Anexo 7.
Modelación de Emisiones Atmosféricas

ÍNDICE

A. PRESENTACIÓN 1
B. OBJETIVOS 3
B.1. General 3
B.2. Específicos 3
C. ANTECEDENTES 4
C.1. Marco legal regulatorio 4
C.2. Estado de la calidad del aire, Laja y alrededores 5
D. METODOLOGÍA 10
D.1. Modelación meteorológica 10
D.2. Modelación CALPUFF 11
D.3. Escenario de Modelación 14
E. RESULTADOS 21
E.1. Caracterización meteorológica del modelo WRF 21
E.2. Concentraciones modeladas 36
F. CONCLUSIONES 54
G. BIBLIOGRAFÍA 56
H. APÉNDICE: ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE Y CORRELACIÓN. 57

TABLAS

Tabla 1. Valores normados para MP_{10} y $MP_{2,5}$ en Chile. 4
Tabla 2. Concentración promedio anual de MP_{10} Estación 21 de mayo. 6
Tabla 3. Días de alerta, preemergencia y emergencia estación 21 de mayo, MP_{10}. 7
Tabla 4. Concentración promedio anual de $MP_{2,5}$ Estación 21 de mayo. 8
Tabla 5. Días de alerta, preemergencia y emergencia estación 21 de mayo, $MP_{2,5}$ 9
Tabla 6. Características de receptores discretos 18
Tabla 7. Concentraciones modeladas en puntos receptores. 51
Tabla 8 Proyección de la concentración en la EMRP 21 de mayo 53
Tabla 9. Resumen de valores de ajuste de variables del modelo 58

FIGURAS

Figura 1. Ubicación del Proyecto Parque Eólico Rinconada 2
Figura 2. Concentración promedio 24 horas de MP_{10}, Estación 21 de mayo. 6
Figura 3. Concentración trianual de MP_{10} Estación 21 de mayo 7
Figura 4. Concentración promedio 24 horas de $MP_{2,5}$ Estación 21 de mayo. 8
Figura 5. Concentración promedio trianual de $MP_{2,5}$ Estación 21 de mayo 9
Figura 6. Dominio de modelación. 11
Figura 7. Dominio CALPUFF. 13
Figura 8. Ubicación de receptores discretos respecto del proyecto. 15
Figura 9. Ubicación de receptores discretos – familias indígenas respecto del proyecto. 16
Figura 10. Ubicación estación de monitoreo aledaña al proyecto. 17

Figura 11. Polígonos modelados. 20
Figura 12. Rosa de los vientos anual WRF, año 2019. 22
Figura 13. Frecuencia de los vientos simulados para el año 2019 23
Figura 14. Rosa de los vientos en verano simulado por el modelo WRF, 2019. 24
Figura 15. Frecuencia de los vientos simulados en verano para el año 2019. 25
Figura 16. Rosa de los vientos en otoño simulado por el modelo WRF, 2019. 26
Figura 17. Frecuencia de los vientos simulados en otoño para el año 2019. 27
Figura 18. Rosa de los vientos en invierno simulado por el modelo WRF, 2019. 28
Figura 19. Frecuencia de los vientos simulados en invierno para el año 2019 29
Figura 20. Rosa de los vientos en primavera simulado por el modelo WRF, 2019. 30
Figura 21. Frecuencia de los vientos simulados en primavera para el año 2019. 31
Figura 22. Perfil diario de velocidad del viento, WRF año 2019. 32
Figura 23. Temperatura mensual, WRF 2019. 33
Figura 24. Perfil diario de temperatura, WRF 2019. 34
Figura 25. Caracterización de la Precipitación, WRF 2019 35
Figura 26. Evolución diaria de la altura de capa de mezcla, WRF 2019 36
Figura 27. Mapa dispersión de MP_{10} concentración promedio anual 39
Figura 28. Mapa isoconcentración de MP_{10} concentración promedio anual 40
Figura 29. Mapa dispersión de MP_{10} concentración promedio 24 horas 42
Figura 30. Mapa isoconcentración de MP10 concentración promedio 24 horas 43
Figura 31. Mapa dispersión de $MP_{2,5}$ concentración promedio anual 45
Figura 32. Mapa isoconcentración de MP2,5 concentración promedio anual 46
Figura 33. Mapa dispersión de $MP_{2,5}$ concentración promedio 24 horas 48
Figura 34. Mapa isoconcentración de MP2,5 concentración promedio 24 horas 49
Figura 35. Correlación entre temperaturas observadas (Estación Laja 1) y modeladas 59
Figura 36. Correlación entre temperaturas observadas (Estación Laja 2) y modeladas 59
Figura 37. Frecuencia de temperaturas observadas (Laja 1) y modeladas 61
Figura 38. Frecuencia de temperaturas observadas (Laja 2) y modeladas 62
Figura 39. Correlación entre velocidad del viento observada (Estación Laja 1) y modeladas. 63
Figura 40. Correlación entre velocidad del viento observada (Estación Laja 2) y modeladas. 63
Figura 41. Frecuencia de velocidad del viento observada (estación Laja 1) y modelada 64
Figura 42. Frecuencia de velocidad del viento observada (estación Laja 2) y modelada 65
Figura 43. Correlación entre dirección del viento observada (Estación Laja 1) y modelada 66
Figura 44. Correlación entre dirección del viento observada (Estación Laja 2) y modelada 66
Figura 45. Frecuencia de la dirección del viento observada (Estación Laja 1) y modelada 67
Figura 46. Frecuencia de la dirección del viento observada (Estación Laja 2) y modelada 68

A. PRESENTACIÓN

En el presente informe se presenta la evaluación de la dispersión y concentración de los contaminantes emitidos a la atmósfera, por el Proyecto "Parque Eólico Rinconada", el cual comprende un Parque Eólico y su Línea de Transmisión, que se sitúa geográficamente en la Región del Biobío, en las comunas de Los Ángeles y Laja (**Figura 1**), en tanto que la delimitación y la justificación del área de influencia se describe en detalle en el **"Capítulo 2. Determinación y justificación del área de influencia"** del presente **EIA.**

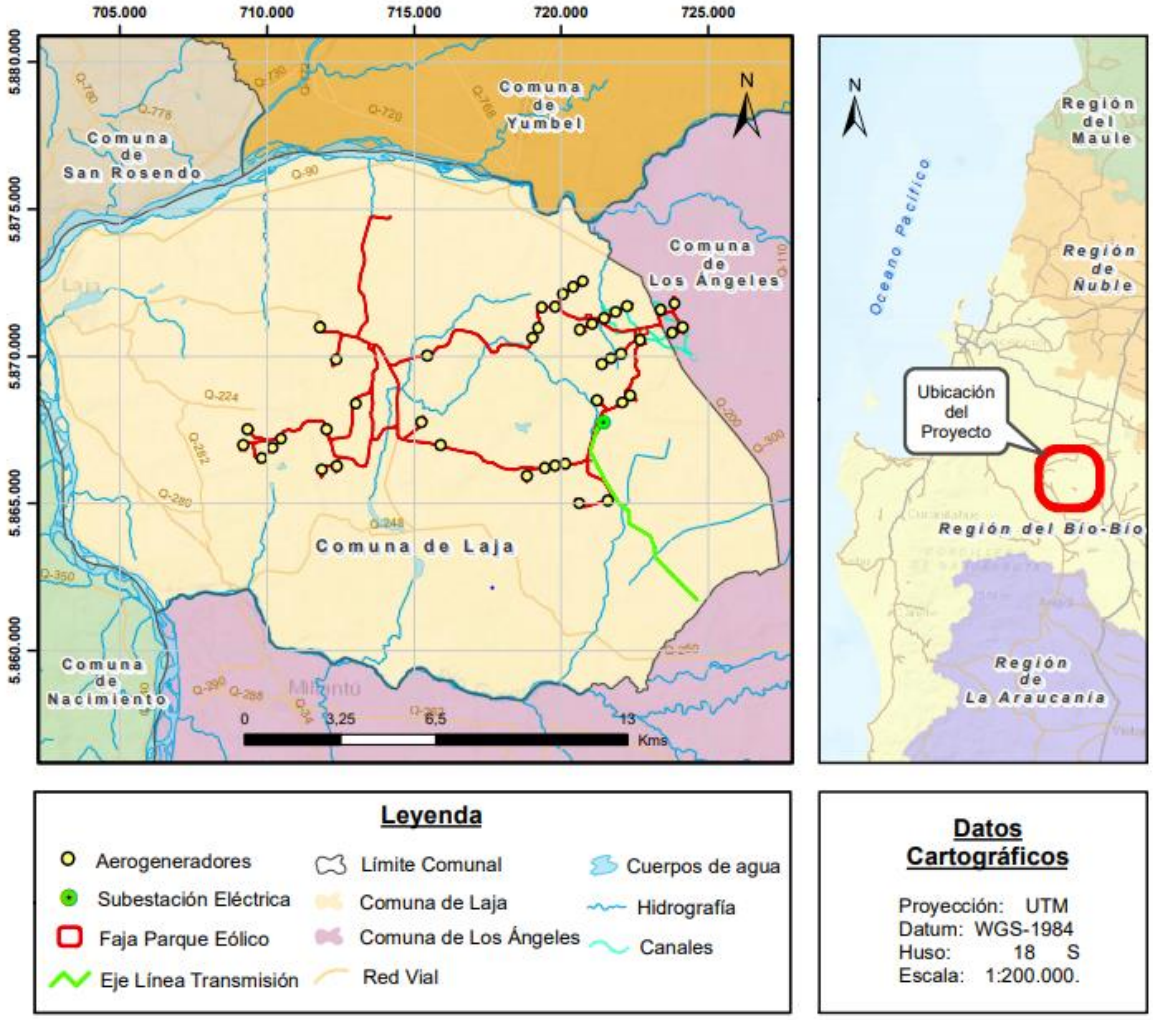
La evaluación se ha realizado mediante las herramientas de modelación sugeridas por el Servicio de Evaluación Ambiental, fijados en los lineamientos establecidos en la Guía para el Uso de Modelos de Calidad del Aire en el SEIA (2012).

De acuerdo a las actividades que se desarrollarán en el proyecto y se estimaron en la estimación de emisiones, estos contaminantes corresponden a aquellos cuya magnitud en las cantidades que se estiman pueden ser perjudiciales a la salud de la población, por ende, se modelan.

Además, dado que Los Ángeles, ciudad en la cual se encontrarán algunos de los aerogeneradores del proyecto cuenta con PDA, se hace un énfasis mayor en el análisis de los contaminantes MP_{10}, $MP_{2,5}$, dado que el PDA son los únicos dos contaminantes que regula.

Cabe destacar que las emisiones de SOx y NOx, fueron modelados como precursores de material particulado a partir de la transformación química, permitiendo así asumir el peor escenario de evaluación. En tanto que el O_3, no fue incorporado en la modelación por las características del proyecto.

Para más detalle se presenta en el documento el **Apéndice: Análisis de incertidumbre y correlación,** de la modelación de emisiones atmosféricas referidas al proyecto.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1. Ubicación del Proyecto Parque Eólico Rinconada

B. OBJETIVOS

B.1. General

El presente estudio, tiene como objetivo general evaluar el potencial impacto sobre la calidad del aire debido a las emisiones de material particulado por la construcción[1] del Proyecto "Parque Eólico Rinconada", con el fin evaluar una posible afectación a la salud de la población, que desarrolle actividades cercanas al área del proyecto.

Para lo anterior se plantean los siguientes objetivos específicos:

B.2. Específicos

- Evaluar el alcance de la dispersión de las emisiones de MP_{10} y $MP_{2,5}$ del proyecto, con el fin de predecir zonas de máximo y bajo impacto.

- Evaluar la máxima concentración de MP_{10} y $MP_{2,5}$, debido a emisiones del proyecto, en receptores que actualmente se encuentren cercanos al proyecto.

- Evaluar la máxima concentración de MP_{10} y $MP_{2,5}$, debido a emisiones del proyecto, en Estación de Monitoreo con Representatividad Poblacional (EMRP) cercanas al proyecto.

- Determinar el área de influencia del proyecto debido a las emisiones atmosféricas de este.

[1] Se evalúa la fase de construcción dado que constituye el peor escenario.

C. ANTECEDENTES

C.1. Marco legal regulatorio

Actualmente, los contaminantes MP_{10} y $MP_{2,5}$ están regulados bajo normas de calidad primaria, cuyo objetivo es proteger la salud de las personas de los efectos agudos y crónicos de la exposición de estos contaminantes con un riesgo aceptable. Para esto, se fijan límites de concentración permitidos, condiciones de superación de la norma y los niveles que dan paso a situaciones de emergencia ambiental razón por la cual se modelan estos contaminantes.

El material particulado respirable MP_{10} es regulado por el D.S. 59/1998 del Ministerio Secretaría General de la Presidencial y el material particulado fino respirable $MP_{2,5}$ es regulado por el D.S. 12/2011 del Ministerio del Medio Ambiente.

Además, dado que el proyecto se emplaza en la comuna de Los Ángeles se consideró los límites establecidos en el Plan de Prevención y Descontaminación (PPDA) Atmosférica de Los Ángeles (D.S. N° 4/2017 del Ministerio del Medio Ambiente).

En la **Tabla 1** se ve una comparación entre los valores del límite anual y diario para los contaminantes MP_{10} y $MP_{2,5}$, además de los rangos que dan origen a situaciones de alerta, preemergencia y emergencia ambiental.

Tabla 1. Valores normados para MP_{10} y $MP_{2,5}$ en Chile.

Nivel	MP_{10} (µg/m³)	$MP_{2,5}$ (µg/m³)
Límite anual	50	20
Limite diario	150	50
Alerta	195-239	80-109
Preemergencia	240-329	110-169
Emergencia	330 o superior	170 o superior

Fuente: Elaboración propia en base a D.S. 59/1998 MINSEGEPRES y D.S. 12/2011 MMA

No obstante, la superación del límite normativo no es motivo de condiciones de superación de la norma, sino que se considera que la norma de MP_{10} es incumplida bajo las siguientes condiciones:

- Cuando el promedio de la concentración anual de tres años consecutivos iguale o supere los 50 µg/m³.
- Si el percentil 98 (P 98) de las concentraciones de 24 horas durante un año sea igual o superior a 150 µg/m³
- Si durante un año se registrasen siete o más días cuya concentración sea mayor a 150 µg/m³

En el mismo contexto, las condiciones de superación de la norma de $MP_{2,5}$ son las que se describen a continuación:

- Cuando el promedio de la concentración anual de tres años consecutivos iguale o supere los 20 µg/m³.
- Si el percentil 98 (P 98) de las de 24 horas durante un año sea igual o superior a 50 µg/m³.

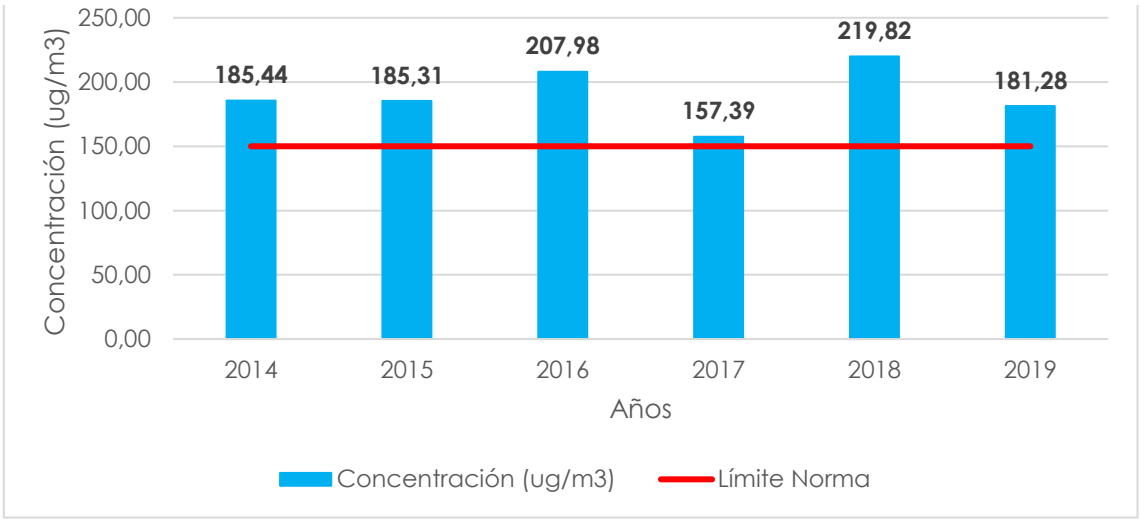
C.2. Estado de la calidad del aire, Laja y alrededores

A continuación, se presenta el cumplimiento normativo evidenciado en la estación de monitoreo con representatividad poblacional "21 de mayo", para el período 2014-2019, mediante datos rescatados del SINCA el día 27 de septiembre de 2020.

C.2.1. Análisis del cumplimiento normativo

Estación 21 de mayo:

Tal como se puede observar en la **Figura 2,** la concentración promedio 24 horas evidenciada en la Estación "21 de mayo" supera el límite señalado por el D.S. N°59/1998 MINSEGPRES (150 µg/m³) que establece la norma de calidad primaria para material particulado respirable MP_{10}, en todos los años evaluados.



Fuente: Elaboración propia basado en datos dispuestos en el Sistema Nacional de Calidad del Aire (SINCA).

Figura 2. Concentración promedio 24 horas de MP_{10}, Estación 21 de mayo.

Respecto a la concentración promedio anual de MP_{10}, se puede observar en la **Tabla 2,** la concentración oscila entre los 45,80 y 57,36 ug/m^3, de donde se aprecia que, en el único año en que no se superó la normativa fue en el año 2017. A continuación, además se presenta un desglose de las concentraciones evidenciadas junto al porcentaje de disponibilidad de datos y la excedencia a la normativa vigente.

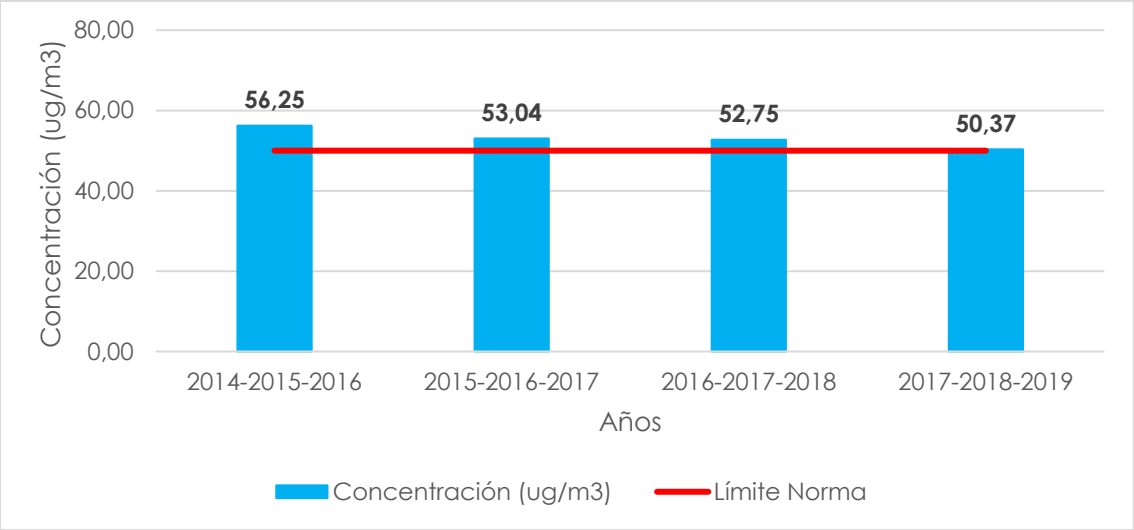
Tabla 2. Concentración promedio anual de MP_{10} Estación 21 de mayo.

Año	Porcentaje de datos disponibles (%)	Concentración Promedio Anual (µg/m^3)	Límite normativo D.S. N°59/1998 MINSEGPRES (µg/m^3)	¿Existe superación de la normativa?
2014	98,4	55,41	50	Supera
2015	99,7	55,97		Supera
2016	99,5	57,36		Supera
2017	99,7	45,80		No supera
2018	99,7	55,08		Supera
2019	99,7	50,24		Supera

Fuente: Elaboración propia en base a los datos dispuestos en el Sistema Nacional de Calidad del Aire (SINCA).

Con respecto a la concentración promedio trianual, este análisis se realizó en los períodos en donde fue posible calcular, correspondiente a cuatro períodos en donde se evidencia la superación al límite de la normativa vigente en los períodos

analizados. Tal como se muestra en **Figura 3.**



Fuente: Elaboración propia en base a los datos dispuestos en el Sistema Nacional de Calidad del Aire (SINCA).

Figura 3. Concentración trianual de MP_{10} Estación 21 de mayo.

Sumado a lo anterior, es importante señalar para la estación analizada y en los períodos que esta presenta información, es decir, 2014-2019, se analizaron la existencia de situaciones de alerta, preemergencia y emergencia ambiental de MP_{10} en base a los límites establecidos en el D.S. N°59/1998 del MINSEGPRES, de dicho análisis se arrojó que para el período evaluado existieron los días de preemergencia, emergencia y alerta que se presentan en la **Tabla 3**.

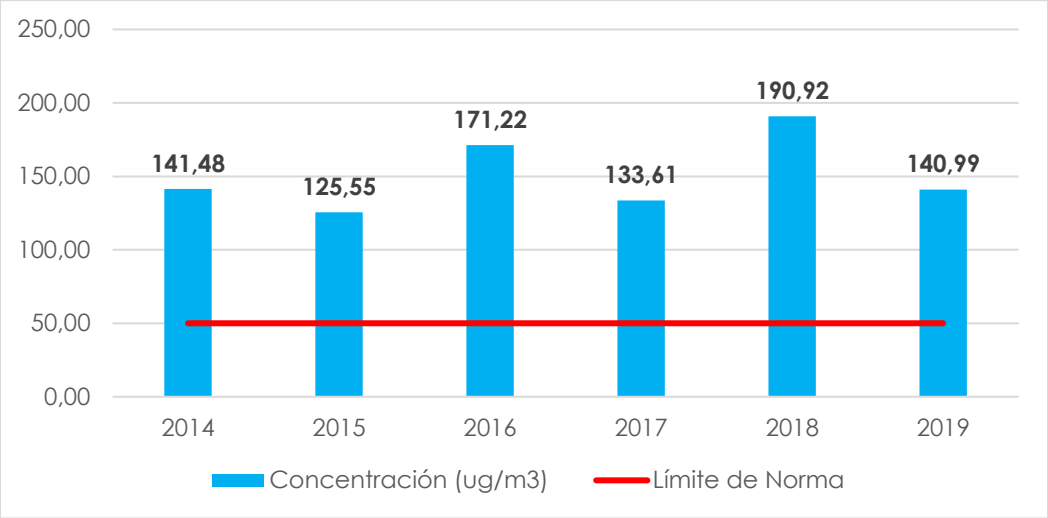
Tabla 3. Días de alerta, preemergencia y emergencia estación 21 de mayo, MP_{10}.

Año	Alerta	Preemergencia	Emergencia
2014	4	2	0
2015	3	1	1
2016	7	3	0
2017	3	0	0
2018	7	6	0
2019	3	2	0

Fuente: Elaboración propia en base a los datos dispuestos en el Sistema Nacional de Calidad del Aire (SINCA).

Con respecto a las concentraciones de $MP_{2,5}$ para la estación "21 de mayo", se observa que según lo establecido en el D.S. N°12/2011 del MMA, existe superación

de la normativa como concentración diaria (50 ug/m^3), para todo el período evaluado, tal como se puede observar en la **Figura 4.**



Fuente: Elaboración propia en base a los datos dispuestos en el Sistema Nacional de Calidad del Aire (SINCA).

Figura 4. Concentración promedio 24 horas de $MP_{2,5}$ Estación 21 de mayo.

En la **Tabla 4** se observa el porcentaje de datos disponibles, la concentración promedio anual de $MP_{2,5}$ en la estación y superación de límite normativo para periodo 2014-2019.

Tabla 4. Concentración promedio anual de $MP_{2,5}$ Estación 21 de mayo.

Año	Porcentaje de datos disponibles (%)	Concentración Promedio Anual (µg/m^3)	Límite normativo D.S. 12/2011 MMA (µg/m^3)	¿Existe superación de la normativa?
2014	98,6	27,33	20	Supera
2015	99,5	29,17		Supera
2016	99,5	33,14		Supera
2017	98,8	28,09		Supera
2018	99,2	35,03		Supera
2019	98,9	29,79		Supera

Fuente: Elaboración propia en base a los datos dispuestos en el Sistema Nacional de Calidad del Aire (SINCA).

Con respecto a la concentración promedio trianual, el cálculo se realizó para 4 períodos (**Figura 5**) correspondientes a los años 2014-2016, 2015-2017, 2016-2018 y

2017-2019 de los cuales se observa que las concentraciones superan el límite en todo el período analizado.

