



IMPACTOS DE LAS EMISIONES DE LAS TERMOELÉCTRICAS A CARBON EN LA CALIDAD DEL AIRE EN LAS COMUNAS DE HUASCO Y PUCHUNCAVÍ

Documento preparado por Greenpeace, Chile Sustentable y KAS Ingenieros

Autores:

Lauri Myllyvirta, Greenpeace Global Air Pollution Unit
Aidan Farrow, Greenpeace Science Unit.
Claudia Fuentes, Fundación Chile Sustentable
Alonso Fernández, KAS Ingenieros Chile

Editores:

Sara Larraín, Fundación Chile Sustentable
Pamela Poo, Fundación Chile Sustentable

Enero 2020

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	2
2. ANTECEDENTES SOBRE LA NORMATIVA AMBIENTAL VIGENTE SOBRE EMISIONES ATMOSFERICAS DE TERMOELÉCTRICAS EN CHILE	3
3.1. DESCRIPCIÓN DE ZONA DE ESTUDIO 1: PUCHUNCAVÍ.....	4
3.2. DESCRIPCIÓN DE ZONA DE ESTUDIO 2: HUASCO.....	5
3.3. MÉTODO.....	5
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	11
4.1. ZONA DE ESTUDIO 1: PUCHUNCAVI.....	11
4.2. ZONA DE ESTUDIO 2: HUASCO	17
4.3. OTROS ANÁLISIS Y DESAFÍOS DE ESTUDIOS FUTUROS	22
5. CONCLUSIONES.....	23
6. REFERENCIAS	24

1. INTRODUCCIÓN

En Chile el 78% de las emisiones de CO₂ son provocadas por el sector de la energía, siendo el principal responsable la generación eléctrica que aporta con un 41,5% de estas emisiones, las cuales están asociadas mayoritariamente al funcionamiento de la industria de la energía en base a combustibles fósiles como el carbón. (MMA, 2018).

La industria termoeléctrica a carbón con todas sus etapas del ciclo de vida - extracción, transporte, combustión y cenizas postcombustión - tiene impactos en el medio ambiente y en la salud de la población. La quema de este combustible libera contaminantes atmosféricos como: dióxido de carbono (CO₂), material particulado (MP), dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y metales pesados como el mercurio (Hg), vanadio (V), níquel (Ni) y plomo (Pb), los cuales afectan gravemente los ecosistemas y poblaciones locales (Lockwood et al., 2009).

Las instalaciones termoeléctricas basadas en el uso del carbón representan un riesgo a la salud en comunidades expuestas por cuanto afectan los principales órganos corporales favoreciendo enfermedades cardíacas, cáncer, accidentes cerebro-vasculares y enfermedades crónicas respiratorias. Esos riesgos se incrementan si las tecnologías son deficientes en el control de emisiones y las poblaciones receptoras muestran condiciones de vulnerabilidad como pobreza, escaso acceso a salud y la presencia de grupos susceptibles como niños, embarazadas y adultos mayores (Cortés et al., 2019).

En Chile, un 38% de su generación eléctrica es en base a carbón, contando con un parque constituido por 28 unidades termoeléctricas a carbón, con potencia bruta de casi de 5,6 GW, localizadas en 6 comunas del país, (CNE, 2018) que en su mayoría han sido declaradas latentes o saturadas de contaminantes atmosféricos locales (D.S 50, 2007; D.S 74, 2008; D.S 10, 2015; D.S 40, 2012; D.S 41, 2006). En la Comuna de Puchuncaví, se encuentran emplazadas 4 unidades, en la comuna de Huasco 5 unidades, en la comuna de Tocopilla 7 unidades, en la comuna de Mejillones 8 unidades, y en Iquique 1 Unidad (Chile Sustentable, 2017).

A continuación se presenta un análisis de la calidad del aire y la proyección de los impactos potenciales sobre la salud de la población local, debido a la presencia y operación de las plantas a carbón presentes en las comunas de Puchuncaví y Huasco. La información sobre generación en base a combustión de carbón corresponden al Coordinador Eléctrico Nacional; y la información sobre emisiones corresponde a la Superintendencia de Medio Ambiente.

OBJETIVOS DEL ESTUDIO

El objeto de este estudio es evaluar cuantitativa y cualitativamente el efecto generado por la operación de 4 centrales termoeléctricas en la comuna de Puchuncaví, en la región de Valparaíso, y 5 unidades termoeléctricas a carbón en la comuna de Huasco, región de Atacama, sobre la calidad del aire en las respectivas comunas y modelar la dispersión territorial de los contaminantes atmosféricos; estableciendo los niveles de concentración de dichos tóxicos y su comparación con los estándares sanitarios internacionales recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS).

Los Objetivos Específicos del estudio, buscaron:

- Estimar cuantitativamente el nivel de emisiones de SO₂, NO_x y material particulado (MP) producto de la operación de 4 termoeléctricas a carbón en Puchuncaví y las 5 localizadas en Huasco.
- Modelar la dispersión de las emisiones contaminantes generadas, utilizando el sistema de modelación CALPUFF.
- Recopilar y procesar los datos entregados por las estaciones de monitoreo de la calidad del aire más cercanas al parque termoeléctrico en cada comuna, a fin de contrastarlos con los resultados de la modelación de la dispersión de contaminantes.

2. ANTECEDENTES SOBRE LA NORMATIVA AMBIENTAL VIGENTE SOBRE EMISIONES ATMOSFERICAS DE TERMOELÉCTRICAS EN CHILE

Todas las unidades termoeléctricas del país deben cumplir con la normativa ambiental vigente aplicable, las cuales están reguladas por el Decreto Supremo N°13 que norma las emisiones atmosféricas de las centrales termoeléctricas (D.S 13, 2011). La norma, establece límites para las emisiones de material particulado (MP), dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y mercurio (Hg), incluyendo una distinción entre las exigencias que se aplican a plantas nuevas, respecto de las referidas a plantas existentes. Adicionalmente esta norma de emisión contempla parámetros de calidad muy laxos en comparación con las normas de emisión de otros países (Agencia Internacional de Energía, 2016), y por ende no protege adecuadamente la salud de la población (Chile Sustentable, 2018) (Figura 1).

Adicionalmente a ello, y a partir de la crisis de intoxicaciones masivas ocurridas en Puchuncavi Quintero, el gobierno publicó en 2018 una Nueva Norma primaria para dióxido de azufre -SO₂ (D.S 104/2018), la cual establece un límite horario equivalente a la normativa vigente en la Unión Europea, de 350 µg/m³ con percentil 98,5.

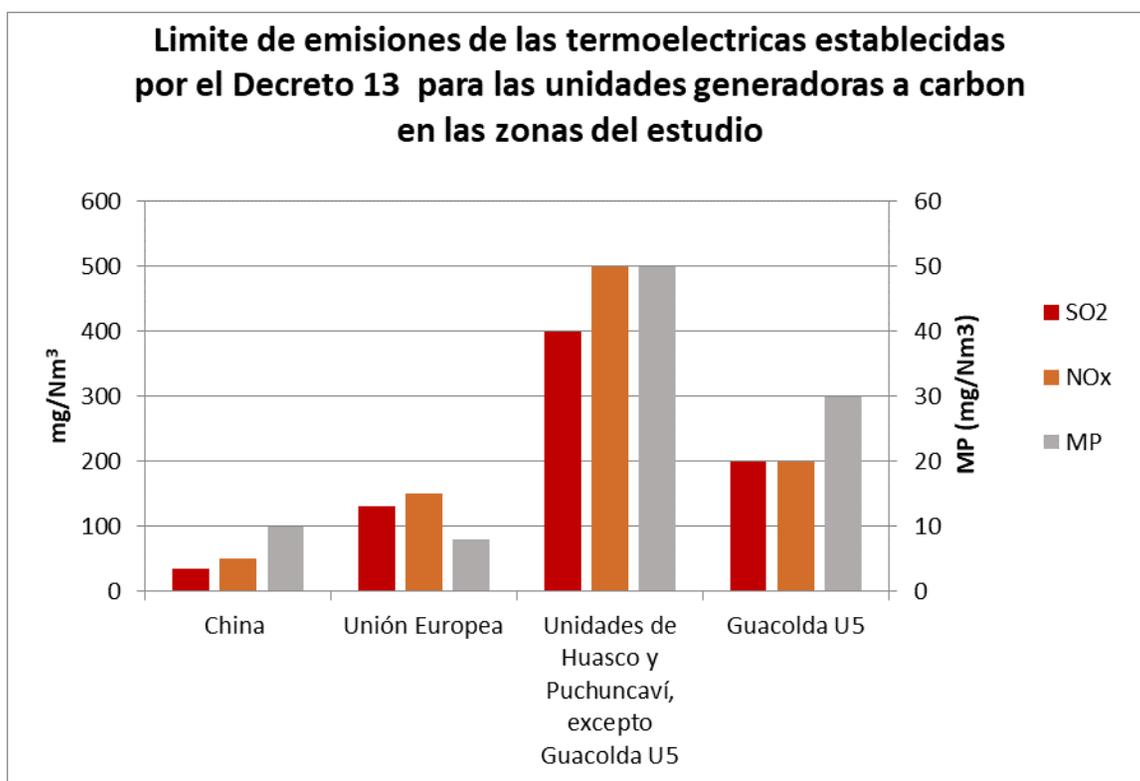


Figura 1. Límite de emisiones para las plantas termoeléctricas a carbón estudiadas, en comparación a los límites de emisiones de China y la Unión Europea.

Fuente: Elaboración propia en base a D.S 13, 2011 y Agencia Internacional de Energía, 2016.

3. METODOLOGÍA

3.1. DESCRIPCIÓN DE ZONA DE ESTUDIO 1: PUCHUNCAVÍ

La comuna de Puchuncaví tiene una historia de desarrollo económico local vinculada a actividades agrícolas y turísticas. No obstante, desde 1960, a partir de la instalación de la primera fundición de cobre de ENAMI en Ventanas, seguida por otras 15 industrias altamente contaminantes (Hervé et. al 2012), la comuna se transformó en uno de los polos de desarrollo industrial más importantes y grande de Chile. En esta área industrial, sus habitantes conviven desde hace más de 50 años con industrias altamente contaminantes; y han sufrido una serie de eventos de contaminación aguda, tales como derrame de ácido sulfúrico en las costas, permanentes varamientos de carbón en el puerto, incendios de combustibles, e intoxicaciones masivas en el año 2008, 2011 y en 2018 (Mujeres en Zona de Sacrificio, 2018).

