

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DEL SUR DE GUANAJUATO



Análisis de la relación entre el viento y el monitoreo de monóxido de carbono (CO) en los municipios de Salamanca, Celaya e Irapuato, estado de Guanajuato.

Opción 2: Titulación Integral – Tesis profesional

Elaborada por:

Isabel Jatziri Hernandez Castillo

Que presenta para obtener el título de:

LICENCIADA EN INGENIERÍA AMBIENTAL

Asesor:

Dr. Edgar G. Blanco Díaz

Análisis de la relación entre el viento y el monitoreo de monóxido de carbono (CO) en los municipios de Salamanca, Celaya e Irapuato, estado de Guanajuato. ”

Elaborada por:

Isabel Jatziri Hernandez Castillo

Aprobado por.....

Dr. Edgar G. Blanco Díaz
Jefe de División de Ingeniería Ambiental
Asesor de tesis profesional

Revisado por.....

M. C. Susana Ramírez Guízar
Docente de la carrera de Ingeniería Ambiental
Revisor de tesis profesional

Revisado por.....

Lic. Brenda Huichapa Rocha
Docente de la carrera de Ingeniería Ambiental
Revisor de tesis profesional



LIBERACIÓN DE PROYECTO PARA LA TITULACIÓN INTEGRAL

Uriangato, Gto. 03/julio/2024

Asunto: Liberación de proyecto para la titulación integral

M.C. José Gabriel Agullera González
Director Académico
ITSUR
PRESENTE


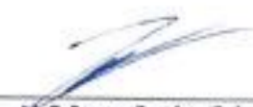

Por este medio informo que ha sido liberado el siguiente proyecto para la titulación integral:

Nombre de estudiante y/o egresado(a): Isabel Jatziri Hernandez Castillo	
Carrera: Ingeniería Ambiental	Núm. de control: A18120218
Nombre del proyecto: Análisis de la relación entre el viento y el monitoreo de monóxido de carbono (CO) en los municipios de Salamanca, Celaya e Irapuato, estado de Guanajuato.	
Producto: Tesis profesional	

Agradezco de antemano su valioso apoyo en esta importante actividad para la formación profesional de nuestras y nuestros egresados.


ATENTAMENTE
 Dr. Edgar G. Blanco Díaz
 Jefe de División de Ingeniería Ambiental
 ITSUR

La comisión revisora ha tenido a bien aprobar la reproducción de este trabajo.

 Dr. Edgar G. Blanco Díaz	 M. C. Susana Ramírez Guízar	 Lic. Brenda Huichapa Rocha
---	--	--

c.c.p - Expediente


 Instituto Tecnológico Superior
 del Sur de Guanajuato
 COORDINACIÓN
 INGENIERÍA AMBIENTAL

Julio 2017

Elementos del trabajo profesional

- Copia de la portada
- Oficio de Liberación de Proyecto para la Titulación Integral
- Resumen
- Abstract
- Palabras Claves (keywords)
- Agradecimientos
- Dedicatoria
- Índice general
- Índice de figuras
- Índice de tablas
- Índice de contenido
- Contenido (Todo lo que se indica en la tabla de contenido)

Índice de contenido

Capítulo 1	11
Introducción.....	11
Capítulo 2.....	12
Marco teórico (Antecedentes).....	12
2.1. Riesgos a la salud por la contaminación atmosférica.	12
2.2. Contaminantes atmosféricos y fuentes de contaminación.....	12
2.3. Escenario de la contaminación atmosférica en México.....	13
2.4. Afectaciones a la salud ocasionadas por monóxido de carbono.	14
2.5. Monitoreo de la calidad del aire en México.....	15
2.6. Calidad del aire en el estado de Guanajuato.	16
Figura 1. Densidad de concentraciones máximas de Monóxido de Carbono en el Estado.	18
2.7. Monitoreo de la calidad del aire en Guanajuato.	18
2.8. El viento, variable meteorológica.....	19
Figura 2. Capas terrestres atmosféricas.....	21
2.9. Influencia del viento en la dispersión de los contaminantes atmosféricos.	21
Capítulo 3.....	23
Planteamiento del problema	23
3.1. Identificación.....	23
3.2. Justificación.....	23
3.3. Alcance.	23
Capítulo 4.....	24
Objetivos	24
4. 1. Objetivo General.	24
4.2. Objetivos Específicos.....	24
Capítulo 5.....	25

Metodología	25
5.1. Descripción del área de estudio.....	25
Figura 3. Mapa de ubicación de la zona de estudio.	26
Tabla 1. Ubicación de las estaciones de monitoreo del área de estudio.	27
5.2. Obtención de los datos.	27
5.3. Instrumentos para el desarrollo de la investigación.....	28
Capítulo 6	34
Resultados	34
Figura 4. Distribución de frecuencias de velocidad del viento de la estación de Seguridad Pública en Celaya del año 2018.	36
Figura 5. Distribución de frecuencias de velocidad del viento de la estación de Seguridad Pública en Celaya del año 2019.	37
Figura 6. Distribución de frecuencias de velocidad del viento de la estación de Seguridad Pública en Celaya del año 2020.	38
Figura 7: Distribución de frecuencias de velocidad del viento de la estación de Seguridad Pública en Celaya del año 2021.	39
Figura 8: Distribución de frecuencias de velocidad del viento de la estación de Teódula en Irapuato del año 2018.	40
Figura 9. Distribución de frecuencias de velocidad del viento de la estación de Teódula en Irapuato del año 2019.	41
Figura 10. Distribución de frecuencias de velocidad del viento de la estación de Teódula en Irapuato del año 2020.	42
Figura 11. Distribución de frecuencias de velocidad del viento de la estación de Teódula en Irapuato del año 2021.	43
Figura 12. Distribución de frecuencias de velocidad del viento de la estación de Bomberos en Irapuato del año 2018.	44
Figura 13. Distribución de frecuencias de velocidad del viento de la estación de Cruz Roja en Salamanca del año 2018.	45
Figura 14. Distribución de frecuencias de velocidad del viento de la estación de Cruz Roja en Salamanca del año 2019.	46
Figura 15. Distribución de frecuencias de velocidad del viento de la estación de Cruz Roja en Salamanca del año 2020.	47
Figura 16. Distribución de frecuencias de velocidad del viento de la estación de Cruz Roja en Salamanca del año 2021.	48

Figura 17. Distribución de frecuencias de velocidad del viento de la estación de Nativitas en Salamanca del año 2018.....	49
Figura 18. Distribución de frecuencias de velocidad del viento de la estación de Nativitas en Salamanca del año 2019.....	50
Figura 19. Distribución de frecuencias de velocidad del viento de la estación de Nativitas en Salamanca del año 2020.....	51
Figura 20. Distribución de frecuencias de velocidad del viento de la estación de Nativitas en Salamanca del año 2021.....	52
Capítulo 7	53
Análisis de Resultados.....	53
7.1. Seguridad Pública.....	53
7.2. Teódula.....	54
7.3. Bomberos.....	55
7.4. Cruz Roja.....	55
7.5. Nativitas.....	56
Figura 21. Representación gráfica de los promedios mensuales de las ppm de CO en la estación SP.....	58
Figura 22. Mapa de Ubicación de la Estación de Monitoreo Seguridad Pública en Celaya.....	59
Figura 23. Representación gráfica de los promedios mensuales de las ppm de CO en la estación TEO.....	60
Figura 24. Representación gráfica de los promedios mensuales de las ppm de CO en la estación BOM.....	61
Figura 25. Mapa de Ubicación de las Estaciones de Monitoreo Bomberos y Teódula en Irapuato.....	62
Figura 26. Representación gráfica de los promedios mensuales de las ppm de CO en la estación CR.....	63
Figura 27. Representación gráfica de los promedios mensuales de las ppm de CO en la estación NAT.....	64
Figura 28. Mapa de Ubicación de las Estaciones de Monitoreo Cruz Roja y Nativitas en Salamanca.....	65
Capítulo 8	66
Conclusiones y trabajo a futuro	66

Referencias bibliográficas	69
Anexos	74

Resumen y abstract:

La contaminación atmosférica ocasionada por monóxido de carbono (**CO**) es una situación que aqueja al estado de Guanajuato, principalmente a los municipios de Salamanca, Celaya e Irapuato. A causa de esto, se han creado e implementado diversos mecanismos que contribuyen a la mejora de la calidad del aire. Uno de los principales mecanismos es el sistema de monitoreo de la calidad del aire que determina la cantidad de **CO** presente en el ambiente, así como las variaciones de velocidad y dirección del viento, una variable que influye en la dispersión de los contaminantes. El análisis de la relación entre el viento y la concentración de **CO** mediante la elaboración de gráficas rosa de los vientos que muestran la velocidad y dirección del viento, simultáneamente la elaboración de mapas permite observar las zonas donde se ubican las estaciones de monitoreo. Este análisis se realiza con el apoyo de la información disponible por Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire del Estado de Guanajuato (**SIMEG**), y el tratamiento de los datos mediante el software Matlab. Las gráficas resultantes muestran el comportamiento durante el mes correspondiente.

Abstract

Air pollution caused by carbon monoxide (**CO**) is a situation that afflicts the state of Guanajuato, mainly Salamanca, Celaya and Irapuato municipalities. Due to this problem, various mechanisms have been created and implemented to contribute and improve air quality. The main mechanism is the air quality monitoring system that determines the amount of **CO** present in the environment, as well as variations in wind speed and direction, a variable which influences the pollutants dispersion. The analysis of the relationship between wind and **CO** concentration through wind rose graphs showing the wind speed and direction, simultaneously the making maps allows to observe the areas where the monitoring stations are located. This analysis is carried out with the support of the information available from the Air Quality Monitoring System of the State of Guanajuato (SIMEG, in Spanish), and the

processing of the data using the Matlab software. The resulting graphs, show the wind behavior during the corresponding month.

Palabras claves (*keywords*)

monóxido de carbono, estación de monitoreo, calidad del aire, viento

carbon monoxide, monitoring stations, air quality, wind

Capítulo 1

Introducción.

En el estado de Guanajuato se han instalado diversas empresas que han incrementado el sector industrial en la región. Éstas empresas se dedican a la industria automotriz de autopartes, productos químicos, la industria del cuero y el calzado, la industria textil, industria de equipo médico, entre otros.

Sin embargo, el incremento de la industria ha traído como consecuencia el aumento de las emisiones de contaminantes atmosféricos, es decir, la liberación de estas sustancias al ambiente ha generado un impacto negativo en la calidad del aire.

Es debido a esta situación, que el monitoreo de la calidad del aire, referente a la cuantificación de los contaminantes presentes en él, permite determinar el nivel de contaminación ambiental, y de ésta forma establecer parámetros de seguridad para la salud de la población.

Los fenómenos meteorológicos ejercen influencia sobre la calidad del aire y uno de los factores con mayor peso es el viento, ya que ocasiona el desplazamiento de los contaminantes. Así pues, la falta de conocimiento sobre la dispersión de **CO** en el estado de Guanajuato representa un área de oportunidad para el estudio de la dinámica de sustancias como el **CO** puesto que la industrialización en la zona y las constantes emisiones de contaminantes a la atmósfera, amenazan al ambiente y por consiguiente, a la población.

Capítulo 2

Marco teórico (Antecedentes).

2.1. Riesgos a la salud por la contaminación atmosférica.

La Organización Mundial de la Salud (**OMS**) define la contaminación del aire de la siguiente forma:

“La contaminación del aire es la presencia en él de agentes químicos, físicos o biológicos que alteran las características naturales de la atmósfera.” [1]

Asimismo, menciona que el 99% de la población total del planeta vive en zonas donde se superan los límites de contaminación del aire recomendados, por lo que, la contaminación del aire representa uno de los riesgos ambientales más alarmantes para la salud y que en el año 2019 provocó aproximadamente 4.2 millones de muertes prematuras [2].

Se estima que la contaminación del aire influye directamente en el fallecimiento de 7 millones de personas por año, y a la par, puede ocasionar grandes afectaciones a la salud como son accidentes cerebrovasculares, cáncer de pulmón y enfermedades del corazón [3].

2.2. Contaminantes atmosféricos y fuentes de contaminación.

La emisión de sustancias contaminantes se generan, sobre todo de sectores como el industrial, pues se requieren combustibles fósiles como gasolina, diesel, carbón para desarrollar las actividades propias de cada industria. Otra de las actividades emisoras de grandes cantidades de contaminantes, es el uso de vehículos ya que requieren combustibles como gasolina y diesel, y que en ciudades con elevada carga vehicular origina una alta concentración de estos contaminantes [4].

Así pues, los procesos o actividades que liberan sustancias a la atmósfera se clasifican de la siguiente forma:

- Fuentes puntuales: un lugar específico o punto fijo, generalmente hace referencia a las industrias.

- Fuentes móviles: como su nombre lo indica, son fuentes que tienen desplazamientos como el caso de los vehículos automotores.
- Fuentes de área: actividades a menor escala y que en la suma varias de estas actividades influyen en la calidad del aire de una zona en específico.

De la misma forma, los contaminantes se agrupan en dos categorías, los contaminantes primarios los cuales son liberados al ambiente en esa forma, es decir que permanecen con las características en que se generaron. Los contaminantes secundarios son los que una vez liberados en la atmósfera reaccionan con otras sustancias y dan como resultado un contaminante distinto [5].

2.3. Escenario de la contaminación atmosférica en México.

En México, de acuerdo con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (**SEMARNAT**), la más reciente publicación del Informe de Medio Ambiente en México 2018: Compendio de Estadísticas Ambientales, Indicadores Clave de Desempeño Ambiental, se emitieron en el país 23.3 millones de toneladas de contaminantes en el país, sin contabilizar las emisiones de las fuentes móviles, en el año 2014, donde el 73% de las emisiones de origen antropogénico provienen de fuentes de área y las fuentes fijas generaron el restante 24.7%. De estas emisiones, los contaminantes producidos en mayor cantidad fueron los compuestos orgánicos volátiles (**COV's**) con 3.4 millones de toneladas, lo que representa el 30.5%, el monóxido de carbono (**CO**) 3.2 millones de toneladas, equivalente al 28.2% y el dióxido de azufre (**SO₂**) con 1.3 millones de toneladas 11.9%, el resto de los contaminantes se generaron entre el 6 y el 9% [6].

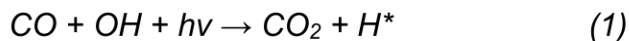
Se estima que en México, del año 2018 a 2022, la calidad del aire superó los límites establecidos por la **OMS** de la calidad del aire, medido en función de las partículas **PM_{2.5}**, lo cual lo sitúa en el lugar número 49 en el ranking de peor calidad del aire de entre 131 países [7].

Ante esta situación, organizaciones como *Green Peace* se han pronunciado diciendo que las malas condiciones de la calidad del aire en gran parte del país demuestran el escaso compromiso de las autoridades por asegurarse de que la población viva en un medio ambiente sano, el cual es un derecho de los ciudadanos,

pues la legislación en la materia regula de manera parcial las fuentes de contaminantes, dejando de lado aquellos emisores que contribuyen en igual medida, o incluso más en ciertas circunstancias, al aumento de contaminantes atmosféricos. Además, declara que es necesario la creación e implementación de estrategias a largo plazo, diseñadas específicamente para satisfacer las necesidades técnicas y administrativas en cada región del territorio nacional, otorgando recursos económicos para su puesta en marcha y estableciendo objetivos pertinentes [8].

2.4. Afectaciones a la salud ocasionadas por monóxido de carbono.

El monóxido de carbono (**CO**) es un gas que en relación con el aire, es 3.5% menos denso, inodoro, incoloro, insoluble en agua e inflamable. Se produce por la combustión incompleta de compuestos orgánicos, pues el oxígeno presente era limitado. En condiciones atmosféricas el **CO** tiende a fotooxidarse (1), convirtiéndose en dióxido de carbono (**CO₂**), empero, es lenta la velocidad de reacción por lo que tiene una duración de dos a cuatro meses [9].



El **CO** es el contaminante de mayor proporción en la atmósfera, sin embargo, no se encuentra distribuido de manera uniforme en el entorno, focalizándose principalmente en espacios urbanos, pues su generación excede la capacidad natural de asimilación.

El daño a la salud de las personas por estar en contacto con **CO** proviene de la afinidad que tiene con la hemoglobina (**Hb**), sustancia presente en la sangre y que es responsable del transporte de oxígeno ingerido por los pulmones y distribuido a través del organismo y que una vez combinados se denomina *carboxihemoglobina* (**COHb**) ralentizando la distribución del oxígeno, propiciando la formación de **COHb** por lo que el grado de afectación dependerá del tiempo de exposición y la cantidad de inhalación de **CO**. Existen factores que pueden influir en el riesgo de afectación por **CO** como el consumo de tabaco, la ubicación geográfica, el sector de trabajo y las condiciones meteorológicas [10].

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (**EPA**, por sus siglas en inglés) afirma que la exposición a concentraciones bajas de **CO** puede ocasionar leves dolores de cabeza y mareos, mientras que una exposición continua puede generar síntomas similares a la gripe. Por otra parte, la exposición a largo plazo de bajas concentraciones de **CO** podría originar problemas neurológicos, emocionales y motrices [11].

2.5. Monitoreo de la calidad del aire en México.

El monitoreo de la calidad del aire y de las condiciones meteorológicas permite analizar la dispersión y el transporte de los contaminantes atmosféricos, con la finalidad de evaluar las concentraciones de contaminantes en relación con las normas de salud ambiental [12].

En el año 2017 la **SEMARNAT** diseñó la Estrategia Nacional de Calidad del Aire (**ENCA**), la cual tiene como objetivos orientar y coordinar acciones para la prevención, control y mitigación de los contaminantes atmosféricos y de ésta forma, influir en la calidad del aire [13].

Los sistemas de vigilancia de la calidad del aire hacen uso de distintos equipos e instrumentos que monitorean contaminantes específicos. El Índice de Calidad del Aire (**ICA**) es una escala que representa el nivel de contaminación del aire de acuerdo a la densidad de contaminantes presentes. Posee un rango de 0 a 500 unidades en donde es segura una lectura por debajo de 50, mientras que por encima de 100 es considerado como poco saludable [14].

En México, el Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (**SINAICA**) se fue diseñado por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (**INECC**) en donde se recaba, se transmite y se publica información sobre la calidad del aire que se monitorea por los 34 Sistemas de Monitoreo de la Calidad del Aire (**SMCA**) a cargo de los estados y municipios en 29 estados y la Ciudad de México y que cuenta con 249 estaciones de monitoreo distribuidos en 103 ciudades y zonas metropolitanas [15].

Las estaciones de monitoreo deben sujetarse a los lineamientos que se establecen en la normativa, como el caso de la **NOM-156-SEMARNAT-2012, Establecimiento**

y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire [16] y la **NOM-172-SEMARNAT-2019, Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de la Calidad del Aire y Riesgos a la Salud** [17], además de las normas que establecen los métodos de medición para determinar la concentración de los contaminantes, así como las normas que evalúan la calidad del aire con respecto de los contaminantes criterio, que son definidos como los contaminantes que han sido normados y para los cuales se fija un límite máximo de la concentración permisible en el ambiente, con el objetivo de proteger la salud de la población y del ambiente. Estos contaminantes son el ozono (**O₃**), monóxido de carbono (**CO**), dióxido de azufre (**SO₂**), dióxido de nitrógeno (**NO₂**) y partículas suspendidas iguales o menores a 10 micrómetros (**PM₁₀**) y partículas suspendidas iguales o menores a 2.5 micrómetros (**PM_{2.5}**).

2.6. Calidad del aire en el estado de Guanajuato.

Durante el año 2023 se suscitaron algunas situaciones que ejemplifican las actividades que deterioran la calidad del aire en el estado. La Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial (**SMAOT**) del estado de Guanajuato alertó a la población por los altos niveles de contaminación atmosférica en distintas ocasiones y una de estas sucedió durante las celebraciones del año nuevo registrando *mala calidad* del aire en el corredor industrial donde la **SMAOT** calificó de *extremadamente mala calidad* del aire en Irapuato, y de mala calidad del aire en León, Celaya y Salamanca debido al uso de pirotecnia y el encendido de fogatas [18].

Posteriormente, en la tarde del día 18 de febrero se activó la *Fase de Vulnerabilidad Atmosférica*, definido como un estado en el que la salud de la población se ve amenazada por un suceso de origen antropogénico que genera emisiones a la atmósfera y que por distintos factores, no se cuantifica por las estaciones de monitoreo, que dió inicio debido a la presencia de humo amarillento emitido por la refinería Ing. Antonio M. Amor perteneciente a Petróleos Mexicanos (**PEMEX**) suscitado por un fallo en la planta catalítica, no se detectaron elevadas concentraciones de **SO₂** pues el viento de dirección suroeste dispersó el

contaminante. Sin embargo, la madrugada del mismo día, la estación de monitoreo Cruz Roja ya había identificado un aumento en las concentraciones de este compuesto [19].