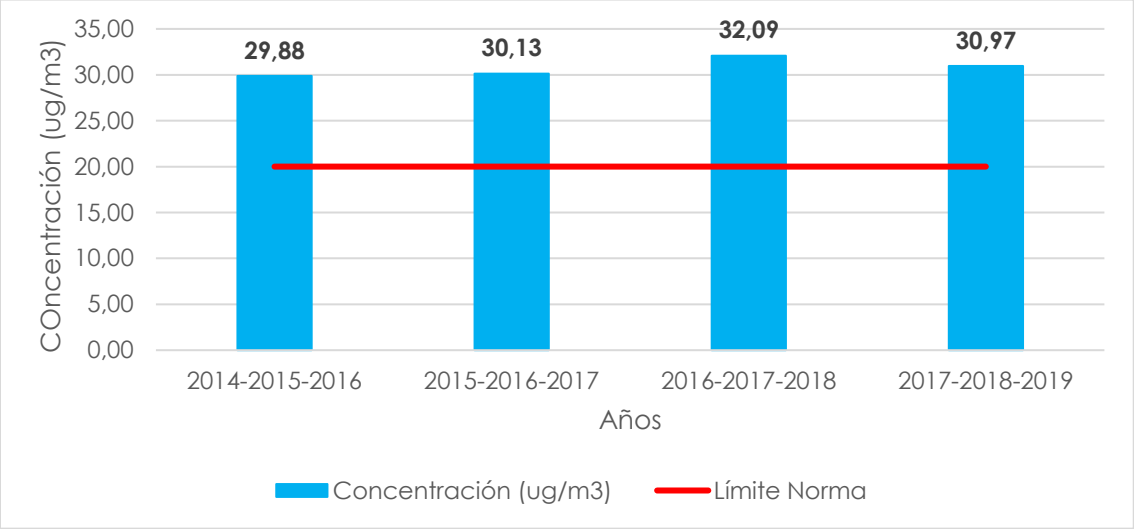


Figura 5. Concentración promedio trianual de $MP_{2,5}$ Estación 21 de mayo

Al igual a lo ocurrido con MP_{10}, se analizó el periodo revisando los días en que se presentaron episodios de alerta, preemergencia y emergencia ambiental por concentración de $MP_{2,5}$ según lo establecido en el D.S. N°12/20111 MMA, del cual se obtuvo que existieron los días de preemergencia, emergencia y alerta que se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 5. Días de alerta, preemergencia y emergencia estación 21 de mayo, $MP_{2,5}$

Año	Alerta	Preemergencia	Emergencia
2014	17	8	4
2015	14	4	3
2016	13	18	7
2017	10	11	3
2018	9	14	13
2019	18	7	5

Fuente: Elaboración propia base a los datos dispuestos en el Sistema Nacional de Calidad del Aire (SINCA).

D. METODOLOGÍA

La modelación de la dispersión de material particulado se realizó de acuerdo a la siguiente metodología.

D.1. Modelación meteorológica

El modelo Weather Research and Forecasting (WRF), es un modelo numérico recomendado para la generación de datos meteorológicos y uno de los modelos de pronóstico meteorológicos más avanzados.

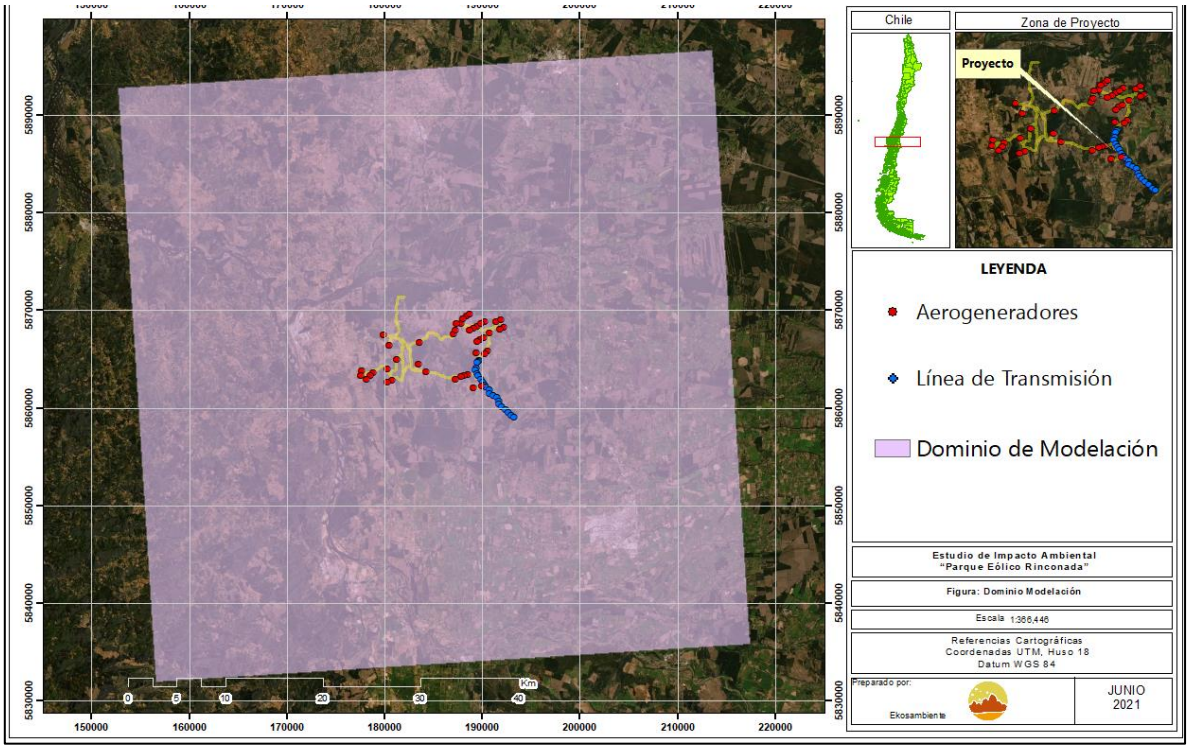
Debido a la falta de una red robusta de estaciones meteorológicas, la Guía para el Uso de Modelos de Calidad del Aire en el SEIA recomienda el uso de WRF por sobre el uso del CALMET. Además, el mismo documento, sugiere el uso del WRF para la modelación de dispersión de contaminantes con CALPUFF.

El modelo WRF utilizado, simula condiciones meteorológicas para el año 2019 a partir de variables que influyen directamente sobre él, estas variables corresponden a velocidad y dirección del viento, temperatura y precipitaciones, las cuales son descritas en acápite E.1.

D.1.1. Dominio de modelación meteorológica

El dominio de la modelación de WRF, se extiende por una gran superficie de la ciudad de Laja, abarcando una vasta área de simulación meteorológica.

De esta forma el dominio de la modelación meteorológica quedó definido en una extensión de 62 x 62 km, con resolución de 1,0 km. En la **Figura 6,** se observa la ubicación espacial del dominio de la modelación, cuyo centroide es 716.754,87 m E y 5.867.488,06 m S.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6. Dominio de modelación.

Por otro lado, la modelación fue realizada sobre 10 celdas de altura que van desde los 0 a los 4.000 m. Las alturas de estas celdas consideran un amplio rango para la variación diaria de la capa de mezcla.

D.2. Modelación CALPUFF

La modelación de dispersión atmosférica de contaminantes provenientes del proyecto se realizó con un modelo tipo "puff", específicamente el modelo CALPUFF.

Tal como lo define la Guía, los modelos tipo "puff" son una combinación entre los modelos Gaussianos y los modelos Lagrangeanos, en el sentido de que esencialmente calculan la dispersión de contaminantes provenientes de una emisión instantánea, llamada "puff", a lo largo de una trayectoria. Su aproximación matemática consiste en estimar la dispersión en forma Gaussiana en cada punto de una trayectoria; es decir, los modelos tipo "puff" sólo requieren una trayectoria

por "puff", lo que hace su cálculo mucho más rápido. En el caso de emisiones continuas, se simulan las trayectorias y la dispersión Gaussiana de muchos "puffs". Al respecto, el modelo tipo "puff" recomendado por la Guía es el modelo CALPUFF.

Así mismo, es un modelo completo que incorpora herramientas para procesar datos meteorológicos y geofísicos, modelos de dispersión y pos-procesamiento. Dicho modelo es recomendado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) para modelar transporte a larga distancia de contaminantes.

CALPUFF se compone de tres módulos:

CALMET: Es un modelo meteorológico que desarrolla campos horarios de viento y temperatura en una grilla de tres dimensiones. También asocia campos en dos dimensiones de altura y usos de suelo. Este módulo puede ser reemplazado por un WRF.

CALPUFF: Es un modelo de transporte y dispersión emitido desde fuentes modeladas, simulando procesos de dispersión y transformación. CALPUFF utiliza los datos generados por CALMET. Los archivos de salida de CALPUFF contienen las concentraciones horarias o deposición por hora de flujos evaluados en receptores seleccionados.

CALPOST: Es usado para procesar aquellos archivos generados por CALMET y CALPUFF, produciendo tabulaciones que resumen los resultados de la simulación.

Ecuación del modelo CALPUFF

La ecuación básica que utiliza el modelo para realizar la modelación es la siguiente:

$$C = \frac{Q}{2\pi\sigma_x\sigma_y} g\ exp\left[\frac{-d_a^2}{2\sigma_x^2}\right] exp\left[\frac{-d_c^2}{2\sigma_y^2}\right]$$

$$g = \frac{2}{(2\pi)^{1/2}\sigma_z} \sum_{n=-\infty}^{\infty} exp\left[\frac{-(H_e + 2nh)^2}{2\sigma_z^2}\right]$$

Dónde:

C, es concentración a nivel del suelo (g/m^3),

Q, es masa de contaminantes (g) en la nube.

σx, es desviación estándar (m) de la distribución de Gauss en el viento a lo largo de la dirección.

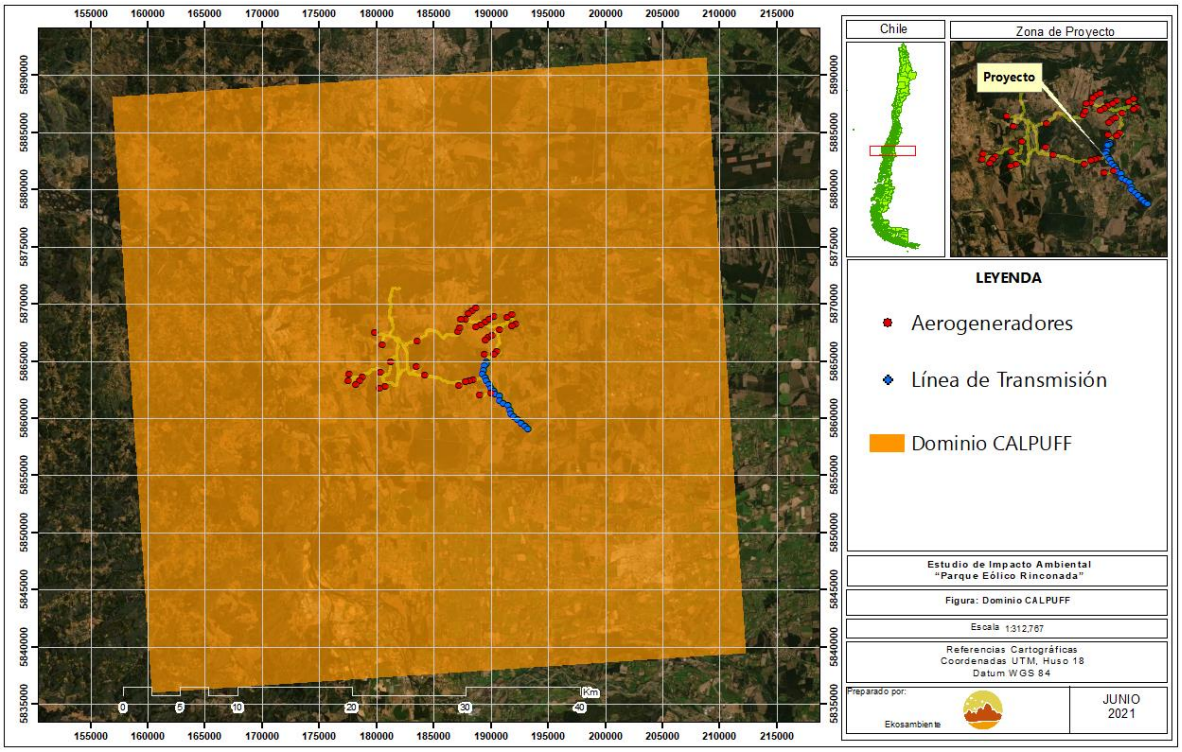
σy, es desviación estándar (m) de la distribución de Gauss en el viento de costado

σz, es desviación estándar (m) de la distribución de Gauss en la dirección vertical.

da, es distancia (m) del centro de la nube al receptor en la dirección del viento a lo largo.
dc, es distancia (m) del centro de la nube al receptor en la dirección de viento cruzado.
g, es el término vertical (m) de la ecuación Gaussiana.
H, es la altura afectiva (m) desde el nivel del suelo del hojaldre.
h, es la altura de la capa de mezcla.

Considerando las características del terreno, las distintas unidades geomorfológicas del área de influencia del proyecto y el dominio de la modelación se consideró utilizar el modelo CALPUFF para simular la dispersión de los contaminantes.

El dominio de la modelación de CALPUFF se acotó privilegiando sectores aledaños al proyecto e incluyendo todos los receptores y estación de monitoreo. Por consiguiente, el dominio de todas formas abarca una superficie de 52 km x 52 km que corresponde a 2.704 km^2, lo anterior se observa en la **Figura 7.**



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7. Dominio CALPUFF.

D.3. Escenario de Modelación

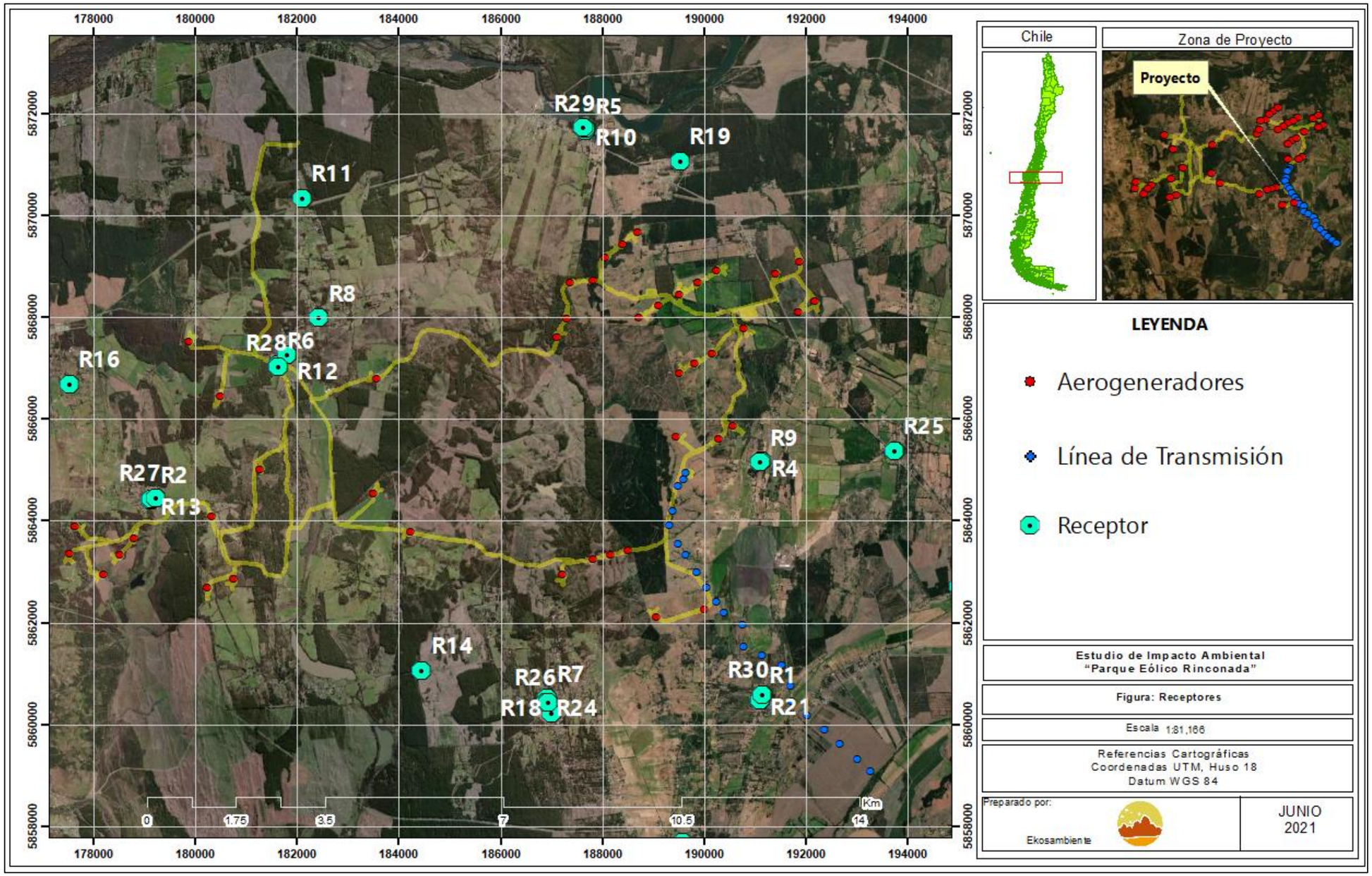
Para analizar los resultados de la modelación de dispersión de contaminantes, se realizaron mapas de iso-concentración de las emisiones generadas por la construcción del Proyecto, específicamente del año 1, que corresponde al año en el cual se estimó la mayor tasa de material particulado, por lo cual se asume el peor escenario de evaluación para el Proyecto. Dichos mapas permitieron evaluar los niveles de concentración, en todo el dominio de modelación.

La modelación se realizó simulando las actividades que conlleva el proyecto, a partir de fuente de área, representados por cuadriláteros que para efectos del presente recibirán el nombre de polígonos de modelación.

Por otro lado, con el fin de analizar el impacto en la calidad del aire en receptores específicos, se realizó una modelación discreta a los cuales se le sumo una estación de monitoreo con representatividad poblacional, para obtener la concentración en el aire de puntos y alturas seleccionadas del área de estudio.

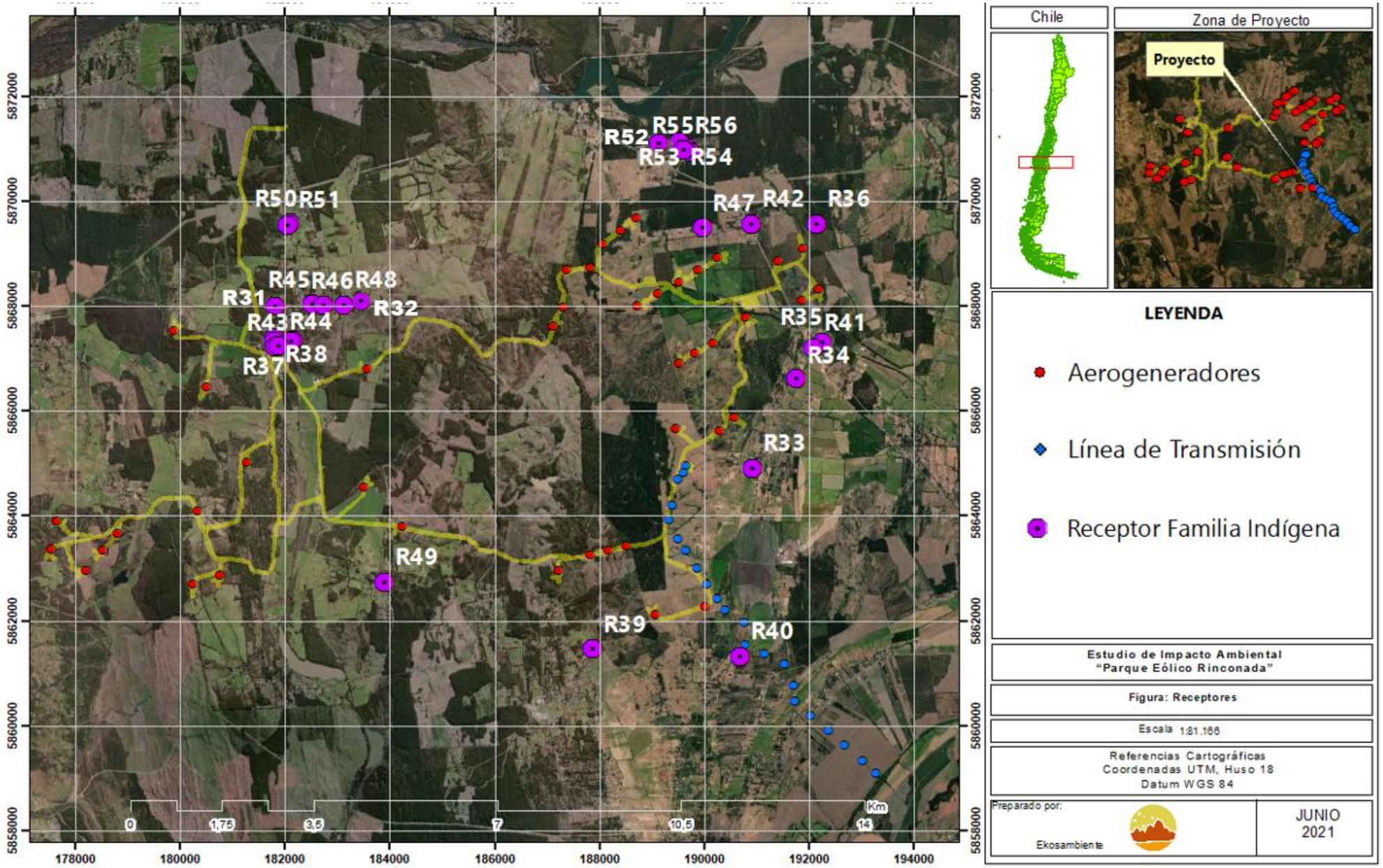
A continuación, se presentan en las siguientes figuras, la ubicación y coordenadas de los receptores discretos los cuales se indican de manera correlativa (**Figura 8**), (**Figura 9**), y la estación de monitoreo utilizada en la modelación, ubicada a 15 km lineales de la obra más cercana (**Figura 10**).

Cabe señalar que los receptores utilizados, corresponden a aquellos que fueron levantados en componente medio humano (ver **Capítulo 3.9. Línea de base medio humano** del presente EIA), los cuales representan sectores geográficos en donde se ubican juntas vecinales, centros de salud y colegios, además de incorporar familias indígenas que habitan en sectores cercanos al proyecto a modo de hacer más representativo el análisis.



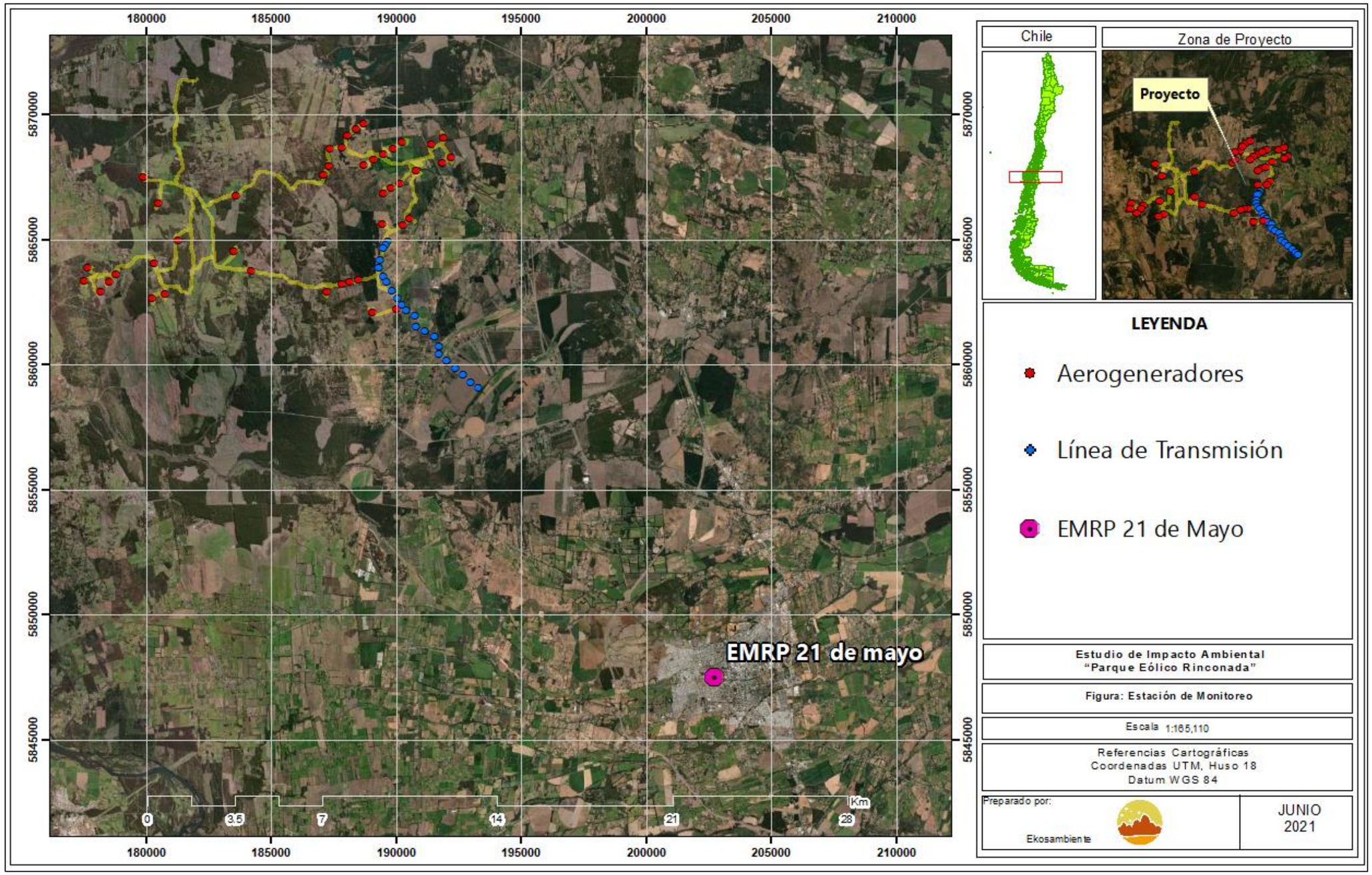
Fuente: Elaboración propia.

