistemas, basados en monitoreo, modelación y caracterización de riesgos, han demostrado su eficacia en reducción de costos y preservación de vidas.

Hernández-Aguilar y López-Montejo (2020) realizaron una evaluación del uso de Atlas de Riesgo como sistema de alerta temprana. Concluyeron que, si bien los Atlas de Riesgo brindan valiosa información, es necesario llevar a cabo un monitoreo dinámico en variables como temperatura y precipitación. Además, sugieren que contar con pronósticos de 24, 48 y 72 horas ayudaría a las autoridades gubernamentales a establecer estrategias de respuesta en caso de emergencias.

En el segundo artículo de la Ley General de Protección Civil se define a los Atlas de Riesgo como un sistema integral de información sobre los agentes perturbadores y los daños esperados. Estos se obtienen mediante un análisis espacial y temporal de la interacción entre los peligros, la vulnerabilidad y el grado de exposición de los agentes afectables.

No obstante, los Atlas de Riesgo presentan ciertas problemáticas. Solo el 15% de los municipios de México cuenta con un Atlas de Riesgo elaborado y existe una falta de homologación en los conceptos y metodologías utilizadas. Además, gran parte de México carece de información confiable y actualizada para la generación y/o actualización de los Atlas de Riesgo (Academia de Ingeniería de México, 2017).

En este contexto, el presente trabajo propone una metodología para la generación de alertamientos basados en el riesgo por fenómenos hidrometeorológicos severos, considerando la vulnerabilidad del sitio y el peligro asociado a las condiciones específicas de cada lugar.

La implementación y propuesta de esta metodología busca abordar las deficiencias y debilidades actuales en el análisis, generación y publicación de alertas locales personalizadas, al considerar las complejas interacciones hidrometeorológicas y parámetros como peligro, riesgo y vulnerabilidad.

A diferencia de los Atlas de Riesgo, el uso de pronósticos dinámicos de riesgos asociados a eventos hidrometeorológicos permite un análisis continuo, actualizado y objetivo de las diferentes variables hidrometeorológicas. Esto podría permitir, implementada de forma operativa, proporcionar a las autoridades gubernamentales y a los encargados de toma de

decisiones una base sólida para establecer estrategias de respuesta efectivas en casos de emergencia. Sin embargo, es importante destacar que este trabajo no pretende ser un sistema de alerta temprana, sino que propone una metodología para la generación de alertamientos por riesgos hidrometeorológicos y no incluye ni la difusión de alertas públicas ni planes de respuesta ante los impactos provocados por estos fenómenos, como sí lo hace un sistema de alerta temprana.

La metodología se fundamenta en el uso de salidas del Sistema de Pronóstico de Ensamble a Corto Plazo (SREF, por sus siglas en inglés), datos de vulnerabilidad ambiental, social y económica, junto con registros climáticos históricos. Mediante el uso de Sistema de Información Geográfica (SIG) y el lenguaje de programación Python, se llevó a cabo el acceso, procesamiento, visualización de los datos y creación de los alertamientos. Se seleccionaron 1430 ubicaciones correspondientes a estaciones climatológicas convencionales en toda la república mexicana.

Este trabajo está estructurado de la siguiente manera: después de la introducción, en el apartado "2 Planteamiento del problema" se aborda la presentación del problema y los desastres en México, se establecen los objetivos generales y específicos, se plantea la hipótesis, se justifica la investigación y se describe la zona de estudio, incluyendo generalidades sobre su orografía, hidrografía y clima.

A continuación, en el capítulo "3 Antecedentes" se exploran los antecedentes tanto a nivel nacional como internacional. Luego, en el capítulo "4 Marco teórico" se examinan temas relevantes para la investigación, como las definiciones de vulnerabilidad, peligro y riesgo, los fenómenos hidrometeorológicos en México, los modelos numéricos de la atmósfera y el uso de umbrales basados en percentiles.

El siguiente capítulo, titulado "5 Datos y métodos", ofrece una descripción detallada de los datos utilizados en esta investigación, así como de la metodología empleada para el cálculo de los alertamientos. En el capítulo "6 Resultados", se exponen los resultados obtenidos al aplicar la metodología a tres casos de cada variable: precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima.

Posteriormente, el capítulo 7 se dedica a discutir los resultados, abordar las conclusiones obtenidas y señalar las limitaciones de la metodología empleada. A continuación, en el capítulo "8 Recomendaciones", se presentan las sugerencias derivadas de este trabajo. Finalmente, el capítulo "9 Referencias" engloba las fuentes utilizadas en el estudio.

La implementación de esta metodología en México impulsará los esfuerzos para reducir los desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos severos. Además, generará beneficios sociales al aumentar el conocimiento y los alertamientos sobre los riesgos asociados a estos fenómenos, a través de la implementación de este sistema del cual no se tienen precedentes similares en México

2 Planteamiento del problema

2.1 Presentación del problema

Debido a su ubicación geográfica y compleja orografía, la república mexicana es constantemente afectada por una gran variedad de fenómenos hidrometeorológicos que pueden provocar pérdidas tanto humanas como económicas (Cavazos, 2015). La falta de recursos económicos, materiales, y/o personal capacitado en análisis, generación y publicación de alertas locales pueden agravar la situación y contribuir en la ocurrencia de desastres asociados a estos eventos naturales.

Según el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2019), México ha experimentado importantes pérdidas humanas y consecuencias económicas y sociales debido a eventos climáticos extremos como huracanes, sequías, temperaturas extremas y lluvias torrenciales durante el periodo de 1999 a 2011. Estos desastres han puesto en peligro la vida y el bienestar de la población, así como sus posesiones, mientras que los ecosistemas y los servicios que brindan también han sufrido daños significativos.

A su vez, estas circunstancias han limitado las oportunidades de desarrollo a corto y mediano plazo en el país. También, se menciona que los efectos del cambio climático se distribuirán de manera desigual en México debido diversos factores, como la distribución climática, la disponibilidad de recursos naturales, la infraestructura, el desarrollo económico y la distribución de la población (Sosa-Rodríguez, 2015, como se citó en INECC, 2019).

Continuando con este marco del cambio climático, de acuerdo con el (IPCC, 2023), en su sexto informe menciona que el cambio climático causado por humanos ya está afectando eventos climáticos extremos a nivel mundial. Estos eventos incluyen olas de calor, precipitaciones intensas, sequías y ciclones tropicales. Estos cambios están directamente relacionados con el calentamiento global, lo cual aumenta la frecuencia e intensidad de estos fenómenos. La evidencia de la influencia humana en estos cambios se ha fortalecido desde el informe anterior. La temperatura global continuará aumentando, si no se hacen esfuerzos de reducción de gases invernaderos.

Por otro lado, los Atlas de Riesgo desempeñan un papel crucial como herramienta en la gestión y reducción del riesgo de desastres, proporcionando una visión integral de los peligros y vulnerabilidad existentes en un área específica. Los Atlas de Riesgo, según el segundo artículo de la Ley General de Protección Civil (LGPC) se definen como un sistema integral de información sobre los agentes perturbadores y los daños esperados. Obtenidos mediante un análisis espacial y temporal de la interacción entre los peligros, la vulnerabilidad y el grado de exposición de los agentes afectables. Estos permiten la identificación de zonas de mayor riesgo y las poblaciones más expuestas. Sin embargo, los Atlas de Riesgo presentan sus propias problemáticas.

La Academia de Ingeniería de México (2017) en su “Inventario de Atlas de Riesgo en México” menciona que solo el 15% (375) de los 2456 municipios de México cuenta con un Atlas de Riesgos elaborado, de estos 375 Atlas de Riesgo solo 312 cuentan con una liga Web consultable. Además, de estos atlas el 82% fue elaborado por empresas de consultoría, 8.3% no especifica quién lo elaboró, 5.8% tienen error de conexión, 2.9% lo realizaron universidades y el 0.3% lo elaboró el Servicio Geológico Mexicano.

Resumiendo, este inventario hace las siguientes conclusiones:

- Existe una falta de homologación de conceptos como peligro, amenaza, vulnerabilidad y riesgo, así como de la metodología empleada en la identificación de los fenómenos lo cual dificulta su integración, comparación y consulta.
- Existen Atlas de Riesgo con más de 10 años de elaboración, aun cuando la Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos del CENAPRED indica que se deben actualizar cada dos años.

- La mayor parte de México no cuenta con información confiable y actualizada para la generación de los Atlas de Riesgo y/o su actualización.

Para abordar estas deficiencias, debilidades y realidades, se han implementado diversas herramientas de uso libre. Entre ellas se encuentran la información satelital, las redes de monitoreo en tiempo real y los modelos numéricos regionales y globales (como ECMWF, GFS, NAM, ICON, entre otros). Asimismo, se utilizan mapas de pronóstico integrados con diversas aplicaciones, como WMO y Windy, que no solo facilitan la labor del pronosticador, sino que también acerca a la cultura meteorológica al público en general.

En relación a la elaboración de pronósticos meteorológicos, Hernández-Cruz (2020) describe diferentes metodologías utilizadas por los centros encargados de esta tarea. En términos generales, estos centros realizan un análisis de las condiciones meteorológicas, emplean información satelital y las salidas de modelos numéricos regionales y globales. Además, el pronosticador depende de sus conocimientos teóricos, su entendimiento, su experiencia personal y el uso de técnicas de diagnóstico. Para la mayoría de las instituciones consultadas por el autor, no cuentan con una metodología formal para la evaluación del pronóstico, únicamente verifican que este se cumpla.

Es necesario considerar el aumento en la frecuencia e intensidad de los diversos fenómenos hidrometeorológicos severos que se presentan en México como a nivel mundial. Ante esta realidad, es imprescindible contar con herramientas objetivas que nos permitan hacer frente a los efectos de estos eventos extremos. El cambio climático plantea desafíos significativos, y reducir sus impactos perjudiciales en la población, la economía y los ecosistemas de México es fundamental. Para lograrlo, es crucial adoptar enfoques basados en ciencia y utilizar información confiable y actualizada. Esto contribuirá a minimizar los efectos adversos en todos los ámbitos.

A pesar de la disponibilidad actual de múltiples herramientas e información especializada de acceso público, las labores operativas de monitoreo y análisis de peligros y riesgos aún dependen en gran medida de un enfoque manual, lo cual puede tener un componente subjetivo debido a la influencia de las experiencias personales en la generación de pronósticos. Por lo tanto, considerando todo lo anterior, resulta prioritario aprovechar e integrar los sistemas de información disponibles para desarrollar productos operacionales

objetivos que generen alertas ante peligros hidrometeorológicos. La implementación de una metodología integral para la generación de alertas, que tome en cuenta las condiciones específicas de cada municipio, contribuirá a los esfuerzos para reducir los efectos adversos ambientales, humanos y económicos asociados a estos eventos.

2.1.1 Desastres en México

De acuerdo con el IPCC (2022), un desastre se refiere a trastornos graves en el funcionamiento normal de una comunidad o sociedad debido a la interacción de fenómenos físicos peligrosos con condiciones sociales vulnerables. Estos trastornos pueden tener efectos humanos, materiales, económicos o ambientales adversos generalizados, que requieren una respuesta de emergencia inmediata para satisfacer las necesidades humanas esenciales.

Durante los últimos 40 años, ha habido un aumento cuádruple en la frecuencia anual promedio de las catástrofes (OECD, 2013). Las crisis económicas, el aumento de población y su asentamiento en zonas de peligro dificultan la tarea de reaccionar ante estos eventos. El Sistema de Protección Civil es la institución oficial en México encargada de actuar en situaciones de desastre, apoyado por distintas instituciones, como el Servicio Meteorológico Nacional, que emite avisos si prevé algún evento. A pesar de esto, en México es un campo muy poco desarrollado con mucho potencial para mejorar.

Al igual que la tendencia global, la proporción del crecimiento urbano en México asociada a asentamientos informales en las grandes ciudades, en zonas costeras, cañones, laderas y riveras, ha aumentado la vulnerabilidad social a los riesgos naturales (OECD, 2013). Estos asentamientos se generan en zonas propensas a inundaciones o deslaves y sin las medidas de seguridad en la construcción necesarias, lo que aumenta la vulnerabilidad y, en consecuencia, el riesgo de esta población. Las personas se mudan a zonas urbanas por la necesidad de mejores oportunidades, no solo los mismos mexicanos desplazándose desde los pueblos a las zonas urbanizadas, también inmigrantes centroamericanos.

Debido a su extensión territorial, el territorio mexicano es vulnerable a los ciclones tropicales que ingresan por ambos flancos, tanto del Pacífico, como del Atlántico (CONAGUA, 2018). Las consecuencias incluyen la producción de mareas altas, inundaciones y daños provocados

por los vientos. Debido a la amplitud del fenómeno, los daños pueden extenderse a lo largo de miles de kilómetros.

Las lluvias asociadas a ciclones tropicales o frentes fríos que afectan anualmente a nuestro país generan grandes daños. Las características meteorológicas y topográficas del país son especialmente apropiadas para generar inundaciones (OCDE, 2013). Las inundaciones pueden ser de origen pluvial o fluvial.

Según Alcántara-Ayala (2019), la base de datos EM-DAT registró un total de 231 desastres en el período de 1900 a 2018. De estos desastres, 174 ($\approx 75.3\%$) estuvieron relacionados con eventos hidrometeorológicos, de los cuales 105 (45.5%) correspondieron a eventos asociados con tormentas y 69 (29.8%) eventos por inundaciones. El resto de los desastres fueron provocados por sismos, por procesos de remoción en masas y actividad volcánica.

En cuanto a los desastres asociados a eventos hidrometeorológicos, se registraron 5,522 muertes asociadas a tormentas y 4,346 muertes relacionadas con inundaciones. Además, se registraron 8,615,276 personas fueron afectadas por efectos asociados a las tormentas, mientras que 4,884,448 sufrieron los impactos de las inundaciones.

El CENAPRED (2018) cuenta una base de datos sobre declaratorias de emergencias, desastres y contingencias climatológicas, estas son obtenidas del Diario Oficial de la Federación el cual es el periódico oficial del Gobierno Federal.

La declaratoria de emergencia es el proceso en el cual la secretaría reconoce que uno o varios municipios o delegaciones de una o más entidades federativas están enfrentando una situación anormal causada por un fenómeno natural perturbador, descrito en el artículo 59 de la LGPC. En contraste, la declaratoria de desastre es el procedimiento mediante el cual la Secretaría de Gobernación reconoce la existencia de un fenómeno natural perturbador severo en ciertos municipios o delegaciones de una o más entidades federativas, descrito en el artículo 60 de la LGPC. Los daños causados por este fenómeno superan la capacidad financiera y operativa local para hacerle frente. Como resultado de esta declaración, se pueden acceder a recursos del Fondo de Desastres Naturales, un instrumento financiero destinado a la atención de desastres naturales.

El Fondo de Desastres Naturales (FONDEN) era un instrumento financiero que mediante el cual dentro del Sistema Nacional de Protección Civil tenía como finalidad apoyar a las entidades federativas de la república mexicana en la atención y recuperación de los efectos que produzca un fenómeno natural (Secretaría de Gobernación, 2016). En los años 2004 y 2012, el 98% de los recursos asignados por el FONDEN se destinaron a enfrentar los impactos causados por fenómenos hidrometeorológicos en México, destinando una cantidad mayor a los 89 mil millones de pesos mexicanos (Aragón-Durand, 2012). No obstante, el 27 de junio de 2021, la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP) anunció la derogación del FONDEN, lo que implica su eliminación y extinción de manera oficial (Hernández, 2021).

En la Figura 1 se puede apreciar un mapa con el número de declaratorias de tipo desastre, emergencia o contingencia climatológica. Además, se presenta un gráfico de pasteles que revela que el 91.86% de los desastres se deben a fenómenos hidrometeorológicos. También, se observa el período comprendido entre 2000 y 2023, el estado de Veracruz registra la mayor cantidad de declaratorias, con un total de 370. En segundo lugar, se encuentra Oaxaca con 219 declaratorias, y en tercero Chiapas, con 190 declaratorias.

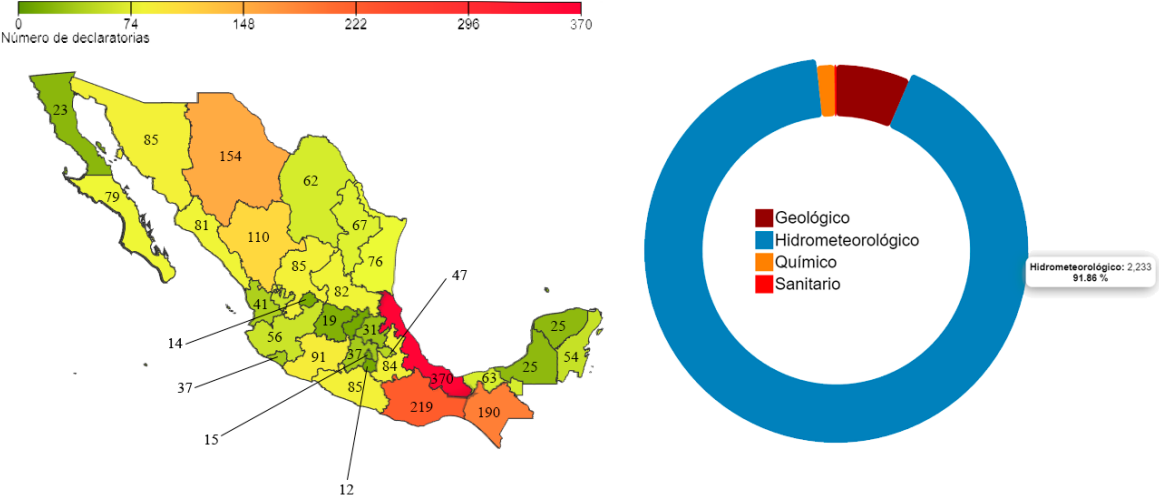


Figura 1 Mapa de declaratorias del período 2000-2023 y gráfico de pasteles de la clasificación de las declaratorias. Adaptación de CENAPRED (2018)

De las declaratorias provocadas por fenómenos hidrometeorológicos, las lluvias son el fenómeno más recurrente, representando un porcentaje significativamente alto (34.04%). Además, heladas, ciclones tropicales, granizadas y nevadas también tienen una relevancia

significativa, cada uno con porcentajes cercanos (alrededor del 10%). Aunque las temperaturas extremas, tanto bajas como altas, representan porcentajes más bajos (1.65% y 1.43%, respectivamente), su impacto en la salud humana y los ecosistemas puede ser relevante. Otros fenómenos hidrometeorológicos, como fuertes vientos, tornados y tormentas severas, también causan declaratorias, aunque su porcentaje es muy bajo (CENAPRED, 2018).

Las sequías son un fenómeno multifactorial que afecta principalmente a la zona norte y centro del país. Sus efectos pueden tener consecuencias negativas sobre la población, su calidad de vida y la actividad económica general, aunque estos últimos pueden no ser inmediatos. Los efectos atribuidos a las sequías incluyen la pérdida forestal, el incremento en la frecuencia de incendios y la vulnerabilidad a pestes o enfermedades. Estos mismos efectos pueden provocar la intensificación de futuros ciclos de sequía. Las principales afectaciones económicas se dan en el ámbito agropecuario; sin embargo, el agua es vital para otros sectores como las manufacturas (Banco de México, 2022). En el año 2019, a través de seguros agrícolas catastróficos, se entregaron más de 536 millones de pesos por afectaciones de sequía en México (SADER, 2019, como se citó en Salas-Martínez et al., 2021).

Por otra parte, las heladas tienen sus principales efectos en la agricultura. Durante el período de 2010 a 2012, en Sonora y Sinaloa se presentaron grandes daños causados por heladas. Estos fenómenos provocan enormes pérdidas para la producción de alimentos en el país, llegando hasta 647 millones de pesos en el año 2010. También pueden generar problemas de salud, especialmente para la población susceptible, entre finales del 2011 y principios de 2012 se registraron 44 muertes asociadas a este fenómeno (Cavazos, 2015).

2.2 Objetivo general

Generar una metodología para el alertamiento por riesgos hidrometeorológicos en la república mexicana, que considere la vulnerabilidad del lugar y el peligro por precipitaciones y temperaturas anómalas.

2.3 Objetivos específicos

- Integrar una fuente de información que incluya datos de vulnerabilidad, observaciones meteorológicas y resultados de simulaciones de modelos numéricos.

- Establecer un procedimiento sistemático para la obtención de peligro, vulnerabilidad y riesgo, basados en el análisis de la información integrada.
- Desarrollar un esquema de análisis de alertamiento para el período de estudio (2020-2022).
- Evaluar el desempeño de los alertamientos por riesgos hidrometeorológicos mediante pruebas en casos seleccionados.

2.4 Hipótesis

El uso de resultados de modelos numéricos de la atmósfera en conjunto con datos de vulnerabilidad y peligro pueden ser empleados para la generación de alertamientos por riesgos hidrometeorológicos en la república mexicana.

2.5 Justificación

Una alternativa para abordar las deficiencias y debilidades previamente presentadas, es el uso de recursos libres para la generación y análisis meteorológico como pronósticos sintéticos, datos satelitales, observaciones, modelación numérica de la atmósfera, entre otros, los cuales pueden brindar información importante respecto a las condiciones meteorológicas en el presente y futuro cercano, pero no del riesgo particular al que están expuesto por la ocurrencia de los eventos pronosticados.

La propuesta de un análisis integrado considera que cada lugar en particular cuenta con diferente vulnerabilidad y riesgo, por lo que sería posible generar alertas ante eventos hidrometeorológicos peligrosos para la población previniendo y disminuyendo la afectación por posibles daños.

Debido a lo anterior, es imperante la necesidad de generar productos nacionales que consideren las complejas interacciones hidrometeorológicas y parámetros como peligro, exposición, riesgo y vulnerabilidad, los cuales se encuentran en constante cambio debido a la variabilidad y cambio climático.

En Europa, los sistemas de información hidrometeorológica y sistemas de alerta temprana salvan cientos de vidas por año, previenen entre 460 millones y 2.7 miles de millones de euros en pérdidas por desastres y producen beneficios de entre 3.4 y 34 miles de millones

euros por año (Hallegatte, 2012). La implementación en México de la metodología desarrollada en este trabajo contribuirá en el esfuerzo de reducir la ocurrencia de desastres generados por fenómenos hidrometeorológicos severos, además de generar un aporte social sobre el conocimiento y alertamiento de riesgo asociado a estos fenómenos hidrometeorológicos a través de la implementación de sistema del cual no se tienen antecedentes similares en la república mexicana.

2.6 Zona de estudio: México

La república mexicana tiene una superficie de 1,964,375 km² está ubicado en la porción del sur de América del Norte y colinda al norte con Estados Unidos y al sureste con Belice y Guatemala. Con su gran extensión territorial, México es el décimo cuarto país más grande a nivel mundial. Este hecho, aunado a su ubicación geográfica provoca que México se vea expuesto a una amplia gama de eventos hidrometeorológicos (Cavazos, 2015).

De acuerdo con el Censo de Población y Vivienda 2020 su población es de más de 126 millones de habitantes, lo que lo ubica en el décimo lugar en cuanto a países con mayor población (INEGI, 2020). Cerca del 90% de la población mexicana se encuentra en situación de riesgo por diversos tipos de fenómenos naturales, y ésta no es necesariamente proporcional con la intensidad de los fenómenos en sí, sino más bien con las condiciones de vulnerabilidad de la población que podrían resultar afectadas (Zitácuaro-Contreras et al., 2011)

2.6.1 Orografía

La comprensión de la orografía es fundamental para conocer el comportamiento del clima y de los fenómenos hidrometeorológicos que pueden llegar a afectar a México, así como también juega un papel muy importante en aspecto como la agricultura, la biodiversidad, y la distribución de la población. En esta sección, se explorará la orografía de la zona de estudio con el objetivo de obtener un conocimiento general de la región. La orografía de México es muy variada y compleja, con la presencia de diversas cadenas montañosas, mesetas, llanuras, valles y costas a lo largo de todo el territorio (Coll-Hurtado, 2007) como se puede observar en la Figura 2.

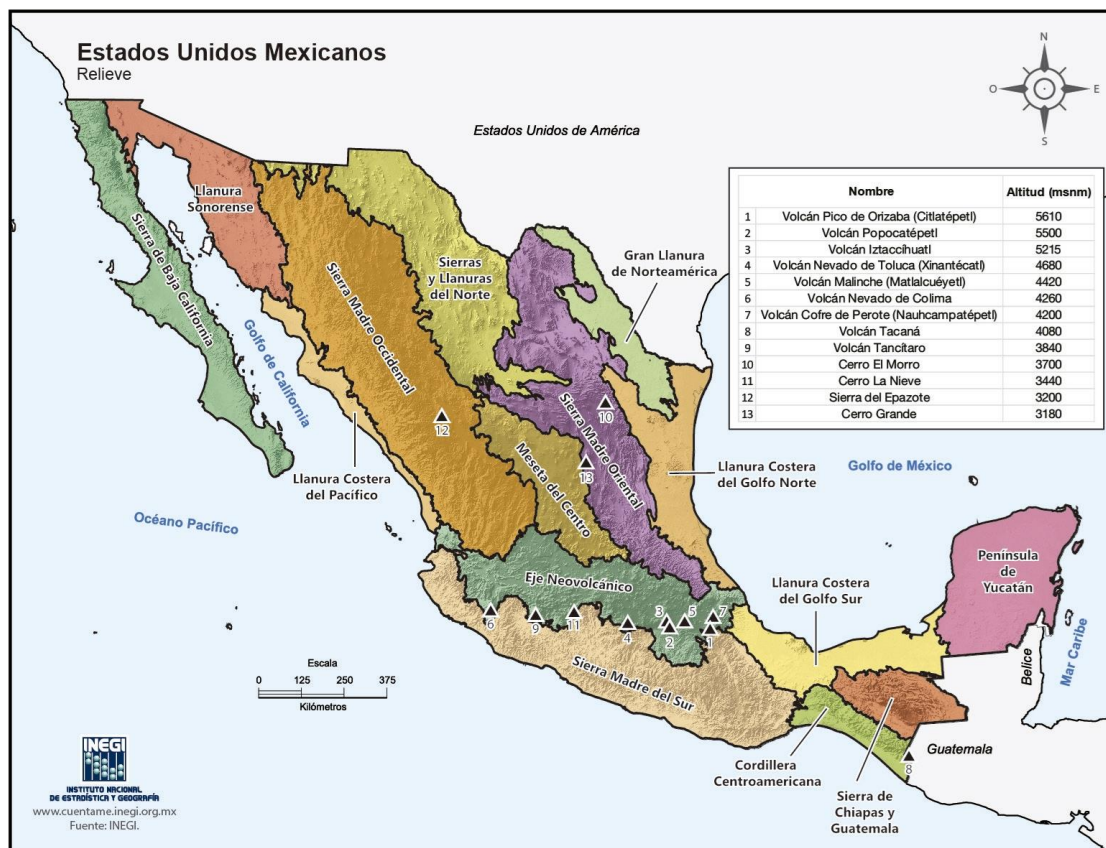


Figura 2 Mapa de relieve del INEGI. Tomado de https://cuentame.inegi.org.mx/mapas/pdf/nacional/relieve/nalrel_col_n.pdf

La principal cadena montañosa de México es la Sierra Madre, que se divide en dos ramas principales: la Sierra Madre Occidental y la Sierra Madre Oriental. La primera recorre la costa del Pacífico y cuenta con picos que superan los 3,000 metros de altura, como lo son el nevado de Colima y el Volcán de Colima. Mientras que la Sierra Madre Oriental se extiende

desde la frontera con Estados Unidos hasta el centro del país, y también cuenta con altas cumbres, como el Pico de Orizaba, el volcán más alto de México.