Otra de las ocasiones donde las emisiones de contaminante se incrementó ocurrió a consecuencia del incendio en sitio de disposición final de residuos sólidos del municipio de la ciudad capital del estado que comenzó en la madrugada del día 01 de mayo y que se extendió por 13 de las 40 hectáreas totales que abarca el sitio y que duró más de una semana activo [20] y considerando que el municipio de Guanajuato sólo cuenta con una estación de monitoreo de contaminación atmosférica y que mide únicamente la cantidad de partículas PM2.5, se resalta una situación alarmante pues no se conoce la cantidad del resto de contaminantes criterio contaminantes presentes en el aire.

En el estado de Guanajuato, la Secretaría de Desarrollo Económico Sustentable (**SDES**) señala que se establecieron 46 parques industriales y los sectores industriales con mayor presencia son automotriz-autopartes, agroalimentario, plástico, servicios, nuevas tecnologías, cuero-calzado proveeduría, así como industria dedicada a la generación de energía [21].

En el año 2017, la emisión de **CO** de las fuentes fijas como la industria petroquímica y del petróleo género 1 134.5 toneladas (28.9%), el sector de la producción de energía eléctrica emitió 1 079.2 toneladas (28.4%), la industria de cuero y piel produjo 857.4 toneladas (22.5%), mientras que la industria química generó 211.2 toneladas (5.5%) [22].

La Figura 1 publicada en el Informe de Estado y Tendencia de Calidad del Aire del Estado de Guanajuato, representa la división municipal del estado en el que se aprecian las estaciones de monitoreo atmosférico identificadas por un símbolo circular, los polígonos de color rosa son asentamientos humanos, y las zonas de color anaranjado mas intenso representan las altas concentraciones de **CO** mientras que las áreas de tono menos anaranjado tienen menor presencia del contaminante, así mismo, las líneas curvas simbolizan éstas concentraciones, donde a menor tamaño de la curva, mayor es la densidad de contaminante y viceversa, identificando a Irapuato y Salamanca como los municipios que

concentran las emisiones de este compuesto como consecuencia de sus actividades industriales, donde se observa claramente las altas concentraciones de este contaminante.

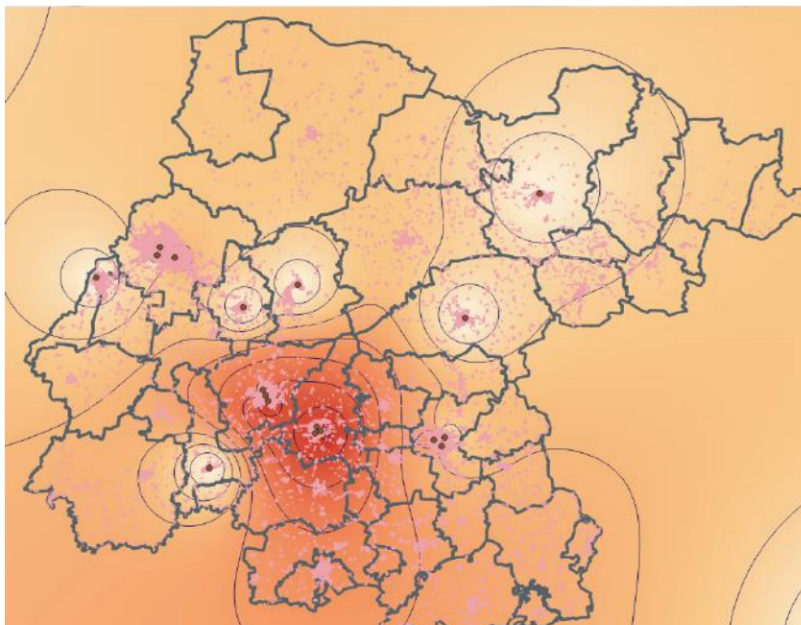


Figura 1. Densidad de concentraciones máximas de Monóxido de Carbono en el Estado.
Fuente: Figura de la Secretaría de Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial. (2021).
Informe de Estado y Tendencia de Calidad del Aire del Estado de Guanajuato.

2.7. Monitoreo de la calidad del aire en Guanajuato.

El Subsistema Estatal de Información de la Calidad del Aire (**SEICA**) establecido en el estado de Guanajuato y administrado por la **SMAOT**, integra información referente a la contaminación atmosférica, contaminantes criterio y gases de efecto invernadero, con el objetivo principal de ser una plataforma accesible para la vigilancia de la calidad del aire, así como para la difusión de la información, en beneficio de la población.

El **SEICA** recopila y organiza la información referente a la calidad del aire y que con la participación del Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire del Estado de Guanajuato (**SIMEG**), encargado de las estaciones monitoreo, las cuales determinan la presencia de los contaminantes criterio, establece tres vertientes principales.

La *calidad del aire en tiempo real* informa sobre la carga de contaminantes registrados en los municipios en el momento de la consulta, y de acuerdo con ello determina su calidad: buena, aceptable, mala, muy mala y extremadamente mala. Los datos *históricos de la calidad del aire* son una recopilación de los registros generados por las estaciones de monitoreo, organizados por municipio, estación, día, mes y año y presenta cuantificación de los contaminantes y el registro de variables meteorológicas.

En la sección *Emisiones* se presenta el Sistema de Información de Contaminantes y Gases de Efecto Invernadero (**SICGEI**) creado para dar cumplimiento al Reglamento en Materia de Prevención y control de la Contaminación Atmosférica y Ley de Cambio Climático del Estado de Guanajuato, así como para sustentar la aplicación de políticas públicas para el mejoramiento de la calidad del aire, así como facilitar el acceso a la información referente a la emisión de contaminantes.

El **SICGEI** está compuesto por el Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (**RETC**), el Registro Estatal de Emisiones Mitigaciones de Gases de Efecto Invernadero (**RE&MGEI**), el Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio (**Inv. Criterio**) y el Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (**Inv. GEI**) [23].

2.8. El viento, variable meteorológica.

El viento se origina por la diferencia de presión en la atmósfera, que es causada por el irregular calentamiento de la superficie terrestre, pues la inclinación de la Tierra propicia que la radiación solar incida en mayor medida en las zonas cercanas al Ecuador por lo que la diferencia de temperaturas modifica la densidad del aire y en consecuencia el aire caliente descendiende y asciende el aire frío proveniente de los polos, creándose un ciclo. A la par, la fuerza de Coriolis, denominada de esta forma el desplazamiento del aire generado por el movimiento de rotación de la Tierra, impulsa el viento en sentido contrario del movimiento de las manecillas del reloj en el hemisferio norte, mientras que en el hemisferio sur sucede a la inversa, es decir, en sentido de las manecillas del reloj. Se considera que el viento se desliza

únicamente de forma horizontal, pues la gravedad ejerce presión de forma vertical lo que este movimiento se descarta.

De forma simple, es posible identificar que en la dinámica del viento influyen cuatro fuerzas principales: la fuerza de presión que se origina por la disparidad en el calentamiento del viento, la fuerza de Coriolis, fuerzas inerciales derivadas de los movimientos circulares de las masas de viento y de la fricción ocasionada por el paso del viento sobre el terreno [24].

El viento está condicionado por las características topográficas del terreno que ocasiona que la velocidad varíe con la altitud, por lo que este obedece a diversas condiciones ambientales [25].

Los vientos a *micro-escala* comprenden superficies de 5 a 10 km y alcanzan los 200 m de altura y presenta diferentes velocidades de acuerdo a su altura, a mayor altura incrementa la velocidad, y se encuentra condicionado por el relieve debido a que a mayor cercanía con el suelo, este ejerce un efecto de frenado por la fricción que se ejerce al rozar el terreno.

En la Figura 2 podemos observar las escalas en que se divide la atmósfera, así como los límites de altitud que comprenden y las fuerzas que en ellas influyen [26].

La capa límite superficial, es decir, la micro-escala es la zona de interés para el propósito de este estudio, la capa más cercana al límite terrestre donde se encuentran los contaminantes atmosféricos que afectan a la salud.

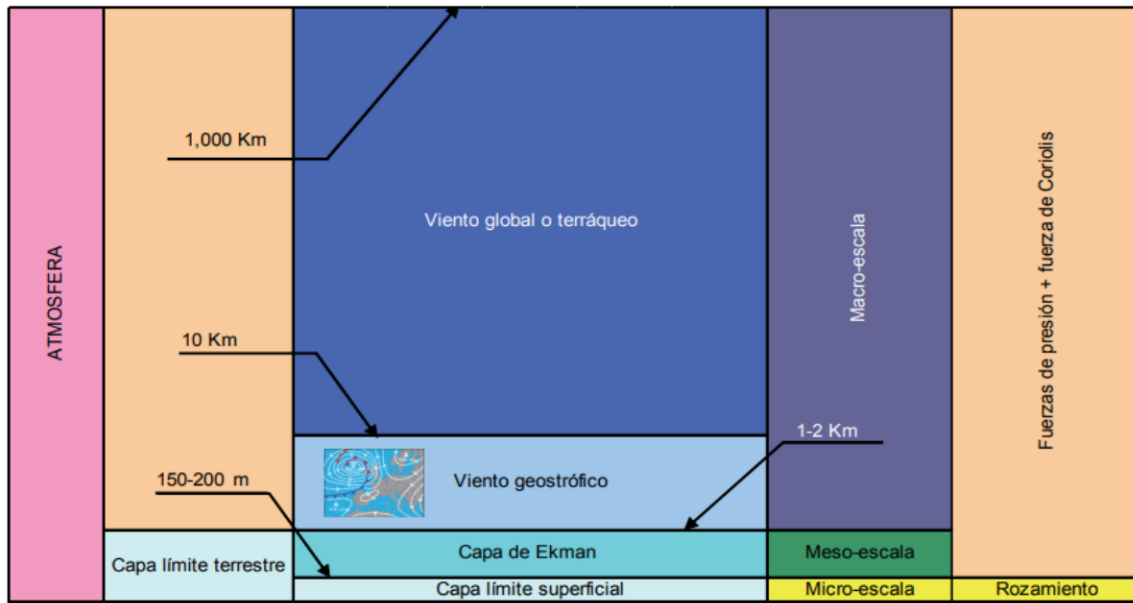


Figura 2. Capas terrestres atmosféricas.

Fuente: Manual de energía eólica.

2.9. Influencia del viento en la dispersión de los contaminantes atmosféricos.

Las variables meteorológicas y las características de las fuentes emisoras de contaminantes atmosféricos repercuten sobre la dispersión de estos [27]. El viento influye significativamente en la dispersión y dilución de los contaminantes atmosféricos. La velocidad del viento favorece en el desplazamiento de los contaminantes y por su parte, la dirección que este presenta se relaciona con la concentración de las sustancias emitidas ya que al ser arrojadas a la atmósfera, el viento contribuye a la dilución de la concentración [28].

Gaitán et al. concluyeron que una de las mayores influencias en los resultados que obtuvieron es que la velocidad del viento tuvo un rol importante, pues la zona de estudio presentó menor concentración de partículas **PM₁₀** [29].

En un estudio realizado en Bahía de Banderas, Nayarit, sobre el campo de viento y temperatura se observó que el viento superficial se desplaza dependiendo de la topografía y la época del año, además de que la temperatura incide en la intensidad del viento. Los resultados mostraron que las zonas montañosas se estanca y redirecciona de forma vertical. Por el contrario, el viento en la costa circula sin

restricción. Adicionalmente indica que para incrementar la confiabilidad de los resultados deben realizarse este tipo de estudios durante largos periodos de tiempo ya que son varios los factores que inciden en el comportamiento del viento [30].

La velocidad, dirección y turbulencia del viento inciden fuertemente en la concentración de los contaminantes en un área determinada. Simultáneamente, el viento depende de las características del relieve [31]. En el estudio *Simulación computacional e influencia de las variables meteorológicas en las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana* de Rojas et al, se observó que el incremento en la velocidad del viento y el aumento de la humedad reducen la presencia de contaminantes en la zona de estudio [32].

Los sistemas que integran variables meteorológicas para modelar la dispersión de los compuestos presentes en el aire, permiten representar mediante mapas, el transporte de los contaminantes atmosféricos [33].

Otro de los factores importantes en el monitoreo de la contaminación atmosférica es la distribución de las estaciones, ya que desempeñan un rol estratégico para vincular el tipo de actividades económicas con mayor influencia en la calidad del aire, y reconocer el tipo de sustancias que emiten, así como la cantidad y el área de afectación de estos [34].

Capítulo 3

Planteamiento del problema

3.1. Identificación.

En Guanajuato, las emisiones de gases de efecto invernadero como el monóxido de carbono (CO) contribuyen a la disminución de la calidad del aire, ocasionando afectaciones a la salud ambiental. Los municipios de Salamanca, Celaya e Irapuato, han registrado los niveles más altos de este contaminante en el estado, que amenaza a la salud de la población.

3.2. Justificación.

La importancia del monitoreo de la calidad del aire radica en que proporciona información oportuna sobre el grado de contaminación presente en el aire ambiente además de señalar el nivel de seguridad existente ante la exposición a la contaminación.

La degradación progresiva de la calidad del aire en la región genera la necesidad de estudiar y analizar el comportamiento del CO frente a fenómenos meteorológicos como el viento, ya que la comprensión sobre los procesos de dispersión de CO contribuye a conocer las potenciales áreas de afectación por la concentración de la contaminación y posteriormente, colaborar con la conformación de herramientas de gestión frente a contingencias ambientales.

3.3. Alcance.

En el presente estudio se aborda únicamente el viento como variable en la dispersión de la contaminación atmosférica, no obstante, no se abordan otras condiciones meteorológicas que al igual que el viento influyen en la dispersión.

Capítulo 4

Objetivos

4. 1. Objetivo General.

Analizar la relación entre la velocidad y dirección del viento y el monitoreo del monóxido de carbono (**CO**) del año 2018 al 2021 en las estaciones de monitoreo de Seguridad Pública en Celaya, Bomberos y Teódula en Irapuato y Cruz Roja y Nativitas en Salamanca.

4.2. Objetivos Específicos.

- Recopilar los datos referentes a la dirección y velocidad del viento de los años 2018 a 2021 en las estaciones mencionadas.
- Generar gráficas sobre las condiciones del viento mediante el uso del software Matlab.
- Determinar cómo se relaciona la cantidad de **CO** cuantificado y la dirección y velocidad del viento.
- Determinar el grado de relación entre la velocidad del viento y las zonas potencialmente afectadas por el **CO**.
- Elaboración de mapas de ubicación de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire.

Capítulo 5

Metodología

5.1. Descripción del área de estudio.

El estado de Guanajuato se ubica en la región centro norte de México, con una superficie territorial de 30,339.8 km². Se conforma por 46 municipios, agrupados en cuatro regiones que a su vez se dividen en subregiones.

La región Centro abarca el 25% del territorio estatal y concentra el 67% de la población, está compuesta por las subregiones zona Metropolitana de León, la zona Metropolitana Irapuato-Salamanca y la zona Metropolitana Laja-Bajío, en donde se ubican los municipios motivo del presente estudio. En esta región se localizan los principales asentamientos humanos del estado como León, Silao, Irapuato, Salamanca y Celaya, caracterizados principalmente por su auge industrial, situando sus instalaciones a lo largo de la carretera federal 45, creando así, el corredor industrial más importante del estado, el cual conecta también la región Sur mediante carreteras aledañas [35].

En concreto, el objeto de estudio de la presente investigación son las estaciones de monitoreo de la calidad del aire son la estación Seguridad Pública en Celaya, Bomberos y Teódula en Irapuato y las estaciones Cruz Roja y Nativitas ubicadas en el municipio de Salamanca, de las cuales, el **SINAICA** da a conocer la ubicación precisa (mapa) (Tabla 1). Sin embargo, las coordenadas de la estación Bomberos, no coinciden con una locación dentro del municipio de Irapuato, información corroborada mediante Google Earth, por lo que, para los motivos de este estudio se toma como la ubicación correcta de la estación de monitoreo, el domicilio adjunto proporcionado por organismo referido anteriormente.



Figura 3. Mapa de ubicación de la zona de estudio.

Capítulo 5. Metodología.

Tabla 1. Ubicación de las estaciones de monitoreo del área de estudio.

Municipio	Estación	Dirección Postal	Coordenadas decimales
Celaya	Seguridad Pública (SP)	Calle: Pipila No. Exterior: #114 Colonia: Zona Centro	20.52 N, 100.82 O, 1760 msnm
Irapuato	Bomberos (BOM)	Calle: Blvd. Torres Landa No. Exterior: 375 Colonia: Álvaro Obregón CP: 36530	21.12 N, 101.6 O, 1724 msnm
	Teódula (TEO)	-	20.66 N, 101.35 O, 1724 msnm
Salamanca	Cruz Roja (CR)	Calle: Ezequiel Ordoñez No. Exterior: 100 No. Interior: Bellavista CP: 36730	20.58 N, 101.2 O, 1721 msnm
	Nativitas (NAT)	Calle: Juárez No. Exterior: 1198 Colonia: Nativitas CP: 36770	20.57 N, 101.19 O, 1721 msnm

Fuente: elaboración propia con información obtenida del *SINAICA*.

5.2. Obtención de los datos.

Para el análisis de la dispersión de monóxido de carbono (**CO**) se obtuvieron los datos históricos de la velocidad y dirección del viento de las estaciones de monitoreo atmosférico señaladas previamente, del año 2018 al 2021 generados por el **SIMEG** a cargo de la **SMAOT**.

Capítulo 5. Metodología.

Los datos históricos incluyen las mediciones de la concentración de **CO** así como la velocidad y dirección del viento que fueron tomados una vez por hora a lo largo del día, y así sucesivamente cada día, y se organizan por cada mes y año las estaciones de monitoreo.

Las mediciones de velocidad y dirección de viento se disponen en un gráfico rosa de los vientos, donde los puntos cardinales, Norte, Sur, Este y Oeste, se dividen en secciones de 10 grados que representan la dirección del viento.

Así mismo, las velocidades del viento en kilómetros por hora (km/h) se clasificaron en seis categorías asociadas a un color distinto cada una. Para la categoría de dos a cinco se definió el azul cobalto, el azul capri representa el intervalo de cinco a siete, la categoría de siete a 10 caracterizado por verde, el rango de 10 a 15 en amarillo, de 15 a 20 en naranja, y por último en color guinda para las velocidades mayores a 20 km/h.

En los gráficos se incluye también el porcentaje de calma de los datos registrados en el mes, es decir, la proporción de los datos que registraron una velocidad menor a los 2 km/h.

Los datos se clasifican en el gráfico rosa de los vientos de acuerdo con su dirección (grados) y en el rango de velocidad en que se encuentra, esto es, el gráfico ilustra la frecuencia en que se presenta determinado dato en el mes.

