



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS

**TRABAJO FINAL DE GRADO PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIATURA EN
QUÍMICA Y TECNOLOGÍA AMBIENTAL**

**“Estimación del aporte a los niveles de material
particulado ambiental, por parte de las centrales
térmicas del Gran La Plata, mediante el diseño de una
red de monitoreo de calidad de aire”**

AUTOR: SANTIAGO AGUILAR FERRARO

DIRECTORA: Dra. YANINA SANCHEZ

TUTORA: Lic. KARINA BALBI

AÑO: 2021

AGRADECIMIENTOS

A mi viejo y a mi vieja, por su constante contención y apoyo. Por darme todo lo que estaba a su alcance y más, para lograr el objetivo de recibirme.

A mis hermanos, tíos, tías, abuelos por todo lo compartido.

A mis tremendos amigos y amigas de Pelle, que siempre están y nos acompañamos en todo momento durante todos estos increíbles años de universidad.

A todos mis amigos y amigas que me dio la Facultad en los primeros años, por acompañarme y disfrutar cada oportunidad y entrar en confianza desde el primer momento.

Al deporte más lindo que conozco por darme tantos amigos y compañeros en esta ciudad desde el primer año y enseñarme tantos valores.

A mis compañeros y compañeras de Ambiental por estar predispuestos a apoyarme en todo momento que lo necesitaba y por tantos mates compartidos durante los últimos años de carrera.

También agradecer a quienes hicieron posible la realización este trabajo:

A Kari por confiar en mí y presentarme a Yani quienes me brindaron su apoyo y constante confianza desde el primer momento. A Yani también por haber confiado en mí desde el primer momento, haberme enseñado tanto y ser una guía en este camino.

A Esteban por su predisposición y gran ayuda en todo momento de este trabajo, sobre todo en el tramo final.

Al Dr. Enrique Puliafíto, ya que sus contribuciones fueron muy importantes para la realización de este trabajo.

Sin ustedes, nada de esto sería posible.

Gracias a todos y todas los que de alguna u otra forma me acompañaron durante todos estos años.

ÍNDICE

RESUMEN.....	4
1. INTRODUCCIÓN.....	5
1.1. CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA.....	5
1.1.1. <i>MATERIAL PARTICULADO</i>	6
1.1.2. <i>MARCO NORMATIVO</i>	8
1.2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	8
1.2.1. <i>CENTRALES TÉRMICAS</i>	9
1.3. INVENTARIO DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS.....	12
1.4. SISTEMA DE MODELADO AERMOD.....	14
1.5. RED DE MONITOREO DE CALIDAD DE AIRE.....	17
1.5.1 <i>EQUIPAMIENTO PARA MONITOREAR MATERIAL PARTICULADO</i>	21
2. OBJETIVOS.....	22
Objetivos generales.....	22
Objetivos específicos.....	22
3. METODOLOGÍA.....	22
3.1. CONFECCIÓN DEL INVENTARIO DE EMISIÓN	23
3.2. CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE MODELADO AERMOD.....	24
3.3. DISEÑO DE LA RED DE MONITOREO DE CALIDAD DE AIRE.....	26
3.4. ESTIMACIÓN DEL APORTE DE LAS CENTRALES TÉRMICAS A LOS NIVELES DE MATERIAL PARTICULADO AMBIENTAL.....	30
4. RESULTADOS.....	31
4.1. INVENTARIO DE EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO DE LAS CENTRALES TÉRMICAS	31
4.2. MODELIZACIÓN DE LA DISPERSIÓN	32
4.3. RED DE MONITOREO DE MATERIAL PARTICULADO PARA LA REGIÓN.....	40
4.4. APORTE ESTIMADO DE LAS CENTRALES TÉRMICAS A LOS NIVELES DE MATERIAL PARTICULADO AMBIENTAL.....	42
5. CONCLUSIONES.....	45
6. BIBLIOGRAFÍA.....	47

RESUMEN

La mala calidad del aire se refiere a cualquier condición que reduce la salubridad o cualquier otra propiedad no deseada del aire como la visibilidad y el olor. A su vez, la contaminación del aire se define como la presencia en la atmósfera de cualquier agente físico, químico o biológico, en lugares, formas y concentraciones tales que puedan ser nocivos para la salud, seguridad o bienestar de la población, o perjudiciales para la vida animal y vegetal.

El presente estudio es un trabajo de investigación que tiene como objetivo general evaluar el aporte de las centrales térmicas emplazadas en el Gran La Plata sobre los niveles de material particulado ambiental de la región, en función de sus emisiones y de la meteorología regional. El trabajo está enfocado en la fracción respirable de material particulado, tanto material particulado menor a 10 micras (MP₁₀) como material particulado menor a 2.5 micras (MP_{2.5}).

Para poder estimar el aporte, se recurre al diseño de una Red de Monitoreo de Calidad de Aire mediante la integración en forma sinérgica de tres herramientas científicas recomendadas tanto por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, como por la Organización Mundial de la Salud, las cuales son: inventario de emisiones atmosféricas, modelado de dispersión de contaminantes y monitoreo de contaminantes atmosféricos.

En primer lugar, se realiza un inventario de emisiones atmosféricas de las centrales térmicas de la región, tanto para MP₁₀ como para MP_{2.5}, con el objetivo de obtener los datos de emisión necesarios para introducir en el sistema de modelado AERMOD y poder simular la dispersión del material particulado en la región, a fin de detectar los puntos de mayor concentración y diseñar la Red de Monitoreo de Calidad de Aire de investigación que permita estimar el aporte de estas instalaciones al material particulado ambiental. Para el diseño de la red se tienen en cuenta otras variables, además de las zonas de mayor concentración de los contaminantes, como son fuentes externas no consideradas en la modelación, pero sí importantes en la región de estudio, incluido el tráfico vehicular. También, zonas densamente pobladas, entre otras.

En base a lo expuesto, se logró diseñar una Red Monitoreo de Calidad de Aire que contempla 5 estaciones de monitoreo, con el fin de estimar el aporte de las centrales térmicas a los niveles material particulado ambiental de la región.

Finalmente, a partir de un registro histórico de observaciones ambientales de material particulado, se obtuvo una estimación inicial del aporte que generan las centrales térmicas a los niveles material particulado ambiental, para poder tener noción del orden de magnitud en el que contribuyen estas instalaciones a la calidad del aire. El aporte resultó ser de entre 0.04 % y el 0.16% para MP₁₀ y entre 0.04 y 0.03 % para MP_{2.5}.

Con la Red de Monitoreo de Calidad de Aire propuesta, y la actualización constante de la información de entrada a cada una de las herramientas, dichas estimaciones de aporte podrán ser optimizadas para las centrales térmicas e incluso para otras fuentes a incorporar en un futuro.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. CONTAMINACIÓN DEL AIRE

La contaminación atmosférica está definida en la Ley Nacional 20.284/73 de la Rep. Argentina, como la presencia en la atmósfera de cualquier agente físico, químico o biológico, o de combinaciones de los mismos en lugares, formas y concentraciones tales que sean o puedan ser nocivos para la salud, seguridad o bienestar de la población, o perjudiciales para la vida animal y vegetal o impidan el uso y goce de las propiedades y lugares de recreación [1].