La Sierra Madre en conjunto con otras cadenas montañosas importantes como la Sierra Nevada, la Sierra de Guadalupe, y la Sierra de Chiapas, conforman una compleja red de montañas, cañones y barrancas que definen gran parte del paisaje mexicano.

Otra característica importante en la orografía de México son las mesetas. La meseta central es la más grande y poblada del país y se encuentra entre las sierras Madre Oriental y Occidental. La meseta de Chiapas, es otra meseta importante que se encuentra en el sureste de México.

En cuanto a las costas, México cuenta con un extenso litoral en la costa del pacífico que se extiende por 7,828 km, mientras que el Golfo de México y Mar de Caribe tiene 3,294 km de longitud.

2.6.2 Hidrografía

Históricamente, los asentamientos humanos se han creado cerca de cuerpos de agua, debido a la importancia que tiene para nuestra vida diaria. Sin embargo, la presencia de estos puede llegar a ser perjudicial en ciertas condiciones, como ocurre en el caso de inundaciones. De acuerdo con el CENAPRED (2019), la creciente densificación poblacional ha provocado asentamientos irregulares en sitios demasiado expuestos a posibles inundaciones lentas o súbitas que generan afectaciones en bienes, salud e incluso pérdidas de vidas.

La hidrografía de México es muy diversa y está influenciada por la geografía del país. Cuenta con tres grandes vertientes hidrográficas: la vertiente del Océano Atlántico, la vertiente del Océano Pacífico y la vertiente interior (Coll-Hurtado, 2007).

La vertiente del Océano Atlántico incluye aquellos ríos que terminan o desembocan en el Golfo de México y en el Mar de las Antillas. La mayoría de estos ríos tienen cursos altos de fuertes pendientes y cursos medios y bajos con pendiente suave. El clima en esta vertiente es generalmente húmedo, por lo que las corrientes suelen ser de carácter permanente. Algunos ríos destacables son el río Grijalva y el río Usumacinta que fluyen a través de los estados de Chiapas y Tabasco; el río Papaloapan que recorre los estados de Oaxaca y Veracruz; el río Coatzacoalcos ubicado en el estado de Veracruz; el río Pánuco, que atraviesa los estados de

San Luis Potosí, Tamaulipas y Veracruz; el río Tonalá, que fluye en el estado de Chiapas; el río Tecolutla, situado en el estado de Veracruz; y el río Bravo que forma parte de la frontera entre México y Estados Unidos, atravesando los estados de Chihuahua, Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas.

La vertiente del Océano Pacífico está constituida por las corrientes que desembocan en el Océano Pacífico. Los ríos suelen ser de cursos cortos y de tipo torrencial debido a que la mayoría de las sierras se acercan al mar, exceptuando aquellos de la parte norte y algunos que se originan muy adentro del continente. El carácter de los ríos depende del clima de las regiones por donde fluyen, Los ríos del norte de la costa del Océano Pacífico y los de la península de Baja California son intermitentes, mientras que los de la zona central y sur de la vertiente son generalmente permanentes. Algunos ríos importantes de esta vertiente son el río Balsas, que fluye a través de los estados de Guerrero, Michoacán y Estado de México; el río Santiago, ubicado principalmente en el estado de Jalisco; el río Verde, que atraviesa los estados de San Luis Potosí y Querétaro; el río Ometepec, situado en el estado de Guerrero; y el río Fuerte, que recorre el estado de Sinaloa.

En cuanto a la vertiente interior, lo conforman aquellos ríos que no tienen salida al mar. Existen dos tipos de cuencas: las cuencas endorreicas que tienen un drenaje establecido y descargan en un lago, y las cuencas arreicas, que no tienen ríos definidos. De esta vertiente se pueden destacar el río Lerma, que fluye por el estado de México, Michoacán y Guanajuato; el río Nazas, ubicado en los estados de Durango y Coahuila; y el río Aguanaval, que se encuentra en el estado de Zacatecas.

México también alberga una cantidad importante de lagos y lagunas, el más importante del país es el Lago de Chapala que tiene una profundidad media de 10 m, tiene dos islas en su interior y se encuentra en los estados de Jalisco y Michoacán. Otros importantes son el lago de Cuitzeo y el lago de Pátzcuaro, ubicados en el estado de Michoacán; el lago de Yuriria, situado en el estado de Guanajuato; la laguna de Catemaco, ubicado en el estado de Veracruz; el lago Nabor Carrillo, ubicado en el Estado de México; y el lago Tequequitengo, que está en el estado de Morelos.

2.6.3 Clima

El clima en México está determinado por la altitud, latitud y distribución de tierra y agua, entre otros factores. En 1988, la geógrafa Enriqueta García (García, 1988) realizó una adaptación de la clasificación climática de Köppen para México, tomando en cuenta factores geográficos y climáticos específicos del país, la cual se puede apreciar en la Figura 3. Esta adaptación clasifica el clima de México en cálido, templado y frío según su temperatura, y en húmedo, subhúmedo y seco según la humedad.

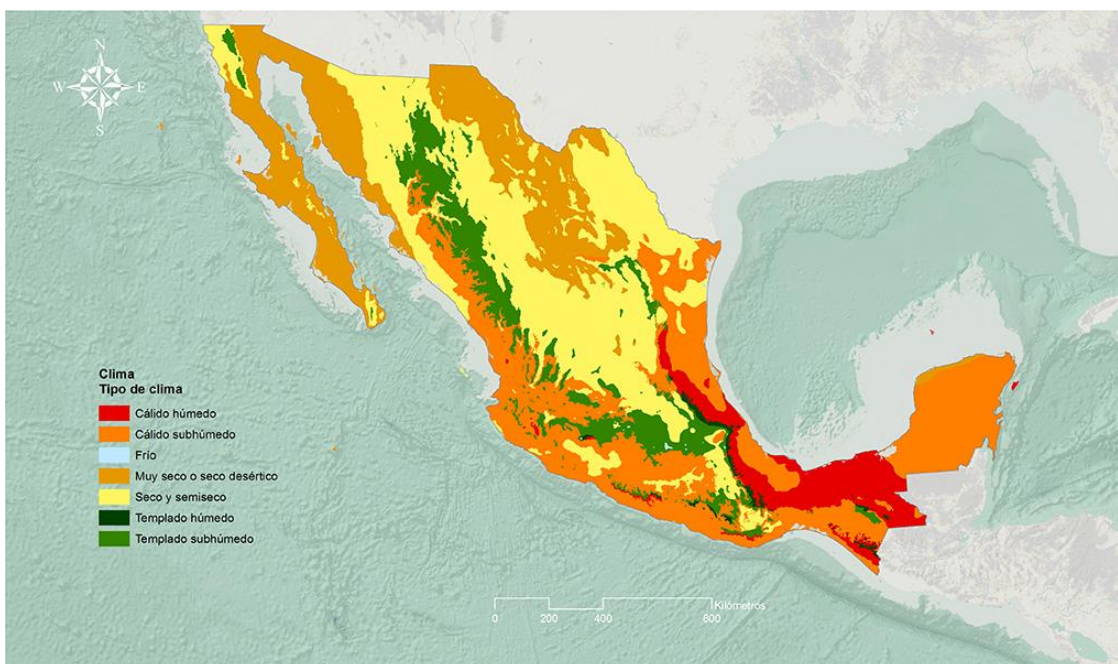


Figura 3 Mapa del clima de México. Tomada de http://gisviewer.semarnat.gob.mx/aplicaciones/Atlas2015/atm_climas.html

Los climas secos y semisecos presentan precipitaciones medias anuales de entre 300 a 600 mm. La variante caliente tiene una temperatura media anual superior a 18°C, mientras que la variante fría tiene una temperatura media anual menor a esta temperatura.

El clima muy seco tiene temperaturas en promedio de 18 a 22° C, y una precipitación anual de 100 a 300 mm en promedio. Al igual que el clima seco, tiene una variante caliente y fría.

El clima cálido húmedo posee una precipitación anual de entre 2000 a 4000 mm, mientras que el clima subhúmedo varía entre 1000 a 2000 mm. La temperatura promedio de ambos varía entre 22 y 26° C.

El clima templado registra una temperatura media anual superior a 12 °C, y una precipitación que varía entre 600 a 1500 mm anuales.

El clima frío cubre cerca del 0.05% de la superficie del país y se encuentra en las zonas de mayor elevación. La temperatura varía entre -2 a 5°C.

3 Antecedentes

3.1 Antecedentes internacionales

Intrieri et al. (2012) describieron un sistema de alerta temprana para deslizamientos de rocas el cual consistía en el uso de conocimiento geológico, donde destaca el uso de escenarios de riesgo, la caracterización de los deslizamientos, así como la instalación de un sistema de monitoreo.

Rahman et al. (2012) propusieron un sistema de alerta temprana de desastres y evacuación basado en la localización. Se usó un algoritmo, el cual tiene la particularidad de determinar la probable área de desastre.

Cama-Pinto et al. (2016) muestran el diseño de una red de sensores inalámbricos en Colombia que consiste en 6 nodos que miden temperatura, humedad y presión atmosférica, y gracias a esto, un sistema informático determina el potencial de formación de celdas que provocan lluvias intensas. Las alertas se transmiten por medio de una página de internet y una aplicación móvil para mayor comodidad de los usuarios.

Fue desarrollado por Susandi et al. (2018) un sistema de alerta temprana que funciona utilizando monitoreo de peligro de riesgo y modelación atmosférica con predicción a 3 días. Al hacer una superposición dinámica de los índices de peligro proporcionados por el inARISK con el pronóstico numérico de 3 días mediante el modelo numérico atmosférico WRF se realizan predicciones del potencial de peligro hidrometeorológico. La sobreposición del índice se realiza mediante el procesamiento con SIG. Entre las alertas que puede generar, se incluyen: por inundación, deslizamientos de tierra, lluvias intensas, vientos intensos y olas extremas. Las alertas se dan mediante un código de colores y un estatus, como se puede apreciar en la Tabla 1.

Tabla 1 Colores correspondientes a alertas del sistema desarrollado por inaRisk.

Alerta	Sin alerta	Aviso	Vigilar	Peligro
Color	Verde	Amarillo	Naranja	Rojo

Hofmann y Schüttrumpf (2019) presentaron un principio y fundamentos de un sistema de alerta temprana basada en riesgo que, a la vez, es un componente integral de un sistema multifuncional de información de inundaciones pluviales (MPFIS).

En este artículo también se menciona que, a pesar de la existencia de sistemas para analizar los peligros y determinar el riesgo de eventos pluviales (que se podrían extender a otros tipos de desastres provocados por fenómenos hidrometeorológicos), ninguno de los sistemas actuales tiene en cuenta la vulnerabilidad de la infraestructura crítica. Este estudio se basa en un caso de estudio de la ciudad alemana de Aachen.

Ujjwal et al. (2019) propusieron un sistema computacional en la nube para ofrecer la funcionalidad de modelos de peligro. Además, usó un sistema de predicción inmediata a corto plazo y un pronóstico de lluvia basado en radar, un modelo hidronumérico y un modelo SIG para identificar y clasificar las áreas particularmente vulnerables (y así estimar el valor de los daños).

Concretamente, en este trabajo (Ujjwal, 2019), para desarrollar el sistema de alerta temprana utilizan dos métodos: en el primero, el método de interpolación de escenarios trabaja con escenarios pre-simulados y emite una advertencia comparando escenarios de patrones de lluvia y pronóstico de la misma. Por otro lado, el método de simulación en tiempo real trabaja con simulaciones en vivo basadas en los patrones de lluvia pronosticados. El principal uso del modelo SIG en este sistema es la documentación histórica de eventos de inundación pluvial, así como la realización de análisis de riesgo, incluyendo el análisis de potencial de daño y la evaluación del riesgo.

Cervantes-Camac (2022) muestra el desarrollo de un sistema de alerta temprana (Espinoza-Silvestre, 2020) con el cual funciona en conjunto con el CENEPRED en Perú que tiene diferentes etapas en las cuales se toman en cuenta escenarios de riesgo (CENEPRED, 2015).

En la mayoría de casos y como lo demuestra Hallegatte (2012), estos sistemas de alerta temprana contribuyen a la preservación de un número significativo de vidas por año, al igual que disminuir los costos por daños causados como consecuencia de una mala planeación y preparación ante fenómenos naturales.

3.2 Antecedentes nacionales

Debido a las necesidades surgidas a partir del intenso sismo de 1985 en México se formó el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) que tiene la responsabilidad en apoyar al Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC) en los requerimientos técnicos que su operación demanda.

El CENAPRED coordina un sistema de alerta temprana mediante la identificación de riesgos, su monitoreo, difusión en caso de ser necesario y ofrecen un plan de respuesta para su pronta solución.

Dentro de los sistemas de alerta que se encuentran activos en México podemos mencionar a: el Sistema de Alerta Sísmica Mexicano (SASMEX) nacido el año 1991 que puede dar avisos segundos previos al arribo de un sismo que ya ocurrió; el sistema de monitoreo del Volcán Popocatepetl también tiene un sistema de monitoreo, el cual inició acciones en 1994 e informa sobre la actividad el volcán; el Sistema de Alerta Temprana para Ciclones Tropicales (SIAT-CT); el Sistema de Alerta de Tsunamis con cobertura en la costa del Pacífico Mexicano; el Sistema de Alerta Temprana de incendios en México; el Servicio meteorológico Nacional genera avisos en casos de que ocurra un evento meteorológico severo o se realice el pronóstico de alguno (CENAPRED, 2022).

Prieto González et al. (2008) desarrollaron una metodología para la creación e implementación de un Sistema de Alerta Temprana para frentes fríos y nortes. De manera similar, en este trabajo se busca utilizar soluciones de modelación numérica para la generación automatizada de avisos.

Por su parte, Llanos-Rodríguez (2020) presentó un sistema de alerta temprana multi-riesgo de la ciudad de México donde se elabora un informe meteorológico dos veces al día, así como la generación de boletines especiales en caso de eventos extraordinarios. En él se clasifican

niveles de alerta por fenómenos meteorológicos basados en las condiciones promedio de la ciudad de México y los efectos perturbadores que podrían ocasionar los hidrometeoros.

Hace mención también de que, en la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastre de Naciones Unidas (EIRD, 2006, como se citó en, Llanos-Rodríguez, 2020), dice que un sistema completo y eficaz de alerta temprana lo comprenden cuatro elementos: conocimiento de los riesgos, servicio de seguimiento y alerta, difusión y comunicación y capacidad de respuesta. Que en otras palabras quiere decir que requiere de comunicación efectiva entre los diferentes elementos que componen el sistema que es la Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil de Ciudad de México, así como de la población generando informes y divulgación.

Hernández-Aguilar y López-Montejo (2020) hacen una evaluación del uso de Atlas de Riesgo como sistemas de alerta temprana, y de cómo estos sistemas son elementos primordiales para la gestión del riesgo de desastres y de monitoreo de amenazas. También, se menciona que el uso de los Atlas de Riesgo como sistemas de alerta temprana aporta valiosa información pero que requiere de un monitoreo dinámico, debido a que existen variables como la temperatura y precipitación que, con pronóstico de 24, 48 y 72 horas ayudaría a las autoridades gubernamentales a establecer estrategias para responder en caso de alguna emergencia, por lo que son instrumentos de carácter más informativo que regulador.

En general, los sistemas de alerta temprana son una herramienta que cada día toma más fuerza alrededor del mundo. Las ciudades y países que los han implementado, han demostrado que son de gran utilidad para la toma de decisiones a la hora de enfrentarse a fenómenos meteorológicos y peligros en general que perturben las condiciones normales en esos lugares.

Es importante tener en cuenta que la metodología desarrollada para la generación de alertamientos en este trabajo no debe considerarse como un sistema de alerta temprana. Sin embargo, puede utilizarse como referencia, ya que comprender las capacidades de los sistemas de alerta temprana resulta valioso para el desarrollo del mismo. En última instancia, los resultados obtenidos mediante la metodología descrita en este trabajo podrían influir en el diseño o establecimiento de un sistema de alerta temprana.

4 Marco teórico

4.1 Definición de vulnerabilidad, peligro y riesgo

En este apartado, se procederá de manera general e introductoria a definir conceptos que son de suma importancia, con el fin de aclarar el uso y la definición que se utilizará a lo largo de esta investigación para los términos de peligro, vulnerabilidad y riesgo.

Las definiciones de estos conceptos dependen en gran medida del campo en el que se utilicen, así como de la finalidad para lo cual se requieran hacer uso de estos. Castellano-Bahena (2021) hace una revisión de diferentes conceptos y definiciones sobre riesgo y vulnerabilidad, y menciona que de manera general diversos autores toman el concepto de la vulnerabilidad como una condición de fragilidad o debilidad de un sistema ante algún tipo de amenaza, el concepto posee un carácter multifacético y multidimensional, y está vinculado a un peligro específico.

En cuanto a la definición de riesgo, en el desarrollo de su tesis, Castellano-Bahena (2021) aborda las definiciones usadas por la Organización de las Naciones Unidas para el Socorro en Desastres (UNDRO, 1979, como se citó en Castellano-Bahena, 2021), la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR, 2009, como se citó en Castellano-Bahena, 2021) y del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2014). Identificando que frecuentemente el riesgo se representa como el resultado de multiplicar la probabilidad de acaecimiento de sucesos o tendencias peligrosas por los impactos que se generarían en caso de que dichos eventos o tendencias se materialicen.

Coincidiendo con sus hallazgos, la autora menciona que a pesar de la cantidad enorme de conceptos y métodos utilizados para definir tanto riesgo como vulnerabilidad, ninguno de ellos es aplicable a todos los casos debido a que estos requieren un contexto específico y la elección del más apto dependerá enteramente del enfoque adoptado, la información disponible y el objetivo a evaluar (Castellano-Bahena, 2021).

Las definiciones usadas por el IPCC (IPCC, 2020; IPCC, 2022) para exposición, peligro, vulnerabilidad y riesgo en el Informe Especial sobre el Cambio Climático y la Tierra, y aquellas utilizados en el Sexto Informe de Evaluación, son las siguientes:

Exposición: Se refiere a la presencia de personas, medios de subsistencia, servicios y recursos ambientales, infraestructura, o activos económicos, sociales o culturales en lugares que podrían verse afectados negativamente.

Peligro: Se refiere a la probabilidad de que ocurra una tendencia o evento físico, ya sea natural o provocada por el ser humano, que pueda resultar en pérdidas de vidas, lesiones u otros efectos negativos en la salud, así como daños y pérdidas en propiedades, infraestructuras, medios de subsistencia, servicios, ecosistemas y recursos ambientales.

Riesgo: Se refiere a la probabilidad de que una comunidad o sociedad experimente una alteración en su funcionamiento normal debido a la interacción de fenómenos físicos peligrosos y que existan condiciones sociales vulnerables, lo que puede resultar en efectos adversos generalizados en términos humanos, materiales, económicos o ambientales que requieren una respuesta de emergencia inmediata para satisfacer las necesidades humanas esenciales.

Vulnerabilidad: Se refiere a la propensión o predisposición a verse afectado negativamente. También, abarca varios conceptos y elementos, dentro de los cuales se incluyen la sensibilidad o susceptibilidad al daño y falta de capacidad para hacer frente y adaptarse.

Dentro de estas nuevas definiciones en el contexto del cambio climático, el riesgo resulta de la interacción dinámica entre los peligros relacionados con el clima, la exposición y la vulnerabilidad de los sistemas humanos o ecológicos ante dichos peligros. Mientras que los peligros, la exposición y la vulnerabilidad pueden presentar cambios con el tiempo y el espacio (IPCC, 2020).

Para el desarrollo de esta investigación, como se menciona en el título de la misma, se aborda los riesgos asociados a los fenómenos hidrometeorológicos severos. Sin embargo, debido a la complejidad de su estudio e identificación, se medirá únicamente la ocurrencia de estos fenómenos mediante las variables meteorológicas asociadas al mismo evento. Por lo cual, es requerido una definición adecuada para peligro, riesgo y vulnerabilidad, que se adapte al contexto de fenómenos hidrometeorológicos, la cual tenga un contexto internacional, por lo cual se basará de las definiciones dadas por el IPCC (IPCC, 2022):

$$\text{Riesgo} = \text{Vulnerabilidad} \times \text{Peligro}$$

Tomando el riesgo con esta ecuación, se define como la probabilidad de que una comunidad experimente una alteración en su funcionamiento normal debido a la interacción de fenómenos físicos peligrosos, en este caso, fenómenos hidrometeorológicos, que puede resultar en efectos adversos generalizados en términos humanos, materiales, económicos o ambientales. El riesgo es el producto de la interacción entre la vulnerabilidad y el peligro.

La vulnerabilidad se refiere a la predisposición de verse afectado negativamente. En este concepto, se incluyen varios aspectos, como la sensibilidad, falta de capacidad para hacer frente y adaptarse, así como la exposición ante cambios y fluctuaciones climáticas que impactan a un sistema en particular.

El peligro se refiere a la probabilidad de que ocurra una tendencia o evento físico que puede resultar en pérdidas de vidas, lesiones u otros efectos negativos en la salud, así como daños y pérdidas en propiedades, infraestructuras, medios de subsistencia, servicios, ecosistemas y recursos ambientales.

Existen muchas situaciones que pueden representar una amenaza y esta, bajo ciertas condiciones, puede resultar en un desastre. La gravedad de las consecuencias por la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos no depende únicamente de la intensidad del mismo, factores como la exposición y vulnerabilidad también tienen un importante papel en los efectos del fenómeno.

4.2 Fenómenos hidrometeorológicos de México

México, como país ubicado en una región geográficamente diversa, se caracteriza por experimentar una amplia gama de fenómenos hidrometeorológicos. Estos eventos naturales, que incluyen lluvias intensas, tormentas tropicales, huracanes, entre otros, tienen un impacto significativo en el territorio mexicano y en la vida de sus habitantes. La interacción de diversos factores geográficos, como la ubicación geográfica, la topografía, la corriente oceánica y la presencia de montañas y zonas costeras, contribuye a la formación y el desarrollo de estos fenómenos. Esta complejidad hidrometeorológica representa un desafío para la gestión del riesgo y la adopción de medidas de prevención y mitigación, lo que hace imperativo comprender y estudiar de manera rigurosa estos fenómenos con el fin de proteger y salvaguardar la vida y los recursos de la población mexicana.

4.2.1 Frentes fríos

Un frente frío es una zona de discontinuidad entre dos masas de aire de distintas características, las cuales pueden ser: cálidas y húmedas provenientes del océano, y otra fría y seca proveniente de latitudes medias o altas. Estos ocasionan a su paso inestabilidad convectiva, desarrollo de sistemas nubosos, disminución de temperaturas y eventos de norte. Tienen su ocurrencia durante los meses de invierno, otoño y primavera. Las precipitaciones asociadas pueden ser en forma de lluvias ligeras, intensas o incluso (en regiones de gran altitud) nevadas.

Los frentes, se pueden asociar con nublados en las cimas de las sierras que están de cara al Golfo; mientras que, sólo ocasionalmente surten efectos en el altiplano o al occidente de la cordillera de la Sierra Madre. Pero cuando están asociadas al paso de vaguadas polares, el enfriamiento abarca al altiplano (Ruiz-Barradas et al., 2010).

De acuerdo con el CENAPRED (2018), dentro del período 2000-2023 se emitieron 443 declaratorias de emergencia y diez declaratorias de desastre asociado al paso de frentes fríos de los cuales los principales efectos notables fueron 407 declaratorias por temperaturas bajas, 29 por lluvias y 17 por inundaciones asociadas al paso de estos fenómenos hidrometeorológicos, en diferentes municipios de México.

4.2.2 Ondas del este

Durante el verano, el aire tropical proveniente de los vientos alisios provoca lluvias orográficas. Las ondas del este sirven como precursores de ciclones tropicales, son perturbaciones en la corriente de los vientos Alisios que se desplazan sobre el Océano Atlántico desde las costas de África. Su interacción con la Sierra Madre Oriental genera desarrollo de convección y precipitación sobre esa región (Meza-Landero, 2020). Las ondas del este ocurren con mayor frecuencia entre los meses de agosto y septiembre.

4.2.3 Ciclones tropicales

Los ciclones tropicales generan anualmente precipitaciones intensas, rachas de viento de hasta 400 km/h, deslizamientos de tierra, inundaciones e incremento en el oleaje. Son eventos que pueden ocasionar daños materiales y humanos graves. Según la intensidad de los vientos se pueden clasificar como depresión tropical, tormenta tropical o huracán (Desde la categoría

1 a la 5 de acuerdo con la escala Saffir-Simpson). Durante el período 1970-2010 casi 2 millones de mexicanos se vieron afectados por los desastres asociados a los ciclones tropicales y se registraron más de 1,700 muertos (Cavazos, 2015)

4.2.4 Otros fenómenos importantes

Es importante mencionar, que el Anticiclón de las Bermudas juega un papel crucial en el clima de México, ya que durante la mitad de la estación de lluvias de verano impide el desarrollo nuboso, lo que resulta en un aumento de las temperaturas.

Otro fenómeno significativo es la brisa marina y terrestre. La brisa marina se produce aproximadamente tres horas después de la salida del sol y se superpone a los alisios durante verano, aunque en invierno es suele ser casi imperceptible debido a los nortes. Por otro lado, la brisa terral es el viento nocturno que sopla desde el continente hacia el mar (Ruiz-Barradas et al., 2010)

Las tormentas convectivas por calentamiento diurno, como su nombre lo indica, se generan debido al calentamiento local que provoca una disminución en la densidad del aire, lo que a su vez provoca su ascenso y la formación de conglomerados de nubes que pueden dar lugar a precipitaciones.

Las lluvias por forzamiento orográfico se originan cuando una masa de aire con potencial convectivo avanza sobre un área con una topografía elevada, lo que favorece la formación de nubosidad que puede desencadenar precipitaciones, rayos e incluso granizo (EuroMET, 2004).

Por otro lado, las turbonadas son fenómenos caracterizados por cambios bruscos en la velocidad del viento de al menos 16 nudos, y suelen generarse en conjunto con tormentas (AEMET, 2018). Las líneas de turbonada consisten en la presencia de varias tormentas eléctricas que se entrelazan entre sí, y para que ocurran se requiere el choque de frentes con diferentes temperaturas (Portillo, 2020).

Además, es importante mencionar las trombas marítimas, que son columnas de aire en rotación rápida que se extienden desde nubes de tipo cumuliforme hasta la superficie acuosa. Su duración suele ser de 5 a 10 minutos y se desplazan a velocidades de 5 a 20 km/h, con una

velocidad máxima de rotación que no supera los 130 km/h. Estas trombas marítimas son comunes en mares de aguas cálidas (Hernández et al., 2014).