5.3. Instrumentos para el desarrollo de la investigación.

El análisis de los registros de velocidad y dirección del viento se realizó en el software Matlab, con el código que se presenta a continuación.

```
clc
clear all
% Leer archivo xls
[num, str]=xlsread(num2str('2018_SP_Ce'));
A=num(:,1);
A=A(~isnan(A)); %Eliminar NaN
B=num(:,2);
B=B(~isnan(B));
a=num(:,6);
a=a(~isnan(a)); %Eliminar NaN
b=num(:,7);
```

Capítulo 5. Metodología.

```
b=b(~isnan(b));
WS=num(:,3);
WS=3.6*(WS);
WS(isnan(WS))=0; %Convertir NaN en zero
WD=num(:,4);
WD(isnan(WD))=0;
dir=zeros(36,1);
n=1;
for j=1:36
    for i=1:length(WD)
        if (A(j,1)<WD(i,1)) && (WD(i,1))< B(j,1)
            dir(j,n)=WS(i,1);
            n=n+1;
        end
    end
    fin=20;
    n=1;
end
dir;
vv=[A,B]; %Matriz con dirección y promedio de velocidad de viento
%Fase de 2 a 4.9 k/hr
s=0;
for j=1:36
    p=0;
    for i=1:length(dir(j,:))
        if 2 < (dir(j,i)) && (dir(j,i)) < 4.9
            p=p+dir(j,i);
            s=s+1;
        end
        vv(j,3)=p/s;
    end
    s=0;
end
%Fase de 5 a 6.9 k/hr
s=0;
for j=1:36
    p=0;
    for i=1:length(dir(j,:))
        if 5 < (dir(j,i)) && (dir(j,i)) < 6.9
            p=p+dir(j,i);
            s=s+1;
        end
        vv(j,4)=p/s;
    end
end
```

Capítulo 5. Metodología.

```
s=0;
end
%Fase de 5 a 6.9 k/hr
s=0;
for j=1:36
    p=0;
    for i=1:length(dir(j,:))
        if 7 < (dir(j,i)) && (dir(j,i)) < 9.9
            p=p+dir(j,i);
            s=s+1;
        end
        vv(j,5)=p/s;
    end
    s=0;
end
%Fase de 10 a 14.9 k/hr
s=0;
for j=1:36
    p=0;
    for i=1:length(dir(j,:))
        if 10 < (dir(j,i)) && (dir(j,i)) < 14.9
            p=p+dir(j,i);
            s=s+1;
        end
        vv(j,6)=p/s;
    end
    s=0;
end
%Fase de 15 a 19.9 k/hr
s=0;
for j=1:36
    p=0;
    for i=1:length(dir(j,:))
        if 15 < (dir(j,i)) && (dir(j,i)) < 19.9
            p=p+dir(j,i);
            s=s+1;
        end
        vv(j,7)=p/s;
    end
    s=0;
end
%Fase de + 20 k/hr
s=0;
for j=1:36
```

Capítulo 5. Metodología.

```
p=0;
for i=1:length(dir(j,:))
    if 20 < (dir(j,i))
        p=p+dir(j,i);
        s=s+1;
    end
    vv(j,8)=p/s;
end
s=0;
end
vv;
vv(isnan(vv))=0;
vv(:,(3:8));
%Porcentaje de calma
dirr=zeros(1,1);
n=0;
for i=1:length(WS)
    if (WS(i,1))< 2
        %dirr(n,1)=WS(i,1);
        n=n+1;
    end
end
%p_c=mean(dirr);
%p_vv=mean(WS);
%calm=(p_c/p_vv)*100
calm=(n/length(WS))*100
%CALCULO DE FRECUENCIA
%Fase de 2 a 4.9 k/hr
vvv=[A,B];
for j=1:36
    s1=0;
    s2=0;
    s3=0;
    s4=0;
    s5=0;
    s6=0;
    p=0;
    f=dir(j,:);
    i=find(f==0);
    f(i) = [];
    d=length(f);
    for i=1:d
        if 2 < f(1,i) && f(1,i) < 4.999
            s1=s1+1;
        end
    end
end
```

Capítulo 5. Metodología.

```
        end
    end
        vvv(j,3)=s1;
    for i=1:d
        if 5 < f(1,i) && f(1,i) < 6.999
            s2=s2+1;
        end
    end
        vvv(j,4)=s2;
    for i=1:d
        if 7 < f(1,i) && f(1,i) < 9.999
            s3=s3+1;
        end
    end
        vvv(j,5)=s3;
    for i=1:d
        if 10 < f(1,i) && f(1,i) < 14.999
            s4=s4+1;
        end
    end
        vvv(j,6)=s4;
    for i=1:d
        if 15 < f(1,i) && f(1,i) < 19.999
            s5=s5+1;
        end
    end
        vvv(j,7)=s5;
    for i=1:d
        if 20 < f(1,i)
            s6=s6+1;
        end
    end
        vvv(j,8)=s6;
    end
end
vvv(:,(3:8))
```

Por otra parte, para el análisis de la correlación entre los registros del viento y las emisiones de **CO**, se referencian los resultados obtenidos en la tesis “Análisis estadístico de las emisiones de CO durante la pandemia en los municipios de Guanajuato”, elaborada por Zavala Díaz (2023) y donde se observan los periodos de tiempo en que se identificó la mayor concentración de **CO**.

Capítulo 5. Metodología.

Así mismo, se elaboran mapas del área de estudio, con mediante el software ArcGis 10.8 y el apoyo de la información disponible desarrollada por el **INEGI**, donde se ilustra la ubicación precisa de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire, así como el uso de suelo y vegetación del municipio.

Capítulo 6

Resultados

Las gráficas de rosas de los vientos, son el producto de del análisis de los datos de velocidad y dirección del viento generados por las estaciones de monitoreo de la calidad del aire, las cuales representan la frecuencia de las condiciones de vientos, la dirección de donde proviene el viento y la velocidad que se registra en la estación al momento de la medición.

Los resultados obtenidos de la estación de Seguridad Pública en Celaya del año 2018 se presentan de la figura 4. La figura 5 pertenece al año 2019. La figura 6 corresponde al año 2020, en el cual no hubo registros referentes a los meses de agosto, septiembre, octubre y noviembre y la causa de ello es desconocida. Los resultados del año 2021 se encuentran en la figura 7.

La figura 8 corresponde a la estación de monitoreo Teódula en Irapuato del año 2018. La figura 9 muestra los resultados del año 2019, sin embargo para el mes junio no se obtuvieron resultados pues la estación no capturó las condiciones de viento en este periodo. Las gráficas generadas para el 2020 se encuentran en la figura 10. Así mismo, los resultados del año 2021 se exponen en la figura 11.

En la estación de monitoreo de la calidad del aire Bomberos en Irapuato únicamente se registraron las condiciones del viento del año 2018, en la figura 12, excepto para los meses octubre, noviembre y diciembre. De igual manera, no hay información referente a los años 2019, 2020 y 2021. El motivo por el cual no se realizó el monitoreo es desconocido.

Capítulo 6. Resultados.

Los resultados de la estación Cruz Roja en el Municipio de Salamanca se exponen en la figura 13 para el año 2018. En la figura 14 la del año 2019, la figura 15 corresponde al año 2020 y en la figura 16 se presentan los resultados del año 2021.

En la estación Nativitas en Salamanca resultaron las gráficas de la figura 17 para el año 2018. Correspondiente al año 2019 es la figura 18. Posteriormente, en la figura 19 estarán los resultados del año 2020 y finalmente, del año 2021 es la figura 20.

Capítulo 6. Resultados.

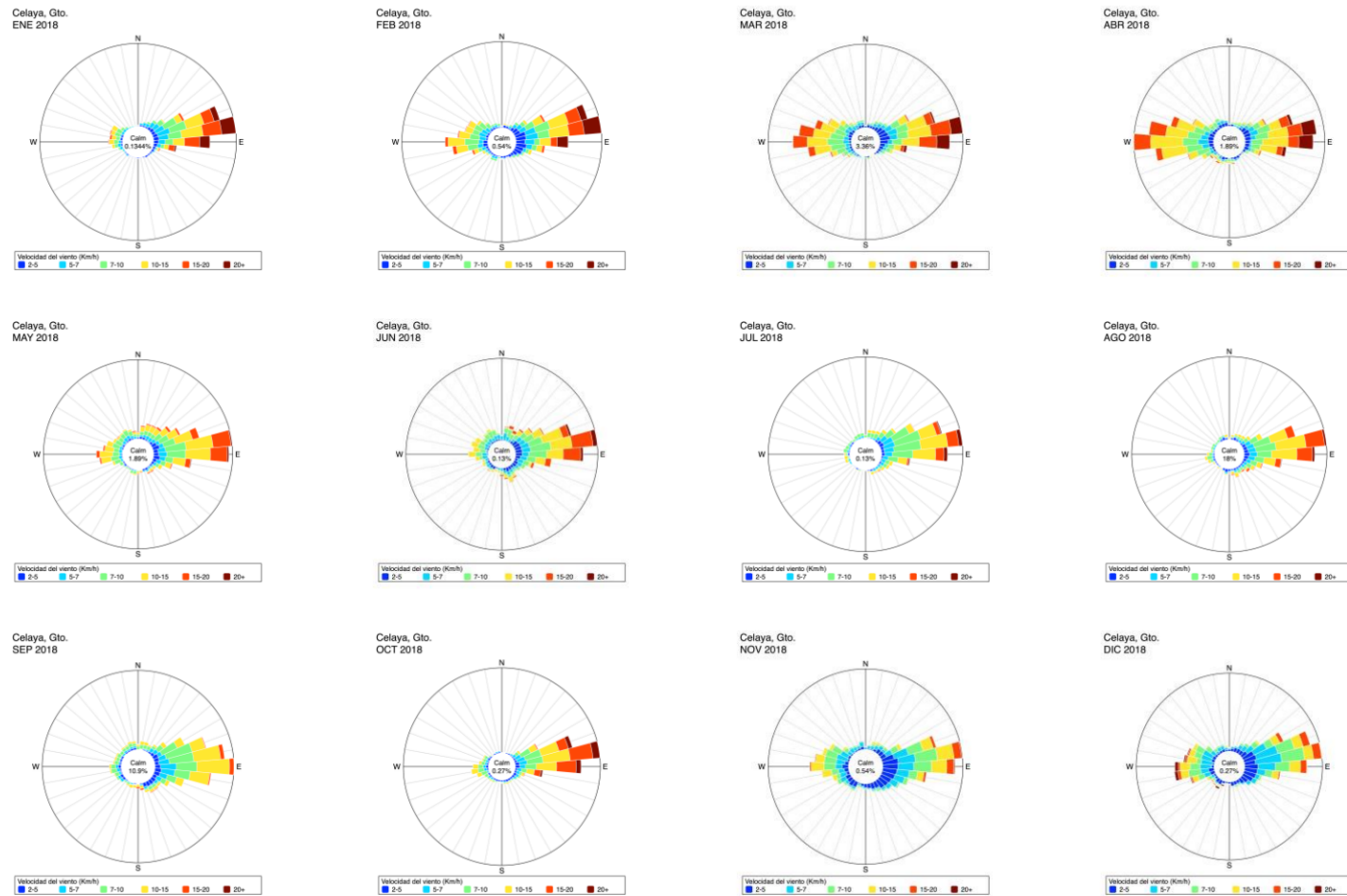


Figura 4. Distribución de frecuencias de velocidad del viento de la estación de Seguridad Pública en Celaya del año 2018.

Capítulo 6. Resultados.

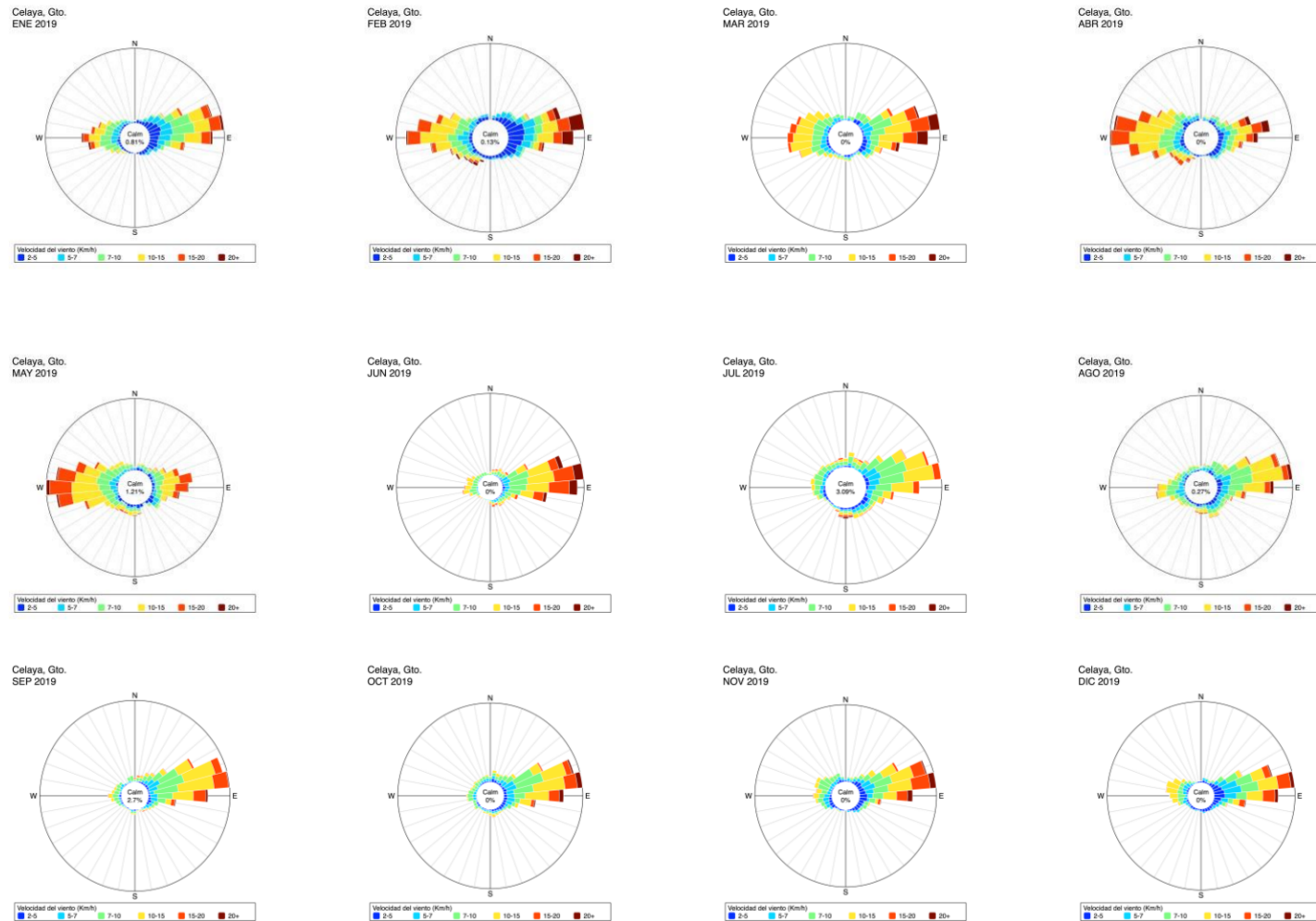


Figura 5. Distribución de frecuencias de velocidad del viento de la estación de Seguridad Pública en Celaya del año 2019.

Capítulo 6. Resultados.

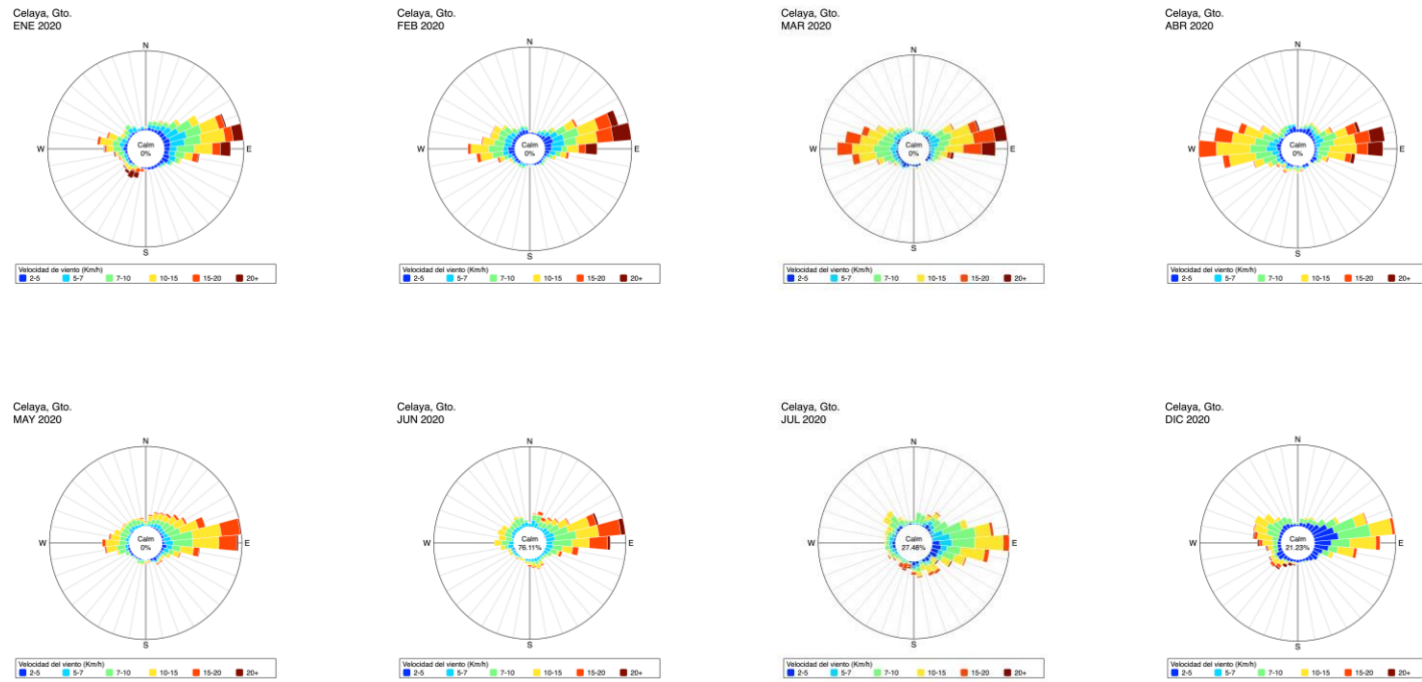


Figura 6. Distribución de frecuencias de velocidad del viento de la estación de Seguridad Pública en Celaya del año 2020.

Capítulo 6. Resultados.

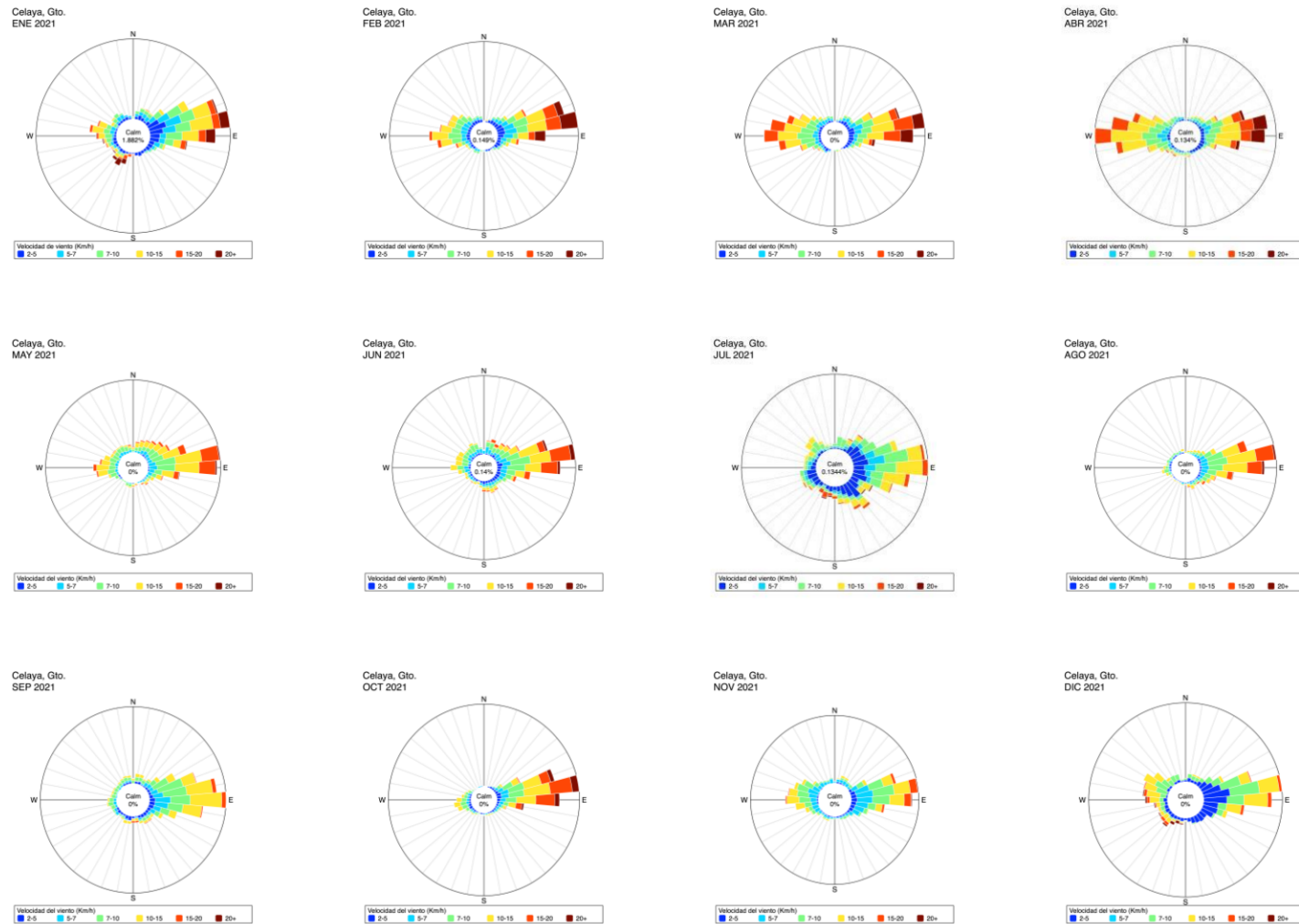


Figura 7: Distribución de frecuencias de velocidad del viento de la estación de Seguridad Pública en Celaya del año 2021.

Capítulo 6. Resultados.