La mala calidad del aire se refiere a cualquier condición que reduce la salubridad o cualquier otra propiedad indeseada del aire, como la visibilidad y el olor. Esta degradación de la calidad del aire, en parte, es el resultado negativo de la modernización en los seres humanos y el ambiente. Asimismo, la creciente contaminación del aire en las zonas urbanas es motivo de preocupación en todo el mundo. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la contaminación atmosférica es el principal riesgo ambiental para la salud [2], quien también estimó que, una de cada nueve muertes en todo el mundo, es resultado de dichas condiciones [3]. Uno de los contaminantes más relevantes para la salud en el mencionado recurso, es el material particulado (MP) con un diámetro de 10 micras o menos, que puede penetrar profundamente en los pulmones e inducir la reacción de la superficie y las células de defensa. El principal aporte de MP se asocia a la quema de combustibles fósiles, pero su composición puede variar según sus fuentes de emisión [4].

Actualmente, se cuenta con abundante evidencia que correlaciona la exposición crónica a contaminantes asociados al tráfico vehicular y a la industria, tales como MP, metales, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs), compuestos orgánicos volátiles (COVs) y gases inorgánicos (SO_2 y NO_x), con efectos adversos al desarrollo y a la función pulmonar, además del incremento de la morbilidad respiratoria, expresada frecuentemente en término de diagnóstico de asma o de enfermedad pulmonar obstructiva crónica, e incremento de la mortalidad principalmente en niños. No obstante, los resultados asociados a MP, son especialmente relevantes respecto del impacto en la salud [5-8]. Los efectos adversos sobre la salud del MP en el aire están particularmente bien documentados. No hay evidencia de un nivel seguro de exposición o un umbral por debajo del cual no se producen efectos adversos para la salud. Así, por ejemplo, la contaminación de MP crea una carga sustancial de la enfermedad, que reduce la esperanza de vida en casi 9 meses promedio en Europa, con más del 80% de su población urbana expuesta a niveles superiores a las Directrices de Calidad del Aire. Dado que en concentraciones relativamente bajas la carga de la contaminación atmosférica sobre la salud es importante, resulta fundamental desarrollar una gestión eficaz de la calidad del aire. Cuando los niveles de MP son muy elevados, tales como los encontrados en las grandes ciudades de la India y China, los contaminantes del aire pueden desencadenar efectos irritantes y efectos inflamatorios en neuroreceptores de las vías respiratorias y del epitelio. Estos niveles de exposición rara vez se encuentran en los países de América del Norte o Europa [7, 9-12]. El MP puede caracterizarse en términos de su composición química (fracción de carbono negro, HAPs, metales, aniones y cationes). La evidencia epidemiológica y toxicológica muestra que, estas diversas fracciones, ejercen distintos tipos y grados de efectos sobre la salud. Además, los diferentes tamaños de partícula y su composición, pueden asociarse a fuentes específicas de emisión, permitiendo identificar las contribuciones particulares de cada una al total de MP determinado. En tal

sentido, el carbono negro es un indicador sensible de las emisiones de procesos de combustión, como las industriales y el tráfico vehicular, sin embargo, no hay evidencia concluyente de que cualquier fuente específica, composición o tamaño (menor a 10 micras) pueda ser excluido como un posible factor contribuyente a la toxicidad del MP [5,7,8,11,13].

Otros estudios desarrollados en Latinoamérica y China señalan resultados equivalentes, y en particular que la prevalencia del asma está dominada principalmente por las concentraciones de MP_{2.5} (menor a 2.5 micras) en la región [5,8,11,13-16]. Los niveles de exposición a MP_{2.5} determinan el tipo de mortalidad, siendo predominantes las de origen cardiovascular a niveles bajos, mientras que la exposición a concentraciones elevadas da lugar a la prevalencia de mortalidad por cáncer pulmonar. Respecto a la exposición a largo plazo a MP_{2.5} se han descrito además el desarrollo de otras enfermedades como diabetes, desarrollo neurológico disminuido en niños y trastornos neurológicos en los adultos [17-23].

En la siguiente sección se describen las principales características y los efectos que causa el material particulado en la salud y el ambiente.

1.1.1. MATERIAL PARTICULADO

El material particulado se define como el conjunto de partículas sólidas y/o líquidas (a excepción del agua pura) presentes en suspensión en la atmósfera [24]. Algunas partículas, como el polvo, la suciedad, el hollín, o el humo, son lo suficientemente grandes y oscuras como para verlas a simple vista. Otras son tan pequeñas que solo pueden detectarse mediante el uso de un microscopio electrónico [25].

Su origen puede ser antrópico o natural. Las partículas pueden ser emitidas directamente a la atmósfera (lo que se conoce como partículas primarias) o formarse en ella por medio de transformaciones de emisiones gaseosas (partículas secundarias). Algunas partículas sirven de núcleo sobre los cuales los vapores se condensan y otras reaccionan químicamente con gases o vapores atmosféricos para formar compuestos diferentes. Cuando dos partículas colisionan en el aire, tienden a adherirse una con la otra por las fuerzas de atracción de la superficie, y así se forman progresivamente partículas más grandes por aglomeración. Las propiedades químicas y físicas del material particulado varían en gran medida con el horario del día, la región, la meteorología y la fuente de emisión [26].

Las partículas pueden clasificarse según sus propiedades aerodinámicas, ya que estas determinan su transporte, los procesos de remoción en el aire, su sitio de deposición y el alcance de su ingreso al tracto respiratorio. El diámetro aerodinámico se usa como indicador del tamaño de la partícula y se define como el diámetro de una partícula esférica de densidad igual a uno, que tiene en el aire la misma velocidad de sedimentación que la partícula considerada. Las partículas MP₁₀ son aquellas con un diámetro aerodinámico de 10 micrones o menos y pueden penetrar y alojarse profundamente dentro de los pulmones, luego las partículas MP_{2.5} son aquellas con un diámetro de 2.5 micrones o menos y son aún más perjudiciales para la salud ya que pueden atravesar la barrera pulmonar e ingresar en el sistema sanguíneo. Por último, las partículas ultrafinas se refieren a las partículas menores a 1 µm (MP₁) [27-30].

El MP es un contaminante de especial preocupación. Muchos estudios han demostrado una relación directa entre la exposición a MP y los impactos negativos en la salud. Las partículas de diámetro más pequeño (MP_{2.5} o menores) son generalmente más peligrosas. Las partículas ultrafinas (de una micra

de diámetro o menos), en particular, pueden alcanzar a penetrar tejidos y órganos, lo que representa un riesgo aún mayor de impactos sistémicos en la salud [29,30].