Figura 8. Ubicación de receptores discretos respecto del proyecto.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 9. Ubicación de receptores discretos – familias indígenas respecto del proyecto.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 10. Ubicación estación de monitoreo aledaña al proyecto.

En la **Tabla 6** se presentan las coordenadas UTM de los receptores discretos, en esta se incluyen juntas de vecinales, escuelas, postas estaciones medico rural, y familias indígenas.

Tabla 6. Características de receptores discretos

		Coordenadas UTM, Huso 18, WGS84	
ID	**Nombre**	**X**	**Y**
R1	Estación Médico Rural Las Ciénagas	722.559,04	5.863.239,01
R2	Estación Médico Rural Chorrillos	710.862,86	5.867.923,24
R3	Estación Médico Rural Quillayal	707.811,67	5.871.862,04
R4	Estación Médico Rural Quiebrafrenos	722.884,85	5.867.928,96
R5	Posta Rural Puente Perales	719.847,66	5.874.616,99
R6	Posta Rural La Colonia	713.519,70	5.870.409,84
R7	Posta Rural Santa Elena	718.384,53	5.863.534,37
R8	Sede JJVV La Pina	714.386,49	5.871.276,91
R9	Sede JJVV Quiebrafrenos	722.857,88	5.867.900,22
R10	Sede JJVV Puente Perales	719.840,58	5.874.670,14
R11	Sede JJVV Peñablanca	714.199,72	5.873.647,52
R12	Sede JJVV La Colonia	713.709,87	5.870.606,73
R13	Sede JJVV Chorrillos	710.865,07	5.867.929,51
R14	Sede JJVV Apelahue	715.951,90	5.864.238,37
R15	Sede JJVV Quillayal	707.754,88	5.871.858,06
R16	Sede JJVV Rucahue Sur	709.401,56	5.870.291,88
R17	Sede JJVV Curaco Las Toscas	706.067,92	5.870.369,80
R18	Sede JJVV Santa Elena	718.453,96	5.863.243,81
R19	Sede Comité de Adelanto Villa Cachapoal	721.663,55	5.873.903,20
R20	Sede JJVV Los Lavanderos	720.852,72	5.860.537,71
R21	JJVV Las Ciénagas	722.560,21	5.863.242,97
R22	Sede JJVV Los Ciénogos	726.610,01	5.865.209,29
R23	Sede JJVV María Dolores	726.671,82	5.859.403,29
R24	Jardín Infantil Santa Elena	718.356,77	5.863.470,17
R25	Escuela La Mancha	725.501,18	5.867.963,74
R26	Escuela Francisco Zattera Guelfi	718.393,20	5.863.467,99
R27	Escuela Diego José Benavente Bustamante	710.964,73	5.867.962,55
R28	Escuela La Colonia	713.525,58	5.870.367,97
R29	Escuela Puente Perales	719.793,78	5.874.683,09
R30	Escuela Las Ciénagas	722.617,00	5.863.345,59
R31	Familia Indígena	713.717,00	5.870.723,00
R32	Familia Indígena	714.084,00	5.870.651,00
R33	Familia Indígena	722.679,00	5.867.672,00
R34	Familia Indígena	723.618,00	5.869.323,00
R35	Familia Indígena	724.159,00	5.869.981,00
R36	Familia Indígena	724.195,00	5.872.238,00
R37	Familia Indígena	714.040,00	5.870.653,00
R38	Familia Indígena	713.725,00	5.870.666,00

		Coordenadas UTM, Huso 18, WGS84	
ID	Nombre	X	Y
R39	Familia Indígena	719.410,00	5.864.416,00
R40	Familia Indígena	722.213,00	5.864.098,00
R41	Familia Indígena	723.970,00	5.869.885,00
R42	Familia Indígena	722.955,00	5.872.323,00
R43	Familia Indígena	713.738,00	5.870.549,00
R44	Familia Indígena	713.804,00	5.870.561,00
R45	Familia Indígena	714.495,00	5.871.319,00
R46	Familia Indígena	714.709,00	5.871.285,00
R47	Familia Indígena	722.009,00	5.872.305,00
R48	Familia Indígena	715.088,00	5.871.271,00
R49	Familia Indígena	715.534,00	5.865.950,00
R50	Familia Indígena	714.160,00	5.872.893,00
R51	Familia Indígena	714.115,00	5.872.863,00
R52	Familia Indígena	721.678,00	5.873.959,00
R53	Familia Indígena	721.825,28	5.873.842,07
R54	Familia Indígena	721.776,10	5.873.801,77
R55	Familia Indígena	721.756,25	5.873.799,45
R56	Familia Indígena	721.873,49	5.873.766,11
R57	EMRP 21 de mayo	733.331,00	5.849.585,00

Fuente: Elaboración propia a partir de Capítulo 3.9. Línea de base medio humano.

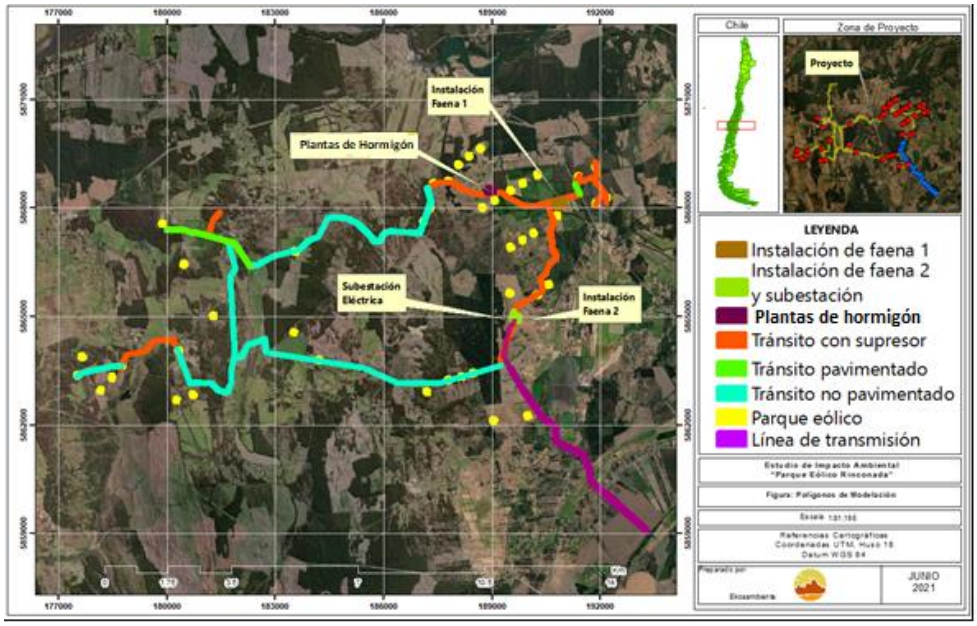
Dado que la mayor cantidad de emisiones directas, es decir, aquellas que se emitirán dentro del área de emplazamiento del proyecto, ocurrirán en la fase de construcción, principalmente en el primer año, es que se modelaron las siguientes actividades, que son las que presentan mayor tasa de emisiones atmosféricas:

- Movimiento de tierra (excavaciones)
- Escarpe
- Tránsito vehicular
- Combustión de maquinaria y vehículos
- Carga y descarga de material
- Erosión en pilas de acopio, entre otros.

La estimación de emisiones totales para ese año resultó ser de 81,80 t/año de MP_{10} y 10,36 t/año de $MP_{2,5}$, las que considera las emisiones directas e indirectas por la construcción de parte del proyecto. De estas, 81,19 t/año, corresponden a emisiones de MP_{10} directas y 10,09 t/año corresponden a emisiones directas de $MP_{2,5}$.

Además, se consideró en la modelación la transformación química en el aire de precursores de material particulado, tales como SO_2 y NO_x, cuyas magnitudes fueron estimadas en 61,36 t/año y 1,89 t/año respectivamente.

Por otro lado, la modelación de las emisiones atmosféricas se realizó teniendo en cuenta la escala temporal de las construcciones en un horario desde las 8 am a 6 pm. Esto con objeto de ser más prolijos en la modelación, sobre todo por la influencia que podría tener sobre el promedio horario, calculado como el percentil 98. A continuación, se presenta en la **Figura 11**, los polígonos modelados para el proyecto, que como fue mencionado, corresponden a la caracterización de las fuentes de áreas modeladas a partir de cuadriláteros, los cuales permiten ejemplificar las diversas actividades que fueron mencionadas tales como excavaciones, tránsito, combustión, entre otras.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 11. Polígonos modelados.

E. RESULTADOS

E.1. Caracterización meteorológica del modelo WRF

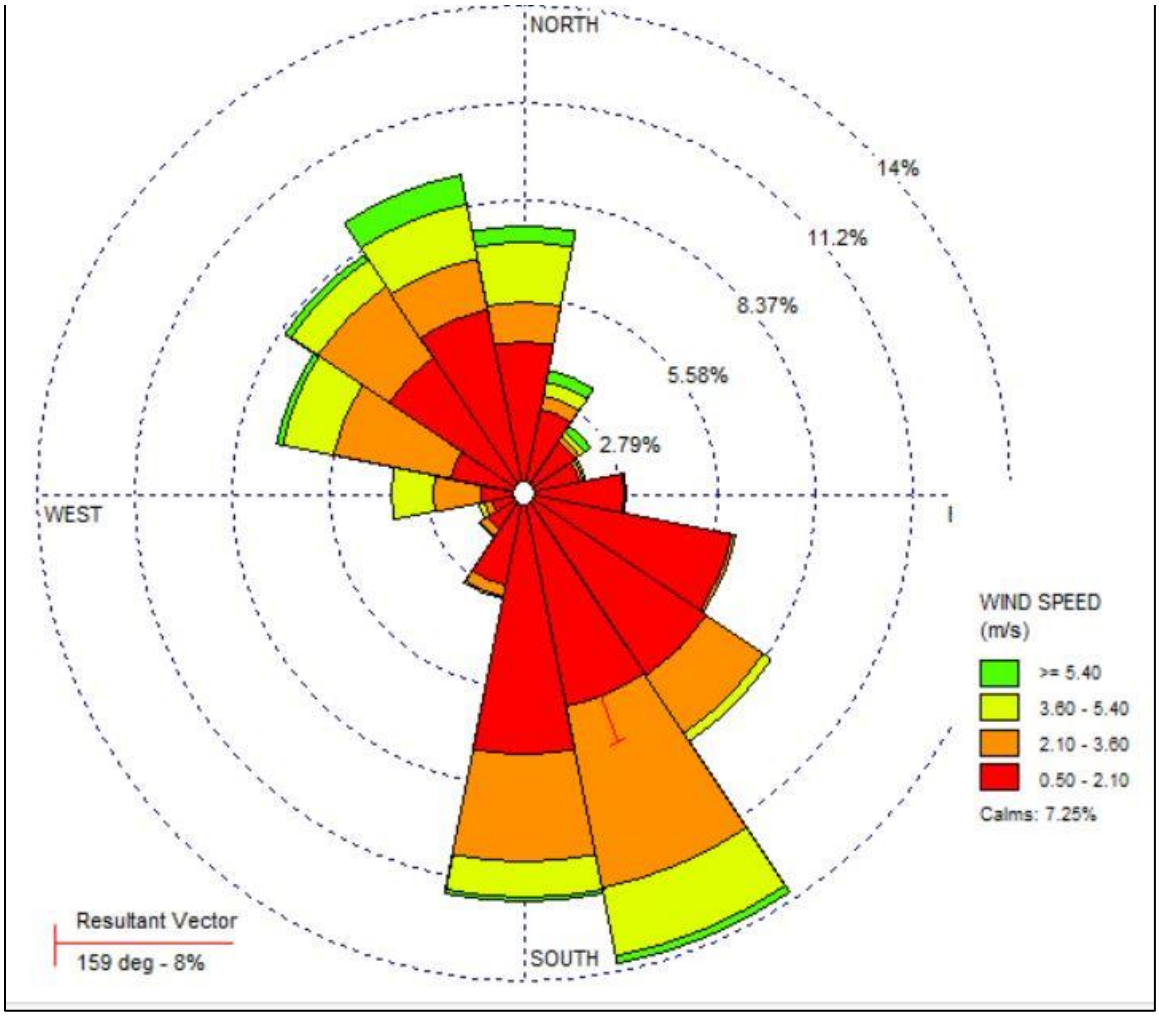
En adelante, se presenta la caracterización meteorológica de acuerdo al modelo WRF, año 2019 de la zona de Laja, Los Ángeles y sus alrededores para distintas variables, tales como: velocidad y dirección del viento, temperatura, precipitaciones y altura de capa de mezcla.

E.1.1. Caracterización de la velocidad y dirección del viento anual y estacional

A continuación, se presenta un análisis de los comportamientos de velocidad y dirección del viento de acuerdo al WRF año 2019 para la zona de Laja y sus alrededores.

E.1.1.1. Dirección y velocidad de vientos predominantes anuales

En la **Figura 12** se presenta la rosa de vientos anual, construida en base a los datos generados por el modelo WRF para el año 2019.



Fuente: Elaboración propia.

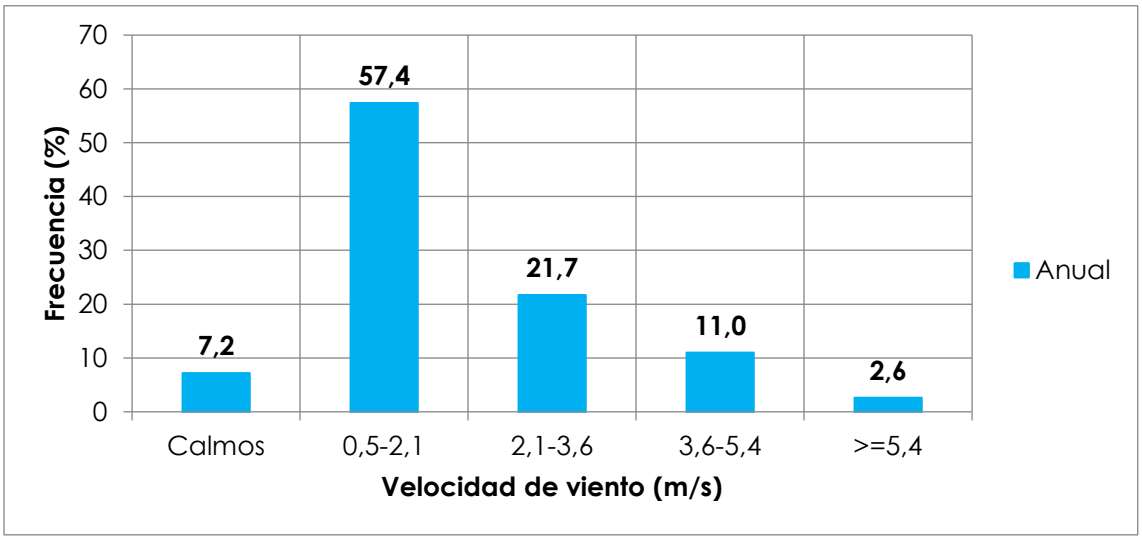
Figura 12. Rosa de los vientos anual WRF, año 2019.

La rosa de los vientos resultante da cuenta que los vientos simulados por el modelo meteorológico tienen un origen prioritario por el sur sureste. En efecto, el 13,68% de los vientos tienen origen en (SSE), de los cuales el 6,22% corresponden a vientos de velocidad entre 0,5 y 2,10 m/s, y el 5,25% a vientos entre 2,10 a 3,60 m/s, seguido de un 2,1% que va entre los 3,60 y 5,70 m/s.

La componente simulada que representa el segundo origen con mayoría de vientos corresponde al sur (S) con un 11,62% del total, seguido del nor noroeste (NNO), con un 9,23%.

El vector resultante de la rosa de los vientos muestra que la dispersión de contaminantes se realizará hacia el nor noroeste, específicamente en el grado 339.

Por otro lado, tal como se observa en la **Figura 13,** la mayor frecuencia de los vientos corresponde a aquellos que se encuentran entre 0,5 y 2,1 m/s, representando el 57,4% de los vientos simulados por el modelo. En segundo lugar, están los vientos que van desde los 2,1 a 3,6 m/s con un 21,7%. Los vientos con menos frecuencia resultaron ser los que están sobre una velocidad de 5,4 m/s con una representatividad del 2,6% solamente.

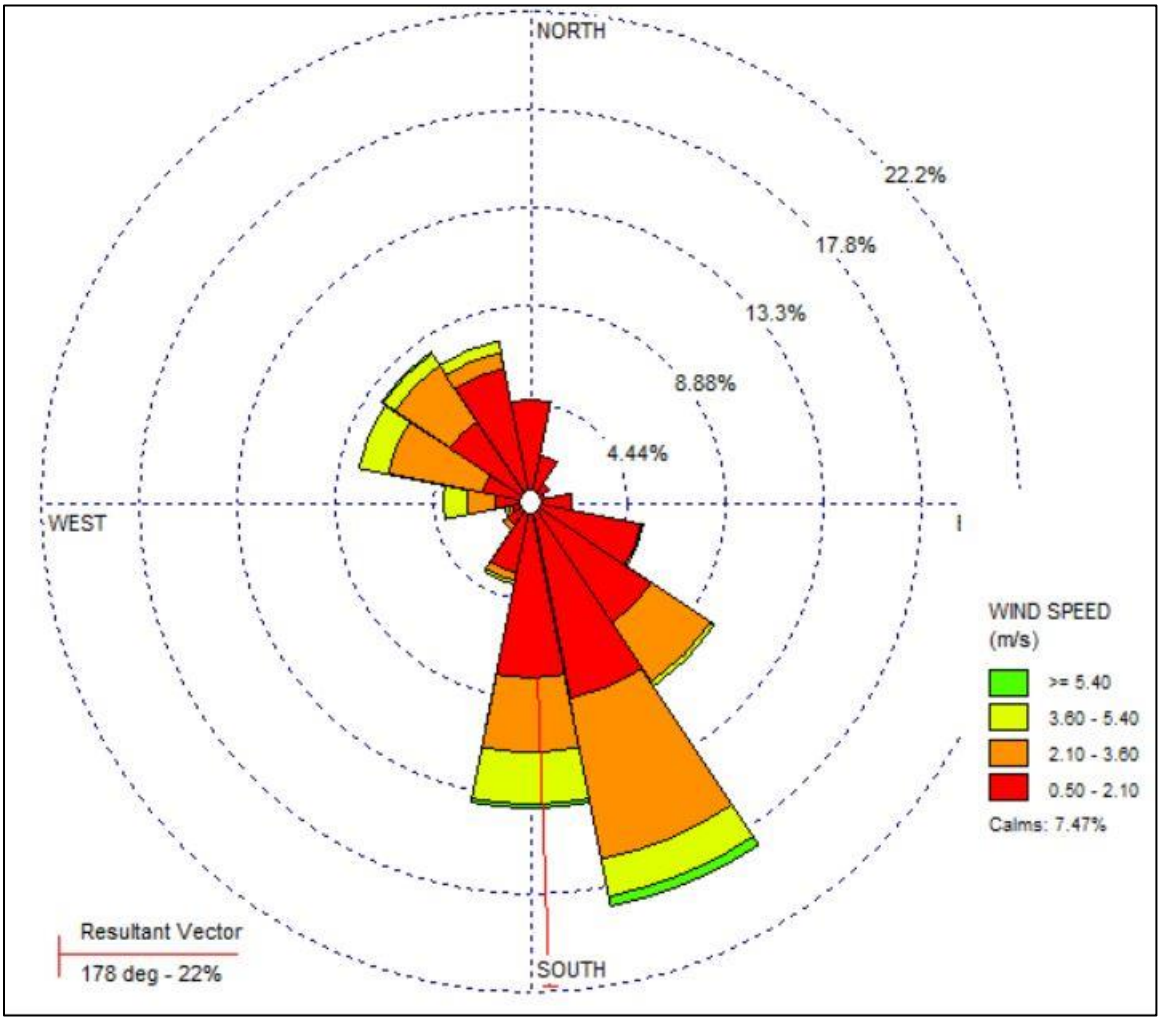


Fuente: Elaboración propia.

Figura 13. Frecuencia de los vientos simulados para el año 2019

E.1.1.2. Dirección y velocidad de vientos predominantes verano

A continuación, se presenta la rosa de los vientos simulada para la estación de verano en el año 2019.



Fuente: Elaboración propia.

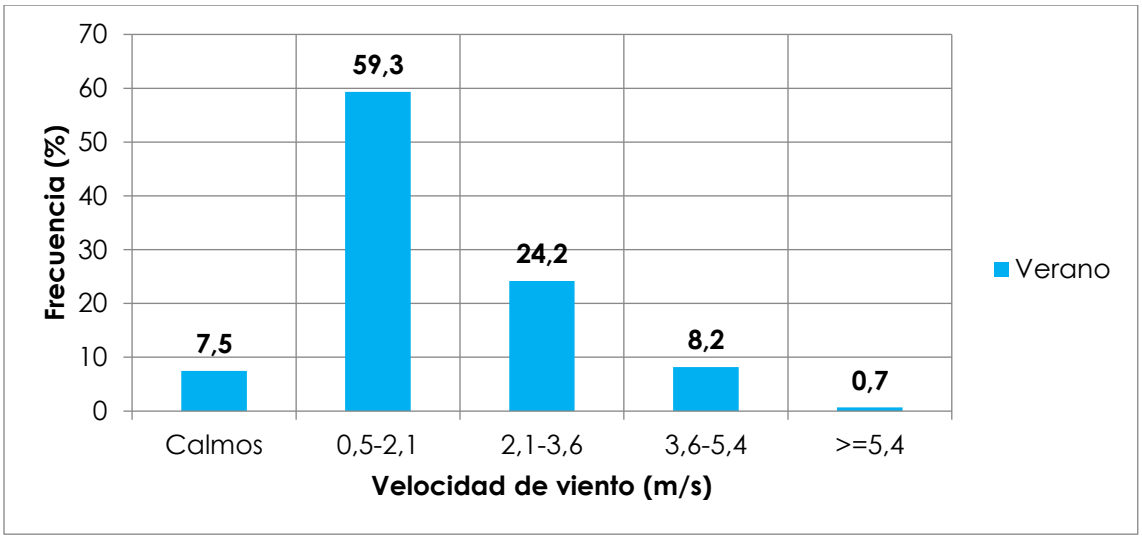
Figura 14. Rosa de los vientos en verano simulado por el modelo WRF, 2019.

Tal como se ve en la **Figura 14,** la modelación meteorológica sugiere que en los meses de verano los vientos tienen una predominancia en sus orígenes en la componente sur sureste (SSE) representando el 18,6% de los vientos de la estación, de ellos el 9,07% corresponde a vientos entre a 0,50 m/s y menores a 2,10 m/s. En segundo lugar, el 13,83% de los vientos simulados durante el verano tendrían origen en la componente sur (S), influenciados principalmente por vientos que no superan los 2,10 m/s.

El vector resultante de la rosa de los vientos se sitúa en el grado 178. Por consiguiente, se puede predecir que durante los meses de verano el desplazamiento de las masas de aire será principalmente hacia el nor noroeste

(NNO) y su vector resultante contrario se encontraría en el grado 358 correspondiente a la componente nor noroeste (NNO).

Tal como se observa en la **Figura 15** la mayor frecuencia de los vientos corresponde a aquellos que son superiores a 0,5 m/s e inferiores a 2,1 m/s, representando el 59,3% de los vientos simulados por el modelo. El 24,2% de los vientos estuvieron entre los 2,1 a 3,6 m/s. Los vientos con menor frecuencia correspondieron a los que superan los 5,4 m/s.