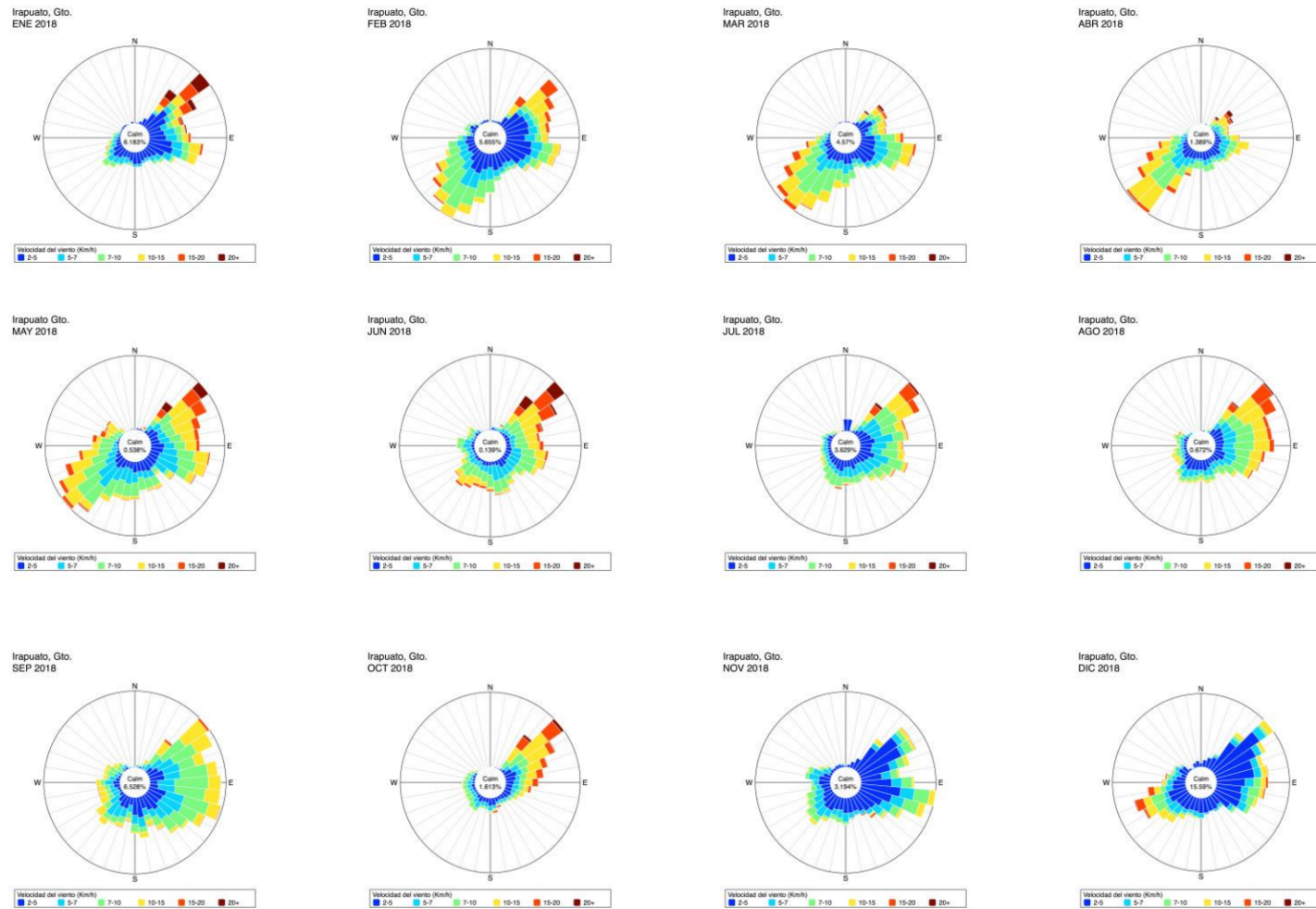


Figura 8: Distribución de frecuencias de velocidad del viento de la estación de Teódula en Irapuato del año 2018.

Capítulo 6. Resultados.

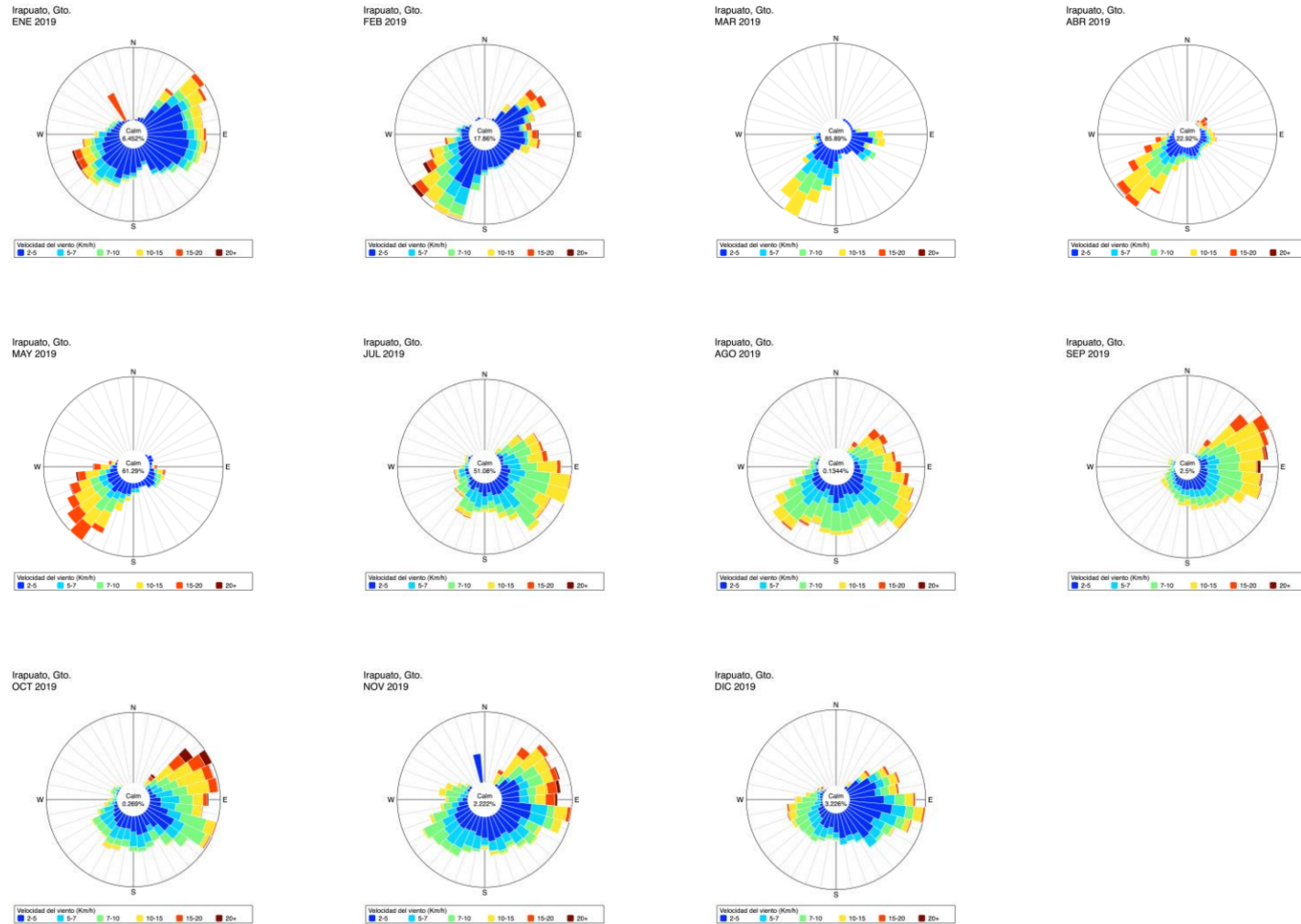


Figura 9. Distribución de frecuencias de velocidad del viento de la estación de Teóduła en Irapuato del año 2019.

Capítulo 6. Resultados.

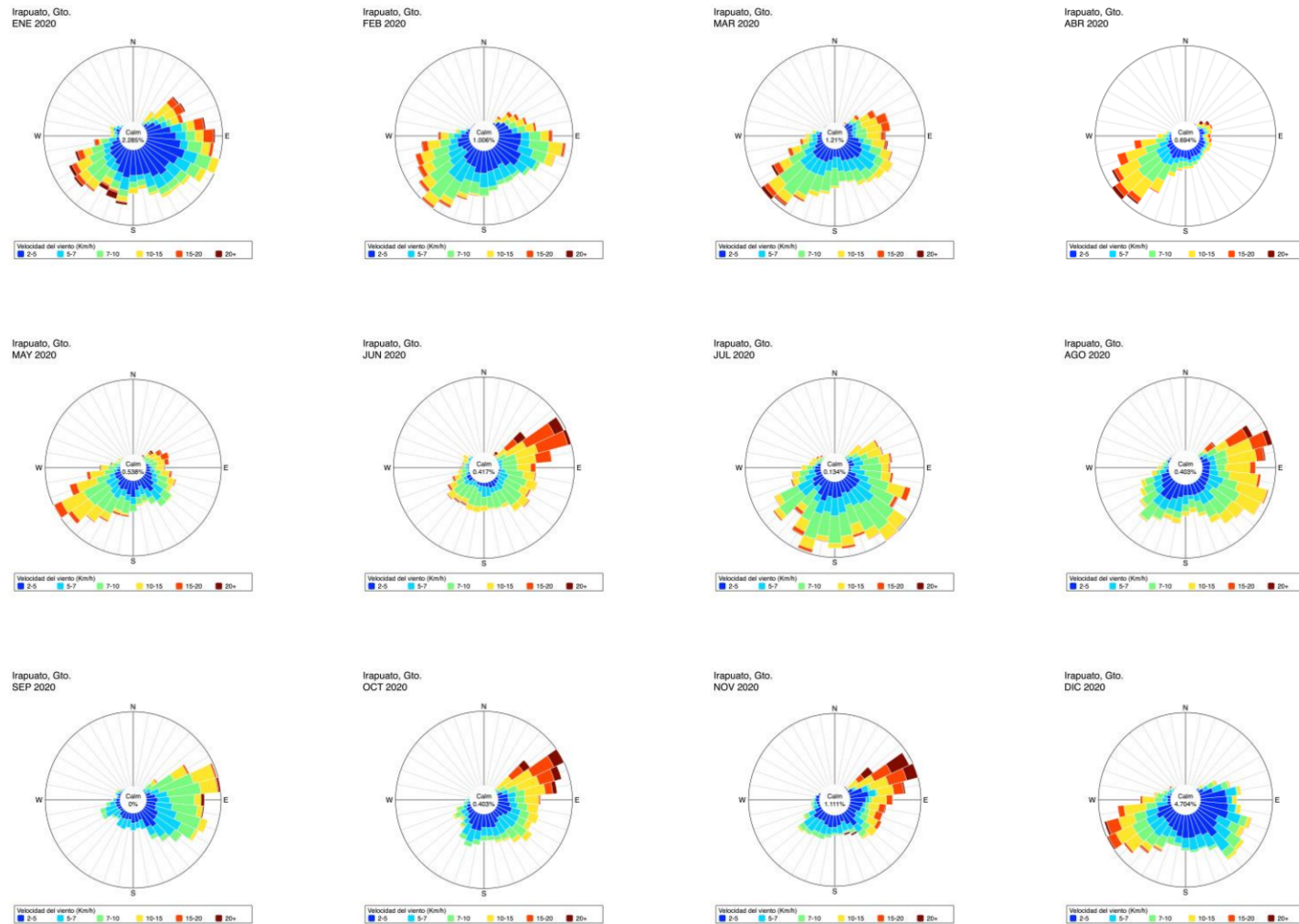


Figura 10. Distribución de frecuencias de velocidad del viento de la estación de Teódula en Irapuato del año 2020.

Capítulo 6. Resultados.

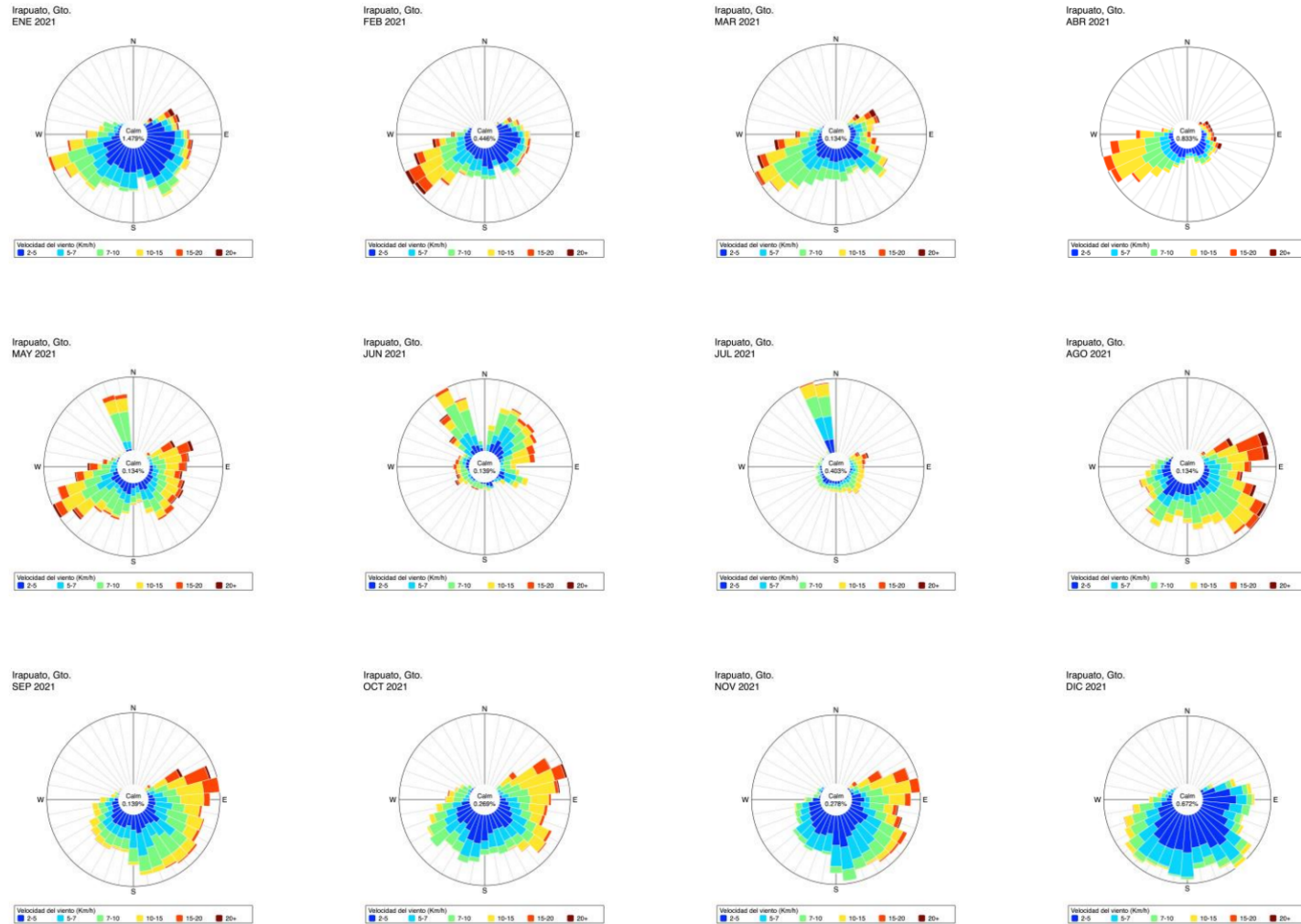


Figura 11. Distribución de frecuencias de velocidad del viento de la estación de Teódula en Irapuato del año 2021.

Capítulo 6. Resultados.

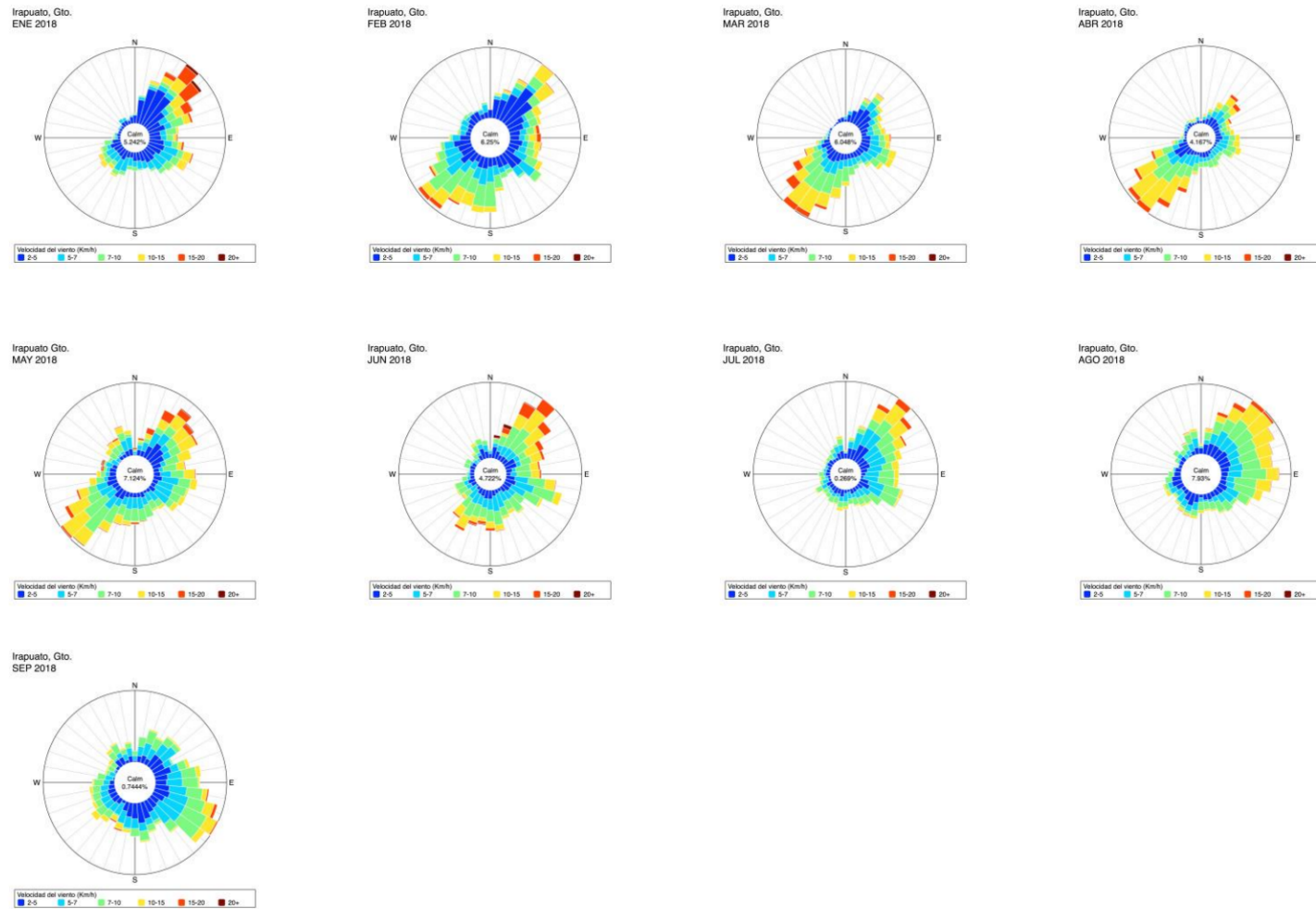


Figura 12. Distribución de frecuencias de velocidad del viento de la estación de Bomberos en Irapuato del año 2018.

Capítulo 6. Resultados.