La presencia en la atmósfera de este contaminante ocasiona variedad de impactos a la vegetación, materiales y a las personas, entre ellos, la disminución visual en la atmósfera, causada por la absorción y dispersión de la luz [31]. Además, la presencia del material particulado está asociada con el incremento del riesgo de muerte por causas cardiopulmonares en muestras de adultos [32]. Muchos estudios epidemiológicos y toxicológicos demuestran que MP_{2.5} es un sólido indicador de riesgo asociado con la exposición a MP de diversas fuentes y en diferentes entornos, señalando que la exposición a MP_{2.5} se asocia con la inflamación sistémica, el estrés oxidativo, la alteración de los procesos eléctricos del corazón y la disfunción vascular [7,10-12,33,34]. Otros estudios ponen en evidencia que los niveles de exposición a MP_{2.5} determinan el tipo de mortalidad, siendo predominantes las de origen cardiovascular si los niveles son bajos, mientras que la exposición a niveles elevados da lugar a la prevalencia de mortalidad por cáncer pulmonar [10,35]. Respecto a la exposición a largo plazo a partículas finas se han descrito otras enfermedades distintas a las cardiovasculares y respiratorias. La evidencia sugiere efectos sobre la diabetes, el desarrollo neurológico en los niños y trastornos neurológicos en los adultos [23,35,36].

En la Tabla 1 se resumen características, fuentes principales y efectos en la salud de los contaminantes estudiados en este trabajo.

Contaminante	Características	Fuente principal	Efectos sobre la salud
MP ₁₀	Material particulado suspendido de diámetro aerodinámico medio menor a 10 µm. Partículas de material sólido o gotas líquidas suspendidas en el aire. Puede presentarse como polvo, niebla, aerosoles, humo, hollín, etc.	Erosión eólica, tráfico en vías sin pavimento y actividades de construcción. Procesos de combustión (industria y tránsito vehicular).	Produce irritación de las vías respiratorias, agrava el asma y favorece las enfermedades cardiovasculares. Se relaciona con la silicosis y asbestosis. Causa deterioro de la función respiratoria (corto plazo). Asociado con el desarrollo de enfermedades crónicas, cáncer o muerte prematura (largo plazo).
MP _{2.5}	Material particulado suspendido de diámetro aerodinámico medio menor a 2.5 µm.	Proceso de combustión (industrias, generación termoeléctrica). Incendios forestales y quemas. Purificación y procesamiento de metales.	Tiene la capacidad de ingresar al espacio alveolar o al torrente sanguíneo incrementado el riesgo de padecer enfermedades crónicas cardiovasculares y muerte prematura.

Tabla 1: Resumen de las características, fuentes principales y efectos sobre la salud de los contaminantes estudiados en este trabajo.

1.1.2. MARCO NORMATIVO

La normativa argentina vigente con respecto al material particulado corresponde a la Ley 5965 promulgada y sancionada en el año 1958. Esta ley se encuentra reglamentada actualmente por el decreto 1074/18 de la Provincia de Buenos Aires, el cual toma como referencia los estándares de calidad del aire de la US. EPA (*United States Environmental Protection Agency*). Vale aclarar que cuando se habla de calidad del aire, se refiere a la concentración del contaminante en el seno de la atmósfera, y no a la salida de la fuente de emisión. Por lo tanto, para obtener los valores de calidad de aire, es excluyente contar con la información del caudal másico de emisión del contaminante de la fuente involucrada y aplicar modelos de dispersión para determinar los niveles de concentración en la atmósfera y así, compararlos con los valores exigidos por la legislación vigente.

El nuevo decreto provincial (N° 1074/18) incorpora al MP_{2.5}. Tema muy controvertido pero que no admite dudas, ya que se trata de una fracción respirable, lo que supone un significativo daño a la salud.

Los valores establecidos en el decreto 1074/18 se muestran en la Tabla 2 [37].

	Tiempo promedio	Valor inicial ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Valor limite ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			Observaciones
			1° etapa	2° etapa	3° etapa	
MP ₁₀	24 hs	150	150	150	150	No podrá ser superado en más de una vez al año
	1 año	50	50	50	50	No se deberá superar la media aritmética anual
MP _{2.5}	24 hs	-	75	40	35	No podrá ser superado en más de una vez al año
	1 año	-	25	15	12	No se deberá superar la media aritmética anual

Tabla 2: Límites de calidad de aire, impuesto por la normativa de la provincia de Buenos Aires, Argentina.

Este decreto propone etapas de implementación para que los establecimientos logren adecuarse a lo exigido, progresivamente en un plazo de 3 años. Esto se conoce como principio de progresividad.

A continuación, se describe la zona de estudio junto al principio de funcionamiento de las centrales térmicas (CTs) emplazadas en la región.

1.2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La ciudad de La Plata, capital de la provincia de Buenos Aires de la República Argentina, cuenta con un aglomerado urbano denominado Gran La Plata conformado por los municipios de La Plata, Ensenada y Berisso. Según el último censo nacional del año 2010, la población es de 799523 habitantes, distribuidos 654324 en el municipio de La Plata, 88470 en Berisso y 56729 en Ensenada [38].

La región limita hacia el noreste con el Río de la Plata, hacia el noroeste con las comunas que integran el Área Metropolitana de Buenos Aires, el mayor conglomerado urbano del país, y hacia el sudeste y sudoeste con comunas básicamente rurales que integran el sistema geográfico de la llanura pampeana. Esta característica topográfica llamada pampa húmeda, se caracteriza por la llanura del suelo y su morfología uniforme.

La zona de estudio de este trabajo se enmarca en el Gran La Plata, con foco, en el municipio de Ensenada y alrededores, el cual presenta reconocidas fuentes de MP por la presencia de un destacable polo petroquímico y parque automotor [26], en donde conviven con casi 57000 personas según el último Censo Nacional [38]. Varios son los conflictos ambientales que surgen de este contexto, y que han sido expuestos en medios de comunicación y/o judicializados [39]. Además, la zona ha sido testigo de una rápida urbanización en las últimas décadas y su consecuente impacto sobre el ambiente. La región cuenta con cuatro centrales térmicas, las cuales serán objeto de estudio en este trabajo (Figura 1). El funcionamiento de estas instalaciones será explicado en el siguiente apartado.