Las emisiones de las industrias presentes en la zona generan concentraciones anuales de material particulado que superan la norma primaria de calidad del aire para MP 2,5, encontrándose saturada y la concentración diaria se encuentre en estado de latencia, al igual que la norma para MP10 como concentración anual (D.S 10, 2015). A pesar de esta situación, recién el año 2018 se publicó un Plan de Descontaminación Atmosférica para las comunas de Quintero-Puchuncaví- Con Cón (DS 105, 2018).

En la comuna de Puchuncaví (aledaña a comunas de Quintero y Concón) funcionan cuatro unidades de generación termoeléctrica a carbón, pertenecientes a la empresa norteamericana Aes Gener. Las unidades Ventanas 1 y Ventanas 2 no tienen Resolución de Calificación Ambiental, por tener una antigüedad de 40 años, época en que el país no contaba con esta exigencia; y porque nunca se les exigió posteriormente. Las unidades Nueva Ventanas y Campiche en operación desde 2010 y 2013 respectivamente, sí poseen Resolución de Calificación Ambiental vigente (Ver Cuadro 1).

Tabla 1: Capacidad de generación y antigüedad de plantas termoeléctricas ubicadas en Puchuncaví

Unidad	Empresa	Año Inauguración	Potencia Instalada (MW)
Ventanas 1	Aes Gener	1964	113,4
Ventanas 2	Aes Gener	1977	208,6
Nueva Ventanas	Aes Gener	2010	249
Campiche	Aes Gener	2013	249

Fuente: KAS Ingenieros, 2017.

La zona en estudio comprende a un área desde el Río Aconcagua hasta el sector del Cerro Colorado en el sector costero de la región de Valparaíso. Específicamente en esta zona, el clima está fuertemente condicionado por la geomorfología existente, donde la planicie litoral se interna en un cajón delimitado por el Cerro Colorado, por el norte hasta el Cerro Mauco por el sur, diferenciando esta área, respecto de las zonas que se encuentran al sur del Río Aconcagua.

El clima del área corresponde al tipo templado, cálido y lluvioso que, producto de su ubicación geográfica costera, presenta vientos predominantemente en dirección mar-valle durante el día, y viceversa durante la noche. Debido a su cercanía con el mar, el área en estudio presenta una alta humedad, alcanzado un valor promedio de 82%. Las precipitaciones en esta zona se concentran principalmente en los meses de Junio, Julio y Agosto, bordeando los 70 mm aproximadamente. La temperatura varía entre los 6 y 25°C, encontrándose predominantemente, temperaturas en torno a los 15°C. (CENMA, 2013).

3.2. DESCRIPCIÓN DE ZONA DE ESTUDIO 2: HUASCO

La comuna de Huasco se localiza en el sector costero de la región de Atacama, y tiene una extensión de 1.601,4 km². En conjunto con las comunas de Freirina, Vallenar y Alto del Carmen conforman la Provincia de Huasco (MMA, 2017b).

Las principales fuentes emisoras de contaminación atmosférica en la comuna de Huasco, son 5 unidades termoeléctricas a carbón de la empresa Aes Gener y una planta de pellets de la Compañía Minera del Pacífico CMP, que produce pellets de minerales de hierro. Adicionalmente, la ciudad de Huasco tiene una importante actividad portuaria (MMA, 2017b).

Los altos niveles de contaminación atmosférica, tuvieron como consecuencia que la comuna fuera declarada zona latente por la concentración anual de material particulado MP10, en mayo de 2012, (D.S 40, 2012), y que desarrollara un Plan de Prevención Atmosférica (D.S 38, 2017), que entro en vigencia cinco años más tarde. Este Plan, establece una serie de medidas para reducir las fuentes de emisión del complejo Guacolda de 5 unidades termoeléctricas a carbón de AES-Gener y de la planta de pellet de CMP.

Tabla 2: Capacidad de generación y antigüedad de termoeléctricas a carbón ubicadas en Huasco

Unidad	Empresa	Año Inauguración	Potencia Instalada (MW)
Guacolda U1	Aes Gener	1995	142,9
Guacolda U2	Aes Gener	1996	142,9
Guacolda U3	Aes Gener	2009	131,1
Guacolda U4	Aes Gener	2010	139
Guacolda U5	Aes Gener	2015	139

Fuente: KAS Ingenieros, 2017.

La provincia de Huasco se encuentra ubicada entre cordones montañosos en torno al Río Huasco (Cuenca del Río Huasco). Su tipo bioclimático dominante es el mediterráneo desértico – oceánico, caracterizado por concentrar sus precipitaciones durante los meses de invierno, sin embargo, esta localidad presenta déficit hídrico durante más de la mitad del año. Las precipitaciones se concentran durante los meses de Mayo, Junio, Julio y Agosto, rondando entre los 15 y 25 mm mensuales, con 40 mm al año.

La temperatura media varía entre 14 y 21°C, principalmente debido a la alta nubosidad que presenta la zona; por otro lado la humedad varía entre 59% y 92%. Respecto al viento, en el área se registran velocidades promedio de viento de 9,6 kilómetros por hora, siendo predominantemente de dirección este y oeste, debido a la geomorfología del sector. (DMC, 2017).

3.3. MÉTODO

3.3.1. Estimación de las emisiones generadas

Según la disponibilidad de información pública, se tomó como referencia para la recopilación y modelación de datos el periodo correspondiente al año 2017. Específicamente se consideró el nivel de emisiones de las 4 termoeléctricas ubicadas en la comuna de Puchuncaví y las 5 termoeléctricas a carbón ubicadas en la comuna de Huasco. Los datos correspondientes a emisiones de SO₂, NO_x y Material Particulado fueron estimados a partir de los reportes anuales afectos al D.S 13/2011, validados por la Superintendencia de Medio Ambiente

(SNIFA, 2018). Adicionalmente, se utilizaron los datos de generación eléctrica entregados por la Comisión Nacional de Energía (CNE, 2018a).

A continuación se muestran las características estructurales de las termoeléctricas a carbón que fueron consideradas en la modelación así como sus niveles de operación durante el año 2017 (Tabla 3).

Tabla 3: Características estructurales de las termoeléctricas de Puchuncaví y Huasco

Unidad	Localización	Coordenadas UTM 19 S		Alto de Chimenea [m]	Diámetro [m]
Ventanas 1	Puchuncaví	267336.52 E	6373503.62 S	61	6
Ventanas 2	Puchuncaví	267336.52 E	6373503.62 S	62	5,6
Nueva Ventanas	Puchuncaví	267336.52 E	6373503.62 S	95	4,7
Campiche	Puchuncaví	267336.52 E	6373503.62 S	95	4,7
Guacolda U1	Huasco	279024.69 E	684928.32 S	89	6
Guacolda U2	Huasco	279024.69 E	684928.32 S	89	6
Guacolda U3	Huasco	279024.69 E	684928.32 S	89	3,7
Guacolda U4	Huasco	279024.69 E	684928.32 S	89	3,7
Guacolda U5	Huasco	279024.69 E	684928.32 S	89	6

Fuente: Ministerio de Energía, 2018

Tabla 4: Nivel de operación para el año 2017

Unidad	Potencia Nominal [MW]	Energía generada [MWh]	Utilización
Ventanas 1	120	614.839	58.49 %
Ventanas 2	218	1.059.302	55.47 %
Nueva Ventanas	267	1.927.212	82.40 %
Campiche	270	1.822.943	77.07 %
Guacolda U1	152	665.758	50,0 %
Guacolda U2	152	543.222	40,8 %
Guacolda U3	152	708.800	53,23 %
Guacolda U4	152	821.189	61,67%
Guacolda U5	152	838.958	63,01 %

Fuente: CNE, 2018a; Ministerio de Energía, 2018.

Por otro lado, en la siguiente tabla, se muestran los niveles de emisiones estimados por la autoridad para las 4 termoeléctricas de Puchuncaví y las 5 termoeléctricas a Huasco recién mencionadas durante el año 2017.

Tabla 5: Niveles de emisión estimados para las termoeléctricas de Puchuncavi. y Huasco

Unidad	Flujo de SO ₂ [kg/h]	Flujo de NO _x [kg/h]	Flujo de Material Particulado [kg/h]
Ventanas 1	75,12	136,0	22,74
Ventanas 2	125,9	180,32	16,97
Nueva Ventanas	232,34	224,36	12,42
Campiche	185,77	212,58	6,81
Guacolda U1	99,4	142,0	7,4
Guacolda U2	81,09	115,9	6,07
Guacolda U3	30,93	87,7	3,24
Guacolda U4	81,63	19,5	13,64
Guacolda U5	21,6	18,0	2,71

Fuente: SNIFA, 2018

La distribución del material particulado fue separada considerando partículas menores a 2.5 micrones, partículas entre 2.5 y 10 micrones y partículas mayores a 10 micrones, basado en la distribución promedio de salida de un precipitador electrostático tipo según U.S EPA AP 42 (1998): de ello se infiere que 30 % de las cenizas emitidas fueron asumidas como PM_{2.5} y 37.5% como PM₁₀. Las partículas mayores a 10 micrones fueron modeladas como con un diámetro promedio de 15 micrones.

3.3.2.Base teórica del modelo utilizado

La dispersión de contaminantes a nivel atmosférico fue modelada usando el modelo CALPUFF¹ que es capaz de modelar el transporte y dispersión de contaminantes tomando en consideración los efectos de los vientos, la dispersión atmosférica, las transformaciones químicas y la deposición superficial de contaminantes con sus variaciones a lo largo del tiempo y del espacio.

3.3.3.Datos meteorológicos

Para modelar cómo ocurre la dispersión de contaminantes, es necesario contar con una base de datos meteorológica que pueda simular las condiciones locales generadas por los vientos, precipitaciones y temperaturas entre otros. Esta base de datos fue generada a partir del sistema de modelación TAPM, desarrollado en Australia por la agencia internacional CSIRO, contrastado con datos observados. TAPM utiliza información climática global proveniente del modelo GASP (Australian Bureau of Meteorology), combinado con información de terreno de alta resolución. Finalmente, estos datos fueron convertidos en formatos aptos para ser procesados por CALPUFF.

¹ CALPUFF es un modelo tipo “puff” Lagrangiano Gaussiano no estacionario sobre un campo de vientos construido con CALMET ((modelo de diagnóstico meteorológico tridimensional). Los modelos tipo “puff” representan una pluma de contaminantes continuo como un número discreto de paquetes de material contaminante. El modelo evalúa la contribución de un “puff” en la concentración atmosférica de un receptor en un instante determinado, para luego permitir que el puff se mueva, evolucione en tamaño, fuerza, etc., hasta la próxima iteración. Luego, la concentración total en un receptor resultará de la sumatoria de las contribuciones de todos los “puff”. Finalmente CALPOST procesa las salidas de CALPUFF creando los archivos con las tabulaciones necesarias para la evaluación de los resultados según los estadísticos establecidos en las normas de calidad del aire.