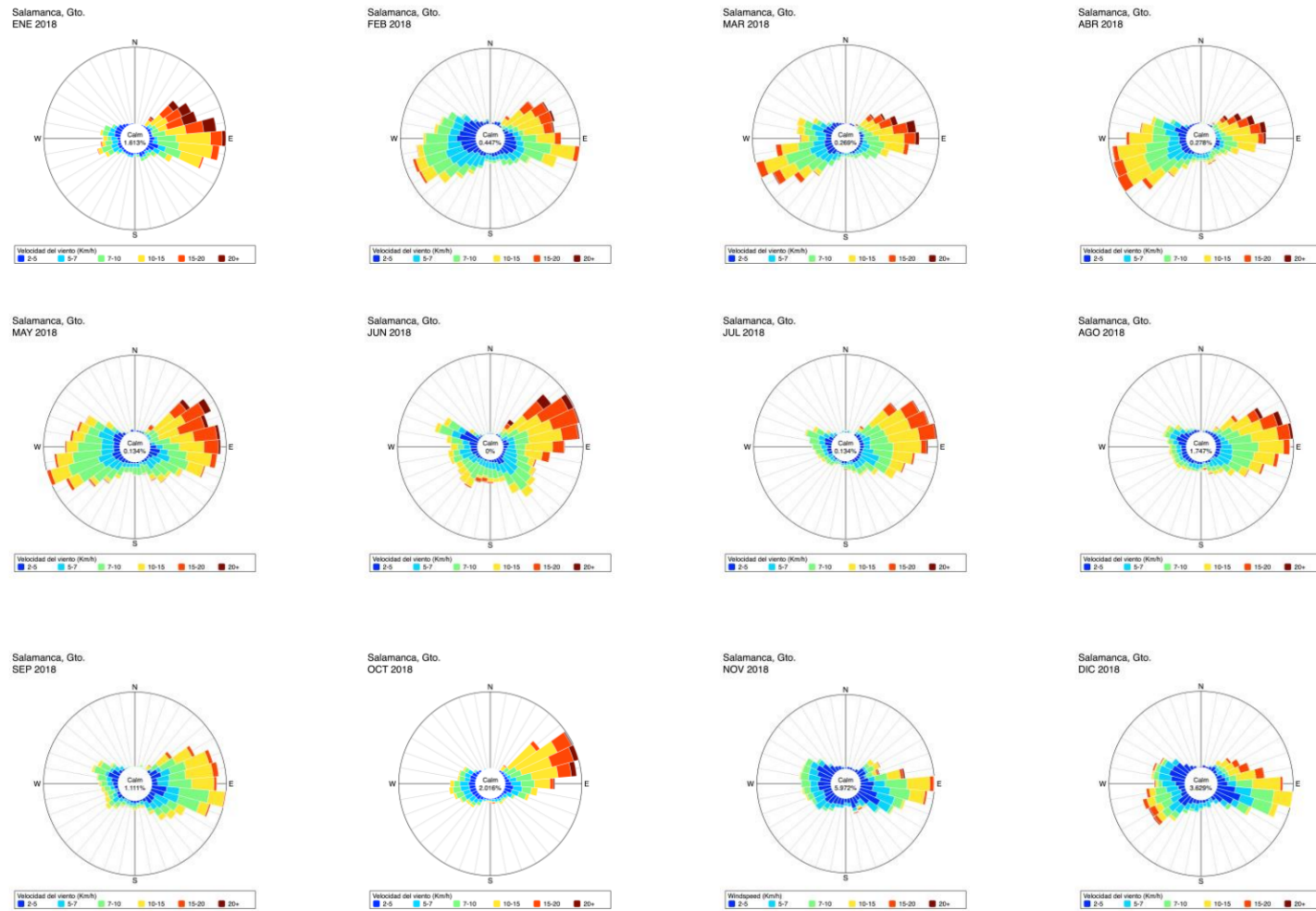


Figura 13. Distribución de frecuencias de velocidad del viento de la estación de Cruz Roja en Salamanca del año 2018.

Capítulo 6. Resultados.

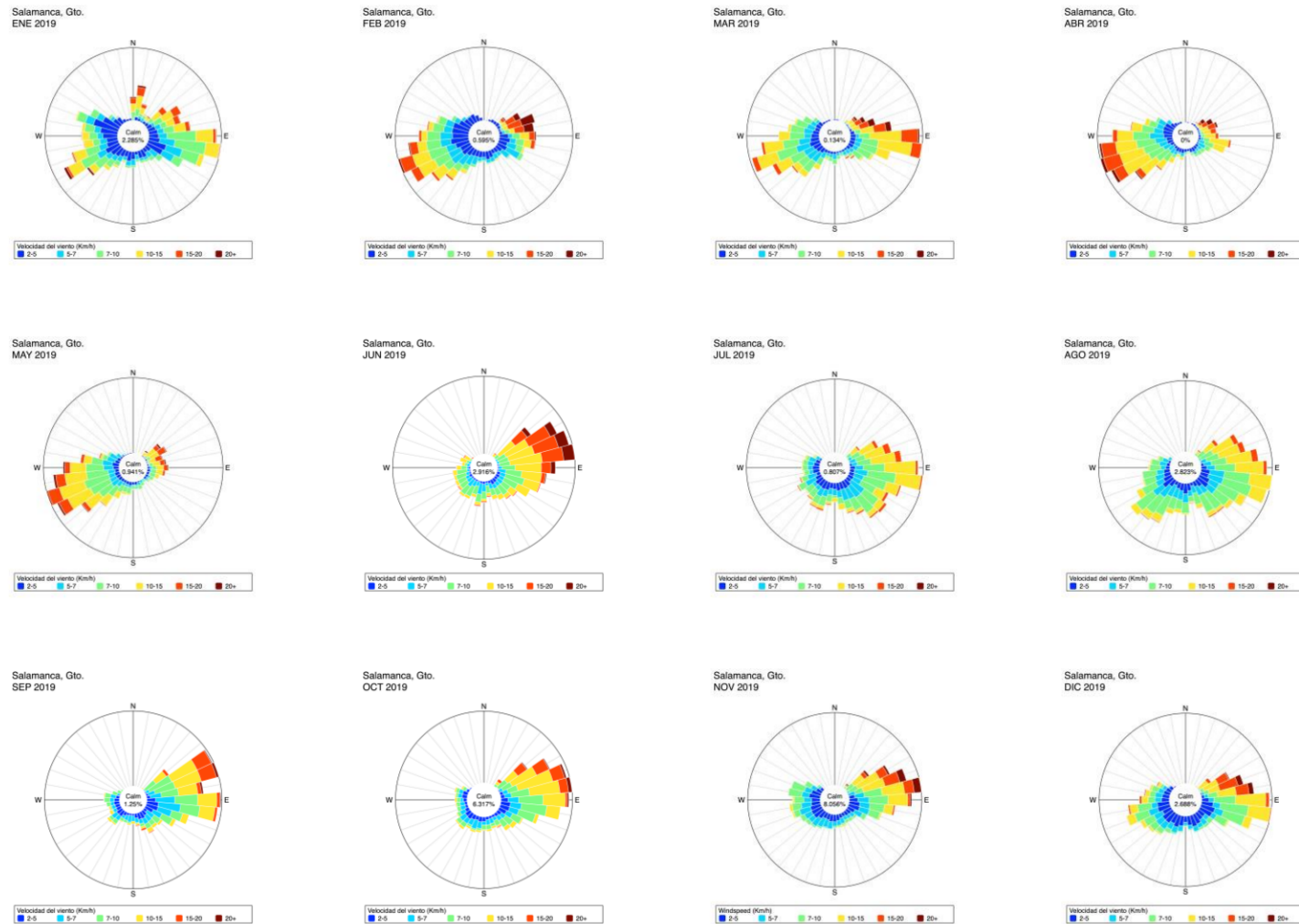


Figura 14. Distribución de frecuencias de velocidad del viento de la estación de Cruz Roja en Salamanca del año 2019.

Capítulo 6. Resultados.

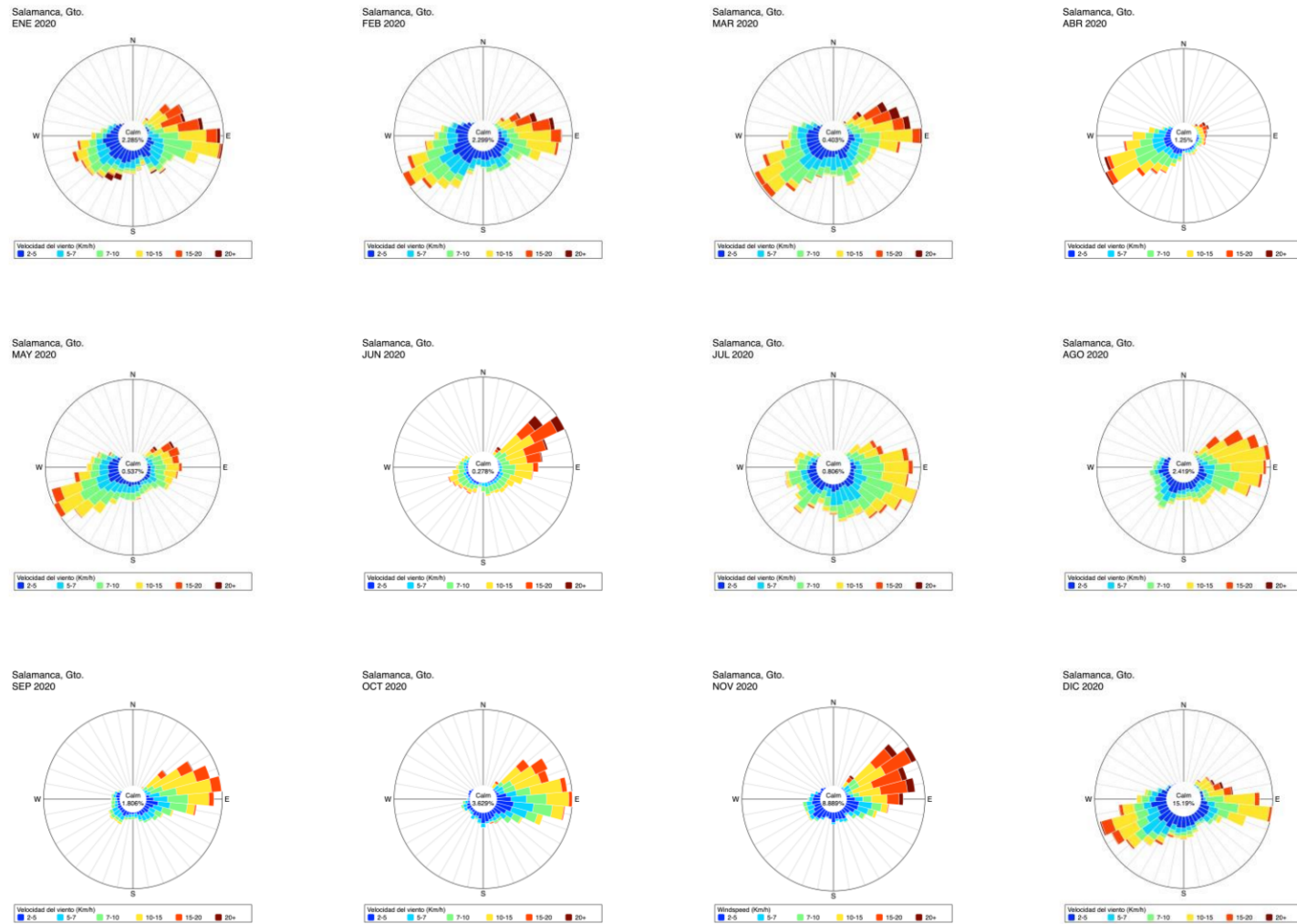


Figura 15. Distribución de frecuencias de velocidad del viento de la estación de Cruz Roja en Salamanca del año 2020.

Capítulo 6. Resultados.

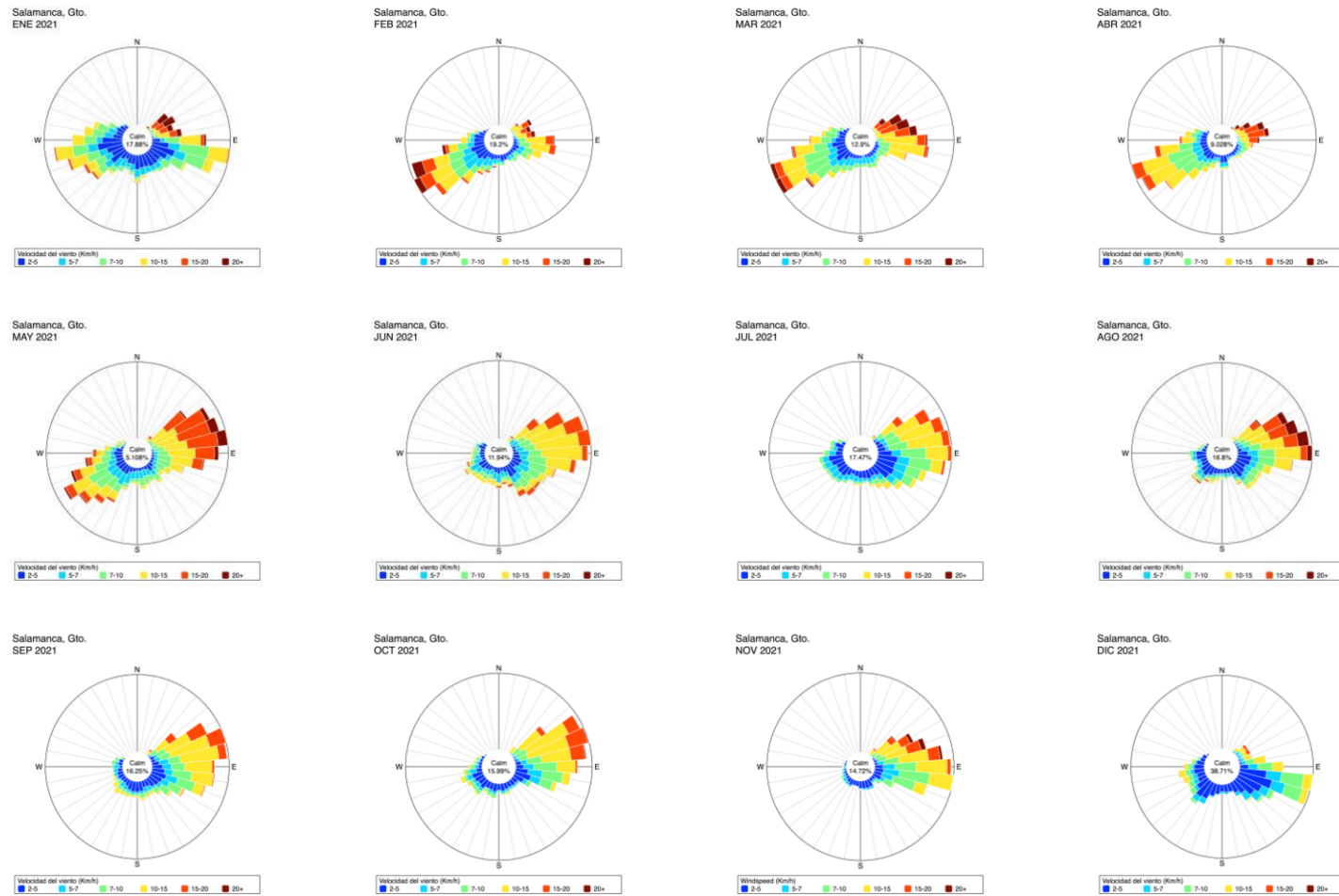


Figura 16. Distribución de frecuencias de velocidad del viento de la estación de Cruz Roja en Salamanca del año 2021.

Capítulo 6. Resultados.

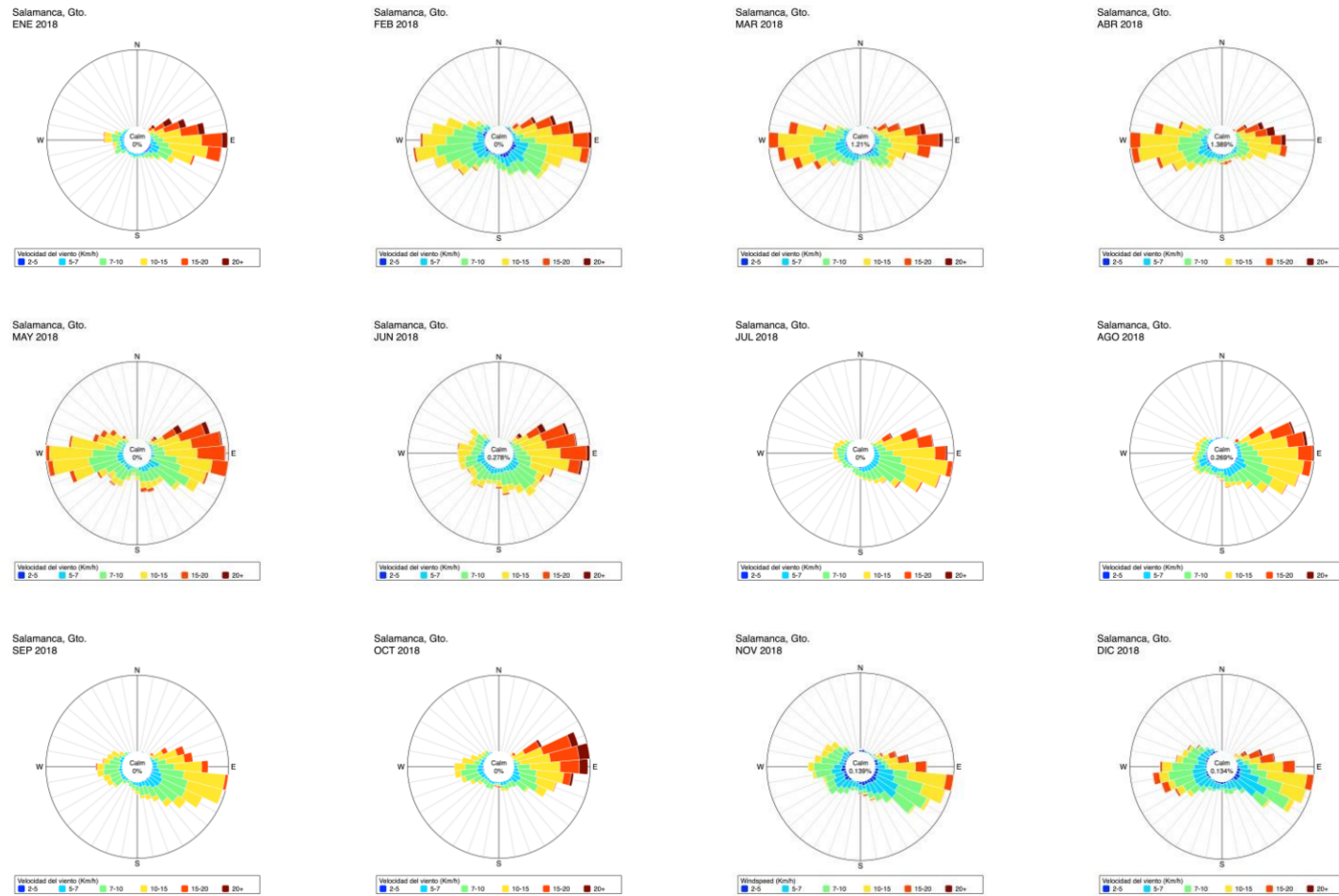


Figura 17. Distribución de frecuencias de velocidad del viento de la estación de Nativitas en Salamanca del año 2018.

Capítulo 6. Resultados.

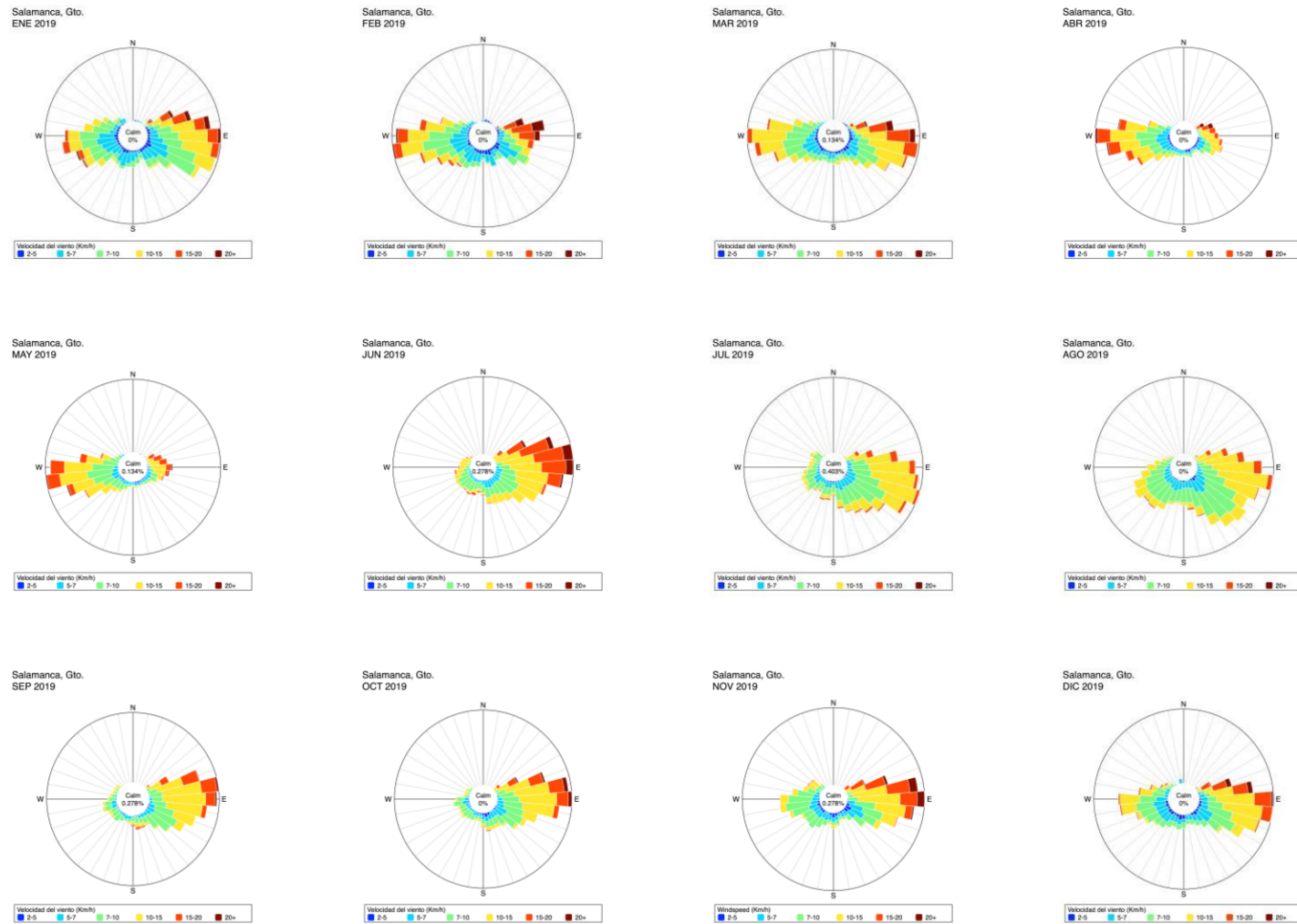


Figura 18. Distribución de frecuencias de velocidad del viento de la estación de Nativitas en Salamanca del año 2019.