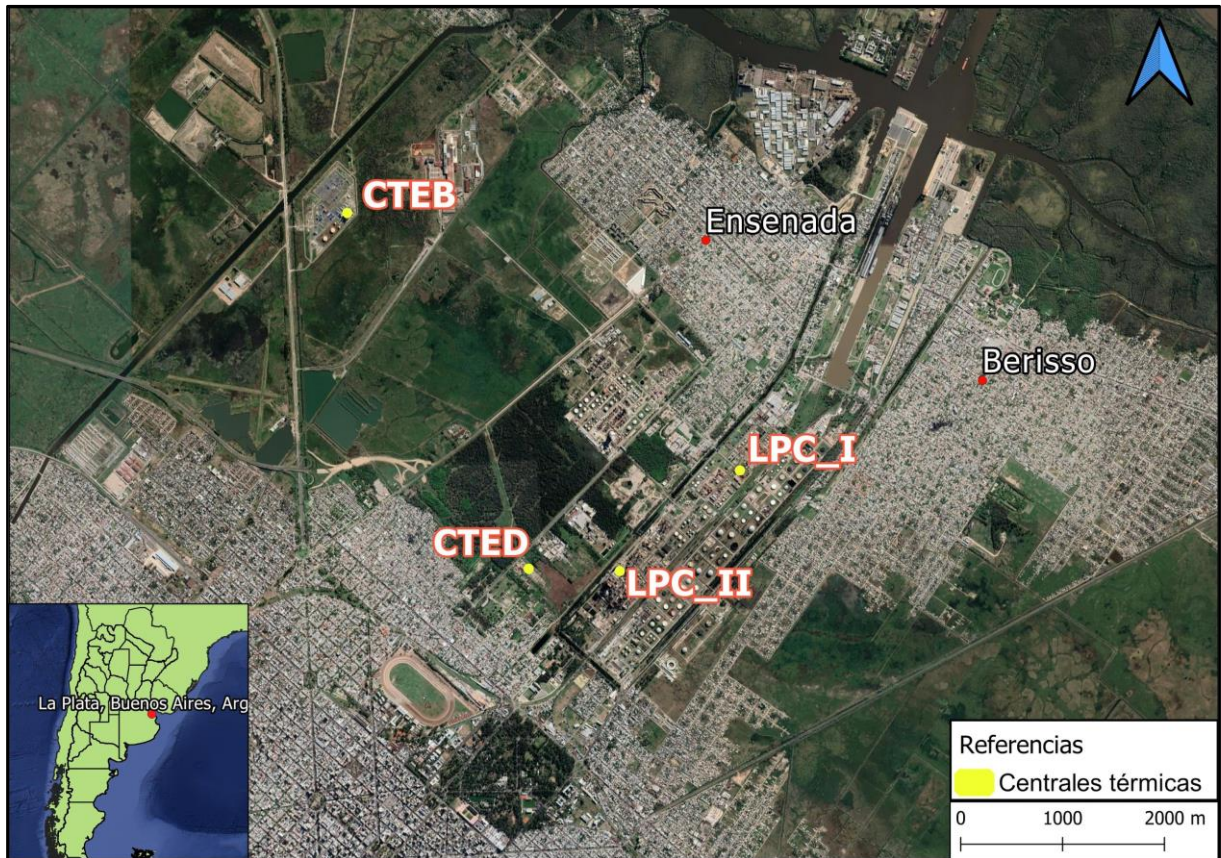


Figura 1: Zona de estudio y ubicación de las centrales térmicas estudiadas en este trabajo. (CTEB: Central Térmica Ensenada Barragán, CTED: Central térmica El Dique, LPC: Central Térmica La Plata cogeneración I y II).

1.2.1. CENTRALES TÉRMICAS

La energía es esencial para el desarrollo económico, social y el mejoramiento de la calidad de la vida. Sin embargo, la mayor parte de la energía del mundo se produce y consume en formas que no podrían perdurar si la tecnología permaneciera constante o si las magnitudes globales aumentaran notablemente.

Las centrales térmicas son plantas de producción de energía eléctrica mediante combustión, cuya actividad principal es el suministro a la red pública (centrales térmicas convencionales).

Las emisiones consideradas, provienen de procesos de combustión controlados y se caracterizan principalmente en función del tipo de combustible utilizado. Además, dichos procesos presentan distintas peculiaridades asociadas a la tipología de las unidades de combustión empleadas (calderas,

turbinas de gas, motores estacionarios) y, en el caso de las calderas, a su potencia térmica nominal (PTN), lo que determina las condiciones en que se realiza la combustión y, consecuentemente, las diferencias entre sus factores de emisión. Según la nomenclatura SNAP-97¹ se distinguen las siguientes actividades [40]:

- Calderas con $PTN \geq 300$ Megawatts (MW)
- Calderas en el rango $300 > PTN \geq 50$ MW
- Calderas con $PTN < 50$ MW
- **Turbinas de gas**
- Motores estacionarios

En base a las actividades antes mencionadas, se debe recalcar que las cuatro centrales térmicas emplazadas en nuestra región de estudio poseen y funcionan a través de turbinas de combustión internas, **turbinas de gas**, ya sea a gas o gasoil, dependiendo de algunos factores como la disponibilidad del recurso involucrado o la época del año. El funcionamiento básico de este tipo de centrales térmicas se observa en la Figura 2 y consta de introducir aire a través de un compresor, comprimir este aire y mandarlo a la cámara de combustión, donde se combina con el combustible. Los gases producidos por la combustión son enviados a la turbina de gas, en donde se expanden y desarrollan trabajo mecánico que se aprovecha para impulsar un generador eléctrico y producir energía eléctrica. Finalmente, los gases calientes son devueltos a la atmósfera [41].

Las emisiones de estas actividades se canalizan siempre a través de chimeneas, de modo que, en la práctica, las emisiones fugitivas (escapes, partículas, vapores de volátiles, etc.) son consideradas como no significativas para la confección de un inventario [40].

Cabe destacar que, el hecho de que todas las centrales térmicas posean el mismo principio de funcionamiento, facilita la realización del inventario y la búsqueda de los factores de emisión. A continuación, se describen las características generales de las mismas.

❖ *Central Térmica El Dique (CTED)*

Esta central térmica se encuentra lindante al Complejo Industrial La Plata, provincia de Buenos Aires, es una planta de generación térmica alimentada a base de gas y gasoil (Diesel). Posee cuatro unidades de 17 MW, que suman una capacidad instalada de 68 MW [43].

❖ *Central Térmica La Plata Cogeneración I (LPC I)*

Esta central se encuentra ubicada dentro del Complejo Petroquímico La Plata, de propiedad de YPF, y posee una capacidad de generación de 128 MW. LPC comenzó su operación comercial en 1997. Es una instalación de cogeneración ubicada en La Plata, provincia de Buenos Aires. La instalación utiliza turbinas de combustión GE MS-9001E, y un generador de vapor de recuperación de calor (HRSG), para producir 200 toneladas de vapor por hora, que son entregadas a YPF. La potencia y capacidad

¹ La nomenclatura SNAP-97 se estructura en tres niveles jerárquicos: Grupo, Subgrupo, Actividad. - El nivel superior, Grupo, consta de 11 divisiones que reflejan las grandes categorías de actividades antropogénicas y naturales. - El nivel medio, Subgrupo, divide el anterior en 78 clases que reflejan la estructura de las actividades emisoras de acuerdo con sus especificaciones tecnológicas y socioeconómicas. - El nivel más desagregado, Actividad, incluye las actividades elementales y las de algunos subgrupos (17) que no aparecen desagregados en actividades [42].

eléctrica generada por la planta se entrega a CAMMESA de acuerdo con la Resolución N° 1/2019. La turbina de gas y los quemadores de ducto complementarios, se alimentan principalmente con gas natural. Cuando el gas natural deja de estar disponible, principalmente debido a factores estacionales, se lo sustituye por gasoil [44].

❖ *Central Térmica La Plata Cogeneración II (LPC II)*

Esta CT, al igual que LPC I, se encuentra ubicada dentro del Complejo Petroquímico La Plata, de propiedad de YPF. Fue inaugurada en el 2020 y cuenta con una potencia instalada de 85 MW y una caldera de recuperación para producir 200 tn/h que serán suministradas a la refinería para sus procesos [44].

