



Escuela de
**Ingeniería
Química**

**TRABAJO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL QUÍMICO**

**ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE IMPACTO EN CALIDAD DEL AIRE DE
UNA PLANTA DE CALEFACCIÓN DISTRITAL EN CONCEPCIÓN**

Candidatas:

AYLINE DE LOS ANGELES CHÁVEZ HERRERA

ISIDORA ANDREA TRINCADO HERRERA

Profesor guía: Ernesto Pino

Valparaíso, diciembre 2024

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo, quiero agradecer a Dios por darme una familia increíble. Partiendo por mis padres, que son mi pilar más grande en esta vida, valoro y agradezco infinitamente su compañía, apoyo y amor incondicional, para enfrentar cada etapa de mi vida. Agradezco a mis hermanos Marco y Mauro y sobrino Alonsito, que son una de mis grandes motivaciones gracias al amor tan grande que nos tenemos. Gracias infinitas a mis abuelitos que son como mis padres, por estar presente en cada etapa de mi vida, creyendo en mí y entregándome su amor incondicional. A mi pareja Dante por su paciencia y compañía durante este proceso, que hizo más llevadero cada momento y por su amor tan bonito. Agradecida de mi tía Maggita por siempre alentarme y tenerme en sus constantes oraciones. A cada integrante de mi gran familia, amistades, que de alguna manera estuvieron presente en mi etapa universitaria enviándome las mejores energías. Finalmente, agradecer a mi gran amiga y compañera Isidora, quien desde el día uno confió en mí, apoyándome en cada proceso, dispuesta a enseñarme y con quien espero seguir fortaleciendo esta linda amistad. A cada uno agradecerles de corazón y decirles que los quiero con mi alma.

Ayline Chávez H.

Tras la finalización de este proyecto, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi mamá, Sandra, por ser mi gran fuente de apoyo y aliento y a mi papá, Carlos, por nunca dejar de confiar en mí, les agradezco a ambos por su amor incondicional, que pese a la distancia siempre me han brindado su apoyo y sé que seguirán haciéndolo en los proyectos que quedan. Agradecer a mis hermanos, familia y amigos, que pese a la distancia siempre han sabido brindar una palabra de aliento o sacar una risa cuando es necesario. Quiero agradecer enormemente a mi amiga y compañera de tesis, Ayline, por su paciencia y amistad, con quien desde primer año hemos recorrido este largo camino y me llena de orgullo compartir este logro con ella.

Isidora Trincado H.

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento al profesor Ernesto Pino, por habernos guiado durante todo este proceso y brindarnos su confianza para llevar a cabo este proyecto.

Le agradecemos a ANID Fondecyt Iniciación 2023 Folio 11230189 por haber financiado el desarrollo de esta tesis. Además, esta investigación fue parcialmente apoyada por la infraestructura de supercómputo del NLHPC (ECM-02).

RESUMEN

La calefacción residencial a base de leña en las ciudades del centro-sur de Chile es una fuente significativa de contaminación del aire. Esta práctica contribuye de manera considerable a la emisión de material particulado (MP_{10} y $MP_{2.5}$), junto con otros contaminantes, lo que resulta en una grave contaminación ambiental. Además de afectar la calidad del aire, estas emisiones afectan adversamente a la salud local, especialmente a las personas mayores de 65 años, más vulnerables a los efectos del material particulado. Esta contaminación del aire no solo conlleva riesgos para la salud humana, sino que también tiene consecuencias negativas para el medio ambiente, incluyendo la tala de bosques nativos para abastecer la demanda de leña.

La reducción de la contaminación ambiental provocada por la calefacción a leña es un desafío crucial para mejorar la calidad de vida en estas comunidades y proteger el entorno natural de la región.

Mediante el uso de varios modelos, como WRF-SMOKE-CMAQ, se busca simular un escenario que considere la implementación de una planta de calefacción distrital. Este enfoque tiene como objetivo evaluar el impacto resultante en la calidad del aire en la ciudad de Concepción.

Se prevé que este estudio disminuya las concentraciones de material particulado, lo que generaría un efecto positivo en el medio ambiente y en la salud de la población residente en la ciudad.

Palabras clave: Calefacción Distrital, Simulación de la Calidad del Aire, Material Particulado, Calidad del Aire, Evaluación Ambiental.

ABSTRACT

Wood-fired residential heating in the cities of central-southern Chile is a significant source of air pollution. This practice contributes considerably to the emission of particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}), along with other pollutants, resulting in serious environmental pollution. In addition to affecting air quality, these emissions adversely affect local health, especially people over 65 years of age, who are more vulnerable to the effects of particulate matter. This air pollution not only carries risks for human health, but also has negative consequences for the environment, including the cutting down of native forests to supply the demand for wood.

Reducing environmental pollution caused by wood heating is a crucial challenge to improve the quality of life in those communities and protect the region's natural surroundings.

By using several models, such as WRF-SMOKE-CMAQ, the goal is to simulate a scenario that considers the implementation of a district heating plant. This approach aims to evaluate the resulting impact on air quality in the city of Concepción.

It is expected that this study will reduce the concentrations of particulate matter, which would generate a positive effect on the environment and the health of the population residing in the city.

Keywords: District Heating, Air Quality simulation, Particulate Matter, Air Quality, Environmental Evaluation.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	I
RESUMEN	II
ABSTRACT	III
TABLA DE CONTENIDO	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	IX
NOMENCLATURAS	X
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.....	1
1.2. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA	1
1.3. HIPÓTESIS	3
1.4. OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.4.1. <i>Objetivo general:</i>	3
1.4.2. <i>Objetivos específicos:</i>	3
2. MARCO REFERENCIAL	4
3. METODOLOGÍA.....	9
3.1. EXTRACCIÓN DE DATOS	9
3.2. SIMULACIÓN PREVIA	13
3.2.1. <i>Dominio de simulación</i>	14
3.2.2. <i>Simulación WRF</i>	16
3.2.3. <i>Simulación Inventario de Emisiones (SMOKE)</i>	18
3.3. ANÁLISIS DE DATOS SIMULADOS FRENTE A DATOS OBSERVADOS.....	22
3.3.1. <i>Velocidad del Viento</i>	22
3.3.2. <i>Temperatura</i>	24
3.3.3. <i>Humedad Relativa</i>	25
3.3.4. <i>Validación de datos</i>	26
3.3.5. <i>Dirección del Viento</i>	27
3.3.6. <i>Material Particulado</i>	28
3.3.7. <i>Temporalidad de Emisiones</i>	29
3.4. EMISIONES DE LA PLANTA	32
3.5. UBICACIÓN DE LA PLANTA	34

3.5.1.	<i>Reducción Material Particulado con Planta de Calefacción</i>	39
4.	RESULTADOS	41
4.1.	SIMULACIÓN ESCENARIO BASE	41
4.1.1.	<i>Humedad Relativa</i>	41
4.1.2.	<i>Temperatura</i>	42
4.1.3.	<i>Velocidad del Viento</i>	42
4.1.4.	<i>Dirección del Viento</i>	43
4.1.5.	<i>Material Particulado</i>	46
4.1.6.	<i>Temporalidad de emisiones</i>	48
4.2.	EMISIONES DE LA PLANTA	49
4.3.	UBICACIÓN PLANTA.....	51
4.3.1.	<i>Planta Sur</i>	51
4.3.2.	<i>Planta Norte</i>	53
4.3.3.	<i>Planta Este</i>	55
4.3.4.	<i>Planta Oeste</i>	57
4.3.5.	<i>Reducción Material Particulado</i>	59
5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	61
5.1.	SIMULACIÓN ESCENARIO BASE	61
5.2.	EMISIONES DE LA PLANTA.....	62
5.3.	UBICACIÓN DE LA PLANTA Y SU EFECTO EN CALIDAD DEL AIRE	63
6.	CONCLUSIONES	65
7.	RECOMENDACIONES O SUGERENCIAS	66
8.	BIBLIOGRAFÍA	67

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. MAPA CIUDAD DE CONCEPCIÓN. (GOOGLE, 2024).....	2
FIGURA 2: MAPA ÁREA METROPOLITANA DEL GRAN CONCEPCIÓN. (MINISTERIO DEL INTERIOR Y SEGURIDAD PÚBLICA, 2023)....	9
FIGURA 3. ESTACIONES DE MONITOREO – SINCA. (MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE, 2024)	11
FIGURA 4. INFORMACIÓN ESTACIONES DE MONITOREO.	12
FIGURA 5. FUENTES DE ÁREA – HUALQUI	13
FIGURA 6. MAPA DE INTERSECCIÓN CENSO-POLÍGONO	14
FIGURA 7. SCRIPT FACTOR DE ÁREA	15
FIGURA 8: SCRIPT SURROGADOS	16
FIGURA 9. SCRIPT “NAMELIST.WPS”	17
FIGURA 10. PARAMETRIZACIONES FÍSICAS DE DGAC.....	18
FIGURA 11. "ASSIGNS"	19
FIGURA 12. SCRIPT “ARINV.AREA”	20
FIGURA 13. EXTRACTO SCRIPT DE MÓDULOS DE SMOKE.....	21
FIGURA 14. SCRIPT PARA MODIFICAR ARCHIVO SURROGADOS.....	21
FIGURA 15. SCRIPT "EXTRACTION_VELOCIDAD_ESTACIONES_SINCA"	22
FIGURA 16. FORMATO DATOS.....	24
FIGURA 17. SCRIPT PARA VELOCIDAD DEL VIENTO.	24
FIGURA 18. SCRIPT DE TEMPERATURA.....	25
FIGURA 19. DIRECCIÓN DEL VIENTO OBSERVADA	27
FIGURA 20. DIRECCIÓN DEL VIENTO SIMULADA	27
FIGURA 21. SCRIPT "EJECUTA.CMAQ_PM25"	28
FIGURA 22. EXTRACTO SCRIPT "AMPTREF"	31
FIGURA 23. EDICIÓN SCRIPT ASSIGNS	32
FIGURA 24. PUNTOS ESTRATÉGICOS PARA LA UBICACIÓN DE LA PLANTA. (GOOGLE, 2024)	35
FIGURA 25. PUNTOS EN EL MAPA	36
FIGURA 26. SCRIPT FUENTE DE EMISIONES.	37
FIGURA 27. LÍNEAS SCRIPT PLANTA SUR.	37
FIGURA 28. EXTRACTO SCRIPT "EXTRACTIONPM.NCL" PARA PUNTOS.....	39
FIGURA 29. HUMEDAD RELATIVA KINGSTON COLLEGE.	41
FIGURA 30. TEMPERATURA KINGSTON COLLEGE.	42
FIGURA 31. VELOCIDAD DEL VIENTO KINGSTON COLLEGE.....	42
FIGURA 32. MP2.5 - ESTACIÓN KINGSTON COLLEGE.	46
FIGURA 33. MP10 - ESTACIÓN KINGSTON COLLEGE.	47
FIGURA 34. TEMPORALIDAD DE EMISIONES - SEMANA 1	48

FIGURA 35. TEMPORALIDAD DE EMISIONES - SEMANA 2	48
FIGURA 36. TEMPORALIDAD DE EMISIONES - SEMANA 3	48
FIGURA 37. TEMPORALIDAD DE EMISIONES SEMANA 4	48
FIGURA 38. TEMPORALIDAD DE EMISIONES SEMANA 4	48
FIGURA 39. GRÁFICAS PM2.5 PLANTA SUR.	51
FIGURA 40. ESTADÍSTICAS MP10 PLANTA SUR.	52
FIGURA 41. ESTADÍSTICAS MP2.5 PLANTA NORTE.	53
FIGURA 42. ESTADÍSTICAS MP10 PLANTA NORTE.	54
FIGURA 43. ESTADÍSTICAS MP2.5 PLANTA ESTE.	55
FIGURA 44. ESTADÍSTICAS MP10 PLANTA ESTE.	56
FIGURA 45. ESTADÍSTICAS MP2.5 PLANTA OESTE.	57
FIGURA 46. ESTADÍSTICAS MP10 PLANTA OESTE.	58

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. DISTRIBUCIÓN DEL MP10 - SEMANA 1	30
TABLA 2. DISTRIBUCIÓN HORARIA MP _{2.5} - SEMANA 1.	31
TABLA 3. CARACTERÍSTICAS SECCIÓN DE LA VIVIENDA. (SIGRIST, Y OTROS, 2012).	33
TABLA 4. FACTOR DE EMISIVIDAD DE CONTAMINANTES. (KACZMARCZYK & SOWIZDZAŁ, 2024)	34
TABLA 5. COORDENADAS POSIBLE UBICACIÓN DE LA PLANTA.	34
TABLA 6. COORDENADAS DE LOS PUNTOS A ESTUDIAR.	36
TABLA 7. PROMEDIO DE CONCENTRACIONES DE MP _{2.5}	40
TABLA 8. PROMEDIO DE CONCENTRACIONES DE MP ₁₀	40
TABLA 9. ANÁLISIS ESTADÍSTICO HUMEDAD RELATIVA	41
TABLA 10. ANÁLISIS ESTADÍSTICO TEMPERATURA.....	42
TABLA 11. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE VELOCIDAD DEL VIENTO.	43
TABLA 12. ROSA DE LOS VIENTOS OBSERVADA VS SIMULADA	45
TABLA 13. ANÁLISIS ESTADÍSTICO MP2.5.....	46
TABLA 14. ANÁLISIS ESTADÍSTICO MP10.....	47
TABLA 15. CALOR REQUERIDO POR CADA SECCIÓN DE LA VIVIENDA.	49
TABLA 16. CALOR TOTAL REQUERIDO POR CANTIDAD DE VIVIENDAS.	49
TABLA 17. COMBUSTIBLE NECESARIO PARA SATISFACER LA DEMANDA.....	49
TABLA 18. EMISIONES DE CONTAMINANTES.	50
TABLA 19. ESTADÍSTICAS MP2.5 PLANTA SUR.	51
TABLA 20. ESTADÍSTICAS MP10 PLANTA SUR.	52
TABLA 21. ESTADÍSTICAS MP2.5 PLANTA NORTE.	53
TABLA 22. ESTADÍSTICAS MP10 PLANTA NORTE.	54
TABLA 23. ESTADÍSTICAS MP2.5 PLANTA ESTE.	55
TABLA 24. ESTADÍSTICAS MP10 PLANTA ESTE.	56
TABLA 25. ESTADÍSTICAS MP2.5 PLANTA OESTE.	57
TABLA 26. ESTADÍSTICAS MP10 PLANTA OESTE.	58
TABLA 27. REDUCCIÓN PORCENTUAL DE MP _{2.5}	59
TABLA 28. REDUCCIÓN PORCENTUAL DE MP ₁₀	59
TABLA 29. ANÁLISIS ESTADÍSTICO PM2.5 ESTACIÓN KINGSTON COLLEGE.	59
TABLA 30. ANÁLISIS ESTADÍSTICO PM10 ESTACIÓN KINGSTON COLLEGE.	60

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos castellanos:

A:	Área [m ²]
A _t :	Área de transferencia de calor [m ²]
B:	Cantidad de combustible [Mg]
C:	Concentración [μg/m ³]
d:	Distancia [m] o [km]
D:	Demanda energética [kW/m]
E	Emisión de contaminante [g/MJ]
P:	Potencia térmica [kW/h]
Q:	Cantidad de energía requerida [W]
t	Tiempo [s] o [hr]
T:	Temperatura [°C]
ΔT:	Diferencia de temperatura [°C]
U:	Coeficiente global de transferencia de calor [W/m ² K]
W	Factor de emisión [Mg]
W _o :	Poder calorífico del combustible [MJ/Mg]
η:	Eficiencia de la caldera [-]

Subíndices y Superíndice:

°:	Grado
----	-------

NOMENCLATURAS

Abreviatura	Significado	Traducción
AMGS	Área Metropolitana del Gran Concepción	-
CMAQ	The Community Multiscale Air Quality	Modelo Comunitario de Calidad del Aire Multiescala
CO	Monóxido de Carbono	-
CO ₂	Dióxido de Carbono	-
COV	Compuestos Orgánicos Volátiles	-
GEC	Gestión de Episodios Críticos	-
IOA	Índice de Ajuste	Fit Index
MB	Sesgo Medio	Mean Bias
MGE	Error Relativo Normalizado	Normalized relative error
MP _{2.5}	Material particulado fino	-
MP ₁₀	Material particulado respirable	-
NH ₃	Amoníaco	-
NLHPC	Simulador Laboratorio Nacional de Computación de Alto Rendimiento	-

NO _x	Óxido de Nitrógeno	-
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico	-
OMS	Organización Mundial de la Salud	-
PPDA	Plan de Prevención y Descontaminación Ambiental	-
QGIS	Quantum GIS	-
RETC	Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes	-
RMSE	Error Cuadrático Medio	Root Mean Square Error
SEREMI	Secretaria Regional Ministerial	-
SINCA	El Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire	-
SMOKE	Sparse Matrix Operator Kernel Emissions	Emisiones dispersas de la matriz del operador de Kernel
SO ₂	Dióxido de Azufre	-
UTM	Universal Transversal de Mercator	-
WRF	Weather Research and Forecasting	Investigación y Pronóstico del Tiempo

1. INTRODUCCIÓN.

1.1. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.

En el marco de este proyecto, se identifica como problemática central la preocupante calidad del aire y la consiguiente contaminación ambiental generada en la ciudad de Concepción, una de las ciudades más pobladas de Chile. El enfoque principal para abordar este desafío es analizar el impacto de la planta de calefacción distrital en la calidad del aire local mediante simulaciones.

La ciudad de Concepción se enfrenta a altas concentraciones de material particulado y otros contaminantes, lo cual genera una contaminación ambiental significativa, afectando directamente la salud de la población local. Esta problemática se agrava por las emisiones provenientes tanto de la calefacción a leña en las residencias, como de las industrias presentes en la ciudad.

Considerando la alta densidad poblacional de Concepción, es esencial abordar las medidas adoptadas en el marco del plan de descontaminación presente desde 2018 en la ciudad, junto con la necesidad de comprender a fondo el papel de la planta de calefacción distrital que, reemplaza el uso de leña por una red centralizada de distribución de energía térmica, la cual ayudaría a mejorar este complejo escenario ambiental.

1.2. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

Concepción, es una ciudad de la región del Biobío la cual cuenta con más de 200.000 habitantes. Esta ciudad enfrenta serios problemas de contaminación del aire debido al uso desmedido de calefacción a leña durante el invierno, lo cual contribuye a altos niveles de contaminación, superando las normas establecidas. A pesar de que la ciudad implementó un plan de prevención en 2018, los problemas de contaminación persisten, sin mostrar una mejora significativa.

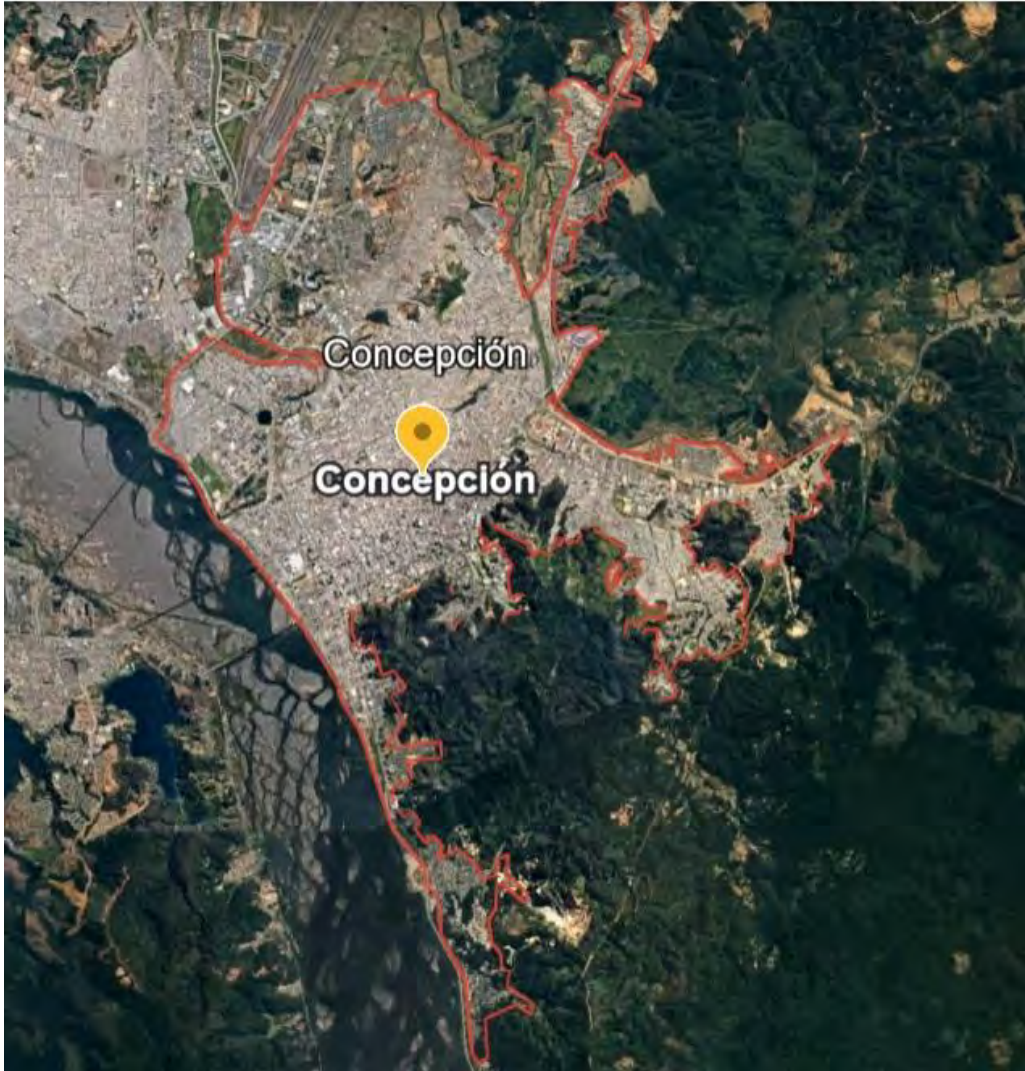


Figura 1. Mapa ciudad de Concepción. (Google, 2024).

Por lo que evaluar el impacto en la calidad del aire que genera una planta de calefacción distrital es esencial ya que, al reducir la contaminación del aire, es posible cumplir con la normativa de calidad ambiental vigente, reducir la contaminación, maximizar la eficiencia energética y mejorar la salud de la población. Esto permite llevar a cabo un proyecto sostenible a largo plazo.

1.3. HIPÓTESIS

Tras simular un escenario que contempla la implementación de una planta de calefacción distrital, se espera una reducción de al menos un 55% en las concentraciones de material particulado MP₁₀ y MP_{2.5} originadas por los sistemas de calefacción e industrias presentes en la ciudad de Concepción.

1.4. OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1.4.1. Objetivo general:

- Evaluar el impacto en la calidad del aire con la implementación de una planta de calefacción distrital en la ciudad de Concepción.

1.4.2. Objetivos específicos:

- Simular la calidad del aire actual en Concepción mediante modelos de calidad del aire, para corroborar que son viables.
- Estimar las emisiones de la planta mediante la herramienta de Microsoft Excel, para determinar la cantidad de sus contaminantes.
- Estimar el efecto en la calidad del aire tras la instalación de la planta de calefacción mediante simulación, para comprobar la disminución de material particulado.
- Estimar la ubicación de la planta mediante los resultados de la simulación, para comprobar dónde se genera menor contaminación.