Capítulo 6. Resultados.

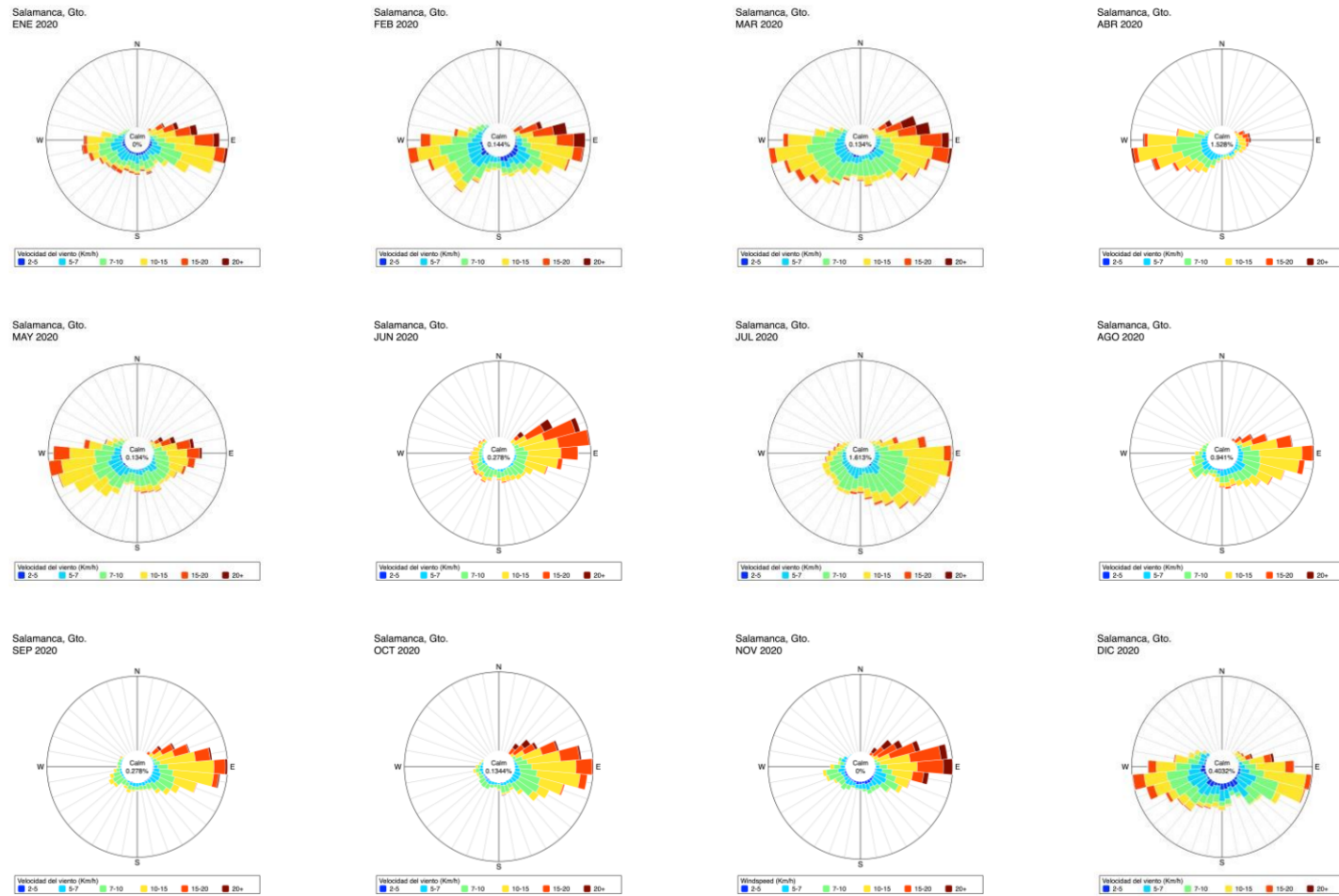


Figura 19. Distribución de frecuencias de velocidad del viento de la estación de Nativitas en Salamanca del año 2020.

Capítulo 6. Resultados.

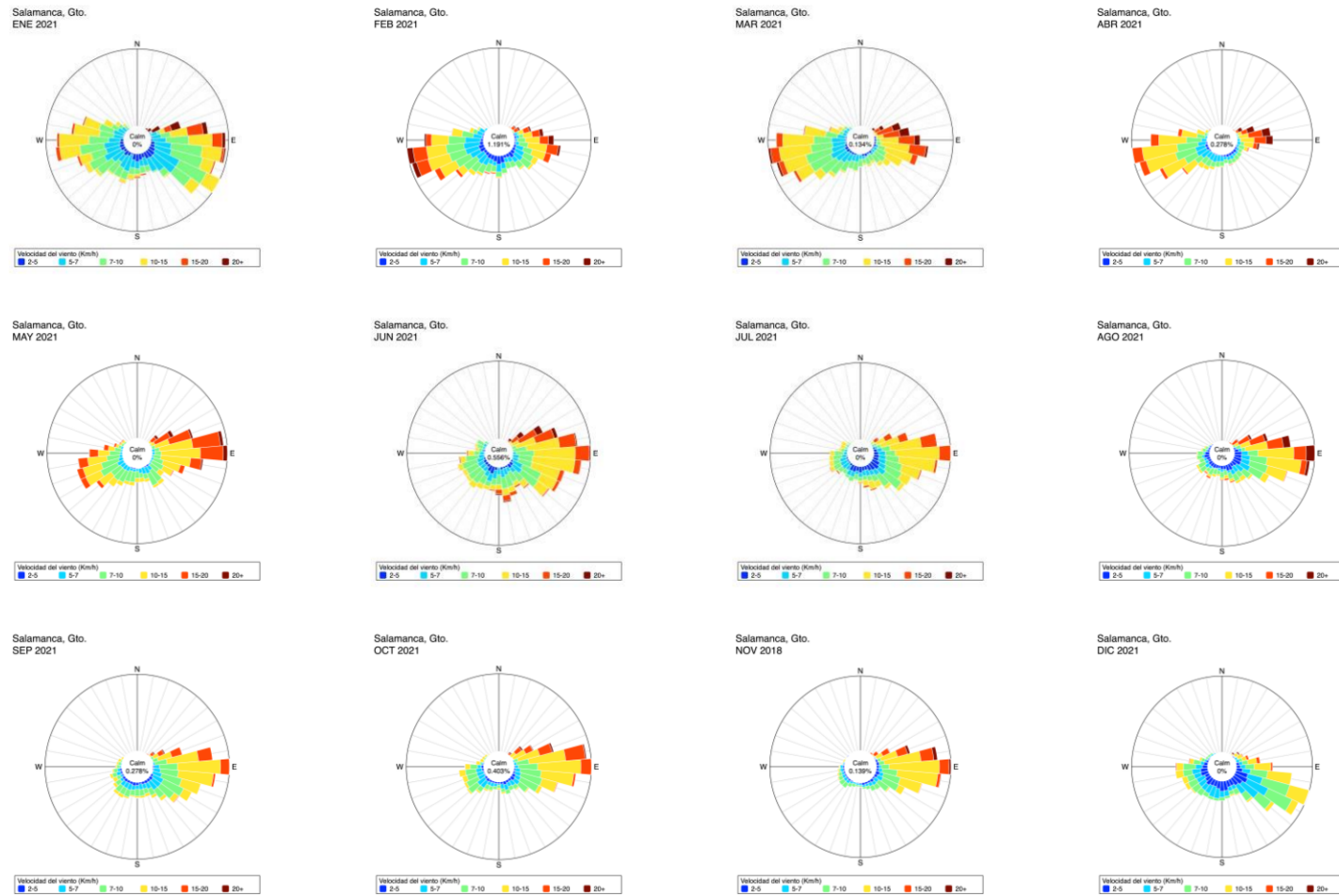


Figura 20. Distribución de frecuencias de velocidad del viento de la estación de Nativitas en Salamanca del año 2021.

Capítulo 7

Análisis de Resultados

El análisis de la relación entre las gráficas de rosa de los vientos obtenidas y la influencia que ejercen sobre la medición de la concentración de **CO** por las estaciones de monitoreo de la calidad del aire, se realiza con el soporte de los resultados de Zavala Díaz, específicamente las gráficas referentes a los promedios mensuales de ppm, así como la tabla en que muestra éstas concentraciones.

En el transcurso del análisis de resultados, se comparan las ocasiones en que ocurrieron las mayores concentraciones de **CO** durante el periodo de estudio.

7.1. Seguridad Pública.

La Figura 21 muestra que, durante el periodo de muestreo, el primer incremento significativo en la concentración de **CO** ocurrió en el mes de enero en el año 2020, en los meses posteriores descendió ligeramente y en mayo se incrementó nuevamente la concentración siendo la mayor registrada ese año. Una vez más, los niveles de **CO** se contrajeron en los próximos meses y a partir de septiembre, se incrementaron las concentraciones hasta el mes de diciembre cuando el nivel de contaminación aumentó y de esta forma continuó durante el año 2021 en que la primera mitad del año presentó la mayor concentración en la estación alcanzando el mayor nivel de **CO** en marzo. A partir de julio descienden.

Es importante mencionar que, a lo largo del periodo de análisis, el viento proviene principalmente de la dirección noreste, específicamente entre los 60° y 90° del gráfico. Así mismo las mayores velocidades ocurrieron en el transcurso de los primeros y últimos meses de cada año (invierno) y la mayor frecuencia se da a partir de los 10 a 20 km/h.

La estación de monitoreo se encuentra ubicada en el centro de la cabecera municipal de Celaya (Figura 22), donde se ubican importantes complejos industriales en la región, los cuales se distribuyen dentro y fuera de los asentamientos humanos. También es importante destacar que la actividad agrícola de riego anual rodea la zona urbana y que en temporada de preparación del terreno para la siembra, usualmente en los meses invernales, se acostumbra incendiar los predios.

7.2. Teóduła.

El monitoreo de **CO** en la estación Teodula (Figura 23) alcanza mediciones de hasta de 1.5 ppm. En el transcurso de los años 2018 y 2019 no superaron concentraciones de 1 ppm. En este periodo, en diciembre y enero respectivamente, el dato más alto fue 0.7 ppm en donde el viento llegó desde dirección noreste y suroeste llegando a alcanzar las mayores velocidades y en el caso del mes de enero particularmente de hasta 20 km/h. En contraste, las velocidades predominantes fueron de entre 2 y 7 km/h. También es importante mencionar que los porcentajes de calma son significativos 15.59% y 6.452%, para las velocidades menores a 2 km/h.

A partir del año 2020, la densidad de **CO** aumentó drásticamente alcanzando 1.5 ppm, el doble del máximo registro de los dos años precedentes. En la segunda mitad del año, el incremento fue bastante notorio, desde el mes de mayo hasta octubre en los cuales el viento procedente del sur. En cuanto a la velocidad, esta fue bastante variable, entre 2 a 15 km/h. Es conveniente destacar, que prácticamente en todos los casos en que la velocidad superó los 15 km/h, el viento llegaba desde el noreste.

Esta estación se ubica al sur de la cabecera municipal, cercana a territorios destinados a la agricultura (Figura 25). Por otra parte, los parques industriales están ubicados fuera de la zona del límite urbano, hacia el norte sobre la carretera que conduce a Silao, y al sur en la carretera con rumbo a Abasolo.

7.3. Bomberos.

En el caso particular de la estación de monitoreo Bomberos en Irapuato, no existen registros referentes a los años 2019, 2020 y 2021, años en que cuantifica la mayor cantidad de **CO** en la estación, específicamente en los años 2020 y 2021 en que fue significativamente más alta.

En agosto de 2018 ocurre un evidente aumento en el nivel registrado en comparación con el resto del año (Figura 24). De acuerdo con la gráfica de rosa de los vientos referente a este periodo se observa que procede en mayor medida desde dirección noreste y la velocidad que alcanza es de 7 a 10 km/h y esporádicamente alcanza velocidades de hasta 20 km.

De la misma forma en más de la mitad de los meses que se tiene registro, el viento proviene del noreste y en ocasiones la velocidad alcanza velocidades más altas en estos meses que en el resto. En la otra porción el viento llega desde el suroeste y la velocidad donde frecuentemente es entre los 2 km/h y 10 km/h.

Esta estación de monitoreo se encuentra al centro de la ciudad (Figura 25) por lo que las áreas industriales del municipio se encuentran significativamente retiradas. Sin embargo, esta estación de monitoreo capturó mayor acumulación de **CO** en comparación con las estaciones Seguridad Pública, Teódula, y Cruz Roja, solo superada por la estación Nativitas. Es por ello que el hecho de no contar con datos referentes al viento durante tres años consecutivos denota que existe cierto grado de falta de supervisión de sobre la estación, en alusión contrata a la estación Bomberos.

7.4. Cruz Roja.

En el transcurso de los años 2018 y 2019 en la estación de monitoreo Cruz Roja (Figura 26), el viento procede de distintas direcciones, en proporciones similares, lo que podría contribuir a relativamente bajos niveles de **CO**, pues esto ocasiona la dispersión de

los contaminantes atmosféricos. Así mismo, la velocidad del viento es variable, con vientos de alta velocidad que llegan desde el noreste y vientos de baja velocidad desde el suroeste.

A partir del 2020, las emisiones crecieron drásticamente, superando 1.8 ppm en febrero cuando el viento venía del suroeste y el noreste, con variabilidad en la velocidad, del mismo modo que el año previo, el viento más fuerte llegó desde el noreste y la menor velocidad desde el suroeste.

Posteriormente, la concentración de **CO** decreció de forma gradual hasta septiembre. A continuación, la acumulación aumentó de nuevo, alcanzando el nivel más alto del año en diciembre, cuando de forma predominante el viento procede del suroeste, pero las velocidades mayores llegaban del noreste, de más de 20 km/h. El crecimiento constante de la concentración se extendió hasta la primera mitad del 2021 cuando alcanzó el nivel más alto del periodo de análisis, cuando la velocidad del viento era inestable, pero con dirección predominante del suroeste.

La estación de monitoreo Cruz Roja se sitúa relativamente al norte, cercana a la periferia de la ciudad y a predios destinados a uso de agricultura de riego anual, como se muestra en la Figura 28, próxima a industrias para la generación de energía, lo que podría explicar los altos niveles de **CO** registrados por la estación, que alcanzan valores de hasta 2.5 ppm, en el momento de mayor concentración registrado.

7.5. Nativitas.

En la estación de monitoreo de calidad del aire Nativitas (Figura 27) es un caso de gravedad pues se han detectado los niveles más altos de captura de **CO**, llegando prácticamente a 4 ppm, en el plazo de análisis. La principal causa aparente de estas emisiones se debería a la industria energética ubicada dentro de la zona urbana, prácticamente aledaña a la estación de monitoreo, en medio de la ciudad, representada en el mapa de la Figura 28.

Capítulo 7. Análisis de Resultados.

La segunda situación alarmante, después de la elevada concentración de **CO**, es el hecho de que a lo largo del año 2018, la estación no provee información concerniente a la captura de las mediciones de **CO** y no hay disponible sobre la razón de ello.

Cabe mencionar que a partir del año 2020, la captura de este contaminante creció alarmantemente, hasta el nivel más alto a partir del mes de septiembre y hasta el final del año cuando el viento provenía en mayor medida de dirección este, así como las mayores velocidades registradas de más de 20 km/h y gran parte de la velocidad osciló entre 7 y 15 km/h y el porcentaje de calma es en esencia nulo.

Finalmente, en el 2021 la contaminación alcanzó el nivel más alto durante enero alrededor de 4 ppm y la dirección el viento provenía del oeste así como del este en proporción similar y de igual manera, la velocidad se fue bastante cambiante, no se encontraba en algún rango en específico.

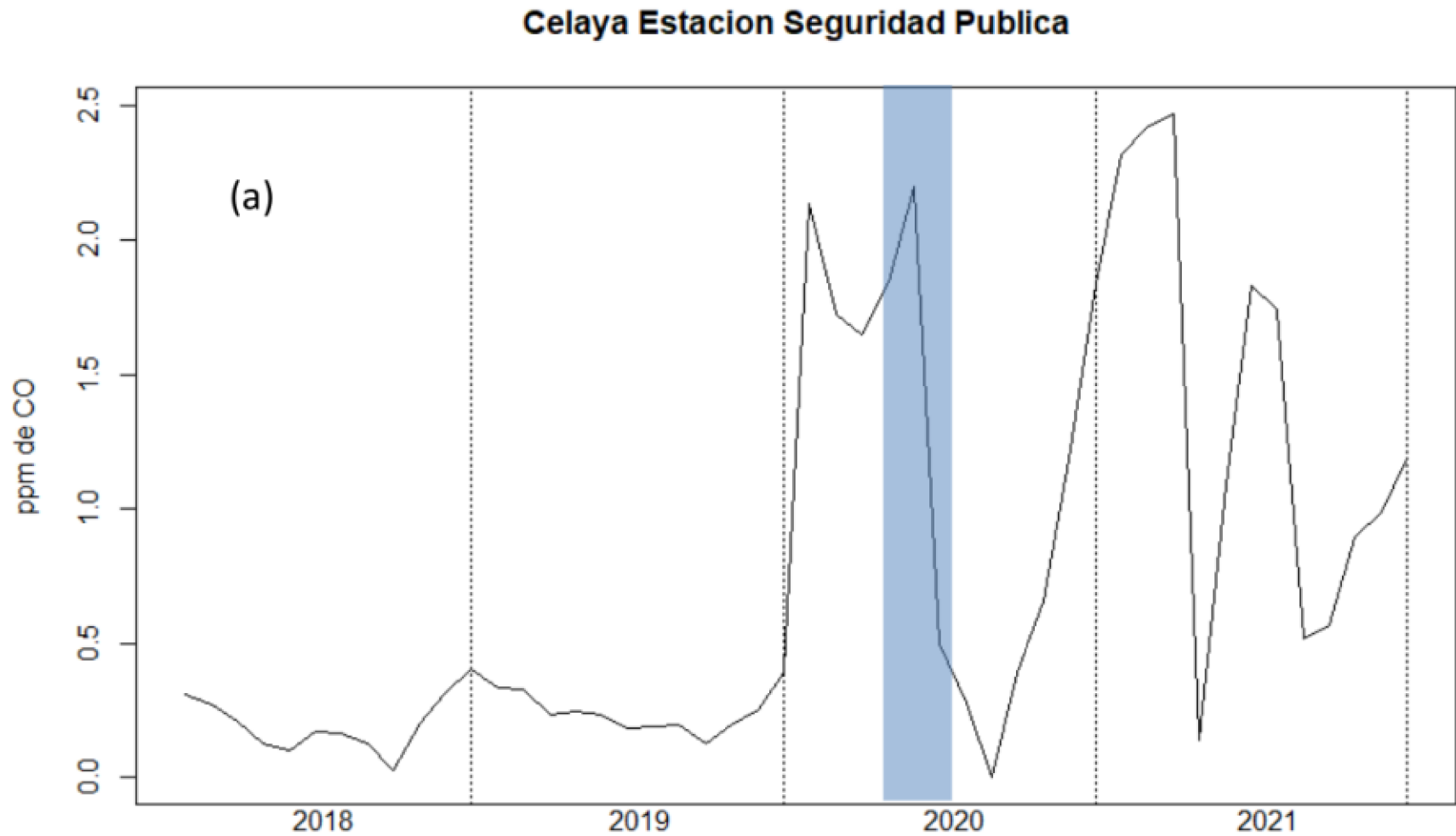


Figura 21. Representación gráfica de los promedios mensuales de las ppm de CO en la estación SP.