3.3.4. Grilla de receptores

Utilizando como punto central las 4 termoeléctricas de Puchuncaví y las 5 termoeléctricas de Guacolda recién mencionadas, se desarrolló una grilla de cálculo de 50x50, con dimensiones de 15 km, 5 km y 2,5 km de resolución horizontal y 12 niveles verticales.

3.3.5. Transformaciones Químicas

La transformación química de las sustancias nitrogenadas y sulfuradas que ocurre en la atmósfera se modeló usando el módulo de CALPUFF ISORROPIA II chemistry. Los niveles de ozono en el ambiente fueron procesados a partir de mediciones reportadas por las autoridades Chilenas (CEN, 2018 ; SNIFA, 2018; CNE, 2018). Los niveles basales de amonio se obtuvieron del estudio realizado por Toro et al, 2014. El nivel ambiental de H2O2 se estimó utilizando el valor por defecto de la U.S EPA de 1 ppb (Exponent 2011).

3.3.6. Periodo de modelación

La modelación de dispersión de contaminantes se realizó utilizando la información meteorológica correspondiente al periodo que comprende entre el 1 de enero del 2017 hasta el 31 de diciembre de 2017.

3.3.7. Estaciones de medición consultadas

Con la finalidad de contrastar los resultados de la modelación con datos medidos experimentalmente, se recurrió a las bases entregadas por el Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (MMA, 2019). Se analizaron las concentraciones horarias reportadas para SO2, NO2, PM2.5, y PM10 para el año en cuestión. Los datos corresponden a la medida de concentración registrada con una frecuencia de 1 h.

A continuación, se resume en las siguientes tablas, las principales características de las estaciones de medición consultadas.

Tabla 6: Ficha técnica de la estación meteorológica “Ventanas”

Estación Ventanas	
Propietario	CODELCO División Ventanas y AES Gener
Operador	SGS Chile Ltda.
Comuna	Puchuncaví
Coordenadas UTM 19 S	267547 E 6474609 N
Inicio de operación	01 – 01 – 2013
Parámetros medidos	SO2 , NO, NO2, O3, NOx, PM2.5, PM10

Tabla 7: Ficha técnica de la estación meteorológica "Centro Quintero"

Estación Centro Quintero	
Propietario	GNL Quintero
Operador	SGS Chile Ltda.
Comuna	Quintero
Coordenadas UTM 19 S	262853 E 6369407 N
Inicio de operación	01 – 03 – 2008
Parámetros medidos	SO2, CO, NO2, NO, NOx, O3, PM10, CH4, HCT

Tabla 8: Ficha técnica de la estación meteorológica "La Greda"

Estación La Greda	
Propietario	CODELCO División Ventanas y AES Gener
Operador	SGS Chile Ltda.
Comuna	Puchuncaví
Coordenadas UTM 19 S	268185 E 6373910 N
Inicio de operación	01 – 07 – 1992
Parámetros medidos	SO ₂ , NO ₂ , NO, NO _x , O ₃ , PM ₁₀ , PM _{2.5}

Tabla 9: Ficha técnica de la estación meteorológica "Husco II"

Estación Husco II	
Propietario	Compañía minera del pacifico
Operador	Serpram S.A
Comuna	Husco
Coordenadas UTM 19 S	281581 E 6849067 N
Inicio de operación	01 – 08 – 2013
Parámetros medidos	SO ₂ , NO, NO ₂

Tabla 10: Ficha técnica de la estación meteorológica "EME F"

Estación EME F	
Propietario	GUACOLDA ENERGIA S.A
Operador	CESMEC S.A
Comuna	Husco
Coordenadas UTM 19 S	282486 E 6849125 N
Inicio de operación	06 – 09 – 2000
Parámetros medidos	SO ₂ , NO ₂ , PM ₁₀ , CO, O ₃

Tabla 11: Ficha técnica de la estación meteorológica "EME M"

Estación EME M	
Propietario	GUACOLDA ENERGIA S.A
Operador	CESMEC S.A
Comuna	Husco
Coordenadas UTM 19 S	282763 E 6848691 N
Inicio de operación	06 – 09 – 2000
Parámetros medidos	SO ₂ , NO ₂ , PM ₁₀ , CO, O ₃

Fuente: MMA, 2019

El tratamiento de datos consistió en considerar como referentes los indicadores informados por la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2005) en su informe "Air Quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfure dioxide, Global update 2005". Estos indicadores informan en base a diversas informaciones científicas, sobre el límite de concentración de contaminantes, para cada sustancia, en donde el nivel pasa a ser

dañino para la salud de la población, de acuerdo con evidencia empírica de población urbana expuesta a dichos contaminantes.

A continuación, se muestran los límites informados por la Organización Mundial de la Salud para los distintos tipos de contaminantes.

Tabla 12: Límites peligrosos de niveles de concentración de contaminantes

Contaminante	Límite de exposición a corto plazo	Límite de exposición a largo plazo
PM ₁₀	50 µg/m ³ Media 24 h	20 µg/m ³ Media anual
PM _{2.5}	25 µg/m ³ Media 24 h	10 µg/m ³ Media anual
NO ₂	200 µg/m ³ Media 1 h	40 µg/m ³ Media anual
SO ₂	500 µg/m ³ Media 10 min	20 µg/m ³ Media 24 h

Fuente: WHO, 2005

Los indicadores recién descritos sobre límites máximos informados por la Organización Mundial de la Salud, se comparan con la información entregada por las estaciones de medición de contaminantes localizadas en la zona, y con los datos obtenidos como resultado de la modelación. En este ejercicio se obtiene el nivel de impacto generado por las emisiones contaminantes antes mencionadas.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. ZONA DE ESTUDIO 1: PUCHUNCAVI

Los resultados de la modelación realizada para la Comuna de Puchuncaví arrojan que las emisiones generadas por las plantas termoeléctricas a carbón consideradas tienen un radio de afectación significativo de entre 10 y 20 km alrededor de las centrales. En específico, los niveles de dióxido de azufre predichos para un promedio de 24 h exceden por más del doble, las concentraciones de peligrosidad informadas por la Organización Mundial de la Salud. Lo anterior, sin considerar otras fuentes de emisión existentes en el parque industrial.

Estas concentraciones conllevan riesgos significativos en la aparición de síntomas respiratorios agudos, especialmente para la población más vulnerable como lo son los niños, adultos mayores y personas con enfermedades respiratorias.

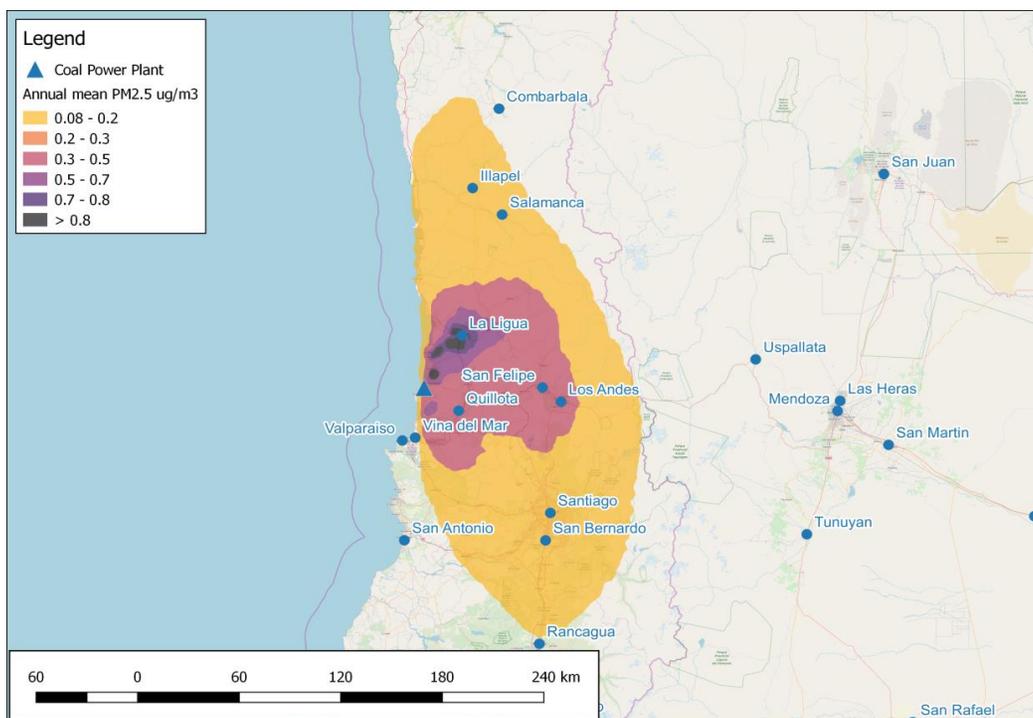


Figura 2: Promedio Anual de concentraciones para material particulado PM 2.5 en la Comuna de Puchuncaví.

Fuente: Elaboración propia, 2019

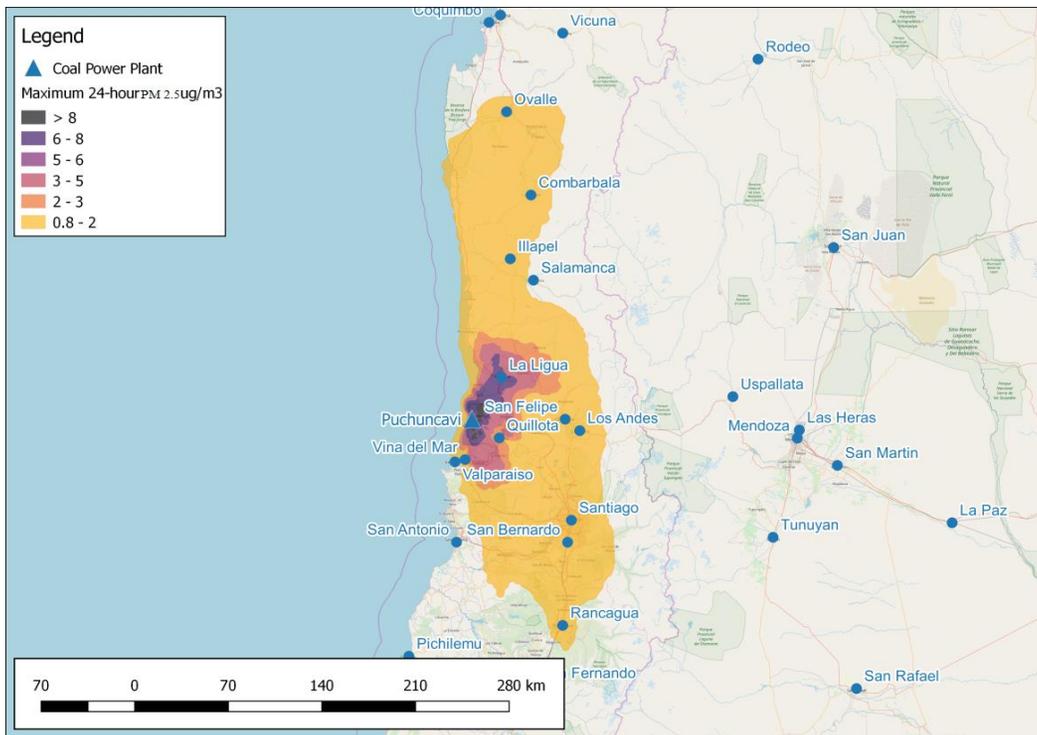


Figura 3: Promedio Máximo 24 h para material particulado PM 2.5 Comuna de Puchuncaví.