4.3 Modelos numéricos de la atmósfera

Los modelos numéricos de la atmósfera son elementos esenciales en la previsión meteorológica y la investigación climática, ya que constituyen representaciones físico-matemáticas que simulan el desarrollo de la atmósfera y posibilitan la realización de pronósticos meteorológicos. Estos modelos se basan en complejas ecuaciones, llamadas ecuaciones primitivas, las cuales son la ecuación de momento, ecuación de energía termodinámica, ecuación de continuidad y la ecuación de gas ideal. Estas ecuaciones describen los procesos físicos que ocurren en la atmósfera, como la circulación atmosférica, la radiación solar, la evaporación y la formación de nubes. Algunos modelos más completos incluirán otro tipo de ecuaciones para describir otros procesos con el objetivo de mejorar la modelación de eventos más complejos (Tomkins-Warner, 2011).

Existen dos tipos principales de modelos numéricos de la atmósfera: los modelos deterministas y los modelos por ensamble (o probabilísticos). Los modelos deterministas se centran en calcular una única solución para el estado futuro de la atmósfera, utilizando condiciones iniciales y datos de entrada precisos. Estos modelos se basan en la premisa de que si se conocen con precisión todas las variables iniciales y los procesos físicos que gobiernan la atmósfera, se puede predecir el estado futuro con certeza.

El proceso de predicción tiene cuatro componentes importantes: recolección de datos, su asimilación, integración del modelo para conseguir el pronóstico y la aplicación del pronóstico. Este proceso lleva consigo errores intrínsecos, inevitables y a veces desconocidos, sumado a que la predicción numérica del tiempo y del clima es de naturaleza caótica (Du, 2007). Los modelos por ensamble reconocen la naturaleza caótica inherentemente de la atmósfera y proporcionan estimaciones de la probabilidad de que ocurran diferentes eventos y condiciones meteorológicas. Estos modelos generan múltiples simulaciones utilizando una variedad de condiciones iniciales y parámetros, lo que resulta en un conjunto de resultados probables en lugar de una sola solución determinista. Esto permite evaluar la variabilidad y la incertidumbre asociadas con las predicciones meteorológicas.

Ambos tipos de modelos son importantes y complementarios. Los modelos deterministas son útiles para obtener pronósticos a corto plazo y en áreas donde las condiciones iniciales se conocen con mayor precisión. Por otro lado, los modelos por ensamble son valiosos para proporcionar información sobre la incertidumbre asociada con las predicciones, especialmente a largo plazo y en situaciones donde las condiciones iniciales son menos precisas. También es importante hacer notar que los modelos por ensamble suelen ser más útiles que los modelos deterministas. Esto se debe a que la media del ensamble es generalmente más precisa que el pronóstico generado por un miembro individual del ensamble, la dispersión o varianza puede ser usado como un indicador de la incertidumbre del pronóstico, la distribución de probabilidad puede proporcionar información sobre eventos extremos y son más efectivos en sistemas de toma decisiones (Tomkins-Warner, 2011).

4.4 Uso de umbrales basados en percentiles

La comprensión y el estudio de los fenómenos hidrometeorológicos severos son de vital importancia debido a que, si no se tiene la prevención adecuada, pueden tener un impacto significativo en diversos sectores. Para identificar y prever la ocurrencia de tales eventos, es fundamental contar con herramientas objetivas que permitan establecer umbrales claros y consistentes. Se han desarrollado diversos métodos que hacen el uso de índices para la determinación de diferentes condiciones atmosféricas y climáticas.

Los eventos extremos son resultado de una combinación compleja de diversos factores. Aunque no existe una definición única para los eventos extremos, Vázquez-Aguirre (2010) los describe como aquellos eventos que se registran en el comportamiento de una variable específica, tienen una baja probabilidad de ocurrencia y su valor observado en dicha variable supera un umbral específico.

Un método útil para establecer estos umbrales específicos es el uso de percentiles. El percentil es una medida estadística utilizada para determinar la posición de un valor dentro de un conjunto de datos ordenados de menor a mayor. Indica el valor de la variable por debajo del cual se encuentra un porcentaje específico de observaciones en un grupo determinado. Este enfoque proporciona una forma de identificar datos relevantes dentro de un conjunto, por ejemplo, el percentil 50 (P50) representa la media, que divide el conjunto en dos partes

iguales: por debajo de este valor se encuentran al menos la mitad de los datos y por encima se encuentra la otra mitad (Wilks, 2006).

La base de datos HadEX2 es un conjunto de datos de extremos climáticos a nivel global producido mediante la coordinación del Equipo de Expertos de Detección de Cambio Climático e Índices (ETCCDI, por sus siglas en inglés) de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), el Programa de Variabilidad Climática de la OMM (CLIVAR) y el Comité de Observaciones y Medidas Marinas (JCOMM) también perteneciente a la OMM. Esta base de datos recopila información sobre una serie de índices climáticas que se utilizan para identificar y analizar eventos climáticos extremos, como olas de calor, sequías, lluvias intensas y tormentas (Donat et al., 2013).

Los índices climáticos incluidos en HadEX2 se derivan de datos observacionales históricos de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación recopilados de estaciones meteorológicas alrededor del mundo. Se calcularon 17 índices de temperatura y 12 de precipitación. De estos índices, se utilizan percentiles para hacer conocer los índices indicados en la Tabla 2.

Tabla 2 Índices climáticos del HadEX2 que utilizan percentiles para su cálculo. Adaptación de Vázquez-Aguirre (2010).

Índice	Descripción del índice
Noches frías (TN10p)	Porcentaje del tiempo cuando la temperatura mínima con valores menores al P10
Noches cálidas	Porcentaje del tiempo cuando la temperatura mínima con valores mayores al P90
Días fríos	Porcentaje del tiempo cuando la temperatura máxima con valores menores al P10
Días cálidos	Porcentaje del tiempo cuando la temperatura mínima con valores mayores al P90

Duración de los períodos cálidos	Conteo anual cuando al menos seis días consecutivos de temperatura máxima con valores mayores al P90
Duración de los períodos fríos	Conteo anual cuando al menos seis días consecutivos de temperatura mínima con valores menores al P90
Días muy lluviosos	Precipitación total anual de días con valores superiores al P95

En cuanto a otros fenómenos climáticos, se han utilizado diferentes definiciones y métodos para analizar las olas de calor. Algunas de estas definiciones incluyen el uso de índices de confort, umbrales absolutos y umbrales relativos. Sin embargo, se ha observado que el uso de umbrales relativos ha demostrado mejores resultados para indicar los efectos negativos que estas olas de calor podrían llegar a tener en la población e incluso en infraestructuras (Villa-Falfán, 2018; Herrera-Alanis, 2012). Esto considera que la temperatura tiene un aspecto fisiológico que se refiere a la termorregulación del cuerpo humano y el sociológico, al cual el uso de umbrales relativos es más apropiado, que se refiere a la adaptación local al clima (Robinson, 2001).

Villa-Falfán (2018) realizó un análisis mensual y estacional utilizando los percentiles P90, P95 y P99 en el período 1981-2010 en temperatura máxima, concluyendo que estos umbrales son adecuados para caracterizar el calor extremo en el estado de Veracruz. Por otro lado, Herrera-Analis (2012) llevó a cabo diversos análisis para caracterizar las olas de calor en México, utilizando los percentiles P80, P90, P95 y P99. Destacó que el uso de estos percentiles generó mejor agrupación y ayudó a determinar el comportamiento de olas de calor en diferentes estaciones. En otro estudio, los autores Bitencourt et al. (2020) investigaron las ondas de calor y ondas frías, señalando que el P90 se puede utilizar para clasificar ondas de calor, usándolo en al menos 3 días consecutivos, y el P10 se puede utilizar para ondas frías en el mismo período de tiempo.

El uso de umbrales relativos permite conocer las condiciones extremas y el peligro a que se enfrentan cuando estas suceden. El uso de percentiles también se ha utilizado como umbrales

relativos para otras variables como la precipitación (Anaya et al, 2020; Nicholls & Murray, 1999, como se citó en Vázquez-Aguirre, 2010). El uso de percentiles es un método útil para establecer estos umbrales relativos, ya que permiten determinar la posición de un valor dentro de un conjunto de datos ordenados.

5 Datos y métodos

5.1 Datos

Desde el comienzo de esta investigación, se ha prestado especial atención a la replicabilidad de la metodología propuesta y al uso de datos de libre acceso. Con este fin, todos los datos utilizados en el estudio provienen de fuentes públicas y están disponibles para su descarga desde diversas fuentes, como bases de datos, repositorios de información científica y gubernamental.

5.1.1 Sistema de Pronóstico de Ensamble a Corto Plazo

Los modelos de predicción numérica del tiempo tienen sus limitaciones, por lo cual se han desarrollado sistemas de pronóstico por ensamble. Estos sistemas, utilizan la sensibilidad de las condiciones iniciales, las estimaciones y errores del modelo para determinar posibles resultados de pronóstico. Cada miembro del ensamble produce un conjunto de resultados que conforma una envolvente. Al eliminar el sesgo sistemático es posible estimar la media del ensamble, su dispersión, distribuciones de probabilidad y valores extremos.

El Sistema de Pronóstico de Ensamble a Corto Plazo (SREF, por sus siglas en inglés) es un modelo probabilístico que toma sus condiciones iniciales de tres sistemas de asimilación de datos de modelos determinísticos. Estos sistemas incluyen el sistema de asimilación de datos (NDAS, por sus siglas en inglés) del modelo mesoescala norteamericano (NAM, por sus siglas en inglés), el sistema de asimilación de datos (GDAS, por sus siglas en inglés) del sistema global de pronóstico (GFS, por sus siglas en inglés) y el sistema de actualización rápida (RAP, por sus siglas en inglés).

El sistema SREF fue desarrollado en 1997 por el Dr. Jun Du, quien aplicó la investigación realizada por la Dra. Eugenia Kalnay, el Dr. Steve Tracton y el Dr. Zoltan Toth a un modelo regional. El sistema comenzó a operar en mayo de 2001 (COMET-MetEd, 2015a).

Para cada uno de los dos núcleos del ensamble, el Modelo Multiescala No Hidrostático (NMMB, por sus siglas en inglés) y el Modelo WRF de Investigación Avanzada (ARW, por sus siglas en inglés) son hechas una corrida de control y un conjunto de 12 perturbaciones en las condiciones iniciales, quedando con un total de 26 miembros. El sistema es ejecutado a las 03, 09, 15 y 21 UTC.

Las condiciones laterales de frontera que utilizan los controles ambos modelos, el WRF-ARW y el NMMB son las del GFS operacional. En el caso de las condiciones laterales de frontera perturbadas, se utilizan los primeros 12 miembros perturbados del Sistema Global de Pronóstico de Ensamblados (GEFS, por sus siglas en inglés) para el núcleo NMMB, y de los primeros cuatro y últimos ocho miembros del ciclo previo del GEFS para el núcleo ARW (COMET-MetEd, 2015d).

5.1.1.1 Resolución y dominio del modelo

Verticalmente, se utilizan dos coordenadas. El WRF-ARW utiliza coordenadas sigma que sigue la topografía. Mientras que el NMMB hace uso de coordenadas híbridas sigma-presión que sigue la topografía desde la superficie hasta el tope del modelo a 50-hPa (COMET-MetEd, 2015e).

La resolución horizontal para el SREF para ambos núcleos es de 16 km. Para las mallas de variables, el WRF-ARW se utiliza una malla Arakawa-C. Por otra parte, el NMMB utiliza una malla Arakawa-B (COMET-MetEd, 2015c).

Las tres escalas del dominio SREF se pueden observar en la Figura 4. El primero es el marcado por la línea punteada el cual es el dominio computacional, el segundo es el dominio de salida el cual está marcado con una línea sólida y el tercero son las salidas del subdominio para Estados Unidos Continental (CONUS, por sus siglas en inglés), Alaska y Hawái (COMET-MetEd, 2015b).

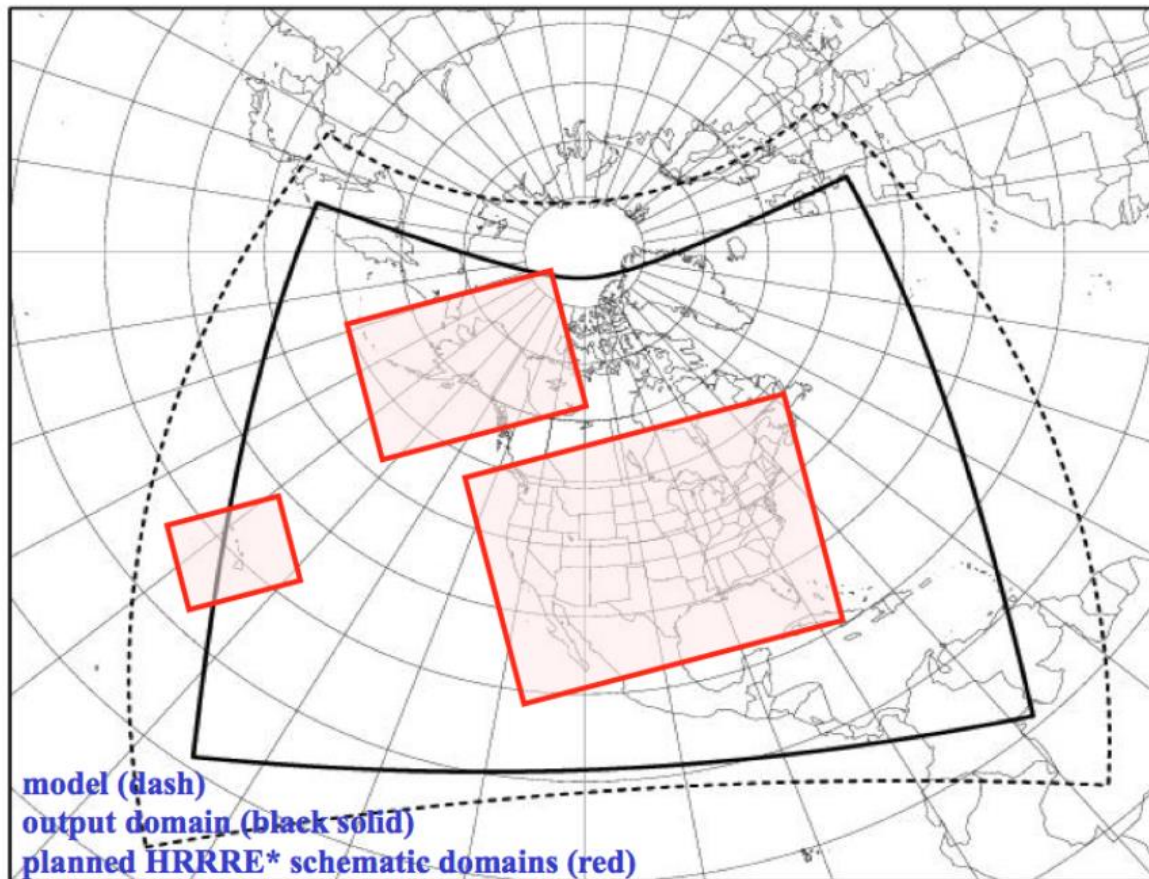


Figura 4 Esquema de los dominios del modelo SREF. Con la línea punteada se delimita el dominio computacional, la línea sólida dominio de la salida y con una línea roja los subdominios. Obtenido de:
<https://sites.google.com/ucar.edu/operational-models-encyclo/pro>

Para este trabajo se utilizó una región delimitada de la república mexicana dentro del dominio de salida, los cuales están ubicados en la Figura 4 por una línea sólida, más adelante se especificará la zona de la cual se extrajeron las variables para la investigación.

5.1.1.2 Disponibilidad y acceso

Para descargar los datos es necesario acceder al sitio oficial del NCEP² donde se encuentran los productos derivados del SREF con datos de salidas disponibles cada 6 horas, con hasta 72 horas de pronóstico. Se encuentran disponibles por vía FTP y HTTPS en formato GRIB2:

- Individual Member Products

² <https://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/sref/>

- Individual Member Bias Corrected Products
- Ensemble Products
- Ensemble Bias Corrected Products
- NDGD Ensemble Products
- Cluster Products

También se encuentran disponibles desde la página de NOAA Operational Model Archive and Distribution System³ (NOMADS) el cual es un servidor de hosting para los datos de modelos NCEP.

Las variables utilizadas en esta metodología, de entre todas las disponibles en los archivos con formato GRIB2, son las siguientes:

- Precipitación total en superficie [kg/m²]
- Temperatura (a 2 m sobre el suelo) [K]

La precipitación total en superficie mide la cantidad total de precipitación que se espera que caiga en un área determinada durante un período de tiempo específico. En el sistema SREF, la resolución espacial del modelo es de 16 km y su resolución temporal es de 3 horas, lo que indica que el valor de precipitación corresponderá a la masa de agua que caería si se cubriera toda la superficie de 16 km x 16 km en acumulados de 3 horas. Mientras que la temperatura representa la temperatura del aire medida a una altura de 2 metros sobre la superficie del suelo.

5.1.2 Datos de estaciones meteorológicas

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de México cuenta con una amplia base de datos del clima que es manejada en el sistema de computación climática (CLICOM, por sus siglas en inglés) que cuenta con información de estaciones climáticas convencionales ubicadas en todo el territorio mexicano (Vázquez-Aguirre, 2006; CICESE, 2013). Esta base de datos cuenta con registros de las variables de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, medidos diariamente y con datos disponibles desde el 01/01/1940 al 31/12/2020.

³ <https://nomads.ncep.noaa.gov/>

En cuanto al control de calidad de los datos, se debe tener en cuenta que el SMN realiza un control de calidad inicial de la base de datos del CLICOM. Dado que existen períodos de observaciones o mediciones faltantes, se verificó que cada año tuviera más del 80% de los datos y se tomaron en cuenta solo las estaciones climáticas convencionales que tuvieran más de 10 años de observaciones. En total, se utilizaron 1430 estaciones climáticas convencionales, como se muestra en la Figura 5.



Figura 5 Estaciones climáticas convencionales seleccionadas.

El proceso para verificar que se contara con más del 80% de los datos se realizó utilizando Python. Se utilizaron las bibliotecas CSV y Pandas para facilitar el manejo de los datos. Los datos de las estaciones climáticas convencionales estaban en formato TXT, por lo que se convirtieron a formato CSV para poder trabajar con ellos de manera más conveniente utilizando Pandas.

La base de datos de las estaciones climáticas convencionales cuenta con un total de 5,442 estaciones. Además, hay un catálogo que incluye información como el nombre del archivo, la ubicación geográfica, el nombre de la estación y otros metadatos relevantes.

Cada archivo individual contiene datos de año, mes, día, temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación desde el 01/01/1940 hasta el 31/12/2020. Los valores nulos están representados como “-99.9”. Las temperaturas están en grados Celsius y la precipitación en milímetros.

El proceso fue iterativo y se realizó para cada estación individualmente. Se revisó que cada mes tuviera más del 80% de sus datos disponibles, lo cual equivale aproximadamente a 24 días o más. Una vez que se verificó este criterio mensual, se procedió a verificar que hubiera más de 9 meses de datos en el mismo año, ya que el 80% de un año corresponde a 9.6 meses. Solo se consideraron aquellas estaciones que tenían más de 10 años de datos. Con este proceso, se seleccionaron las estaciones que cumplían con los criterios mencionados para su posterior análisis, quedando un restante de 1430 estaciones climáticas convencionales.

5.1.3 Datos vectoriales de vulnerabilidad

Los archivos vectoriales de vulnerabilidad utilizados en esta metodología fueron obtenidos de la base de Datos Abiertos de México⁴. Los datos se descargan en un archivo comprimido en formato RAR con un tamaño aproximado de 79 MB. Este archivo contiene información vectorial en formato Shapefile (SHP) sobre vulnerabilidad social, ambiental y económica. Los archivos están disponibles hasta la fecha (2 de mayo de 2023) y fueron publicados por CONAGUA⁵ en el año 2017.

La tabla de atributos de estos archivos incluye la Clave Municipal del catálogo de INEGI para los 2463 municipios, con la Clave Estatal y la Clave Municipal en la cadena numérica (CVE_CONCATENADA), el identificador de Región Hidrológica Administrativa (CVE_RHA), el nombre de la Región Hidrológico Administrativa (NOM_RHA), valor numérico de vulnerabilidad ambiental a nivel municipal (Probabilid) y el Nivel de vulnerabilidad ambiental, social o económica, según sea el caso (T_Prob).

⁴ <https://datos.gob.mx/busca/dataset/vulnerabilidad-social-economica-y-ambiental-por-municipio/resource/b9e51543-5fe3-4e55-bf09-eaf280c9570b>

⁵ <https://datos.gob.mx/busca/dataset/vulnerabilidad-social-economica-y-ambiental-por-municipio>

De acuerdo a la descripción en la página de Datos Abiertos, los valores de vulnerabilidad se calculan empleando diferentes metodologías. La vulnerabilidad social se determina utilizando indicadores sociales basados en la metodología del panel intergubernamental de cambio climático (IPCC, 2007). De manera similar, la vulnerabilidad económica se calcula mediante el uso de indicadores económicas, mientras que la vulnerabilidad ambiental se evalúa mediante indicadores ambientales.

La metodología utilizada para el cálculo de la vulnerabilidad publicada por CONAGUA fue propuesta por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y se describe con más detalle en Vázquez-Aguirre et al. (2019). En este trabajo se menciona que esta metodología es para el cálculo de vulnerabilidad ante sequía. De acuerdo con esta, se hace el uso de la definición de vulnerabilidad establecida por el IPCC (2014) la cual es definida de la siguiente manera:

$$\text{Vulnerabilidad} = \text{Exposición} + \text{Sensibilidad} - \text{Capacidad Adaptativa}$$

Donde,

La vulnerabilidad es el grado de incapacidad que posee un sistema para enfrentar los efectos adversos del cambio climático

La exposición se refiere a la naturaleza, extensión y ritmo de los cambios y fluctuaciones climáticas que impactan a un sistema en particular.

La sensibilidad hace referencia al nivel de afectación que experimenta un sistema ante las variabilidades climáticas, en función de sus características propias.

Finalmente, la capacidad adaptativa se refiere a las habilidad y recursos institucionales que permiten implementar procesos de adaptación para hacer frente ante una amenaza climática específica.

La metodología por el IMTA identifica los siguientes factores para el cálculo de índices de vulnerabilidad económica, social y ambiental, apreciables en la Tabla 3.

Tabla 3 Factores utilizados para el cálculo de vulnerabilidad (IMTA, 2015).

Componentes	Factores
Grado de exposición	Densidad de población (hab/km ²) Población económicamente activa desocupada (%) Población sin derechohabiencia a servicios de salud (%) Población en condiciones de pobreza (%) Población analfabeta (%) Grado de explotación de los acuíferos (adimensional) Grado de explotación de las cuencas (adimensional)
Sensibilidad	Valor producción agrícola (\$) Valor de la producción ganado en pie (\$) Viviendas sin drenaje ni excusado (%) Viviendas sin energía eléctrica (%) Viviendas sin agua entubada (%) Viviendas con piso de tierra (%) Deforestación (ha) Superficie afectada por incendios forestales (ha)
Capacidad de adaptación	Superficie rehabilitada para riego (ha) Superficie agrícola tecnificada (ha) Longitudes de caminos rurales (km) Ingreso per cápita anual Beneficiarios del programa Oportunidades Beneficiarios del programa Liconsa Años promedio de escolaridad Superficie reforestada (ha) Áreas naturales protegidas (%)

Debido a que esta metodología fue aplicada para evaluar la vulnerabilidad ante sequías, algunos de los factores presentados en la Tabla 3 no representan adecuadamente la vulnerabilidad ante fenómenos hidrometeorológicos severos, que es el enfoque principal de esta metodología. A continuación, se mencionarán los factores que sí son representativos para la vulnerabilidad ante fenómenos hidrometeorológicos severos:

- *Densidad de población:* Es la medida de cuántas personas viven en un área específica, generalmente expresada como el número de habitantes por kilómetro cuadrado.
- *Población económicamente activa desocupada:* Indica el porcentaje de personas en edad de trabajar que no tienen empleo en relación con el total de la población económicamente activa.
- *Población sin derechohabiencia a servicios de salud:* Representa el porcentaje de personas que no tienen acceso a servicios de salud o no cuentan con algún tipo de seguro médico.
- *Población en condiciones de pobreza:* Indica el porcentaje de personas que viven en situación de pobreza, es decir, que no tienen acceso adecuado a recursos básicos para satisfacer sus necesidades básicas.
- *Población analfabeta:* Es el porcentaje de personas mayores de 15 años que no saben leer ni escribir.
- *Viviendas sin drenaje ni excusado:* Es el porcentaje de viviendas que no cuentan con sistemas adecuados de drenaje de aguas residuales ni de saneamiento básico.
- *Viviendas sin energía eléctrica:* Indica el porcentaje de viviendas que no tienen acceso a la electricidad.
- *Viviendas sin agua entubada:* Representa el porcentaje de viviendas que no disponen de agua proveniente de una red de distribución.
- *Viviendas con piso de tierra:* Mide el porcentaje de viviendas cuyo piso está compuesto por tierra sin ningún tipo de revestimiento.
- *Deforestación:* Es la pérdida de superficie forestal debido a la tala o destrucción de árboles y bosques.
- *Superficie afectada por incendios forestales:* Representa la extensión de tierra que ha sido afectada por incendios forestales.

- *Longitudes de caminos rurales:* Representa la longitud total de los caminos o vías de comunicación en áreas rurales.
- *Ingreso per cápita anual:* Es el ingreso promedio que recibe cada persona en un año, calculado dividiendo el ingreso total entre la población total.
- *Beneficiarios del programa Oportunidades:* Indica el número de personas o familias que reciben beneficios del programa social Oportunidades.
- *Beneficiarios del programa Liconsa:* Representa el número de personas o familias que son beneficiarios del programa social Liconsa.
- *Años promedio de escolaridad:* Mide el promedio de años de educación formal completados por la población.
- *Superficie reforestada:* Indica la extensión de tierra que ha sido reforestada o plantada con árboles para restaurar o aumentar la cobertura forestal.
- *Áreas naturales protegidas:* Representa el porcentaje de superficie total que está designada como área protegida, destinada a la conservación de la biodiversidad y los ecosistemas.

Además, para futuros trabajos se propone utilizar estos factores exclusivamente para evaluar la vulnerabilidad ante fenómenos hidrometeorológicos severos. Sin embargo, se hace la aclaración de que posiblemente el enfoque más adecuado sea tener una evaluación de vulnerabilidad para cada una de las variables estudiadas (temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación).

Esta metodología utiliza una técnica que involucra el cálculo de coeficientes tipo beta en un proceso de ajuste de dos pasos para el análisis final de la vulnerabilidad. Esta técnica considera una serie de "áreas", que pueden ser municipios, subcuencas u otras unidades geográficas, para después aplicar una categorización de la vulnerabilidad basada en percentiles.

Finalmente, se realiza una normalización que como resultado sitúa los valores de los indicadores de vulnerabilidad entre 0 y 1, la cual se categoriza como muy baja, baja, media, alta o muy alta.

5.2 Metodología

En este capítulo se describe detalladamente la metodología utilizada para el cálculo de riesgo ante fenómenos hidrometeorológicos severos.

Para calcular el riesgo se seleccionaron 1430 estaciones climáticas convencionales que serán utilizadas como puntos de interés. En el caso de la vulnerabilidad, se utilizaron los índices de vulnerabilidad para los municipios de México publicados por CONAGUA (2017) de la base de datos abiertos. Sin embargo, dado que estos índices solo incluyen la vulnerabilidad social, ambiental y económica, es necesario calcular la vulnerabilidad total o global.