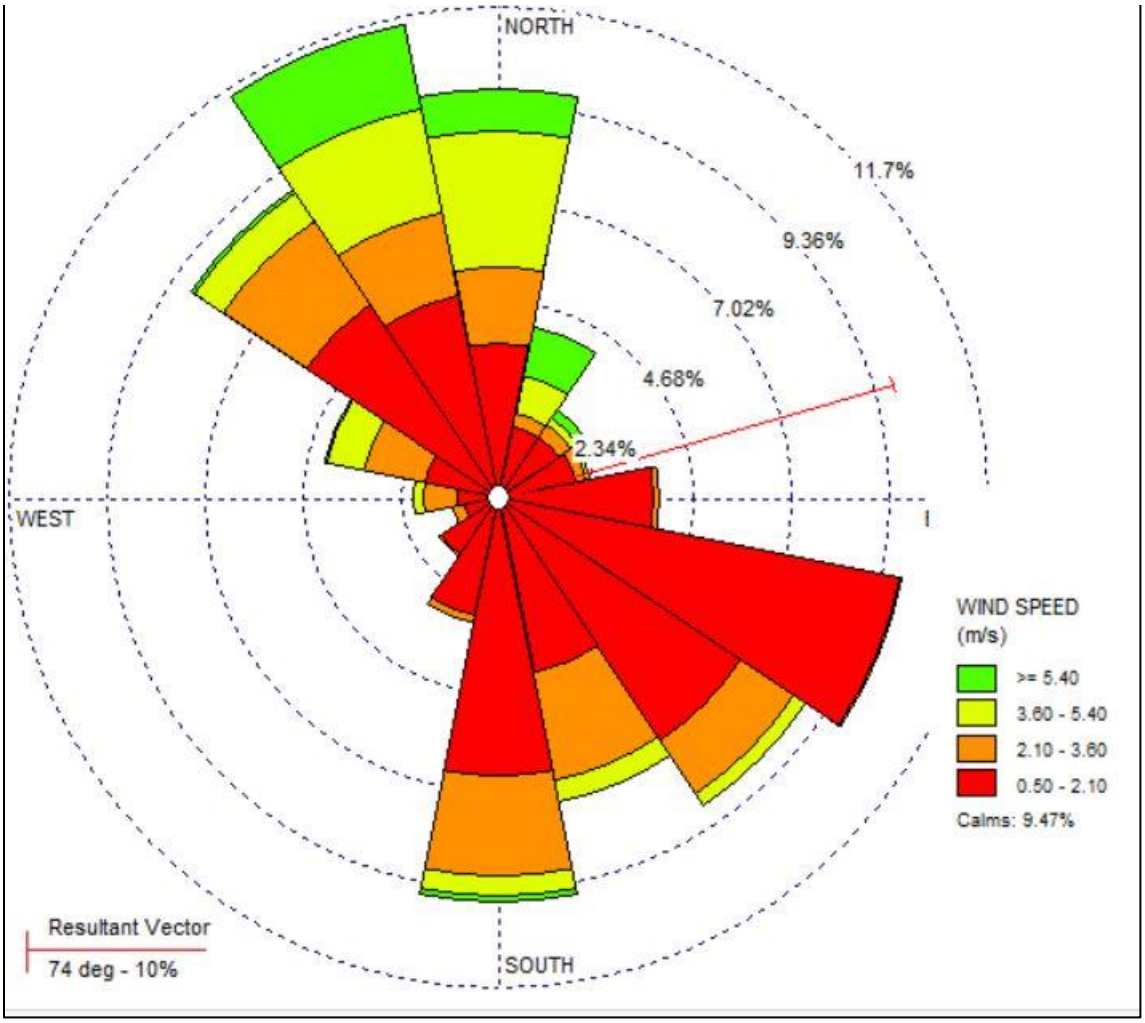


Fuente: Elaboración propia.

Figura 15. Frecuencia de los vientos simulados en verano para el año 2019.

E.1.1.3. Dirección y velocidad de vientos predominantes otoño

A continuación, se presenta la rosa de los vientos simulada para la estación de otoño en el año 2019.

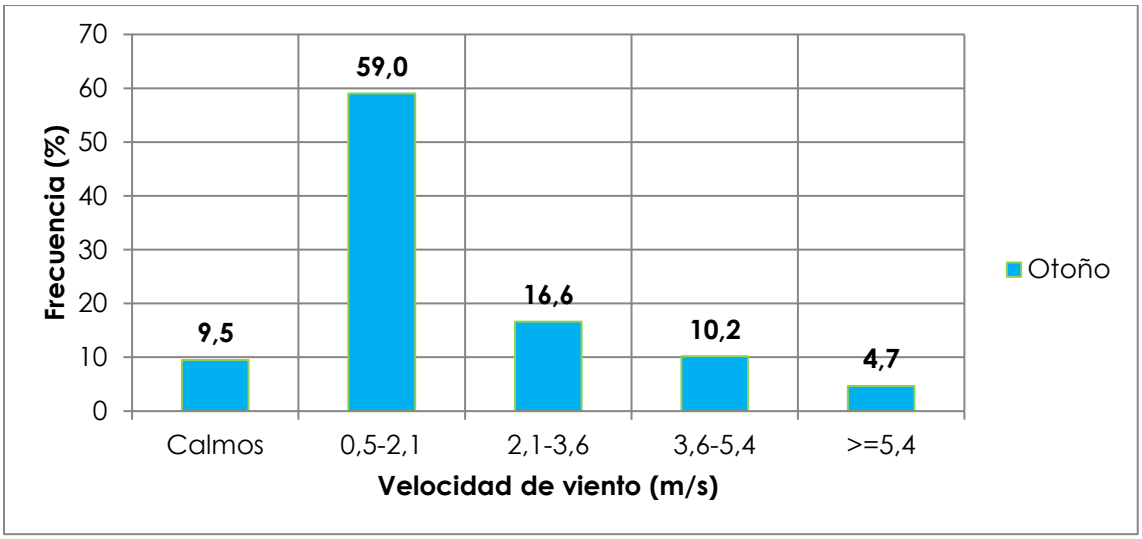


Fuente: Elaboración propia.

Figura 16. Rosa de los vientos en otoño simulado por el modelo WRF, 2019.

En la **Figura 16**, se observa la rosa de los vientos simulados durante el otoño. Los resultados concluyen que el 11,44% de los vientos tiene origen en el nor noroeste (NNO), siendo predominantes aquellos de velocidades mayores a 0,5 m/s y menores a 2,10 m/s, representando el 4,89% de los vientos en esta componente.
En consecuencia, del vector resultante, se puede concluir que las masas de aire serán desplazadas hacia el sur sureste (SSE).

Tal como se observa en la **Figura 17**, la mayor frecuencia de los vientos durante el otoño, corresponde a aquellos que son superiores a 0,5 m/s e inferiores a 2,1 m/s, representando el 59,0% de los vientos simulados por el modelo. Solo el 4,7% de los vientos son superiores a 5,4 m/s.

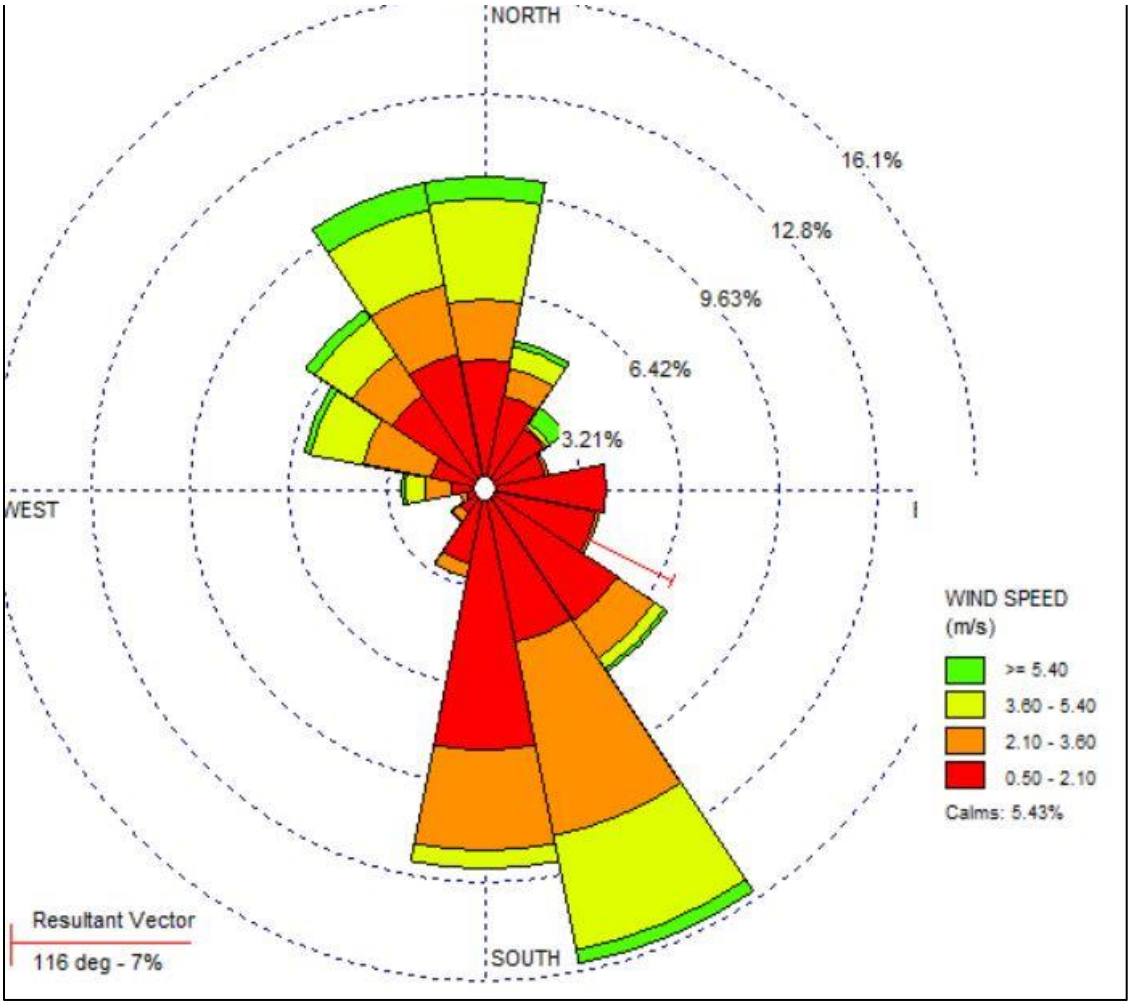


Fuente: Elaboración propia.

Figura 17. Frecuencia de los vientos simulados en otoño para el año 2019.

E.1.1.4. Dirección y velocidad de vientos predominantes invierno

A continuación, se presenta la rosa de los vientos simulada para la estación de invierno en el año 2019.

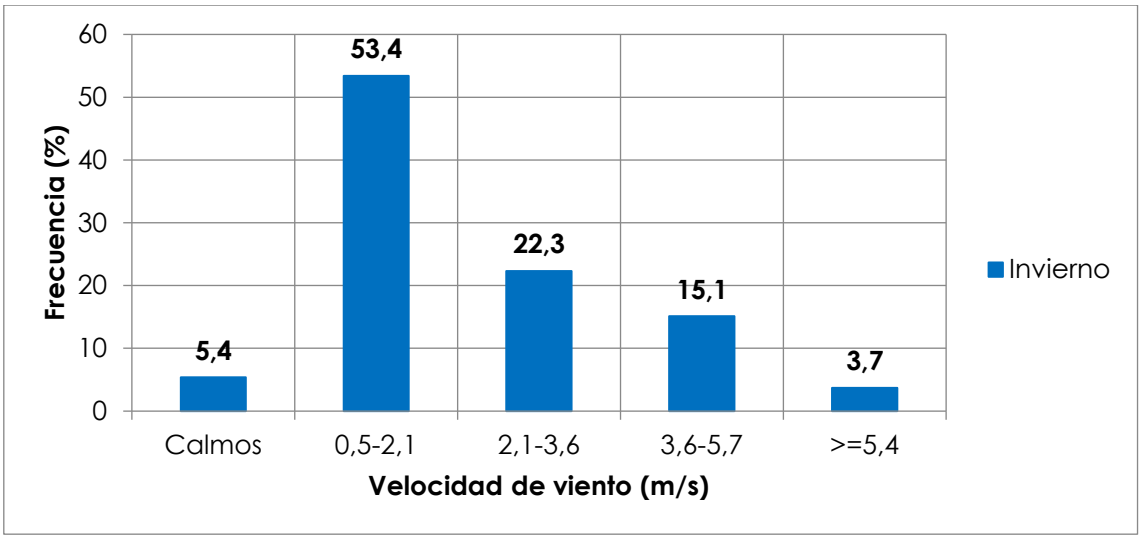


Fuente: Elaboración propia.

Figura 18. Rosa de los vientos en invierno simulado por el modelo WRF, 2019.

La rosa de los vientos durante los meses de invierno, visible en la **Figura 18**, sugiere que la mayoría de los vientos provienen desde el sur sureste (SSE) con un 15,7% del total. De los vientos de origen en estas componentes, la mayoría de estos van desde los 2,10 m/s hasta los 3,60 m/s. En consecuencia, de esto, la dispersión de contaminantes será desplazada hacia el nor noroeste (NNO).

Tal como se observa en la **Figura 19,** la mayor frecuencia de los vientos durante el invierno corresponde a aquellos que son superiores a 0,5 m/s e inferiores a 2,1 m/s, representando el 53,4% de los vientos simulados por el modelo. En segundo lugar, de predominancia, el 22,3% de los vientos son vientos con velocidades entre 2,1 a 3,6 m/s.

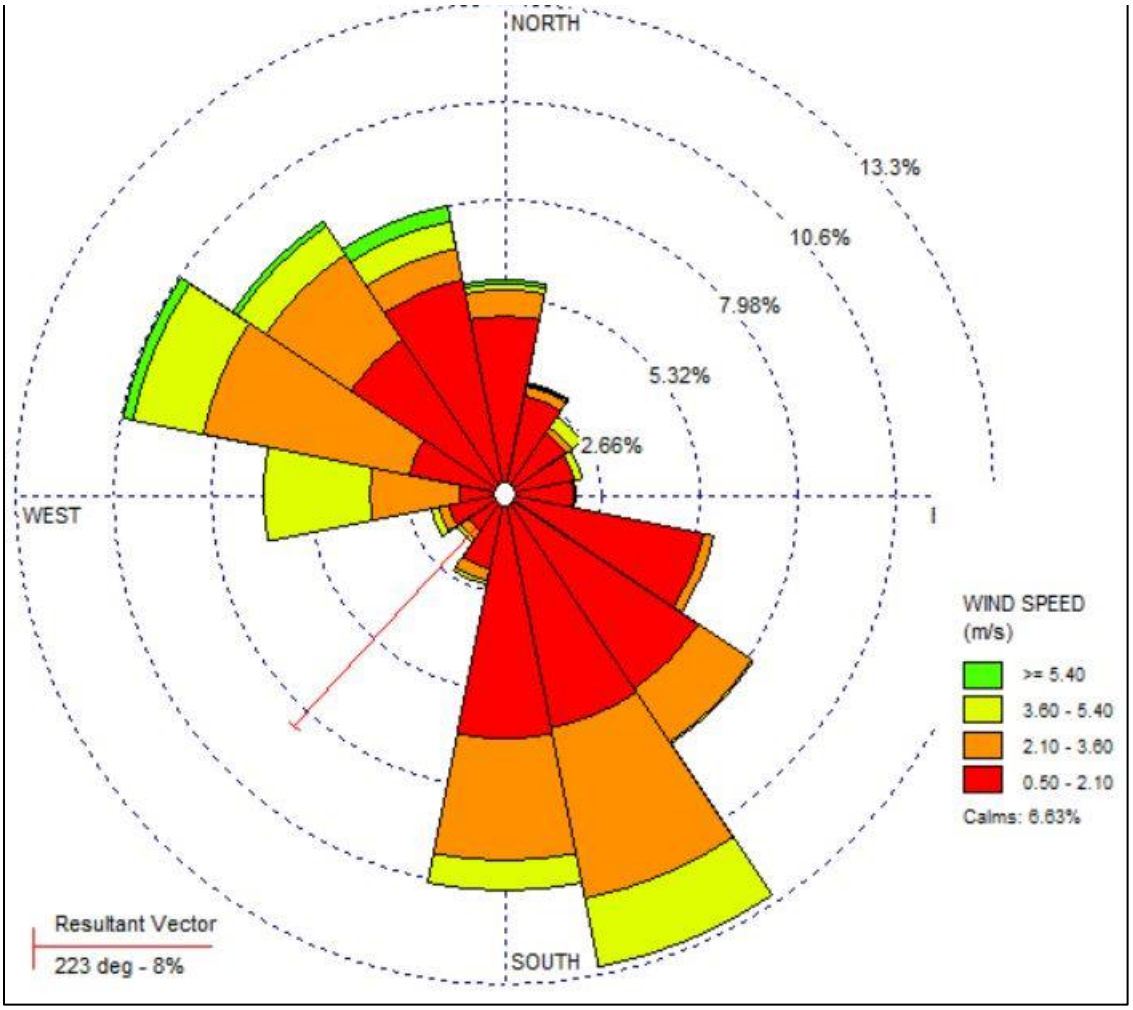


Fuente: Elaboración propia.

Figura 19. Frecuencia de los vientos simulados en invierno para el año 2019

E.1.1.5. Dirección y velocidad de vientos predominantes primavera

A continuación, se presenta la rosa de los vientos simulada para la estación de primavera en el año 2019.

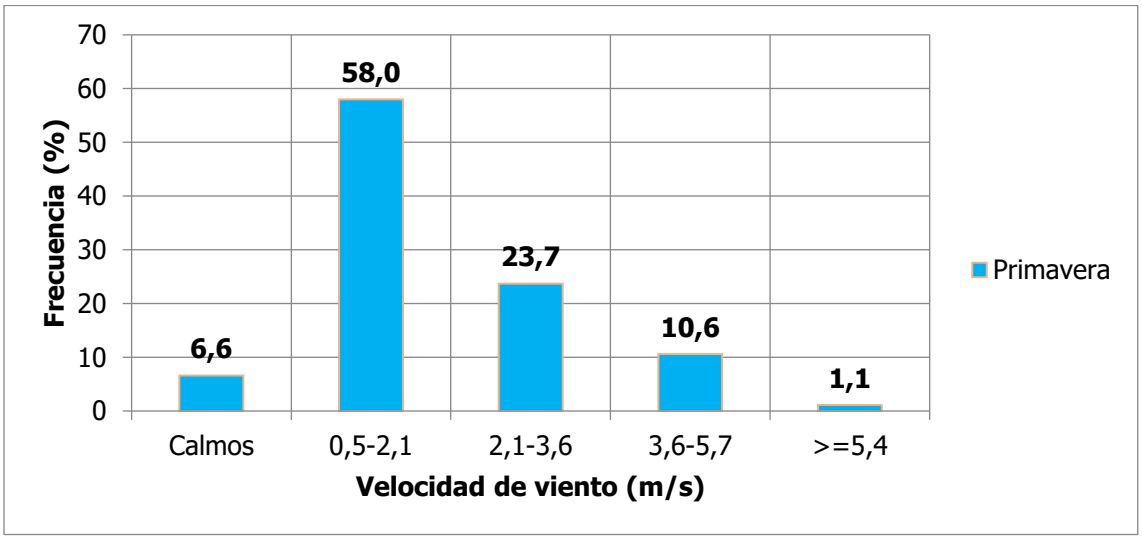


Fuente: Elaboración propia.

Figura 20. Rosa de los vientos en primavera simulado por el modelo WRF, 2019.

De la **Figura 20,** se puede observar la rosa de los vientos durante la primavera simulados por el modelo WRF. Las máximas frecuencias de vientos tienen origen en el componente sur sureste (SSE) representando el 13,03% de los vientos en primavera, de ellos el 6,45% corresponde a aquellos de magnitud superior a 0,50 m/s e inferior a 2,10 m/s. En segundo lugar, se presenta un comportamiento de vientos provenientes desde el sur (S) con un 10,7% del total, donde los vientos provenientes en esta dirección abundan en velocidades que también van desde los 0,50 m/s a los 2,10 m/s. En consecuencia, de lo anterior los vientos propiciarán que los contaminantes se desplacen en dirección nor noroeste (NNO), específicamente en el grado 43.

Tal como se observa en la **Figura 21**, la mayor frecuencia de los vientos durante la primavera, corresponde a aquellos que se encuentran entre 0,5 a 2,1 m/s, representando el 58,0% de los vientos simulados por el modelo. En último lugar el 1,1% resulta ser mayor o igual a 5,4 m/s, siendo los vientos menos significativos.

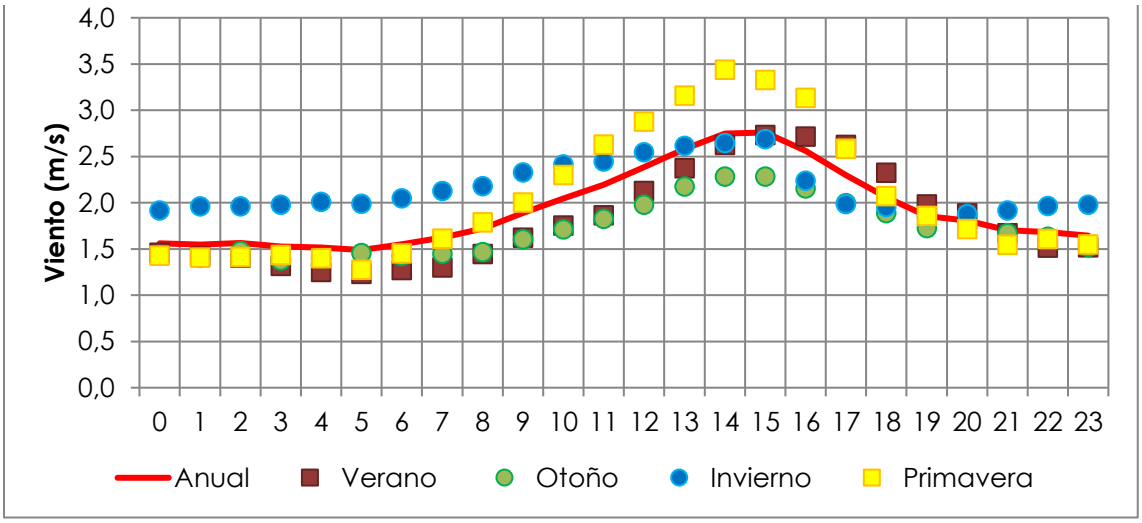


Fuente: Elaboración propia.

Figura 21. Frecuencia de los vientos simulados en primavera para el año 2019.

E.1.1.6. Perfil diario de velocidad del viento

En la **Figura 22**, se observa el perfil diario de la velocidad del viento simulado por el modelo meteorológico.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 22. Perfil diario de velocidad del viento, WRF año 2019.

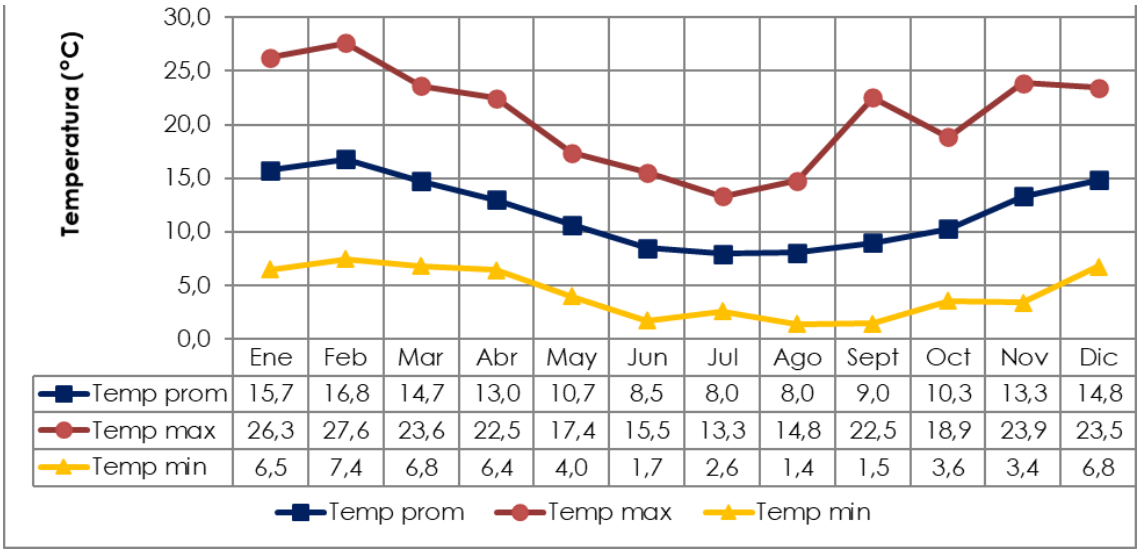
En general, la velocidad del viento en todas las estaciones presentó comportamientos similares entre sí, respecto a la media anual. Se observa, que, de forma general en el día, entre las 13 y 16 horas para todas las estaciones, en especial durante la primavera, las velocidades de los vientos aumentan.