2. MARCO REFERENCIAL

En Chile, se ha estudiado que las ciudades con los niveles más elevados de contaminación atmosférica por emisión de material particulado se concentran en la zona centro y sur del país. Se observa un aumento considerable de esta contaminación, especialmente durante el invierno en la zona sur, debido al uso desmedido de leña como fuente de calefacción principal en los hogares. En el último periodo los niveles de contaminación han sobrepasado los estándares nacionales e internacionales que, han llevado a declarar gran parte de las ciudades como saturadas (Ahumada R, 2020). Es importante recalcar que, tras un estudio realizado en 2018 sobre el consumo energético residencial en Chile, el cual se distribuyó de manera porcentual, declara que el 53% de la energía es destinada a calefacción y climatización y alrededor de un 20% se destina en agua caliente sanitaria, siendo estos puntos los más importantes para el análisis (Yañez O, Fissore, & Leiva, 2019).

La normativa primaria de calidad ambiental establece límites de concentración para el material particulado respirable en dos categorías: $MP_{2.5}$ y MP_{10} . Para el material particulado fino ($MP_{2.5}$) los límites son de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para concentraciones anuales y $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para concentraciones de 24 horas. Esta norma se considera sobrepasada si el percentil 98 de los promedios diarios en un año supera los $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en cualquier estación de monitoreo calificada, o si el promedio trianual de las concentraciones anuales supera los $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Si el período de medición no comienza el 1 de enero, se toman los tres primeros periodos de 12 meses a partir del mes de inicio (Ministerio del Medio Ambiente, 2011).

En el caso del material particulado respirable MP_{10} , los límites son de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ normal para concentraciones anuales y $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$ normal para concentraciones de 24 horas. La norma se sobrepasa en concentraciones anuales si el promedio de tres años consecutivos supera los $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ normal en cualquier estación de monitoreo calificada. Para concentraciones de 24 horas, la norma se sobrepasa si el percentil 98 supera los $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$ normal en un año calendario o si se registran más de siete días con mediciones por encima de este valor antes de que termine el año calendario (Ministerio del Medio Ambiente, 2022).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) fundamenta sus valores de referencia para las concentraciones de partículas finas en el aire ($MP_{2.5}$) en investigaciones epidemiológicas llevadas a cabo en los Estados Unidos. Estos estudios han revelado que, en el caso de concentraciones anuales,

cada incremento de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{MP}_{2.5}$ se traduce en un incremento del riesgo de mortalidad del 6%. En cuanto a las concentraciones diarias, un aumento de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ se asocia con un aumento del riesgo de fallecimiento del 1% (Ministerio del Medio Ambiente, 2011).

La ciudad de Concepción se ubica en la Provincia de Concepción en la Región del Biobío, según el censo de 2017, tiene una población de 223.574 habitantes. Este censo también reveló que el 97,97% de la población se concentra en la zona urbana, mientras que un 2,02% reside en la zona rural (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2020).

Según lo indicado por la empresa de tecnología suiza IQAIR la concentración de $\text{MP}_{2.5}$ en Concepción es actualmente 3,4 veces superior al valor guía anual de calidad del aire de la OMS (IQAir, 2022).

En el contexto del Plan de Prevención y Descontaminación para 10 comunas del Gran Concepción, que se ejecutó desde el 1 de abril hasta el 30 de septiembre, durante el período de pandemia del 2020, se implementó la entrega diaria de pronósticos de calidad del aire. A diferencia de la Región Metropolitana, donde el parque vehicular es la principal fuente de contaminación, el Gran Concepción enfrenta una distribución diversa de fuentes contaminantes: 34% industrial, 59% residencial y 5% vehicular. A pesar de ser el segundo plan de descontaminación más grande de Chile, arrojó resultados positivos. Los episodios críticos se presentaron principalmente en mayo, junio y julio, relacionados con la disminución de la temperatura, además de considerar el confinamiento en las residencias, durante ese período. Durante el período de gestión de episodios críticos (GEC) 2020 hasta el 30 de septiembre (182 días), se registraron episodios críticos en 26 días, lo que corresponde al 14% del tiempo (Municipalidad de Hualpen, 2023).

En relación con las 138 medidas establecidas en el Plan, se destaca que, hasta el año 2021, un total de 99 medidas han cumplido con los supuestos de implementación, y de estas, 74 medidas han registrado reportes de progreso. Esto indica que el grado de avance del Plan de Prevención y Descontaminación para Concepción (PPDA) hasta 2021 alcanza el 75%. Además, durante el mismo año, se observó un aumento notable en los valores promedio diarios de MP_{10} y $\text{MP}_{2.5}$ entre los meses de abril y septiembre, lo que caracteriza el "*periodo GEC*", en el que se superaron los límites diarios establecidos. En este lapso, se documentaron 21 episodios críticos relacionados con $\text{MP}_{2.5}$, de los cuales 17 fueron clasificados como Alerta y 4 como Preemergencia. Asimismo, se registraron 59 días en los que se superaron los estándares fijados. Estos datos, obtenidos del Ministerio del Medio

Ambiente, son fundamentales para evaluar la calidad del aire en la región (División de Fiscalización, 2023).

En un estudio realizado en Chile para el período 2015-2017, se estimaron las emisiones de diferentes contaminantes, incluyendo dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NOx), dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles (COV), amoníaco (NH₃) y material particulado (MP_{2.5} y MP₁₀), en sectores como el vehicular, industrial, energético, minero y residencial. Se encontró que las emisiones anuales promedio de MP_{2.5} y MP₁₀ ascendieron a 191 y 173 kilotoneladas, respectivamente, siendo el sector residencial el mayor contribuyente con más del 90% de estas emisiones, especialmente en CO y COV. Los sectores energético e industrial influyeron en NH₃, SO₂ y CO₂, mientras que el transporte fue responsable de NOx y CO₂, y el sector minero lideró en las emisiones de SO₂, especialmente en la zona sur del país (Osses, y otros, 2022).

Tras un estudio realizado en el año 2015 donde se plantea la opción de implementar un sistema de calefacción distrital en la ciudad de Rancagua para una cantidad 1.826 viviendas tuvo un impacto potencial de reducir 5.5 µg/m³ de MP_{2.5} en un área de población de 316.51 personas. Además, tras el análisis costo-efectividad se obtuvo que este tipo de calefacción presenta altos costos frente a alternativas como la fiscalización, regulación y subsidio de leña seca. Sin embargo, el impacto que genera en las concentraciones es significativo dado que tiene un potencial para reducir el 99,9 % de las emisiones y concentraciones ambientales de MP_{2.5} (Carrasco Vidal, Jiménez del Río, & Mardones Poblete, 2016).

En Chile se ha implementado el sistema de calefacción con geotermia como, por ejemplo, en el año 2009 se construyó el proyecto inmobiliario condominio Frankfurt calefaccionado mediante un sistema geotérmico distrital, que tras su proceso mantiene la calefacción de las viviendas a 20°C. Este proyecto cuenta con una potencia térmica instalada de 140 kW/h y una demanda energética de 27 kW/m por vivienda, lo cual equivale a un consumo 12 veces menor respecto a las viviendas promedio existentes en la ciudad de Temuco. Además, en la ciudad de Coyhaique existe un proyecto para el liceo Altos de Mackay donde calefaccionan 11 salas, traduciéndose a aproximadamente 600 m² (Vicencio Sura, 2021).

El sistema de calefacción distrital ya está en uso en países nórdicos como Dinamarca e Islandia, así como en naciones europeas como, Alemania y Austria. Por ejemplo, en la ciudad de Vantaa, Finlandia, se puso en marcha una planta de cogeneración en septiembre de 2014 que utiliza residuos

como fuente de energía. Esta instalación no solo contribuye a la reducción del consumo de combustibles fósiles, sino que también aprovecha anualmente 320.000 toneladas de residuos para satisfacer el 30% y el 50% de las necesidades anuales de electricidad y calefacción de la ciudad, respectivamente (Libertad y Desarrollo, 2017).

En términos de beneficios medioambientales, las estimaciones de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), indican que las instalaciones de calefacción distrital existentes reducen las emisiones de dióxido de carbono en un rango de 3% a 4% al año en comparación con un escenario sin estas instalaciones. Este impacto es significativo, y vale la pena destacar que esta tecnología tiene un gran potencial de expansión en todo el mundo, lo que implica que sus contribuciones positivas al medio ambiente seguirán creciendo (Libertad y Desarrollo, 2017).

Dada la necesidad imperante por modificar estos niveles de contaminación es que se han desarrollado proyectos de calefacción distrital en diversas ciudades de Chile, como también en otros países persiguiendo el mismo objetivo. A continuación, se presentan algunos de estos proyectos:

En 1969 se construyó el primer proyecto de calefacción distrital conocido como Torres de San Borja ubicado en Santiago de Chile, el cual fue remodelado en 2012 reemplazando una caldera por una caldera a biomasa, abasteciendo a 18 edificios con calefacción y agua caliente sanitaria. En 1970 se construyó otra planta de calefacción en el campus de la Universidad de Concepción, remodelada en 2007, cambiando su combustible a gas para disminuir la contaminación. Esta consta de 3 calderas que abastecen a 23 edificios del campus. En 2020 en el Condominio Jardines de Luxemburgo, perteneciente a la ciudad de Temuco, se edificaron 3 edificios junto a una central distrital aerotérmica que otorga un sistema de calefacción y agua caliente de manera eficiente a cada departamento. Más recientemente, en 2021 en el proyecto Sendero Bayo, perteneciente a la ciudad de Valdivia se edificaron 8 edificios, que cuentan con una central distrital aerotérmica que los provee de calefacción y agua caliente sanitaria (Villalobos, Weidlich, Wolf, & Fumeron, 2023).

El modelo de calidad de aire regional (CMAQ) es ampliamente utilizado en Chile y el mundo para evaluar y gestionar diversos casos de contaminación en el aire generados por las industrias, transporte, calefacción a leña, entre otros (Maia, Baptista, & Monteiro, 2020).

El simulador CMAQ fue utilizado en un estudio en la ciudad de Nueva York (EE. UU.), para predecir las concentraciones diarias promedio de material particulado fino ($MP_{2.5}$). Se examinó la sensibilidad

del modelo a 4 km y 12 km de las estaciones de monitoreo, donde se determinó que se obtuvo un mejor rendimiento en la calidad del aire a 12 km. Las estimaciones de impacto en la salud fueron compatibles, especialmente en áreas rurales. Concluyendo que, CMAQ a 12 km, con calibración adicional o reducción de escala, es una opción viable para estimar variaciones a pequeña escala en las concentraciones de contaminantes del aire (Jiang & Yoo, 2018).

Desde la primavera de 2019 hasta el verano de 2020 se realizó otro estudio que utiliza el simulador CMAQ para cuantificar la contribución de diez sectores sobre la emisión de material particulado fino ($MP_{2.5}$) en el sureste de Brasil de la Región Metropolitana de Vitória, esta zona está altamente influenciada por emisiones industriales y urbanas. Estos estudios demostraron que los principales responsables de la generación de $MP_{2.5}$ fue el polvo de las carreteras y fuentes puntuales, tales como, transporte marítimo (Lago Kitagawa, y otros, 2021).

Otro estudio realizado con el simulador WRF-CMAQ y el filtro KZ fue llevado a cabo en Changchun, China que, a diferencia del CMAQ, combina la predicción meteorológica con la simulación de la calidad del aire (EPA, 2023). Los resultados de este estudio indicaron que las fluctuaciones a corto plazo y estacionales, junto con el ajuste meteorológico influyeron en la concentración de material particulado fino ($MP_{2.5}$) (Chunsheng, de Jiaxin, Li, & Wang, 2022).

En la ciudad de Coyhaique se han llevado a cabo estudios para estimar las pérdidas de calor en las viviendas. En estos se determinó que las pérdidas térmicas dependen de varios factores, entre estos se encuentran las características de las casas, desde su diseño y materiales utilizados para su construcción, que influyen en su capacidad de aislamiento, como también de factores climáticos locales que juegan un papel crucial. Cabe destacar que no existe información exacta sobre las características de viviendas, por lo que utilizaron información proporcionada por el Ministerio de Energía y el Ministerio del Medio Ambiente que, en conversaciones con la Cámara Chilena de la Construcción, establecieron una casa modelo para realizar los estudios posteriores (Sigrist, y otros, 2012).

Actualmente, la disponibilidad de estudios que evalúen la calidad del aire en Chile, específicamente en lo relativo a los niveles de material particulado $MP_{2.5}$ y MP_{10} , mediante el simulador CMAQ, es limitada. Esta carencia de investigaciones resalta la importancia de nuestro actual estudio, que se concentra en la región de Concepción. La investigación contribuirá significativamente a llenar este

vacío de conocimiento y proporcionará información esencial sobre la calidad del aire en esta área geográfica específica.

3. Metodología

En este apartado se describe todo el desarrollo realizado para llevar a cabo este proyecto, incluyendo detalladamente aspectos técnicos, meteorológicos, estadísticos, entre otros.

3.1. Extracción de datos

Se define como zona de estudio el Área Metropolitana del Gran Concepción (AMGC) la cual se localiza en la provincia de Concepción, región del Biobío, que incluye 11 de las 12 comunas que la componen, siendo estas: Chiguayante, Concepción, Coronel, Hualpén, Hualqui, Lota, Penco, San Pedro de la Paz, Santa Juana, Talcahuano, Tomé. Se seleccionó la ciudad de Concepción debido a su alta densidad poblacional en comparación con el resto del país y el preocupante nivel de contaminación ambiental, que incluso llevó a la implementación de un plan de prevención y descontaminación a partir de 2018.

El periodo de estudio abarca los meses julio y agosto, debido a los altos niveles de contaminación por el uso de calefacción a leña. Se utilizaron datos del año 2019, posterior a la implementación del plan de descontaminación y previo de la pandemia COVID-19, que impactó significativamente el comportamiento de la población en los años posteriores, afectando los resultados del estudio.

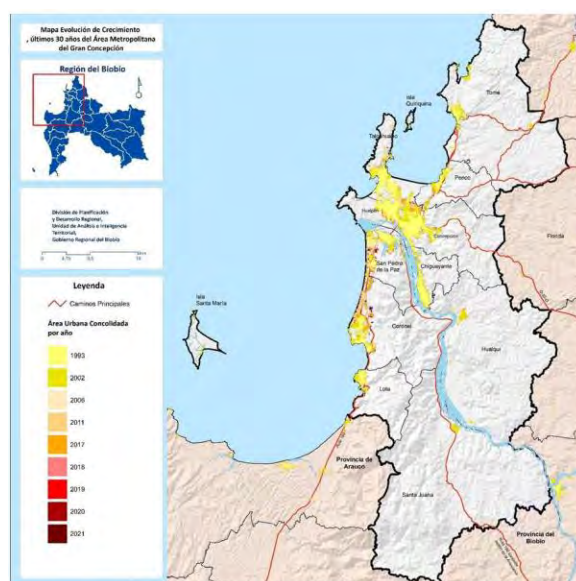


Figura 2: Mapa Área Metropolitana del Gran Concepción. (Ministerio del Interior y Seguridad Pública, 2023)

El Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) del ministerio del medio ambiente pone a disposición información de calidad del aire de todo el país. Desde aquí se extrae información de las estaciones de monitoreo presentes en la zona de estudio.

Como es posible ver en la Figura 3 las estaciones de monitoreo presentes en la zona corresponden a:

- Bocatoma
- Calabozo
- Cerro Merquín
- Consultorio – San Vicente
- Coronel Norte
- Coronel Sur
- Escuadrón, ENESA
- Hualqui
- Indura
- INPESCA
- JUNJI
- Liceo Polivalente
- Kingston College
- Nueva Libertad
- Punteras

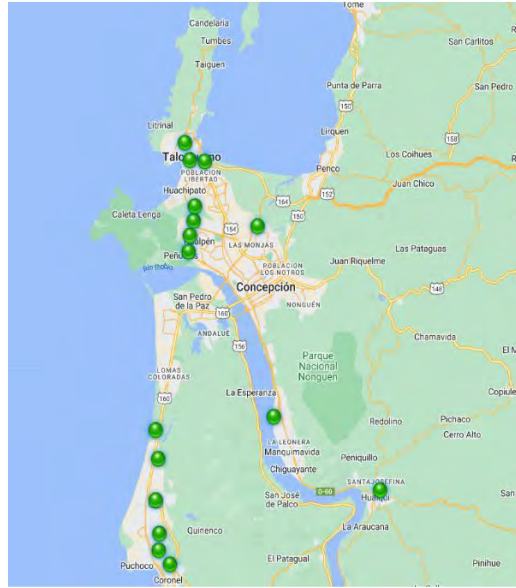


Figura 3. Estaciones de Monitoreo – SINCA. (Ministerio del Medio Ambiente, 2024)

Para cada una de ellas se registró la comuna y las coordenadas correspondientes. Cabe destacar que, para esta última, el SINCA entrega la información en el sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM) que, a diferencia del sistema de coordenadas geográficas, expresadas en latitud y longitud, las magnitudes en el sistema UTM se expresan en metros. Para poder realizar el estudio es necesario realizar el cambio a coordenadas geográficas. Adicionalmente, para cada estación se extrajo la siguiente información, según presentasen los datos para el periodo de estudio, información ilustrada en la Figura 4.

- Parámetros Meteorológicos
 - Temperatura
 - Velocidad del viento
 - Dirección del viento
 - Humedad relativa
- Parámetros Contaminante
 - Material Particulado (MP_{2,5} – MP₁₀)
 - Dióxido de azufre (SO₂)

Estación	Comuna	Coordenada UTM E	Coordenada UTM N	Longitud	Latitud	Temperatura	Velocidad del Viento	Dirección del Viento	Humedad Relativa	PM2.5	PM10	SO2
Liceo Polivalente	Tomé	662597	5947369	-72.95891	-36.58711	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Consultorio - San Vicente	Talcahuano	667557	5934138	-73.12405	-36.70904	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Nueva Libertad	Talcahuano	667962	5932742	-67.11921	-36.72154	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Impesca	Talcahuano	669252	5932595	-73.10474	-36.72263	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Indura	Talcahuano	668339	5928983	-73.11416	-36.75533	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
JUNJI	Hualpén	668154	5927794	-73.11597	-36.76607	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
ENAP price	Hualpén	667819	5926622	-73.11947	-36.77668	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Bocatoma	Hualpén	667680	5925321	-73.12074	-36.78842	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Kingston College	Concepción	673817	5927247	-73.05243	-36.76997	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Escuadron, ENESA	Coronel	664532	5910674	-73.15267	-36.91909	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Calabozo	Coronel	668730	5903504	-73.10412	-36.99472	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Coronel Norte	Coronel	664628	5902487	-67.14997	-36.99461	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Cerro Marquín	Coronel	664607	5901176	-73.14992	-37.00642	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Coronel Sur	Coronel	665556	5899980	-73.13900	-37.01702	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Punteras	Chiguayante	674923	5911833	-73.03650	-36.90856	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Hualqui	Hualqui	684073	5905626	-72.93234	-36.96274	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 4. Información Estaciones de Monitoreo.

El Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC) es una base de datos pública que recopila información sobre las emisiones y residuos de contaminantes dañinos generados por actividades industriales, con el objetivo de sistematizar y difundir estos datos, promoviendo la transparencia y el conocimiento sobre el impacto ambiental de diversas actividades. El RETC considera como fuentes difusas, aquellas de menor tamaño o dispersas, donde no se puede identificar información específica sobre sus emisiones o residuos. En contraste, las fuentes puntuales tienen ubicación definida para la descarga o emisión de contaminantes, y sus impactos pueden estar regulados o sujetos a medición según normas o planes de monitoreo establecidos (Ministerio del Medio Ambiente, 2013).

Desde el RETC, se descargó la base de datos correspondiente a las emisiones al aire de fuentes puntuales para el año 2019, la cual incluye información de todas las regiones de Chile. Dado que el estudio se centra en Concepción, se filtró la información para esta zona, seleccionándose datos precisos como el ID de la fuente emisora, razón social de la empresa, sus contaminantes presentes y sus coordenadas de longitud y latitud en grados decimales correspondientes. Adicionalmente, se solicitó por transparencia a la secretaria regional ministerial (SEREMI) de Salud del Biobío una base de datos que no estaba incluida en el archivo previamente descargado, el cual contiene la siguiente información para cada fuente emisora:

- Altura de chimenea
- Diámetro de chimenea
- Código CCF8
- Información sobre los gases y su velocidad de salida de las chimeneas

Esta información sirve para posteriormente calcular las emisiones de la planta. Sin embargo, dado que el SEREMI de Salud del Biobío no proporcionó toda la información solicitada, fue necesario realizar un ajuste para estimar estos datos.

Adicionalmente, se extrajo la base de datos para fuentes difusas, que al igual que antes, se seleccionan datos para el periodo y zona de estudio, filtrando información relevante, que incluye datos sobre la combustión residencial urbana. Desde esta base de datos se extrae la información para cada ciudad presente en el área seleccionada, junto con los contaminantes (CO, VOC, SO₂, MP₁₀, MP_{2.5}, NO_x, CO₂, CH₄) y su cantidad respectiva. A esta última fue necesario realizar un cambio de unidades a toneladas cortas. Esta información se procesó posteriormente en un script individual para cada comuna, asignando códigos únicos para su identificación. Identificando estos archivos como “*fuentes de área*”, como se ve en la Figura 5 específicamente para la comuna de Hualqui, que contiene la cantidad de cada contaminante en toneladas cortas para el año 2019.

```

#ORL      NONROAD ALM
#TYPE     NonRoad ALM Inventory for CAPS
#COUNTRY  US
#YEAR     2002
#DESC     ANNUAL
#DESC     US (including AK and HI)          PR      VI
#DESC     March 27      2007 version of NEI
#DESC     Pollutants in file are CO      NH3      NOX      PM10      PM2_5      SO2      VOC
#DESC     Mar 28 2007      C. Allen: removed SCCs 2285002015      2285004015      and 2285006015
12123    2104008010      CO      3384.08201      2019
12123    2104008010      VOC      1901.824219      2019
12123    2104008010      SO2      1.092241766      2019
12123    2104008010      PM10     173.1640308      2019
12123    2104008010      PM2_5    168.30917      2019
12123    2104008010      NOX      29.277259      2019
12123    2104008010      CO2      16407.99898      2019
12123    2104008010      CH4      179.31599      2019

```

Figura 5. Fuentes de área – Hualqui

3.2. Simulación previa

Para la obtención de la distribución espacial del MP_{2.5} se utiliza en secuencia los modelos WRF-SMOKE-CMAQ a través de los simuladores *tongas*, simulador de la escuela de Ingeniería Química, Universidad Católica de Valparaíso, y el simulador Laboratorio Nacional de Computación de Alto Rendimiento, NLHPC, que es el centro nacional de supercomputación de Chile. Primero, se lleva a cabo la simulación meteorológica, seguida de su validación. Esto permite la creación de inventario de emisiones por fuentes emisoras, utilizando el formato requerido por CMAQ. Posteriormente, se validan los datos obtenidos del modelo CMAQ, comparándolos con los registros obtenidos previamente de las estaciones de monitoreo.

3.2.1. Dominio de simulación

Para la creación del dominio de simulación se utilizó ArcMap, herramienta que organiza y administra información geográfica. Se empleó un script de Python, lenguaje de programación, que incluye las coordenadas del centro (X e Y) y define un tamaño de 223 x 223 celdas para el dominio. Una vez procesado el script, se generó un archivo con el polígono de simulación. Este archivo se procesa junto con información del censo de 2017, el cual detalla la distribución de la población del país, obteniendo el dominio correspondiente al estudio.

En el programa Quantum GIS (QGIS), software de código libre que permite manejar ráster y vectoriales como base de datos, se utilizó la herramienta de geoproceto “*cortar*” para intersecar el archivo polígono y del censo 2017, creando el dominio de simulación correspondiente. Se agregó las áreas de las celdas cortadas e información del cortador al polígono. Luego, se realizaron intersecciones entre las capas resultantes y el archivo del censo, Figura 6. Esto dio lugar a un archivo con información sobre el número de personas por celda en el dominio.