Para ello, el primer paso consistió en convertir los valores de vulnerabilidad cualitativos en valores cuantitativos, asignándoles un valor numérico. Posteriormente, mediante una suma ponderada es posible calcular la vulnerabilidad total. A cada uno de los puntos de interés se le asignó el valor de vulnerabilidad total correspondiente a su ubicación, para esta tarea fue utilizado el sistema de información geográfica QGIS.

El siguiente paso es el cálculo de peligro. Para conocer el peligro asociado al fenómeno hidrometeorológico se utilizaron las variables meteorológicas de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación acumulada a 24 horas. Estos valores se extrajeron de la media del ensamble del sistema SREF. Los valores se convierten a las unidades de grados Celsius para temperatura y milímetros para precipitación.

Para obtener el valor de peligro asociado para cada uno de los sitios y variables utilizadas se emplearon umbrales. El uso de umbrales relativos permitió asociar estas variables a un valor cuantitativo y cualitativo del peligro. Se tomaron los valores de observaciones de las estaciones climáticas convencionales de cada sitio y se calcularon sus percentiles para definir los umbrales.

Para la temperatura máxima se utilizaron los percentiles P80, P90 y P95, mientras que para la temperatura mínima se utilizaron los percentiles P20, P10 y P05. Para la precipitación se utilizó P80, P90 y P95. El índice de peligro se obtiene comparando los valores obtenidos de las variables meteorológicas del SREF con los umbrales.

A continuación, se realizó el cálculo de riesgo, que es obtenido mediante el producto del índice de riesgo con el índice de vulnerabilidad total. El índice de riesgo obtenido es

contrastado con la Tabla 8 para la obtención de un valor cualitativo, que puede ser “bajo”, “medio”, “alto” o “muy alto”, según el valor numérico obtenido.

Para representar el valor de riesgo para cada una de los puntos de interés se optó por el uso de una representación geográfica, mediante el uso de círculos que utilizan una escala de colores verde para riesgo bajo, amarillo para riesgo medio, naranja para riesgo alto y rojo para riesgo muy alto. El tamaño de los indicadores es mayor cuanto mayor es el valor de riesgo. El diagrama de flujo que sintetiza la metodología se observa en la Figura 6.

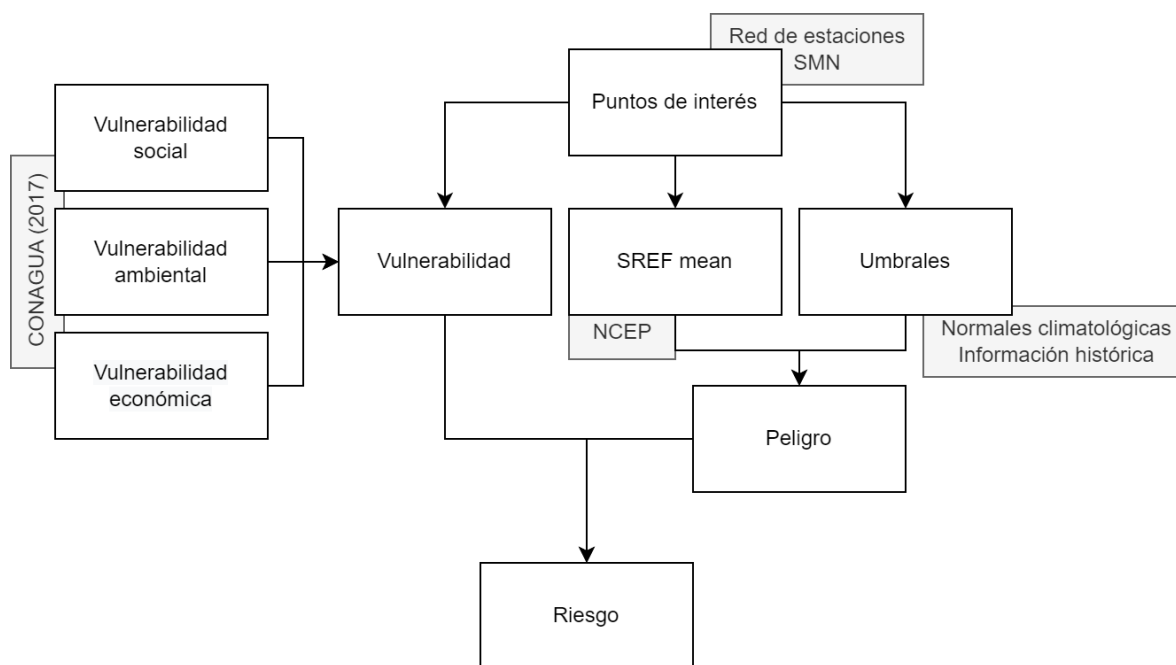


Figura 6 Diagrama de flujo de la metodología utilizada

5.2.1 Equipo utilizado

El equipo de cómputo, de nombre Voragine, empleado para el procesado de datos, es una estación de trabajo HPZ 210. Voragine tiene instalado el sistema operativo Linux Mint 20.1 la cual es una distribución de GNU/Linux basada en Ubuntu y en Debian, fue lanzada en 2006. Dentro de sus especificaciones, incluye un procesador Xeon Intel (4 núcleos físicos y 2 virtualizados), un almacenamiento de 2 tb distribuido en 3 HDD, y 8 gb de RAM.

5.2.2 Extracción de variables meteorológicas

En la extracción de variables meteorológicas, se utilizaron dos variables principales: precipitación y temperatura, obtenidos directamente de la media del ensamble del sistema

SREF. Para la precipitación, se calculó la precipitación acumulada a 24 horas. Generalmente, este período corresponde a mediciones desde las 8 am hasta las 8 am del siguiente día hora local (OMM, 2018). Sin embargo, debido a que el sistema SREF genera acumulados cada tres horas para esta medición se tomó el pronóstico acumulado correspondiente al día desde las 15:00 UTC del día actual hasta 12:00 UTC del siguiente día, que corresponden a las 09:00 a 06:00 del día siguiente de la hora local (GMT-6).

Asimismo, tanto la temperatura máxima como de temperatura mínima se registran alrededor de las 8am, lo cual corresponde a los valores máximos (o mínimos) de las últimas 24 horas. Estos valores corresponden a diferentes momentos del día. Por lo tanto, para la temperatura máxima se registra el valor máximo de un periodo de 24 horas, utilizando el periodo de 15:00 UTC del día actual a 12:00 UTC del siguiente día. De manera similar, para la temperatura mínima se utilizó el mismo periodo, pero calculando el valor mínimo.

Para el manejo de los datos, se utilizó el software GrADS. Se emplearon las funciones de max, min y sum, las cuales se utilizan para calcular el valor máximo, el valor mínimo y el acumulado, respectivamente, en un período de tiempo especificado.

En el caso de la temperatura, la variable del archivo GRIB2 se denomina “tmp2m” y está expresada en unidades Kelvin, por lo cual es necesario convertirlo a grados Celsius. Se calculó la temperatura máxima y la temperatura mínima utilizando esta variable.

La función de *max* y *min* tienen los mismos argumentos:

$$\text{max}(\text{expr}, \text{dim1}, \text{dim2} \langle, \text{tinc} \rangle)$$
$$\text{min}(\text{expr}, \text{dim1}, \text{dim2} \langle, \text{tinc} \rangle)$$

Donde:

- *expr*: es cualquier expresión válida de GrADS
- *dim1*: es la expresión de la dimensión inicial
- *dim2*: es la expresión de la dimensión final
- *tinc*: Incremento de tiempo opcional

Considerando que la expresión válida corresponde a la variable con la resta para obtener el valor en grados Celsius, la dimensión inicial se define como $t=3$ (9:00 GMT-6) y la

dimensión final como t=9 (6:00 GMT-6 del siguiente día). La expresión para calcular el valor máximo y mínimo es la siguiente:

$$d \max(tmp2m-273.15,t=3,t=9)$$

$$d \min(tmp2m-273.15,t=3,t=9)$$

La función *sum* es similar a las funciones *max* y *min*, con la diferencia que añade el argumento “-b” el cual indica el uso de fronteras exactas:

$$sum (expr, dim1, dim2, <,tinc> <,-b>)$$

Considerando que la expresión válida corresponde a la variable, la dimensión inicial está dada por t=3 (9:00 GMT-6) y la dimensión final está dada por t=9 (6:00 GMT-6 del siguiente día), la expresión para calcular la precipitación acumulada está dada por:

$$d \sum(apcpsfc,t=3,t=9)$$

Una vez calculadas las variables de precipitación acumulada, temperatura máxima y temperatura mínima se extraen estos valores para los puntos de interés que corresponden a las estaciones climáticas convencionales. El proceso de extracción se realiza con el software GrADS mediante un proceso iterativo que incluye la posición geográfica de los puntos para lograr obtener sus valores, estos valores se almacenan en formato CSV.

5.2.3 Cálculo de umbrales de peligro

Para el cálculo del peligro, se utilizaron umbrales basados en percentiles. Estos umbrales relativos permiten evaluar qué tan peligroso puede ser un fenómeno o situación en particular. Los percentiles se emplean para tener en cuenta las condiciones climáticas a las que se han enfrentado las poblaciones en el pasado, lo que nos brinda información sobre la peligrosidad de los fenómenos hidrometeorológicos severos para una población con características específicas.

Los percentiles propuestos en esta metodología son los siguientes:

- Para la temperatura máxima, se utilizaron los percentiles P80, P90 y P95. Si la temperatura máxima está por debajo del P80, se considera un peligro bajo; si está por

debajo del P90, se considera un peligro medio; si está por debajo del P95, se considera un peligro alto; y si es igual o superior al P95, se considera un peligro muy alto.

- Se utilizan los mismos umbrales que en temperatura máxima para la precipitación, con la consideración de solo tomar los valores mayores a 0 mm.
- Para la temperatura mínima, se emplean los percentiles equivalentes. Si la temperatura mínima está por encima del P20, se considera un peligro bajo; si está por encima del P10, se considera un peligro medio; si está por encima del P05, se considera un peligro alto; y si es menor o igual que el P05, se considera un peligro muy alto.

Estos umbrales basados en percentiles nos permitieron clasificar los niveles de peligro en función de las características climáticas. En el caso de la temperatura máxima y la precipitación, superar el P80 representaría que solo el 20% de las mediciones históricas son superiores a este valor. De manera similar, superar el P90 indica que solo el 10% de las mediciones son superiores a este valor, mientras que superar el P95 implica que solo el 5% de las mediciones está por encima de este valor.

Cuando la temperatura máxima o la precipitación superan estos percentiles, estamos hablando de casos extremos que tienen baja probabilidad de ocurrir con base al registro histórico. En consecuencia, representan un mayor nivel de peligro para el sitio donde se produzcan, ya que están por encima de la mayoría de las mediciones históricas.

5.2.4 Cálculo de vulnerabilidad

Para conocer los valores de vulnerabilidad para los sitios de interés, se partió de los archivos vectoriales de vulnerabilidad social, ambiental y económica publicados por CONAGUA (2017). Fue necesario convertir los valores cualitativos dados por los archivos vectoriales de vulnerabilidad social, ambiental y económica a valores cuantitativos. Para ello, se utilizó los valores dados por la Tabla 4.

Tabla 4 Grado de vulnerabilidad según su valor cuantitativo, tomado de CENEPRED, 2015.

Vulnerabilidad muy alta	Vulnerabilidad alta	Vulnerabilidad media	Vulnerabilidad baja	Vulnerabilidad muy baja
0.503	0.260	0.134	0.068	0.035

Como el formato original está dado en shp, se utilizó QGIS para acceder y extraer la tabla de atributos para cada uno de los archivos de vulnerabilidad. Estos archivos se exportaron en formato CSV para poder manejarlos utilizando la librería Pandas en Python. A través de un proceso iterativo, se convierten los valores cualitativos a cuantitativos utilizando la información proporcionada en la Tabla 4.

Una vez teniendo los valores de vulnerabilidad social, ambiental y económica se calculó la vulnerabilidad total, mediante el uso de una suma ponderada de los factores de vulnerabilidad (CENEPRED, 2015).

$$V = V_s * p_1 + V_e * p_2 + V_a * p_3$$

Donde:

V=Vulnerabilidad

V_s=Vulnerabilidad social

V_e=Vulnerabilidad económica

V_a=Vulnerabilidad ambiental

p₁,p₂,p₃ = pesos ponderados calculado mediante el método multicriterio propuesto, se observan sus valores en la Tabla 5.

Tabla 5 Valores de los pesos usados para cálculo de vulnerabilidad. Tomado de CENEPRED, 2015.

Peso vulnerabilidad social (p1)	Peso vulnerabilidad económica (p2)	Peso vulnerabilidad ambiental (p3)
0.633	0.106	0.260

La suma ponderada se llevó a cabo utilizando Python. Se abrieron los tres archivos de vulnerabilidad en formato CSV y se generó un archivo de salida que contenía la vulnerabilidad total por municipio. Una vez calculada la vulnerabilidad total por municipios para todo México, se extrajeron los valores para los sitios de interés utilizando el sistema de información geográfico QGIS. Para realizar esto, se utilizó la herramienta *Unir atributos por localización*, la cual se encuentra en el menú *Herramientas de gestión de datos* en la pestaña *Vectorial*. Esta herramienta permitió unir el archivo de la vulnerabilidad total con las

ubicaciones geográficas de las estaciones climáticas convencionales seleccionadas previamente. El archivo de salida se guardó en formato CSV e incluyó el nombre de la estación, su ubicación geográfica y su valor de vulnerabilidad total.

5.2.5 Cálculo de peligro

Las condiciones del peligro de acuerdo se definieron de acuerdo a lo siguiente: el nivel de peligro bajo corresponde a las condiciones normales del sitio, el peligro medio corresponde a aquellos valores que pudieran producir daños a la población susceptible, el peligro alto corresponde a valores que podrían provocar daños debido a su intensidad, y finalmente el peligro muy alto corresponde a valores extraordinarios que tienen como consecuencia daños potencialmente graves. Estos valores corresponden también a la baja probabilidad de que ocurra un evento al superar los umbrales establecidos por los percentiles. Los valores de los índices de peligro que se asignarán se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6 Tabla de niveles de alerta de peligro y el valor asociado al mismo. (CENEPRED, 2015)

Nivel de alerta de peligro	Valor de peligro
Peligro bajo	$0.035 = P < 0.068$
Peligro medio	$0.068 = P < 0.134$
Peligro alto	$0.134 = P < 0.260$
Peligro muy alto	$0.260 \leq P < 0.503$

Para obtener el valor del peligro para cada uno de los sitios, es necesario conocer el valor de las variables para cada uno punto. Este proceso se realizó con Python. Se abrieron dos archivos, uno que contenga los valores de las variables meteorológicas y otro en el cual se encuentren los percentiles que establecen los umbrales relativos. Mediante la comparación entre el valor y la proximidad o lejanía al umbral, fue posible obtener un valor de peligro.

Por ejemplo, si el valor de temperatura máxima es de 30°C y el P80 también es de 30°C, al ser ambos valores iguales, el nivel de peligro para este caso se consideraría peligro medio (como se especifica en la sección de *Cálculo de umbrales de peligro*). Además, dado que el valor es exactamente igual al P80, su valor cuantitativo sería de 0.068.

5.2.6 Cálculo de riesgo

Una vez identificado el índice de la vulnerabilidad y calculado los índices de peligro de acuerdo con los umbrales relativos establecidos mediante el uso de percentiles para cada una de las variables es posible conocer el riesgo asociado a los fenómenos hidrometeorológicos. Se usó la definición de riesgo del capítulo 3.

El riesgo incluye factores sociales, económicos, ambientales y climáticos, lo que convierte en un índice adecuado para conocer las posibles alteraciones a las que una determinada población puede enfrentarse debido al impacto de algún fenómeno hidrometeorológico perturbador. A diferencia de definiciones que incluyen la exposición en el cálculo de riesgo, en este caso la vulnerabilidad ya incluye el grado de exposición de las poblaciones. Por lo tanto, el cálculo del riesgo se obtiene únicamente mediante el producto entre los valores cuantitativos de peligro y vulnerabilidad:

$$\text{Riesgo} = \text{Peligro} * \text{Vulnerabilidad}$$

Este proceso se realizó mediante el uso de Python, utilizando los valores de peligro y vulnerabilidad calculados previamente mediante la librería Pandas. El archivo de salida en formato CSV incluye el nombre de la estación, su posición geográfica y los valores de riesgo.

El resultado de este producto da como resultado un valor que indica el riesgo al que se expone un punto dado ante cierta circunstancia, los cuales serán los fenómenos hidrometeorológicos medidos mediante el uso de variables meteorológicas (tmax, tmin y pp).

El riesgo obtenido, se puede interpretar de acuerdo con el valor que da como resultado el producto de vulnerabilidad y peligro, con la tabla 7.

Tabla 7 Grado de riesgo según su valor cuantitativo (CENEPRED, 2015).

Riesgo muy alto	Riesgo alto	Riesgo medio	Riesgo bajo
$0.068 \leq R < 0.253$	$0.018 = R < 0.068$	$0.005 = R < 0.018$	$0.001 = R < 0.005$

En la Tabla 8 se puede observar de manera simplificada el comportamiento de esta función cuando existen diferentes valores de vulnerabilidad y de peligro.

Tabla 8 Método simplificado para cálculo de riesgo. (CENEPRED, 2015)

Método de cálculo de riesgo				
Peligro muy alto	Riesgo alto	Riesgo alto	Riesgo muy alto	Riesgo muy alto
Peligro alto	Riesgo medio	Riesgo alto	Riesgo alto	Riesgo muy alto
Peligro medio	Riesgo medio	Riesgo medio	Riesgo alto	Riesgo alto
Peligro bajo	Riesgo bajo	Riesgo medio	Riesgo medio	Riesgo alto
	Vulnerabilidad baja	Vulnerabilidad media	Vulnerabilidad alta	Vulnerabilidad muy alta

5.2.7 Representación gráfica

A continuación, se abordará la representación gráfica del riesgo asociado a los fenómenos hidrometeorológicos. Una vez que los cálculos previos (vulnerabilidad, peligro y riesgo) han sido realizados, se vuelve crucial poder plasmar los grados de riesgo de manera visual para lograr una comprensión más clara y efectiva.

Para lograr una representación objetiva, e independiente del fenómeno o la variable a representar, se optó por el uso de la misma escala de colores para los tres riesgos calculados en esta investigación. Esta codificación cromática establecida representa con color verde el riesgo bajo, con color amarillo el riesgo medio, con color naranja el riesgo alto, y, por último, con color rojo se denota el riesgo muy alto. Además, se implementó un elemento visual adicional: los símbolos correspondientes a las localizaciones tendrán un diámetro mayor según el grado de riesgo asociado, con el propósito de resaltar de manera efectiva las zonas que presentan un riesgo mayor.

Este enfoque usado para la representación gráfica representa más bien un método simple pero efectivo de conocer el grado de riesgo de acuerdo con la localización, con especial consideración para todas aquellas personas que no sean expertas en el tema, sin embargo, se hace la aclaración de que este método puede que no sea el más adecuado según las

circunstancias que se traten de abordar. Por lo cual, se incita a que, si esta metodología se deseara aplicar de manera operativa o con algún otro enfoque, se busque una estrategia más dinámica o alguna otra que logre representar de mejor manera los grados de riesgo según los objetivos de dicha aplicación. Los mapas fueron generados utilizando el archivo de riesgo mediante el uso de QGIS. Para comodidad de los lectores, en los anexos se incluyen los mapas con mayor tamaño y calidad.

6 Resultados

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos tras la aplicación de la metodología para conocer el riesgo por fenómenos hidrometeorológicos descrita en el capítulo anterior. Se hizo el cálculo de este para diferentes eventos extremos que acontecieron a lo largo del período 2020-2022 mediante el uso de datos de vulnerabilidad, umbrales de peligro y las variables meteorológicas extraídas del sistema SREF.

Se realizó un análisis de los fenómenos hidrometeorológicos extremos más representativos para México que pudieran ser observados mediante el uso de variables meteorológicas. Como método de comparación de los alertamientos por riesgo generados se contrastaron directamente con mapas de observaciones diarias de precipitación acumulada a 24 horas, temperatura máxima y temperatura mínima generados por el SMN, así como noticias de diferentes fuentes e información gubernamental sobre los efectos negativos que acontecieron debido al impacto de estos fenómenos, así como las características de vulnerabilidad propias de cada región. Los eventos a estudiar son olas de calor, frentes fríos y ciclones tropicales.

6.1 Riesgo por precipitación

21 de agosto de 2012 – Huracán Grace

El día 21 de agosto de 2012, el huracán “Grace” tocó tierra por segunda vez, impactando previamente la península de Yucatán el día 19 de agosto del mismo año, ingresando como un huracán de categoría 3 en la escala Saffir-Simpson con vientos máximos sostenidos de 201 km/h por la costa del Golfo de México entre las poblaciones de Tecolutla y Nautla en el estado de Veracruz, y posterior a su ingreso se debilitó rápidamente a huracán categoría 1. Se puede observar su trayectoria en la Figura 7.



Figura 7 Trayectoria huracán "Grace" de la fecha 13 de agosto de 2021 a 21 de agosto de 2021.

Como consecuencia del paso de este ciclón hubo deslaves, inundaciones, caídas de árboles, bloqueos de caminos, encharcamientos y diversos daños en varios municipios de los estados de Veracruz, Puebla y Hidalgo.

Hubo daños considerables en al menos 22 municipios del estado de Veracruz, algunos de estos fueron Cerro Azul, Atzalan, Martínez de la Torre, Tuxpan, Poza Rica, Tecolutla, Las Vigas, Papantla, entre otros (El Financiero, 2021). Se reportaron 8 muertos debido al paso del ciclón en la entidad, 7 de ellos en la capital Xalapa, y uno en Poza Rica (Corro, 2021). Otra de las consecuencias del fenómeno hidrometeorológico fue el desborde de ríos (Más Noticias, 2021). Se requirió el apoyo del ejército mexicano, el cual aplicó el Plan DN-III-E en su fase de auxilio en Veracruz realizando actividades de remoción de escombros, lodo y limpieza (Valencia, 2021).

En el estado de Puebla, de acuerdo con el medio de información El Milenio (Milenio, 2021c; Milenio, 2021d; Milenio, 2021b) falleció una persona en el municipio de Huauchinango debido a la caída de un árbol y en la localidad de Tlaola se registraron dos fallecimientos. También, se reportaron deslaves e inundaciones en el estado

Otra entidad de México afectada por el huracán "Grace" fue Hidalgo, donde se declaró zona de desastre en al menos 27 municipios, algunos fueron: Calnali, Chapulhuacán, Cuautepec de Hinojosa, Huehuetla, Huejutla de Reyes, Mineral de la Reforma, San Felipe Orizatlán, Tenango de Doria, Tulancingo de Bravo, Zacualtipán de Ángeles, entre otros. (Rosas, 2021). A su vez, también se reportaron inundaciones, daños en estructuras, caídas de árboles y el desbordamiento de un río en Tulancingo (Milenio, 2021a).

En el mapa de precipitación acumulada de 24 horas para México que se observa en la Figura 8, se registraron acumulados de precipitación de entre 35 mm a más de 100 mm debido a este fenómeno hidrometeorológico de forma generalizada para los estados de Veracruz, Hidalgo, San Luis Potosí, Guerrero, Michoacán, Colima, Tamaulipas, entre otras entidades de la región central y suroeste. Los valores de precipitación alcanzaron un máximo de 258 mm en Atlapexco, Hidalgo; 148.2 mm en Naranjos, San Luis Potosí; y un acumulado de 140 mm para la localidad de Huejutla, Hidalgo.

De manera análoga, el mapa de riesgo por precipitación acumulada a 24 horas generó alertas de “riesgo medio” en la zona central del país, mientras que en las regiones que presentaron mayores acumulados se pudieron registrar alertas de “riesgo alto”. Es apreciable que solo en algunos puntos cuyas circunstancias lo requirieron se generaron alertas de “riesgo muy alto”, estas localizaciones son cercanas a los lugares donde se registraron las precipitaciones máximas acumuladas para ese día. Un 14.82% (212) de los alertamientos generados de riesgo alto y solo 0.55% (8) alertamientos de riesgo muy alto, como se puede observar en la Figura 8.

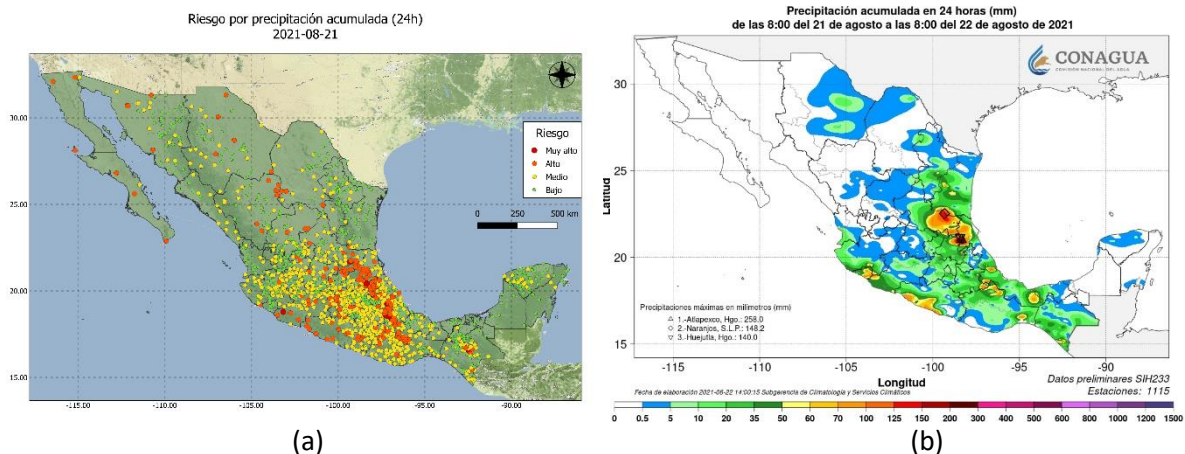


Figura 8 Comparativo del mapa de riesgo por precipitación acumulada de 24 horas (a) y del mapa de la precipitación observada (b) para el día 21 de agosto de 2021.

12 de mayo de 2021 – frente frío No. 56

El día 10 de mayo del 2021 ingresó por el noroeste de México el frente frío No. 56, tuvo una duración de 5 días, del 10 al 15 de mayo. De acuerdo con la Secretaría de Marina (SEMAR, 2021), durante su trayecto interactuó con un canal de baja presión y la corriente de chorro subtropical originando fuertes rachas de viento y lluvias fuertes. Este suceso continuó durante

dos días, cuando el 12 de mayo provocó lluvias puntuales, a causa de una nueva interacción en la atmósfera superior con una inestabilidad y la corriente en chorro subtropical, en los estados de San Luis Potosí, Querétaro, Hidalgo, Puebla y Veracruz, también generó lluvias intensas en el norte, noreste, centro y oriente del país, afectando a su vez al valle de México.

Debido a este suceso, la ciudad de México activó su Alerta Roja para prevenir a la población de los distintos daños que la intensa lluvia podría provocar (UnoTV, 2021b). El día siguiente, 13 de mayo de 2021 se activó el Protocolo de operación Conjunta en los municipios de La Paz, Ixtapaluca, Valle de Chalco, Ecatepec y Tultitlán para optimizar la operación de la infraestructura del drenaje debido a que al menos 60 viviendas reportaron afectaciones debido a las precipitaciones registradas por el paso de este frente frío (Navarro, 2021), también la carretera México-Puebla se inundó debido a las fuertes lluvias (Carrasco, 2021).