Todas las estaciones presentaron un promedio similar de las velocidades de sus vientos, las cuales van en un rango de 1,7 m/s a 2,2 m/s.

E.1.2. Caracterización de la temperatura del aire

E.1.2.1. Temperatura diaria mensual

Tal como se ve en la **Figura 23,** la simulación del modelo meteorológico (WRF) para el año 2019, sugiere que la temperatura promedio mensual disminuye en los meses de otoño e invierno y aumenta en los meses más cálidos durante la época estival.



Fuente: Elaboración propia.

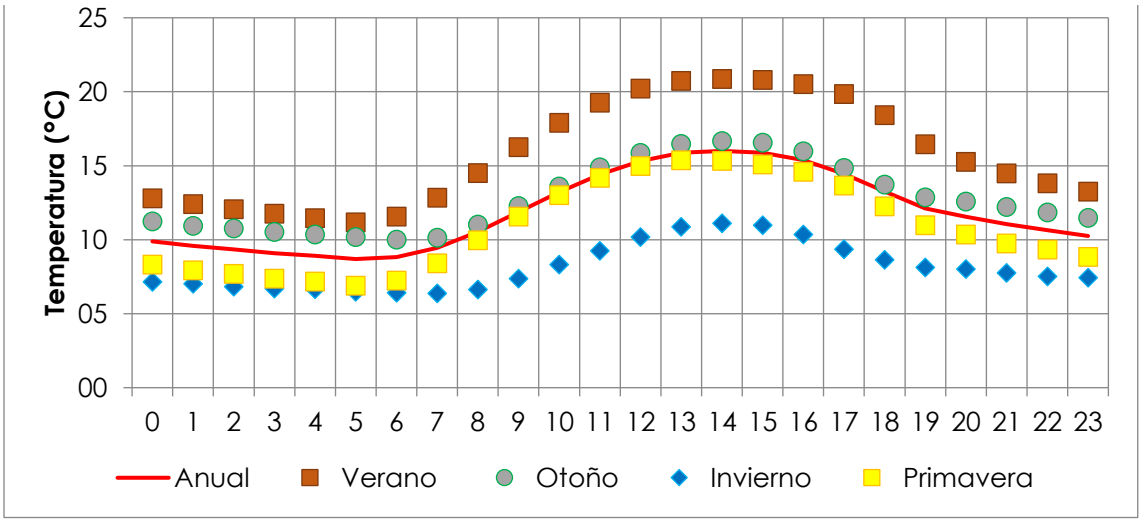
Figura 23. Temperatura mensual, WRF 2019.

Las mínimas temperaturas fueron simuladas durante los meses de julio y agosto, en donde en promedio las temperaturas alcanzaron magnitudes de 8,0°C para ambos meses por igual.

La temperatura media máxima en el año fue simulada en el mes de febrero alcanzando los 16,8°C, con una amplitud térmica de 20,2°C. Otros meses cálidos fueron diciembre y enero, cuya media mensual se encuentra aproximada a los 15°C aproximadamente.

E.1.2.2. Perfil diario de la Temperatura

La simulación del modelo meteorológico WRF dentro del dominio de las temperaturas horarias, demuestran un comportamiento similar en todas las estaciones del año. En efecto, tal como se muestra en la **Figura 24,** la evolución de la temperatura diaria resulta tener una leve diminución entre las 0 y 7 horas, a partir de entonces la temperatura aumenta hasta alcanzar temperaturas máximas entre las 13 y 14 horas, luego la temperatura disminuye constantemente hasta las 23 horas.



Fuente: Elaboración propia.

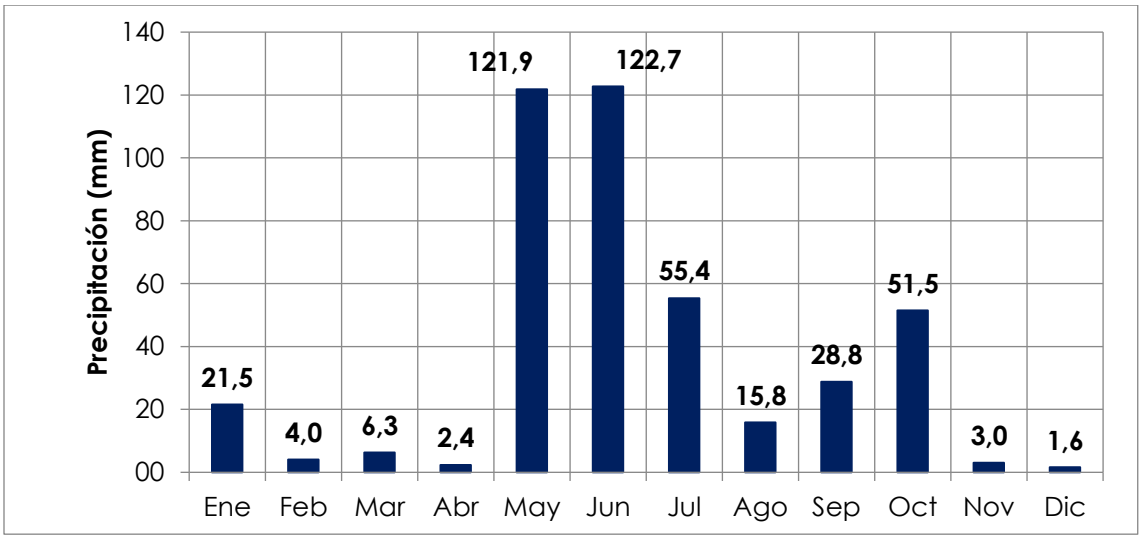
Figura 24. Perfil diario de temperatura, WRF 2019.

Además, se hace visible que en los meses de verano y primavera la amplitud térmica diaria es mayor, llegando a una diferencia de 9,7°C y 8,5 °C entre la mínima y máxima promedio horario, respectivamente, para ambas estaciones. Durante los meses de otoño e invierno la amplitud térmica es menor siendo de 6,7°C y 4,7°C, respectivamente, en donde es posible observar que durante los meses de invierno se registra la menor amplitud térmica del año simulado.

E.1.3. Caracterización de la precipitación

Según los resultados de la simulación meteorológica del modelo WRF, concluyen que, en el año 2019, la precipitación en la zona de estudio alcanzó los 434,8 mm/año.

En la **Figura 25,** se muestra la precipitación mensual para el año 2019, de donde se concluye que los meses de mayor precipitación son los meses de mayo, junio, y julio donde precipita el 69,0% (300 mm) del total anual simulado para el año 2019, correspondiendo y conviniendo en que precipita mayormente en meses de temporada invernal (junio y julio). Por otro lado, la modelación meteorológica concluye que la precipitación no es significativa en los meses de noviembre, diciembre y abril.



Fuente: Elaboración propia.

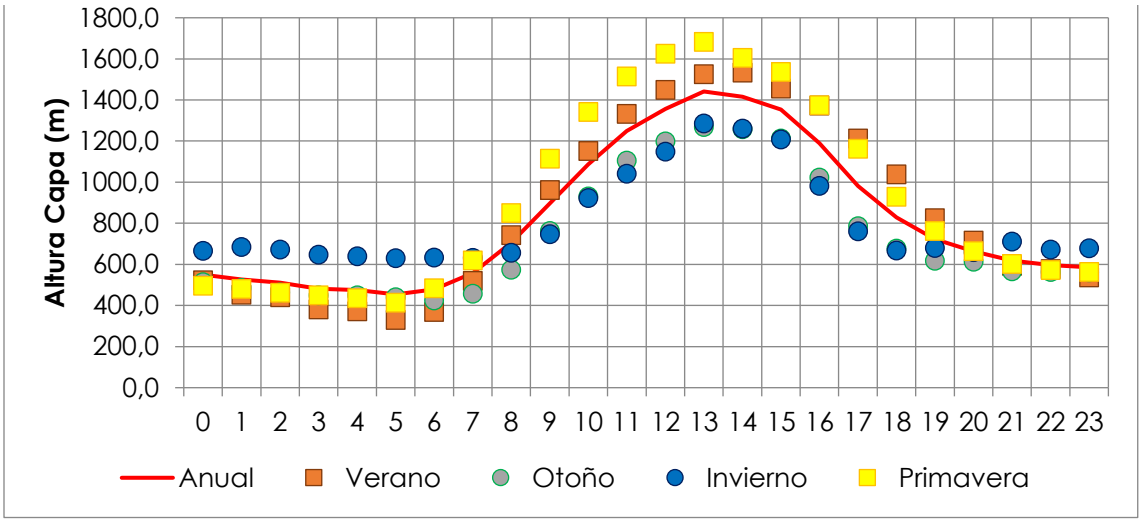
Figura 25. Caracterización de la Precipitación, WRF 2019

Por otro lado, es importante destacar que, para efectos de la modelación, la precipitación juega un rol importante en la remoción de material particulado en el aire, representando un medio de remoción natural denominado deposición húmeda.

E.1.4. Altura de capa de mezcla

La altura de la capa mezcla es de importancia, pues es un parámetro básico de la modelación de dispersión de contaminantes, ya que es ahí donde tiene lugar el transporte turbulento de masas y energía, constituyendo un parámetro que caracteriza la troposfera baja.

El modelo WRF, es capaz de simular la altura de capa de mezcla, de hecho, tal como se observa en la **Figura 26**, la evolución de la capa de mezcla diaria tiene un patrón similar en todas las estaciones del año. En general, se puede observar que durante la noche y madrugada la altura de capa de mezcla es menor a la simulada durante el día, esto significa que es durante el día, en donde se propician mejores condiciones para la dispersión de contaminantes.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 26. Evolución diaria de la altura de capa de mezcla, WRF 2019

Los resultados son los esperados, pues se espera que la capa de mezcla sea más estable durante las noches, debido a la ausencia de aporte energético del sol, influyendo en el intercambio vertical entre distintos niveles desfavorablemente, de este modo, la agitación turbulenta es muy reducida.

Con la salida del sol, el calentamiento de la superficie terrestre es transmitido a la atmósfera, produciendo agitación en la capa de mezcla lo que provoca un incremento en el espesor del volumen del aire afectado por el calentamiento del suelo, llegando al máximo entre las 13 y 14 horas del día, es en este momento del día en donde se propician las condiciones de máxima inestabilidad atmosférica, favoreciendo la dispersión de contaminantes.

E.2. Concentraciones modeladas

E.2.1. Dispersión e isoconcentración de contaminantes

A continuación, se presentan los resultados de la pluma de dispersión e isoconcentración obtenida para cada contaminante estudiado. Adicionalmente, se muestran los puntos receptores, sin embargo, las concentraciones evaluadas como puntos discretos se aborda en extenso en la sección E.2.2 de este informe.

E.2.1.1. Material particulado grueso respirable, MP_{10}

A continuación, se presenta el análisis de los resultados para el MP_{10} tanto para la concentración promedio anual y 24 horas.

Respecto a la magnitud de las concentraciones simuladas, se observa que tanto la concentración promedio anual como la concentración promedio 24 horas son bajas de acuerdo a la Guía OMS, 2005.

Concentración Promedio Anual de MP_{10}

En la **Figura 27** se observa la dispersión de la concentración promedio anual de MP_{10}. Los resultados de la modelación sugieren que:

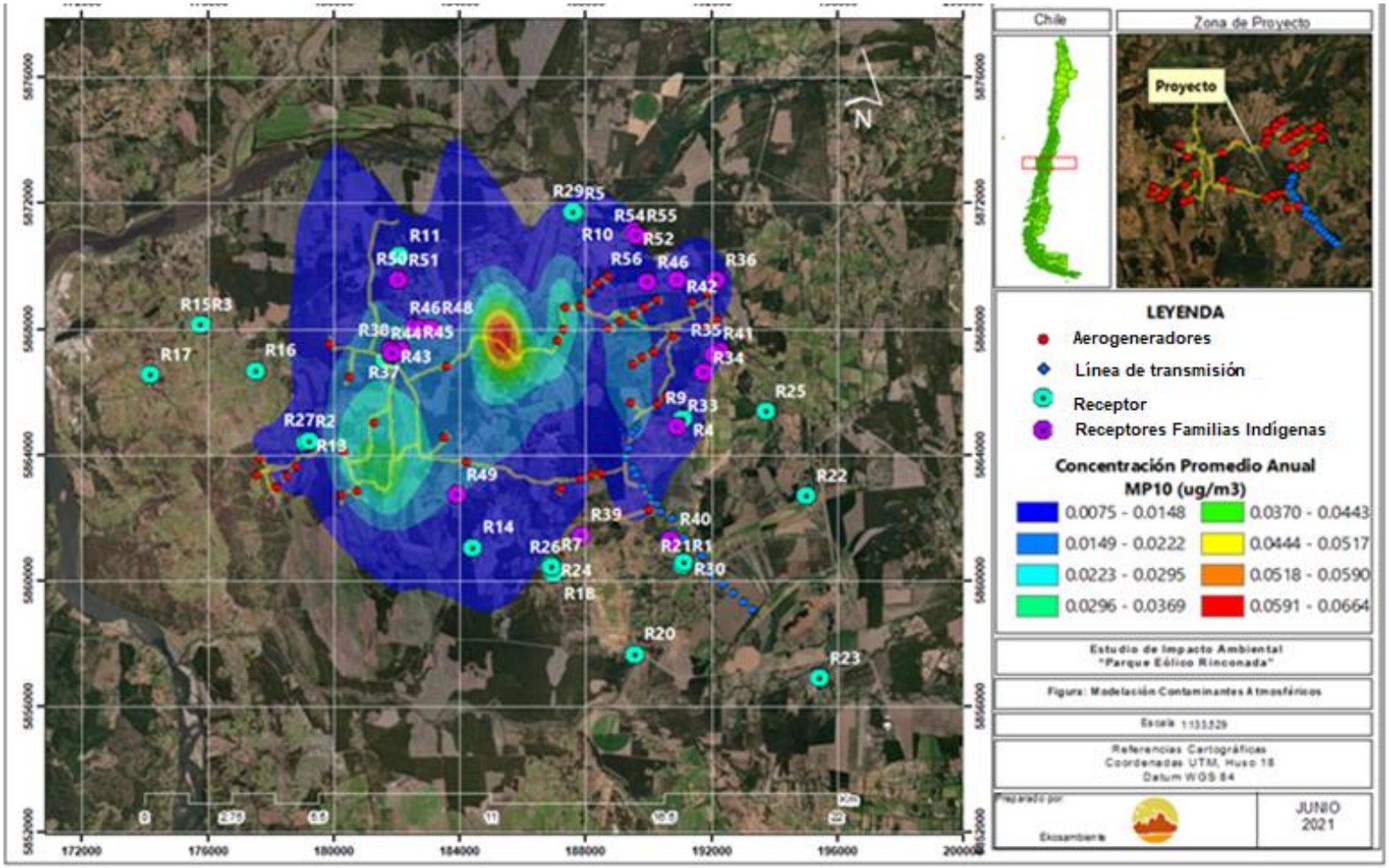
- La pluma de dispersión presenta un comportamiento acorde a los focos emisores, es decir, se simula una dispersión cuyas concentraciones más altas se evidencian en los tramos de caminos no pavimentados, plantas de hormigón (PH1 y PH2).

- Las concentraciones modeladas son de baja magnitud y van desde los 0,0024 µg/m³ a los 0,0726 µg/m³. En relación a los puntos receptores discretos escogidos cercanos al área del proyecto, se observa que la pluma de concentración de MP_{10} abarca áreas que incluyen estos, pese a lo anterior, es importante señalar que las concentraciones simuladas en dichos puntos son de baja magnitud y no se simulan en zonas de mayor concentración.

En la **Figura 28**, se puede observar el mapa de isoconcentración, de donde se obtuvieron los siguientes resultados:

- La pluma se extiende hasta los 19.500 m por el norte y 15.610 m al sur desde la zona de mayor concentración, en estos lugares las concentraciones modeladas son de 0,074 µg/m³ y representan una reducción del 96% de la isoconcentración más alta modelada.

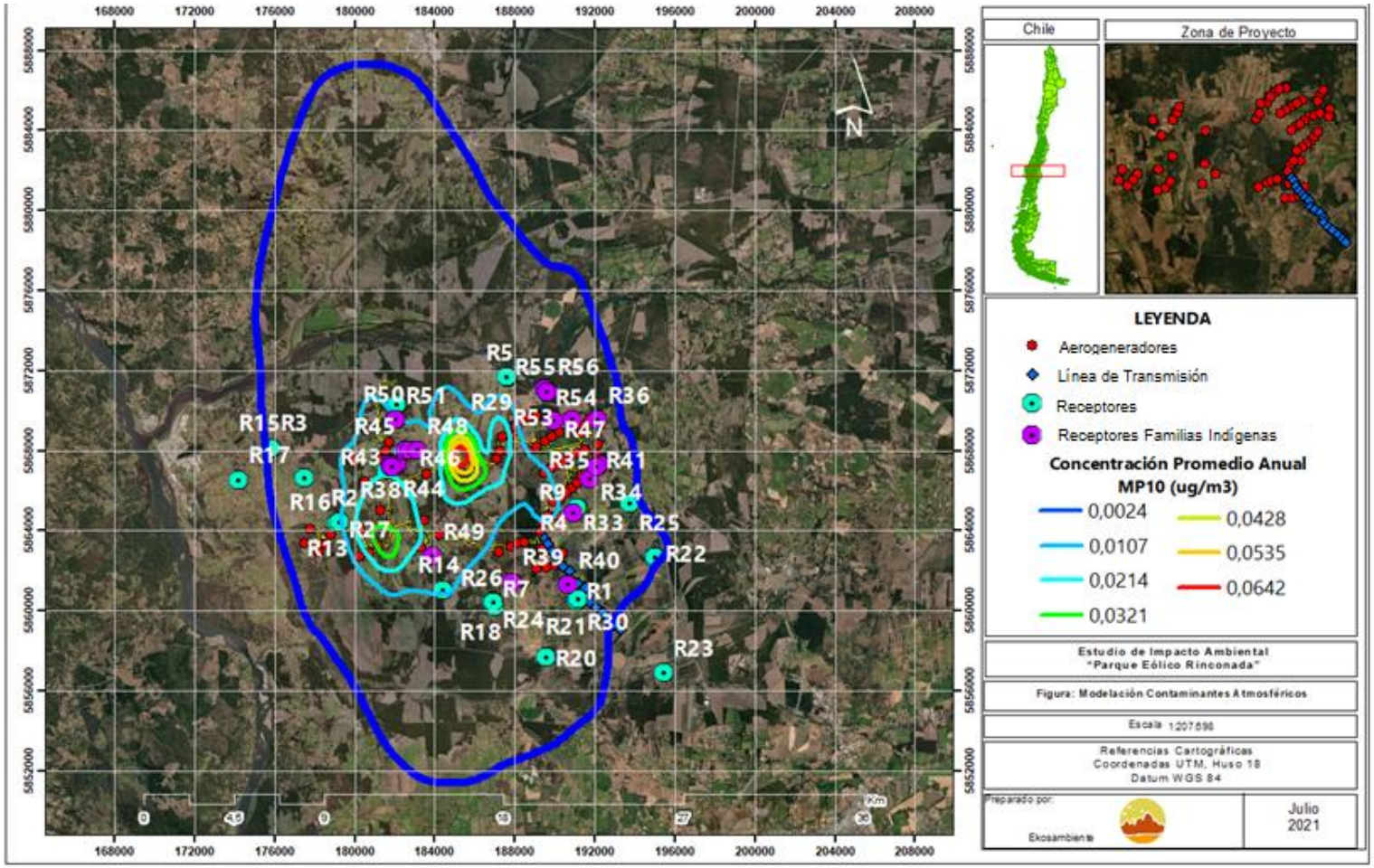
- La zona de mayor concentración abarca 1 lugar cuya superficie es aproximadamente 37 ha aledaña a plantas de hormigón y tránsito no pavimentado. La concentración sería cercana a los 0,0642 µg/m³



Nota: Dado lo bajo de las emisiones asociadas a la LT estas quedan sin representación de isocontraciones pues se encuentran bajo el valor mínimo considerado para la gráfica.

Fuente: Elaboración propia

Figura 27. Mapa dispersión de MP_{10} concentración promedio anual



Nota: Dado lo bajo de las emisiones asociadas a la LT estas quedan sin representación de isocontraciones pues se encuentran bajo el valor mínimo considerado para la gráfica.

Fuente: Elaboración propia

Figura 28. Mapa isoconcentración de MP_{10} concentración promedio anual

- **Concentración Promedio 24 horas de MP_{10}**

La **Figura 29**, se presenta la dispersión de la concentración promedio 24 horas de MP_{10}[2], de donde se puede concluir que:

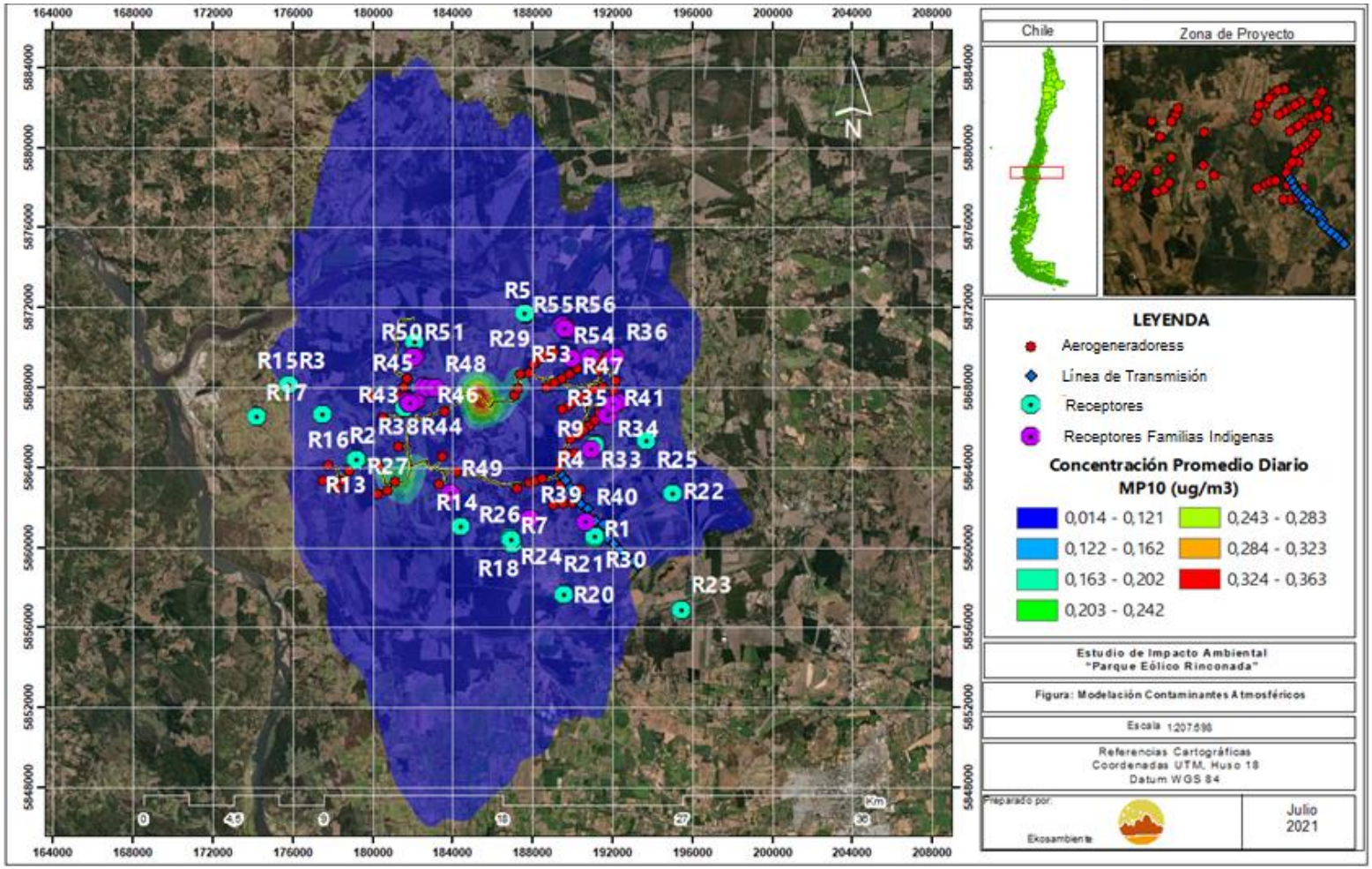
- En la pluma de dispersión se observa un área de concentraciones mayores, cuyo rango de concentración varía entre los 0,324 y 0,363 µg/m³, emplazándose en las zonas aledañas a tránsito no pavimentado y construcción de aerogeneradores.

- Cabe mencionar, que dentro del área de mayor concentración no se encuentra emplazado ningún receptor.