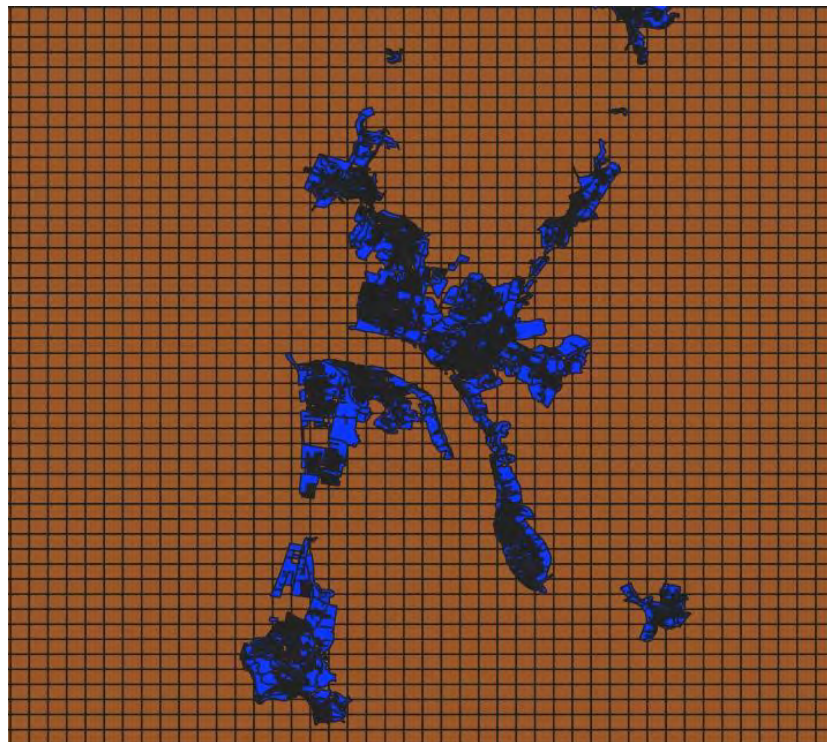


Figura 6. Mapa de Intersección Censo-Polígono

Cabe destacar que se hicieron correcciones a las celdas, ya que al marcar un punto dentro del polígono no coincidía con el número de fila y columna. Información que posteriormente es utilizada.

Tras el uso de QGIS, se generan archivos denominados “*surrogados*” que ayudan a distribuir la población en el dominio. Para obtener estos surrogados, se utiliza un archivo Excel obtenido en QGIS, filtrándolo por comuna creando un archivo en formato “*csv*” para cada una, permitiendo su lectura en el programa R-Studio, herramienta dedicada a la computación estadística y gráfica.

En R-Studio, se deben instalar los paquetes “*openxlsx*” y “*tidyverse*” antes de ejecutar el script. Luego, se realizan las siguientes ediciones al código, Figura 7:

- **Línea 4:** Redirigir a la carpeta de trabajo del computador.
- **Línea 5:** Indicar el nombre de la carpeta de la comuna y cargar el módulo.
- **Línea 26:** Cambiar el número de población de la comuna, basado en el censo de 2017.
- **Línea 32:** Especificar el nombre del archivo que generará el script.

```
1 library(openxlsx)
2 library(tidyverse)
3
4 setwd("~/AAA Proyecto de Ingeniería/R- Studio")
5 Data <- read.csv("NombreComuna.csv")
6
7 head(Data)
8
9 Data$fid=factor(Data$FID)
10
11 levels(Data$fid)
12 SUMA_AREA = c()
13
14 for (i in 1:length(levels(Data$fid))) {
15   SUMA_AREA[i] =sum(Data[Data$fid==levels(Data$fid)[i],"area"],na.rm = TRUE)
16 }
17
18 Factores <-data.frame(SUMA_AREA,levels(Data$fid))
19 colnames(Factores) <- c("SUMA_AREA","fid")
20
21 Factor_area <- dplyr::left_join(Factores, distinct(Data), by = "fid")
22
23 Factor_area$factor.area<-data.frame(Factor_area$area/Factor_area$SUMA_AREA)
24
25 names (Factor_area)[12] = "Fraccion_area"
26 Fraccion.personas <- Factor_area$TOTAL_PERS*(Factor_area)[12]/27274
27
28 Data_correcta <- cbind(Data$celdas,Data$COMUNA,Fraccion.personas)
29
30 colnames(Data_correcta) <- c("CELDAS","COMUNA","Factor_Poblacion")
31 write.table(Data_correcta, sep = ",", row.names = FALSE,col.names = TRUE,file = "Factores_Poblacion_NombreComuna.csv")
32
```

Figura 7. Script Factor de Área

El programa genera un archivo llamado “*Factor_Poblacion_Comuna.csv*” para cada comuna, que incluye datos sobre las celdas, la comuna y el factor de población. Esto proporciona información sobre la distribución de personas en cada celda según el área, entregando una fracción de la

población por área. Para verificar que la información sea correcta, se suman las fracciones y esta debe dar 1.

Posteriormente, para determinar la cantidad de personas en cada celda, se utiliza otro script, Figura 8. En este se modificaron las líneas correspondientes al nombre del archivo que R-Studio debe leer (Línea 5: “*Factor_Area_Comuna.csv*”) y el archivo que se generará, correspondiente a los surrogados (Línea 21: “*SurrogadosComuna.csv*”)

```
1 library(openxlsx)
2 library(tidyverse)
3
4 setwd("~/AAA Proyecto de Ingeniería/Factores Area")
5 Data <- read.csv("Factores_Poblacion_Comuna.csv")
6
7 head(Data)
8
9 Data$X=factor(Data$CELDAS)
10
11 levels(Data$X)
12
13 surrogados = c()
14 for (i in 1:length(levels(Data$X))) {
15 surrogados[i] =sum(Data[Data$X==levels(Data$X)[i], "Factor_Poblacion"], na.rm = TRUE)
16 }
17
18 Factores <-data.frame(surrogados, levels(Data$X))
19
20
21 write.table(Factores, sep = ",", row.names = FALSE, file = "SurrogadosComuna.csv")
```

Figura 8: Script Surrogados

3.2.2. Simulación WRF

Se utiliza Weather Research and Forecasting (WRF), el cual es un modelo meteorológico que permite obtener datos de la velocidad del viento, presión, temperatura y humedad con alta resolución espacio-temporal, que sirven como datos de entrada en modelos de calidad del aire. (Fernández, y otros, 2024).

Se lleva a cabo el sistema de procesamiento WPS, utilizando el archivo “*namelist.wps*”, el cual contiene tres módulos a los cuales les da instrucciones, estos son “*geogrid.exe*”, “*ungrid.exe*” y “*metgrid.exe*”, que se van modificando uno a uno en ese mismo orden, como se puede ver en la Figura 9.

```

1  &share
2  wrf_core = 'ARW',
3  max_dom = 4,
4  start_date = '2019-01-01_00:00:00', '2019-01-01_00:00:00', '2019-01-01_00:00:00', '2019-01-01_00:00:00',
5  end_date = '2019-01-09_18:00:00', '2019-01-09_18:00:00', '2019-01-09_18:00:00', '2019-01-09_18:00:00',
6  interval_seconds = 21600
7  io_form_geogrid = 2,
8  opt_output_from_geogrid_path = '/home/epino/Dominios/Quintero/Pino_1/',
9  debug_level = 0,
10 /
11
12 &geogrid
13 parent_id = 1, 1, 2, 3,
14 parent_grid_ratio = 1, 3, 3, 3,
15 i_parent_start = 1, 15, 44, 128,
16 j_parent_start = 1, 18, 52, 148,
17 e_we = 100, 217, 403, 403,
18 e_sn = 120, 265, 433, 433,
19 geog_data_res = '5m', '5m', '2m', '30s',
20 dx = 81000,
21 dy = 81000,
22 map_proj = 'lambert',
23 ref_lat = -32.774,
24 ref_lon = -71.531,
25 truelat1 = -32.674,
26 truelat2 = -32.874,
27 stand_lon = -71.531,
28 geog_data_path = '/home/epino/WPS_INV_PREGRADO/WPS_Coyhaique/GEOG_DATA/geog'
29 /
30
31 &ungrib
32 out_format = 'WPS',
33 prefix = 'FILE',
34 /
35
36 &metgrid
37 fg_name = 'FILE',
38 io_form_metgrid = 2,
39 opt_output_from_metgrid_path = '/home/epino/Dominios/Quintero/Pino_1/',

```

Figura 9. Script “namelist.wps”

En el módulo “*geogrid.exe*” se identifican 4 dominios que utilizan una razón de 1: 3 : 3 : 3. El dominio mayor tiene 27 Km de resolución, el siguiente con la relación de 3 tiene 9 km, el siguiente 3 Km y el último 1 km. Además, se definió la resolución de la data geográfica, que corresponde a 5 min, 5 min, 2 min y 30 s, respectivamente.

Se definieron las celdas que contienen al dominio 1, el cual es un dominio cuadrado, por ende, se determinaron 260 celdas en vertical y 260 en horizontal, de la misma manera se continuó con los siguientes. Cabe mencionar que una vez que se pase a simular SMOKE y CMAQ, estos se van a reducir en 3 celdas, es decir, para el dominio 1 serían 257, esto porque el programa al procesar la meteorología quita 3 celdas para evitar efectos de borde. Por lo tanto, dado que en CMAQ trabajamos con el dominio más pequeño que, ahora es 226, pasará a ser 223. Adicionalmente, se estableció las coordenadas del punto central del dominio. Finalmente, al ejecutar “*geogrid.exe*”, se genera en la carpeta correspondiente los archivos para cada uno de los dominios, estos corresponden a “*geo_em.do1.nc*”, “*geo_em.do2.nc*”, “*geo_em.do3.nc*” y “*geo_em.do4.nc*”. Estos archivos entregan la posición geográfica del dominio de simulación.

Luego, se ejecutó el módulo “*ungrib.exe*”, el cual requiere los archivos de la data meteorológica descargada previamente, ya que modifica los datos que vienen en formato “*GRIB*”, para dejarlos en formato “*WPS*”, identificando los archivos con el prefijo “*FILE*”, generándose cada seis horas.

Posteriormente, se ejecuta el módulo “*metgrid.exe*”, el cual toma los archivos generados por “*geogrid.exe*” y “*ungrib.exe*” para obtener nuevos archivos que se utilizan en WRF, generándose archivos de salida con intervalos de seis horas para cada dominio.

Previo a la iniciación de WRF se modificaron ciertos módulos del archivo “*namelist.input*”, de los cuales se identifican “*time_control*” que determina el periodo de simulación para cada dominio y el intervalo con el que se entregan estos datos, que para el caso es horario. Además, se modifica el módulo “*domains*”, que contiene información del número de celdas y dominios de la simulación. Por último, se modifica el módulo “*Physics*”, que corresponden a parametrizaciones físicas de la simulación, de las cuales se modificaron específicamente las ilustradas en la Figura 10.

<code>&physics</code>				
<code>mp_physics</code>	<code>= 3,</code>	<code>3,</code>	<code>3,</code>	<code>3,</code>
<code>ra_lw_physics</code>	<code>= 1,</code>	<code>1,</code>	<code>1,</code>	<code>1,</code>
<code>ra_sw_physics</code>	<code>= 1,</code>	<code>1,</code>	<code>1,</code>	<code>1,</code>
<code>sf_sfclay_physics</code>	<code>= 5,</code>	<code>5,</code>	<code>5,</code>	<code>5,</code>
<code>sf_surface_physics</code>	<code>= 1,</code>	<code>1,</code>	<code>1,</code>	<code>1,</code>
<code>bl_pbl_physics</code>	<code>= 5,</code>	<code>5,</code>	<code>5,</code>	<code>5,</code>
<code>cu_physics</code>	<code>= 5,</code>	<code>5,</code>	<code>5,</code>	<code>5,</code>

Figura 10. Parametrizaciones físicas de DGAC

Una vez modificados los módulos anteriormente mencionados, se dio paso a la ejecución de WRF, para lo cual fue necesario ejecutar “*real.exe*”, mediante un programa que comprime los archivos generados, el cual se identifica como “*ejecuta.real.sh*”. Una vez obtenidos los archivos de salida, se dio inicio al archivo “*ejecuta.wrf.sh*”, el cual se alimenta de los archivos generados por “*real.exe*” y “*metgrid.exe*” para llevar a cabo la simulación meteorológica de cada dominio. Los archivos generados de la simulación contienen datos horarios de los parámetros a estudiar, que corresponden a la Temperatura, Velocidad del viento, Dirección del Viento y Humedad relativa.

3.2.3. Simulación Inventario de Emisiones (SMOKE)

SMOKE se encarga de procesar el inventario de emisiones para fuentes puntuales y para fuentes de área.

La simulación de SMOKE se llevó a cabo en el cluster proporcionado por la Escuela de Ingeniería Química, llamado “*tongas.eiq.cl*”. Para esto se ingresó a la carpeta “*Build_SMOKE*”, la cual contiene

dos carpetas importantes. Por un lado, la carpeta *"Data"*, que contiene información de la data de entrada y salida, y por otro lado la carpeta *"Subsys"*, con los archivos ejecutables.

Para correr SMOKE, se necesitan los archivos que contienen la especiación química y la temporalidad de las fuentes emisoras. Esta última se obtiene al modificar los scripts de *"Perfil_Horario.csv"*, *"Perfil_Semanal.csv"* y *"Perfil_Mensual.csv"*, que luego encontramos en el archivo de *"Temporalidad.csv"* para ver la distribución de los contaminantes.

Una vez listos los archivos mencionados anteriormente, se redirige la consola a la carpeta de SMOKE, donde se modifica el archivo denominado *"ASSINGS"* mediante el editor de texto *"Sublime text"*, el cual configura las variables del entorno para luego ser usadas por SMOKE. En este se definió el inicio del periodo de simulación en días julianos, que corresponde a 2019182, donde el número 182 que va al final, corresponde al 1 de julio en calendario normal. También, se indica la hora a la que comienza la corrida (00:00), la cantidad de horas (744 h) y días (31) que se van a correr, cada cuanto tiempo generar emisiones (1 h) y el año en que se realiza la corrida (2019), en las líneas correspondientes, Figura 11

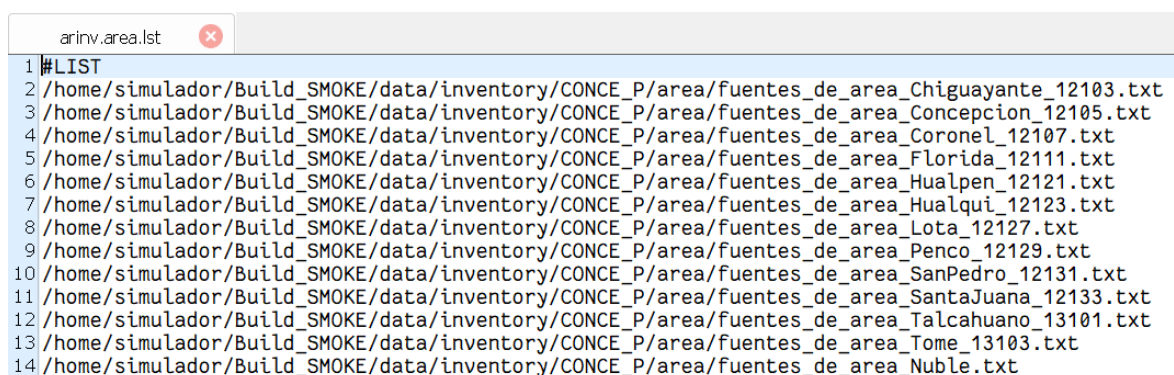
```
46 setenv EPI_STDATE 2019182 # Julian start date
47 setenv EPI_STTIME 000000 # start time (HHMMSS)
48 setenv EPI_RUNLEN 7440000 # run length (HHMMSS)
49 setenv EPI_NDAY 31 # number of full run days
50 ## Per-period environment variables
51 setenv G_STDATE 2019182 # Julian start date
52 setenv G_STTIME 000000 # start time (HHMMSS)
53 setenv G_TSTEP 010000 # time step (HHMMSS)
54 setenv G_RUNLEN 7440000 # run length (HHMMSS)
55 setenv ESDATE 20190701 # Start date of emis time-based files/dirs
56 setenv ESDATE 20190701 # Start date of met time-based files
57 setenv NDAYS 31 # Duration in days of each emissions file
58 setenv MDAYS 31 # Duration in days of met time-based files
59 setenv YEAR 2019 # Base year for year-specific files
60
```

Figura 11. "ASSINGS"

Posteriormente, se modifica el archivo *"smk_Conce.csh"* con la misma herramienta de texto utilizada previamente y así crear un script que da instrucción a SMOKE para ejecutarse. En este archivo se da la orden de cambiar la fuente puntual (P) por una fuente de área (A), además se corrió el modulo *"SMKINVEN"*, el cual lee el inventario, se reemplazó *"point"* por *"area"* y se escribe *"NO"* a todo lo que no se quiere correr.

Una vez generado los scripts, se ejecutan para corregir los errores en caso de requerirlo. Para esto nos dirigimos a la carpeta “Build_SMOKE”, “data” luego “run_Concepcion”, abrimos “static”, luego “logs”, y en ésta última se encuentran los errores.

Para continuar, se redirige la consola a la carpeta “Build_SMOKE”, siguiendo las siguientes direcciones: *data* -> *inventory* -> *CONCE_P* -> *area*, aquí se suben los archivos de fuentes de área previamente creados (Figura 5). Adicionalmente, se crea un script denominado “*arinv.area*”, donde se incorporan uno a uno la dirección de estos los archivos por comuna, Figura 12, y así poder ejecutarlo.



```
arinv.area.lst x
1 #LIST
2 /home/simulador/Build_SMOKE/data/inventory/CONCE_P/area/fuentes_de_area_Chiguayante_12103.txt
3 /home/simulador/Build_SMOKE/data/inventory/CONCE_P/area/fuentes_de_area_Concepcion_12105.txt
4 /home/simulador/Build_SMOKE/data/inventory/CONCE_P/area/fuentes_de_area_Coronel_12107.txt
5 /home/simulador/Build_SMOKE/data/inventory/CONCE_P/area/fuentes_de_area_Florida_12111.txt
6 /home/simulador/Build_SMOKE/data/inventory/CONCE_P/area/fuentes_de_area_Hualpen_12121.txt
7 /home/simulador/Build_SMOKE/data/inventory/CONCE_P/area/fuentes_de_area_Hualqui_12123.txt
8 /home/simulador/Build_SMOKE/data/inventory/CONCE_P/area/fuentes_de_area_Lota_12127.txt
9 /home/simulador/Build_SMOKE/data/inventory/CONCE_P/area/fuentes_de_area_Penco_12129.txt
10 /home/simulador/Build_SMOKE/data/inventory/CONCE_P/area/fuentes_de_area_SanPedro_12131.txt
11 /home/simulador/Build_SMOKE/data/inventory/CONCE_P/area/fuentes_de_area_SantaJuana_12133.txt
12 /home/simulador/Build_SMOKE/data/inventory/CONCE_P/area/fuentes_de_area_Talcahuano_13101.txt
13 /home/simulador/Build_SMOKE/data/inventory/CONCE_P/area/fuentes_de_area_Tome_13103.txt
14 /home/simulador/Build_SMOKE/data/inventory/CONCE_P/area/fuentes_de_area_Nuble.txt
```

Figura 12. Script “*arinv.area*”

Nuevamente se ejecutó el archivo “*smk_Conce.csh*”, pero esta vez se modificó la línea 29 por “NO” y la 30 a “Y” para correr el módulo “*SPCMAT*”, que cumple la función de darle la especiación química a las sustancias, completándose de manera normal. Finalmente se modificó la línea 30 por “NO” y la línea 31 a “Y” para correr el módulo “*GRDMAT*”.

Mediante la Figura 13 se observa el script con los módulos que se corrieron durante el periodo de marzo – junio de 2024.

```

smk_Conce_P.csh
5 # Date      $Date$
6 #
7 # This script sets up needed environment variables for processing point source
8 # emissions in SMOKE and calls the scripts that run the SMOKE programs.
9 #
10 # Script created by : M. Houyoux, CEP Environmental Modeling Center
11 #
12 #*****
13
14 ## Set optional customized SMKMERGE output file names
15 ## setenv SMKMERGE_CUSTOM_OUTPUT N # Y define your own output file names from SMKMERGE
16 setenv SMKROOT /home/simulador/Build_SMOKE/subsys/smoke
17 setenv SMK_HOME /home/simulador/Build_SMOKE/
18
19 ## Set Assigns file name
20 setenv ASSIGNS_FILE $SMKROOT/assigns/ASSIGNS.Concepcion.Pino
21
22 ## Set source category
23 setenv SMK_SOURCE A # source category to process
24 setenv MRG_SOURCE A # source category to merge
25
26 ## Set programs to run...
27
28 ## Time-independent programs
29 setenv RUN_SMKINVEN Y # run inventory import program
30 setenv RUN_SPCMAT Y # run speciation matrix program
31 setenv RUN_GRDMAT Y # run gridding matrix program
32
33 ## Time-dependent programs
34 setenv RUN_TEMPORAL Y # run temporal allocation program
35 setenv RUN_SMKMERGE Y # run merge program

```

Figura 13. Extracto Script de Módulos de SMOKE.

El script “SRGDESC_CHILE”, le dice a SMOKE el tipo de distribución geográfica de la población en cada comuna. Se agregó información de los archivos surrogados generados a partir de los factores de población en R-Studio para cada comuna. La carpeta que guarda los archivos surrogados se denomina “surrogados_Concepcion”. Antes de subir los archivos a la carpeta, estos fueron editados en Microsoft Excel, agregando información de las filas y columnas que corresponden a cada celda, utilizando de referencia el archivo de las celdas que fueron corregidas del dominio de simulación. También, se agrega una columna con el código asignado previamente a la comuna, junto con otra información que requiere el script para ejecutarse, esto se observa en la Figura 14.

```

#GRID DOMAIN_04 -111500.000 -111501.695 1000.000 1000.000 223 223 1 LAMBERT METERS -36.869 -36.669 -73.052 -73.052 -36.769
100 12121 108 107 2.59866E-05
100 12121 109 107 0.000753567
100 12121 106 108 2.34939E-05
100 12121 107 108 0.014433182
100 12121 108 108 0.054778155
100 12121 109 108 4.33E-02
100 12121 110 108 0.00328535
100 12121 106 109 0.046330923
100 12121 107 109 0.154171363
100 12121 108 109 1.07E-01
100 12121 109 109 0.08988899
100 12121 110 109 0.005928457
100 12121 111 109 0.001904579
100 12121 106 110 0.046128651
100 12121 107 110 0.134514143
100 12121 108 110 0.117835838
100 12121 109 110 4.91E-02
100 12121 110 110 0.008382773
100 12121 106 111 0.015050637
100 12121 107 111 0.078499706
100 12121 108 111 2.29E-02
100 12121 109 111 0.005519155

```

Figura 14. Script para modificar archivo Surrogados.

3.3. Análisis de Datos Simulados frente a Datos Observados

Para poder realizar una comparación entre la data simulada y observada de los datos meteorológicos, se trabajó con los resultados obtenidos de la simulación en CMAQ. Cabe mencionar que para este apartado se trabaja con el simulador NLHPC.