En la Figura 9 se observan la precipitación acumulada de 24 horas para el día 14, la cual muestra valores máximos de 158 mm para la población de San Felipe Usila en el estado de Oaxaca, 157 mm en Tomata en Veracruz, y en Xalapa, Veracruz una precipitación acumulada de 155 mm. Además, es notable que de manera generalizada en las áreas impactadas por la lluvia se presentan precipitaciones con valores que oscilan entre 5 mm y 35 mm, aunque también hay regiones aisladas en los estados de Veracruz, Oaxaca, Chiapas y Tabas con valores superiores a los 70 mm.

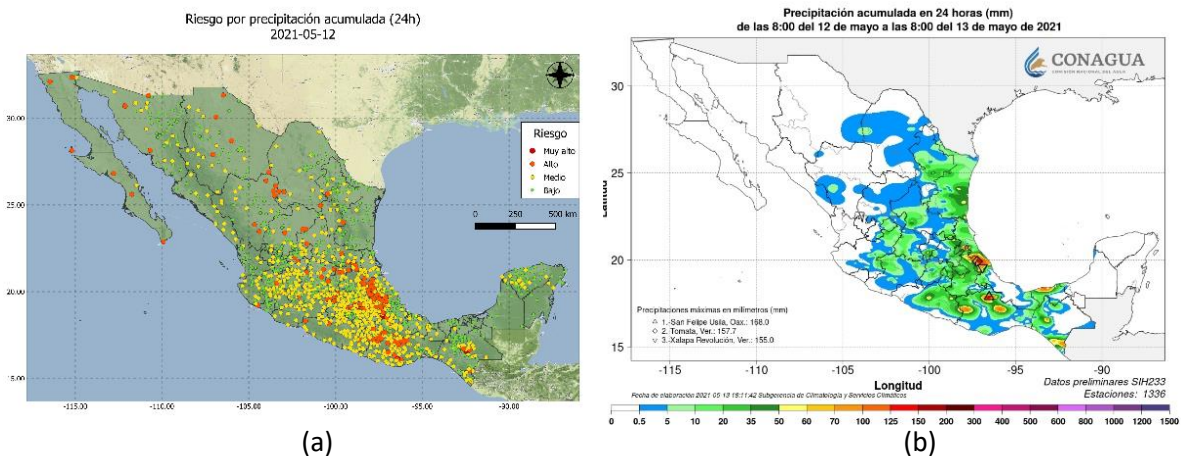


Figura 9 Comparativo del mapa de riesgo por precipitación acumulada de 24 horas (a) y del mapa de la precipitación observada (b) para el día 12 de mayo de 2021.

El porcentaje de alertamientos generado por la metodología fue de 10.62% (152) para alertamientos de riesgo alto y de 0.2% (3) de alertamientos por riesgo muy alto, como se puede observar en la Figura 9. Estos alertamientos se localizaron principalmente en los

estados de Hidalgo, Puebla, Veracruz y Tlaxcala, aunque los 3 alertamientos de riesgo muy alto se localizaron en San Mateo Río Hondo en Oaxaca, Amatenango del Valle en el estado Chiapas y la localidad de Vicente Guerrero ubicada en Puebla.

21 de junio de 2022 – Tormenta tropical “Celia”

Ubicándose a 450 km al sureste del río Suchiate, el 17 de junio de 2022 a partir de la depresión tropical “Tres-E” se desarrolló la tormenta tropical “Celia”, su trayectoria se puede observar en la Figura 10. En interacción con un canal de baja presión sobre el sureste del país y una zona de baja presión sobre el occidente del Mar Caribe provocaron lluvias sobre la península de Yucatán y el sureste de México (CONAGUA, 2022). En los días posteriores continuó generando precipitaciones. El día 21 de junio se intensificó nuevamente, debido a que en días pasados fue clasificado como depresión tropical, con vientos sostenidos de 65 km/h y rachas de 85 km/h en combinación con un canal de baja presión y la onda tropical No. 6 generó lluvias de muy fuertes a puntuales torrenciales en la región occidente, oriente, sur y sureste del país de acuerdo con CONAGUA.



Figura 10 Trayectoria tormenta tropical "Celia" del día 16 al 28 de junio de 2022. Fuente: CONAGUA.

De acuerdo con el medio informativo Prensa Latina (Prensa Latina, 2022), el paso de esta tormenta tropical provocó intensas lluvias, inundaciones, deslizamientos que afectaron a tres

escuelas y sietes viviendas, y también, deslaves en carreteras del estado de Oaxaca. Las inundaciones también afectaron a la Cuenca de Papaloapan, y a algunas localidades del municipio de Actopan, Veracruz quedaron incomunicadas debido al desbordamiento de ríos. Los efectos asociados al paso de la tormenta tropical “Celia” provocaron el fallecimiento de una persona en el estado de Oaxaca y daños a viviendas (El Financiero, 2022)

Las precipitaciones acumuladas a 24 horas observadas para la república mexicana para el día 21 de junio de 2022 fueron principalmente en la región sur y este del país. Los máximos registrados fueron para la localidad de Jaltipan, Veracruz con 163 mm de precipitación acumulada, 160.7 mm para Tepango de Rodríguez, Puebla y Cosautlán de Carvajal, Veracruz con un acumulado de 160.2 mm. Ese día las precipitaciones acumuladas se registraron especialmente en el estado de Veracruz con valores mayores a 50 mm para la mayor parte de la entidad.

En la Figura 11, el mapa que muestra el riesgo por precipitación acumulada a 24 horas presenta un 11.88% (170) correspondiente a alertamientos por riesgo alto y solo un 1.67% (24) corresponde a alertamientos por riesgo muy alto. La mayor parte de alertamientos se encuentran en el estado de Veracruz, Oaxaca, Chiapas y Guerrero, así como otros diseminados al norte de la república mexicana.

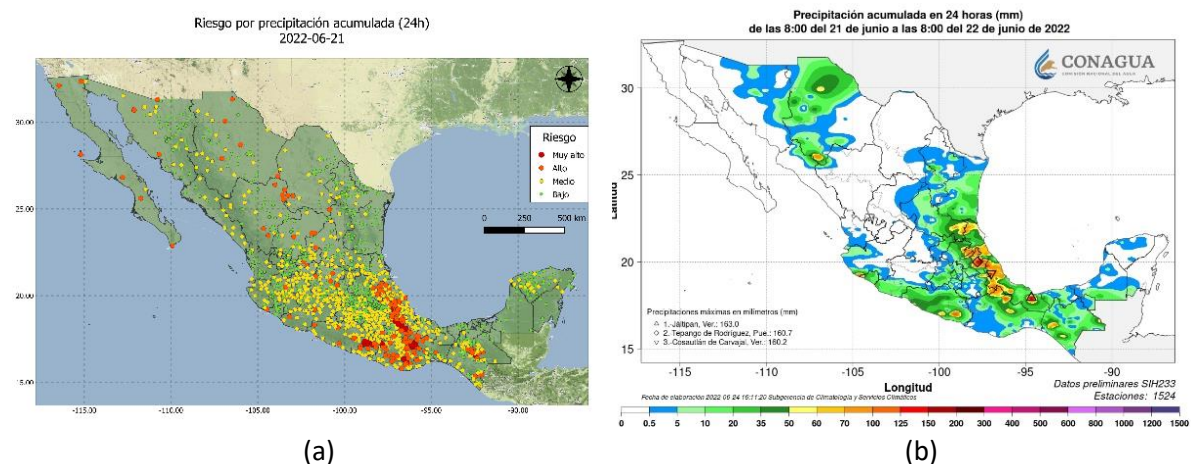


Figura 11 Comparativo del mapa de riesgo por precipitación acumulada de 24 horas (a) y del mapa de la precipitación observada (b) para el día 22 de junio de 2022.

6.2 Riesgo por temperaturas altas

9 de mayo de 2022 – Cuarta ola de calor 2022

Mayo de 2022 se situó como el primero de los mayos más cálidos, de acuerdo con el período de registro del año 1953 al 2022 (SMN, 2022), en él se registraron la tercera (3 al 7 de mayo) y cuarta (9 al 19 de mayo) ola de calor. El día elegido para representar el riesgo por temperaturas altas fue el 9 de mayo de 2022. De acuerdo, con el reporte de Temperaturas Naturales Extremas de la semana epidemiológica 19 (Secretaria de Salud, 2022a), que corresponde del día 9 de mayo al 15 de mayo, se reportaron 41 casos de golpes de calor, deshidratación y quemaduras solares, que se presentaron en los estados de Baja California, Campeche, Chihuahua, Coahuila, Hidalgo, Michoacán, Oaxaca, Quintana Roo, Sonora, Tabasco, Tamaulipas y Yucatán. También se reportaron 2 fallecimientos, uno en el estado de Campeche y el otro en Quintana Roo.

El día 9 de mayo de 2022 se presentaron temperaturas máximas con valores de hasta 45.8°C en el Puente Mezcal en el estado de Guerrero y 45°C en Francisco Zarco en Durango y en Jalpan en la entidad de Querétaro. De manera generalizada se observan temperaturas superiores a los 25° C a lo largo de todo el país con excepción de la península de Baja California. Este evento fue originado por un sistema anticiclónico cercano a la república mexicana.

Los alertamientos por riesgo alto por temperaturas altas para la república mexicana fueron un 42.65% (610), también se generaron un 9.37% (134) de alertamientos por riesgo muy alto debido a las temperaturas tan altas alcanzadas en este día, lo que significa que más de la

mitad del país se encontraba en riesgo alto o muy alto, como se puede observar en la Figura 12.

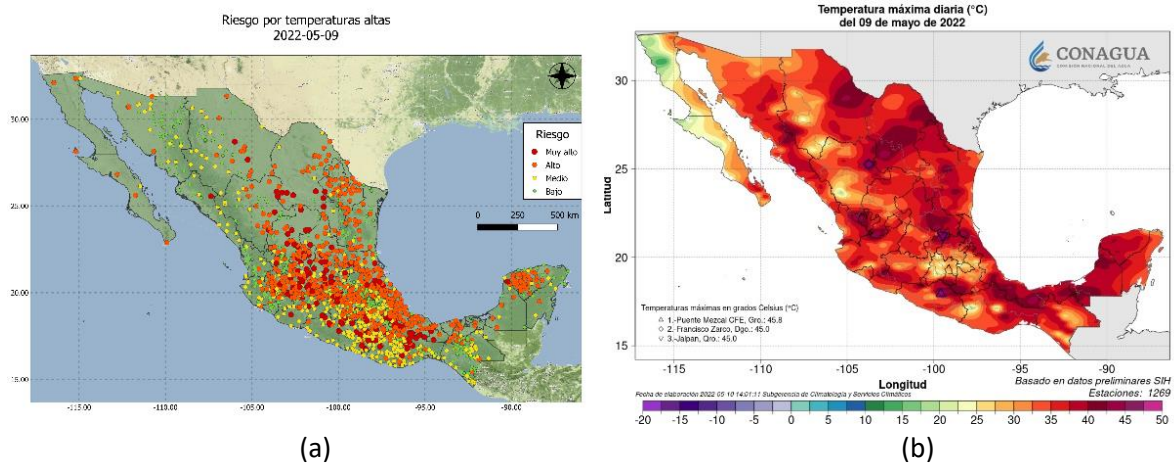


Figura 12 Comparativo del mapa de riesgo por temperaturas (a) y del mapa de temperatura máxima observada (b) para el día 09 de mayo de 2022.

Al mismo tiempo, el mapa de riesgo por temperaturas altas muestra de manera generalizada alertas de “riesgo medio”, y como fue mencionado anteriormente, casi un tercio de las alertas corresponden a mayores que “riesgo alto”. Las alertas de “riesgo muy alto” corresponden en ubicación con los puntos donde se registraron más altas temperaturas pero que, a su vez, eran más susceptibles y tenían mayor vulnerabilidad. Se puede señalar la manera en que se distribuyen las alertas, con alertas de “riesgo medio” o inclusive “riesgo bajo” en las zonas donde las temperaturas fueron menores.

17 de abril de 2022 – Segunda ola de calor 2022

El segundo evento para representar el riesgo para temperaturas altas fue la segunda ola de calor de 2022. La segunda ola de calor del año 2022 tuvo fecha desde el 14 al 20 de abril. Abril de 2022 se situó como el segundo abril más cálido del período del año 1953 al año 2022 (SMN, 2022). De acuerdo con el reporte de Temperaturas Naturales Extremas (Secretaría de salud, 2022b) en la semana epidemiológica 15 (11 al 17 de abril) se presentaron 34 casos relacionados al calor extremo que se vivió en esas fechas, lo cual provocó golpes de calor y deshidratación, presentándose en los estados de Baja California Sur, Campeche, Chiapas, Jalisco, Michoacán, Oaxaca, Sonora, Tabasco y Veracruz.

La temperatura máxima observada para el día 17 de abril de 2022 registró máximos de 45.5°C para el estado de Guerrero, en la población de Puente Mezcal, 45°C en Jesús María en Nayarit, así como 44.5°C para Tequesquitengo en el estado de Morelos. La temperatura predominante en todo el territorio mexicano superaba los 25°C, alcanzando valores generalizados mayores de 30°C, como se puede observar en la Figura 13.

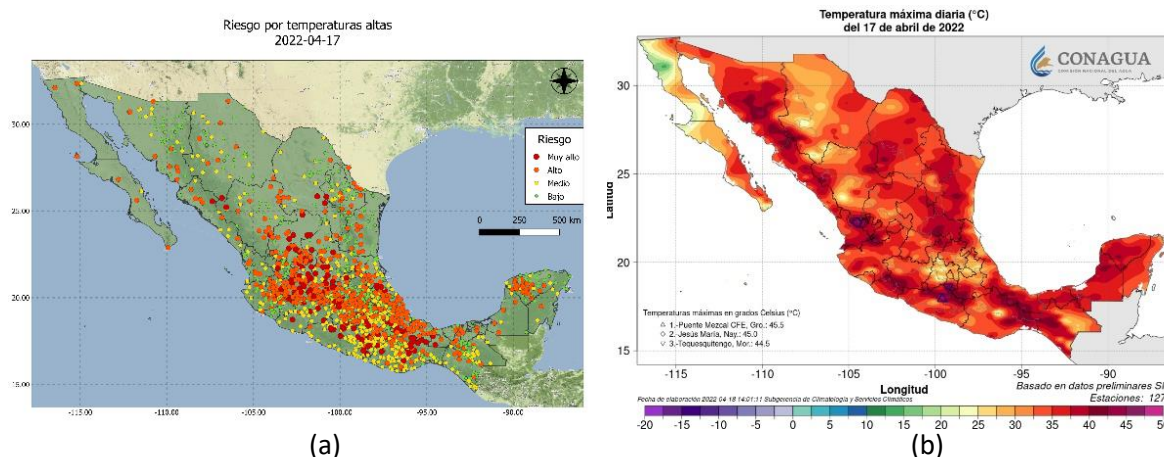


Figura 13 Comparativo del mapa de riesgo por temperaturas (a) y el mapa de temperatura máxima observada (b) para el día 17 de mayo de 2022.

El porcentaje de alertamientos de riesgo alto para el día 17 de abril fue de 36.71% (525), mientras que el porcentaje de alertamientos para riesgo muy alto fue de 8.74% (125), la suma de estos dos supone un 45% aproximadamente de la cantidad de puntos a los cuales se les genera alertas. Las alertas de riesgo alto y muy alto tuvieron principal presencia en la zona centro del país, con especial enfoque en los estados de Veracruz, Tamaulipas, Guerrero, Oaxaca, Puebla, México, Jalisco, Nayarit, así como alertamientos de riesgo muy alto en Nuevo León, Zacatecas, Sonora y Durango.

23 de abril de 2020

Abril de 2020 registró temperaturas altas históricas registrando valores superiores a los 40°C en la península de Yucatán durante más de 15 días, la razón principal de este mes tan caluroso se debió a un sistema de alta presión, la falta de humedad y la temperatura de las aguas del Golfo de México (BBC, 2020). Las temperaturas para el día 23 de abril de 2020 fueron bastante altas, alcanzan valores en el estado de Oaxaca de 47°C en las localidades de Rio Manso Lalana y San Felipe Usila, mientras que en la localidad de Presidente Alemán se observaron valores de 46°C de temperatura máxima.

Para el día 23 de abril de 2020, la cantidad de alertamientos que correspondían a riesgo alto o muy alto debido a las temperaturas altas fue de un 37% aproximadamente del total, siendo 33.14% (474) alertas de riesgo alto y 4.96% (71) de riesgo muy alto. Las alertas de riesgo alto se localizaron principalmente en la costa del golfo de México, así como alertamientos de riesgo muy alto con principal presencia en las cercanías de la frontera de Oaxaca y Veracruz. También se registraron alertamientos de riesgo alto en distintos puntos del territorio mexicano, como lo son los estados de Michoacán, Guerrero, Guanajuato, San Luis Potosí, Yucatán, Sonora, entre otros, como se puede observar en la Figura 14.

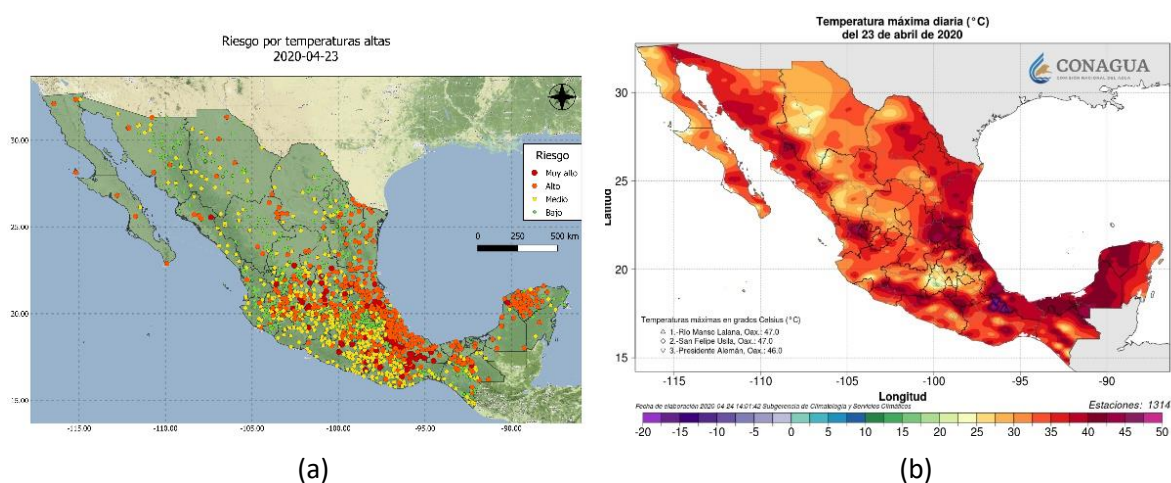


Figura 14 Comparativo del mapa de riesgo por temperaturas (a) y del mapa de temperatura máxima observada (b) para el día 23 de abril de 2020.

6.3 Riesgo por temperaturas bajas

14 de febrero de 2021 – Frente frío No. 35

El frente frío No. 35 ingresó por el noroeste del país la tarde del 10 de febrero y tuvo una duración de 10 días. Fue uno de los frentes más intensos de la temporada, ocasionando rachas fuertes de viento frente a las costas de Tamaulipas y Veracruz, así como oleaje elevado en las costas del centro del Golfo de México. Fue considerado un evento de “Norte muy fuerte” (SEMAR, 2021). El paso de este frente frío generó un total de 20 muertes en la zona norte del país (Infobae, 2021). Las muertes fueron causadas por hipotermia, accidentes causados por el hielo e intoxicación. Otras consecuencias del sistema frontal fueron los cortes eléctricos y apagones, lo que también desencadenó en la falta de agua y afectaciones a diversas empresas y sus trabajadores.

El paso del frente frío No 35 y la novena tormenta invernal, impulsadas por una masa de aire ártico, provocó un grave descenso en las temperaturas el día 14 de febrero de 2021. Los valores más bajos de temperatura se obtuvieron en Guanaceví, Durango con valores de -9°C , como se observa en la Figura 15.

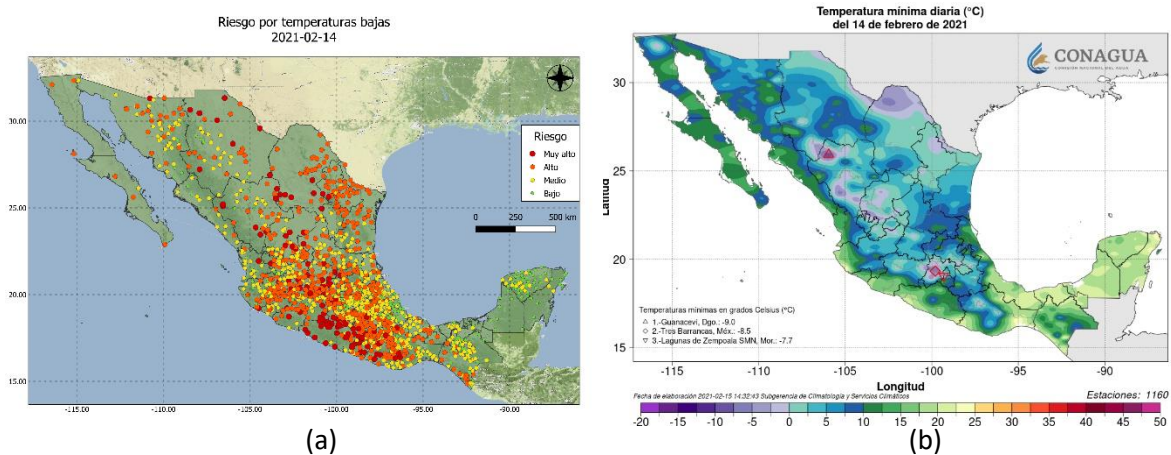


Figura 15 Comparativo del mapa de riesgo por temperaturas bajas (a) y del mapa de temperatura mínima observada diaria (b) para el día 14 de febrero de 2021.

Este día, en el riesgo por temperaturas bajas se obtuvieron un 47% de alertas con “riesgo alto” o “riesgo muy alto”. Las temperaturas bajas afectaron principalmente a la zona centro y norte del país, donde se identificaron localizaciones con “riesgo muy alto” en lugares donde la temperatura mínima registró valores menos de 0°C . Al mismo tiempo, en ciudades de los estados de Guerrero y Michoacán que, aunque no mostraron temperaturas tan bajas como en otros puntos del país, debido a las condiciones de vulnerabilidad y umbrales históricos de peligro del sitio se generaron alertas de “riesgo muy alto”.

1 de enero de 2021 – Frente frío No. 24

El sistema frontal No. 24 en conjunto con la quinta tormenta invernal que interactuaba con las corrientes en chorro polar y subtropical provocaron una disminución de la temperatura al norte del territorio mexicano, así como el Valle de México (MiMorelia.com, 2021). Debido al paso del frente frío No. 24, la Secretaría de Gestión Integral de Riesgo y Protección Civil activó la Alerta Roja en la ciudad de México (Uno TV, 2021a). El mes de enero, presentó el mayor número de frentes del período invernal 2020-2021 con un total de 9 sistemas frontales de los 57 que afectaron a ese período (SMN, 2021). Este sistema frontal generó afectaciones

en 16 municipios del Estado de Veracruz, entre las que destacan 920 viviendas destechadas, derrumbes, caídas de bardas, árboles caídos (Cancino, 2021).

El día 1 de enero de 2021 se observó una disminución de la temperatura que resaltó especialmente en los estados de Chihuahua, Durango, Zacatecas y Coahuila, las tres localidades con la temperatura más baja registrada para el primer día del primer mes del año fue en Navíos Viejos, Durango con -14.5°C ; Cumbres de Majalca, Chihuahua con -13.5°C ; y Guanacevit, Durango con -13°C . Sin embargo, las temperaturas mínimas registradas en esas entidades alcanzaron valores bajo 0 en gran parte de su territorio. En el valle de México también se observaron temperaturas bajas con valores inferiores a 10°C , como se aprecia en la Figura 16.

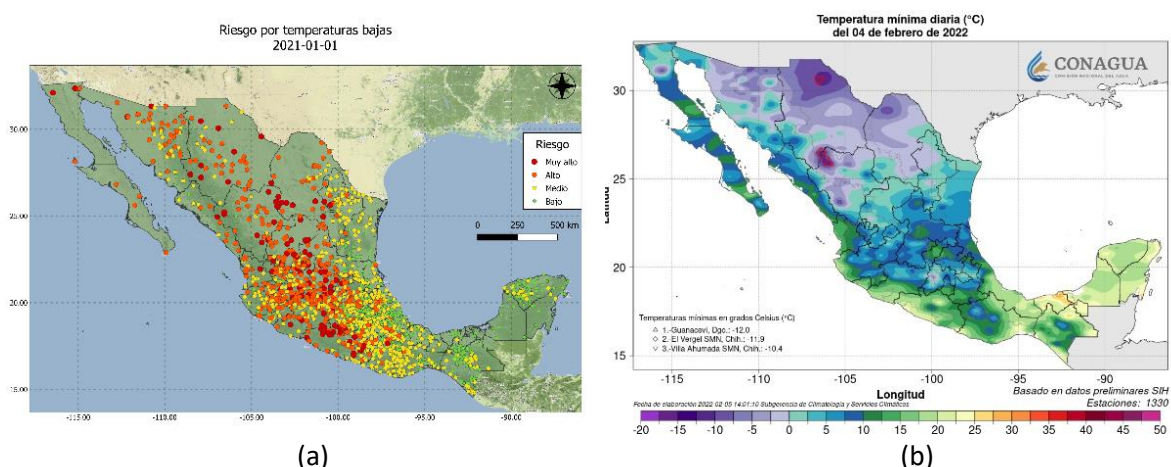


Figura 16 Comparativo del mapa de riesgo por temperaturas bajas (a) y del mapa de temperatura mínima observada diaria (b) para el día 1 de enero de 2021.

Los alertamientos por riesgo de temperaturas bajas de riesgo alto y riesgo muy alto para este fenómeno se observaron principalmente al norte del país en los estados de Chihuahua, Durango, Coahuila, Zacatecas, entre otros. Así como también se observó en la zona central del país en CDMX, el estado de México, Michoacán, Guerrero, entre otros. El porcentaje de alertamientos de riesgo alto fue de 26.08% (373), mientras que de riesgo muy alto fue de 7.06% (101) de los alertamientos, por lo que un 33% del país presentó alertamientos de riesgo alto o muy alto.

4 de febrero de 2022 – Frente frío No. 28

El frente frío no. 28 se mantuvo estacionario desde el 31 de diciembre en el noreste de México, para posteriormente moverse gradualmente hacia el oriente del territorio mexicano,

impulsado por su masa de aire polar en conjunto con la quinta tormenta invernal, ocasionando un descenso de la temperatura, precipitaciones, oleaje elevado, y fuertes rachas de viento, lo que provocaron la volcadura de ocho tráileres en Oaxaca (Infobae, 2022).