En la **Figura 30**, se puede observar la dimensión de la pluma de isoconcentración, de la cual se puede destacar lo siguiente:

- La pluma se extiende hasta los 11.126 m por el norte, 16.760 m al sur, desde las zonas de mayor concentración. A estas distancias las concentraciones esperadas son de 0,020 µg/m³.
- Se distinguen una zona cuyas superficies es de 9,2 ha en donde las concentraciones son cercanas a 0,360 µg/m³. Esta zona es en donde se simularon las mayores concentraciones para el MP_{10} concentración diaria y se sitúa aledaño a planta hormigonera y en una vía de tránsito no pavimentado.

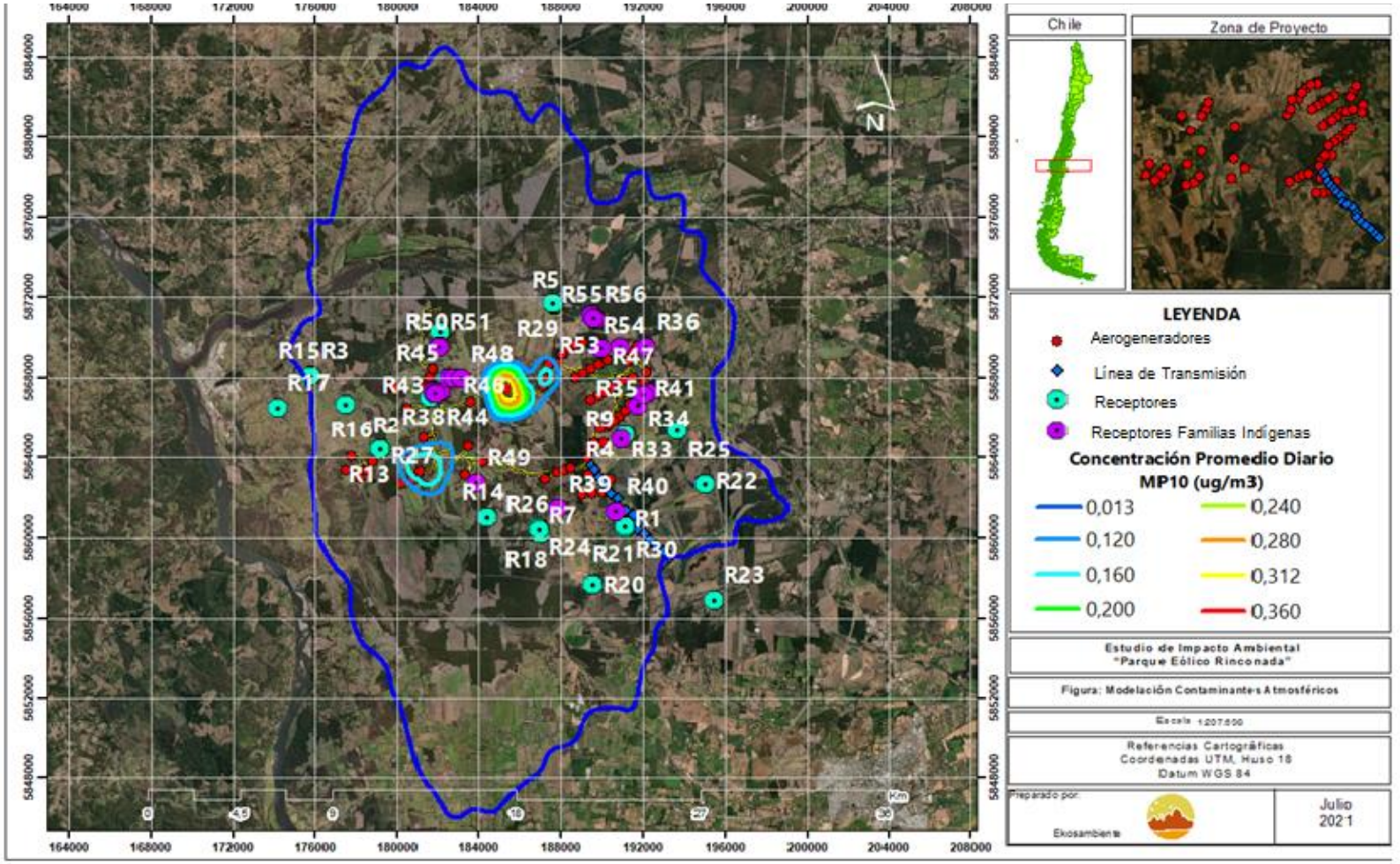
[2] Calculada como el percentil 98 de las concentraciones promedio 24 horas para el año de modelación.



Nota: Dado lo bajo de las emisiones asociadas a la LT estas quedan sin representación de isocontraciones pues se encuentran bajo el valor mínimo considerado para la gráfica.

Fuente: elaboración propia

Figura 29. Mapa dispersión de MP_{10} concentración promedio 24 horas



Nota: Dado lo bajo de las emisiones asociadas a la LT estas quedan sin representación de isocontraciones pues se encuentran bajo el valor mínimo considerado para la gráfica.

Fuente: Elaboración Propia

Figura 30. Mapa isoconcentración de MP10 concentración promedio 24 horas

E.2.1.2. Material particulado fino respirable, $MP_{2,5}$

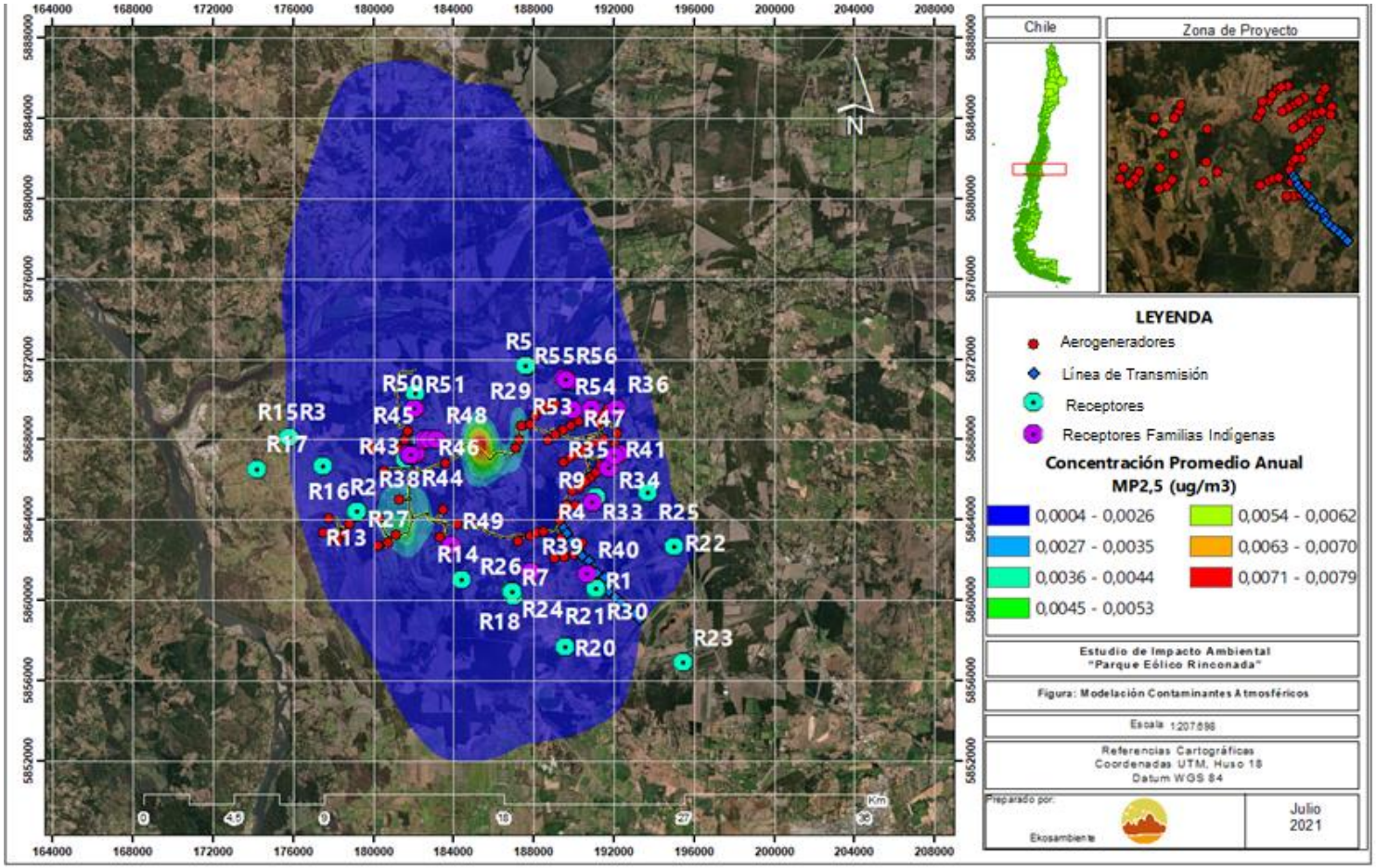
- **Concentración Promedio Anual de $MP_{2,5}$**

En la **Figura 31**, se observa la dispersión de la concentración promedio anual de $MP_{2,5}$, además, se encuentran los puntos receptores de interés, de donde se puede destacar:

- El área de mayor concentración tendrá lugar dentro del polígono donde se pretende desarrollar el proyecto, específicamente en una vía de tránsito no pavimentado y aledaño a planta hormigonera y a los aerogeneradores.
- La concentración que se generará en la atmósfera de las emisiones de $MP_{2,5}$ es de baja magnitud y varía desde los 0,0004 a los 0,0079 µg/m³.

En la **Figura 32**, se puede observar el mapa de isoconcentración, de donde se obtuvieron los siguientes resultados:

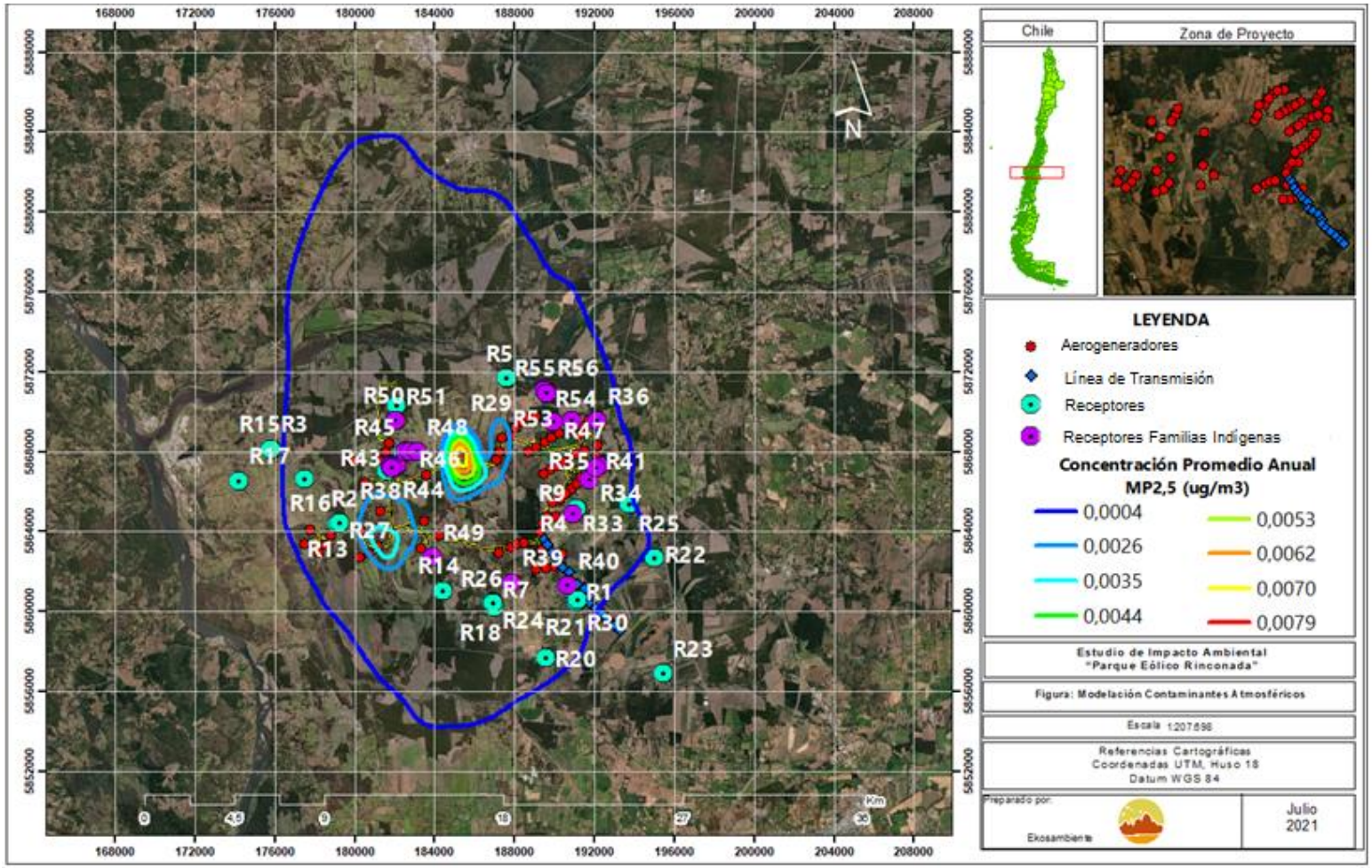
- La pluma se extiende hacia el norte, a una distancia de 16.300 m desde la zona de máxima concentracion alcanzando una concentración promedio anual de 0,0004 µg/m³. Del mismo modo, hacia el sur, se alcanza la misma concentración a una distancia de 13.140 m. Con respecto al oeste y este se modelaron esas concentraciones a 8.730 y 8.200 metros respectivamente.
- La isolinea de mayor magnitud es de 0,0079 µg/m³ y abarca una superficie de 2,7 ha.
- Además, es importante destacar que si bien se observan receptores discretos dentro de las isolíneas simuladas, la concentración en estos puntos son de baja magnitud y ninguno se encuentra cerca del área de mayor concentración.



Nota: Dado lo bajo de las emisiones asociadas a la LT estas quedan sin representación de isocontraciones pues se encuentran bajo el valor mínimo considerado para la gráfica.

Fuente: Elaboración propia

Figura 31. Mapa dispersión de $MP_{2,5}$ concentración promedio anual



Nota: Dado lo bajo de las emisiones asociadas a la LT estas quedan sin representación de isocontraciones pues se encuentran bajo el valor mínimo considerado para la gráfica.

Fuente: Elaboración propia

Figura 32. Mapa isoconcentración de MP2,5 concentración promedio anual

- **Concentración Promedio 24 horas de $MP_{2,5}$**

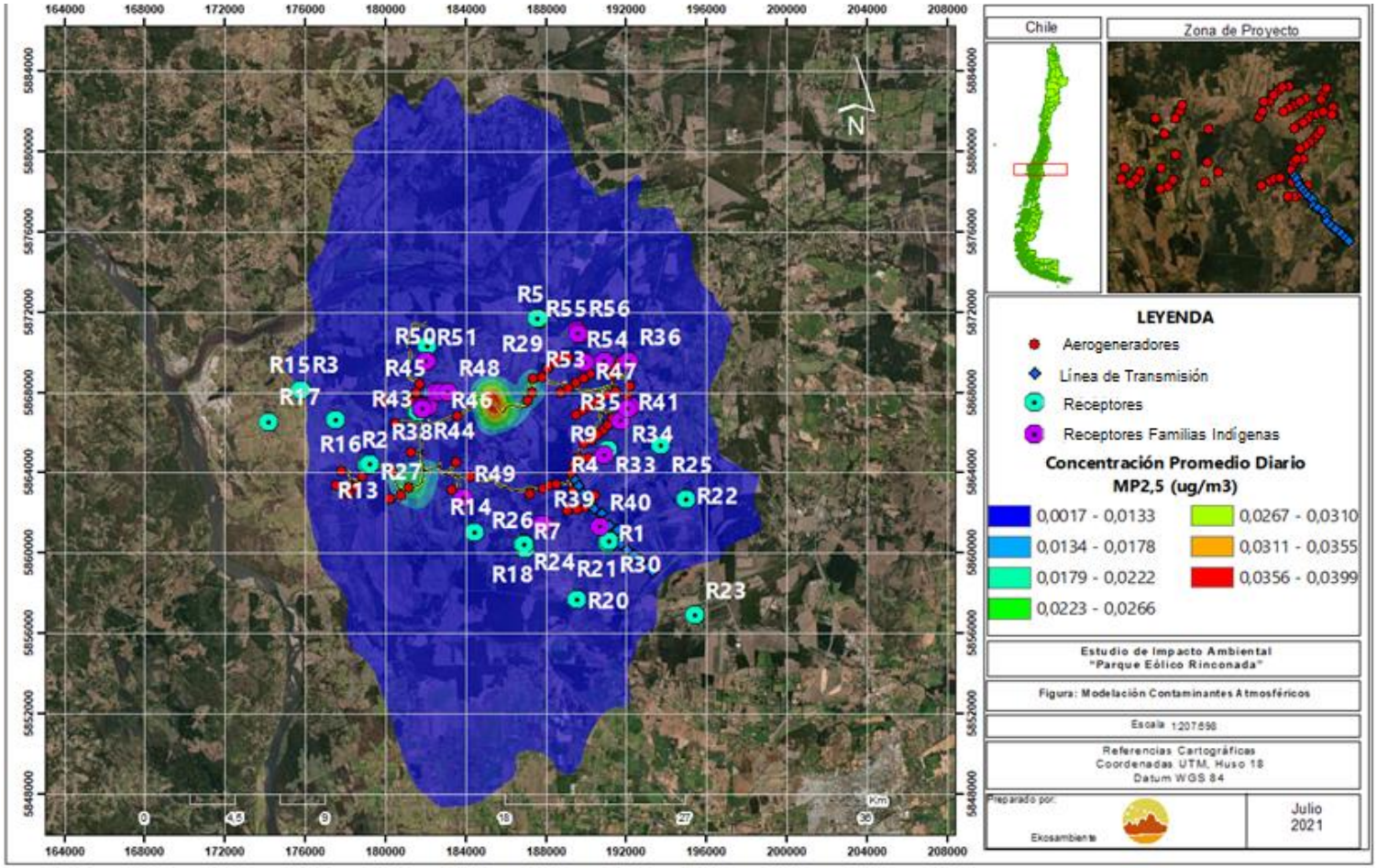
En la **Figura 33**, se presenta la pluma de dispersión para éste contaminante simulada por el modelo en concentración promedio diaria, de donde es importante señalar:

- Las concentraciones varían en el rango de 0,0017 a 0,0399 µg/m³.
- Al igual que para concentracion 24 horas de material particulado grueso, se observa una zona de máxima concentracion ubicada en el proyecto, específicamente donde se emplazará una vía no pavimentada y aledaña a plantas de hormigón cuyas concentraciones varían de 0,0356 a 0,0399 µg/m³.

En la **Figura 34**, se puede observar la dimensión de la pluma de isoconcentración promedio 24 horas para $MP_{2,5}$, de la cual se puede destacar lo siguiente:

- En relación a la dimensión, la pluma se extiende hasta los 14.540 m por el norte y 19.545 m al sur, desde la zona de mayor concentración. A estas distancias la concentración esperada es de 0,0017 µg/m³.

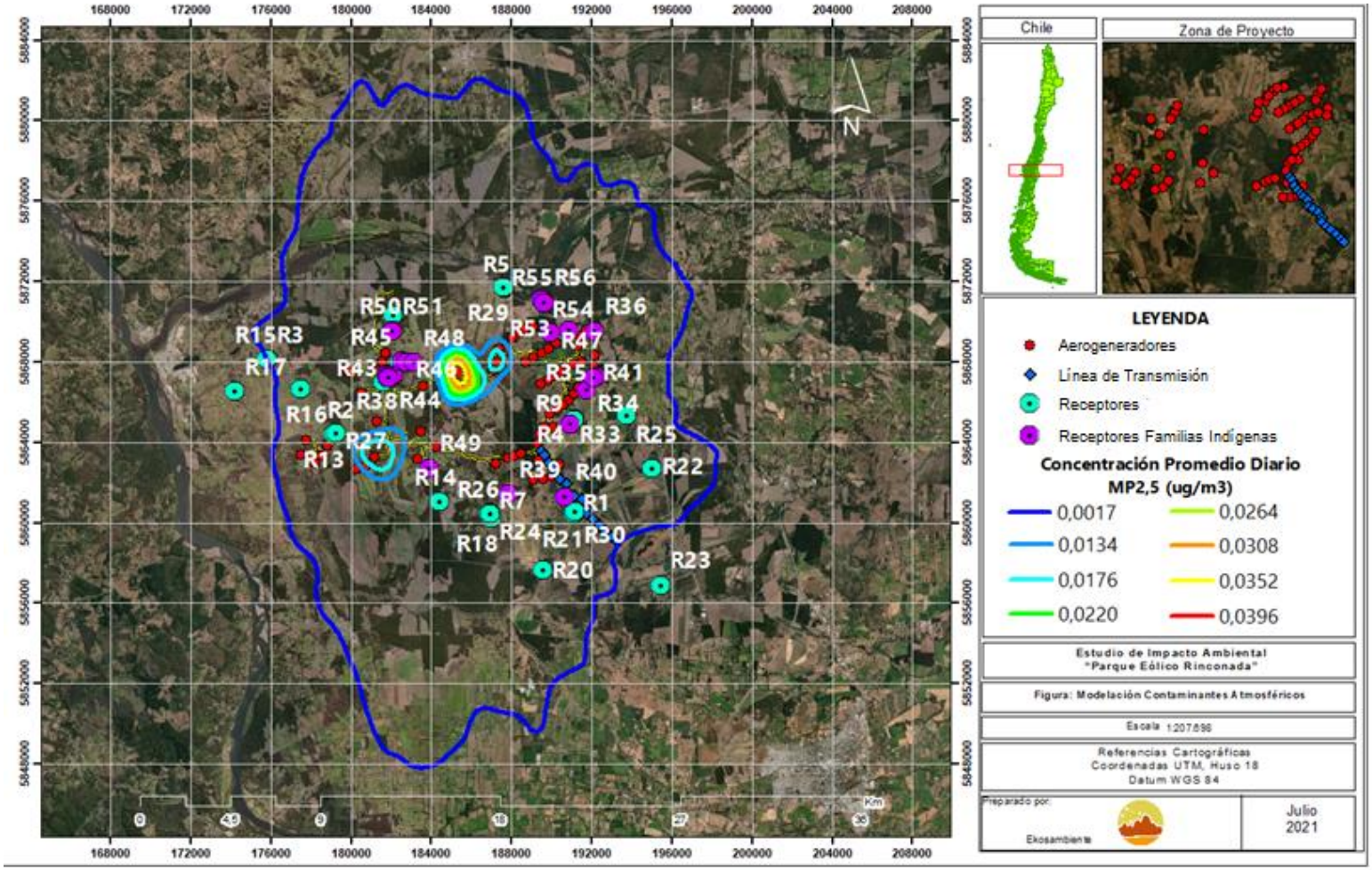
- En un área que se extiende en 9,8 ha se simularon las máximas concentraciones de $MP_{2,5}$ en su concentración promedio 24 horas. Es en esta zona, donde se encuentra el punto de máximo impacto, con una concentración de 0,0017 µg/m³.



Nota: Dado lo bajo de las emisiones asociadas a la LT estas quedan sin representación de isocontraciones pues se encuentran bajo el valor mínimo considerado para la gráfica.

Fuente: Elaboración propia

Figura 33. Mapa dispersión de $MP_{2,5}$ concentración promedio 24 horas



Nota: Dado lo bajo de las emisiones asociadas a la LT estas quedan sin representación de isocontraciones pues se encuentran bajo el valor mínimo considerado para la gráfica.

Fuente: Elaboración propia

Figura 34. Mapa isoconcentración de MP2,5 concentración promedio 24 horas

E.2.2. Concentración de contaminantes en receptores discretos para MP_{10} y $MP_{2,5}$

A continuación, se presentan las concentraciones modeladas para cada uno de los contaminantes en los receptores discretos representativos indicados y las estaciones de monitoreo (Ver **Figura 8** y **Figura 10**). Además, dichos receptores están descritos en la **Tabla 6.**

Estos corresponden a la simulación realizada a la altura de 1,6 m sobre el nivel del suelo.

Los resultados de la modelación de receptores discretos de MP_{10} como concentración promedio anual demostraron que en el receptor discreto "R48", el cual corresponde a la Familia 18 ubicada cerca de los aerogeneradores 1, 2 y 3, simula la concentración más alta de todos los puntos receptores evaluados con 0,0181 µg/m^3; mientras que como concentración promedio 24 horas la mayor concentración se simuló con 0,0764 µg/m^3.

Con respecto a la simulación realizada para el contaminante criterio $MP_{2,5}$, se observa que la modelación presenta en el receptor "R48", el cual como fue mencionado corresponde la Familia 18, en donde se evidencian las mayores concentraciones como concentración diaria, con 0,0024 µg/m^3, en relación a la concentración más alta modelada como promedio anual, se observa que esta ocurrirá en el receptor "R6" que corresponde a la Posta Rural La Colonia, con 0,0085 µg/m^3, valores bajo lo exigido por la normativa.