3.3.1. Velocidad del Viento

Se utiliza el script “*Extraction_Velocidad_Estaciones_SINCA*”, Figura 15, el cual extrae la data simulada del archivo “*METCRO2D_CONCEPCION.nc*”, que contiene información a nivel de superficie de la meteorología. En el primer archivo mencionado, se edita para cada una de las estaciones de monitoreo, lo siguiente, con el fin de obtener un archivo con la información de la velocidad del viento para cada una de las estaciones:

- ID
- Nombre de la estación
- Fila y columna donde está ubicada la estación de monitoreo en el dominio de simulación
- Nombre del archivo a generar

```
1 | load "$NCARG_ROOT/lib/ncarg/nclscripts/csm/contributed.ncl"
2
3 | begin
4
5 | ;run=Corrida1.2
6 | a = addfile("/home/epino/CMAQ_v5.3/data/MCIP_OUT/CONCEPCION_PINO/Dominio_04/METCRO2D_CONCEPCION.nc", "r")
7
8 |     ID="01"
9 |     Estacion="Consultorio_San_Vicente"
10 |         COL = 105
11 |         ROW = 116
12 |         WSPD10 = a->WSPD10(:, :, ROW, COL)
13 |     asciwrite("Velocidad_"+ID+Estacion+"test13"+" .txt", WSPD10)
14
15 |
16 |     ID="02"
17 |     Estacion="Hualqui"
18 |         COL = 167
19 |         ROW = 85
20 |         WSPD10 = a->WSPD10(:, :, ROW, COL)
21 |     asciwrite("Velocidad_"+ID+Estacion+"test13"+" .txt", WSPD10)
22
```

Figura 15. Script "Extraction_Velocidad_Estaciones_SINCA"

Cabe mencionar que el contador de columnas y filas comienza en el punto (1,1) por lo que fue necesario ajustar cada columna y fila, sumando una unidad, utilizando así las columnas “*COL_NCL*” y “*ROW_NCL*”. Cabe destacar que los archivos se generan en formato “.txt”.

Destacar que las estaciones que se estudian son aquellas, que según los datos proporcionados por el SINCA presentan información de la velocidad del viento para el periodo de estudio (julio-agosto 2019), resultando ser:

- Consultorio San Vicente
- Hualqui
- Kingston College
- Liceo Polivalente
- Nueva libertad
- Punteras

Para ejecutar el script "*Extraction_Velocidad_Estaciones_SINCA*" primero se debe subir al cluster NLHPC a la carpeta donde se trabajará, denominada "velocidad". Como es un programa de tipo "ncl" primero hay que cargarlo a la consola con el comando "*ml icc/2019.2.187-GCC-8.2.0-2.31.1 impi/2019.2.185 NCL/6.5.0*". Una vez cargado, para ejecutar el archivo re dirige a la carpeta y se aplica "*ncl Extraction_Velocidad_Estaciones_SINCA*" con el cual se generaran los nuevos archivos de velocidad del viento para cada estación. Para juntar toda esta información en un solo archivo se utiliza la herramienta de pegado, tal que: "*paste Velocidad_* > TODAS_VELOCIDAD.txt*" obteniendo el archivo "*TODAS_VELOCIDAD.TXT*" ya con los datos de velocidad del viento para cada una de las estaciones de moniterio.

A continuación, crea un archivo excel con la fecha en el formato "*DD-MM-AAAA HH:MM:SS*" en la primera columna y las estaciones de estudio en las columnas posteriores quedando la Figura 16. Se rellena un excel con los datos de la velocidad observada, información extraida del SINCA, y otro con los datos obtenidos de la simulación. Para este último, los datos se extraen del archivo antes mencionado "*TODAS_VELOCIDAD.TXT*" traspasando los datos en la fecha y hora correspondiente, donde si bien la simulación fue hecha para el periodo 01-07-2019 0:00:00 hasta 08-08-2019 23:00:00, el simulador tiene un desfase de 5 h, por lo que los datos se colocan desde 6-30-2019 19:00, específicamente desde la celda 4340.

date	Estacion_1	Estacion_2	Estacion_3
01-01-2019 1:00			
01-01-2019 2:00			
01-01-2019 3:00			
01-01-2019 4:00			
01-01-2019 5:00			

Figura 16. Formato Datos

Una vez creados los archivos para velocidad simulada y observada se procede a utilizar la herramienta R-Studio. El script que se muestra en la Figura 17, lo que hace es leer la data de velocidad del viento simulada y observada comparándolos a través de un análisis estadístico para que el periodo de estudio correspondiente a *"inicio=2019-07-10 fin=2019-08-08"*. Luego, se modificó para cada estación las líneas según corresponde.

Obteniendo como resultado gráficas de comparación de data observada y simulada, junto con el análisis estadístico para cada estación.

```

1 library(openxlsx)
2 library(ggplot2)
3 library(openair)
4 library(grid)
5 library(gridExtra)
6 library(dplyr)
7
8 setwd("~/AAA Proyecto de Ingeniería/Velocidad")
9
10 CorridaObs_Velocidad <- read.csv("Velocidad_observada.csv", header = TRUE)
11 CorridaObs_Velocidad$date <- as.POSIXct(strptime(CorridaObs_Velocidad$date, format = "%m-%d-%Y %H:%M", tz = "Etc",
12
13 Corrida_Velocidad <- read.csv("Velocidad_simulada.csv", header = TRUE)
14 Corrida_Velocidad$date <- as.POSIXct(strptime(Corrida_Velocidad$date, format = "%m-%d-%Y %H:%M", tz = "Etc/GMT-3"
15
16 inicio="2019-07-10"
17 fin="2019-08-08"
18
19 #CONSULTORIO.SAN.VICENTE
20
21 Estacion1_Velo <- data.frame(cbind(Corrida_Velocidad$date,
22                                 CorridaObs_Velocidad$CONSULTORIO.SAN.VICENTE,
23                                 Corrida_Velocidad$CONSULTORIO.SAN.VICENTE))
24 colnames(Estacion1_Velo) <- c("date", "Observado",
25                               "Simulado")
26 Estacion1_Velo$date <- CorridaObs_Velocidad$date
27 Estacion1_Velo <- selectByDate(Estacion1_Velo, start = inicio, end = fin)
28 Estacion1_Velo$Simulado <- as.numeric(Estacion1_Velo$Simulado)
29 Estacion1_Velo$Observado <- as.numeric(Estacion1_Velo$Observado)
30 TEM_Estacion1 <- modStats(Estacion1_Velo, mod = "Simulado", obs = "observado", type = "month")
31 TEM_Estacion1_todos <- modStats(Estacion1_Velo, mod = "Simulado", obs = "Observado")
32 TEM_Estacion1_todos

```

Figura 17. Script para Velocidad del viento.

3.3.2. Temperatura

De la misma manera, para la comparación de la data simulada y observada de la temperatura se realizan los mismos pasos que para la velocidad del viento descrita anteriormente, salvo que se utiliza un script diferente, el cual modifica la temperatura, realizando un cambio de unidades de temperatura (de celsius a kelvin) para poder realizar el análisis estadístico, veáse la Figura 18.

```

#CONSULTORIO.SAN.VICENTE

Estacion5_Temp <- data.frame(cbind(Corrida_Temperatura$date,
                                CorridaObs_Temperatura$CONSULTORIO.SAN.VICENTE,
                                Corrida_Temperatura$CONSULTORIO.SAN.VICENTE))
colnames(Estacion5_Temp) <- c("date", "Observado",
                              "Test1")
Estacion5_Temp$date <- CorridaObs_Temperatura$date
Estacion5_Temp$Observado = Estacion5_Temp$Observado + 273.15

Estacion5_Temp<- selectByDate(Estacion5_Temp, start = inicio, end = fin)
Estacion5_Temp$Test1<- as.numeric(Estacion5_Temp$Test1)
Estacion5_Temp$Observado<- as.numeric(Estacion5_Temp$Observado)

TEM_Estacion5<-modStats(Estacion5_Temp, mod = "Test1" , obs = "Observado",type = "month")
TEM_Estacion5_todos<-modStats(Estacion5_Temp, mod = "Test1" , obs = "Observado")
TEM_Estacion5_todos

#write.table(TEM_Estacion5_todos, sep = ",", row.names = FALSE,file = "Estadística_CONSULTORIO.SAN.VICENTE.csv")

Estacion5_Temp$Observado = Estacion5_Temp$Observado - 273.15
Estacion5_Temp$Test1 = Estacion5_Temp$Test1 - 273.15
png("timeplot_Hour_06_CONSULTORIO.SAN.VICENTE.png",width = 20, height = 5, units = 'in', res = 1000)
timePlot(Estacion5_Temp, pollutant = c("Test1","Observado"),
          group=TRUE,key.position = "top",
          ylab = "Temperatura (°C)",ylim=c(-5,20),fontsize = 19,date.breaks = 7,
          xlab = "Fecha", lwd = c(2, 2), lty = c(1,1), cols = c("red","black"),
          name.pol = c("Simulado","Observado"),
          main="Consultorio San Vicente")
dev.off()

```

Figura 18. Script de Temperatura.

Adicionalmente, según la información proporcionada por el SINCA, las estaciones que presentan información en el periodo de estudio correspondiente son:

- Consultorio San Vicente
- Hualqui
- Kingston College
- Liceo Polivalente
- Punteras

Trabajando ahora con 5 estaciones, se ejecuta el script para obtener los gráficos, junto a su análisis estadístico.

3.3.3. Humedad Relativa

Para la comparación de la data simulada y observada de humedad relativa se realizan los mismos pasos descritos con anterioridad, salvo que ahora se reemplaza el script por “Humedad”. Al igual que para la Temperatura, el SINCA proporciona información de Humedad para las mismas estaciones de monitoreo, correspondientes a:

- Consultorio San Vicente

- Hualqui
- Kingston College
- Liceo Polivalente
- Punteras

Trabajando ahora con 5 estaciones, se obtienen los gráficos, junto a su análisis estadístico en el siguiente apartado.

3.3.4. Validación de datos

Para la validación de los datos meteorológicos simulados con el uso de los scripts en la herramienta R-Studio se obtuvieron datos estadísticos respecto al comportamiento de estos datos para el periodo de estudio.

Para evaluar el rendimiento del modelo, se realiza una comparación gráfica y analítica, basada en los siguientes parámetros utilizados en el análisis estadístico para cada variable meteorológica:

- ✓ **MB:** corresponde al sesgo medio, indica el error sistemático del modelo a subestimar o sobreestimar valores simulados respecto a los reales. Lo ideal es estar cerca de cero, donde un valor positivo indica sobreestimación y uno negativo subestimación.
- ✓ **MGE:** corresponde al error relativo normalizado, este permite comprobar la existencia de errores aleatorios. Lo ideal es estar cerca de cero, valores más altos indican errores aleatorios significativos.
- ✓ **RMSE:** corresponde al error cuadrático medio, que entrega información acerca de la precisión del modelo. Un valor más bajo indica mejor precisión, un valor cercano a cero es lo ideal.
- ✓ **IOA:** corresponde al índice de ajuste, el cual indica qué tan bien se adapta el modelo de simulación a los datos observados. Los valores cercanos a 1 indican una buena adaptación del modelo y los datos observados.

$$MB = \frac{1}{N} \sum (P_j - O_j) \quad \text{Ecuación 3.3.4.1}$$

$$MGE = \frac{1}{N} \sum |P_j - O_j| \quad \text{Ecuación 3.3.4.2}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (P_j - O_j)^2} \quad \text{Ecuación 3.3.4.3}$$

$$IOA = 1 - \frac{\sum (P_j - O_j)^2}{\sum (|P_j - \bar{O}| + |O_j - \bar{O}|)^2} \quad \text{Ecuación 3.3.4.4}$$

3.3.5. Dirección del Viento

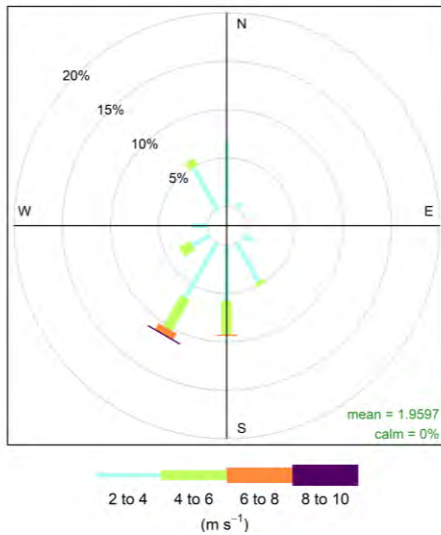


Figura 19. Dirección del Viento Observada

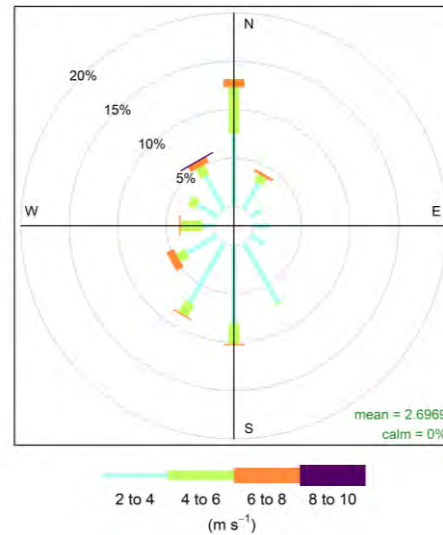


Figura 20. Dirección del Viento Simulada

La forma de realizar la comparación del modelo simulado con los datos observados es a través del análisis a la rosa de los vientos, la cual muestra la distribución de la velocidad y dirección del viento en un lugar seleccionado. La Figura 19 y Figura 20 presentan la rosa de los vientos con los datos observados y simulados, respectivamente, para la estación de Kingston College. La forma de realizar el análisis es observando la tendencia de los vectores y su magnitud, la tendencia de estos indica la eficacia del modelo. Para la estación de ejemplo no hay una distribución clara, sin embargo, se ve que no hay una tendencia hacia el sureste.

3.3.6. Material Particulado

Para realizar la simulación del material particulado 2.5 se trabaja con NLHPC y posteriormente con tongas para procesar los resultados.

Una vez terminada la simulación de CMAQ en NLHPC se redirige la consola a la carpeta donde se han creado los archivos de salida, denominados AMPDIAG y ACON: `"/home/epino/CMAQ_v5.3/data/output_CCTM_v53_intel_BASE_CONCE/"`

Ya en la carpeta, los archivos presentes están en formato "nc", por lo que es necesario cargar el módulo "NCO" con el comando `"ml intel/2019b NCO/4.7.9 OpenSSL/1.0.1s"` para poder ejecutar. Luego se agrupan todos los archivos APMDIAG y ACON:

- APMDIAG: `"ncrcat CCTM_APMDIAG_v53_intel_BASE_CONCE_20190*APMDIAG_JULIO.nc"`
- ACON: `"ncrcat CCTM_ACONC_v53_intel_BASE_CONCE_20190*ACONC_JULIO.nc"`

Una vez listos los archivos, se edita el script `"ejecuta.CMAQ_PM25sh"` en las líneas mostradas en la Figura 21, para obtener el archivo con el MP_{2.5}, con datos que luego se utilizan para hacer las gráficas.

```
1 #!/bin/bash
2 #-----SLURM Script - NLHPC-----
3 #SBATCH -J CMAQ_25
4 #SBATCH -p general
5 #SBATCH -n 5
6 #SBATCH --ntasks-per-node=1
7 #SBATCH --mem-per-cpu=800
8 #SBATCH --mail-user=emepc8@gmail.com
9 #SBATCH --mail-type=ALL
10 #SBATCH -t 0-05:00:00
11
12 ml purge
13 ml intel/2019b NCO/4.7.9 OpenSSL/1.0.1s
14 wait
15
16 #ncap2 -s "PM25_TOT=(AS04T+AN03T+ANH4T+ANAT+ACLT+AECT+ALVPO1T+ASVPO1T+ASVPO2T+APOCT+APNCOMI+ALV001T+ALV002T+ASV001T+ASV002T+AOTHR1)*PM25AT+(AS04T+AN03T+ANH4T+ANAT+ACLT+AECT+ALV
17
18
19 ncap2 -A -v -s "PM25ATTOTAL=(AS04T+AN03T+ANH4T+ANAT+ACLT+AECT+ALVPO1T+ASVPO1T+ASVPO2T+APOCT+APNCOMI+ALV001T+ALV002T+ASV001T+ASV002T+AOTHR1)" ACONC_JULIO.nc PM25_CMAQ.nc
20 wait
21 ncap2 -A -v -s "PM25AC1=(AS04T+AN03T+ANH4T+ANAT+ACLT+AECT+ALVPO1T+ASVPO1T+ASVPO2T+APOCT+ASVPO3T+ALVPO1T+APNCOMI+ATSO1T)" ACONC_JULIO.nc PM25_CMAQ.nc
22 wait
23 ncap2 -A -v -s "PM25AC2=(ATSO2T+ATSO3T+AMT1T+AMT2T+AMT3T+AMT4T+AMT5T+AMT6T+AMT7T+AMT8T+AMT9T+AMT10T+AMT11T+AMT12T+AMT13T+AMT14T+AMT15T+AMT16T+AMT17T+AMT18T+AMT19T+AMT20T)" ACONC_JULIO.nc PM25_CMAQ.nc
24 wait
25 ncap2 -A -v -s "PM25AC3=(ALV002T+ASV001T+ASV002T+ASV003T+APCS0T+AAVB1T+AAVB2T+AAVB3T+AAVB4T+AOTHR3+AECT+ASTT+ATTI+ACA1+AKG3+APN1+AAL3+AK3)" ACONC_JULIO.nc PM25_CMAQ.nc
26 wait
27 ncap2 -A -v -s "PM25CO1=(AS01T+ACORS+ASEACAT+ACLK+AS04K+AN03K+ANH4K)" ACONC_JULIO.nc PM25_CMAQ.nc
28 wait
29 ncap2 -A -v -s "PM25AT=PM25AT" APMDIAG_JULIO.nc PM25_CMAQ.nc
30 wait
31 ncap2 -A -v -s "PM25AC=PM25AC" APMDIAG_JULIO.nc PM25_CMAQ.nc
32 wait
33 ncap2 -A -v -s "PM25CO=PM25CO" -s "PM25AC=PM25AC" -s "PM25AT=PM25AT" APMDIAG_JULIO.nc PM25_CMAQ.nc
34 wait
35 ncap2 -A -v -s "PM25=PM25ATTOTAL*PM25AT+(PM25AC1+PM25AC2+PM25AC3)*PM25AC+PM25CO1*PM25CO" PM25_CMAQ.nc PM25_CMAQ_forVISDEF.nc
```

Figura 21. Script "ejecuta.CMAQ_PM25"

Para el MP₁₀ se realiza una copia al script anterior, reemplazando el MP_{2.5} por MP₁₀.

Para ejecutar CMAQ → `"sbatch ejecuta.CMAQ_PM25.sh"` y `"ejecuta.CMAQ_PM10.sh"` así se obtienen los archivos `"PM25_CMAQ_forVISDEF.nc"` y `"PM10_CMAQ_forVISDEF.nc"`,

respectivamente. Archivos que posteriormente se llevan a VERDI para observar el comportamiento del material particulado en el periodo de estudio en relación a la velocidad y dirección el viento.

De los archivos anteriormente generados, ahora es necesario extraer la data de material particulado para cada estación, con el archivo "*extractionPM.ncl*" que al ser un archivo ncl es necesario cargar el módulo NCL:

- NCL: "*ml icc/2019.2.187-GCC-8.2.0-2.31.1 impi/2019.2.185 NCL/6.5.0*"

Y ejecutamos → "*ncl ExtractionPM.ncl*", así se generan los archivos con las nuevas concentraciones para cada estación en formato "*txt*". Luego, se juntan estos archivos en uno solo, para llevar esta información a una copia del Excel utilizado en velocidad del viento, pegando los datos desde la fecha 9 Julio a las 19 hr.

Ya con la data observada (obtenida del SINCA) y la simulada de CMAQ, se realiza el análisis en R-Studio, de la misma forma que se realizó anteriormente.

Para el MP₁₀ se realiza el mismo procedimiento, pero con los archivos correspondientes a este contaminante.

3.3.7. Temporalidad de Emisiones

Se realiza una comparación semidirecta del comportamiento de las concentraciones y las emisiones de material particulado MP_{2.5} y MP₁₀ en la ciudad de Concepción, utilizando el simulador "*tongas.eiq.cl*". Esto se realiza semana a semana donde van cambiando las emisiones de material particulado.

El periodo de simulación se dividió en 5 etapas, estas son:

- **Simulación 1:** 10 al 14 de julio, 2019
- **Simulación 2:** 15 al 21 de julio, 2019
- **Simulación 3:** 22 al 28 de julio, 2019
- **Simulación 4:** 29 de julio al 04 de agosto, 2019
- **Simulación 5:** 05 al 09 de agosto, 2019

Si bien la ciudad de Concepción cuenta con diferentes estaciones de monitoreo, donde cada una presenta diferentes concentraciones de material particulado, se selecciona la estación Kingston

College, ubicada específicamente en la comuna de Concepción. De esta se obtuvo el registro horario de las concentraciones de MP_{2.5} y MP₁₀ para el periodo de estudio.

Para cada semana se realiza lo siguiente:

- Se obtiene la cantidad de MP₁₀ para cada día de la semana y se calcula la fracción de cada día respecto al total semanal, Tabla 1

	Día	Cantidad de MP10 µg/m³	Fracción
Lunes	08	312	0.107
Martes	09	169	0.058
Miércoles	10	326	0.111
Jueves	11	713	0.243
Viernes	12	452	0.154
Sábado	13	362	0.124
Domingo	14	595	0.203
Total		2929	1

Tabla 1. Distribución del MP10 - Semana 1

- Se obtiene la cantidad de MP₁₀ para cada semana, calculando la fracción de contaminante en cada hora de cada día. Es decir, se obtiene un registro horario del contaminante para cierta hora de un día y se divide por el total diario correspondiente. Luego, se calcula el promedio de contaminante para cada hora a lo largo de los días de la semana, quedando de la siguiente forma, Tabla 2.

	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo	Fracción
00:00	0.103	0.055	0.019	0.062	0.115	0.026	0.094	0.068
01:00	0.238	0.064	0.032	0.054	0.111	0.042	0.061	0.086
02:00	0.214	0.037	0.032	0.047	0.140	0.031	0.056	0.079
03:00	0.103	0.037	0.025	0.047	0.121	0.036	0.038	0.058
04:00	0.024	0.028	0.019	0.094	0.060	0.021	0.018	0.038
05:00	0.022	0.009	0.025	0.109	0.056	0.005	0.013	0.034
06:00	0.022	0.018	0.019	0.042	0.029	0.005	0.005	0.020
07:00	0.011	0.018	0.025	0.017	0.021	0.010	0.008	0.016
08:00	0.019	0.009	0.019	0.012	0.023	0.016	0.008	0.015
09:00	0.014	0.009	0.006	0.030	0.017	0.026	0.003	0.015
10:00	0.005	0.037	0.032	0.030	0.021	0.047	0.008	0.026
11:00	0.022	0.046	0.032	0.047	0.043	0.093	0.008	0.041
12:00	0.011	0.046	0.019	0.067	0.066	0.057	0.005	0.039
13:00	0.000	0.073	0.025	0.030	0.035	0.036	0.003	0.029

14:00	0.027	0.037	0.051	0.030	0.017	0.031	0.003	0.028
15:00	0.030	0.037	0.101	0.027	0.010	0.031	0.033	0.039
16:00	0.016	0.028	0.032	0.017	0.006	0.031	0.023	0.022
17:00	0.005	0.018	0.025	0.015	0.006	0.021	0.015	0.015
18:00	0.008	0.037	0.019	0.012	0.017	0.031	0.018	0.020
19:00	0.016	0.046	0.025	0.017	0.012	0.026	0.018	0.023
20:00	0.027	0.073	0.070	0.022	0.017	0.047	0.031	0.041
21:00	0.024	0.083	0.070	0.032	0.025	0.083	0.069	0.055
22:00	0.022	0.101	0.133	0.030	0.023	0.124	0.315	0.107
23:00	0.019	0.055	0.146	0.111	0.012	0.124	0.152	0.089
								1.000

Tabla 2. Distribución horaria MP_{2.5} - Semana 1.

Una vez obtenida la información anterior, se utiliza el simulador *"tongas.eiq.cl"* y se redirige la consola a la dirección *"/home/simulador/Build_SMOKE/data/ge_dat/"* se modifica la temporalidad horaria y semanal en los scripts mencionados en el punto 3.2.3 (Simulación Inventario de Emisiones (SMOKE)). Estos valores se agregan al final de los documentos correspondientes y se le asigna un código a cada semana, indicando el año, día de inicio y término de la corrida, como por ejemplo 2019_10_14, es decir, datos obtenidos del 10 de Julio al 14 de Julio.