Se registraron temperaturas mínimas observadas con valores bajos para Durango con -12°C en Guanacevi, mientras que, en Chihuahua, en las poblaciones de El Vergel y Villa Ahumada se observaron temperaturas de -11.9°C y -10.4°C correspondientemente. En los estados de Coahuila, Chihuahua, Durango, Baja California y Sonora, así como el estado de México se registraron temperaturas por debajo de 0°C . En contraste, las temperaturas en el resto del país permanecieron con valores superiores a los 5°C , y en zonas del sur del territorio mexicano, así como la península de Yucatán registraron temperaturas superiores a los 15°C , como se aprecia en la Figura 17.

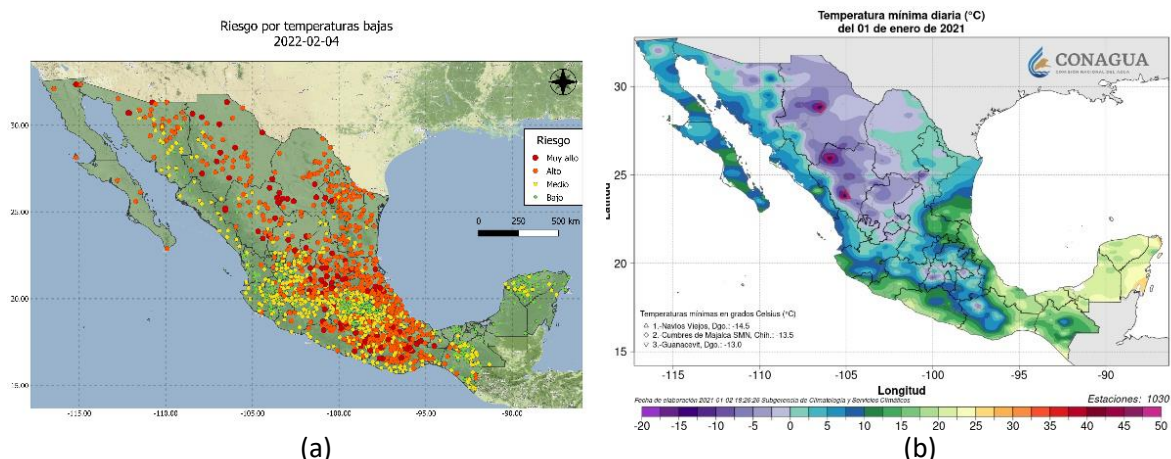


Figura 17 Comparativo del mapa de riesgo por temperaturas bajas (a) y del mapa de temperatura mínima observada diaria (b) para el día 4 de febrero de 2022.

Debido al sistema frontal No. 28 un 39% (562) de los alertamientos generados para riesgo por temperaturas bajas alcanzaron el valor de riesgo alto, y un 6% (99) alcanzó el estatus de riesgo muy alto para la república mexicana. Los alertamientos de riesgo muy alto se presentan principalmente en los estados de Chihuahua, Sonora, Baja California, Coahuila, Durango, Zacatecas, Guanajuato, Guerrero, Oaxaca, Veracruz, entre otros. La cantidad de alertamientos de riesgo bajo es muy pequeña en comparación con la cantidad de alertamientos por riesgo alto o muy alto.

7 Discusión, conclusiones y limitaciones

7.1 Discusión

La presente sección de discusión tiene como objetivo analizar y profundizar en los resultados obtenidos en el marco de esta investigación, con el fin de comprender su relevancia y contribución al campo de estudio. En esta investigación, se aplicó la metodología propuesta para diversos eventos hidrometeorológicos severos del período 2020-2022, bajo la propuesta de analizar el riesgo por temperaturas altas, riesgo de temperaturas bajas y riesgo por precipitación acumulada a 24 horas. Los fenómenos que se estudiaron fueron principalmente frentes fríos, tormentas invernales, ciclones tropicales y olas de calor.

En primera instancia, para riesgo por precipitación acumulada se estudiaron los fenómenos del huracán “Grace”, el frente frío No.56 de la temporada 2020-2021 y la tormenta tropical “Celia”.

El huracán “Grace” que impactó el 21 de agosto de 2021 causó daños significativos en varios municipios de los estados de Veracruz, Puebla e Hidalgo. Provocando deslaves, inundaciones, caídas de árboles y bloqueos de caminos, lo que resultó en el daño de infraestructuras y pérdidas humanas.

El frente frío No. 56 que ocurrió del 10 al 15 de mayo de 2021, generó fuertes lluvias en los estados de San Luis Potosí, Querétaro, Hidalgo, Puebla y Veracruz, así como en el Valle de México. Se activó la Alerta Roja en la Ciudad de México y se implementaron protocolos para gestionar las afectaciones causadas por las precipitaciones.

En cuanto a la tormenta tropical “Celia”, que se intensificó el 21 de junio de 2022, provocó lluvias intensas, inundaciones y deslizamientos en Oaxaca y Veracruz. Hubo daños a viviendas y una persona falleció debido a las condiciones meteorológicas adversas.

En el caso de los alertamientos de riesgo por precipitación acumulada para estos 3 eventos, la cantidad de alertamientos de riesgo alto o riesgo muy alto fue considerablemente menor que la cantidad de alertamientos por temperaturas altas o bajas. Pero, en los 3 casos estudiados, los alertamientos no solo respondieron a la ubicación donde se observaron la mayor cantidad de precipitaciones acumuladas, sino que también lo fueron en aquellos lugares que sufrieron las consecuencias del paso de estos fenómenos. Los alertamientos de

riesgo alto o muy alto, al ser el resultado de la interacción de la vulnerabilidad con el peligro, identifican de manera adecuada los lugares que más probabilidad tenían de sufrir alguna perturbación debida a los fenómenos que impactaron a México.

Sin embargo, al compararlo con las observaciones existieron puntos donde a pesar de que se generaron alertamientos de riesgo alto o muy alto no se registraron valores de precipitación para ciertas zonas. Esto puede deberse principalmente a las salidas del modelo numérico presentan errores que pueden deberse a diferentes factores, especialmente en variables cercanas a la superficie. Estos errores son principalmente debidos a la incapacidad de los modelos numéricos para resolver fenómenos de pequeña escala y a las limitaciones en la representación de procesos físicos mediante las parametrizaciones (Righetti et al., 2019). Esto mismo ocurre también para otras variables como temperatura máxima o temperatura mínima.

Para riesgo por temperaturas altas, se estudiaron olas de calor y días atípicamente calurosos. Los eventos de ola de calor, como la segunda ola de calor de abril de 2022 y la cuarta ola de calor de mayo de 2022, generaron impactos significativos en diferentes estados del país. Estos eventos resaltan los riesgos asociados con las altas temperaturas y la exposición prolongada al calor extremo.

Durante estos eventos de calor extremo, se reportaron numerosos casos de golpes de calor, deshidratación y quemaduras solares, así como fallecimientos relacionadas con las altas temperaturas. Esto destaca la importancia de tomar medidas preventivas y brindar información y recursos adecuados para proteger la salud y el bienestar de la población.

Las temperaturas máximas registradas durante estos eventos de calor extremo alcanzaron valores extremadamente altos, superando los 45°C en varias regiones del país. Estas temperaturas excepcionales tienen implicaciones tanto para la salud humana como para otros campos como la agricultura, la ganadería y otros sectores económicos (Herrera-Alanís, 2012; López-Díaz, 2004).

Las alertas de riesgo alto y muy alto se concentraron en áreas específicas del país, y con los mapas de riesgo por temperaturas altas funcionan como herramientas útiles para identificar las áreas con mayor probabilidad de sufrir los efectos del calor extremo. Estos mapas, al ser

personalizados con las condiciones de vulnerabilidad para cada sitio y el peligro, el cual es función de la información climática de cada uno de los lugares para los cuales se generan los alertamientos, provoca que los alertamientos por riesgo alto o muy alto no solo sean donde se presentan temperaturas máximas severamente altas, en cambio, los alertamientos responden a cuando los sitios se enfrenten a temperaturas anómalas de acuerdo al clima del lugar.

Los patrones de distribución geográfica de las alertas y los registros de temperaturas altas resaltan la importancia de considerar las características geográficas y climáticas específicas de cada región.

Los últimos fenómenos analizados fueron por riesgo ante temperaturas bajas. Se analizó el frente frío No. 35 en febrero de 2021, el frente frío No. 28 en febrero de 2022 y el frente frío No. 24 en enero de 2021. Estos eventos provocaron una disminución drástica de la temperatura, provocando muertes por hipotermia, accidentes relacionados con el hielo e intoxicaciones. También generaron interrupciones en el suministro eléctrico, apagones y falta de agua, lo que afectó a diversas empresas y sus trabajadores.

Las regiones más afectadas por estos tres fenómenos y las bajas temperaturas se encuentran en el norte y centro del país, como Chihuahua, Durango, Coahuila, Zacatecas y el Valle de México. Estas áreas experimentaron temperaturas extremadamente bajas, con registros por debajo de 0°C, lo que resultó en alertas de riesgo alto y riesgo muy alto. Incluso en algunos lugares donde las temperaturas no fueron tan bajas, se generaron alertas de riesgo alto o muy alto debido a las condiciones de vulnerabilidad y peligro existentes en estos sitios.

Se debe tomar en cuenta que este sistema no pretende ser un sistema de alerta temprana, ya que como hace mención Llanos-Rodríguez (2020), la EIRD indica que, un sistema completo y eficaz de alerta temprana lo comprenden cuatro elementos: conocimiento de los riesgos, servicio de seguimiento y alerta, difusión, comunicación y capacidad de respuesta. Lo cual indica que, a pesar de que esta metodología funcione como herramienta para generar alertamientos y dar a conocer los riesgos a los que se enfrentan los diferentes sistemas que se estudian, requieren de un trabajo en conjunto con las autoridades. Por lo cual, esta metodología propuesta únicamente genera los alertamientos por riesgo ante fenómenos

hidrometeorológicos severos que pueden ser aprovechadas por los tomadores de decisiones en caso de que esta metodología sea aplicada de forma operativa.

La respuesta de las autoridades y los equipos de emergencia juegan un papel crucial para mitigar los impactos y brindar apoyo a las comunidades afectadas por el paso de estos fenómenos naturales. La cooperación y coordinación entre los diferentes niveles de gobierno, las instituciones y la sociedad son esenciales para hacer frente a los desafíos que plantean los fenómenos hidrometeorológicos. La preparación, la respuesta rápida y la recuperación efectiva requieren de un enfoque integral y colaborativo para proteger la vida y el bienestar de las personas afectadas.

Es necesario la implementación de medidas de prevención, concientización sobre los riesgos a los que estamos expuestos y la capacitación de profesionales para reconocer y tratar los efectos en la población. La difusión de información precisa y comprensible sobre los riesgos que enfrentamos, así como las medidas de prevención y protección, pueden empoderar a la población para tomar decisiones informadas y adoptar comportamientos seguros durante estos eventos extremos. Debido a que muchas veces, este tipo de eventos puede mostrar las desigualdades existentes en el país. Las comunidades en situación de vulnerabilidad, como aquellas con bajos ingresos, viviendas precarias o falta de acceso a servicios básicos, pueden enfrentar mayores dificultades para hacer frente a estos eventos hidrometeorológicos severos.

7.2 Conclusiones

A lo largo de esta investigación, se ha realizado una revisión de diversos trabajos y fuentes de información nacionales e internacionales. El objetivo principal fue desarrollar una metodología para el alertamiento por riesgos hidrometeorológicos en México. Dicha metodología debería tener en cuenta las condiciones de vulnerabilidad existente, así como los peligros asociados a las precipitaciones y temperaturas anómalas. Para lo cual, se logró cumplir con todos los objetivos propuestos.

La integración de fuentes de información libres, como datos de vulnerabilidad, peligros, observaciones meteorológicas y resultados de simulaciones numéricas, proporciona una visión más completa y precisa de los riesgos hidrometeorológicos. Además, el esquema de procesamiento de los datos permite un análisis e interpretación más óptimo, lo que permite

que los alertamientos de riesgo obtenidos complementen la toma de decisiones por parte de los mecanismos y organismos responsables. Esto garantiza que las decisiones se tomen de manera informada y oportuna ante situaciones de riesgo.

La metodología desarrollada para el alertamiento por riesgo hidrometeorológicos, ha demostrado ser efectiva para identificar y predecir los posibles daños a los que se encuentran expuestas las diferentes poblaciones, comparándolos con los efectos asociados a los fenómenos severos. El uso de esta metodología innovadora y útil como una herramienta objetiva que puede complementar de manera significativa las actividades actuales de monitoreo y prevención de fenómenos severos.

Es importante señalar que este sistema desempeñaría un papel relevante tanto para el público general como para los tomadores de decisiones y cualquier persona que necesite acceder a esta información. Esto se debe a que integra las condiciones particulares de las ubicaciones donde se generan las alertas, junto con los valores pronosticados por el modelo numérico, en este caso el sistema SREF. El resultado es un mapa operativo, objetivo e intuitivo que no requiere de conocimientos altamente especializados para su uso e interpretación. Sin embargo, en manos adecuadas, se podría convertir en una herramienta eficaz para la toma de decisiones.

Este sistema pretende impulsar el uso de sistemas operacionales que generen alertamientos basados en esquemas objetivos, evitando depender exclusivamente de la interpretación y el conocimiento empírico propio del operador. En este sentido, se busca establecer una base sólida fundamentada en la uniformidad y homologación de datos de vulnerabilidad y peligros. Esto permitirá determinar los grados de riesgo para cada ubicación específica.

Esta investigación tiene como propósito apoyar la construcción y el uso de datos cuantitativos, que a su vez posibiliten un análisis estadístico efectivo del estado actual y la evolución del riesgo en nuestro país, tanto a corto como a mediano plazo, así como ante posibles escenarios de cambio climático. Además, se enfatiza el valor de analizar los umbrales de peligros históricos como base para el cálculo del riesgo, permitiendo asociar de manera cuantitativa y cualitativa las variables de peligro a umbrales relativos, lo cual agrega valor al análisis de riesgos.

En conclusión, la metodología para el alertamiento por riesgos hidrometeorológicos en México ha mostrado ser efectiva en la identificación de posibles riesgos asociados a fenómenos hidrometeorológicos severos, Considera la vulnerabilidad particular y el peligro derivado por precipitaciones y temperaturas anómalas. Su aplicación puede contribuir a la reducción de los impactos negativos de estos eventos al proporcionar alertamientos que permitan la implementación de medidas de prevención y mitigación adecuadas.

7.3 Limitaciones

A pesar de los logros y contribuciones significativas de esta investigación en el desarrollo de una metodología para el alertamiento por riesgos hidrometeorológicos en México, es importante reconocer y abordar sus limitaciones. Estas limitaciones son cruciales para comprender el alcance y las posibles restricciones de la metodología, así como para identificar áreas de mejora y futuras investigaciones. A continuación, se presentan algunas de las principales limitaciones a tener en cuenta:

Un factor que se podría considerar como limitante dentro de la investigación es el tipo de datos que fue obtenida y utilizada para el procesamiento de los datos. Los datos de vulnerabilidad utilizados fueron calculados para sequía. Sin embargo, se continuó con el uso de estos datos de vulnerabilidad debido a que la vulnerabilidad económica, social y ambiental son calculados mediante la inclusión de diferentes índices usados para conocer el grado de exposición, la sensibilidad y capacidad de adaptación. Estos índices, que se pueden observar en la Tabla 3 en su mayoría nos permiten conocer las condiciones específicas de cada sitio, con algunas excepciones de índices específicos para su uso en sequía como lo son el grado de explotación de los acuíferos o el grado de explotación de las cuencas.

A pesar de eso, índices como la densidad de población, la población sin acceso a servicios de salud, la pobreza, la falta de infraestructuras básicas como drenaje, energía eléctrica o agua entuba, y las condiciones precarias de vivienda pueden indicar una mayor vulnerabilidad ante fenómenos hidrometeorológicos. Además, el grado de explotación de los acuíferos y las cuencas hidrográficas también pueden influir en la vulnerabilidad de un sitio, ya que pueden afectar la disponibilidad de agua y aumentar el riesgo de afectaciones por las precipitaciones como, por ejemplo, con inundaciones.

Sin embargo, se debe tener la consideración y aclaración que no son el mejor tipo de información de vulnerabilidad que puede ser usado, y en estudios posteriores se propone el cálculo de vulnerabilidad mediante alguna metodología específica para fenómenos hidrometeorológicos severos.

Otro limitante puede ser la información de observaciones con las que se cuenta, debido a que como menciona Vázquez-Aguirre (2006), aunque la base de datos utilizada por el SMN es la más completa sobre el clima en México, el sistema CLICOM puede presentar problemas como períodos con de observaciones faltantes, carecer de control de calidad y puede contener valores sospechosos susceptibles a errores de registro.

La precisión y confiabilidad de los alertamientos de riesgo hidrometeorológicos dependen en gran medida de la calidad de los datos utilizados de entrada. Por ejemplo, las salidas del sistema SREF podrían ser mejoradas mediante algún método de corrección de sesgo, ya que es importante reconocer que todos los modelos tienen cierto grado de incertidumbre.

Finalmente, la efectividad de los alertamientos depende en gran medida de la capacidad de respuesta y recursos de los mecanismos y organismos responsables. Factores como la infraestructura de comunicación, la capacidad de monitoreo y la capacidad de implementar medidas de prevención y mitigación pueden influir en la capacidad de respuesta ante los alertamientos generados por esta metodología.

8 Recomendaciones

Con base en los resultados y las conclusiones obtenidas, se sugieren las siguientes recomendaciones:

- Continuar mejorando la integración de fuentes de información y la actualización constante de los datos utilizados en la metodología, de manera que se asegure la precisión y confiabilidad de los resultados. Así como, buscar la implementación de una metodología para conocer la vulnerabilidad específica a cada una de las variables estudiadas.
- Promover la colaboración entre instituciones gubernamentales, centro de investigación, organizaciones no gubernamentales y otros actores relevantes, para

compartir información y conocimientos, y fortalecer la capacidad de respuesta ante los fenómenos hidrometeorológicos.

- Realizar investigaciones y estudios adicionales para mejorar la comprensión de los procesos relacionados con los riesgos hidrometeorológicos en la república mexicana, lo que permitirá afinar y enriquecer la metodología propuesta.
- Conformación de bases de datos formales de afectaciones por peligros hidrometeorológicos para validar los sistemas de alertamiento.
- Fomentar la educación y concienciación sobre los riesgos hidrometeorológicos en la población, a través de campañas de información, capacitación y difusión de medidas de prevención.
- Evaluar y monitorear de manera constante la eficacia y eficiencia de la metodología una vez sea implementada, con el fin de identificar áreas de mejora y realizar ajustes necesarios para su óptimo funcionamiento
- Implementar esta metodología de forma operativa y dinámica, con una interfaz que permita a la población en general y los tomadores de decisiones conocer sobre los alertamientos por riesgo hidrometeorológicos.

9 Referencias

- Academia de Ingeniería de México. (2017, noviembre). *Inventario de Atlas de Riesgos en México Informe del estado actual—PDF Free Download*. <https://docplayer.es/73747822-Inventario-de-atlas-de-riesgos-en-mexico-informe-del-estado-actual.html>. <https://docplayer.es/73747822-Inventario-de-atlas-de-riesgos-en-mexico-informe-del-estado-actual.html>
- AEMET, A. E. de M. (2018). *Turbonada*. MeteoGlosario Visual. https://meteoglosario.aemet.es/es/termino/216_turbonada
- Alcántara-Ayala, I. (2019). *Desastres en México: Mapas y apuntes sobre una historia inconclusa*. <https://doi.org/10.14350/rig.60025>
- Aragón-Durand, F. (2012). *Análisis y diseño de medidas e instrumentos de respuesta del sector asegurador ante la variabilidad climática y el cambio climático en México*. INECC.
- Banco de México. (2022). *Sequía en México y su Potencial Impacto en la Actividad Económica*.
- BBC. (2020). Cómo se explica la ola de calor que rompe récords al norte del Caribe (y qué riesgos genera). *BBC News Mundo*. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-52388816>
- Bitencourt, D. P., Fuentes, M. V., Franke, A. E., Silveira, R. B., & Alves, M. P. A. (2020). The climatology of cold and heat waves in Brazil from 1961 to 2016. *International Journal of Climatology*, 40(4), 2464-2478. <https://doi.org/10.1002/joc.6345>
- Cama-Pinto, A., Piñeres-Espitia, G., Zamora-Musa, R., Acosta-Coll, M., Caicedo-Ortiz, J., & Sepulveda Ojeda, J. (2016). *Design of a wireless sensor network for monitoring of flash floods in the city of Barranquilla, Colombia*. 24, 581-599.
- Cancino, K. (2021, enero 1). *Frente Frío 24 dejó daños en 16 municipios*. El Sol de Córdoba | Noticias Locales, Policiacas, sobre México, Veracruz y el Mundo. <https://www.elsoldecordoba.com.mx/local/frente-frio-24-dejo-danos-en-16-municipios-vientos-lluvias-frios-bajas-temperaturas-proteccion-civil-conagua-6194537.html>
- Carrasco, F. (2021, mayo 13). Video: Sigue inundada la México-Puebla debido a las fuertes lluvias. *Quinta Fuerza*. <https://quintafuerza.mx/mexico/video-sigue-inundada-la-mexico-puebla-debido-a-las-fuertes-lluvias/>
- Castellano-Bahena, H. V. (2021). *Metodología para evaluar la vulnerabilidad y el riesgo ante la sequía en los organismos operadores de agua potable (OOAPAS) de México*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).
- Cavazos, T. (2015). *Conviviendo con la Naturaleza El problema de los desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos en México*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3737.6722>
- CENAPRED. (2018, agosto 7). *Declaratoria* [Sistema de Consulta de Declaratorias]. Declaratoria - Atlas Nacional de Riesgos. <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/apps/Declaratorias/#>

CENAPRED. (2019, junio 14). *El riesgo de habitar cerca de un cuerpo de agua*. <https://www.gob.mx/cenapred/es/articulos/el-riesgo-de-habitar-cerca-de-un-cuerpo-de-agua?idiom=es>

CENAPRED. (2022, marzo 22). *Sistema de alerta temprana*. <https://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/298-INFOGRAFASISTEMASDEALERTATEMPRANA.PDF>

CENAPRED. (2015). *Manual para la Evaluación de Riesgos originados por Fenómenos Naturales (2°)*.

Cervantes-Camac, M. (2022, marzo 24). *Las aplicaciones de la Meteorología en el Perú dentro del contexto Político Nacional de Gestión de Riesgo de Desastres al 2050*. Día Meteorológico Mundial. Organización Mexicana de Meteorólogos A.C.

CICESE. (2013, junio 15). *CLICOM*. <http://clicom-mex.cicese.mx/>

Coll-Hurtado, A. (2007). *Nuevo Atlas Nacional de México*. Instituto de Geografía, Universidad Autónoma de México. https://www.geografia.unam.mx/Geodig/nvo_atlas/index.html/5_naturaleza_ambiente/2_geologia/NA_II.pdf

COMET-MetEd. (2015a, agosto 3). *Operational Models Encyclopedia—SREF*. <https://sites.google.com/ucar.edu/operational-models-encyclo/probabilistic-models/sref>

COMET-MetEd. (2015b, agosto 3). *Operational Models Encyclopedia—SREF - Grid-scale*. <https://sites.google.com/ucar.edu/operational-models-encyclo/probabilistic-models/sref/grid-scale>

COMET-MetEd. (2015c, agosto 3). *Operational Models Encyclopedia—SREF - Horizontal Resolution*. <https://sites.google.com/ucar.edu/operational-models-encyclo/probabilistic-models/sref/horizontal-resolution?authuser=0>

COMET-MetEd. (2015d, agosto 3). *Operational Models Encyclopedia—SREF - Perturbation Method*. <https://sites.google.com/ucar.edu/operational-models-encyclo/probabilistic-models/sref/perturbation-method>

COMET-MetEd. (2015e, agosto 3). *Operational Models Encyclopedia—SREF - Vertical Resolution*. <https://sites.google.com/ucar.edu/operational-models-encyclo/probabilistic-models/sref/vertical-resolution>

CONAGUA. (2017). *Vulnerabilidad Social, Económica y Ambiental por municipio*. <https://datos.gob.mx/busca/dataset/vulnerabilidad-social-economica-y-ambiental-por-municipio>

CONAGUA. (2018, diciembre 8). *Lluvias asociadas a ciclones tropicales*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/ciclones-tropicales/lluvias-asociadas-a-ciclones-tropicales>

CONAGUA. (2022). *Tormenta Tropical «Celia» del Océano Pacífico*. <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Ciclones%20Tropicales/Ciclones/2022-Celia.pdf>

Corro, T. (2021, agosto 22). Hurricane Grace unleashes severe flooding in Mexico, killing eight. *Reuters*. <https://www.reuters.com/world/americas/hurricane-grace-aims-mexico-president-urges-people-shelter-2021-08-21/>

Donat, M. G., Alexander, L. V., Yang, H., Durre, I., Vose, R., Dunn, R. J. H., Willett, K. M., Aguilar, E., Brunet, M., Caesar, J., Hewitson, B., Jack, C., Klein Tank, A. M. G., Kruger, A. C., Marengo, J., Peterson, T. C., Renom, M., Oria Rojas, C., Rusticucci, M., ... Kitching, S. (2013). Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 dataset: HADEX2-GLOBAL GRIDDED CLIMATE EXTREMES. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(5), 2098-2118. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50150>

Du, J. (2007). *Uncertainty and Ensemble Forecast*. 42.

El Financiero. (2021, agosto 21). 'Grace' deja 22 municipios veracruzanos en estado de emergencia. El Financiero. <https://www.elfinanciero.com.mx/estados/2021/08/21/grace-deja-22-municipios-veracruzanos-en-estado-de-emergencia/>

El Financiero. (2022, junio 25). Tormenta tropical 'Celia' deja una persona muerta en Oaxaca. El Financiero. <https://www.elfinanciero.com.mx/estados/2022/06/24/tormenta-tropical-celia-deja-una-persona-muerta-en-oaxaca/>

Espinoza-Silvestre, E. S. (2020). *MODELO CONCEPTUAL PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE ALERTA TEMPRANA: CASO APLICADO A EVENTOS EXTREMOS FRÍOS* [Universidad Nacional Agraria La Molina]. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/4460/silvestre-espinoza-elizabeth.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

EuroMET. (2004, octubre 21). *Tipos de tormentas y Fenómenos asociados*. <https://rammb.cira.colostate.edu/wmovl/vrl/tutorials/euromet/courses/spanish/satmet/s9260/s9260241.htm>

García, E. (1988). *Modificación al sistema de Clasificación Climática de Köppen* (5° Edición). Instituto de Geografía.

Hallegatte, S. (2012). *A Cost Effective Solution to Reduce Disaster Losses in Developing Countries: Hydro-Meteorological Services, Early Warning, and Evacuation*. World Bank. <https://doi.org/10.1596/1813-9450-6058>

Hernández, E. (2021, agosto 26). *Por extinción de los fondos de desastres naturales, transfieren 26 mil mdp a Hacienda*. Forbes México. <https://www.forbes.com.mx/por-extincion-de-los-fondos-de-desastres-naturales-transfieren-26-5-mil-mdp-a-hacienda>

Hernández, M., Cardós, C., Barrera, E., & Sanz, R. (2014). Trombas marinas y su climatología en Canarias. *Revista Tiempo y Clima*, 5(25), Article 25. <https://pub.ame-web.org/index.php/TyC/article/view/311>

Hernández-Aguilar, M. L., & López-Montejo, G. D. (2020). Atlas de riesgos como instrumentos de sistemas de alertas tempranas. En O. Frausto Martínez, J. C. Morales Hernández, & C. D. Aguilar

Becerra (Eds.), *Sistema de Alerta Temprana ante Fenómenos Hidrometeorológicos Extremos en México*.