❖ *Central Térmica Ensenada de Barragán (CTEB)*

Esta central térmica cuenta con dos conductos. Está conformada por dos turbinas de gas Siemens, habilitadas en 2012, con una potencia total de 567 MW, que representan el 1,4% de la capacidad instalada de toda la Argentina. Dicha central térmica tiene la posibilidad de consumir gas natural o *gas oil* [45].

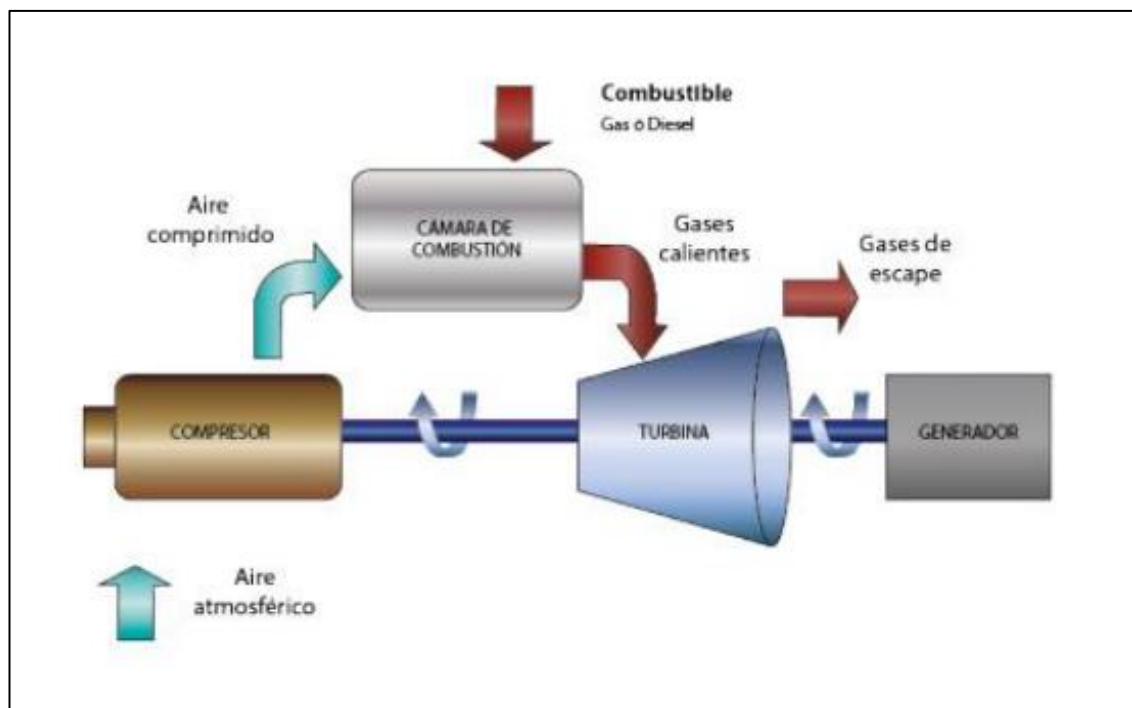


Figura 2: Diagrama del funcionamiento general en el que opera una central termoeléctrica convencional [41].

Se debe tener en cuenta que el caudal de emisión de MP que liberan estas instalaciones a través de sus conductos, como consecuencia de la quema de combustibles para poder generar electricidad, se puede obtener de dos maneras. La primera y más directa, es tomar muestra a la salida de los conductos de emisión mediante un equipo de monitoreo. Este método es el más eficiente, pero requiere personal capacitado, mayor costo y no siempre es posible acceder a los sitios de toma de muestra, muchas veces por ser de propiedad privada. La segunda forma de evaluar la emisión de contaminantes de una fuente fija, y más accesible, es a través de la elaboración de un inventario de emisiones atmosféricas

por factores de emisión, tal como se hará en este trabajo para todas las centrales térmicas de La Plata. Sus fundamentos serán explicados en la siguiente sección.

1.3. INVENTARIO DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS

Un inventario de emisiones atmosféricas es un conjunto de datos que caracterizan y consolidan, mediante sumatoria, las emisiones de contaminantes atmosféricos, de acuerdo con el tipo de fuente, y el tipo y cantidad de contaminantes emitidos, en un área geográfica determinada, con una resolución espacial a nivel municipal o estatal y en un intervalo de tiempo definido [46].

Los inventarios de emisiones son herramientas científicas indispensables que sirven para la gestión de la calidad del aire y para la prevención de la contaminación atmosférica, pueden servir como punto inicial para programas de control y gestión de la calidad del aire.

Dependiendo del objetivo para el que se planifique, los inventarios proporcionan información para diferentes tipos de contaminantes, en base al propósito será el uso que se le dé luego a los resultados y en base al alcance geográfico, se deben definir y seleccionar las fuentes a considerar para la estimación de los datos de emisiones.

El objetivo general de un inventario de emisiones atmosféricas es cuantificar las emisiones generadas por un grupo de fuentes o actividades de interés.

La comprensión cuantitativa de un inventario ayuda a identificar mejor las fuentes de emisión y estimar escenarios futuros de calidad del aire mediante sistemas de modelado. Un inventario de emisiones atmosféricas se puede expresar como se muestra en la Ecuación 1 [47],

$$IEA = \sum_{i=1}^n E_{j,t} \quad \text{Ecuación 1}$$

donde:

- IEA: inventario de emisiones atmosféricas para la sustancia o mezcla de sustancias (j) en el periodo de tiempo (t).
- $E_{j,t}$: emisión atmosférica de la sustancia o mezcla de sustancias (j), generada por la actividad (i) en el periodo de tiempo (t).
- n: número total de actividades a inventariar.

Teniendo en cuenta que, en la mayoría de los casos, no es posible contar con información de las emisiones medidas de forma directa durante el periodo de tiempo de evaluación en cada una de las fuentes a inventariar, el enfoque más común para estimar las emisiones en un inventario ($E_{j,t}$), consiste en combinar información de los procesos de cada actividad (factor de actividad), con información de las emisiones asociadas a los procesos de dicha actividad (factor de emisión), como se observa en la siguiente ecuación (Ecuación 2) [47].

$$IEA = \sum_{i=1}^n (FE_{j,i} \times FA_{i,t}) \quad \text{Ecuación 2}$$

donde:

$FE_{j,i}$: factor de emisión de la sustancia o mezcla de sustancias (j) para la actividad (i).

$FA_{i,t}$: factor de actividad de la actividad (i) durante el tiempo (t).

Hay dos formas de realizar un inventario, dependiendo del propósito y la disponibilidad de información. Puede ser de la forma Top-Down (de arriba hacia abajo) en la cual se parte de información general a nivel país, por ejemplo, para luego llegar a la información específica. O puede tener el enfoque Bottom-Up (de abajo hacia arriba) en donde se parte de información específica, más detallada, para poder llegar al dato de emisión requerido. Un inventario de las emisiones de este tipo de instalaciones logra retratar, en un momento de tiempo, la contribución de los diferentes sectores (industriales, comerciales y de servicios) a las emisiones atmosféricas de diversos contaminantes de interés. Los inventarios de emisiones son esenciales para la adecuada gestión de la calidad del aire [48].