Fuente: Zavala Díaz, 2023

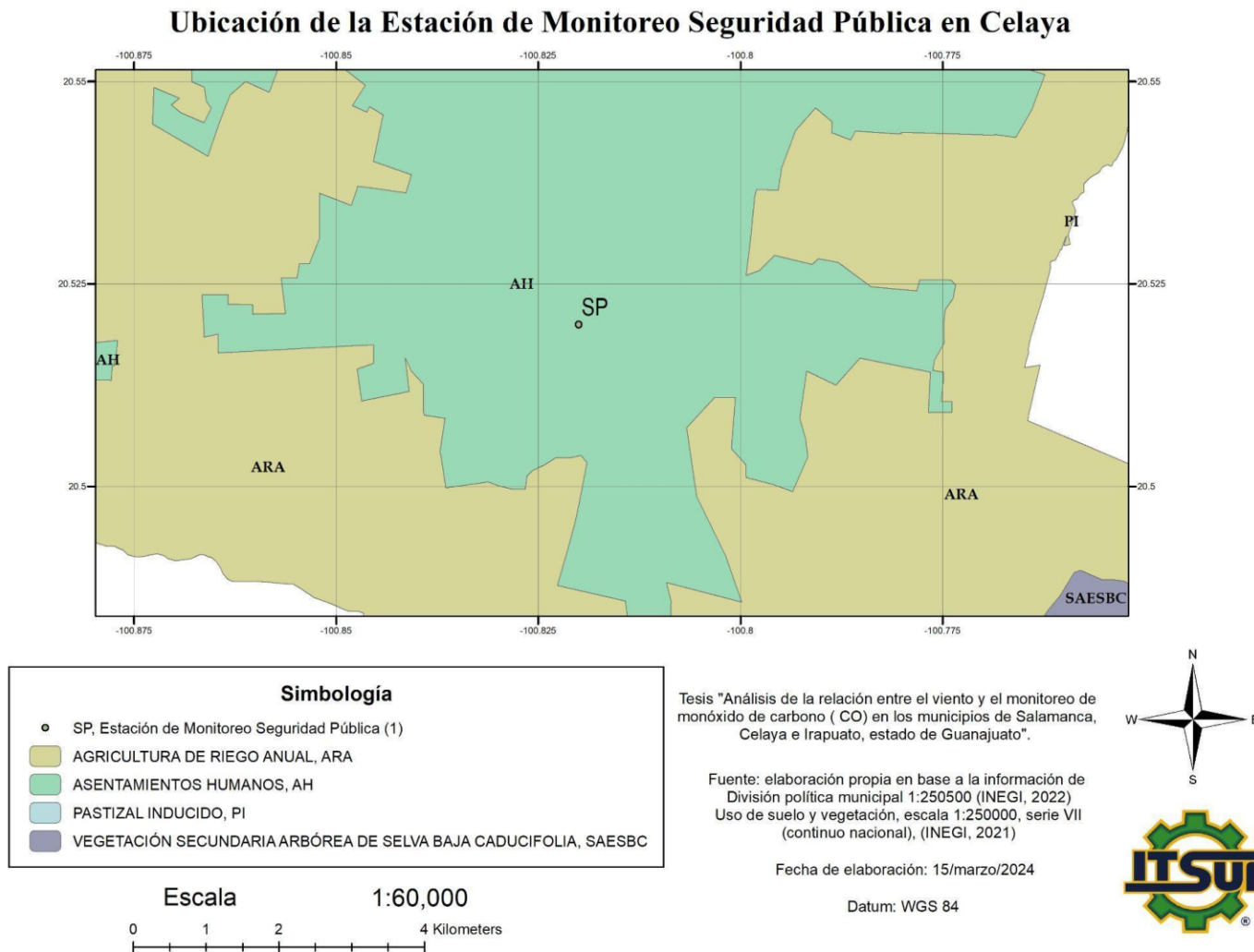


Figura 22. Mapa de Ubicación de la Estación de Monitoreo Seguridad Pública en Celaya.

Irapuato Estacion Teódula

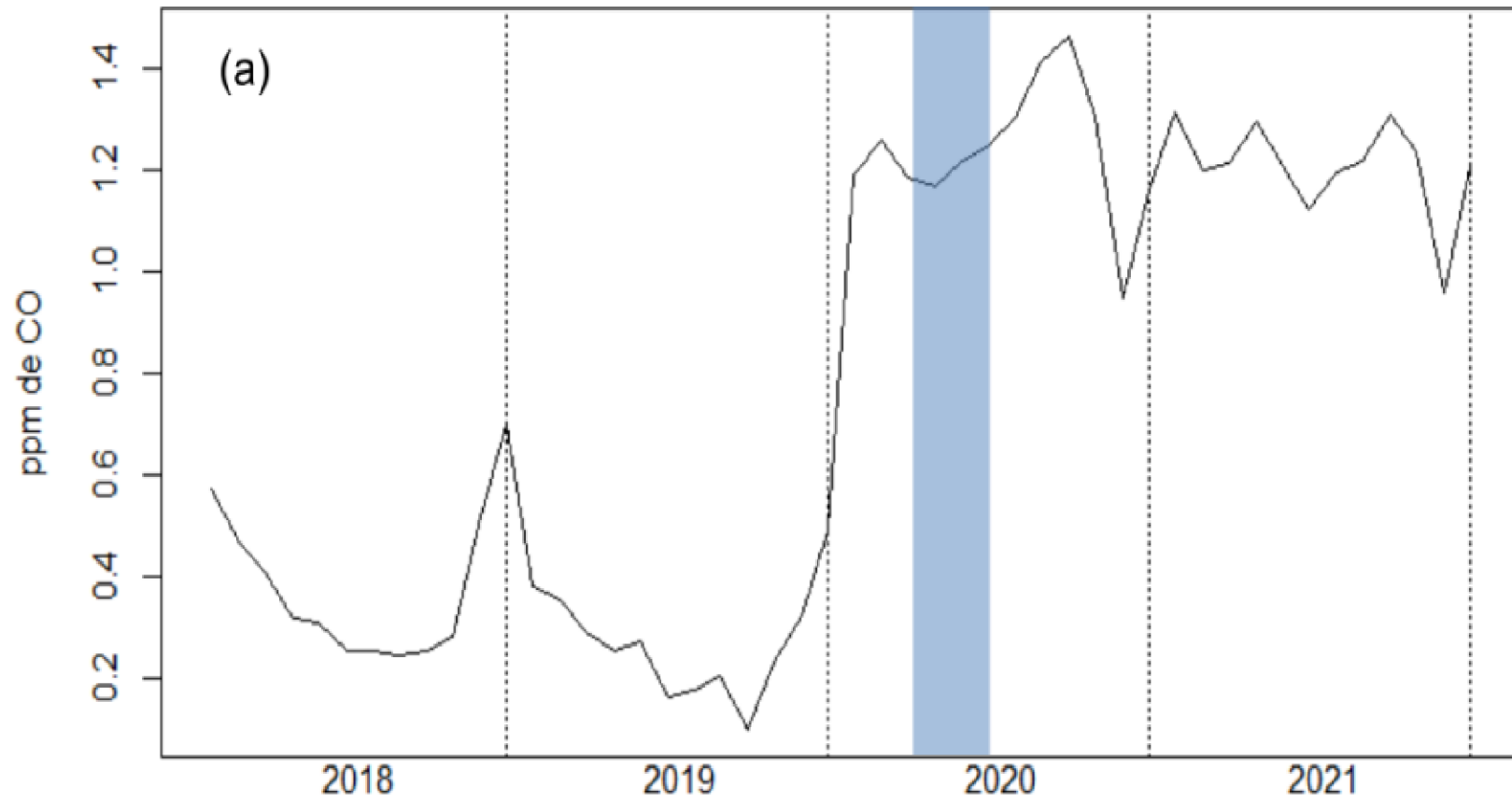


Figura 23. Representación gráfica de los promedios mensuales de las ppm de CO en la estación TEO.
Fuente: Zavala Díaz, 2023

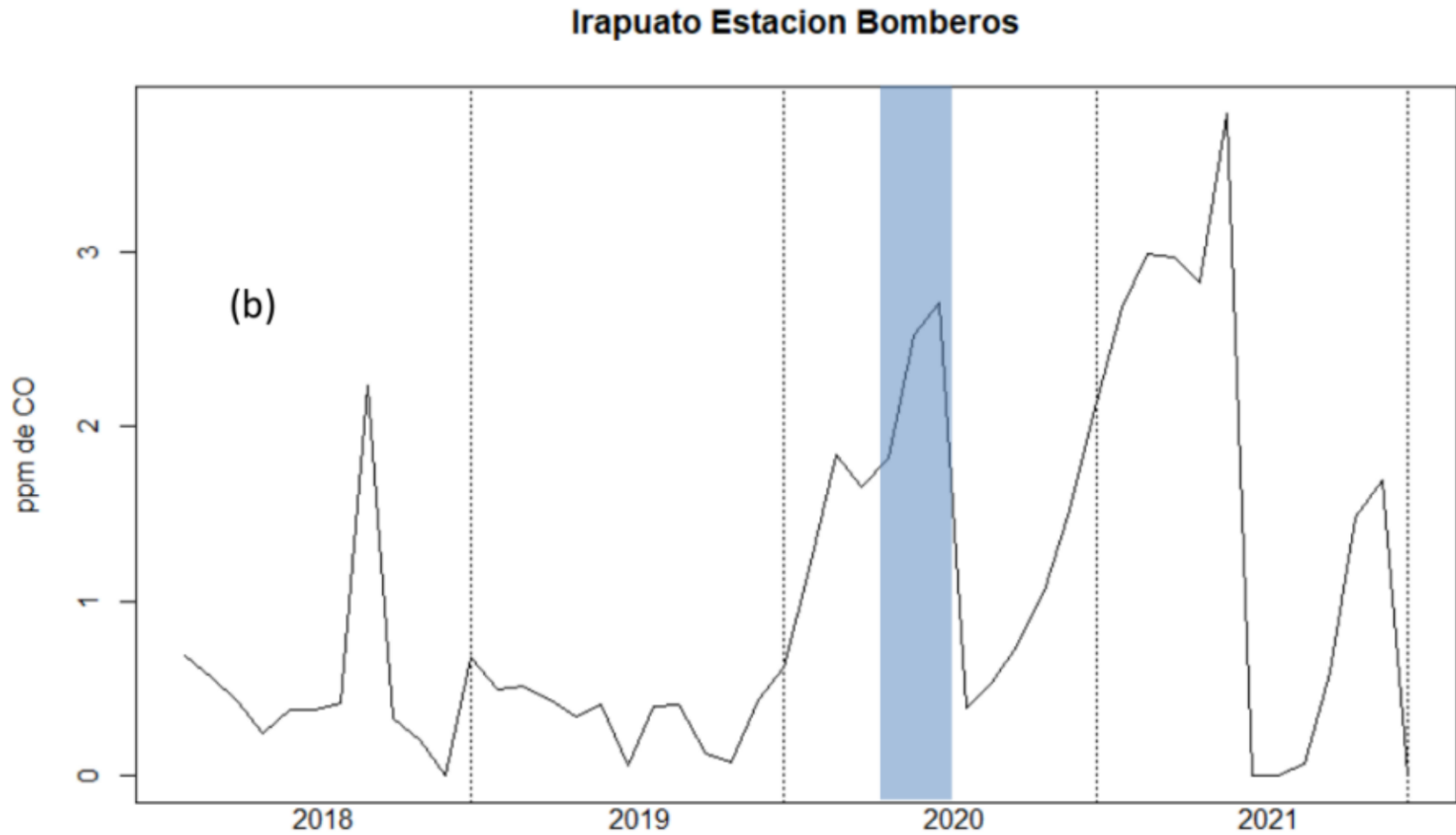


Figura 24. Representación gráfica de los promedios mensuales de las ppm de CO en la estación BOM.

Fuente: Zavala Díaz, 2023

Ubicación de las Estaciones de Monitoreo Bomberos y Teódula en Irapuato

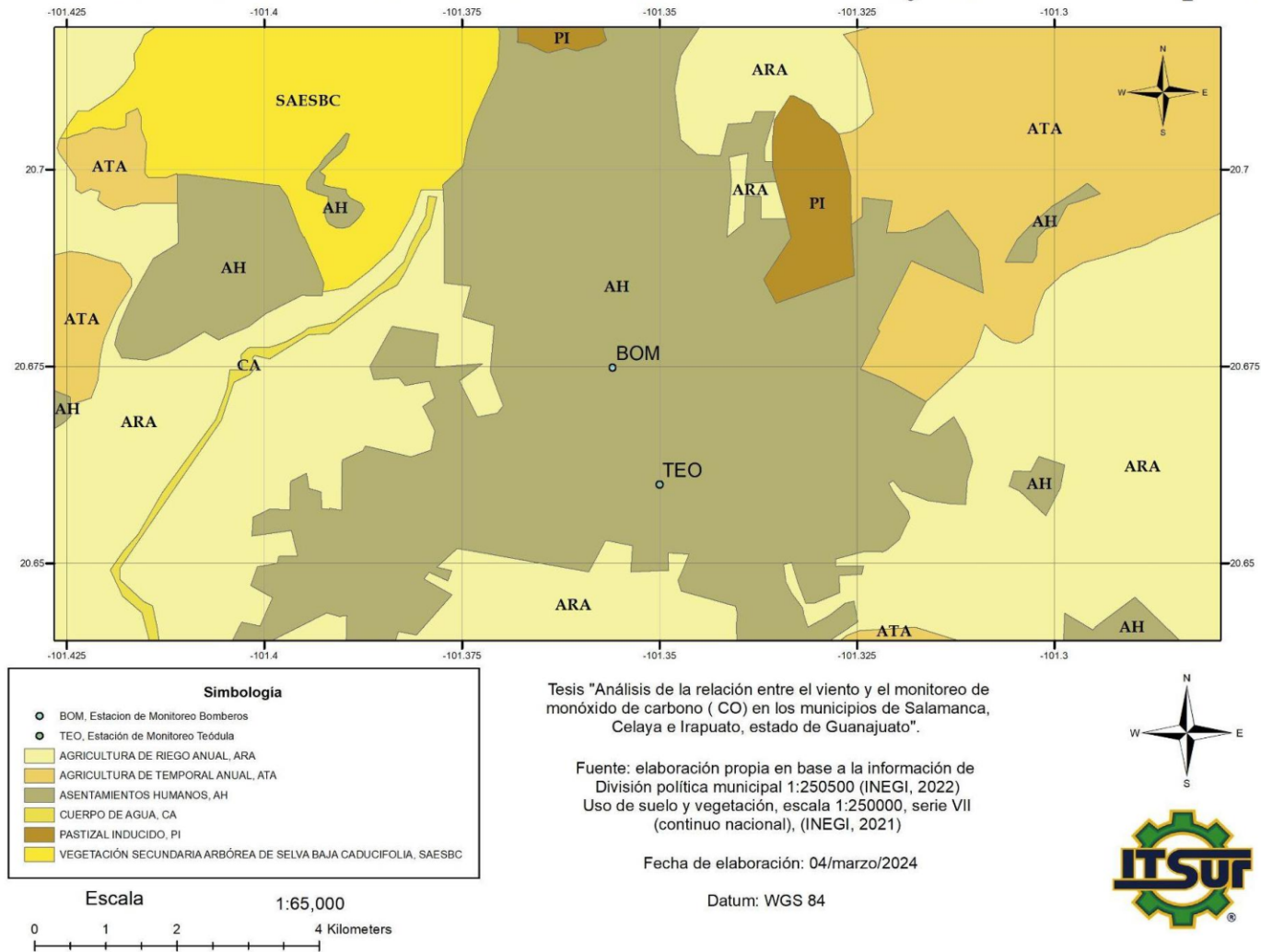


Figura 25. Mapa de Ubicación de las Estaciones de Monitoreo Bomberos y Teódula en Irapuato.

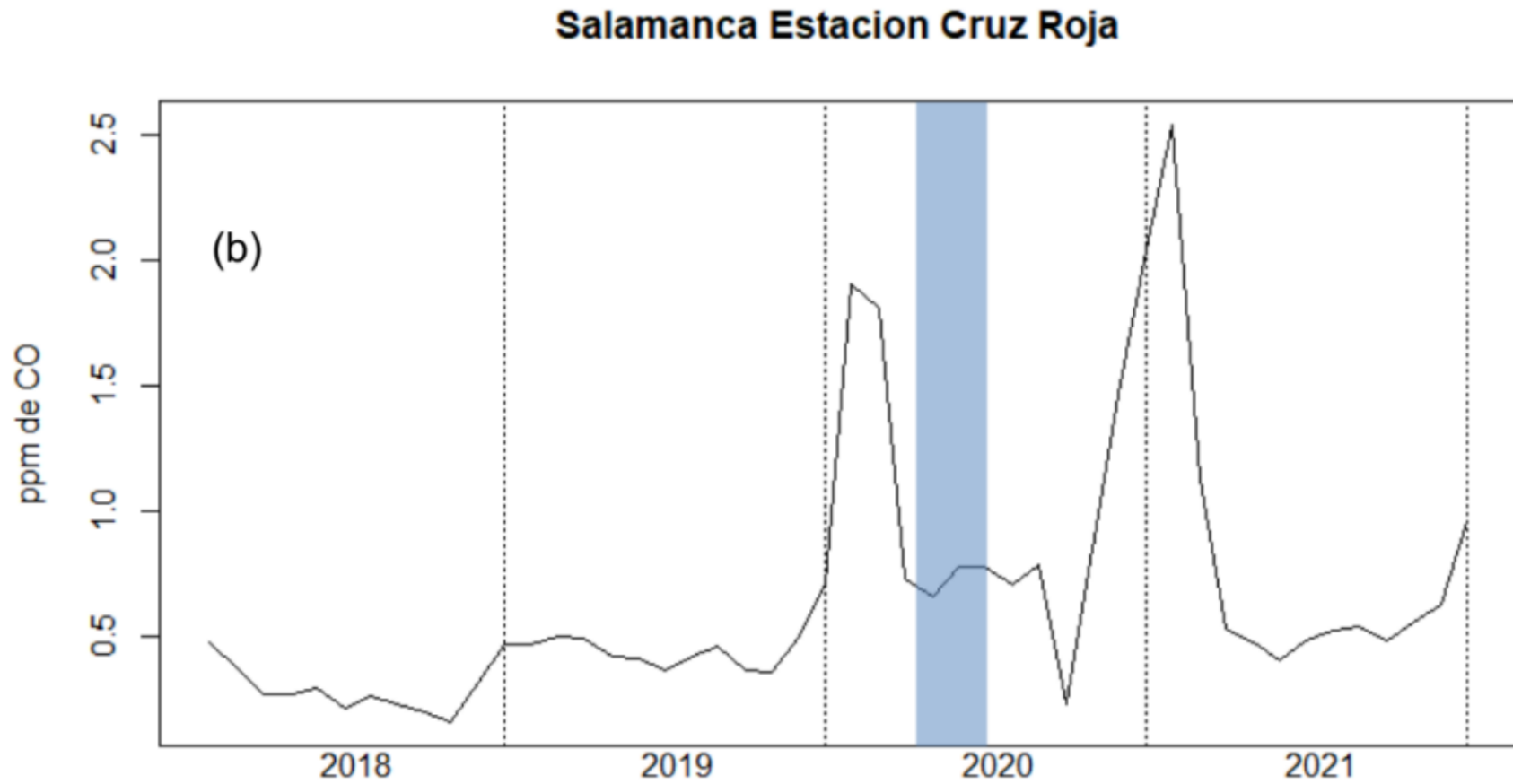


Figura 26. Representación gráfica de los promedios mensuales de las ppm de CO en la estación CR.