Hernández-Cruz, P. (2020). *Propuestas metodológicas para el pronóstico de tormentas eléctricas con precipitación fría y lluvia intensa a nivel operativo*. Universidad Veracruzana.

Herrera-Alanís, J. L. (2012). *Análisis de las olas de calor en la república mexicana* [Tesis doctorado, UNAM]. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/5149>

Hofmann, J., & Schüttrumpf, H. (2019). Risk-Based Early Warning System for Pluvial Flash Floods: Approaches and Foundations. *Geosciences*, 9(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/geosciences9030127>

INECC. (2019). *Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático México (1°)*. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. https://atlasvulnerabilidad.inecc.gob.mx/page/fichas/ANVCC_LibroDigital.pdf

Infobae. (2021). *El letal saldo del frío en México: Cinco muertos en Tamaulipas y uno en Chihuahua*. infobae. <https://www.infobae.com/america/mexico/2021/02/19/el-letal-saldo-del-frio-en-mexico-cinco-muertos-en-tamaulipas-y-uno-en-chihuahua/>

Infobae. (2022, febrero 6). *Frente Frío número 28 ha provocado al menos ocho volcaduras de tráileres en Oaxaca*. infobae. <https://www.infobae.com/america/mexico/2022/02/06/frente-frio-28-ha-provocado-al-menos-ocho-volcaduras-de-trailer-es-en-oaxaca/>

Intrieri, E., Gigli, G., Mugnai, F., Fanti, R., & Casagli, N. (2012). Design and implementation of a landslide early warning system. *Engineering Geology*, 147-148, 124-136. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.07.017>

IPCC. (2007). *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Vol. 1). Cambridge University Press.

IPCC. (2014). *Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resúmenes, preguntas frecuentes y recuadros multicapítulos. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* (p. 200). Organización Meteorológica Mundial. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WGIIAR5-IntegrationBrochure_es-1.pdf

IPCC. (2020). *The concept of risk in the IPCC Sixth Assessment Report: A summary of cross- Working Group discussions*.

IPCC. (2022). *Glossary—IPCC*. <https://www.ipcc.ch/report/sr15/glossary/>

IPCC. (2023). *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf

Llanos-Rodríguez, M. L. (2020). Sistema de alerta temprana multi-riesgo de la Ciudad de México. En O. Frausto Martínez, J. C. Morales Hernández, & C. D. Aguilar Becerra (Eds.), *Sistema de Alerta Temprana ante Fenómenos Hidrometeorológicos Extremos en México*.

López-Díaz, J. A. (2004). *Análisis de tendencias en olas de calor a partir de series largas de temperatura*. http://aeclim.org/wp-content/uploads/2016/02/0034_PU-SA-IV-2004-JA_LOPEZDIAZ.pdf

Más Noticias. (2021, agosto 21). Ríos Cazones y Actopan reportan niveles críticos, a punto de desbordamiento. *MÁSNOTICIAS*. <https://www.masnoticias.mx/rios-cazones-y-actopan-reportan-niveles-criticos-a-punto-de-desbordamiento/>

Milenio. (2021a). *Hidalgo, afectaciones por paso de Grace en Tulancingo—Grupo Milenio*. <https://www.milenio.com/politica/comunidad/hidalgo-afectaciones-por-paso-de-grace-en-tulancingo>

Milenio. (2021b, agosto 21). *Hidalgo, afectaciones por paso de Grace en Tulancingo*. Grupo Milenio. <https://www.milenio.com/politica/comunidad/hidalgo-afectaciones-por-paso-de-grace-en-tulancingo>

Milenio. (2021c, agosto 22). *Huauchinango. Un muerto, inundaciones y deslaves ante el paso de Grace*. Grupo Milenio. <https://www.milenio.com/politica/comunidad/huauchinango-muerto-inundaciones-deslaves-paso-grace>

Milenio. (2021d, agosto 22). *Mueren tres personas por paso de Huracán Grace en Puebla*. Grupo Milenio. <https://www.milenio.com/politica/comunidad/mueren-personas-paso-huracan-grace-puebla>

MiMorelia.com. (2021, enero 1). *Madrugada del 1 de enero con temperatura mínima de 1°C en Morelia*. Mi Morelia.com. <https://mimorelia.com/noticias/madrugada-del-1-de-enero-con-temperatura-minima-de-1c-en-morelia>

Navarro, M. (2021). *Activan protocolo conjunto para atender inundaciones en Valle de México*. El Sol de México | Noticias, Deportes, Gossip, Columnas. <https://www.elsoldemexico.com.mx/metropoli/valle-de-mexico/activan-protocolo-conjunto-para-atender-inundaciones-en-valle-de-mexico-lluvias-6710123.html>

OECD. (2013). *Estudio de la OCDE sobre el Sistema Nacional de Protección Civil en México*. Organisation for Economic Co-operation and Development. https://www.oecd-ilibrary.org/governance/estudio-de-la-ocde-sobre-el-sistema-nacional-de-proteccion-civil-en-mexico_9789264200210-es

Portillo, G. (2020, noviembre 10). Turbonada: Qué es, características y diferencias con tornados. *Meteorología en Red*. <https://www.meteorologiaenred.com/turbonada.html>

Prensa Latina. (2022, junio 23). *Tormenta tropical Celia ocasiona daños en Oaxaca, México*. <https://www.prensa-latina.cu/2022/06/23/tormenta-tropical-celia-ocasiona-danos-en-oaxaca-mexico>

Prieto-González, R., Ramírez Villa, R., & San Cristóbal Araujo, B. C. (2008). *Metodología para la creación e implementación del Sistema de Alerta Temprana para frentes fríos y nortes*. IMTA. http://www.cenapred.unam.mx:8080/TransparenciaGobMX/documentos/Renglon_14.pdf

- Rahman, K. M., Alam, T., & Chowdhury, M. (2012). Location based early disaster warning and evacuation system on mobile phones using OpenStreetMap. *2012 IEEE Conference on Open Systems*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICOS.2012.6417627>
- Righetti, S. A., Hobouchian, M. P., & Skabar, G. (2019). *Corrección del BIAS del pronóstico de temperatura mínima y máxima del modelo GFS* (Nota Técnica SMN 2017-56). http://repositorio.smn.gob.ar/bitstream/handle/20.500.12160/1102/Nota_Tecnica_SMN_2019-56.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Robinson, P. (2001). On the definition of a heat wave. *Journal of Applied Meteorology*, 40(4), 14.
- Ruiz-Barradas, A., Tejeda-Martínez, A., Miranda-Alonso, S., & Flores-Zamudio, R. H. (2010). *Climatología*. Gobierno del Estado de Veracruz. <https://cdigital.uv.mx/>
- Salas-Martínez, F., Valdés Rodríguez, O., Palacios-Wassenaar, O., & Márquez-Grajales, A. (2021). *Reducciones sobre el rendimiento del maíz en grano en la región central de Veracruz, México* (pp. 1530-1541).
- Secretaría de Gobernación. (2016, septiembre 7). *Fideicomiso Fondo de Desastres Naturales (Fonden)*. gov.mx. <http://www.gob.mx/segob/documentos/fideicomiso-fondo-de-desastres-naturales-fonden>
- Secretaría de Salud. (2022a). *Temperaturas Naturales Extremas (Temporada de Calor 2022) Semana epidemiológica* 15. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/725714/TNE_2022_SE15.pdf
- Secretaría de Salud. (2022b). *Temperaturas Naturales Extremas (Temporada de Calor 2022) Semana epidemiológica* 19. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/727341/TNE_2022_SE19.pdf
- SEMAR. (2021, septiembre). *Resumen anual de Frentes Fríos que afectaron aguas y costas mexicanas*. <https://meteorologia.semar.gob.mx/dirmet/pdf/resumenff.pdf>
- SMN. (2021, junio 1). *Concluye estadísticamente la Temporada Invernal 2020-2021*. gov.mx. <http://www.gob.mx/smn/prensa/concluye-estadisticamente-la-temporada-invernal-2020-2021-273595>
- SMN. (2022). *Cuatro ondas de calor generaron efectos en la mayor parte de México, de marzo a mayo de 2022*. gov.mx. <http://www.gob.mx/smn/prensa/cuatro-ondas-de-calor-generaron-efectos-en-la-mayor-parte-de-mexico-de-marzo-a-mayo-de-2022-306714>
- Susandi, A., Tamamadin, M., Pratama, A., Wijaya, A., Pratama, A., Pandini, O., & Widiawan, D. (2018). Development of Hydro-Meteorological Hazard Early Warning System in Indonesia. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 50, 461-478. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2018.50.4.2>
- Tomkins-Warner, T. (2011). *Numerical Weather and Climate Prediction*. Cambridge University Press.

Ujjwal, Garg, S., Hilton, J. E., Aryal, J., & Forbes-Smith, N. (2019). Cloud Computing in natural hazard modeling systems: Current research trends and future directions. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 38, 101188. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101188>

UnoTV. (2021a, enero 1). *Clima CDMX hoy 1 de enero: Frío y heladas al amanecer—Uno TV*. <https://www.unotv.com/estados/ciudad-de-mexico/clima-cdmx-hoy-1-de-enero-frio-y-heladas-al-amanecer/>

UnoTV, R. |. (2021b, mayo 12). *Clima México hoy 12 de mayo: Lluvias fuertes a intensas*. Uno TV. <https://www.unotv.com/nacional/clima-mexico-hoy-12-de-mayo-lluvias-fuertes-a-intensas/>

Valencia, H. (2021, agosto 22). *Ejército aplica Plan DN-III-E en Veracruz por daños de Grace*. N+. <https://noticieros.televisa.com/ultimas-noticias/ejercito-aplica-plan-dn-iii-e-en-veracruz-por-danos-de-grace/>

Vázquez-Aguirre, J. L. (2006). *Datos climáticos de la República Mexicana: Panorama actual y requerimientos inmediatos*.

Vázquez-Aguirre, J. L. (2010). *Guía para el cálculo y uso de índices de cambio climático en México*. Instituto Nacional de Ecología.

Vázquez-Aguirre, J. L., Cervantes-Pérez, J., Villa-Falfán, C., Guillén-Cadena, M. de J., Sánchez-Martínez, Ó., Arellano-Palacios, J., & García-Rosas, R. (2019). *Diagnóstico de vulnerabilidad presente y futura a los impactos de cambio climático de los tres subsectores de producción agroalimentaria en dos regiones de la República Mexicana*. <https://iki-alliance.mx/wp-content/uploads/Diagn%C3%B3stico-de-vulnerabilidad-presente-y-futura-a-los-impactos-de-cambio-clim%C3%A1tico-de-los-tres-subsectores-de-producci%C3%B3n-agroalimentaria-en-dos-regiones-de-la-Rep%C3%BAblica-Mexicana-Informe-final.pdf>

Villa-Falfán, C. (2018). *Análisis de calor extremo en el estado de Veracruz y sus aplicaciones*. Universidad Veracruzana.

Wilks, D. S. (2006). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences* (Segunda, Vol. 91). ELSEVIER.

Zitácuaro-Contreras, A., Méndez-Pérez, J. M., & Magaña-Rueda, V. (2011, noviembre). Diagnóstico de las Tendencias actuales de fenómenos meteorológicos extremos y proyección de su actividad al clima futuro cercano 2030 y clima futuro lejano 2080. Considerando los efectos del cambio climático global y otros efectos locales. *Agua.org.mx*. <https://agua.org.mx/biblioteca/diagnostico-las-tendencias-actuales-fenomenos-meteorologicos-extremos-proyeccion-actividad-al-clima-cercano-2030-clima-lejano-2080-considerando-los-efectos-del-cambio-cl/>

Glosario

ARW: Advanced Research WRF por sus siglas en inglés, es un modelo numérico de pronóstico del tiempo. Es uno de los dos núcleos del WRF soportado por la división de Meteorología de Mesoescala y Microescala del Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR).

Cambio climático: Alteraciones a largo plazo en los patrones climáticos, como temperatura y precipitación, causadas por actividades humanas y factores naturales.

CENAPRED: Centro Nacional de Prevención de Desastres, una institución en México encargada de la gestión de riesgos y la prevención de desastres.

CENEPRED: El Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres es un organismo público peruano encargado de la planificación, coordinación y ejecución de acciones para la gestión integral de riesgo de desastres en el país.

CLICOM: El Climate Computing Project es un sistema de software de manejo de datos climatológicos desarrollado por las Naciones Unidas.

CONAGUA: La Comisión Nacional del Agua es un organismo administrativo encargado de la gestión, administración, regulación y control del agua en México.

Coordenadas híbridas sigma-presión: Coordenadas híbridas sigma-presión: Sistema de coordenadas utilizado en modelos numéricos de pronóstico del tiempo para representar la atmósfera. Este sistema combina las ventajas del sistema de coordenadas sigma en la superficie y la representación de superficies de presión constante en niveles altos de la atmósfera.

CSV: Comma-Separated Values, un formato de archivo de texto utilizado para almacenar datos tabulares.

Datos de libre acceso: Datos que están disponibles públicamente y se pueden utilizar sin restricciones.

ECMWF: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Centro Europeo para Pronósticos Meteorológicos de Medio Alcance.

Estaciones climáticas convencionales: Estaciones meteorológicas tradicionales que recopilan datos atmosféricos como temperatura, precipitación y viento, y permiten medir las variaciones del clima.

Eventos extremos: Fenómenos climáticos o meteorológicos que se desvían significativamente de los valores normales y tienen un impacto severo.

Fenómenos hidrometeorológicos: Eventos que involucran la interacción entre la atmósfera y el agua, como lluvias intensas, tormentas, inundaciones y sequías.

Fenómenos hidrometeorológicos severos: Eventos extremos hidrometeorológicos con el potencial de causar daños significativos.

GDAS: Global Data Assimilation System, Sistema Global de Asimilación de Datos usado por el GFS.

GEFS: Global Ensemble Forecast System, un conjunto de modelos de pronóstico utilizados para realizar pronósticos en conjunto y evaluar la incertidumbre, genera 21 pronósticos separados.

Gestión de desastres: Procesos sociales para desarrollar, implementar y evaluar estrategias que mejoren la preparación, respuesta y recuperación ante desastres a nivel organizacional y social.

Gestión de riesgo: Medidas, acciones, estrategias o políticas para disminuir la probabilidad y/o magnitud de posibles consecuencias negativas, basadas en riesgos evaluados o percibidos.

GFS: Global Forecast System, un modelo numérico de pronóstico del tiempo del Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP).

GrADS: Grid Analysis and Display System, un software utilizado para analizar y visualizar datos meteorológicos y climáticos.

GRIB2: Segunda versión del formato GRIB que se usa para el almacenamiento y transporte de datos meteorológicos en forma de cuadrículas. Está diseñado para ser autoexplicativo, compacto y portátil, fue diseñado por la Organización Meteorológico Mundial.

ICON: Icosahedral Nonhydrostatic, un modelo numérico de pronóstico del tiempo desarrollado por el Deutscher Wetterdienst.

Inundación fluvial: Desbordamiento de un río o corriente que causa la inundación de áreas cercanas.

Inundación pluvial: Inundación causada por la acumulación de agua de lluvia en áreas urbanas o terrenos con baja capacidad de absorción.

Ley General de Protección Civil: Marco legal en México que establece las bases para la protección civil y la gestión de desastres.

Malla Arakawa-B: Tipo de malla utilizado en modelos numéricos de pronóstico del tiempo, separa la evaluación de dos conjuntos de cantidades.

Malla Arakawa-C: Tipo de malla utilizado en modelos numéricos de pronóstico del tiempo, separa aún más la evaluación de los valores vectoriales en comparación con la malla Arakawa-B.

Monitoreo de amenazas: Vigilancia y seguimiento continuo de las condiciones y eventos que representan una amenaza para la población y el entorno.

NAM: North American Mesoscale Model, es uno de los modelos numérico de pronóstico mayores del Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP).

NCEP: National Centers for Environmental Prediction, Centros Nacionales de Predicción Ambiental. Suministra a sus socios y comunidades de usuarios externos pronósticos, análisis y advertencias meteorológicas, hidrológicas, climáticas y de clima espacial a nivel nacional e internacional.

NDAS: NCEP's Global Forecast System (GFS) Data Assimilation System, Sistema de Asimilación de Datos del Sistema de Pronóstico Global (GFS) de NCEP.

NMMB: Nonhydrostatic Mesoscale Model with a 'B' grid staggering, Núcleo del WRF basado en el modelo Eta desarrollado en el NCEP.

NOMADS: National Oceanic and Atmospheric Administration Operational Model Archive and Distribution System, Sistema de Archivo y Distribución de Modelos Operativos de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica. Es un sistema desarrollado por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés) que permite acceder a datos de modelos climáticos y meteorológicos en tiempo real y retrospectivo.

Pandas: Biblioteca de Python utilizada para el análisis y manipulación de datos tabulares.

Plan DN-III-E: Un instrumento militar que guía al Ejército y Fuerza Aérea Mexicanos en la asistencia a la población afectada por desastres, optimizando recursos para una respuesta eficiente y preservación de bienes y entorno.

Pronóstico sintético: Informe especializado generado de manera automatizada que brinda alertas meteorológicas a nivel municipal. Este sistema suele utilizar información de modelos numéricos, datos satelitales, estadísticas y sondeos virtuales compartidos por la comunidad científica y gubernamental.

Python: Lenguaje de alto nivel de programación interpretado ampliamente utilizado en el análisis y procesamiento de datos.

QGIS: Quantum Geographic Information System, es un software de sistema de información geográfica de código abierto.

RAP: Rapid Refresh, un modelo numérico de pronóstico del tiempo desarrollado por la NOAA.

RAR: Un archivo con extensión RAR es un archivo comprimido que contiene uno o más ficheros o carpetas en su interior.

Servicio Meteorológico Nacional: Es un organismo encargado de monitorear y predecir las condiciones meteorológicas en México que depende directamente de CONAGUA.

Shapefile: Formato de archivo utilizado para almacenar datos geoespaciales vectoriales.

Sistema de Alerta Temprana: Sistema diseñado para detectar y alertar sobre la proximidad o la ocurrencia inminente de un evento peligroso.

Sistema de información geográfico: Conjunto de herramientas y tecnologías utilizadas para capturar, almacenar, analizar y visualizar datos geoespaciales.

TXT: Formato de archivo de texto sin formato.

Variabilidad climática: Variaciones naturales en el clima a lo largo del tiempo, que pueden ser de corto plazo (variabilidad intraseasonal) o de largo plazo (variabilidad interanual o decadal).

Vulnerabilidad ambiental: Susceptibilidad de los ecosistemas y recursos naturales a los impactos del cambio climático y los desastres.

Vulnerabilidad económica: Grado de exposición y susceptibilidad de los sistemas económicos y las actividades económicas a los riesgos y desastres.

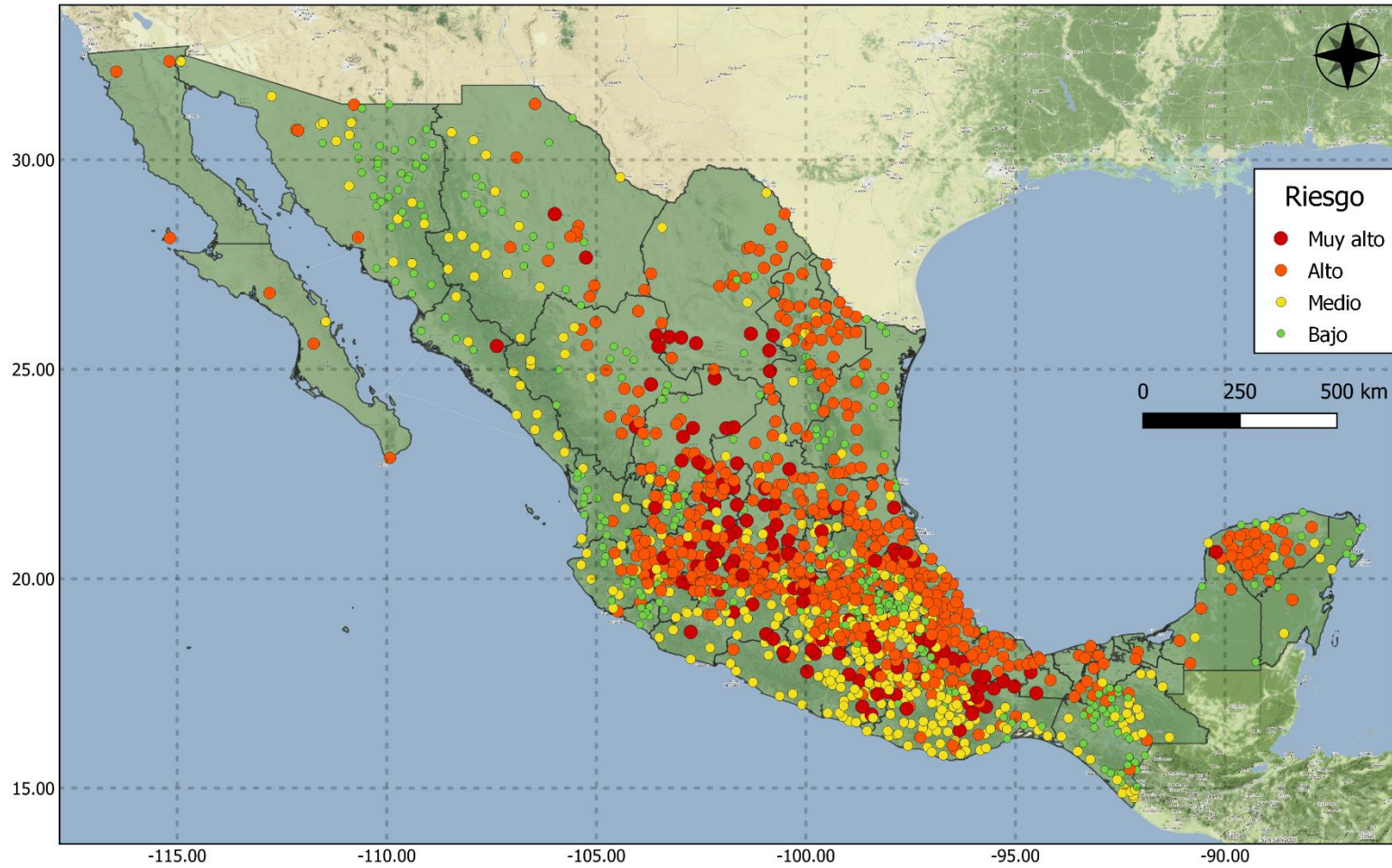
Vulnerabilidad social: Grado de exposición y susceptibilidad de las personas, comunidades y grupos sociales a los riesgos y desastres.

Windy: Plataforma en línea que proporciona visualizaciones interactivas y pronósticos meteorológicos.

WRF: Weather Research and Forecasting, un modelo numérico de pronóstico del tiempo ampliamente utilizado.

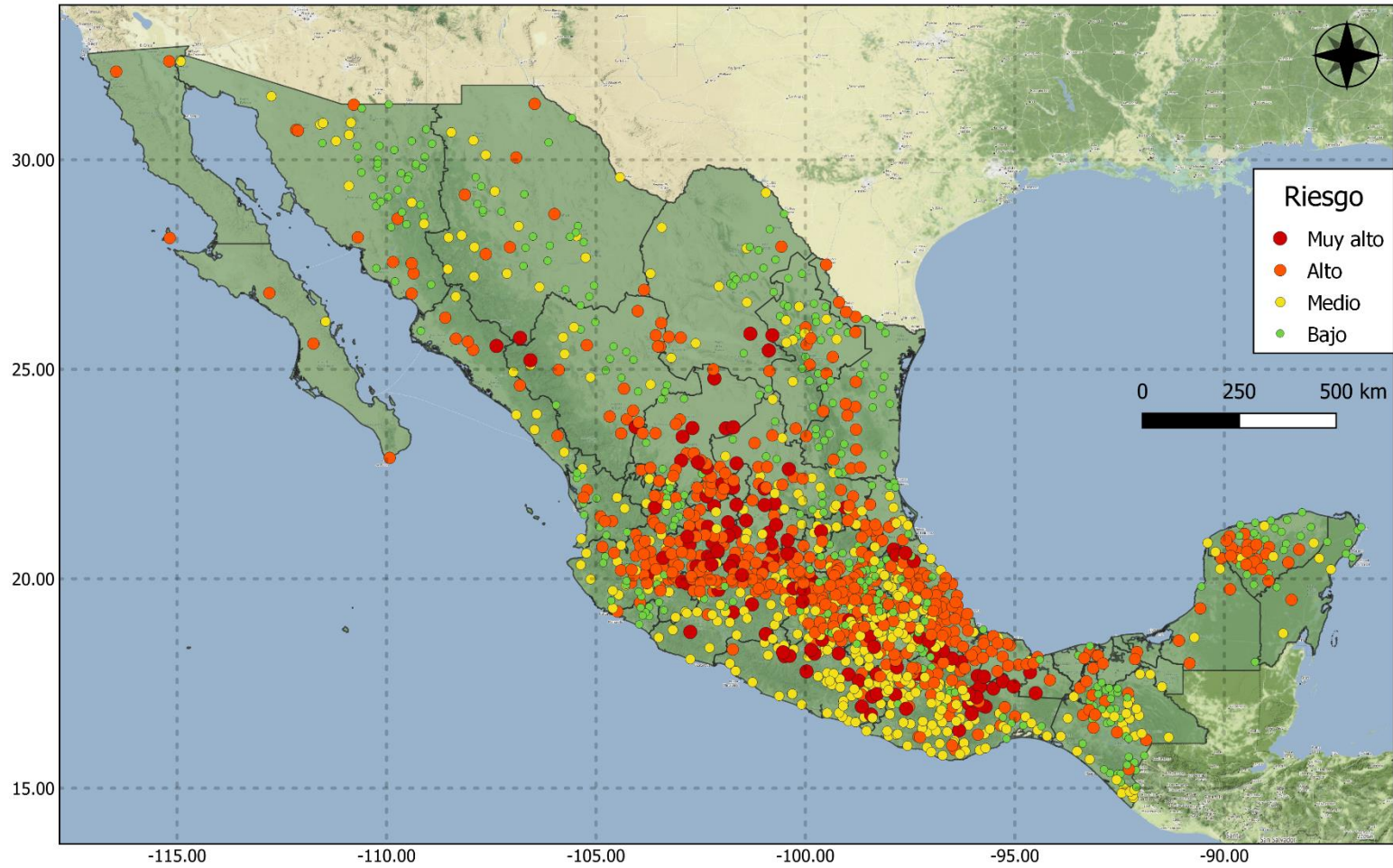
Anexos

Riesgo por temperaturas altas 2022-05-09



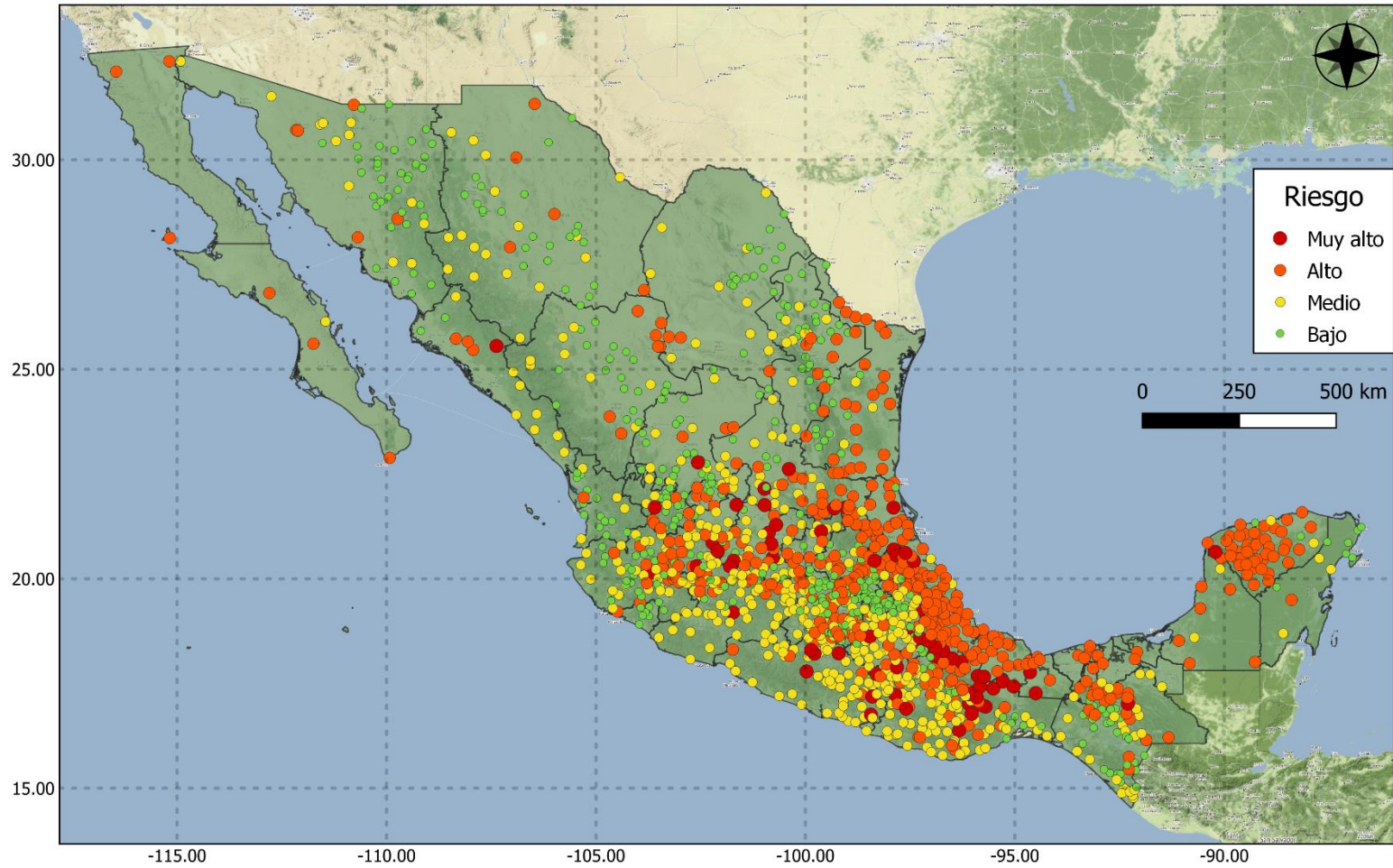
Anexo 1 mapa de riesgo por temperaturas altas para el día 17 de mayo de 2022.