Fuente: Elaboración propia, 2019

En las Figuras 2 y 3, se muestra la contribución de material particulado 2.5 de las cuatro plantas modeladas para Puchuncaví, mostrando el promedio anual (Figura 2) y el promedio máximo en 24 h (figura 3). Se puede apreciar que las cuatro termoeléctricas modeladas en la comuna aportan cerca de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a la media anual de material particulado localmente, y en una proporción menor, afectan hasta más de 100 km al norte y sur del área modelada.

Respecto al promedio máximo en 24 h (figura 3), se puede observar que el impacto a corto plazo aportado por las cuatro termoeléctricas estudiadas es significativo, en periodos en donde las condiciones climáticas son desfavorables, producto del poco dinamismo de los flujos dispersivos. Para estos periodos, se observan concentraciones de material particulado sobre $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, representando más de un tercio del límite recomendado por la Organización Mundial de la Salud. Esto, sin considerar las otras fuentes de emisión existentes en el parque industrial; lo cual deja en evidencia, las altas concentraciones a las que se encuentra expuesta la población de la comuna, afectando incluso, otras comunas y regiones, como la Región Metropolitana, la cual ya está decretada como zona saturada en cuanto a material particulado.

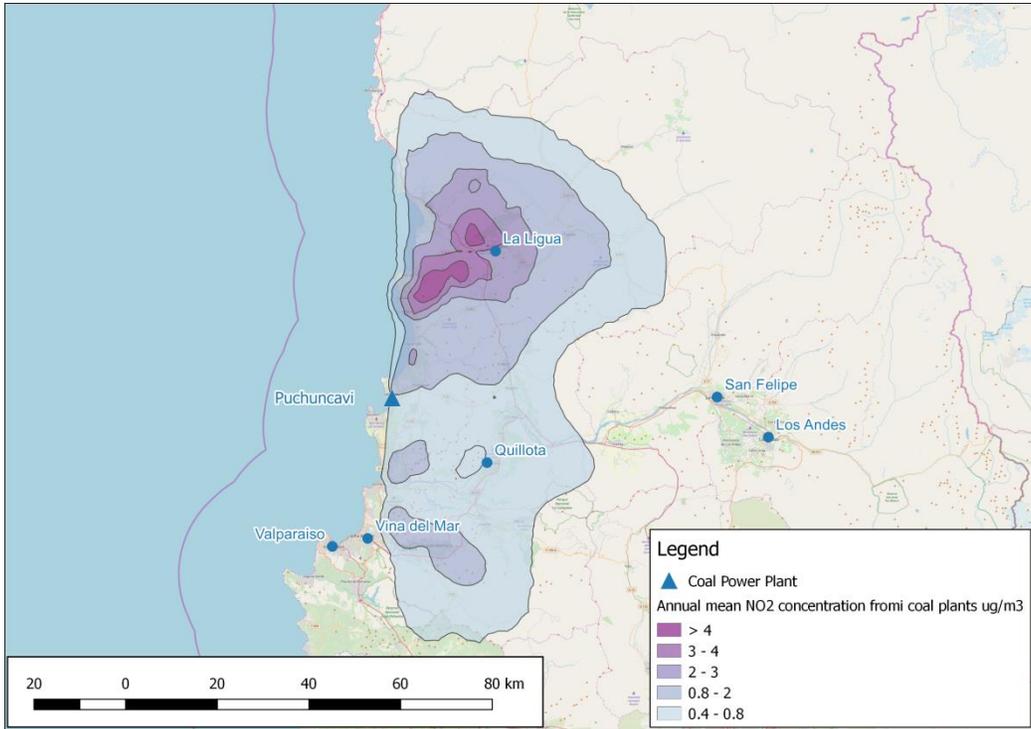


Figura 4: Promedio Anual de concentraciones de dióxido de nitrógeno en la Comuna de Puchuncaví.

Fuente: Elaboración propia, 2019

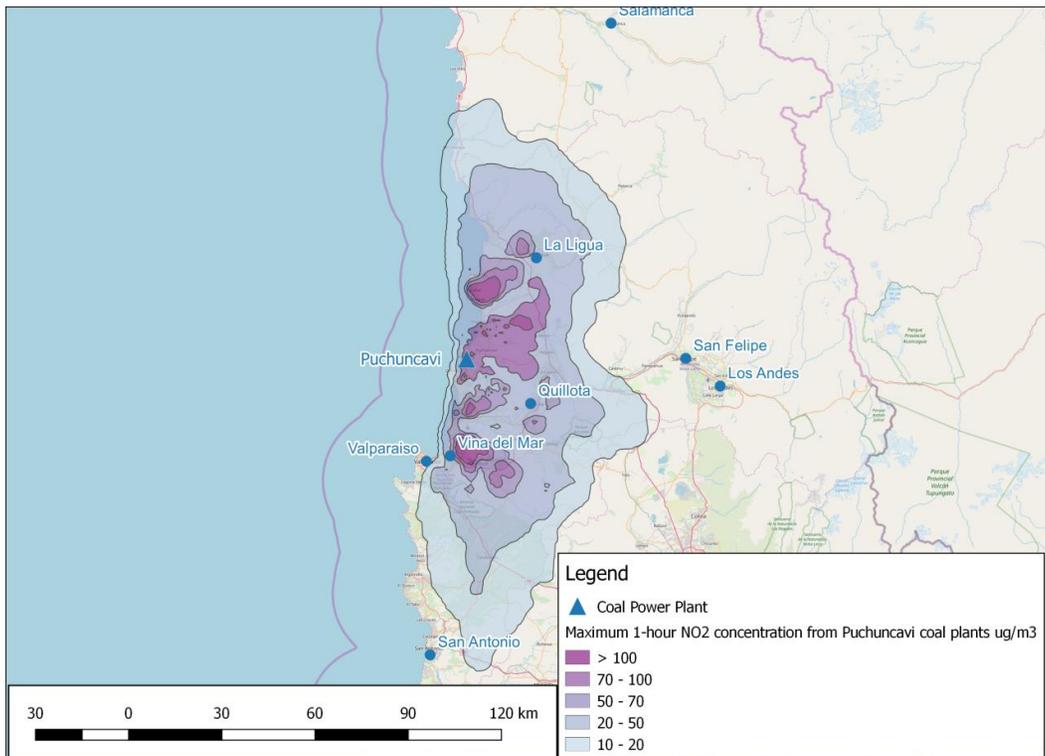


Figura 5: Concentraciones máximas horarias de dióxido de nitrógeno en la Comuna de Puchuncaví.

Fuente: Elaboración propia, 2019

En la Figura 4 se muestra el promedio anual de las emisiones de dióxido de nitrógeno generadas por las cuatro termoeléctricas a carbón de la comuna y en la Figura 5, se presentan los máximos horarios. Respecto al promedio anual, se aprecia una concentración local de $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ por parte de las termoeléctricas modeladas, lo que representa un 10% el límite recomendado por Organización Mundial de la Salud (ver Tabla 12). A distancias más lejanas, la dispersión de este contaminante es significativa, abarcando distancias de más de 60 km de dispersión hacia el este y oeste del punto de emisión, afectando a mayor cantidad de comunas.

Existe una notable diferencia en el patrón de comportamiento del **dióxido de nitrógeno** con respecto al **material particulado**, lo cual se debe principalmente al corto periodo de residencia atmosférica del dióxido de nitrógeno debido a su transformación química hacia formas nitrogenadas secundarias.

Respecto a las concentraciones máximas horarias modeladas de dióxido de nitrógeno, se puede observar que en términos de corto plazo, el impacto es significativo. El modelo predice que las 4 plantas consideradas podrían ser capaces de añadir más de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de dióxido de nitrógeno en los días con peores condiciones de dispersión de contaminantes. En las áreas más cercanas, la concentración de emisiones representa un 50% del límite máximo informado por Organización Mundial de la Salud ($200 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Este nivel de concentración es preocupante y deja un reducido espacio si se consideran las otras fuentes de dióxido de nitrógeno presentes en este parque industrial.