Cabe destacar que, si bien el 10 de Julio (miércoles) no corresponde al inicio de la semana (lunes), se toman igual los valores de la semana completa. Lo mismo para la última semana. En la misma carpeta se crea una copia del script *"amptref_tref.csv"* el cual contiene los códigos *"CSC"*, que corresponden a las emisiones, y luego buscamos el asignado previamente en los archivos fuente de área, el cual corresponde a *"2104008010"*. Ahora, las líneas que contienen ese código son las que se utilizan, posicionando la información en la parte superior del archivo de texto, como se ve en la Figura 22.

```

1 2104008010,,,,,-9,MONTHLY,485,""
2 2104008010,,,,,-9,WEEKLY,2019_1014,""
3 2104008010,,,,,-9,ALLDAY,2019_1014,""
4 0000000000,,,,,-9,MONTHLY,262,""
5 0000000000,,,,,-9,WEEKLY,7,""
6 0000000000,,,,,-9,ALLDAY,21,""

```

Figura 22. Extracto Script "amptref".

Posteriormente se realiza una copia del archivo *"TemporalidadCONCE_SEMANAESTUDIO.csv"* para cada semana, modificando las líneas 2 y 3 con el código definido previamente. Una vez listos los archivos de temporalidad, se redirige a la carpeta *"assigns"*, donde se crea una copia para cada

semana respectivamente, realizando las modificaciones al periodo de simulación, horas y días corridos, Figura 23.

```
46 setenv EPI_STDATE 2019192 # Julian start date
47 setenv EPI_STTIME 000000 # start time (H#M#SS)
48 setenv EPI_RUNLEN 1200000 # run length (H#M#SS)
49 setenv EPI_NDAY 5 # number of full run days
50 ## Per-period environment variables
51 setenv G_STDATE 2019192 # Julian start date
52 setenv G_STTIME 000000 # start time (H#M#SS)
53 setenv G_TSTEP 010000 # time step (H#M#SS)
54 setenv G_RUNLEN 1200000 # run length (H#M#SS)
55 setenv ESDATE 20190710 # Start date of emis time-based files/dirs
56 setenv MDATE 20190710 # Start date of met time-based files
57 setenv NDAY5 5 # Duration in days of each emissions file
58 setenv MDAY5 5 # Duration in days of met time-based files
59 setenv YEAR 2019 # Base year for year-specific files
60
61 setenv ATPRO_HOURLY $GE_DAT/Temporalidad@lorarioCONCE.csv # Hourly Temporal profiles
62 setenv ATREF $GE_DAT/TemporalidadCONCE_1014JUL.csv # Temporal x-ref
63 setenv GSREF $GE_DAT/gsref.$SPC.txt # Speciation x-ref
```

Figura 23. Edición Script Assigns

Posteriormente se dirige la consola a la carpeta `"/home/simulador/Build_SMOKE/subsys/smoke/scripts/run/"` para correr SMOKE, y obtener la creación de los nuevos archivos en la carpeta: `"/home/simulador/Build_SMOKE/data/run_CONCE_P/output/cmaq_cb05_soa/"` que contienen la temporalidad de las emisiones para cada semana.

3.4. Emisiones de la planta

Para estimar las emisiones de contaminantes, especialmente de material particulado (MP_{2.5} Y MP₁₀) generado por la planta de calefacción distrital, se inició con la selección de una vivienda estándar ubicada en una zona con condiciones meteorológicas similares a las de Concepción, debido a la falta de estudios específicos para esta ciudad.

La vivienda seleccionada se sitúa en la ciudad de Coyhaique. Para el presente estudio se asumió que todas las casas presentan la misma estructura y dimensiones. Se tomó en cuenta la superficie de las áreas que influyen en la demanda energética, incluyendo paredes, ventanas, techo y suelo. Cada uno presenta un coeficiente de transferencia de calor específico acorde a su material y un área de transferencia de calor definido, los cuales se presentan en la Tabla 3.

Superficie de la casa	Coficiente global de transferencia de calor W/m ² K	Área de transferencia de calor m ²
Ventanas	3.50	10
Techo	0.25	66
Suelo	0.40	66
Paredes	0.30	80

Tabla 3. Características sección de la vivienda. (Sigrist, y otros, 2012).

Adicionalmente, se estableció la temperatura promedio al interior del hogar, la cual fue determinada en base a un estudio técnico, el cual establece que la temperatura debería estar alrededor de los 20 °C para mantener el confort térmico (Chapple C, 2008). Por otro lado, se determinó la temperatura promedio al exterior del hogar para el periodo invernal (julio - agosto) del año 2019, en base a datos proporcionados por el SINCA, la cual corresponde a 11.5 °C.

Para determinar el calor requerido por cada una de las superficies mencionadas con anterioridad se utiliza la Ecuación 3.4.1 de transferencia de calor:

$$Q = U \cdot At \cdot \Delta T \quad \text{Ecuación 3.4.1}$$

Para obtener la demanda energética de cada casa, se sumó el calor requerido por cada una de las secciones de la vivienda mencionadas anteriormente.

Luego, se descargó la base de datos del último Censo (2017), la cual indica que en la ciudad existen 85.638 viviendas (INE, 2024). Dado que se tiene el calor requerido por cada vivienda, este valor se multiplicó por el total de viviendas y de esta manera se obtuvo la demanda energética total de la ciudad de Concepción.

Para continuar se seleccionó el tipo de combustible, el cual corresponde a Biomasa sólida (forestal). Este posee una eficiencia nominal de 0.84 y un poder calorífico de 15.6 MJ/Mg (Kaczmarczyk & Sowizdzal, 2024). Con esta información, mediante la Ecuación 3.4.2 se determinó la cantidad de combustible necesario para calefaccionar las viviendas.

$$B = \frac{Q}{\eta * W_o} \quad \text{Ecuación 3.4.2}$$

Luego, se determinó el factor de emisión del combustible seleccionado, correspondiente a calderas con alimentación automática de combustible que cumplen con los requisitos de Ecodiseño* y clase 5 según PN-EN 303–5:2012 con una potencia calorífica nominal ≤ 0.5 MW. En la Tabla 4 se presenta el factor de emisividad para cada contaminante:

Contaminante	Factores de emisividad g/ton
TSP	20
PM10	19
PM2.5	18
SOx	11
NOx	100

Tabla 4. Factor de emisividad de contaminantes. (Kaczmarczyk & Sowizdzal, 2024)

Una vez recopilada la información anterior, se utilizó la Ecuación 3.4.3 para calcular las emisiones generadas por la planta de calefacción para cada contaminante, con el fin de satisfacer el requerimiento energético de la ciudad de Concepción.

$$E = B * W \quad \text{Ecuación 3.4.3}$$

Las dimensiones que tendrá la chimenea de la planta de calefacción serán de 30 m de altura y 1 m de diámetro.

3.5. Ubicación de la planta

Para determinar la ubicación de la planta, se proponen cuatro puntos estratégicos, considerando la existencia de espacio disponible para su instalación y que se encuentren cercanos a la urbanización sin dañar el ecosistema, detallando la información de estas posibles ubicaciones en la Tabla 5 e ilustrado en la Figura 24 en el mapa de Concepción

Ubicación	Coordenadas decimales
Planta Norte	-36.776111, -73.054444
Planta Sur	-36.831861, -73.061111
Planta Oeste	-36.803333, -73.058611
Planta Este	-36.819750, -73.009167

Tabla 5. Coordenadas posible ubicación de la planta.

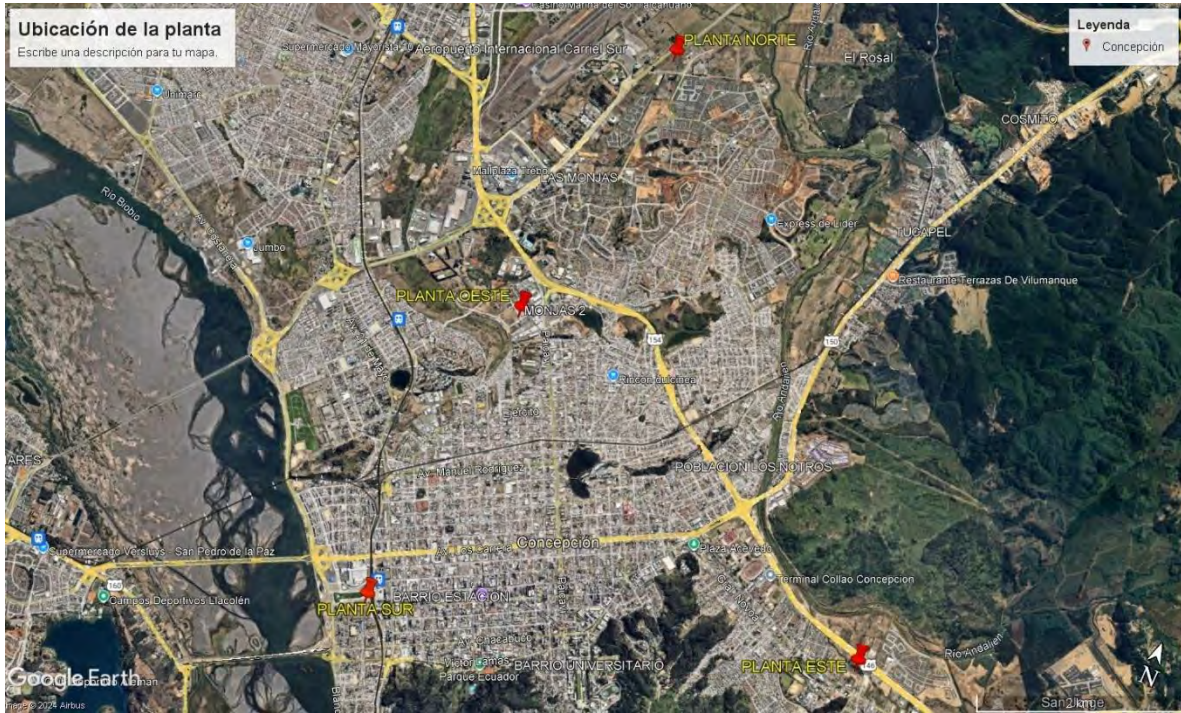


Figura 24. Puntos estratégicos para la ubicación de la planta. (Google, 2024)

Para determinar la mejor ubicación de la planta primero se debe determinar cómo afecta su instalación en las concentraciones de material particulado en la ciudad de Concepción evaluando en diferentes puntos, teniendo como foco la estación de monitoreo Kingston College, por encontrarse en la comuna de Concepción, y otros puntos aleatorios alrededor de la zona, como es posible ver en la Figura 25 con datos de la Tabla 6.



Figura 25. Puntos en el Mapa

PUNTOS	Coordenadas decimales
A	-36.755461, -73.063542
B	-36.785497, -73.089286
C	-36.7841, -73.022789
D	-36.814331, -73.080311
E	-36.805925, -73.028275
F	-36.854367, -73.049281

Tabla 6. Coordenadas de los puntos a estudiar.

Instalar una planta de calefacción en la ciudad de Concepción, implica que las concentraciones de material particulado siguen existiendo, pero se espera una disminución al reemplazar la calefacción a leña por esta red de distribución. Para estimar el efecto de la planta en la calidad del aire, y si esta contribuye a la reducción de las concentraciones se realiza el siguiente procedimiento:

Se utiliza el archivo previamente creado, “Fuente de Emisiones” con la información obtenida del RETC y del Ministerio de Medio Ambiente extraídos en el apartado 3.1 Extracción de datos, que contiene información de cada empresa en Concepción junto a sus contaminantes y cantidades, además de la ubicación geográfica, diámetro y altura de chimenea, Figura 26.

1	#FF10	POINT													
2	#IYPE	Point Source Toxics Inventory													
3	#COUNTRY	US													
4	#YEAR	2019													
5	#DESC	CentroSur 2019													
6	country,	county,	ID,	ID,	SCC,	Pollutant,	Emission,	Name,	altura(ft),	diametro(ft),	T(f),	velocidad(ft/s),	longitud,	latitud	
7	US,	92490,	,AN-	PPH-	2047,	,AN-	PPH-	2047,	,,	10300603,	CO2,	1.381150,	228,	'CIA SIDERURGICA HUACHIPATO S A',	2,18.7017,1.6405,572,0.3281,,,-73.12542139,-36.75168609
8	US,	92490,	,AN-	PPH-	2047,	,AN-	PPH-	2047,	,,	10300603,	VOC,	61.98774824,	'CIA SIDERURGICA HUACHIPATO S A',	2,18.7017,1.6405,572,0.3281,,,-73.12542139,-36.75168609	
9	US,	92490,	,AN-	PPH-	2047,	,AN-	PPH-	2047,	,,	10300603,	CO,	6.825849873,	'CIA SIDERURGICA HUACHIPATO S A',	2,18.7017,1.6405,572,0.3281,,,-73.12542139,-36.75168609	
10	US,	92490,	,AN-	PPH-	2047,	,AN-	PPH-	2047,	,,	10300603,	PM10,	0.617576893,	'CIA SIDERURGICA HUACHIPATO S A',	2,18.7017,1.6405,572,0.3281,,,-73.12542139,-36.75168609	
11	US,	92490,	,AN-	PPH-	2047,	,AN-	PPH-	2047,	,,	10300603,	PM2_5,	0.617576893,	'CIA SIDERURGICA HUACHIPATO S A',	2,18.7017,1.6405,572,0.3281,,,-73.12542139,-36.75168609	
12	US,	92490,	,AN-	PPH-	2047,	,AN-	PPH-	2047,	,,	10300603,	PM,	0.617576893,	'CIA SIDERURGICA HUACHIPATO S A',	2,18.7017,1.6405,572,0.3281,,,-73.12542139,-36.75168609	
13	US,	92490,	,AN-	PPH-	2047,	,AN-	PPH-	2047,	,,	10300603,	NH3,	0.260032376,	'CIA SIDERURGICA HUACHIPATO S A',	2,18.7017,1.6405,572,0.3281,,,-73.12542139,-36.75168609	
14	US,	92490,	,AN-	PPH-	2047,	,AN-	PPH-	2047,	,,	10300603,	SO2,	0.04875607,	'CIA SIDERURGICA HUACHIPATO S A',	2,18.7017,1.6405,572,0.3281,,,-73.12542139,-36.75168609	
15	US,	92490,	,AN-	PPH-	2047,	,AN-	PPH-	2047,	,,	10300603,	PM2_5,	0.039925325,	'CIA SIDERURGICA HUACHIPATO S A',	2,18.7017,1.6405,572,0.3281,,,-73.12542139,-36.75168609	
16	US,	92490,	,AN-	PPH-	2047,	,AN-	PPH-	2047,	,,	10300603,	PM10,	0.000276285,	'CIA SIDERURGICA HUACHIPATO S A',	2,18.7017,1.6405,572,0.3281,,,-73.12542139,-36.75168609	
17	US,	92490,	,AN-	PPH-	2047,	,AN-	PPH-	2047,	,,	10300603,	PM2_5,	0.000170646,	'CIA SIDERURGICA HUACHIPATO S A',	2,18.7017,1.6405,572,0.3281,,,-73.12542139,-36.75168609	
18	US,	92490,	,AN-	PPH-	2047,	,AN-	PPH-	2047,	,,	10300603,	NOX,	4.06749E-05,	'CIA SIDERURGICA HUACHIPATO S A',	2,18.7017,1.6405,572,0.3281,,,-73.12542139,-36.75168609	
19	US,	92490,	,AN-	PPH-	2047,	,AN-	PPH-	2047,	,,	10300603,	SO2,	1.62038E-05,	'CIA SIDERURGICA HUACHIPATO S A',	2,18.7017,1.6405,572,0.3281,,,-73.12542139,-36.75168609	

Figura 26. Script Fuente de Emisiones.

A final de este archivo se incluyen los datos de la planta de calefacción distrital presentada, incluyendo la cantidad de emisiones por contaminante (CO₂, VOC, CO, PM10, PM2_5, etc.) según corresponda en la línea y con datos obtenidos en el apartado de emisiones de la planta. Además del nombre de la planta, altura y diámetro de chimenea por donde saldrán los gases y la velocidad de estos. El final de la línea corresponde a ubicación geográfica que tendrá la planta, por lo que se crea un archivo diferente para cada una de las posibles ubicaciones, utilizando los datos de la Tabla 5. La Figura 27 ejemplifica para específicamente la planta sur lo recién mencionado.

```

US,92490,,PLANTA-2047,,PLANTA-2047,,,,,10300502,VOC,294.529,,,'PLANTA CALEFACCION',2,98.4252,3.28,300,3.281,,,-73.06110,-36.83187
US,92490,,PLANTA-2047,,PLANTA-2047,,,,,10300502,PM10,2244.03,,,'PLANTA CALEFACCION',2,98.4252,3.28,300,3.281,,,-73.06110,-36.83187
US,92490,,PLANTA-2047,,PLANTA-2047,,,,,10300502,PM2_5,2125.92,,,'PLANTA CALEFACCION',2,98.4252,3.28,300,3.281,,,-73.06110,-36.83187
US,92490,,PLANTA-2047,,PLANTA-2047,,,,,10300502,NOX,11810.072,,,'PLANTA CALEFACCION',2,98.4252,3.28,300,3.281,,,-73.06110,-36.83187
US,92490,,PLANTA-2047,,PLANTA-2047,,,,,10300502,SO2,1299.17,,,'PLANTA CALEFACCION',2,98.4252,3.28,300,3.281,,,-73.06110,-36.83187

```

Figura 27. Líneas Script Planta Sur.

Dado que para cada una de las ubicaciones se realiza el mismo procedimiento, se procede a explicar de forma general:

En el simulador “*tongas.eiq.cl*” se procede a editar el archivo “*ptinv.point.lst*” que contiene la lista de archivos que va a utilizar, los cuales corresponden a:

- “*/home/simulador/Build_SMOKE/data/inventory/CONCE_P/point/FUENTES_FIJAS_BIOBIO_SMOKE_Planta.csv*”
- */home/simulador/Build_SMOKE/data/inventory/CONCE_P/point/FUENTES_FIJAS_NUBLE_SMOKE.csv*

Para continuar, se redirige la consola a la carpeta “*/home/simulador/Build_SMOKE/subsys/smoke/scripts/run/*” donde se ejecuta: “*./smk_point_CONCE_pino.csh*” y dando inicio a la corrida.

Los archivos generados se encuentran en la carpeta “*/home/simulador/Build_SMOKE/data/run_CONCE_P/output/merge/*” donde se corrobora que se generaron correctamente.

Posteriormente, estos archivos correspondientes a *"stack_groups.point.Puntuales.CONCE_P.ncf"* y *"inlnts_l.point.20190701.40.Puntuales.CONCE_P.ncf"* se llevan al simulador "NLHPC" y se disponen en la carpeta asociada a la ubicación correspondiente en la siguiente ruta *"/home/epino/CMAQ_v5.3/data/inventario_fondecyt/Concepcion/Puntuales/Dominio04/"*.

Luego, se redirige la consola a la carpeta: *"/home/epino/CMAQ_v5.3/CCTM/scripts/scripts_CONCE/"* donde se encuentran los archivos por cada periodo. Aquí se consideran solo los siguientes:

- *"run_cctm_CONCE_01.csh"*
- *"run_cctm_CONCE_02.csh"*

En estos se modifica la ruta en la que se encuentran los archivos *"stack"* y *"inlnts"* generados anteriormente y el nombre asociado a la ubicación según corresponda. Luego, estos mismos se activan y ejecutan en el archivo *"sbatch_cctmCONCE.csh"*, dando como resultado archivos de tipo *'CCTM_ACONC_v53_intel.nc"* y *"CCTM_APMDIAG_v53_intel.nc"*, los cuales se encuentran en la dirección *"/home/epino/CMAQ_v5.3/data/"* con carpetas diferentes para cada ubicación.

Desde acá se sigue el mismo procedimiento que en el apartado 3.3.6 "Material Particulado", pero esta vez se modifica el archivo *"ExtractionPM.ncl"* donde en vez de obtener datos para cada estación de monitoreo se obtiene para cada uno de los puntos propuesto en la Tabla 6. Manteniendo únicamente la estación de Kingston College, quedando como la Figura 28. Obteniendo la data de material particulado para cada posible ubicación.

```

14     ID="01"
15     Estacion="Punto_A"
16         COL = 110
17         ROW = 113
18
19     PM25 = a->PM25(:,0,ROW,COL)
20     PM10 = c->PM10(:,0,ROW,COL)
21
22     asciiwrite("Concentraciones_PM25"+ID+Estacion+".txt",PM25)
23     asciiwrite("Concentraciones_PM10"+ID+Estacion+".txt",PM10)
24
25
26     ID="02"
27     Estacion="Punto_B"
28         COL = 108
29         ROW = 109
30
31     PM25 = a->PM25(:,0,ROW,COL)
32     PM10 = c->PM10(:,0,ROW,COL)
33
34     asciiwrite("Concentraciones_PM25"+ID+Estacion+".txt",PM25)
35     asciiwrite("Concentraciones_PM10"+ID+Estacion+".txt",PM10)
36
37
38     ID="03"
39     Estacion="Kingston_College"
40         COL = 111
41         ROW = 109
42
43     PM25 = a->PM25(:,0,ROW,COL)
44     PM10 = c->PM10(:,0,ROW,COL)
45
46     asciiwrite("Concentraciones_PM25"+ID+Estacion+".txt",PM25)
47     asciiwrite("Concentraciones_PM10"+ID+Estacion+".txt",PM10)
48

```

Figura 28. Extracto script "ExtractionPM.ncl" para puntos.

Con el fin de comparar la variación de las concentraciones de material particulado, se utiliza el script mencionado en la Figura 28 para obtener la data simulada en los mismos puntos ya mencionados con anterioridad y así comparar con los datos originales para determinar la ubicación de la planta.

3.5.1. Reducción Material Particulado con Planta de Calefacción

Obtenidos los archivos del escenario base que contienen información de las concentraciones de $MP_{2.5}$ y MP_{10} y las concentraciones de la simulación de la planta que generan estos mismos contaminantes, se proceden a descargar y se llevan a Microsoft Excel. En esta herramienta se analizan los resultados de la ubicación sur, norte, este, oeste y el escenario base. Para cada una de estas ubicaciones se calcula el promedio de las concentraciones en cada uno de los puntos a estudiar, incluyendo la estación Kingston College que se encuentra en la ciudad de Concepción.

A continuación, en la Tabla 7 y Tabla 8 se presentan los promedios obtenidos para cada ubicación tanto para $MP_{2.5}$ y MP_{10} :

CONCENTRACIONES MP _{2.5} µg/m ³							
UBICACIÓN	PUNTO A	PUNTO B	KINGSTON COLLEGE	PUNTO C	PUNTO D	PUNTO E	PUNTO F
Sur	5.842	8.311	7.315	4.759	15.977	6.800	7.551
Norte	14.744	8.047	45.211	8.220	11.536	9.376	9.596
Oeste	9.338	10.441	16.967	6.356	20.605	9.937	6.343
Este	5.195	4.360	6.983	8.651	5.994	14.217	10.639
Base	12.027	36.402	21.949	11.536	20.064	27.654	9.099

Tabla 7. Promedio de concentraciones de MP_{2.5}.

CONCENTRACIONES MP ₁₀ µg/m ³							
UBICACIÓN	PUNTO A	PUNTO B	KINGSTON COLLEGE	PUNTO C	PUNTO D	PUNTO E	PUNTO F
Sur	19.607	21.991	20.929	18.107	29.817	20.286	20.055
Norte	28.765	21.697	59.780	21.662	25.006	23.002	23.141
Oeste	23.203	24.186	30.855	19.747	34.494	23.508	18.822
Este	18.949	17.924	20.600	22.114	19.539	27.913	23.238
Base	25.898	50.555	35.826	25.006	33.866	41.543	21.601

Tabla 8. Promedio de concentraciones de MP₁₀.