Riesgo por temperaturas altas 2022-04-17



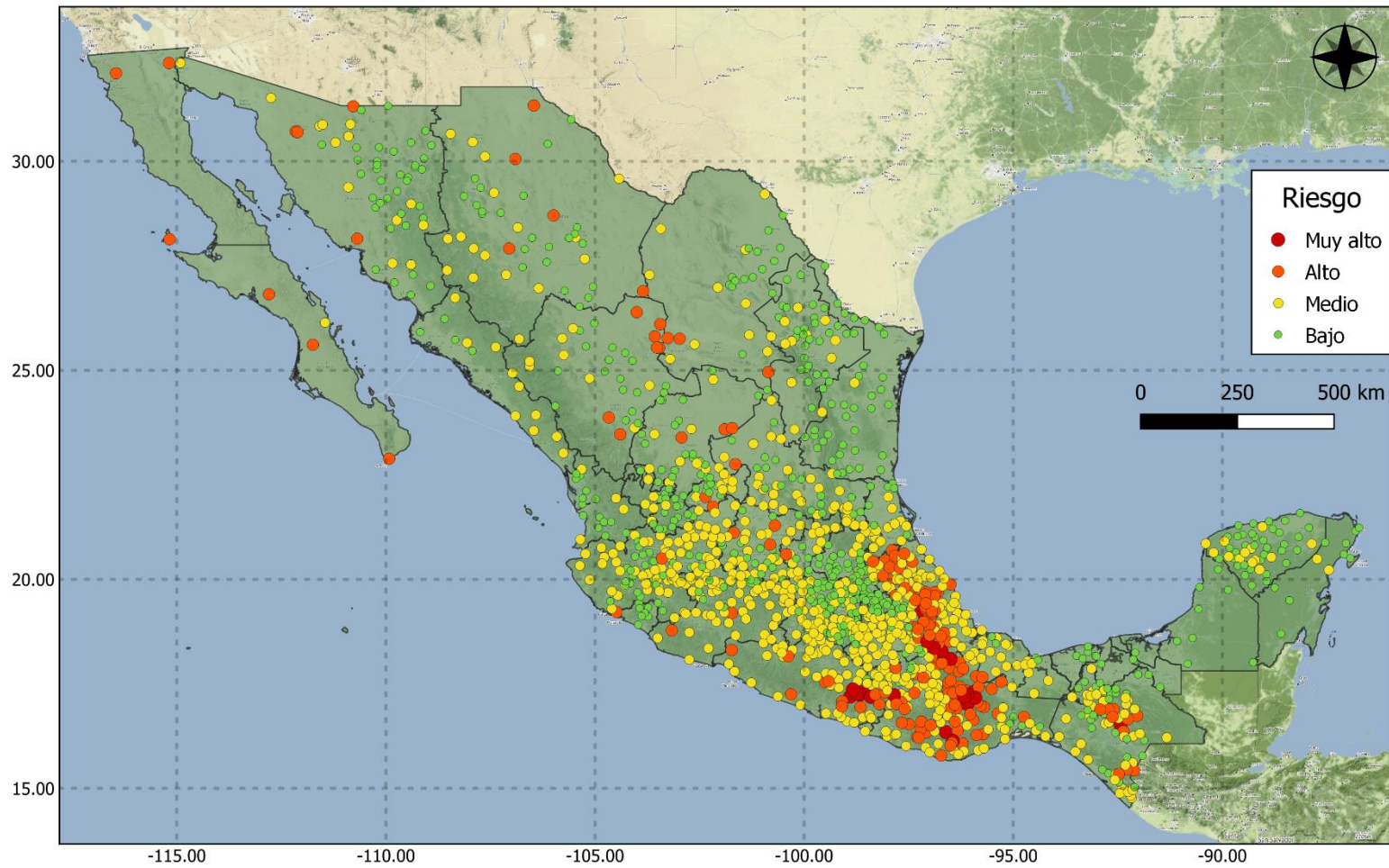
Anexo 2 mapa de riesgo por temperaturas altas para el día 17 de abril de 2022.

Riesgo por temperaturas altas 2020-04-23



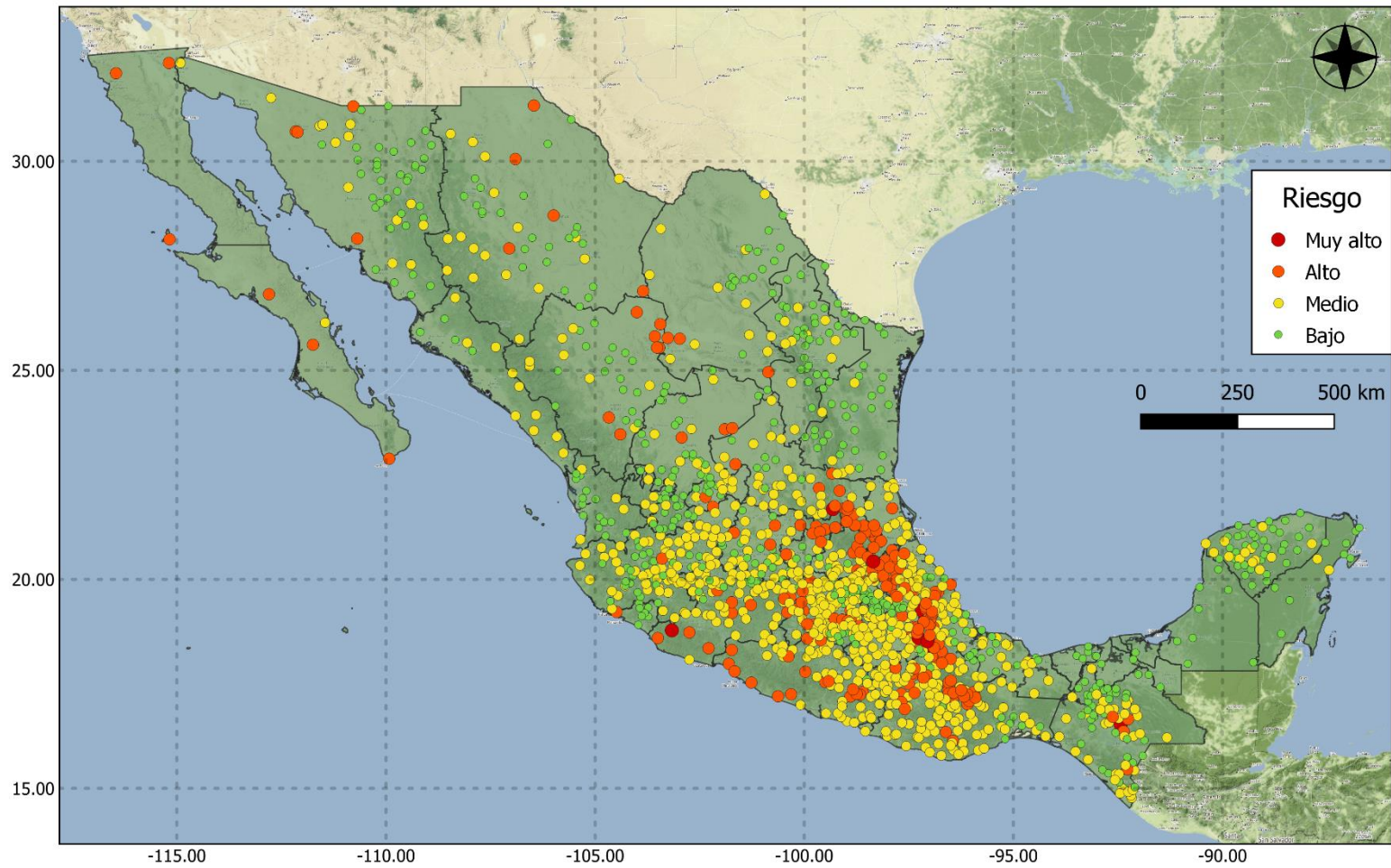
Anexo 3 mapa de riesgo por temperaturas altas para el día 23 de abril de 2020.

Riesgo por precipitación acumulada (24h) 2022-06-21



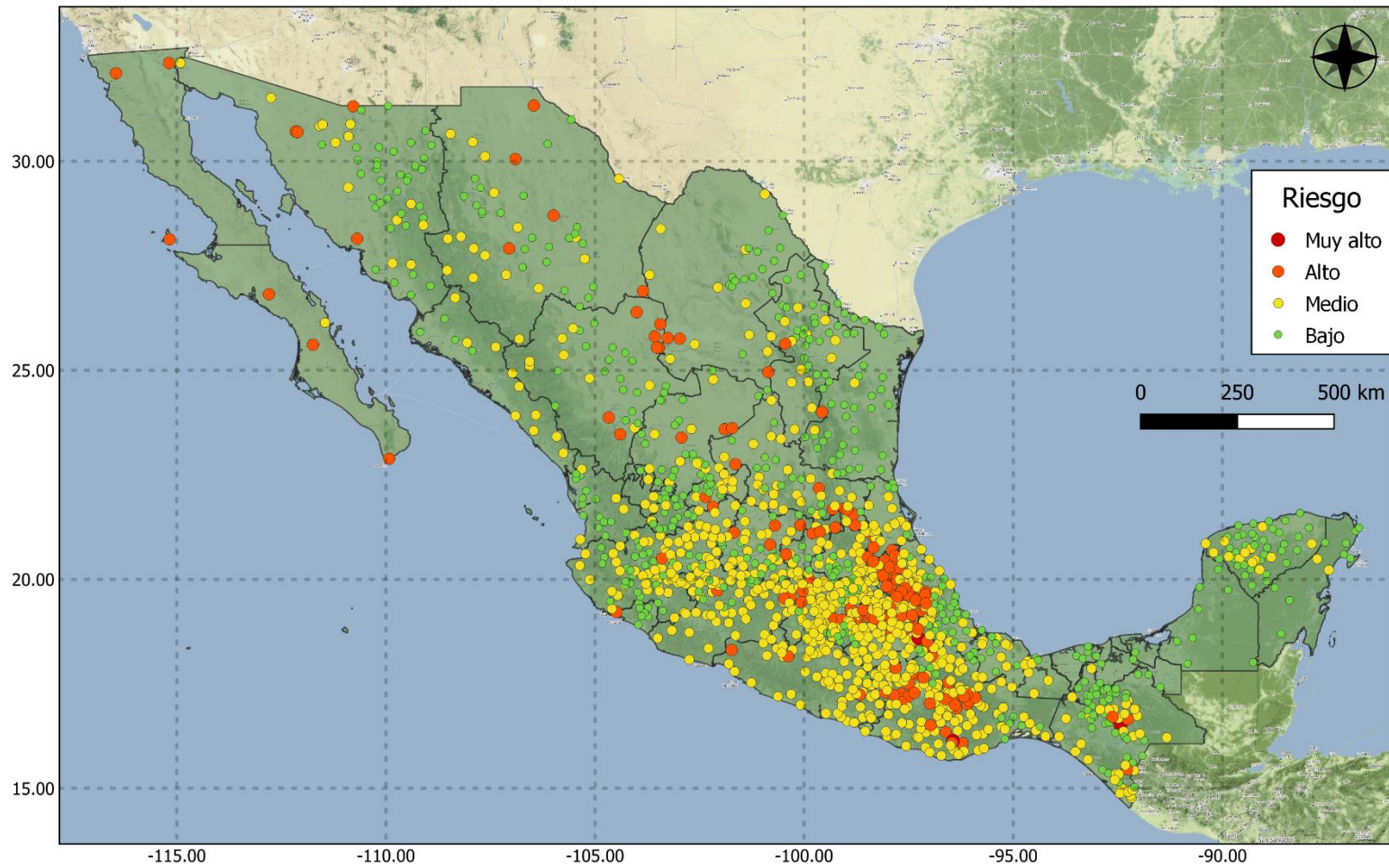
Anexo 4 mapa de riesgo por precipitación acumulada (24h) para el día 21 de junio de 2022.

Riesgo por precipitación acumulada (24h)
2021-08-21



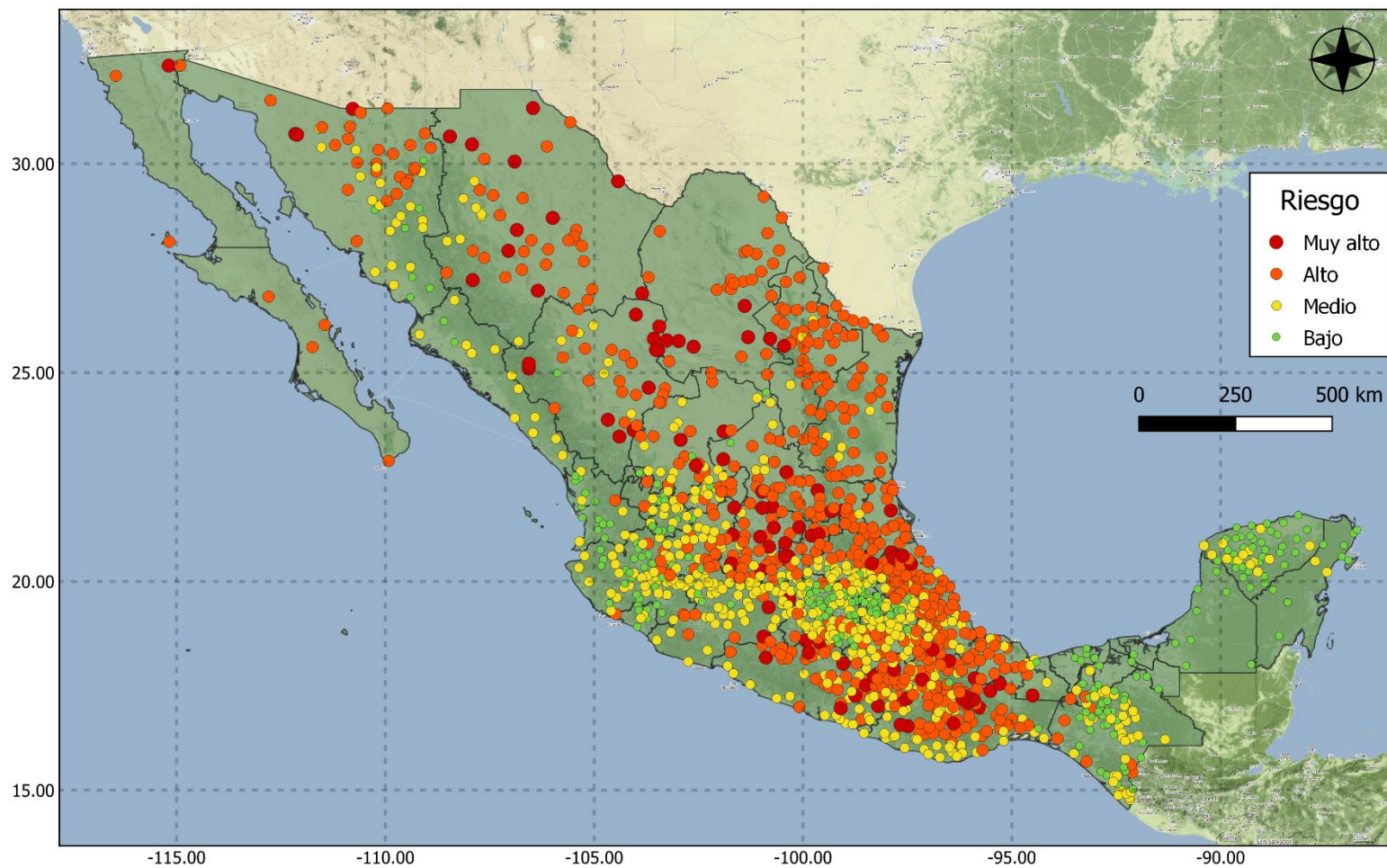
Anexo 5 mapa de riesgo por precipitación acumulada (24h) para el día 21 de agosto de 2021.

Riesgo por precipitación acumulada (24h)
2021-05-12



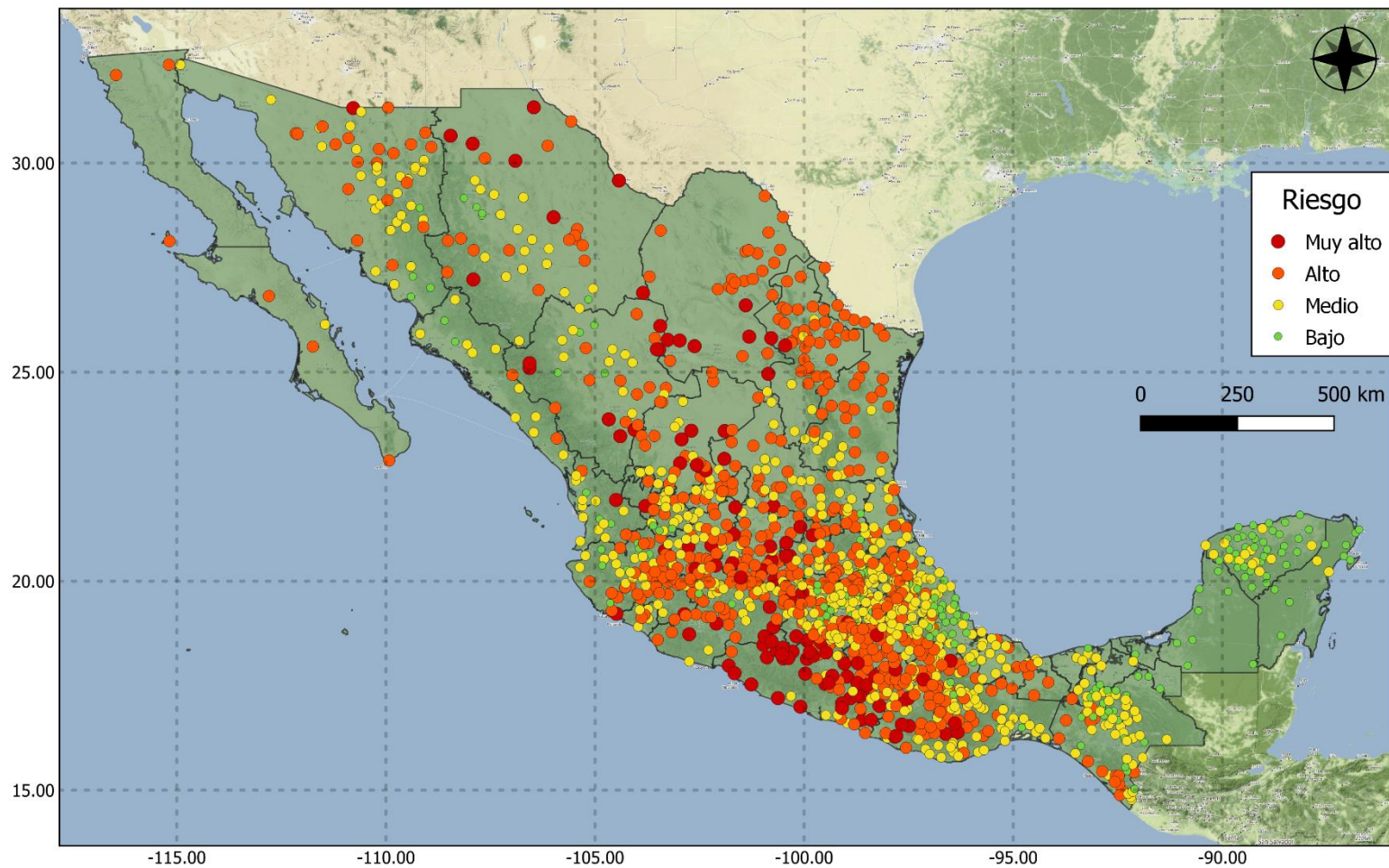
Anexo 6 mapa de riesgo por precipitación acumulada (24h) para el día 12 de mayo de 2021.

Riesgo por temperaturas bajas 2022-02-04



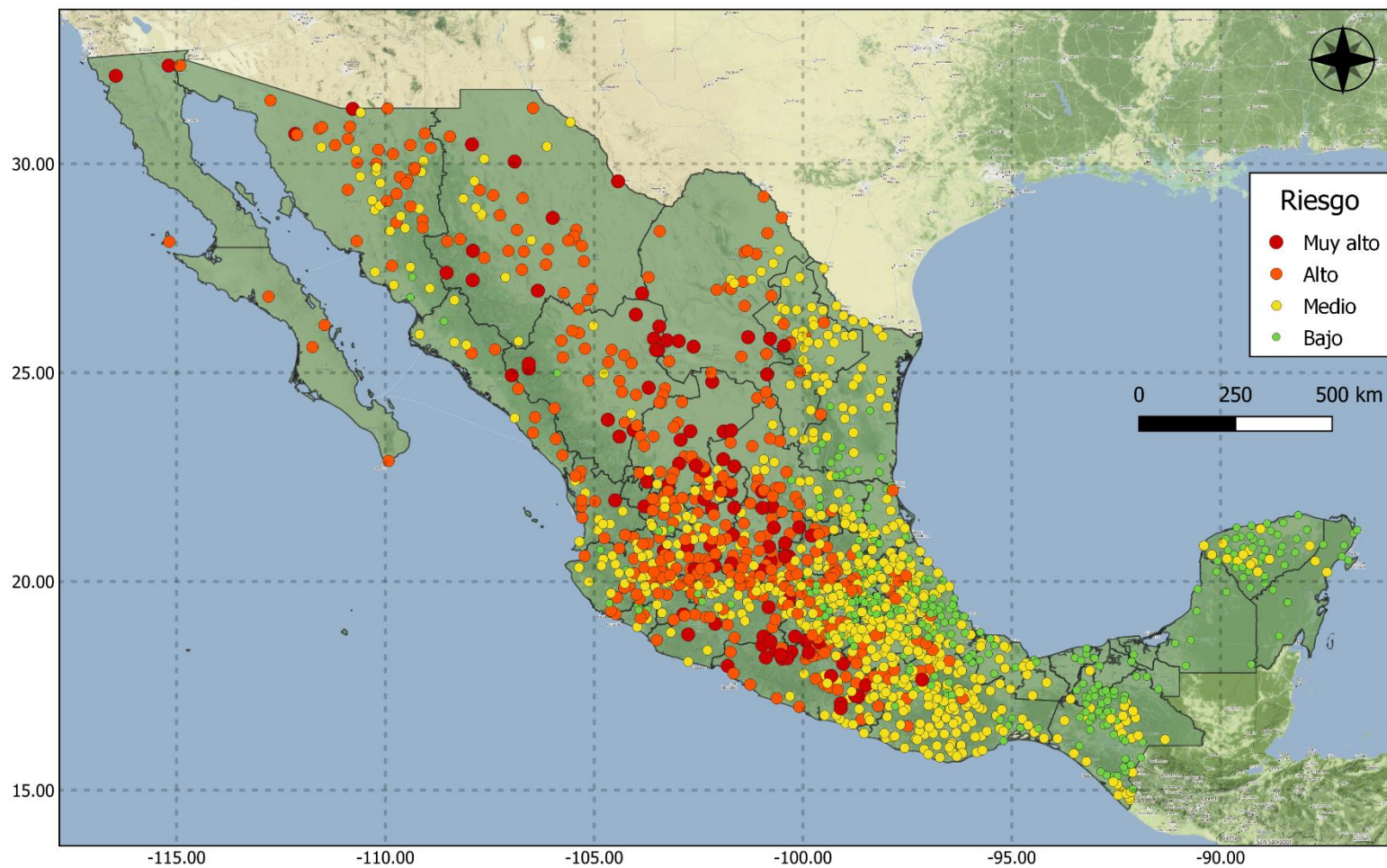
Anexo 7 mapa de riesgo por temperaturas bajas para el día 4 de febrero de 2022.

Riesgo por temperaturas bajas 2021-02-14



Anexo 8 mapa de riesgo por temperaturas bajas para el día 14 de febrero de 2021.

Riesgo por temperaturas bajas 2021-01-01



Anexo 9 mapa de riesgo por temperaturas bajas para el día 1 de enero de 2021.