La elaboración de un inventario de emisiones comprende los siguientes pasos [49]:

1. *Planeación*: dependiendo del objetivo y del uso final que se le dará al inventario. Esta etapa permite definir el grado de detalle que se pretende alcanzar, las principales características que definirán al inventario y la calidad que se espera que tenga el producto final.
2. *Identificación de las fuentes fijas*: en esta sección se definen los criterios para determinar qué establecimientos se reportaron como fuentes fijas.
3. *Recopilación de la información*: la cantidad y la calidad de la información disponible para estimar emisiones, son determinantes para asegurar la calidad y el nivel de detalle deseados para el inventario. En esta sección se describen las diferentes fuentes y metodologías para recopilar información útil a fin de estimar las emisiones para fuentes fijas.
4. *Técnicas de estimación de emisiones*: para elaborar un inventario de emisiones de fuentes fijas existen diferentes técnicas de estimación, cuyo uso depende básicamente de los recursos económicos con que se cuente y de la confiabilidad deseada del inventario.
5. *Evaluación del inventario*: las exigencias de calidad del inventario dependen del uso y del propósito, y están determinadas por las herramientas e insumos utilizados en la estimación del inventario. En esta sección se definen las principales fuentes de incertidumbre asociadas con la estimación de emisiones de fuentes fijas.
6. *Reporte de resultados*: el proceso de elaboración de un inventario de emisiones no culmina con los cálculos realizados, sino con la elaboración de un reporte final cuya calidad determinará en gran medida su verdadera utilidad y aprovechamiento. Así, el reporte final debe incluir una serie de elementos indispensables a fin de cumplir con el objetivo de comunicar con claridad y detalle los resultados obtenidos.

Los resultados del inventario pueden ser utilizados como datos de entrada en la modelización de la dispersión del material particulado. Uno de los sistemas de modelado recomendados por la US.EPA, y de amplio uso en sectores privados y públicos, es el sistema de modelado AERMOD. A continuación, se desarrolla una descripción detallada de este sistema de modelado.

1.4. SISTEMA DE MODELADO AERMOD

Los modelos de calidad del aire utilizan técnicas matemáticas y numéricas para simular los procesos físicos y químicos que afectan a los contaminantes del aire a medida que se dispersan y reaccionan en la atmósfera. Estos modelos, basados en entradas de datos meteorológicos e información de fuentes, como las tasas de emisión y la altura de la chimenea, están diseñados para caracterizar los contaminantes primarios que se emiten directamente a la atmósfera y, en algunos casos, los contaminantes secundarios [50]. Además, son importantes para nuestro sistema de gestión de la calidad del aire porque son ampliamente utilizados por las agencias encargadas de controlar la contaminación atmosférica para identificar las contribuciones de la fuente a los problemas de calidad del aire y ayudar en el diseño de estrategias de control.

Dentro de los modelos de calidad de aire, se encuentran los modelos de dispersión que utilizan formulaciones matemáticas para caracterizar los procesos atmosféricos que dispersan un contaminante emitido por una fuente. Sobre la base de las emisiones y las entradas meteorológicas, se puede utilizar un modelo de dispersión para predecir concentraciones en ubicaciones seleccionadas de receptores a favor del viento [50].

Particularmente, el sistema de modelado AERMOD (American Meteorology Society - Environmental Protection Agency Regulatory MODEl) fue desarrollado en colaboración de la American Meteorology Society y la Environmental Protection Agency (EPA) de los Estados Unidos. Es un potente software utilizado para simular la dispersión de contaminantes en el aire y es el recomendado por la US. EPA para estimar el impacto de fuentes contaminantes sobre los niveles de calidad ambiental del aire a distancias horizontales de hasta de 50 kilómetros [51]. Determina la distribución de contaminantes en una pluma de manera horizontal y vertical siguiendo un comportamiento de tipo normal en estado estacionario denominado distribución gaussiana [52].

Este sistema de modelado, en su versión View [53], cuenta con una interfaz principal en la que se establece el contaminante a modelar, el tiempo promedio en el que se desea obtener los resultados (promedio diario, anual, etc) y se especifica el tipo de terreno (plano o elevado). A su vez, AERMOD cuenta con dos módulos fundamentales pre-procesadores, que son componentes regulatorios para la modelación. Se los debe utilizar para configurar los datos de entrada. En primer lugar, se debe configurar AERMET, un preprocesador de datos meteorológicos que incorpora la dispersión del aire basada en la estructura de turbulencia de la capa límite planetaria y conceptos de escala, y, en segundo lugar, AERMAP, un preprocesador de datos del terreno que incorpora terrenos complejos usando modelos de elevación digitales y le asigna la altura de elevación tanto a las fuentes de emisión como a cada cuadrícula de receptores de la grilla de receptores [54,55].

A su vez, este sistema de modelado AERMOD incorpora un módulo preprocesador no obligatorio llamado BPIP para contemplar el efecto building downwash, es decir, el efecto que múltiples edificios en las proximidades de las fuentes puedan ocasionar en la dispersión de la pluma de contaminación. En la Figura 3 se puede observar el diagrama de bloques y preprocesadores de AERMOD [55].

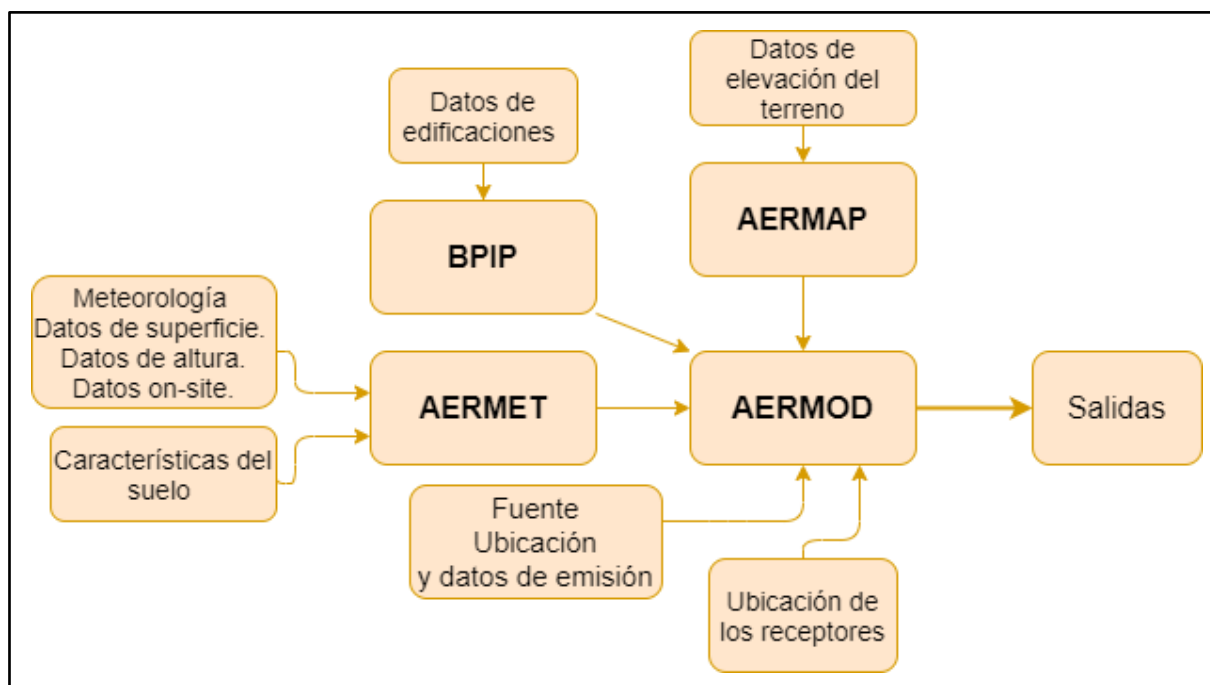


Figura 3: Diagrama de bloques y preprocesadores de AERMOD.