Luego, mediante la ecuación 3.5.1.1 se calcula la reducción porcentual de las concentraciones de MP_{2.5} y MP₁₀.

$$Reducción \% = \frac{\bar{X}_{base} - \bar{X}_{simulado}}{\bar{X}_{base}} * 100 \quad \text{Ecuación 3.5.1.1}$$

4. Resultados

4.1. Simulación escenario base

Si bien se realizó análisis estadístico para todas las estaciones de monitoreo que presentasen información, solo se muestran las gráficas de la estación de Kingston College dado que es la única que se presenta específicamente en la comuna de Concepción.

4.1.1. Humedad Relativa

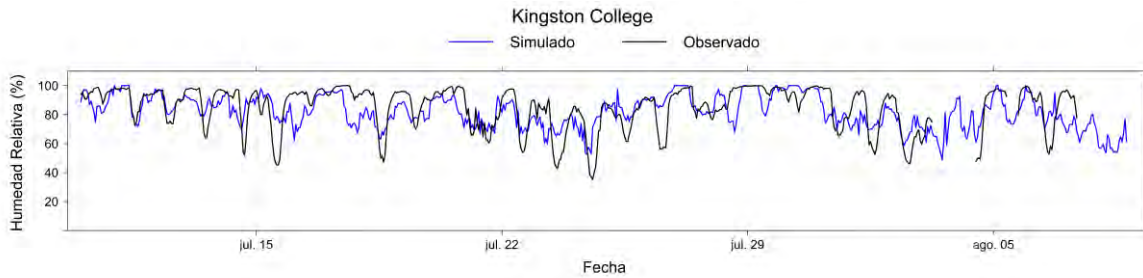


Figura 29. Humedad Relativa Kingston College.

Estación	MB	MGE	RMSE	IOA
Punteras	-3.651	10.741	14.843	0.521
Kingston College	-1.721	9.256	12.040	0.609
Hualqui	0.463	7.137	9.387	0.594
Liceo Polivalente	-6.311	10.555	13.106	0.575
Consultorio San Vicente	5.988	8.421	11.036	0.607

Tabla 9. Análisis Estadístico Humedad Relativa

- **MB:** la mayoría de las localidades presentan valores negativos de MB, lo que sugiere que el modelo tiende a subestimar los datos observados, siendo Liceo Polivalente la que presenta mayor sesgo.
- **MGE:** todas las localidades presentan valores de MGE que indican la existencia de errores aleatorios significativos, siendo Liceo Polivalente y Punteras quienes muestra mayor error.
- **RMSE:** nuevamente existe una menor precisión del modelo, dado que los valores están alejados de lo esperado.
- **IOA:** se han obtenido valores positivos cercanos a 1, por lo que el modelo se ajusta a los datos reales.

4.1.2. Temperatura

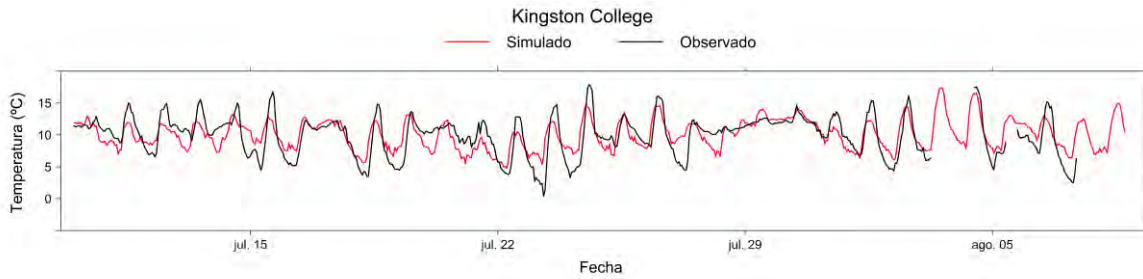


Figura 30. Temperatura Kingston College.

Estación	MB	MGE	RMSE	IOA
Punteras	1.465	2.206	2.845	0.566
Kingston College	0.086	1.759	2.186	0.649
Hualqui	0.899	2.702	3.367	0.639
Liceo Polivalente	0.454	1.385	1.739	0.638
Consultorio San Vicente	-1.225	2.067	2.514	0.501

Tabla 10. Análisis Estadístico Temperatura.

- **MB:** la mayoría de las localidades presentan valores positivos de MB, lo que sugiere que el modelo tiende a sobreestimar los datos observados, excluyendo Consultorio San Vicente que sugiere una subestimación de los datos.
- **MGE:** todas las localidades presentan valores de MGE que indican la existencia de errores aleatorios significativos.
- **RMSE:** Hualqui es quien muestra una menor precisión, mientras que las demás localidades presentan valores mayores al esperado, pero aceptables.
- **IOA:** los valores obtenidos son cercanos a 1, indicando buen ajuste del modelo.

4.1.3. Velocidad del Viento

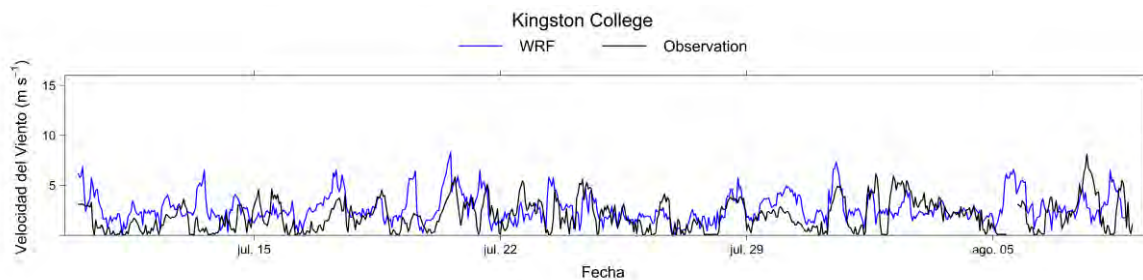


Figura 31. Velocidad del Viento Kingston College.

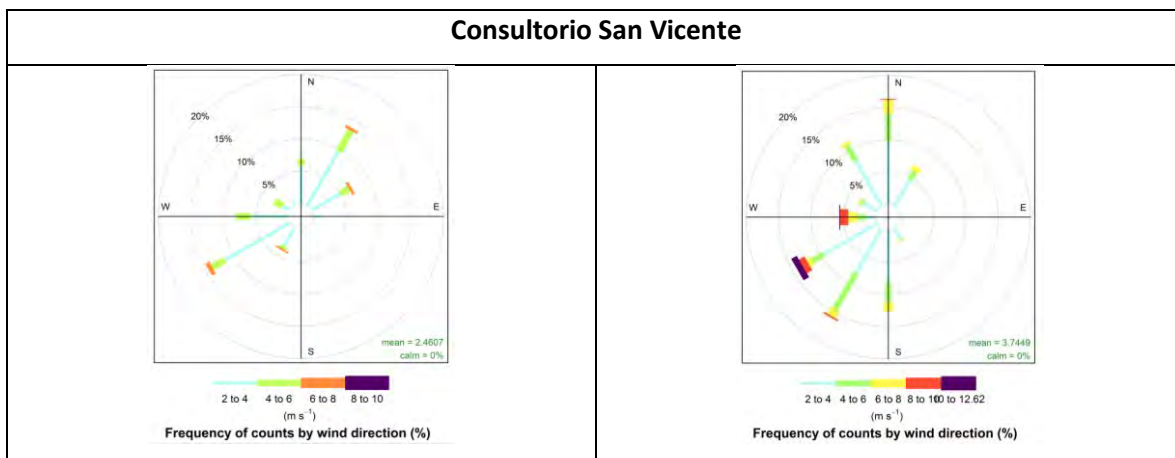
Estación	MB	MGE	RMSE	IOA
Consultorio San Vicente	1.285	1.558	2.042	0.355
Hualqui	2.945	2.949	3.498	-0.773
Kingston College	0.701	1.464	1.859	0.425
Liceo Polivalente	1.164	1.552	1.911	0.298
Nueva Libertad	0.292	1.410	1.916	0.347
Punteras	1.602	2.109	2.756	0.206

Tabla 11. Análisis Estadístico de Velocidad del Viento.

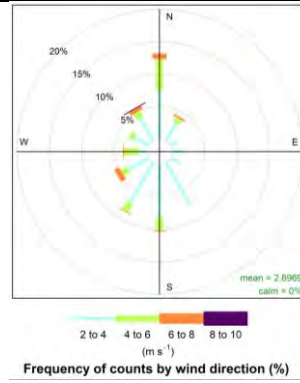
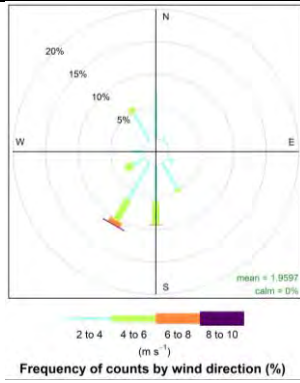
- **MB:** la mayoría de las localidades presentan valores positivos de MB, lo que sugiere que el modelo tiende a sobreestimar los datos observados, siendo Hualqui la que presenta mayor sesgo.
- **MGE:** todas las localidades presentan valores de MGE que indican la existencia de errores aleatorios significativos, siendo Hualqui quien muestra mayor error.
- **RMSE:** Hualqui es quien muestra nuevamente una menor precisión, mientras que las demás localidades presentan valores aceptables.
- **IOA:** Hualqui muestra un valor negativo, sin embargo, las demás localidades muestran valores aceptables.

4.1.4. Dirección del Viento

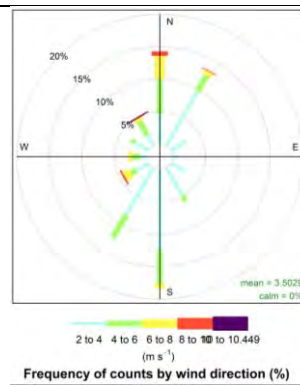
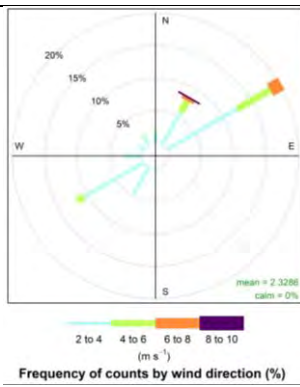
A continuación, se presentan las rosas de los vientos obtenidas para las estaciones de monitoreo que presentaban información, al lado izquierdo está con los datos observados y al derecho con datos simulados.



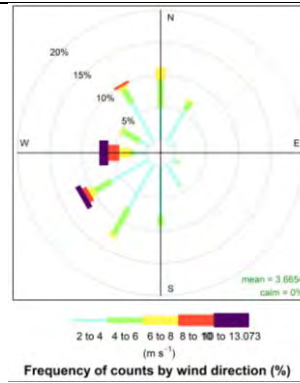
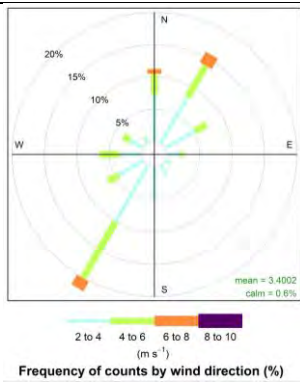
Kingston College



Liceo Polivalente



Nueva Libertad



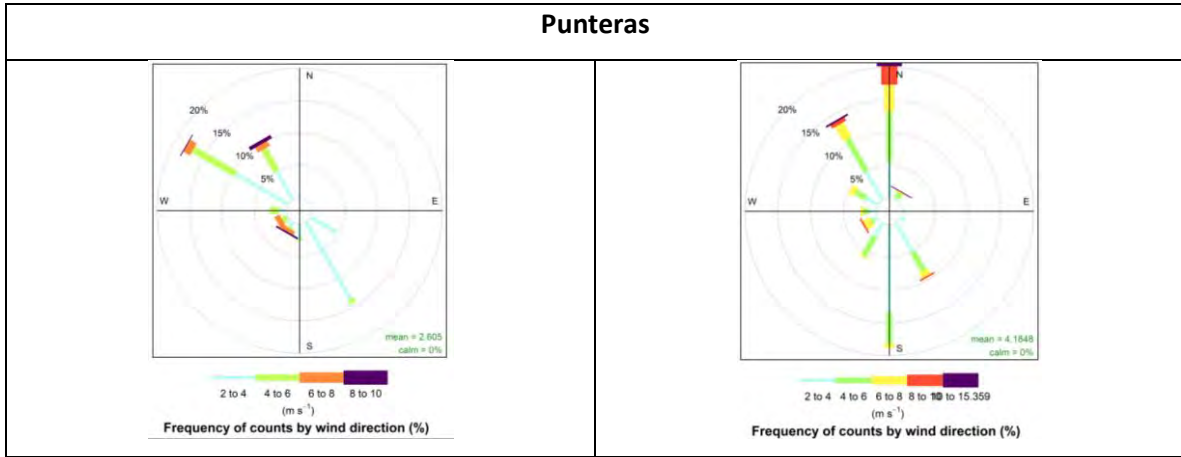


Tabla 12. Rosa de Los Vientos Observada vs Simulada

La forma de realizar la comparación del modelo simulado con los datos observados es a través del análisis a la rosa de los vientos, la cual muestra la distribución de la velocidad y dirección del viento en un lugar seleccionado.

Tras analizar las estaciones de monitoreo que presentaban información, es posible evidenciar que no hay una clara tendencia de la dirección del viento, respecto a la frecuencia con la que este se mueve, salvo que presenta una menor tendencia hacia el noreste y sureste. Además, al contrarrestar la data observada con la simulada no hay gran similitud, salvo las tendencias antes mencionadas.

Información que sirve para tener referencia del comportamiento de los contaminantes y así poder estimar donde ubicar la planta.

4.1.5. Material Particulado

4.1.5.1. MP_{2.5}

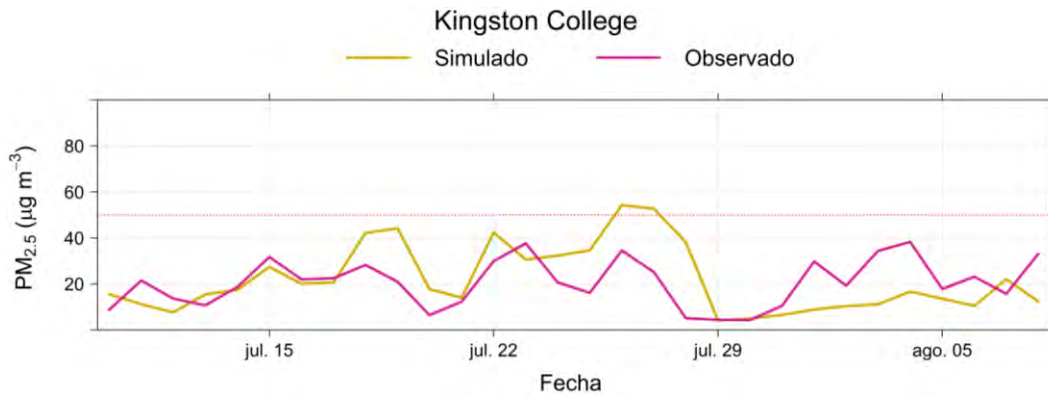


Figura 32. MP_{2.5} - Estación Kingston College.

Estación	MB	MGE	RMSE	IOA
Bocatoma	20.590	24.365	38.053	-0.307
Cerro Merquín	7.371	9.120	12.700	-0.409
Consultorio San Vicente	-11.032	15.099	19.601	0.446
ENAP	-1.301	8.181	10.497	0.361
Hualqui	-30.789	30.789	32.755	-0.410
INDURA	10.647	15.842	23.586	0.197
INPESCA	-16.022	18.222	25.983	0.541
JUNJI	-24.155	26.612	32.850	0.364
Kingston College	1.413	11.364	14.390	0.315
Liceo Polivalente	-5.100	10.681	13.709	0.493
Nueva Libertad	-3.490	15.178	18.688	0.423
Punteras	-21.533	22.719	27.297	0.133

Tabla 13. Análisis Estadístico MP_{2.5}

- **MB:** acá los valores se encuentran bastante alejados de cero, presentando tanto valores positivos como negativos, lo que indica una sobreestimación y subestimación de los datos.
- **MGE:** nuevamente los valores se encuentran alejados del cero, lo que indican altos errores aleatorios.

- **RMSE:** se han obtenido valores muy altos, lo que indica muy poca precisión del modelo utilizado.
- **IOA:** a diferencia de los otros parámetros estadísticos, se han obtenido valores cercanos a uno, tanto positivos como negativos, lo que sugiere de todas formas que el modelo se adapta bien.

4.1.5.2. MP₁₀

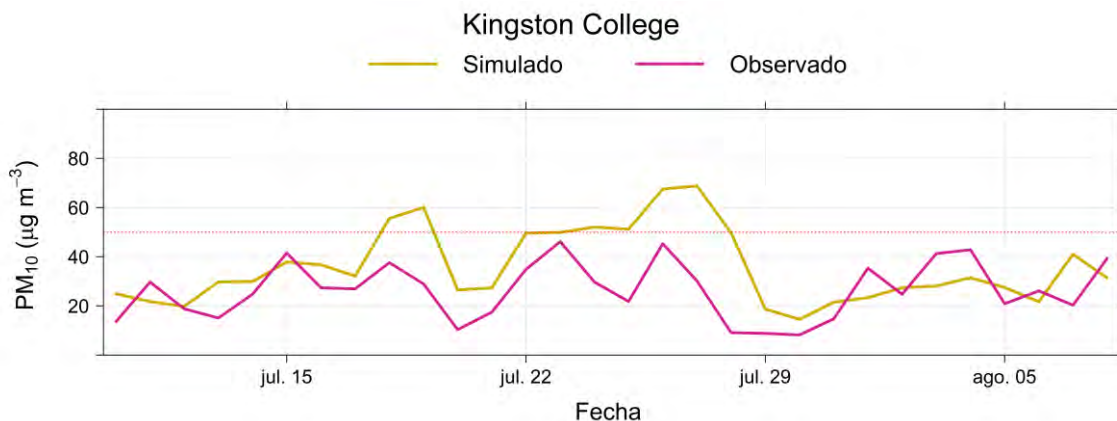


Figura 33. MP10 - Estación Kingston College.

Estación	MB	MGE	RMSE	IOA
Bocatoma	29.142	30.933	43.081	-0.458
Cerro Merquín	20.696	20.696	23.388	-0.739
Consultorio San Vicente	-17.830	21.511	29.620	0.484
ENAP	1.061	8.523	11.161	0.453
Hualqui	-25.614	25.614	27.428	-0.229
INDURA	9.862	15.276	23.321	0.307
INPESCA	-12.284	17.623	24.089	0.563
JUNJI	-18.670	23.040	29.252	0.449
Kingston College	9.525	13.564	16.964	0.279
Liceo Polivalente	0.779	11.073	13.992	0.528
Nueva Libertad	-22.626	27.689	37.648	0.466
Punteras	-13.676	15.991	21.423	0.384

Tabla 14. Análisis Estadístico MP10.

- **MB:** se observa que la estación Liceo Polivalente se ajusta un poco mejor al modelo. No así los valores de las demás estaciones, ya que se alejan bastante de cero, tomando valores positivos y negativos que indican sobreestimación y subestimación de los datos respectivamente.

- **MGE:** los valores obtenidos se alejan muy de cero, lo cual indica la existencia de altos errores aleatorios.
- **RMSE:** los valores se alejan bastante de cero, lo cual indica una baja precisión del modelo.
- **IOA:** a diferencia de los otros parámetros, los valores obtenidos se acercan bastante a uno, lo cual indica un buen ajuste del modelo de simulación a los datos observados.

4.1.6. Temporalidad de emisiones

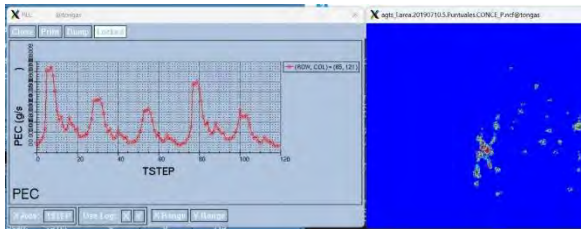


Figura 34. Temporalidad de emisiones - Semana 1

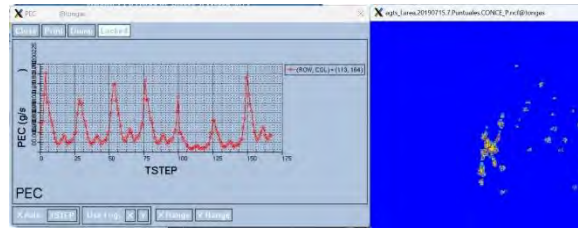


Figura 35. Temporalidad de emisiones - Semana 2

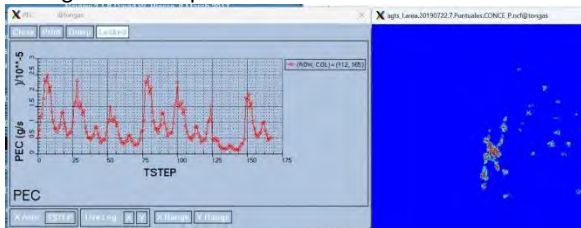


Figura 36. Temporalidad de emisiones - Semana 3

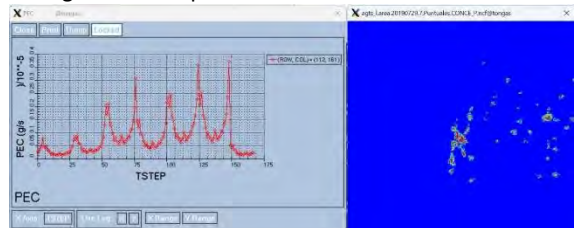


Figura 37. Temporalidad de emisiones Semana 4

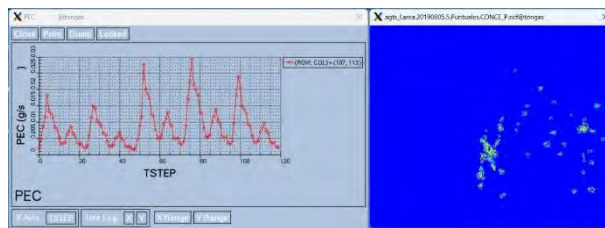


Figura 38. Temporalidad de emisiones Semana 4

Para el análisis de temporalidad de emisiones se ve que no todas las semanas se comportan de la misma manera, habiendo puntos de mayor y menor concentración. Evidenciándolo en el comportamiento de las gráficas y por el color rojo (que indica mayor foco de concentración) del mapa, siendo la semana 1 y 3 las con mayor concentración.

4.2. Emisiones de la planta

En la Tabla 15 se presentan los resultados del requerimiento energético por cada sección de la vivienda:

Sección de vivienda	Q [W]
Paredes	203.15
Ventana	296.26
Techo	139.67
Suelo	223.47

Tabla 15. Calor requerido por cada sección de la vivienda.

De los valores obtenidos se puede apreciar que las ventanas son la sección de la casa que más energía requieren, esto puede tener relación con la alta exposición al exterior y las pérdidas de calor.

A continuación, se presentan los resultados correspondientes a la demanda energética de una vivienda y del total de viviendas presentes en la ciudad de Concepción, que corresponde a 85638.

N° viviendas	Q [W]
1	862.54
85638	73866435.17

Tabla 16. Calor total requerido por cantidad de viviendas.

La demanda energética total para calefaccionar la ciudad es bastante considerable, lo cual resalta la importancia de implementar estrategias eficientes de uso de energía.

En el siguiente apartado se muestra la cantidad de combustible necesario para calefaccionar las viviendas de Concepción:

Combustible	Cantidad [ton/s]
Biomasa sólida forestal	6.582E-05

Tabla 17. Combustible necesario para satisfacer la demanda.