Si se comparan estos valores con lo que menciona la guía de calidad de aire de la OMS de 2005: "*... el nivel más bajo de la gama de concentraciones para las cuales se han demostrado efectos adversos no es muy superior a la concentración de fondo, que para las partículas de menos de 2,5 µg ($MP_{2,5}$) se ha estimado en 3-5 µg/m^3…*" se evidencia que las concentraciones modeladas son consideradas de baja magnitud puesto que, estas representarían para aquellos receptores discretos en donde se modelaron las concentraciones más altas,"R48" (concentración diaria) y "R6" (concentración anual), el 0,28% y 0,08% para $MP_{2,5}$, y comparándolo con el umbral más bajo mencionado 3 µg/m^3, por tanto asume un escenario conservador.

En la **Tabla 7**, se presentan los resultados de la modelación discreta de cada punto receptor, de la cual se observa que en general las concentraciones modeladas son de baja magnitud.

Tabla 7. Concentraciones modeladas en puntos receptores.

Punto Receptor	Concentración modelada de MP_{10} ($\mu g/m^3$)		Concentración modelada de $MP_{2,5}$ ($\mu g/m^3$)	
	Promedio Anual	Promedio 24 horas	Promedio Anual	Promedio 24 horas
R1	0,0036	0,0198	0,0005	0,0026
R2	0,0087	0,0497	0,0010	0,0055
R3	0,0029	0,0160	0,0003	0,0018
R4	0,0071	0,0403	0,0011	0,0057
R5	0,0061	0,0315	0,0009	0,0039
R6	0,0223	0,0625	0,0024	0,0070
R7	0,0069	0,0310	0,0008	0,0036
R8	0,0161	0,0602	0,0018	0,0068
R9	0,0071	0,0403	0,0011	0,0056
R10	0,0060	0,0305	0,0009	0,0038
R11	0,0092	0,0416	0,0010	0,0046
R12	0,0196	0,0654	0,0022	0,0074
R13	0,0087	0,0495	0,0009	0,0055
R14	0,0112	0,0522	0,0012	0,0057
R15	0,0028	0,0157	0,0003	0,0017
R16	0,0050	0,0231	0,0006	0,0025
R17	0,0007	0,0072	0,0001	0,0008
R18	0,0065	0,0302	0,0008	0,0036
R19	0,0051	0,0383	0,0009	0,0049
R20	0,0034	0,0178	0,0004	0,0024
R21	0,0036	0,0198	0,0005	0,0026
R22	0,0025	0,0181	0,0004	0,0024
R23	0,0017	0,0101	0,0002	0,0013
R24	0,0069	0,0308	0,0008	0,0036
R25	0,0029	0,0192	0,0004	0,0027
R26	0,0068	0,0309	0,0008	0,0035
R27	0,0088	0,0516	0,0010	0,0057
R28	0,0220	0,0631	0,0024	0,0070
R29	0,0060	0,0297	0,0009	0,0036
R30	0,0036	0,0200	0,0005	0,0026
R31	0,0179	0,0601	0,0020	0,0069
R32	0,0176	0,0595	0,0019	0,0067
R33	0,0074	0,0356	0,0011	0,0055
R34	0,0061	0,0334	0,0010	0,0047

Punto Receptor	Concentración modelada de MP_{10} ($\mu g/m^3$)		Concentración modelada de $MP_{2,5}$ ($\mu g/m^3$)	
	Promedio Anual	Promedio 24 horas	Promedio Anual	Promedio 24 horas
R35	0,0059	0,0297	0,0009	0,0047
R36	0,0080	0,0318	0,0012	0,0049
R37	0,0172	0,0582	0,0019	0,0066
R38	0,0187	0,0636	0,0021	0,0072
R39	0,0063	0,0284	0,0008	0,0033
R40	0,0043	0,0255	0,0006	0,0031
R41	0,0061	0,0302	0,0010	0,0049
R42	0,0056	0,0335	0,0010	0,0053
R43	0,0190	0,0644	0,0021	0,0073
R44	0,0181	0,0635	0,0020	0,0071
R45	0,0164	0,0642	0,0018	0,0072
R46	0,0171	0,0714	0,0019	0,0079
R47	0,0055	0,0375	0,0010	0,0056
R48	0,0181	0,0764	0,0020	0,0085
R49	0,0145	0,0633	0,0016	0,0069
R50	0,0107	0,0466	0,0012	0,0052
R51	0,0107	0,0460	0,0012	0,0051
R52	0,0048	0,0334	0,0009	0,0045
R53	0,0047	0,0364	0,0008	0,0048
R54	0,0049	0,0383	0,0008	0,0050
R55	0,0048	0,0380	0,0008	0,0049
R56	0,0048	0,0362	0,0008	0,0048
R57	0,0007	0,0046	0,0001	0,0006

Fuente: Elaboración propia,

(*) Las concentraciones sombreadas corresponden a las más altas,

E.2.3. Aporte del proyecto a la concentración en estaciones de cumplimiento normativo

En la **Tabla 8**, se observa el aumento de la concentración basal registrada en la EMRP "21 de mayo" entre enero y diciembre de 2019 (último año analizado) para MP_{10} y $MP_{2,5}$,

Tabla 8 Proyección de la concentración en la EMRP 21 de mayo

Concentración (µg/m³)	MP_{10}		$MP_{2,5}$	
	Promedio anual	**Promedio 24 horas**	**Promedio anual**	**Promedio 24 horas**
Basal	50,24	181,28	29,79	140,99
Del proyecto	0,0007	0,0046	0,0001	0,0006
Proyectada en el sector	50,2407	181,2846	29,7901	140,99056

Fuente: Elaboración propia.

Para la Estación 21 de mayo, se proyecta un aumento de la condición basal de un 0,00253% para la concentración promedio diario y de un 0,00132% para la concentración promedio anual de MP_{10}, En relación al $MP_{2,5}$ se esperan incrementos correspondientes a un 0,0004% para la concentración promedio diario y 0,0003% para la concentración promedio anual, siendo estos aportes a la estación 21 de mayo no significativos. Esto puede deberse principalmente a la lejanía de la ubicación de esta estación respecto al proyecto la cual es de 15 km lineales aproximadamente desde la obra más cercana a este.

Por tanto, en base a todo lo anterior y teniendo en cuenta que la estación representa zonas urbanas pobladas en la ciudad, resulta importante destacar que **se prevé un aumento no significativo en la condición basal de la ciudad registrada en la estación considerada** y que la puesta en marcha del proyecto no representa un cambio sustancial de la calidad del aire.

F. CONCLUSIONES

Se estudió la concentración de las emisiones producto de la construcción del primer año del Proyecto "Parque Eólico Rinconada", de esta forma, fueron modeladas las emisiones MP_{10}, $MP_{2,5}$, a fin de determinar las concentraciones que éstos tendrán en la atmósfera y desde este punto de vista, evaluar el aporte a la línea de base, en tanto que la delimitación y la justificación del área de influencia se describe en detalle en el **"Capítulo 2. Determinación y justificación del área de influencia"** del presente **EIA.** Además de lo anterior de prever posibles efectos negativos a la salud de las personas.

Por otra parte, las emisiones de SOx y NOx, fueron modeladas como precursores de material particulado a partir de la transformación química, permitiendo así asumir el peor escenario de evaluación. En tanto que el O_3, no fue incorporado en la modelación por las características del proyecto

Tal como se abordó en la sección E.2.2 Concentración de contaminantes en receptores discretos representativos para MP_{10} y $MP_{2,5}$ de este informe, el receptor discreto "R48" simula la concentración más alta de los puntos receptores evaluados con 0,0181 µg/m^3 como concentración promedio anual de material particulado grueso; mientras que como concentración promedio 24 horas la mayor concentración se simuló con 0,0764 µg/m^3. En relación al $MP_{2,5}$, el receptor que simula la mayor concentración anual corresponde al receptor "R6", que corresponde a Posta Rural La Colonia siendo de 0,0024 µg/m^3, por otro lado, la concentración $MP_{2,5}$ diaria máxima se encuentra nuevamente en el receptor discreto "R48", con 0,0085 µg/m^3. Cabe destacar que estos valores fueron modelados a una altura promedio de 1,6 metros, correspondiente a la altura promedio de los habitantes en Chile,

Si se comparan estos valores con lo que menciona la guía de calidad de aire de la OMS de 2005: "… *el nivel más bajo de la gama de concentraciones para las cuales se han demostrado efectos adversos no es muy superior a la concentración de fondo, que para las partículas de menos de 2,5 µg ($MP_{2,5}$) se ha estimado en 3-5 µg/m^3*…" se evidencia que las concentraciones modeladas son consideradas de baja magnitud puesto que, estas representarían para aquellos receptores en donde se modelaron las concentraciones más altas,"R48" (concentración diaria) y "R6" (concentración anual), el 0,28% y 0,08% para $MP_{2,5}$, comparándolo con el umbral más bajo mencionado 3 µg/m^3, por tanto asume un escenario conservador.

El análisis de la variación de la concentración sobre la línea de base demuestra que el funcionamiento del proyecto eólico no prevé un aumento significativo de la condición basal, en la estación 21 de mayo.

En relación a las plumas de dispersión presentadas en el Acápite E.2.1 Dispersión e isoconcentración de contaminantes (**Figuras 27-35**), la forma que presenta la pluma de dispersión es acorde a las actividades que ocurrirán por la construcción del Proyecto (tránsito de vehículos, excavaciones, combustión de vehículos y maquinarias, entre otros), de acuerdo a los polígonos modelados y las tasas de emisión que estos presentarán.

Sumado a lo anterior, es fundamental señalar que la concentración en el aire de los contaminantes puede ser influida por diversos factores, entre los cuales están la tasa de emisión, las condiciones en que los contaminantes son liberados a la atmósfera, la topografía del entorno, e indudablemente las condiciones meteorológicas; es decir, la dispersión y concentración de las partículas y gases en el aire quedará determinado por las condiciones ambientales en donde estos son liberados, como por ejemplo: gradiente de presión, gradiente de temperatura, velocidad y dirección de los vientos (los que a su vez están influenciados por las características topográficas del lugar), entre otros.

En este contexto, la modelación de dispersión de contaminantes fue simulada usando el modelo meteorológico WRF, el cual es recomendado por el SEIA en la Guía para el Uso de Modelos de Calidad del Aire, el modelo meteorológico es de importancia, pues simula las condiciones que conforman el proceso de dispersión de contaminantes. Para más detalle se presenta en el documento el **Apéndice: Análisis de incertidumbre y correlación,** de la modelación de emisiones atmosféricas referidas al proyecto.

En conclusión, la modelación de las emisiones del proyecto producto del material particulado, MP_{10} y $MP_{2,5}$ analizados según línea de base o normativa vigente y debido al incremento que estos presentarían en la EMRP, **no representan un riesgo significativo a la salud de la población, puesto que en ningún caso la proyección de la concentración en los puntos receptores evaluados, respecto de la concentración basal representó un aumento significativo; así mismo, se presume que no habrá afectación a los recursos naturales dado las bajas tasas de concentraciones obtenidas de dicha modelación.**

G. BIBLIOGRAFÍA

Servicio de Evaluación Ambiental, 2012, Guía para el Uso de Modelos de Calidad de Aire en el SEIA, p, 14-39, Recuperado el 01 de abril de 2016, desde http://www,sea,gob,cl/sites/default/files/migration_files/guias/Guia_uso_modelo_calidad_del_aire_seia,pdf

Organización Mundial de la Salud (OMS), 2005, Guía de calidad del aire

H. APÉNDICE: ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE Y CORRELACIÓN.

1. Análisis de Resultados Meteorológicos

1.1. Análisis de ajuste sobre el modelo meteorológico

La correlación de los datos se realizó entre datos observados y modelados. Los datos observados corresponden a los registrados en dos estaciones de propiedad del titular, correspondientes a Laja 1 y Laja 2. Mientras que el modelo WRF utilizado simula condiciones meteorológicas dentro de un rango de 62 x 62 km. Para efectos del análisis del ajuste de los datos meteorológicos simulados, se comparó los valores medidos en la estación y el valor modelado.

La correlación de los datos se determinó a través del ajuste por mínimos cuadrados, método en el que existen dos parámetros de importancia: coeficiente de correlación de Pearson (r) y el coeficiente de determinación (R^2).

El coeficiente de correlación lineal es una medida de relación de Pearson entre dos variables y se usa para medir el grado de relación entre ellas. El rango de valores va desde el -1 al 1 y está representado por la siguiente ecuación.

$$r_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \cdot \sigma_y}$$

Donde,

- σ_{xy}, es la covarianza entre x e y;
- σ_x, es la desviación estándar de x;
- σ_y, es la desviación estándar de y;

El coeficiente de determinación, se utiliza como medida de eficiencia de la cobertura de datos midiendo el porcentaje de variación entre las variables observadas y modeladas, es decir, testea la capacidad predictiva del modelo e indica la proporción de la varianza de los resultados que puede ser explicado por el modelo. Los valores del coeficiente de determinación varían de 0 a 1, siendo este último el valor óptimo y está determinada por la siguiente relación.

$$R^2 = r_{xy}^2 = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \cdot \sigma_y}$$

Donde,

- σ_{xy}, es la covarianza entre x e y;
- σ_x, es la desviación estándar de x;
- σ_y, es la desviación estándar de y;

Además, se presenta el análisis de tendencia de los valores modelados a estar sobredimensionados o subdimensionados respecto de los observados, a través del

percent bias (PBIAS), el valor óptimo es 1 y su cálculo se realiza según la siguiente ecuación.

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i - O_i)}{\sum_{i=1}^{n} O_i}\right]$$

Donde,

- S_i, es el valor simulado;
- O_i, es el valor observado.

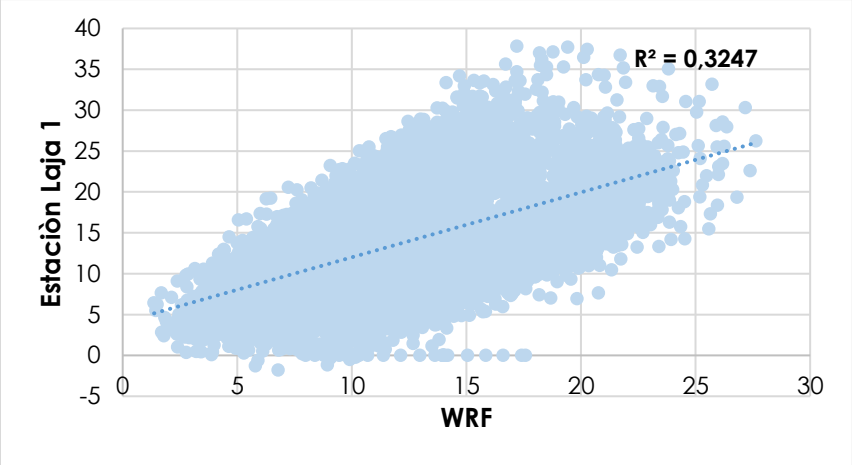
Tabla 9. Resumen de valores de ajuste de variables del modelo

Id	Variable	Coeficiente de correlación lineal (r)	Coeficiente de determinación (R^2)	Percent bias (PBIAS)
Estación Laja 1	Temperatura horaria	0,2629	0,0691	12,04%
	Velocidad del viento horaria	0,0360	0,0013	64,46%
	Dirección del viento horaria	0,1400	0,0196	-9,24%
Estación Laja 2	Temperatura horaria	0,2960	0,0876	-103,13%
	Velocidad del viento horaria	0,2496	0,0623	62,99%
	Dirección del viento horaria	0,1631	0,0266	-10,26%

Fuente: Elaboración propia

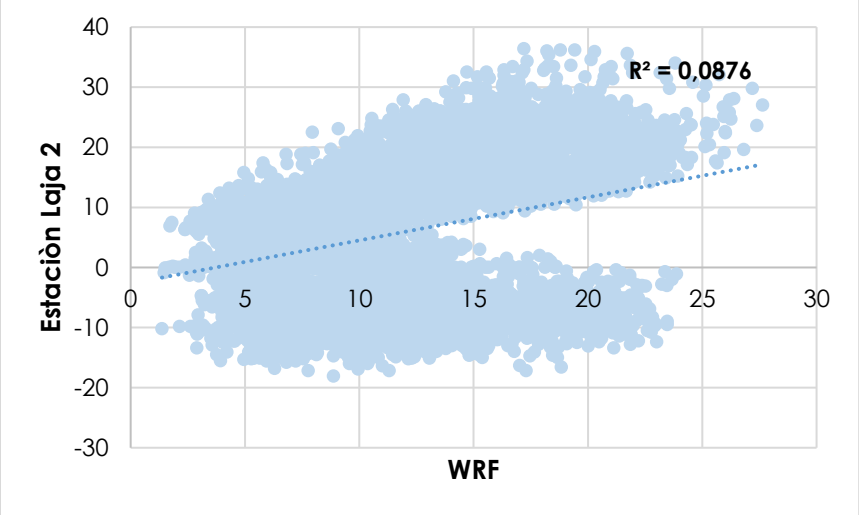
1.1.1 Temperatura

En la **Figura 35** y **Figura 36**, se observa la correlación entre la temperatura horaria observada en la estación Laja 1 y Laja 2 respectivamente, y las simuladas por el modelo WRF de la ciudad de Laja, Los Ángeles y alrededores para los datos horarios de temperatura en el año 2019.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 35. Correlación entre temperaturas observadas (Estación Laja 1) y modeladas



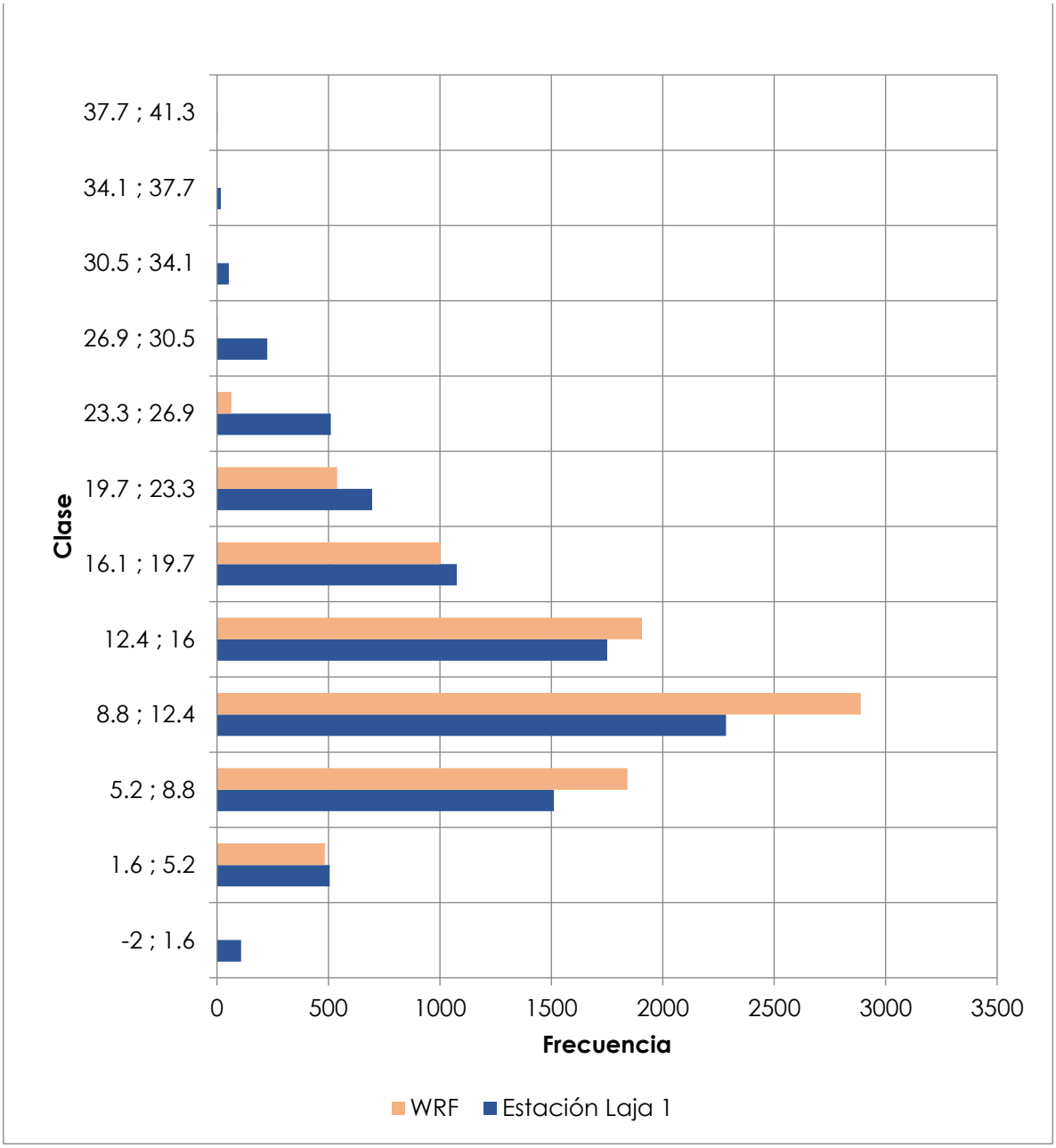
Fuente: Elaboración propia.

Figura 36. Correlación entre temperaturas observadas (Estación Laja 2) y modeladas

De las figuras anteriores se observa una correlación directa y positiva entre las variables observadas y las simuladas, con un coeficiente de determinación correspondiente a 0,3247 para la estación Laja 1 y 0,0876 para la estación Laja 2.

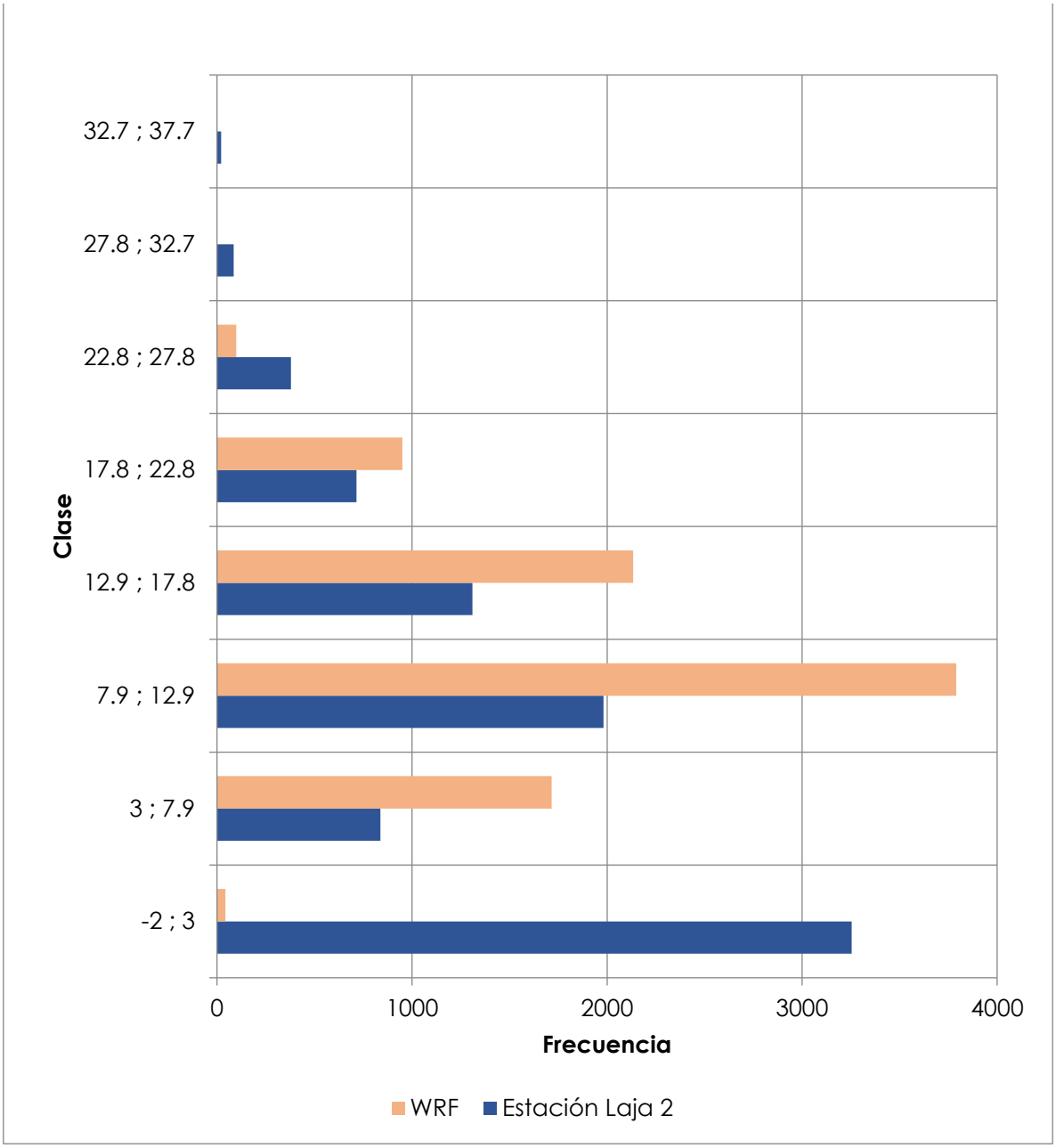
En la **Figura 37**, se observa la frecuencia de las temperaturas en rangos de clases para los datos modelados y los simulados, de donde es visible que el modelo tiene una tendencia similar a la de la estación Laja 1, donde la clase correspondiente a 8,8 – 12,4 es aquella que presenta la mayor frecuencia en ambos escenarios. Con todo esto el valor del percent bias concluye, que en general, los datos modelados se encuentran un 12,04% sub estimados en relación a los observados.