AERMOD utiliza varios parámetros de la capa límite atmosférica para modelar la dispersión de los contaminantes en el aire. Muchos de estos parámetros no se observan, sino que se estiman a partir de otras variables que se miden más fácilmente. Para hacer estas estimaciones, se requiere información del viento y la temperatura observados cerca de la superficie, entre otras variables. Estas variables meteorológicas de entrada se obtienen a partir de una estación meteorológica cercana a la fuente de emisión, y se procesan a través de módulo AERMET para transformar los datos en formato aceptable para introducirlo en AERMOD.

Para poder ejecutar la simulación se debe generar una grilla de receptores para que el modelo calcule la concentración en los centros de cada cuadrícula y se pueda visualizar gráficamente la dispersión de los contaminantes con su pluma de isoconcentración. La grilla de receptores puede abarcar todo el dominio de modelado o tener una menor resolución.

AERMOD está diseñado para calcular las concentraciones de contaminantes del aire en todo tipo de terreno, desde una pradera o zona plana hasta situaciones montañosas complejas. Por esto, es fundamental otorgar al modelo la elevación del terreno de la zona de estudio a la hora de simular la dispersión de los contaminantes. Esto se realiza a través del preprocesador del terreno AERMAP, el cual permite importar y procesar datos de altura del terreno para el proyecto. En dicho modo, se configura la topografía del terreno del dominio de modelado, atribuyéndole a cada receptor, antes definido, y a cada fuente de emisión involucrada, una altura representativa del terreno. Es posible introducir varios formatos de datos de terreno estandarizados como SRTM, NTF, DTM, CDED, DEM, GTOPO30 y XYZ [56,57].

AERMOD utiliza su interfaz gráfica para la entrada de datos y la visualización de resultados. Dependiendo de lo establecido, permite calcular tanto la concentración máxima como la media del contaminante para cada periodo especificado del año (1h, 4h, 6h, 8h, 12h, 24h, mensual, anual) y para

cada receptor dentro de la malla seleccionada. A partir de las concentraciones en cada receptor de la malla se dibujan isolíneas que se pueden superponer a cartografía para la estimación de la superficie afectada [58].

Finalmente, se debe recalcar que AERMOD es un modelo detallado, que requiere de un usuario con experiencia. El tiempo necesario para ejecutar el modelo dependerá de los datos de entrada (nº de receptores, nº de registros meteorológicos, cantidad de fuentes de emisión y cantidad de contaminantes) y del tipo de promedios o tratamientos estadísticos que se le pida a los resultados (cálculo de percentiles, valor máximo, valor medio). La duración de la simulación puede llevar desde minutos hasta pocos días.

Resumiendo, las principales características y ventajas de este software en su versión *View*, se listan a continuación [59-73].

- Permite evaluar aspectos de carácter regulatorio o normativo, como así también, utilizarlo para la investigar diferentes situaciones de contaminación y efectos en la salud.
- Está diseñado para trabajar con escalas de dominio que van desde 1 m hasta 50 km.
- Es el modelo de dispersión de calidad del aire preferido y recomendado por la US. EPA.
- Es un modelo de fácil implementación, cuenta con una interfaz intuitiva.
- Su resolución (distancia mínima entre cuadrículas/receptores adyacentes) posee un alcance espacial de hasta 1 m.
- Permite trabajar con todo tipo de terreno (desde terrenos complejos, montañosos, hasta terrenos planos)
- Tiene la opción de simular la dispersión de múltiples sustancias de manera simultánea. Posee un completo análisis gráfico del arrastre por edificios (efecto building downwash).
- Acepta información del terreno en formatos DEM, SRTM, GTOPO30, NTF, DTM, CDED y XYZ.
- Permite elaborar gráficos de dirección, velocidad y frecuencias de los vientos.
- Una vez finalizada la ejecución del modelo, los resultados se muestran automáticamente, de forma gráfica en la interfaz principal.

Como todo software, AERMOD no puede ser más preciso que la información que se le proporciona para ejecutarse. Algunas limitaciones a destacar, se mencionan a continuación.

- Es un modelo detallado que requiere gran cantidad de datos de entrada para poder simular.
- NO modela la dispersión a distancias mayores que 50 km, desde la fuente de emisión.
- Es un modelo en estado estacionario, por lo que no permite evaluar los cambios de las variables, entre ellas la dispersión de los contaminantes, en función del tiempo.
- El modelo no es válido para aquellas emisiones que experimentan reacciones químicas para dar lugar a contaminantes secundarios.
- El modelo presenta mayor incertidumbre en áreas donde las condiciones meteorológicas varían de forma significativa, como son terrenos de orografía muy compleja, fondos de valle encajonados donde cambia la dirección del viento o zonas costeras afectadas por patrones de viento mar-tierra y por brisa costera.
- El modelo asume que la pluma sigue una línea recta. Como consecuencia de la anterior limitación, la pluma no cambia de dirección en toda el área de estudio.

Los resultados obtenidos por el modelo, vinculados a la dispersión del material particulado, pueden ser utilizados para el diseño de una Red de Monitoreo de Calidad de Aire (RMCA). En la siguiente sección se detallan los fundamentos de una RMCA.

1.5. RED DE MONITOREO DE CALIDAD DE AIRE

Debido a la gran cantidad de industrias de gran magnitud e importancia para la economía de la región que se encuentran emplazadas en el Complejo Industrial La Plata, es necesario contar con una RMCA y utilizarla como un sistema de vigilancia y control de la calidad de este recurso.

Una RMCA es un instrumento que se utiliza para controlar y vigilar los niveles de contaminación. Están compuestas por dos o más estaciones de monitoreo y la US. EPA las clasifica en cuatro grupos dependiendo de sus objetivos: red de investigación, red de tendencias, red de cumplimientos de normas y red de episodios de emergencia [74].

Una RMCA se debe diseñar con tres objetivos básicos de vigilancia:

- 1) Proporcionar datos sobre la contaminación del aire, al público en general de manera oportuna.
- 2) Apoyar el cumplimiento de las normas de calidad del aire ambiente y la elaboración de estrategias de emisión.
- 3) Apoyar los estudios de investigación sobre la contaminación del aire.