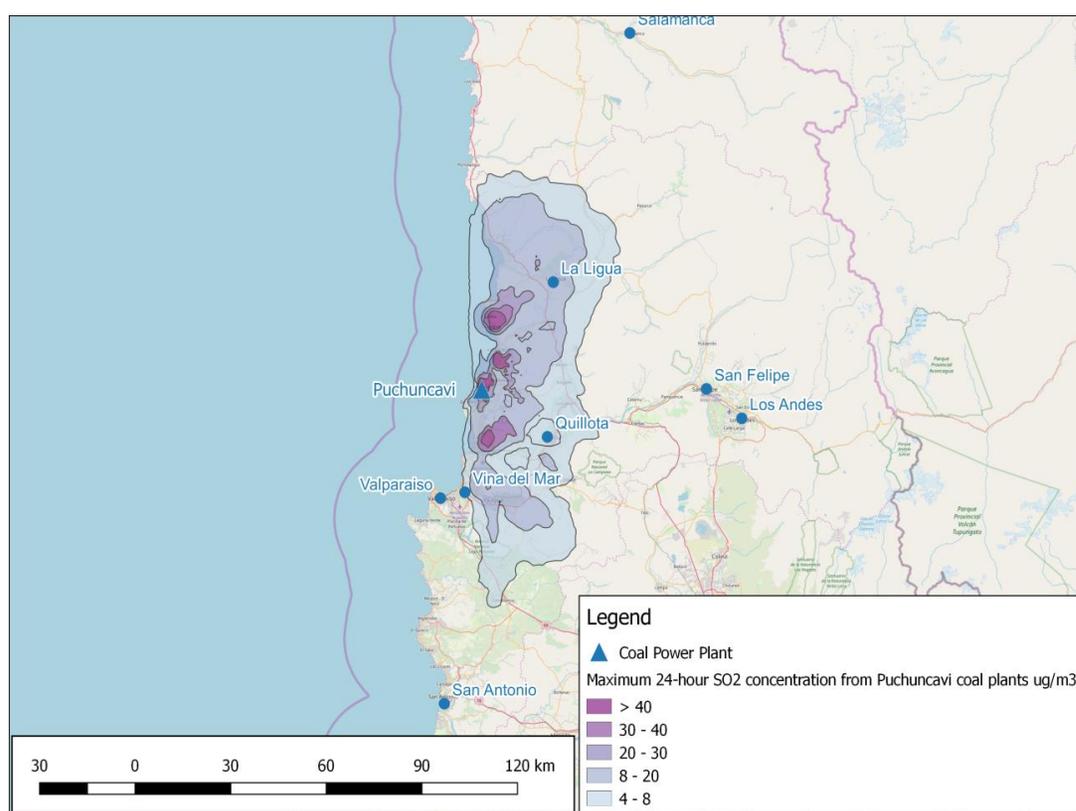


Figura 6: Concentraciones máximas diarias de dióxido de azufre en la Comuna de Puchuncaví.

Fuente: Elaboración propia, 2019

En la Figura 6, se muestran los resultados de la modelación para las emisiones de dióxido de azufre, informados como concentraciones máximas diarias. Los resultados muestran una contribución por parte de las cuatro termoeléctricas modeladas que exceden los $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ localmente, valor que se encuentra por sobre el límite recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para este contaminante ($30 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Esto quiere decir, que en los días con condiciones climáticas con baja capacidad de dispersión de contaminantes, la contribución de las 4 termoeléctricas copa totalmente el nivel de seguridad informado por la OMS.

Modelación de concentraciones en referencia a la Nueva Norma primaria para SO₂

Finalmente, respecto de las emisiones contaminantes de Puchuncavi, se realizó un último análisis referido a la Nueva Norma primaria para SO₂ (D.S 104/2018), la cual establece un límite horario equivalente a la normativa vigente en la Unión Europea, de 350 µg/m³ con percentil 98,5.

Para lo anterior, se modeló la dispersión de contaminantes, teniendo como resultado que las termoeléctricas modeladas generan un área de afectación que se extiende a más de 15 kilómetros desde la fuente de origen, y generando un máximo de 126,12 µg/m³ promedio horario, valor que representa más de un 36% del límite establecido por la norma. Esto evidencia que la contribución de las 4 termoeléctricas modeladas es significativa, tomando en cuenta que el análisis no considera otras fuentes de contaminantes presentes en el parque industrial.

4.1.1. Análisis de datos experimentales

Las 3 estaciones de medición de calidad del aire de donde se obtuvieron los datos de concentración de emisiones, poseen un periodo de generación de datos de una hora. Los datos fueron procesados de manera tal de obtener indicadores lo más representativos posibles para ser comparados con los límites establecidos por la Organización Mundial de la Salud, los que se presentan en la Tabla 12.

En las tablas a continuación, se presentan los resultados del procesamiento de los datos para el año 2017 a lo largo de los 12 meses de ese año cuando. Se destacan en rojo, los valores que superan los límites establecidos por la Organización Mundial de la Salud.

Tabla 13: Datos mensuales de concentraciones de contaminantes medidas en estación Loncura

	Indicador	Año 2017 concentraciones en µg/m ³											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Estación Loncura	PM 10 media 24 h	68,1	52,8	128,2	56,2	31,1	28,6	35,9	25,2	38,1	31,1	29,9	40,0
	PM 10 Media Anual	47,11											
	PM 2.5 media 24 h	19,8	14,1	12,68	20,7	17,7	15,8	23	13,7	15,1	11,2	12,5	13,4
	PM 2.5 media anual	15,79											
	SO2 media 24 h	8,39	12,2	12,82	16,2	14,5	17,8	27,3	17,4	21,7	14,9	15,1	16
	SO2 media 1 h*	561	460	515,9	500	425	747	604	833	602	836	687	801
	NO2 media 1h **	140	199	115,8	281	144	201	500	274	162	147	238	121
	NO2 media anual	9,911											

Tabla 14: Datos mensuales de concentraciones de contaminantes medidas en estación Ventanas

	Indicador	Año 2017 concentraciones en µg/m ³											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Estación Ventanas	PM 10 media 24 h	72,9	60,9	42,5	52,1	34	29,3	39,5	29,9	37,4	36,6	38,6	41,1
	PM 10 Media Anual	42,81											
	PM 2.5 media 24 h	18	13,6	11,44	13,6	15,1	13,8	20,6	13,8	13,1	10,5	10,8	10,9
	PM 2.5 media anual	13,78											

	SO2 media 24 h	13,4	16,2	13,25	14,7	14,6	18,4	20,1	14,6	16,2	16,4	12,8	10,6
	SO2 media 1 h**	165	456	146	279	227	222	284	247	215	247	307	140
	NO2 media 1h	46,9	31,9	27,01	22,8	28,1	32,4	34,2	34,5	22,8	21,9	22,1	23,4
	NO2 media anual	8,21											

Tabla 15: Datos mensuales de concentraciones de contaminantes medidas en estación La Greda

	Indicador	Año 2017 concentraciones en $\mu\text{g}/\text{m}^3$											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Estación La Greda	PM 10 media 24 h	57	42,2	43,4	41,3	38,3	37,2	42,9	32,1	45,2	30,4	31,7	29,5
	PM 10 Media Anual	39,22											
	PM 2.5 media 24 h	17,3	10,9	6,623	8,7	15,9	16,6	21,6	12,5	12,5	10,4	10,1	10,4
	PM 2.5 media anual	12,81											
	SO2 media 24 h	12,9	18,9	16,8	18,8	14,8	17,7	15,8	14,6	16,9	17,3	17,7	17,2
	SO2 media 1 h**	176	602	170,8	374	256	480	279	174	272	374	317	444
	NO2 media 1h	25,8	27,9	27,99	27,7	33	28,8	30,6	29,1	22,2	26,9	22,7	28,4
	NO2 media anual	9											

** Dado que los datos entregados tienen un tiempo de muestreo de 1h, la media 1h corresponderá al valor máximo registrado durante el mes en cuestión.

A partir de los resultados expuestos en las tablas anteriores, se puede observar que el contaminante que genera mayor riesgo a la salud de la población corresponde al material particulado, en específico el material particulado PM_{10} . Esta sustancia excede los límites recomendados por la OMS reiteradas veces durante el año 2017, excediendo en más de un 156% los niveles recomendados.

Por otro lado, los niveles de dióxido de azufre presentes en el aire, sobrepasan reiteradamente los valores recomendados, siendo la estación Loncura, la locación que detectó mayor concentración, mostrando valores máximos horarios que exceden en 66% los valores recomendados. La diferencia de concentraciones en esta estación, muestra la importancia de la componente velocidad del viento, la cual puede generar diferencias de concentración a nivel local bastante significativas.

4.2. ZONA DE ESTUDIO 2: HUASCO

La modelación realizada en base a las emisiones generadas por las 5 termoeléctricas que operan en la Comuna de Huasco, arroja que, para todos los contaminantes en estudio, se presenta un radio de afectación de más de 100 km, con concentraciones significativamente altas en el radio de 15 km de distancia. En específico, los niveles de dióxido de azufre resultantes en el área exceden los límites de peligrosidad informada por OMS. Estos cálculos realizados, no consideran otras fuentes de emisión cercanas al complejo termoeléctrico.

Cabe mencionar que estas concentraciones tienen directa relación con el aumento de riesgos respiratorios para la población más vulnerable de la comuna, como lo son niños, adultos mayores y personas con enfermedades respiratorias.

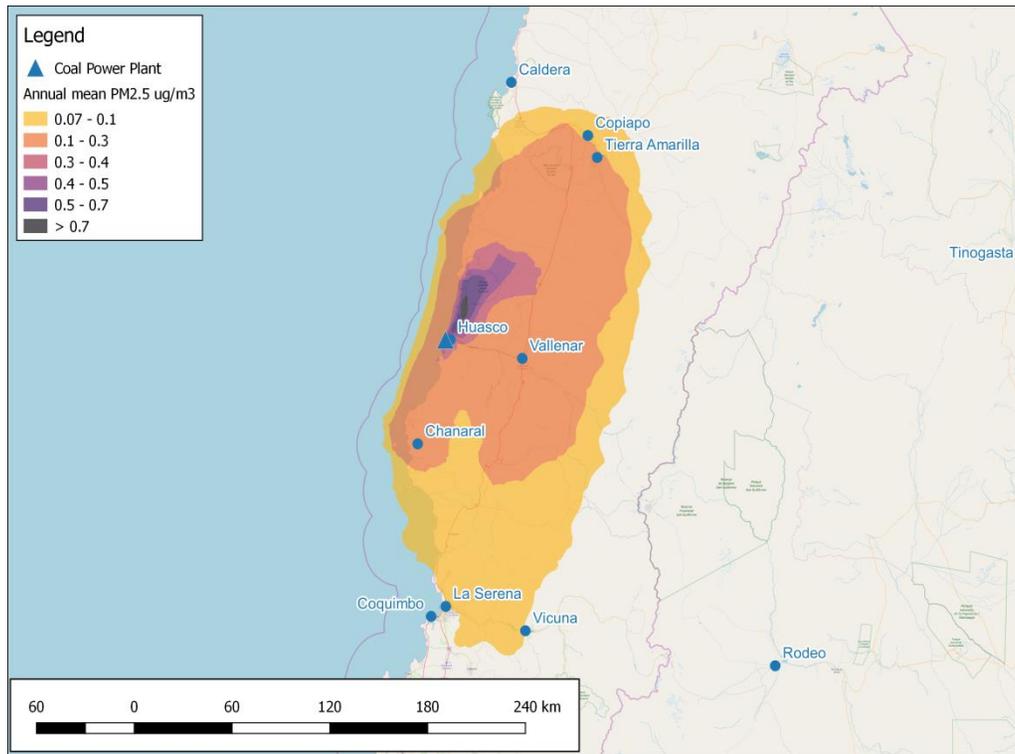


Figura 7: Promedio de concentraciones anual para material particulado 2.5 en la Comuna de Huasco.