Finalmente, las emisiones de contaminantes generadas por la planta de calefacción se muestran en la Tabla 18:

Contaminante	Emisiones [ton/año]
MP _{2.5}	2125.92
MP ₁₀	2244.03
VOC	294.53
NO _x	11810.072
SO ₂	1299.17

Tabla 18. Emisiones de contaminantes.

De las emisiones de contaminantes se observan altas concentraciones, ya que se debe considerar que la planta abastecerá de energía a toda la ciudad.

4.3. Ubicación Planta

4.3.1. Planta Sur

4.3.1.1. MP_{2.5}

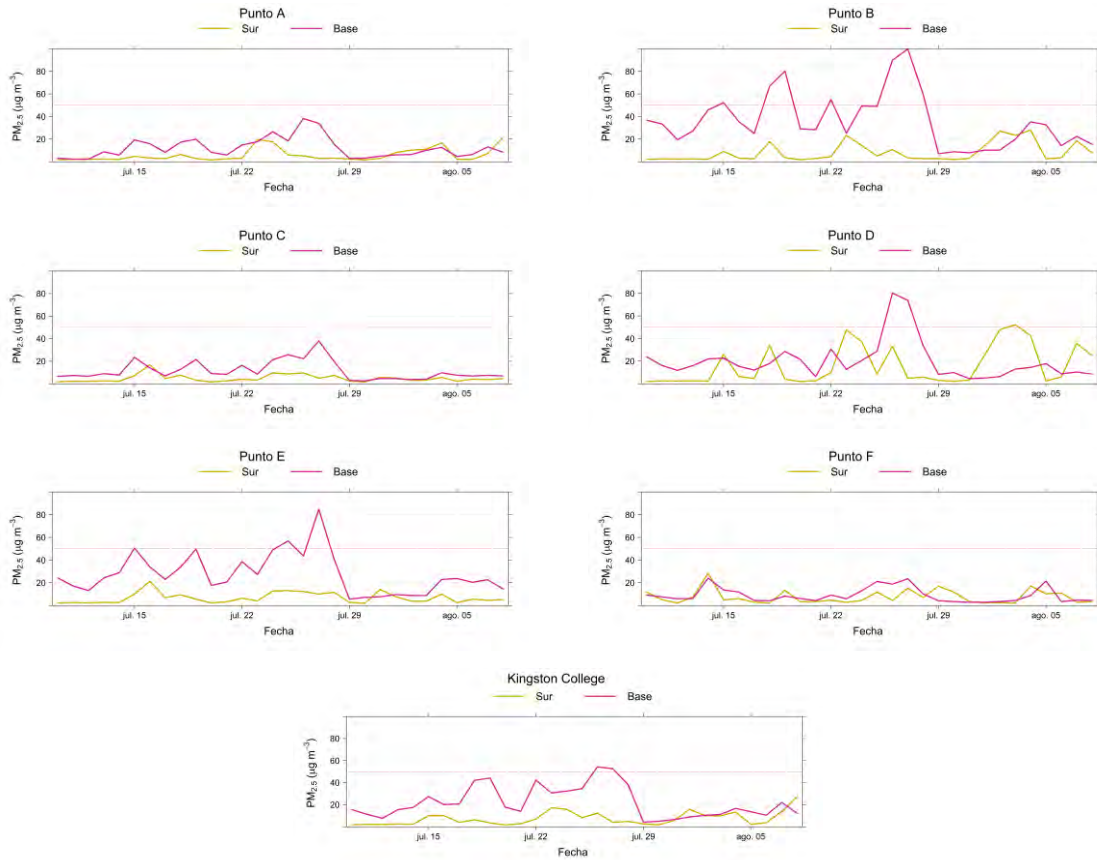


Figura 39. Gráficas PM_{2.5} Planta Sur.

Puntos	MB	MGE	RMSE	IOA
A	-6.094	7.831	11.225	0.451
B	-28.087	29.705	38.348	0.216
C	-6.774	7.063	9.931	0.468
D	-3.935	20.018	24.830	0.093
E	-20.875	21.304	26.279	0.225
F	-1.534	4.961	6.268	0.516
Kingston College	-14.518	15.936	20.709	0.332

Tabla 19. Estadísticas MP_{2.5} Planta Sur.

4.3.1.2. MP₁₀

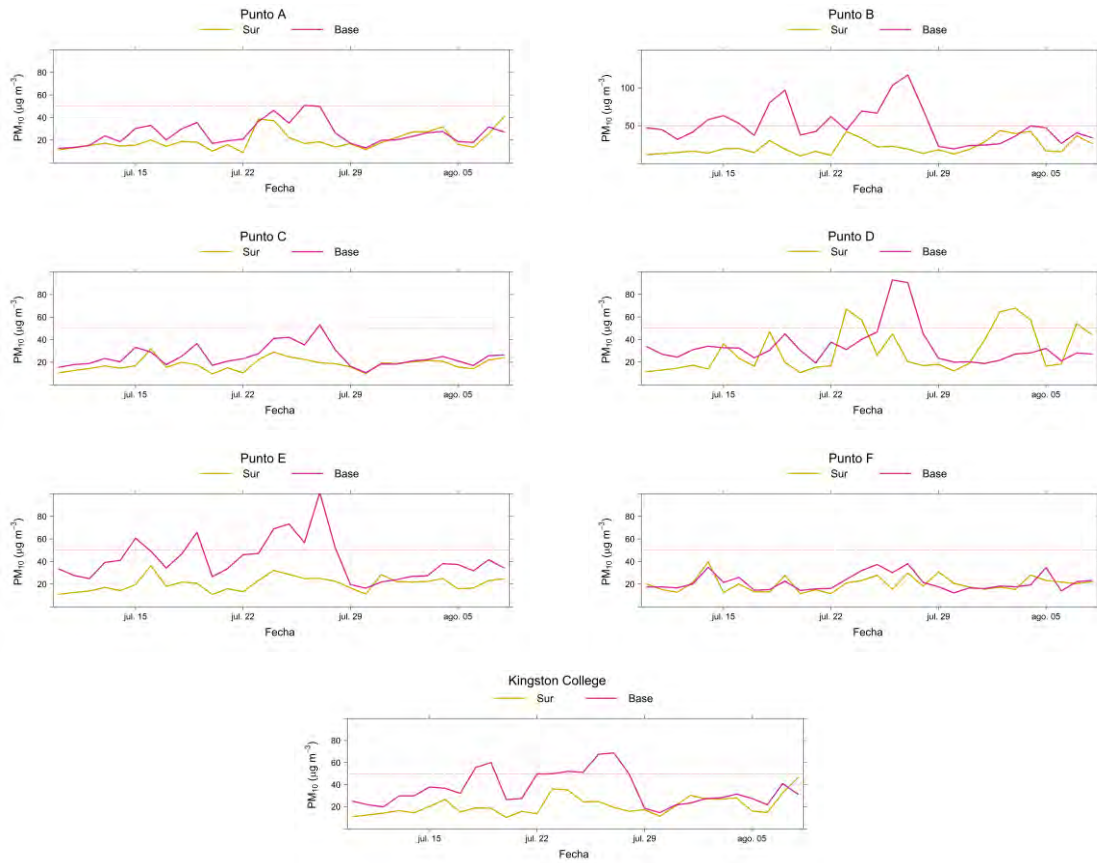


Figura 40. Estadísticas MP₁₀ Planta Sur.

Punto	MB	MGE	RMSE	IOA
A	-6.197	7.983	11.436	0.516
B	-28.561	30.227	39.000	0.203
C	-6.896	7.199	10.119	0.490
D	-3.894	20.485	25.377	0.045
E	-21.279	21.717	26.766	0.225
F	-1.532	5.069	6.404	0.568
Kingston College	-14.776	16.236	21.084	0.355

Tabla 20. Estadísticas MP₁₀ Planta Sur.

4.3.2. Planta Norte

4.3.2.1. MP_{2.5}

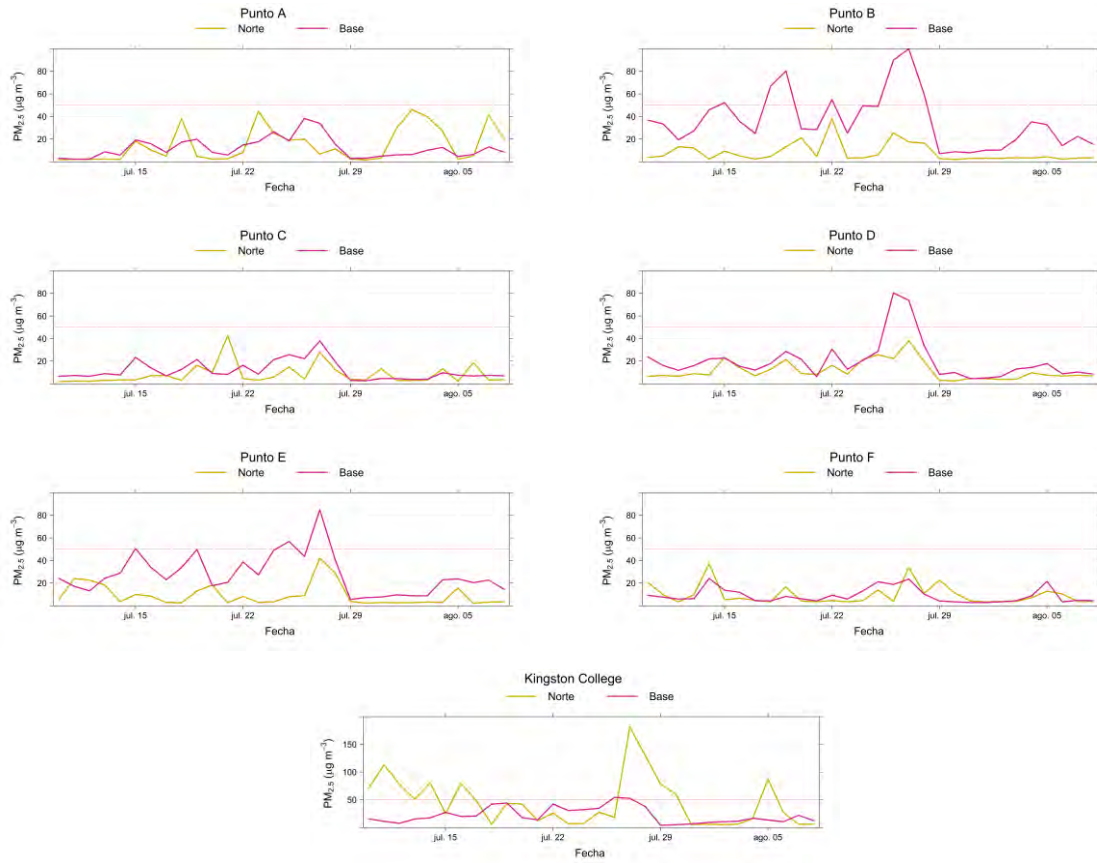


Figura 41. Estadísticas MP_{2.5} Planta Norte.

Punto	MB	MGE	RMSE	IOA
A	2.800	10.221	15.088	0.283
B	-28.384	28.384	35.024	0.251
C	-3.318	7.391	10.229	0.443
D	-8.522	8.760	14.514	0.603
E	-18.356	19.493	23.900	0.291
F	0.511	5.197	7.093	0.493
Kingston College	23.101	35.572	49.155	-0.330

Tabla 21. Estadísticas MP_{2.5} Planta Norte.

4.3.2.1. MP₁₀

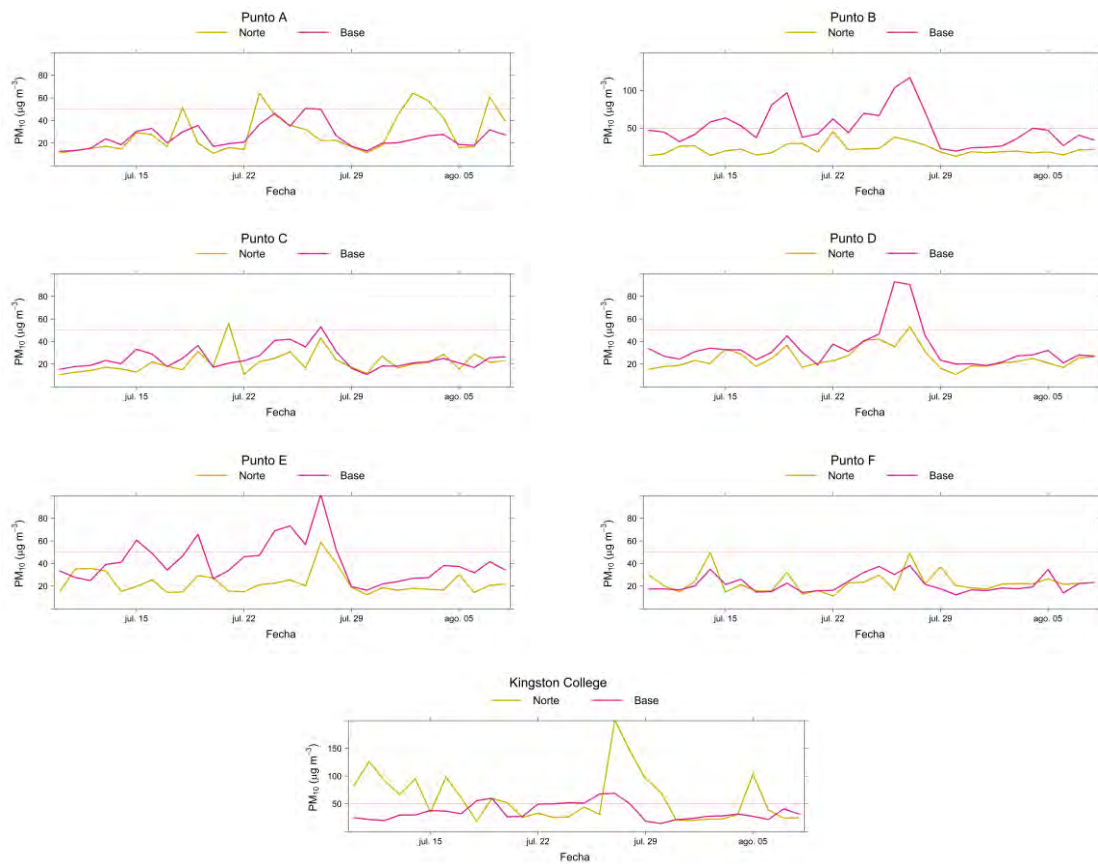


Figura 42. Estadísticas MP₁₀ Planta Norte.

Puntos	MB	MGE	RMSE	IOA
A	2.953	10.472	15.501	0.365
B	-28.889	28.889	35.624	0.238
C	-3.346	7.555	10.482	0.464
D	-8.854	9.046	14.699	0.578
E	-18.617	19.879	24.193	0.290
F	1.545	5.550	7.425	0.527
Kingston College	23.790	36.518	50.494	-0.310

Tabla 22. Estadísticas MP₁₀ Planta Norte.

4.3.3. Planta Este

4.3.3.1. MP_{2.5}

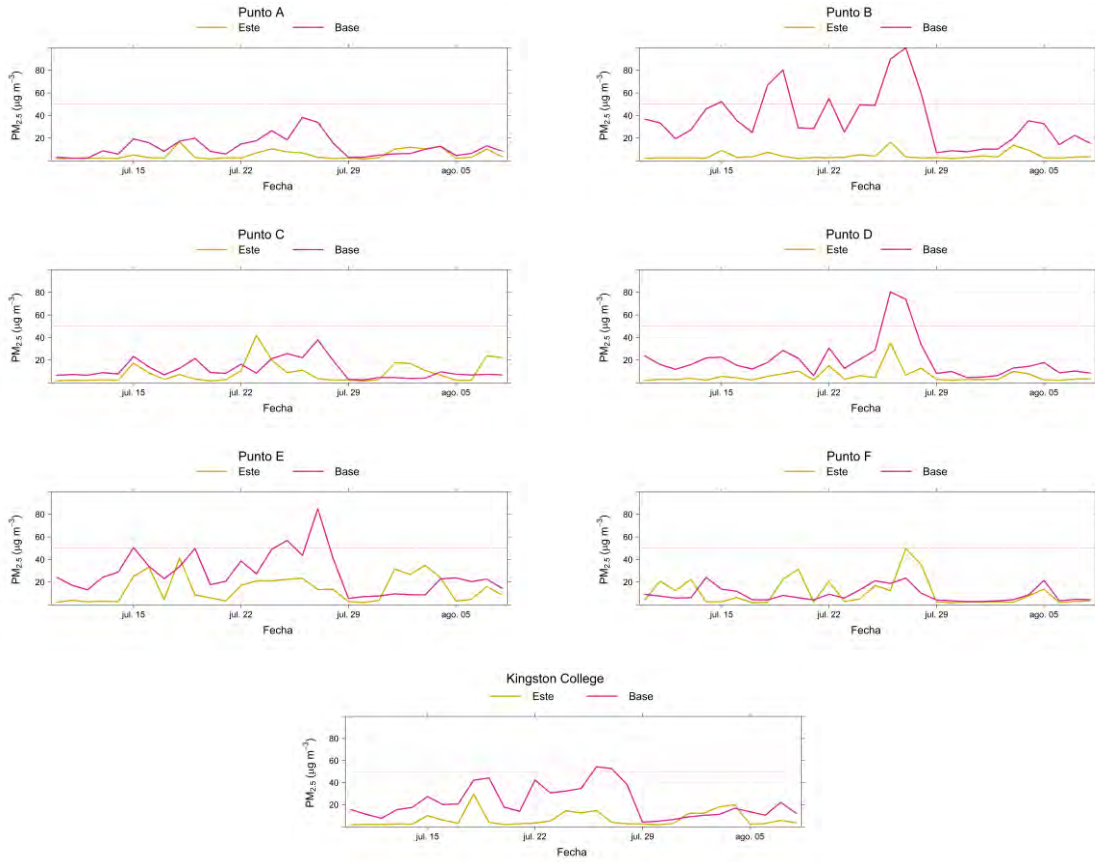


Figura 43. Estadísticas MP_{2.5} Planta Este.

Puntos	MB	MGE	RMSE	IOA
A	-6.864	7.549	11.077	0.471
B	-32.070	32.070	39.464	0.153
C	-2.758	9.327	12.493	0.297
D	-14.069	14.069	19.220	0.363
E	-13.434	18.401	23.155	0.331
F	1.546	7.686	11.035	0.250
Kingston College	-15.010	16.013	20.365	0.329

Tabla 23. Estadísticas MP_{2.5} Planta Este.

4.3.3.2. MP10

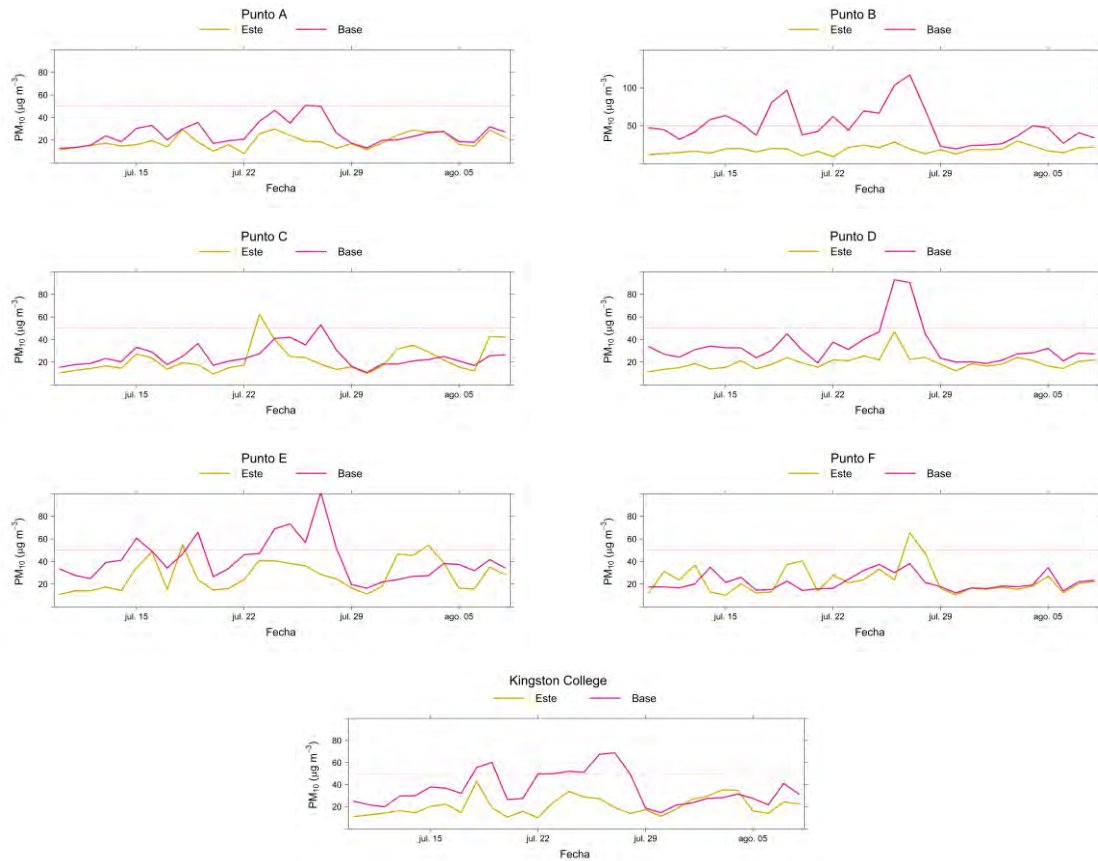


Figura 44. Estadísticas MP10 Planta Este.

Punto	MB	MGE	RMSE	IOA
A	-6.982	7.689	11.280	0.534
B	-32.661	32.661	40.152	0.139
C	-2.761	9.533	12.792	0.324
D	-14.327	14.327	19.535	0.332
E	-13.626	18.766	23.585	0.330
F	1.643	7.857	11.313	0.331
Kingston College	-15.270	16.309	20.731	0.353

Tabla 24. Estadísticas MP10 Planta Este.

4.3.4. Planta Oeste

4.3.4.1. MP_{2.5}

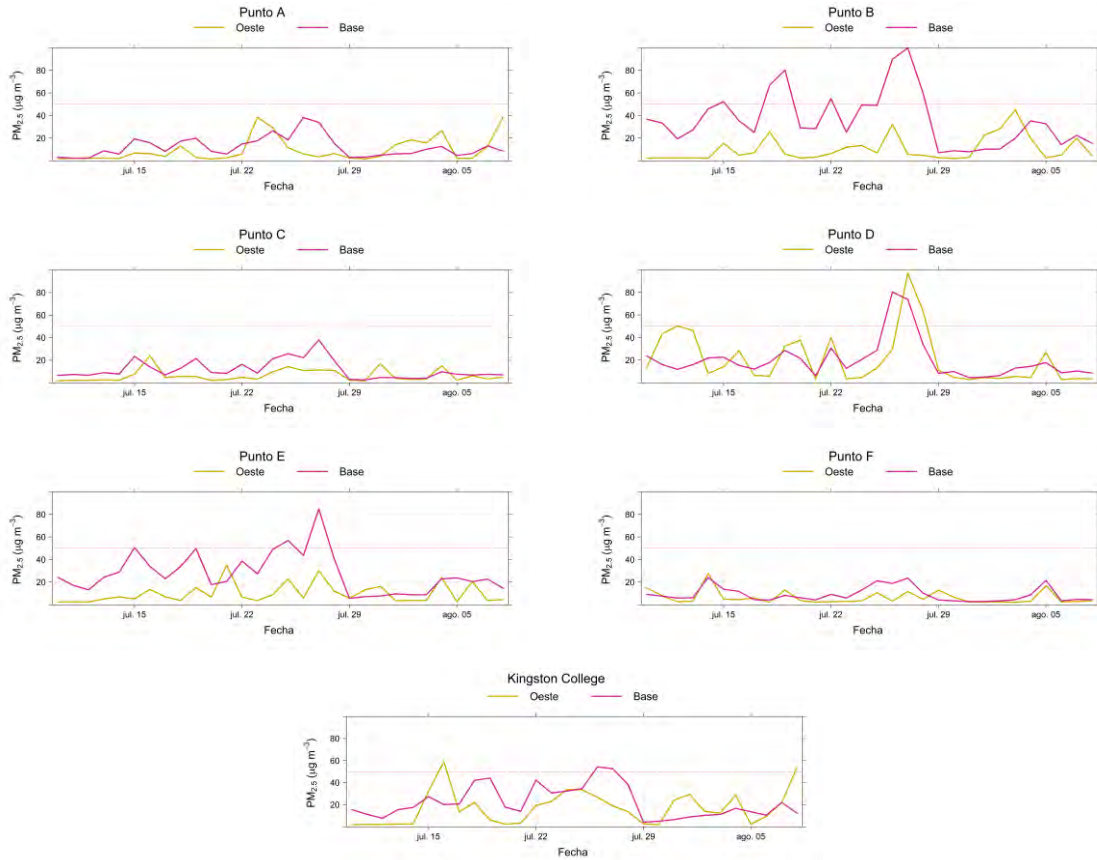


Figura 45. Estadísticas MP_{2.5} Planta Oeste.