Fuente: Zavala Díaz, 2023

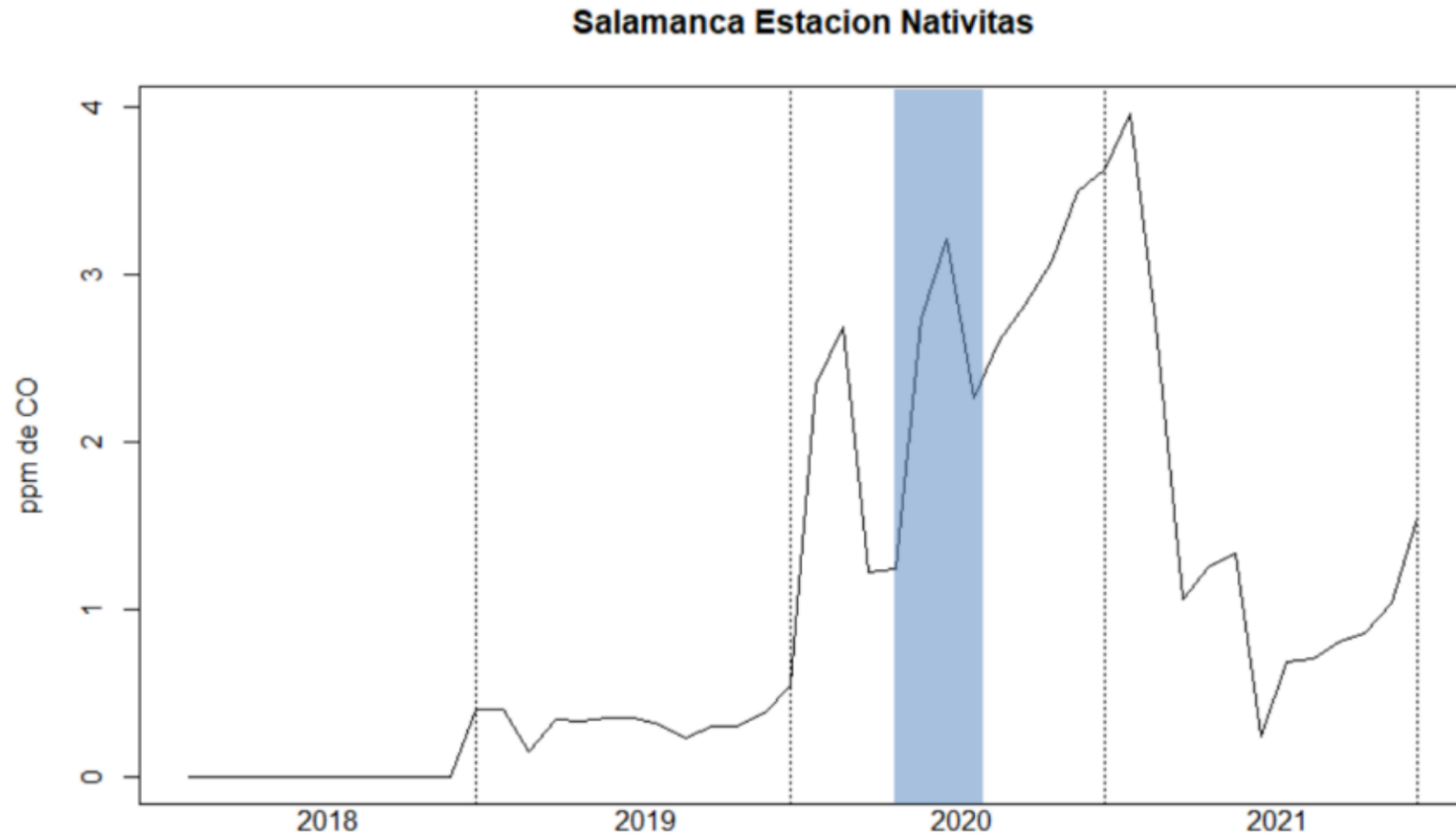


Figura 27. Representación gráfica de los promedios mensuales de las ppm de CO en la estación NAT.

Fuente: Zavala Díaz, 2023

Ubicación de las Estaciones de Monitoreo Cruz Roja y Nativitas en Salamanca

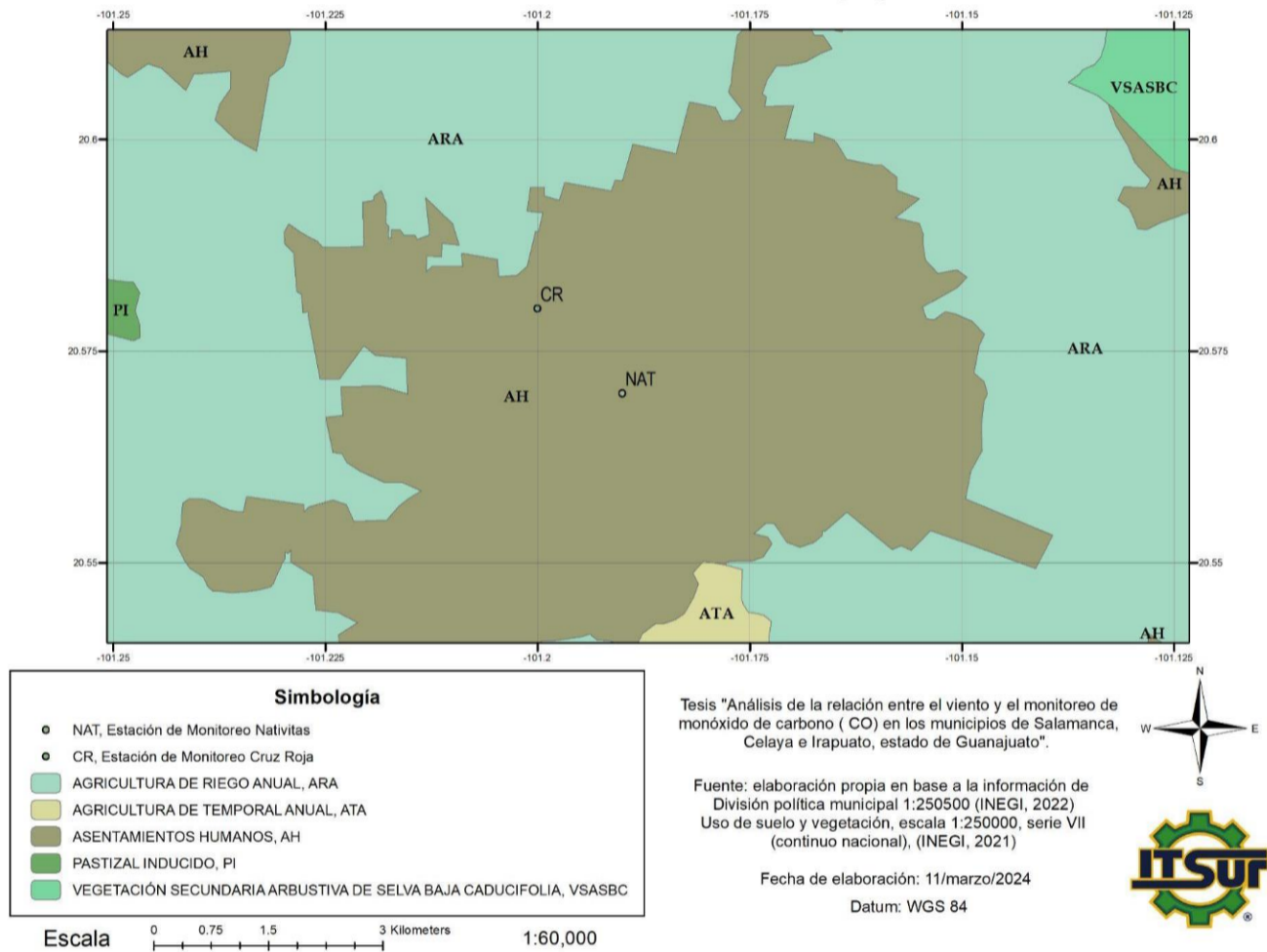


Figura 28. Mapa de Ubicación de las Estaciones de Monitoreo Cruz Roja y Nativitas en Salamanca.

Capítulo 8

Conclusiones y trabajo a futuro

La contaminación del aire en Guanajuato ha experimentado un crecimiento constante, específicamente en las emisiones de **CO**. Con base a la información disponible, los municipios de Salamanca, Celaya e Irapuato han presentado los mayores niveles de contaminación atmosférica en el estado, y de acuerdo con los informes más recientes, elaborados por las instituciones responsables y los registros disponibles, Salamanca es la ciudad que es mayormente afectada por esta sustancia.

Debido a los antecedentes sobre la baja calidad del aire, se han creado diversos instrumentos para la previsión de la contaminación atmosférica, como instrumentos normativos, que establecen las responsabilidades y obligaciones de entidades públicas y privadas los cuales se encaminan a reducir las emisiones de contaminantes en procesos industriales, a la verificación vehicular, la industria ladrillera, entre otros.

A la par, las redes para el monitoreo de la calidad del aire contribuyen de forma muy significativa al diagnóstico de la contaminación atmosférica, lo que es el primer paso para determinar el origen de las emisiones de sustancias dañinas en el aire, y con ello, es posible y necesario elaborar estrategias de regulación y prevención de la contaminación en los sectores apropiados, que sean diseñados específicamente para contrarrestar de forma relevante las emisiones que se generan y corroborar la eficacia de las medidas adoptadas.

Los sistemas de monitoreo son esenciales para determinar las amenazas a que se expone la población en materia de calidad del aire, pues al estar en contacto con estos compuestos, es probable desarrollar enfermedades que afecten a la salud. De ahí la importancia que tiene la actualización y mantenimiento de los sistemas de monitoreo, lo que permite generar la información y los datos oportunos sobre la

concentración de los contaminantes criterio, así como las variables atmosféricas presentes en el momento puesto que favorecen o contrarrestan la concentración de contaminantes en una zona determinada. Por consiguiente, el estudio a fondo de la influencia del viento en la dispersión de **CO** es necesaria para analizar las áreas de mayor afectación y el arrastre de los compuestos sobre los asentamientos humanos.

La creación de modelos que muestren los patrones de circulación del viento a escala regional, incluyendo las variaciones dependientes de la altitud del relieve u que en conjunto con la información disponible sobre las emisiones de **CO**, constituyan una herramienta de predicción del comportamiento de los contaminantes liberados a la atmósfera, con la finalidad de crear e implementar estrategias de prevención, reducción y amortiguamiento de los impactos ocasionados, la información generada por las estaciones se proporcionan los datos por separado, es decir, no existe un análisis entre las concentraciones de **CO** y las condiciones atmosféricas, por lo que el primer paso constituye en evaluación del grado de relación entre concentración y viento

En vista de la utilidad de las estaciones de monitoreo, resulta preocupante la que durante periodos tan largos de tiempo no se haya presentado información sobre el viento y sobre la concentración de **CO**, en el caso de la estación Bomberos del año 2019 al 2021 y la estación Nativitas 2018, respectivamente. Esta situación denota una problemática grave en las estaciones pues podría suponer falta de mantenimiento en los instrumentos de medición, lo que impide conocer la información correspondiente a esos años.

Adicionalmente, un factor que resalta, es el hecho de que las estaciones de monitoreo localizadas dentro de asentamientos humanos, detectan en el ambiente concentraciones de **CO** significativamente mayores, donde la función del viento, en especial, la velocidad, actúa como un agente que permite la pronta disolución de las mismas, favoreciendo a la mejora de la calidad del aire. Sin embargo, para prevenir daños a la salud de la población, se considera adecuado la ubicación y reubicación

Capítulo 8. Conclusiones y trabajo a futuro.

de los complejos industriales, en áreas distantes, donde no se encuentren aglomeraciones poblacionales.

Por último, la investigación de la influencia de las condiciones meteorológicas en general y su relación con la dispersión de los contaminantes atmosféricos es un área de estudio en desarrollo, específicamente de la relación con el viento, es conveniente realizar la observación de su comportamiento de forma estacional y también sería posible simular la dispersión mediante softwares especializados para determinar de forma más específica las zonas de afectación potenciales.

Referencias bibliográficas

1. Organización Mundial de la Salud (2023). *Contaminación atmosférica*. [Contaminación atmosférica \(who.int\)](https://www.who.int/es/news-room/spotlight/how-air-pollution-is-destroying-our-health)
2. Organización Mundial de la Salud. (19 de diciembre de 2022). *Contaminación del aire ambiente (exterior)*. [Calidad del aire ambiente \(exterior\) y salud \(who.int\)](https://www.who.int/es/news-room/spotlight/how-air-pollution-is-destroying-our-health)
3. Organización Mundial de la Salud (s. f.). *Cómo la contaminación del aire está destruyendo nuestra salud*. Consultado el 23 de enero del 2024. <https://www.who.int/es/news-room/spotlight/how-air-pollution-is-destroying-our-health>
4. Palate Gaybor, L. A. (2009). *Contaminación atmosférica*. Consultado el 27 de agosto de 2023, de [E Libro](#)
5. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (s. f.) Fuentes de Contaminación Atmosférica. Consultado el 23 de enero del 2024. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/fuentes-de-contaminacion-atmosferica#:~:text=Se%20agrupan%20en%3A,transporte%20y%20los%20veh%C3%ADculos%20automotores.>
6. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2018). Informe de Medio Ambiente en México 2018: Compendio de Estadísticas Ambientales, Indicadores Clave de Desempeño Ambiental. https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/pdf/Informe2018GMX_web.pdf
7. IQAir. (s. f.). *Países y regiones con mayor contaminación del mundo*. Consultado el 23 de enero del 2024. <https://www.iqair.com/mx/world-most-polluted-countries>
8. Greenpeace México. (2018). El aire que respiro el estado de la calidad del aire. https://www.greenpeace.org/static/planet4-mexico-stateless/2018/11/ff412966-ff412966-aire_que_respiro_ok_emr.pdf

Referencias bibliográficas.

9. Acosta-Linares, J. (2007). *Módulo: contaminación atmosférica. Contaminantes: características, origen y efectos.* <https://static.eoi.es/savia/documents/componente48105.pdf>
10. Puerto Martín, A. y García Rodríguez, J. A. (1986). *La contaminación atmosférica.* Salamanca. Centro de Edafología y Biología Aplicada. <https://digital.csic.es/bitstream/10261/35579/1/La%20contaminaci%C3%B3n%20atmosf%C3%A9rica.pdf>
11. Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. (13 de diciembre de 2022). *Monóxido de carbono.* [Monóxido de carbono | US EPA](#)
12. Salcido, A., Celda Murillo, A. T., Tamayo Flores, G. A., Hernández Flores, N., Carreón Sierra, S., Martínez Flores, M. A., Colín Aguilar, A. L., Solano Olivares, H. A., Salcido Merino, A. I., Alberto Gaspar, J. (2019). Calidad del aire y monitoreo atmosférico. *Revista Digital Universitaria*, Vol. 20, No. 3. Consultado el 27 de agosto de 2023, [Calidad del aire y monitoreo atmosférico | Revista Digital Universitaria \(unam.mx\)](#)
13. SEMARNAT. (2017). *Estrategia Nacional de Calidad del Aire.* [Estrategia Nacional de Calidad del Aire | Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales | Gobierno | gob.mx \(www.gob.mx\)](#)
14. Programa para el Medio Ambiente. (22 de septiembre de 2022). *¿Cómo se mide la calidad del aire?*. Organización de las Naciones Unidas. [¿Cómo se mide la calidad del aire? \(unep.org\)](#)
15. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (s. f.). *Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire, SINAICA.* Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. [INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO \(inecc.gob.mx\)](#)
16. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (16 de julio de 2012). *Norma Oficial Mexicana NOM-156-SEMARNAT-2012, Establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire.* Diario Oficial de la Federación. [DOF - Diario Oficial de la Federación](#)

Referencias bibliográficas.

17. (20 de noviembre de 2019). *Norma Oficial Mexicana NOM-172-SEMARNAT-2019, Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgo a la Salud*. Diario Oficial de la Federación. [DOF - Diario Oficial de la Federación](#)
18. Méndez Valadez, J. (1 de enero de 2023). *Contaminación en corredor industrial: Amanece León, Irapuato, Salamanca y Celaya con mala calidad del aire*. AM. Consultado el 15 de enero de 2024. <https://www.am.com.mx/guanajuato/2023/1/1/contaminacion-en-corredor-industrial-amanece-leon-irapuato-salamanca-celaya-con-mala-calidad-del-aire-640789.html>
19. Secretaría de Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial. (18 de febrero de 2023). *Se activa la Fase de "Vulnerabilidad Atmosférica"*. Consultado el 24 de enero de 2024. <https://boletines.guanajuato.gob.mx/2023/02/18/se-activa-la-fase-de-vulnerabilidad-atmosferica/>
20. Rosete, E. (15 de agosto de 2023). *El incendio del basurero en Guanajuato: la advertencia al 87% de tiraderos que operan de la misma forma en todo México*. El País. Consultado el 24 de enero del 2024. <https://elpais.com/mexico/2023-08-15/el-incendio-del-basurero-en-guanajuato-la-advertencia-al-87-de-tiraderos-que-operan-de-la-misma-forma-en-todo-mexico.html>
21. Secretaría de Desarrollo Económico Sustentable. (23 de abril 2023). *Parques Industriales en Guanajuato atraen inversiones*. Consultado el 22 de enero del 2024. <https://boletines.guanajuato.gob.mx/tag/parques-industriales/#:~:text=%2D%20Con%206%20mil%20800%20hect%C3%A1reas,para%20la%20atracci%C3%B3n%20de%20inversiones>
22. Secretaría de Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial. (2021). *Informe Ambiental del Estado de Guanajuato*. Periodico Oficial del Gobierno del Estado de Guanajuato.

Referencias bibliográficas.

- https://portalsocial.guanajuato.gob.mx/sites/default/files/documentos/2021_SMAOT_Informe_ambiental_estado_guanajuato_2020_20210324.pdf
23. Secretaria de Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial. Subsistema Estatal de Información de Calidad del Aire. Consultado el 9 de enero del 2024. <https://smaot.guanajuato.gob.mx/sitio/seica/>
24. Jaramillo Salgado, J. A. (2013). Energía Eólica Teoría y Conceptos. Instituto de Energías Renovables de la Universidad Nacional Autónoma de México. https://www.ier.unam.mx/~ojs/pub/CursoOladeEolica/Sesion_3_Septiembre%206%20de%202013.pdf
25. Moragues, J. y Rapallini, A. (2003). *Energía Eólica*. Instituto Argentino de la Energía “General Mosconi”. <https://docplayer.es/10404081-Energia-eolica-jaime-moragues-y-alfredo-rapallini.html>
26. Cucó Pardillos, S. (2017). Manual de energía eólica. Desarrollo de Proyectos e Instalaciones. Universitat Politècnica de València. https://gdocu.upv.es/alfresco/service/api/node/content/workspace/SpacesStore/c3212017-bbaf-496b-b730-99de32eed79c/TOC_6330_01_01.pdf?guest=true
27. Aguilera Pizano, A. M., Cruz Aguilar, M., Hernández Bustos, D. A., Ojeda Paredes, A. P., Ramírez Rangel, J. F., Villalpando Vargas, O., Zapien Gómez, J., Vázquez Núñez, E. (2021). Estimación de la dispersión de contaminantes atmosféricos empleando el modelo de dispersión Gaussiano, ocasionados en Salamanca, Guanajuato y sus efectos sobre la salud humana. *Revista Jóvenes en la Ciencia*, Vol. 10. Consultado el 27 de agosto de 2023, [Repositorio Institucional de la Universidad de Guanajuato: Estimación de la dispersión de contaminantes atmosféricos empleando el modelo de dispersión Gaussiano, ocasionados en Salamanca, Guanajuato y sus efectos sobre la salud humana. \(ugto.mx\)](https://repositorio.institucional.de.la.universidad.de.guanajuato.mx/Estimaci3n-de-la-dispersi3n-de-contaminantes-atmosf3ricos-empleando-el-modelo-de-dispersi3n-Gaussiano-ocasionados-en-Salamanca-Guanajuato-y-sus-efectos-sobre-la-salud-humana.-ugto.mx)
28. Venegas, L. E., Mazzeo, N. A. (2012). La velocidad del viento y la dispersión de contaminantes en la atmósfera. Consultado el 27 de agosto de 2023, <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/100066>

Referencias bibliográficas.

29. Gaitan, M., Cancino, J. y Behrentz, E. (2007). Análisis del estado de la calidad del aire en Bogotá. *Revista de Ingeniería*, (26), 81-92.
30. Morales Hernández, J. C., Carrillo González, F. M., Cornejo López, V. M., Téllez López, J. y Farfán Molina, L. M. (2013). Campo de viento y temperatura en Bahía de Banderas (México): análisis espacial y temporal. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México*, (81), 7-17.
31. Arrieta Fuentes, A. J. (2016). Dispersión de Material Particulado (PM10), con Interrelación de Factores Meteorológicos y Topográficos. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, (16), 43-54.
32. Rojas, F. J., Pacsi-Valdivia, S. y Sánchez-Ccoyllo, O. R. (2022). Simulación computacional e influencia de las variables meteorológicas en las concentraciones de *PM10* y *PM2.5* en Lima Metropolitana. *Información Tecnológica*, (33), 223-238.
33. Moscoso-Vanegas, D. L., Astudillo-Alemán, A. L. y Vázquez-Freire, V. E. (2015). Modelamiento de la calidad del aire en la ciudad de Cuenca-Ecuador. *ITECKNE Innovación e Investigación en Ingeniería*, (12), 188-197.
34. Zavála Díaz, J. (2023). Análisis estadístico de las emisiones de CO durante la pandemia en los municipios de Guanajuato. (Tesis de licenciatura no publicada). Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato.
35. Instituto de Planeación, Estadística y Geografía del Estado de Guanajuato. (2 de marzo de 2018). *Programa Estatal de Desarrollo Urbano y Ordenamiento Ecológico Territorial del Estado de Guanajuato 2040*. Periodico Oficial del Gobierno del Estado de Guanajuato No. 45 Tercera Parte.

Anexos.

Anexos