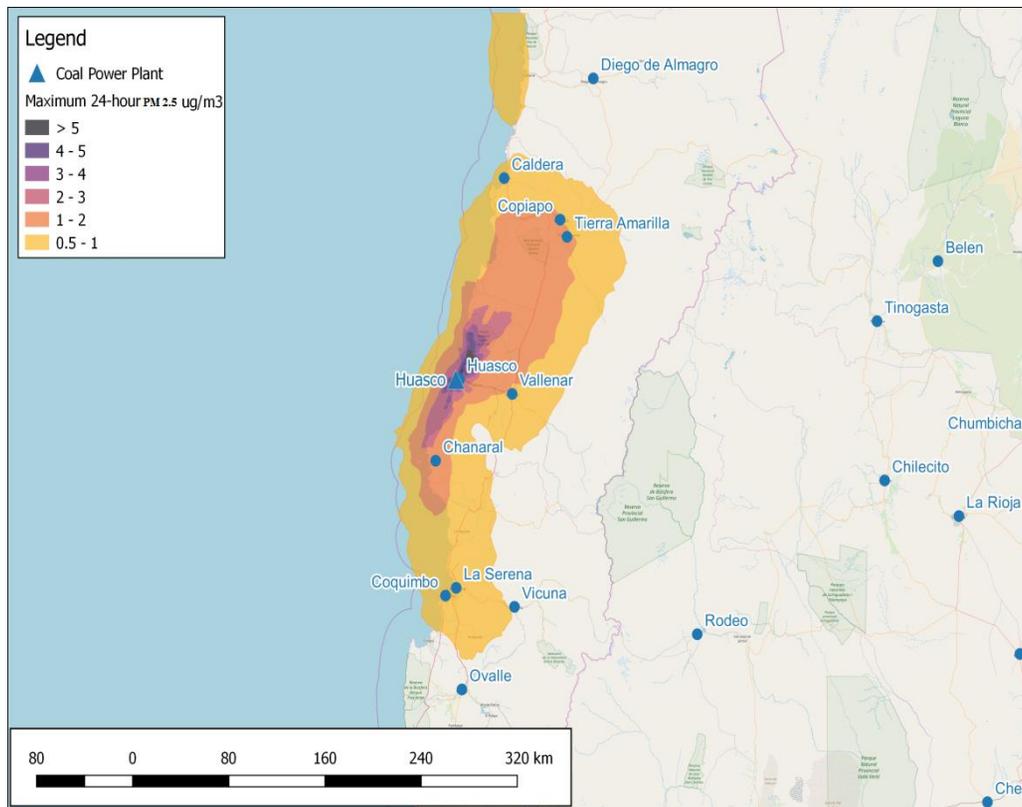


Figura 8: Máximos diarios para concentraciones de material particulado 2.5 para la comuna de Huasco.

En la **Figura 7** se presenta la pluma modelada para concentraciones anuales de material particulado PM 2.5, donde se puede observar una contribución de $0,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el área más cercana a las termoeléctricas modeladas, lo cual sobrepasa en un 6% el límite de peligrosidad informado por OMS.

El mayor impacto en la calidad del aire, durante todos los meses en el área, ocurre al noreste de las plantas en la comuna de Huasco. El impacto está muy influenciado por la topografía y vientos dominantes que inciden en la dispersión de contaminantes. El área costera al sur de las plantas se ve más afectada en los meses de invierno, de mayo a septiembre, cuando los vientos del norte son más recurrentes. En general, el impacto de las emisiones de PM2.5 en la calidad del aire es mayor durante el invierno, debido a la disminución de la velocidad del viento y a las condiciones atmosféricas más propicias para la formación de partículas secundarias, incluida una mayor humedad.

En la **Figura 8** se muestran las concentraciones máximas diarias para material particulado en la comuna de Huasco, en donde se aprecian niveles mayores a $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en las cercanías de las termoeléctricas modeladas, lo cual representa un 20% el límite máximo recomendado por la OMS. Este nivel es significativo, pues no se están incluyendo las emisiones de otras fuentes de material particulado del área. La diferencia entre la concentración anual y diaria esta relacionada con los episodios climáticos que no favorecen la dispersión de contaminantes. Esto deja en evidencia, que, durante ciertos días, la calidad del aire puede alcanzar características de peligrosidad para la población, incluso a distancias mayores a 100 km desde la fuente de emisión.

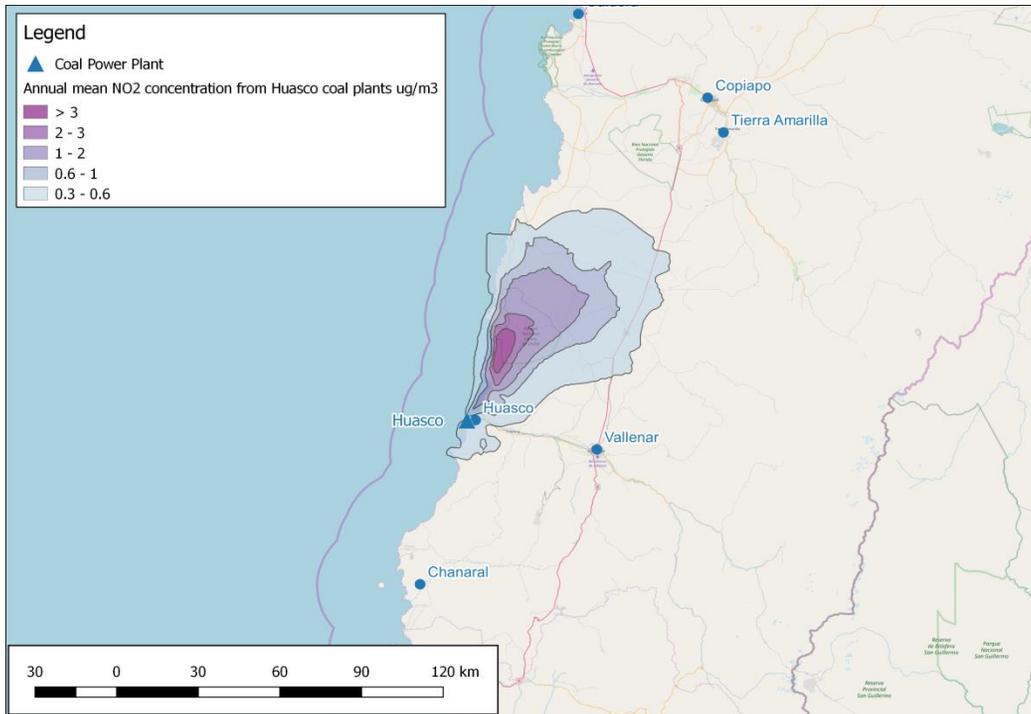


Figura 9: Promedio anual para la concentración de dióxido de nitrógeno para la comuna de Huasco.

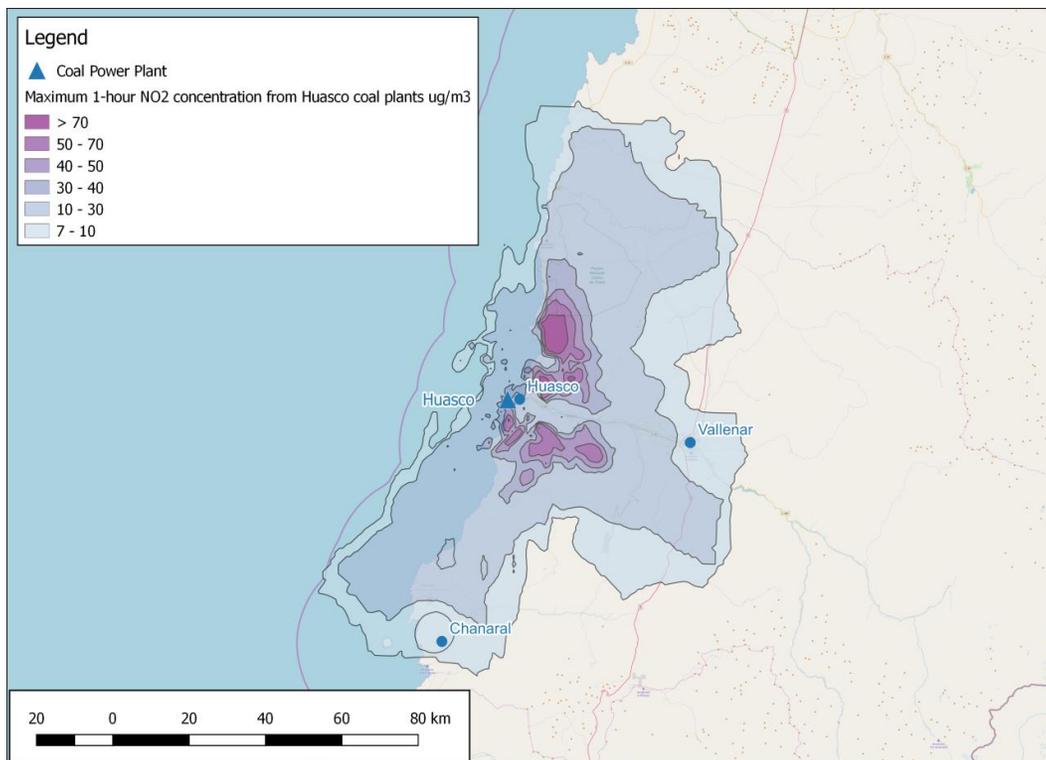


Figura 10: Máximos horarios para concentración de dióxido de nitrógeno para la Comuna de Huasco.

En la **Figura 10**, se muestran los resultados de la modelación de dispersión del contaminante dióxido de nitrógeno, expresado como media anual. En las cercanías de las termoeléctricas consideradas, se puede observar una contribución de $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, lo cual representa una contribución de solo las termoeléctricas con un 7,5 % de

los límites informados por OMS. Las concentraciones más bajas, en comparación con otros contaminantes, se deben principalmente a que el dióxido de nitrógeno tiene un reducido tiempo de presencia en la atmósfera, pues se transforma en contaminantes secundarios debido a transformaciones químicas.

Esto se puede evidenciar en los niveles máximos diarios presentados en la Figura 9 los cuales muestran $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en las cercanías de las termoeléctricas modeladas, valor que representa un 30% del valor límite informado por la OMS. Esta concentración es significativa, ya que no se están considerando otras fuentes de emisión presentes en la comuna de Huasco. Cabe señalar que este tipo de máximos se debe principalmente a días en donde las condiciones atmosféricas dificultan la dispersión de contaminantes.