Para la estación Laja 2 y tal como se observa en la **Figura 38,** la frecuencia de las temperaturas en rangos de clases para los datos modelados y los simulados, presenta un valor del percent bias el cual concluye, que en general, los datos modelados se encuentran un 103,13% sobre estimados en relación a los observados



Fuente: Elaboración propia.

Figura 37. Frecuencia de temperaturas observadas (Laja 1) y modeladas

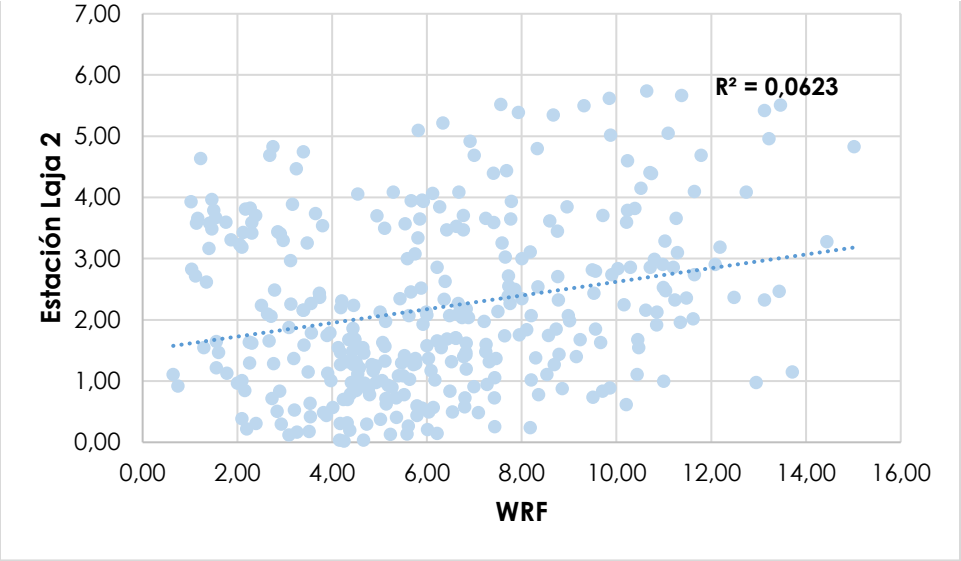


Fuente: Elaboración propia.

Figura 38. Frecuencia de temperaturas observadas (Laja 2) y modeladas

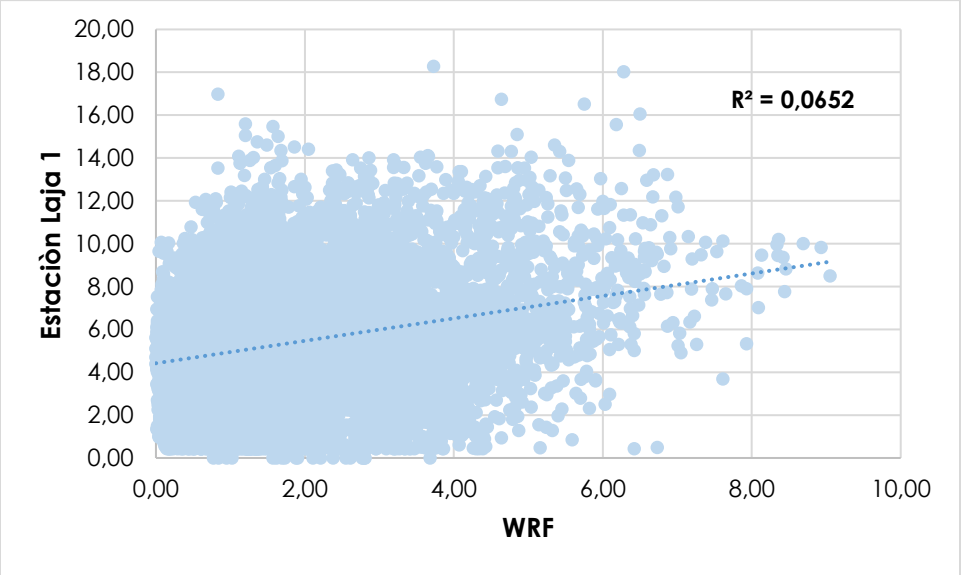
1.1.2 Velocidad del viento

En las siguientes figuras se observa la velocidad del viento horaria observada en estación Laja 1 (ver **Figura 39**) y estación Laja 2 (**Figura 40**) en comparación con las modeladas por el modelo WRF para el año 2019.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 39. Correlación entre velocidad del viento observada (Estación Laja 1) y modeladas.

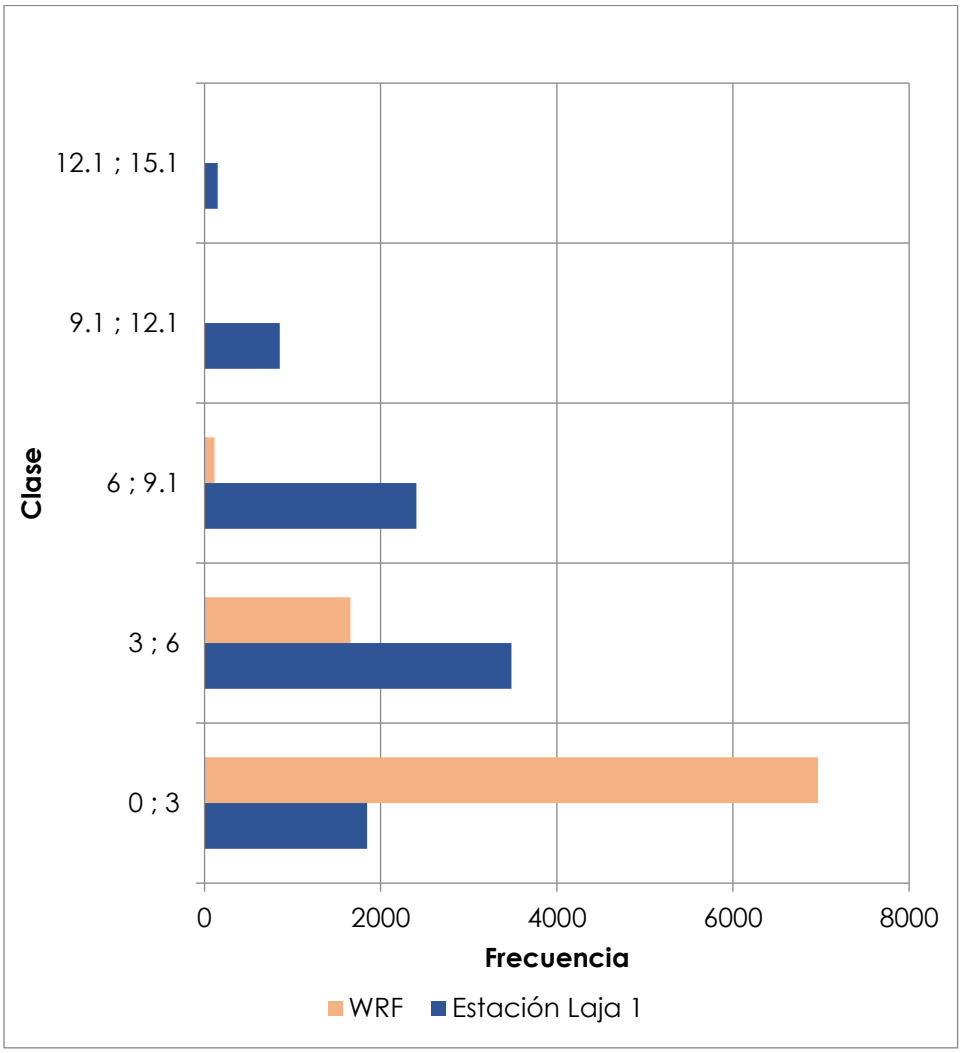


Fuente: Elaboración propia.

Figura 40. Correlación entre velocidad del viento observada (Estación Laja 2) y modeladas.

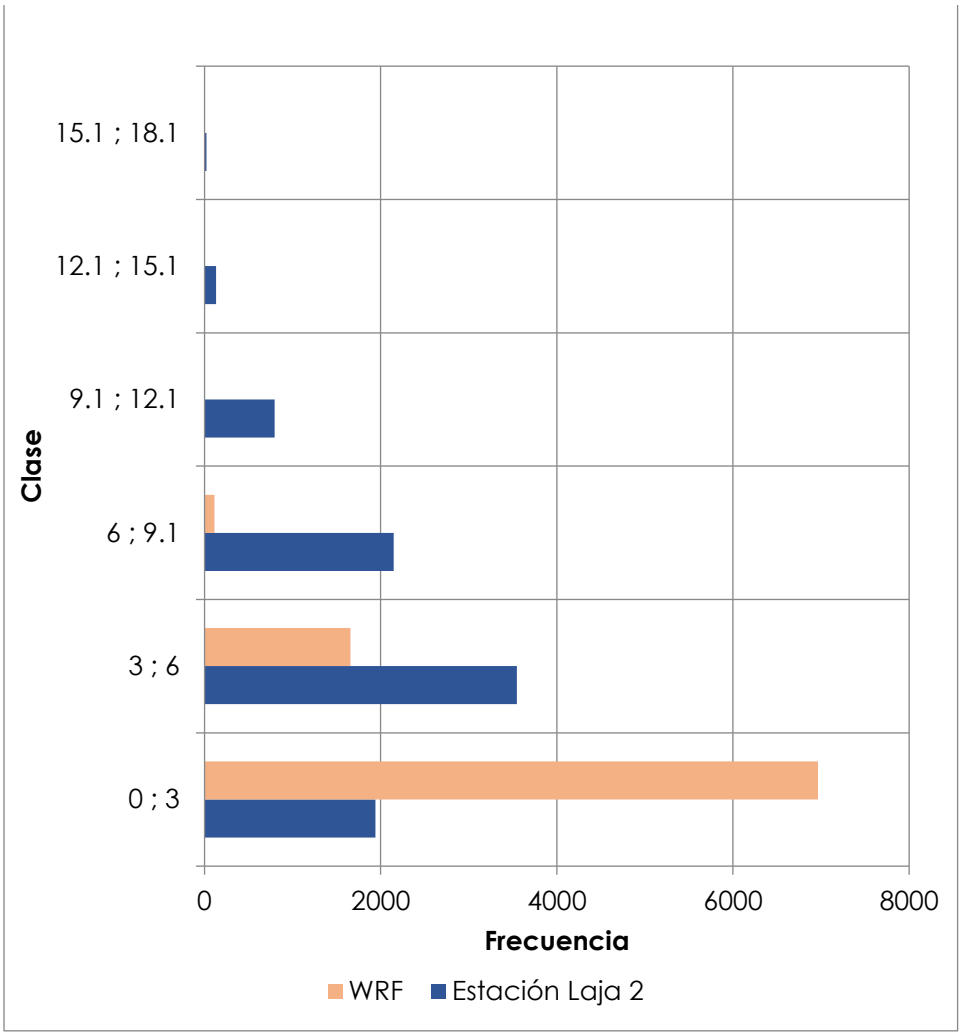
De las figuras anteriores se concluye que existe una correlación positiva baja para ambas estaciones, además se observa que los datos modelados no se ajustan fielmente a los datos observados, de hecho, el coeficiente de determinación es bajo (R^2=0,0623, estación Laja 1; R^2=0,0652, estación Laja 2).

En la **Figura 41 y Figura 42**, se observa la frecuencia de magnitudes de velocidad del viento en distintas categorías, siendo apreciable la subestimación de datos de altas velocidades de viento simuladas por el modelo WRF en ambas estaciones.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 41. Frecuencia de velocidad del viento observada (estación Laja 1) y modelada

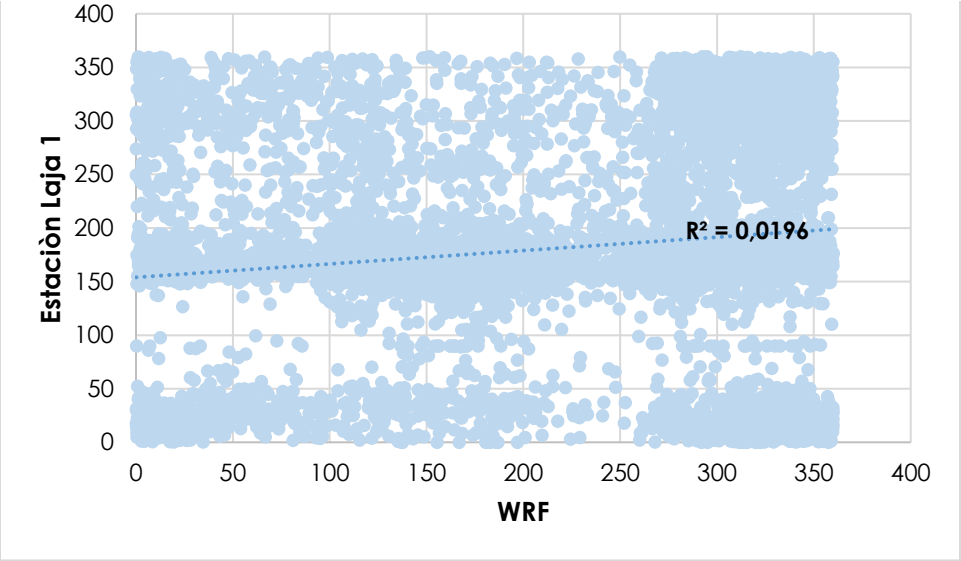


Fuente: Elaboración propia.

Figura 42. Frecuencia de velocidad del viento observada (estación Laja 2) y modelada

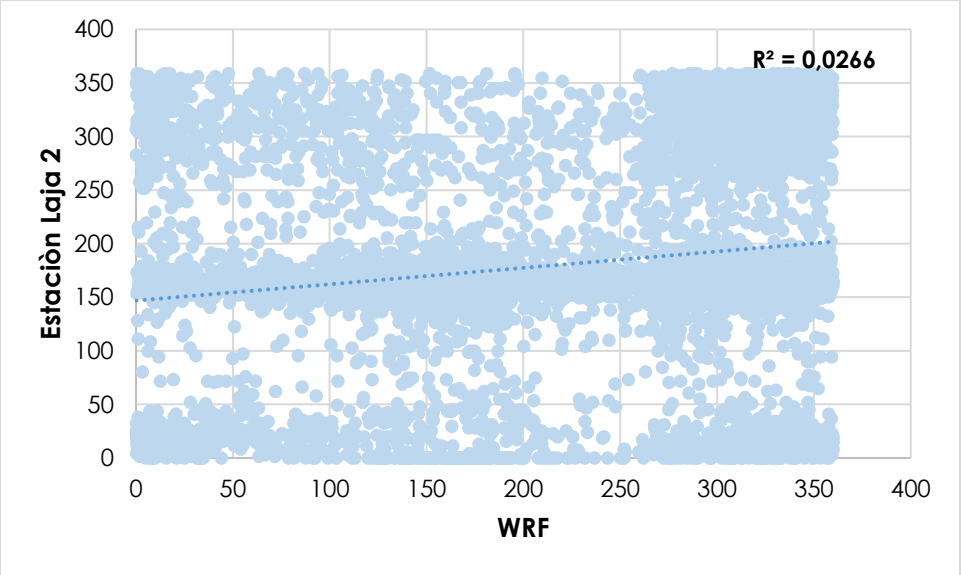
1.1.3. Dirección del viento

En la **Figura 43** y en la **Figura 44** se observa la correlación entre los datos observados en la estación Laja 1 y Laja 2 y los simulados por el WRF para el año 2019.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 43. Correlación entre dirección del viento observada (Estación Laja 1) y modelada

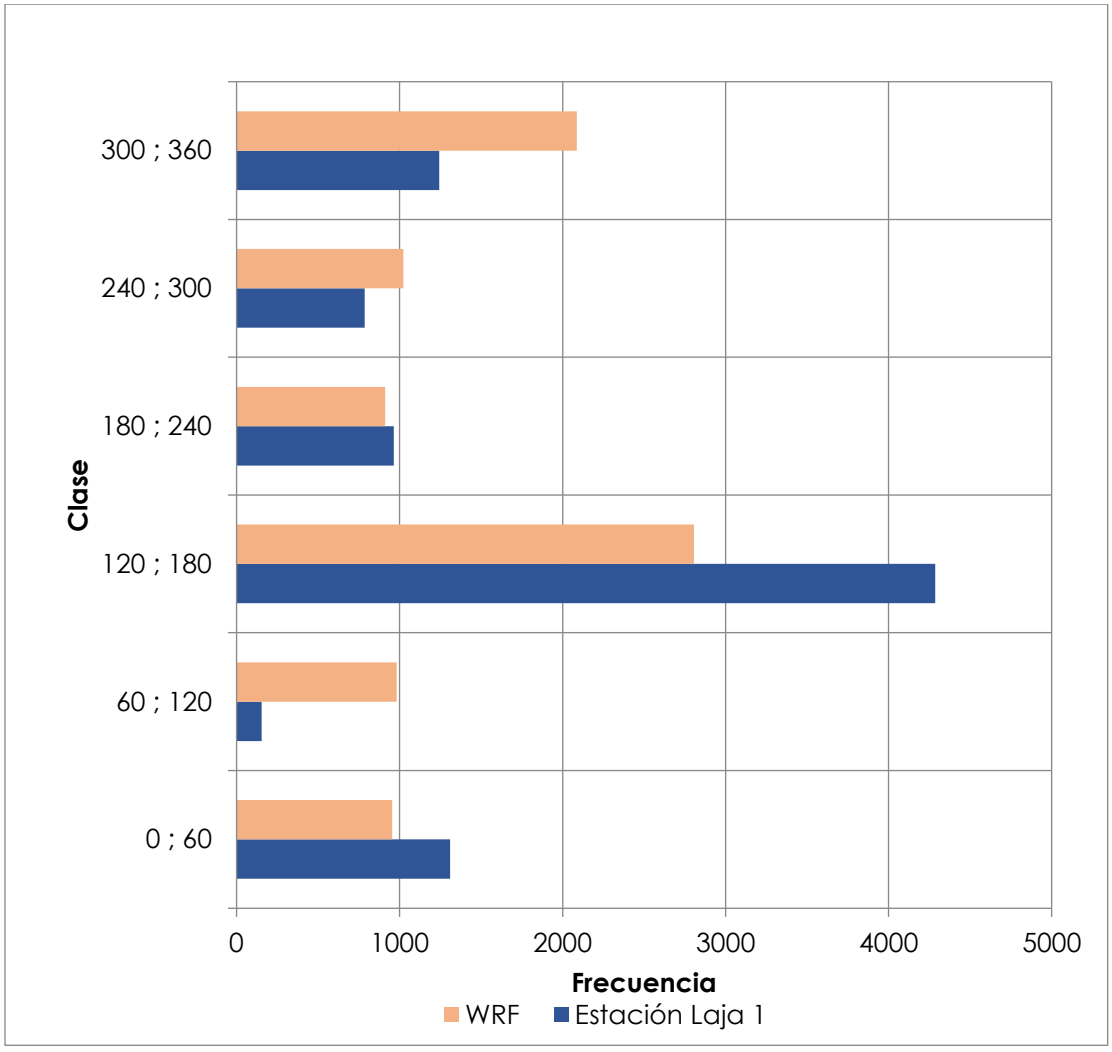


Fuente: Elaboración propia.

Figura 44. Correlación entre dirección del viento observada (Estación Laja 2) y modelada

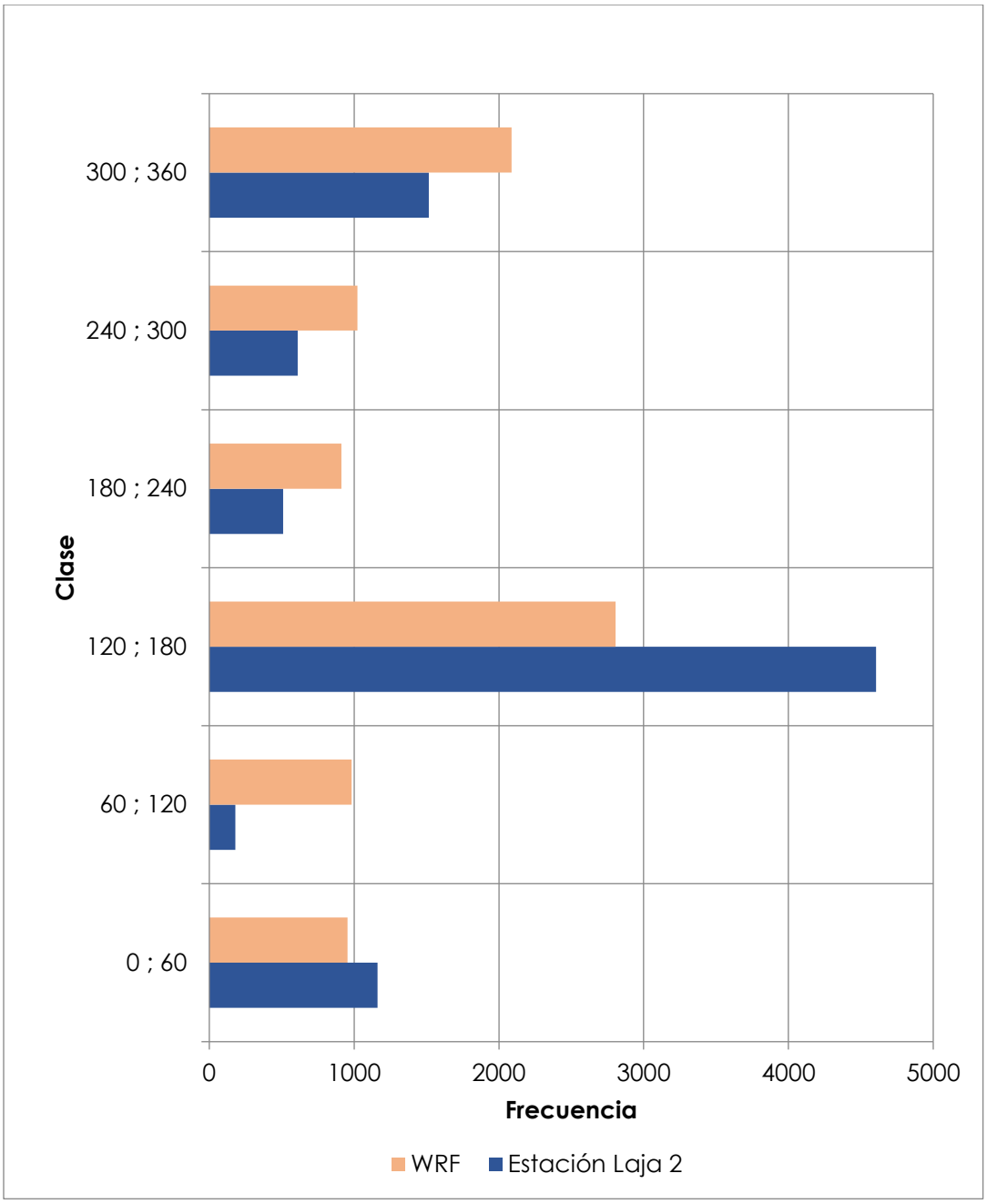
De las figuras se concluye que en ambas estaciones existe una correlación baja y por tanto el ajuste de los datos observados y modelados es de R^2= -0,0196 para la estación Laja 1 y R^2= -0,0266 para la estación Laja 2.

En la **Figura 45** y **Figura 46,** se observa la frecuencia de dirección del viento en distintas categorías, siendo apreciable que los datos modelados se distribuyen de manera similar a los observados en la estación analizada.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 45. Frecuencia de la dirección del viento observada (Estación Laja 1) y modelada



Fuente: Elaboración propia.

Figura 46. Frecuencia de la dirección del viento observada (Estación Laja 2) y modelada

1.1.4 Test de Bondad de Ajuste sobre el Modelo Meteorológico

Se prescindirá de la aplicación de test de bondad de ajuste entre los datos modelados y los observados, debido a que los datos modelados no provienen de una muestra sobre la cual se ha supuesto una distribución de probabilidad específica, como, por ejemplo: log normal, binomial, Bernoulli, etc., sino que son el resultado de la simulación a través de la implementación de un modelo matemático.

Los resultados del análisis de incertidumbre y correlación indican una falta de relación entre los datos, esto es producto de que el área donde se encuentra el proyecto difiere (condiciones topográficas y de vegetación) de las zonas donde se ubican las estaciones meteorológicas, las que tienen un radio de representatividad menor a la distancia a la que se encuentra el proyecto.