Punto	MB	MGE	RMSE	IOA
A	-2.480	8.712	12.488	0.389
B	-25.981	29.677	36.300	0.216
C	-5.174	6.985	9.017	0.474
D	0.448	13.085	17.488	0.407
E	-17.744	19.756	24.128	0.281
F	-2.742	4.613	5.952	0.550
Kingston College	-4.676	14.119	18.546	0.408

Tabla 25. Estadísticas MP_{2.5} Planta Oeste.

4.3.4.2. MP10

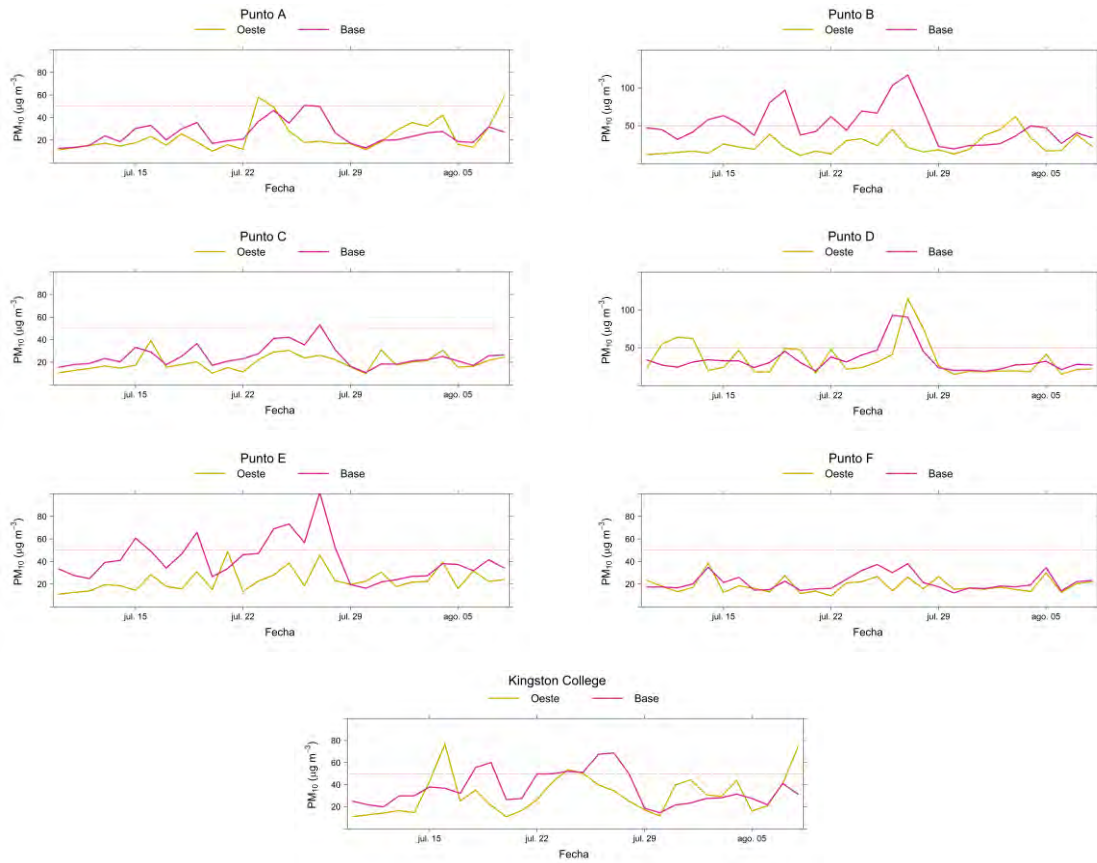


Figura 46. Estadísticas MP10 Planta Oeste.

Punto	MB	MGE	RMSE	IOA
A	-2.481	8.906	12.770	0.460
B	-26.391	30.207	36.912	0.204
C	-5.252	7.119	9.188	0.495
D	0.531	13.465	17.949	0.372
E	-18.062	20.161	24.578	0.280
F	-2.764	4.706	6.069	0.599
Kingston College	-4.656	14.395	18.939	0.429

Tabla 26. Estadísticas MP10 Planta Oeste.

4.3.5. Reducción Material Particulado

Para determinar la mejor ubicación de la planta de calefacción distrital, se calcularon las diferencias numéricas de las concentraciones de MP_{2.5} y MP₁₀ entre los datos de la corrida base y los simulados (considerando la planta), para observar en cual de estos puntos disminuyen en mayor proporción las concentraciones. Esto se llevó a cabo mediante un análisis de reducción porcentual, donde se obtuvo que la ubicación ESTE y SUR presentan un mejor escenario para ambos contaminantes.

A continuación, en la Tabla 27 y en la Tabla 28 se presentan los valores obtenidos para cada ubicación, donde se observa la tendencia de las concentraciones:

Reducción porcentual de MP _{2.5}							
UBICACIÓN	PUNTO A	PUNTO B	KINGSTON COLLEGE	PUNTO C	PUNTO D	PUNTO E	PUNTO F
Sur	51.430	77.168	66.675	58.744	20.370	75.411	17.014
Norte	-22.590	77.894	-105.978	28.744	42.502	66.097	-5.458
Oeste	22.355	71.316	22.700	44.908	-2.697	64.068	30.293
Este	56.803	88.022	68.187	25.011	70.124	48.589	-16.920

Tabla 27. Reducción porcentual de MP_{2.5}

Reducción porcentual de MP ₁₀							
UBICACIÓN	PUNTO A	PUNTO B	KINGSTON COLLEGE	PUNTO C	PUNTO D	PUNTO E	PUNTO F
Sur	24.290	56.501	41.580	27.589	11.957	51.169	7.157
Norte	-11.071	57.083	-66.864	13.371	26.164	44.632	-7.132
Oeste	10.407	52.159	13.876	21.029	-1.852	43.413	12.864
Este	26.831	64.545	42.500	11.562	42.305	32.808	-7.580

Tabla 28. Reducción porcentual de MP₁₀

4.3.5.1. Estadística Estación Kingston College

MP_{2.5}

Kingston College	MB	MGE	RMSE	IOA
Este	-15.010	16.013	20.365	0.329
Norte	23.101	35.572	49.155	-0.330
Oeste	-4.676	14.119	18.546	0.408
Sur	-14.518	15.936	20.709	0.332

Tabla 29. Análisis Estadístico PM2.5 Estación Kingston College.

- **MB:** la mayoría de las ubicaciones presentan valores negativos de MB, lo que sugiere que el modelo tiende a subestimar los datos observados, por otro lado, la ubicación norte presenta un valor positivo, siendo la ubicación que presenta mayor sesgo.
 - **MGE:** todas las localidades presentan valores altos que indican la existencia de errores aleatorios significativos, siendo la ubicación Norte y Este quienes muestra mayor error.
 - **RMSE:** se observa una baja precisión del modelo, dado que los valores están alejados de lo esperado.
 - **IOA:** se han obtenido valores positivos y negativos cercanos a 1, lo cual indica una buena precisión en la adaptación del modelo.
- **MP₁₀**

Kingston College	MB	MGE	RMSE	IOA
Este	-15.270	16.309	20.731	0.353
Norte	23.790	36.518	50.494	-0.310
Oeste	-4.656	14.395	18.939	0.429
Sur	-14.776	16.236	21.084	0.355

Tabla 30. Análisis Estadístico PM10 Estación Kingston College.

- **MB:** la mayoría de las ubicaciones presentan valores negativos de MB, lo que sugiere que el modelo tiende a subestimar los datos observados, por otro lado, la ubicación norte presenta un valor positivo, siendo la ubicación que presenta mayor sesgo.
- **MGE:** todas las localidades presentan valores altos que indican la existencia de errores aleatorios significativos, siendo la ubicación Norte y Este quienes muestra mayor error.
- **RMSE:** se observa una baja precisión del modelo, dado que los valores están alejados de lo esperado.
- **IOA:** se han obtenido valores positivos y negativos cercanos a 1, lo cual indica una buena precisión en la adaptación del modelo.

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

5.1. Simulación escenario base

Para llevar a cabo el estudio fue necesaria la utilización de modelos de simulación de calidad del aire, que, si bien ya han sido utilizados en otros estudios, fue necesario corroborar su eficiencia. Para ello se simuló un escenario previo a la instalación de la planta y se contrarrestó con los datos obtenidos del SINCA.

Respecto a los parámetros ambientales (velocidad del viento, humedad y temperatura) para determinar la eficiencia del modelo se utilizaron diferentes parámetros estadísticos, que, si bien dan valores aceptados, aun así, indican que es posible seguir mejorando el modelo, ya que se observa cierto grado de error. Este error se ha de tener en consideración, dado que los resultados de la simulación no reflejan la realidad como tal, solo un acercamiento.

Por otro lado, para el modelo de la dirección del viento, no se utilizan los parámetros estadísticos anteriores, dada la inexactitud del comportamiento de este. Por lo que a su vez la simulación no resulta tan satisfactoria al no ajustarse a los datos observados, no logrando ver una clara tendencia de su comportamiento, salvo que el viento no suele ir hacia el sureste, sirviendo, así como referencia para la determinación de la posible ubicación de la planta.

El modelo ha demostrado funcionar bien para los parámetros ambientales, sin embargo, en lo que respecta a la emisión de material particulado falta por mejorar. Si bien sirve para el estudio presentado, una mayor precisión del modelo permitiría un mejor desarrollo del estudio, acercando los datos a la realidad. Cabe mencionar que la estación que presenta mejores resultados es la de Kingston College, ya que justamente se encuentra en la zona de estudio (Comuna de Concepción), procediendo a utilizarla como referencia en datos del escenario base.

Respecto a la temporalidad de las emisiones el que exista diferencia en su nivel de concentración durante las semanas, puede deberse a diversos factores climáticos, actividades industriales o el aumento del tráfico vehicular. Donde durante ciertas semanas, se observan niveles elevados de contaminación, resaltando la importancia de reducir los niveles.

5.2. EMISIONES DE LA PLANTA

Respecto a la emisión de los contaminantes de la planta de calefacción, se utilizó como base una vivienda estándar de la ciudad de Coyhaique como modelo para facilitar y simplificar los cálculos y así poder comparar. Sin embargo, esto afecta en la representatividad de las viviendas reales de la ciudad de Concepción, ya que no pertenece a la zona estudiada. El realizar un análisis al tipo de vivienda existente en la ciudad de Concepción permitiría realizar un mejor análisis de su requerimiento energético obteniendo un resultado más acercado a la realidad.

Sin embargo, considerando la vivienda propuesta se observa que existe un alto requerimiento energético en las ventanas, donde sería necesario mejorar el aislamiento de ellas, pudiendo así reducir la demanda energética de calefacción y por consecuencia, disminuir las emisiones generadas por la planta de calefacción distrital.

Al observar la gran cantidad de demanda energética, es posible evidenciar la necesidad de generar estrategias eficientes de calefacción y optimizar el uso de energía.

Adicionalmente, para el estudio se consideró y trabajó en base al mejor escenario posible, considerando así la idealidad, cosa que no es posible llevar a la realidad, por lo que los resultados posteriores sugerirán el resultado en el caso favorable de la planta, utilizando como combustible biomasa sólida. Considerando que si este se cambiase por otro los resultados se hubiesen visto afectados.

5.3. UBICACIÓN DE LA PLANTA Y SU EFECTO EN CALIDAD DEL AIRE

Para la estimación de la posible ubicación de la planta se evaluó su comportamiento ubicándola en diferentes zonas geográficas, viendo su efecto en diferentes puntos de la ciudad. Una de las estrategias utilizadas para la determinación de su ubicación fue que hubiese espacio disponible y zona urbana, para poder suministrar de mejor forma. Además, se toma como referencia la dirección del viento, para tomar zonas donde este no tenga mayor efecto.

Luego de haber analizado los diferentes escenarios para la posible ubicación de la planta es posible evidenciar que las que presentan mejores resultados son “Planta Este” y “Planta Sur” reduciendo significativamente el $MP_{2.5}$ y MP_{10} en los puntos presentados, convirtiéndolas en las opciones más recomendadas para la instalación de la planta, lo que se condice con los datos obtenidos de la dirección del viento, donde se veía que el viento no iba en la dirección del sureste, por lo que podrían ser

Ahora, respecto a la “Planta Norte”, esta presenta resultados inconsistentes y negativos en varios puntos, indicando que no es la ubicación más adecuada para minimizar las concentraciones de material particulado de la ciudad. Al comparar con la información de la dirección del viento se observa que, pese a no ser una tendencia clara, el viento se inclinaría hacia el norte, afectando así el comportamiento de sus emisiones.

Y respecto a la “Planta Oeste” es un punto intermedio, dado que no presenta grandes reducciones ni valores negativos, por lo que podría ser una opción viable en el caso que las dos primeras no llegasen a funcionar.

Tras la implementación de la planta de calefacción en los distintos escenarios, se puede evidenciar que si bien en todos hay una disminución de material particulado hay zonas donde esta es mayor. Para determinar cuánta es su disminución, es que se obtuvo la reducción porcentual de estos contaminantes, variando este valor según el punto donde se estuviese evaluando, lo que tenía relación con la ubicación de la planta y el punto que está comparando, así a mayor distancia de estos, menor era su disminución de material particulado.

Como se mencionó anteriormente, los datos obtenidos al contrarrestar los datos observados del SINCA y los de la simulación, la estación con mejores resultados resultó ser Kingston College,

ubicándose además en la comuna de Concepción, por lo que es importante mencionar el efecto de la instalación de la planta en este punto, dado que aquí es posible contrarrestar con datos reales.

Siendo este el caso, la ubicación que presenta peores resultados es la planta norte, siguiendo así la tendencia de lo que ocurre en los otros puntos de comparación y la ubicación más favorable se presenta para la ubicación sur y este, obteniendo valores muy similares tanto para material particulado $MP_{2.5}$ y MP_{10} , nuevamente cumpliendo con la idea de los demás puntos.

6. CONCLUSIONES

De acuerdo con el estudio realizado para evaluar la calidad del aire tras implementar un sistema de calefacción distrital, se concluye que los modelos de calidad del aire, si bien presentan ciertos errores, los resultados de la simulación son útiles para evaluar la viabilidad de implementar estos sistemas de calefacción.

Tras haber realizado la simulación de la instalación de la planta de calefacción en los distintos escenarios, es posible evidenciar que en todos existe una reducción del material particulado, lo que sugiere que la implementación de una planta de calefacción distrital mejoraría la calidad del aire en la ciudad de Concepción. Cuánto va a disminuir depende directamente de la ubicación que esta tome, considerando que en cada uno de los puntos los valores de dirección y velocidad del viento son diferentes, además de considerar que la zona sea industrial o urbanizada.

En general, se logra observar que reemplazar la calefacción a leña por un sistema de calefacción distrital podría mejorar la calidad del aire significativamente, especialmente en lo que respecta a $MP_{2.5}$, ya que porcentualmente las concentraciones en la planta sur y este cumplen con la hipótesis de reducir las concentraciones alrededor de un 55%. Por otro lado, si bien no se observa el mismo comportamiento para MP_{10} , ya que las concentraciones disminuyen en menor medida, se puede concluir que de igual manera se reducen, lo cual resalta la importancia de utilizar estos sistemas de calefacción para mejorar la calidad del aire y con ello la salud de la población en la ciudad de Concepción.

7. RECOMENDACIONES O SUGERENCIAS

Pese a tener resultados favorables de la simulación, donde se consideró el mejor escenario posible, se recomienda revisar los casos no tan favorables, respecto a las emisiones de contaminantes, ya que se debe considerar la disponibilidad del combustible, variable que en nuestro proyecto no tuvo mayor análisis por el periodo de estudio.

Por otro lado, se recomienda realizar una evaluación técnica y económica, ya que es un parámetro importante para definir la factibilidad de implementar estos sistemas de calefacción en el largo plazo, tomando en consideración los costos de operación, mantenimiento, tecnologías y equipos que contribuyan a la reducción de emisiones.

Otra recomendación por considerar implica realizar un estudio sobre el impacto que generaría en la población local la implementación de una red de distribución de este tipo, ya que el uso desmedido de leña genera altas concentraciones de material particulado, que son nocivos para los habitantes, reflejándose un alto índice de enfermedades respiratorias en la ciudad de Concepción. De esta manera se debería realizar un seguimiento para verificar la factibilidad de su implementación, que contribuiría a disminuir los problemas de salud pública presentes, que tienen directa relación con la contaminación.

Se considera pertinente realizar un estudio más detallado de las tipologías de viviendas presentes en Concepción, resaltando las condiciones térmicas que posee, ya que por el momento los estudios son escasos y esto contribuiría a estudiar un escenario más realista de la ciudad.

Finalmente, se resalta la importancia de educar a la comunidad acerca de los sistemas de calefacción distrital. Mientras no se implementen estos sistemas de calefacción, se pueden buscar alternativas de combustible menos contaminantes para mitigar las concentraciones de material particulado y de esta manera mejorar la calidad del aire y la salud de la población.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Ahumada R, J. (20 de Junio de 2020). *Agrocolun*. Obtenido de <https://agrocolun.cl/3179-2/>
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (Diciembre de 2020). *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile*. Obtenido de <https://www.bcn.cl/siit/reportescomunales/reporpdf.html?anno=2023&idcom=8101>
- Carrasco Vidal, R., Jiménez del Río, J., & Mardones Poblete, C. (2016). Análisis Costo-Beneficio de la Calefacción Distrital en la Zona Central de Chile. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35-35.
- Chapple C, P. (Julio de 2008). *Estudio Técnico Confort Térmico en las Viviendas*. Obtenido de <https://catalogo.extension.cchc.cl/documentos/documentos/21264.pdf>
- Chunsheng, C., de Jiaxin, Q., Li, J., & Wang, J. (2022). Analysis of the meteorological impact on PM2.5 pollution in Changchun based on KZ filter and WRF-CMAQ. *Atmospheric Environment*, 118924.
- División de Fiscalización. (2023). *Informe de Estado de Avance de las Medidas e Instrumentos del Plan Año 2021*. Chile: Superintendencia del Medio Ambiente.
- EPA. (25 de Julio de 2023). *United States Environmental Protection Agency*. Obtenido de <https://www.epa.gov/cmaq/wrf-cmaq-model>
- Fernández, R., Lakkis, G., Allende, D., Santos, R., Cremades, P., & Puliafito, E. (2024). *Repositorio UCA*. Obtenido de <https://repositorio.uca.edu.ar/bitstream/123456789/17202/1/modelacion-evento-meteorologico.pdf>
- Google. (2024). *Google Earth*. Obtenido de <https://www.google.es/intl/es/earth/index.html>
- INE. (2024). *INE*. Obtenido de <https://regiones.ine.gob.cl/biobio/estadisticas-regionales/sociales/censos-de-poblacion-y-vivienda/censo-de-poblacion-y-vivienda>
- IQAir. (Octubre de 2022). *IQAir*. Obtenido de <https://www.iqair.com/es/chile/biobio/concepcion>

- Jiang, X., & Yoo, E. (2018). The importance of spatial resolutions of Community Multiscale Air Quality (CMAQ) models on health impact assessment. *Science of the total environment*, 1528-1543.
- Kaczmarczyk, M., & Sowizdzal, A. (2024). *Environmental friendly energy resources improving air quality in urban area*.
- Lago Kitagawa, Y. K., Pedruzzi, R., Silva Galvão, E., Araújo, I. B., Almeida Albuquerque, T., Kumar, P., . . . Martins Moreira, D. (2021). Source apportionment modelling of PM2.5 using CMAQ-ISAM over a tropical coastal-urban area. *Atmospheric Pollution Research*.
- Libertad y Desarrollo. (Junio de 2017). *Libertad y Desarrollo*. Obtenido de <https://lyd.org/wp-content/uploads/2017/07/TP-1307-CALEFACCION-DISTRITAL.pdf>
- Maia, R., Baptista, L., & Monteiro, E. (2020). *PREPARAÇÃO E VALIDAÇÃO DE ARQUIVOS DE ENTRADA PARA USO NO SIMULADOR DE QUALIDADE DO AR (CMAQ)*. Brasil: Quim Nova.
- Ministerio del Interior y Seguridad Pública. (29 de 08 de 2023). *Subdere.gov*. Obtenido de <https://www.subdere.gov.cl/sites/default/files/documentos/Informe%20recomendacio%CC%81n%20Area%20Metropolitana%20Gran%20Concepcio%CC%81n.pdf>
- Ministerio del Medio Ambiente. (09 de Mayo de 2011). *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile*. Obtenido de <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1025202>
- Ministerio del Medio Ambiente. (02 de 05 de 2013). *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile*. Obtenido de <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1050536>
- Ministerio del Medio Ambiente. (04 de Junio de 2022). *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile*. Obtenido de <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1176988>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2024). *Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire*. Obtenido de <https://sinca.mma.gob.cl/index.php/>
- Municipalidad de Hualpen. (06 de Octubre de 2023). *Municipalidad de Hualpen*. Obtenido de <http://www.hualpenciudad.cl/seremi-del-medio-ambiente-realiza-historico-primer-balance-de-calidad-del-aire-en-el-gran-concepcion/>

- Osses, M., Puja, S., Pantoja, N., Dennier Van der Gon, H., Shueftan, A., Reyes, R., . . . Opazo, M. (31 de Enero de 2022). *Earth System Science Data*. Obtenido de <https://essd.copernicus.org/articles/14/361/2022/>
- Remaggi S, J., Mardones P, C., & Jiménez R, J. (2019). Impacto de la contaminación por material particulado sobre las atenciones de urgencias por causas respiratorias en Chillán, Concepción y Los Ángeles. *Revista Chilena de enfermedades respiratorias*, 181-190.
- Sigrist, R., Roger, W., Sell, J., Sáez, S., Pichard, F., & Henzen, C. (21 de Diciembre de 2012). *Estudio de Prefactibilidad de un Sistema de Calefacción Distrital y Agua Caliente Sanitaria en base a ERNC en Coyhaique*. Chile: TBE Chile. Obtenido de <https://airecoyhaique.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/02/Estudio-prefactibilidad-Calefaccion-distrital-Coyhaique.pdf>
- Vicencio Sura, V. D. (2021). *Estudio de calefacción distrital utilizando distintos sistemas de captación geotérmica en Cochrane, Aysén*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Villalobos, F., Weidlich, I., Wolf, I., & Fumeron, J. (2023). *District heating in Chile and advances in the investigation on soil-pipe interactions in district*. Chile.
- Yañez O, C., Fissore, A., & Leiva, A. (2019). *Usos de energía de los Hogares Chile 2018*. Chile: Ministerio de Energía.