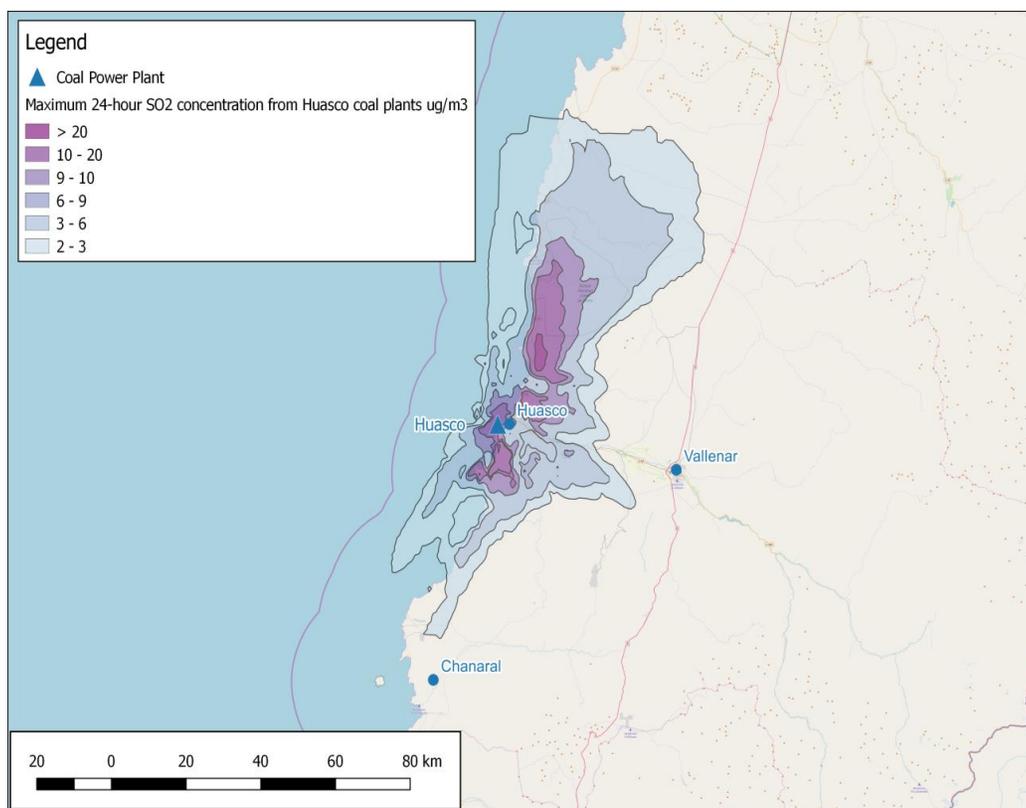


Figura 11: Máximos horarios para emisiones de dióxido de azufre en la Comuna de Huasco.

En la **Figura 11**, se muestran los resultados de modelación para los máximos diarios de concentración de dióxido de azufre. Se puede observar que en las cercanías de las plantas modeladas existe una contribución de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ valor equivalente al límite recomendado por la OMS, dejando en evidencia, que durante los días en que las condiciones atmosféricas de dispersión son limitadas, el aporte de estas plantas representa un peligro para la población. Es necesario constatar que la modelación no consideró otras fuentes de emisión de dióxido de azufre presentes en el área de estudio.

4.2.1. MODELACION DE EMISIONES EN BASE A LA NUEVA NORMA PRIMARIA PARA SO_2

Finalmente, en este estudio se realizó un último análisis en relación a la Nueva Norma primaria para SO_2 (D.S 104/2018), la cual establece un límite horario equivalente a la normativa vigente en la Unión Europea, de $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con percentil 98,5.

Con la finalidad de comparar la modelación realizada con el indicador de la nueva norma de SO_2 , se realizó una nueva modelación, esta vez configurada para entregar el promedio horario con un percentil 98,5 para el dióxido de azufre. Los resultados de dicha dispersión de contaminantes arrojan la existencia de un área de

Estación HUASCO II	Indicador	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	SO2 media 24 h	5	4,8	4,4	4,1	4,5	8,19	5	6,35	6,8	5
	SO2 media 1 h**	636	379	476	392	416	626	603	35,6	27	19
	NO2 media 1h	175	132	134	264	173	127	266	20,3	17	12
	NO2 media anual	4,151									

** Dado que los datos entregados tienen un tiempo de muestreo de 1h, la media 1h corresponderá al valor máximo registrado durante el mes en cuestión.

En el análisis de las 3 estaciones, se puede observar que las concentraciones de dióxido de azufre (SO₂) han llegado en reiteradas ocasiones a niveles nocivos para la salud de las personas, llegando a peaks de concentración horaria del orden de los 800 µg/m³, un 60 % más del límite recomendado por la OMS. Por otro lado, no se observa una correlación entre la calidad del aire y la estacionalidad anual, observándose altas concentraciones en todas las estaciones del año.

Si bien, la concentración de dióxido de nitrógeno se encuentra en niveles aceptables la mayor parte del año, se pueden observar peaks de corto plazo que aumentan los riesgos para la salud de la población.

4.3. OTROS ANÁLISIS Y DESAFÍOS DE ESTUDIOS FUTUROS

Las emisiones contaminantes provenientes de la combustión de carbón en plantas termoeléctricas, además de los impactos sobre la salud humana, generan lluvia ácida que se ha comprobado afecta severamente a los bosques y a otros ecosistemas. La agricultura puede ver afectado el rendimiento de sus cultivos o enfrentar un aumento en el costo de los insumos, ya que tienen que neutralizar los efectos de la lluvia ácida. Esta lluvia ácida también daña propiedades y edificios de importancia cultural. Adicionalmente las cenizas generadas en la combustión del carbón contienen metales pesados tóxicos que están asociados con una serie de riesgos para la salud.

Recientemente, la Universidad Católica de Valparaíso reveló una alta concentración de arsénico en las hortalizas cultivadas en las localidades de La Greda, Campiche y Los Maitenes, en la comuna de Puchuncaví (CHV, 2019). Lo anterior resulta coherente con la presencia de industrias en la zona, ya que las emisiones contaminantes de las centrales termoeléctricas de carbón conducen a la depositación de metales pesados tóxicos, cenizas volantes, lluvia ácida y mercurio, en la tierra y en el agua.

Si bien la absorción real de los metales y la biomagnificación dependen en gran medida de la química, la hidrología y la biología locales; la depositación de los contaminantes ocurre principalmente durante las lluvias. Tanto en Huasco como en Puchuncaví, la mayor parte de la depositación de tóxicos en el medio ambiente se producen durante las lluvias del invierno.

En consecuencia, es altamente preocupante y deberían generarse estudios futuros para responder a la necesidad de implementar planes de remediación de suelos y/o aguas para mejorar la seguridad alimentaria de la población de las zonas contaminadas.

5. CONCLUSIONES

En base a los resultados presentados de este estudio, se evidencia que las emisiones procedentes de las termoeléctricas a carbón modeladas, tanto en la Comuna de Puchuncaví como en Huasco, afectan negativa y significativamente la calidad del aire. Los datos modelados revelan que las concentraciones máximas de contaminantes aportados por las termoeléctricas contribuyen entre un 18 y 30% de los valores límites establecidos por OMS, para la comuna de Huasco y entre el 32 y 50% para la comuna de Puchuncaví. Ello evidencia claramente que el aporte de las emisiones contaminantes, provenientes de termoeléctricas a carbón afectan significativamente la calidad del aire en ambas comunas.; y por tanto la importancia de acelerar políticas de descarbonización que permitan mejorar la calidad de vida y la salud de las poblaciones que habitan estos lugares.

Las modelaciones realizadas, se pueden contrastar con los datos medidos en las distintas estaciones de medición de calidad de aire, las cuales muestran que efectivamente, los límites de peligrosidad establecidos por la organización Mundial de la Salud (OMS) son periódicamente excedidos, generando condiciones adversas en la calidad del aire y poniendo en peligro la salud respiratoria de la población en las comunas estudiadas.

Las emisiones de las 4 termoeléctricas a carbón localizadas en Puchuncaví, elevan los niveles de material particulado (MP) y NO₂ en el aire sobre una gran área que abarca 100 km. de norte a sur y 150 km. de este a oeste desde Puchuncaví-Quintero, llegando a varias otras ciudades, entre ellas Maitencillo, Zapallar y La Ligua. Las emisiones de las 5 centrales eléctricas a carbón localizadas en Huasco se dispersan de manera similar afectando a ciudades, pueblos y áreas protegidas, incluyendo Carrizal, Freirina y el Parque Nacional Llanos de Challe.

Esta contaminación generada por estas emisiones aumenta el riesgo de diversas enfermedades como el cáncer de pulmón, derrame cerebral, enfermedades cardíacas y respiratorias en los adultos, así como infecciones respiratorias en los niños. Esto conduce a generar muertes prematuras por estas causas. Las emisiones de SO₂, NO_x y polvo contribuyen a esta exposición a partículas tóxicas. Adicionalmente, las emisiones contaminantes de las centrales de carbón provocan lluvia ácida, la cual puede afectar los cultivos y los suelos, así como también provocar precipitaciones de metales pesados tóxicos como arsénico, níquel, cromo, plomo y mercurio.

Estos impactos se ven agravados principalmente por las débiles regulaciones sobre límite de emisiones contaminantes en Chile para las industrias contaminantes, los que superan con creces los estándares de emisión de regiones como la UE y China. Además de los débiles mecanismos e instituciones de medición, fiscalización y control.

Los resultados de la modelación aplicada en el estudio, predicen que puede producirse una superación de las normas de calidad del aire para mercurio en Valparaíso, Petorca y Huasco y una superación para el SO₂ en Valparaíso, Petorca, Quillota y Huasco. Hecho que ha sido corroborado con los datos de calidad del aire de las estaciones de monitoreo respectivas.

Considerando los efectos de la contaminación en Puchuncaví-Quintero y Huasco, resulta importante generar en forma urgente estudios epidemiológicos y políticas públicas que consideren el impacto del uso del carbón sobre la salud de la población; con el objetivo de acelerar el reemplazo del carbón en la matriz eléctrica, por energías limpias y seguras, que contribuyan a mejorar la salud respiratoria y cardiovascular de las poblaciones locales.

Esta urgencia, ha sido destacada por la Organización Mundial de la Salud (OMS) desde hace más de una década (2005) La OMS y otras agencias internacionales han declarado reiteradamente que la exposición a contaminantes provenientes de la combustión del carbón es dañina para la salud infantil y genera graves impactos en los sistemas respiratorio y cardiovascular, además de favorecer el aumento en la incidencia de cánceres en personas adultas. Por esta razón, las instituciones internacionales han llamado a establecer estrictos límites a la emisión de las termoeléctricas a carbón, y han recomendado el cierre definitivo de dichas centrales o su reconversión en lugares próximos a asentamientos humanos.

En este contexto, reconociendo el paso inicial dado por el gobierno de Chile para descarbonizar la matriz eléctrica, al anunciar un cronograma de descarbonización parcial el pasado 4 de junio, evaluamos este anuncio

como poco ambicioso e insuficiente, por sólo contempla el retiro de 8 unidades generadoras en base a carbon durante los próximos 5 años; y ninguna de ellas corresponde a las localizadas en la ciudad de Huasco. Además, estableció un plazo voluntario para el cierre de las 20 centrales restantes, excesivamente largo, al 2040, lo cual lo cual implica que los impactos sobre la salud de la población se perpetuaran por 20 años más.

Este débil cronograma fue mejorado el pasado mes de diciembre, en el contexto de la COP 25, donde el gobierno anunció el adelanto en la fecha de cierre de las centrales consideradas en el primer anuncio de descarbonización, e incluyó el cierre de dos termoeléctricas adicionales, lo cual implica que al 2024, se habrán cerrado 10 unidades de generación a carbón, de las 28 que operaban conectadas al Sistema Eléctrico Nacional, a inicios de 2019

El proceso de descarbonización del sector eléctrico en Chile requiere establecer un cronograma de cierre para las 18 centrales no consideradas en el programa de retiro al 2024, y procurar que el cierre o reconversión de estas unidades sea cercano al año 2030, fecha establecida para los países miembros de la OECD.

Adicionalmente, el estado de Chile debe invertir urgentemente en la ejecución de estudios independientes, de calidad científica, en aquellas comunas que albergan termoeléctricas a carbón y que ya disponen de instrumentos de gestión para la calidad del aire, tales como planes de descontaminación. Estos estudios, deben poner especial atención en el monitoreo de la calidad de aire y en los indicadores específicos de salud en las poblaciones expuestas, a objeto de poder asegurar que las acciones de control ambiental, de prevención y control de las enfermedades, sean efectivas.

6. REFERENCIAS

- Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés). 2016. Energy and Air Pollution: World Energy Outlook. 266p. Disponible en: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WorldEnergyOutlookSpecialReport2016EnergyandAirPollution.pdf>
- Anenberg S.C. et al, 2010. An estimate of the global burden of anthropogenic ozone and fine particulate matter on premature human mortality using atmospheric modeling. *Environ Health Perspect.* 118:1189–1195. doi: 10.1289/ehp.0901220
- CEN (Coordinador Eléctrico Nacional), 2018. Restricciones Ambientales de centrales termoeléctricas. <https://www.coordinador.cl/informe-documento/determinacion-de-parametros-operacionales-de-unidades-generadoras/restricciones-operativas/>
- CNE (Comisión Nacional de Energía), 2018. Anuario Estadístico de Energía. 162p.
- CNE (Comisión Nacional de Energía), 2018a. Energía Abierta: factores-de-emision-anual-por-unidad-de-generacion. <http://datos.energiaabierta.cl/dataviews/248821/factores-de-emision-anual-por-unidad-de-generacion/>
- CNE (Comisión Nacional de Energía), 2018b. Consumo de combustibles de centrales del sistema eléctrico nacional para el año 2017.
- Chile Sustentable. 2017. Matriz Eléctrica y generación a carbón en Chile: Propuestas para acelerar la transición energética. 16p.
- Chile Sustentable. 2018. Impactos de las termoeléctricas a carbon en la salud de la población local. 16p. <http://cne.cl/wp-content/uploads/2015/05/consumo-de-combustible-SEN.xlsx>
- Cortés S., Yohannessen K., Tellerés L. & Ahumada E. 2019. Exposición a contaminantes provenientes de termoeléctricas a carbon y salud infantil: ¿Cuál es la evidencia internacional y nacional? *Revista Chilena de Pediatría.* Vol 90(1): 102-114.
- CENMA. (Centro Nacional del Medio Ambiente). 2013. Evaluación de exposición ambiental a sustancias potencialmente contaminantes presentes en el aire, comunas de Concon, Quintero y Puchucaví. 11p
- Decreto 10. Declara Zona Saturada por Material Particulado Fino Respirable MP2.5 como concentración anual y latente como concentración diaria y zona latente por Material Particulado Respirable MP10 como

- concentración anual a las comunas de Concón Quintero y Puchuncaví. Ministerio de Medio Ambiente. Publicado en Diario Oficial: 09 de Junio de 2015.
- Decreto 13. Establece norma de emisión para centrales termoeléctricas. Ministerio de Medio Ambiente. Publicado en Diario Oficial: 23 de Junio de 2011.
- Decreto 38. Establece Plan de Prevención de Contaminación Atmosférica para la localidad de Huasco y su zona circundante. Ministerio de Medio Ambiente. Publicado en Diario Oficial: 30 de Agosto de 2017.
- Decreto 40. Declara Zona Latente por Material Particulado Respirable MP10 como concentración anual a la localidad de Huasco y su zona circundante. Ministerio de Medio Ambiente. Publicado en Diario Oficial: 23 de Mayo de 2012.
- Decreto 41. Declara Zona Latente por Material Particulado Respirable MP10, la zona geográfica comprendida por las comunas de Lota, Coronel, San Pedro De La Paz, Hualqui, Chiguayante, Concepción, Penco, Tome, Hualpen y Talcahuano. Ministerio Secretaría General de la Presidencia. Publicado en Diario Oficial: 06 de Marzo de 2006.
- Decreto 50. Declara Zona Saturada por Material Particulado Respirable MP10 como concentración anual a la zona circundante a la ciudad de Tocopilla. Ministerio Secretaría General de la Presidencia. Publicado en Diario Oficial: 04 de Octubre de 2007.
- Decreto 74. Declara Zona Saturada por Material Particulado Respirable MP10 como concentración de 24 horas a la zona circundante a la ciudad de Tocopilla. Ministerio Secretaría General de la Presidencia. Publicado en Diario Oficial: 23 de Agosto de 2008.
- Decreto 105. Aprueba Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví. Ministerio de Medio Ambiente. Publicado en Diario Oficial: 30 de Marzo de 2019.
- DMC (Dirección Meteorológica de Chile) 2017. Consulta a plataforma web: <http://www.meteochile.cl/PortalDMC-web/index.xhtml>
- Exponent 2011: CALPUFF Modeling System Version 6. User Instructions. http://www.src.com/calpuff/download/CALPUFF_Version6_UserInstructions.pdf
- Hervé, D., Hervé, D., Schönsteiner, J., Mariangel, S., & Mewes, I. (2012). Empresas, medio ambiente y derechos humanos: la zona industrial de Quintero-Puchuncaví. En: Informe anual sobre derechos humanos en Chile 2012, Universidad Diego Portales (Eds) (pp. 131-162). Santiago, Chile.
- Jones, B., and B. C. O'Neill. 2017. Global Population Projection Grids Based on Shared Socioeconomic Pathways (SSPs), 2010-2100. Palisades, NY: NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC).
- KAS Ingenieros, 2017. Análisis de costos de operación y rentabilidad de plantas a carbón en el mercado eléctrico chileno. Santiago, Chile.
- Kopplitz, N. et al. 2017: Burden of Disease from Rising Coal-Fired Power Plant Emissions in Southeast Asia. Environmental Science & Technology. <http://dx.doi.org/10.1021/acs.est.6b03731>
- Krewski, D et al. 2009. Extended follow-up and spatial analysis of the American Cancer Society study linking particulate air pollution and mortality (No. 140). Boston, MA: Health Effects Institute.
- Lee SJ, Seo YC, Jang HN, Park KS, Baek JI, An HS, Song KS, 2006. Speciation and mass distribution of mercury in a bituminous coal-fired power plant. Atmospheric Environment 40:2215–2224.
- Lockwood A.; Weelker-Hood K.; Raunch M. and Gottlieb B. 2009. El Impacto del Carbón sobre la Salud Humana. Physicians for Social Responsibility – PSR. EEUU.
- MMA (Ministerio de Medio Ambiente) Chile, 2017a. Programa para la Recuperación Ambiental y Social de Quintero – Puchuncavi. 356p.
- MMA (Ministerio de Medio Ambiente). Chile, 2017b. Programa para la Recuperación Ambiental y Social de Huasco. 290p.
- MMA (Ministerio de Medio Ambiente), 2018. Tercer Informe Bienal de Actualización de Chile sobre Cambio Climático. Resumen Ejecutivo. 21p.
- MMA (Ministerio de Medio Ambiente), 2019. Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire, plataforma web: <https://sinca.mma.gob.cl/>

- Ministerio de Energía, 2018. Estudio de variables ambientales y sociales que deben abordarse para el cierre o reconversión programada y gradual de generación eléctrica a carbón. Consultora INODU. 192p.
- Mujeres en Zona de Sacrificio (2019). Quintero – Puchuncavi, Zona de Sacrificio. Ponencia presentada en en “Encuentro de Zonas de Sacrificio”, Santiago, 2018.
- SNIFA (Sistema Nacional de Información y Fiscalización Ambiental), 2018. Datos abiertos: Emisiones de Centrales Termoeléctricas (D.S. 13/2011) para el año 2017. <http://snifa.sma.gob.cl/v2/DatosAbiertos>
- Toro RA, M Canales, RG Flocchini, RGE Morales, MA Leiva, 2014. Urban Atmospheric Ammonia in Santiago City, Chile. Aerosol and Air Quality Research, 14:33–44.
- UNEP (United Nations Development Programme), 2017. Toolkit for Identification and Quantification of Mercury Releases. UN Environment Chemicals Branch, Geneva, Switzerland.
- US EPA (United States Environmental Protection Agency) AP 42, Fifth Edition Compilation of Air Pollutant Emissions Factors.
- World Bank Databak, World Development Indicators. <http://databank.worldbank.org/data/home.aspx>
- World Health Organisation (WHO), 2006. WHO Air Quality Guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide, Global update 2005.
- World Health Organization (WHO), 2013. Health risks of air pollution in Europe-HRAPIE project. http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0006/238956/Health_risks_air_pollution_HRAPIE_project.pdf?ua=1
- WHO (World Health Organization) , 2014. Global Health Estimates. http://www.who.int/healthinfo/global_burden_disease/estimates/en/index1.html