Además, estas redes de vigilancia también pueden desarrollarse para:

- Activar procedimientos de control de emergencia que prevengan o alivien los episodios de contaminación atmosférica.
- Observar las tendencias de la contaminación en toda la región, incluidas las zonas no urbanas.

Para satisfacer estas necesidades básicas, la red puede requerir que se ubiquen sitios de vigilancia para:

- Determinar la mayor concentración que se prevé que se produzca en la zona abarcada por la red.
- Medir las concentraciones típicas en zonas de alta densidad de población.
- Determinar el impacto de las fuentes o categorías de fuentes importantes en la calidad del aire.
- Determinar los niveles de concentración de fondo.
- Determinar la extensión del transporte regional de contaminantes entre zonas pobladas.
- Medir los impactos de la contaminación atmosférica en la visibilidad, los daños a la vegetación o los impactos basados en el bienestar.

Según el manual de aseguramiento de calidad para un sistema de medición de la contaminación de la US. EPA [74], y las guías para la calidad del aire de la OMS [75], un programa de monitoreo y evaluación de la calidad de aire debe combinar tres herramientas fundamentales:

- ❖ Monitoreo de contaminantes atmosféricos
- ❖ Modelado de dispersión de contaminantes
- ❖ Inventario de emisiones

El monitoreo provee bases científicas, para el desarrollo de estrategias y políticas para mejorar la calidad del aire, y permite la cuantificación del efecto que producen las medidas adoptadas para implementarlas. Sin embargo, cualquier red monitoreo por bien diseñada y operada que sea, solo da una imagen parcial, pero útil, de los comportamientos de las variables de contaminación del aire, en espacio y tiempo, para una ciudad o región. Las otras herramientas se usan para completar y aclarar esa imagen, mediante cálculos de interpolación y procesos de mapeo.

En la Figura 4 se muestra una representación de la integración de las mencionadas herramientas, en un programa de monitoreo y evaluación de la calidad de aire. La identificación del problema, incluye considerar estrategias de monitoreo, que luego requerirá de la aplicación de modelos para evaluar escenarios de contaminación y formular políticas de acción. Estos modelos no podrán ser ejecutados sin información procedente de los inventarios de emisiones. Asimismo, dichos inventarios son necesarios para la implementación de acciones de control.

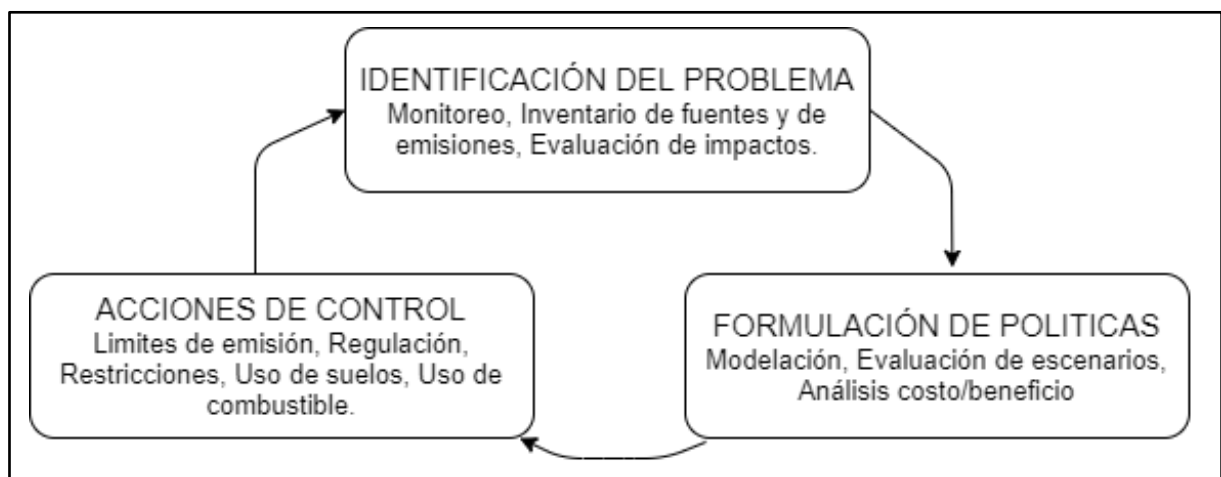


Figura 4: Integración de monitoreo de contaminantes atmosféricos, modelado de dispersión de contaminantes e inventario de emisiones en un programa de monitoreo y evaluación de la calidad de aire.

Al iniciar un programa de monitoreo y evaluación de la calidad de aire, se debe entonces comenzar por definir a donde debe apuntarse la herramienta de monitoreo, es decir cuáles fenómenos o efectos de la contaminación quieren medirse. En torno a estos objetivos deben integrarse las otras herramientas *-el modelado y el inventario de emisiones-*.

Con base en este primer paso y no antes, deben definirse objetivos de calidad de datos y aspectos como el número o densidad de puntos de muestreo, la localización de los mismos, y otros.

Una definición clara de los objetivos permite maximizar los recursos para poder cumplimentar los mismos (Figura 5). Los objetivos deben definirse de una forma concisa y clara, asimismo deben ser congruentes con la realidad económica y las posibilidades técnicas. Objetivos de monitoreo difusos, muy restringidos o demasiados ambiciosos, resultará en programas poco efectivos en costos y con una utilización pobre de los datos. En esta circunstancia no es posible hacer un uso óptimo de los recursos disponibles.

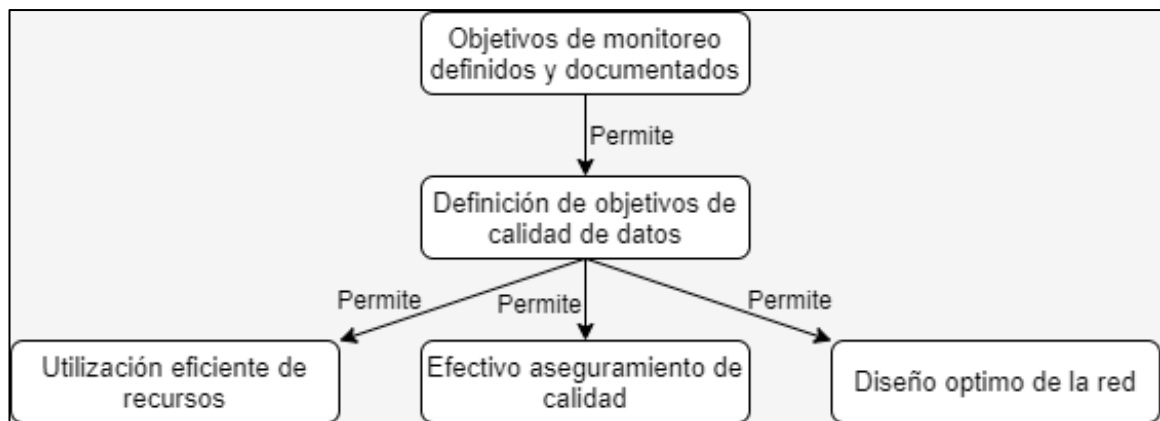


Figura 5: Esquema a seguir en el diseño de una RMCA. Definición clara de objetivos permite maximizar los recursos para poder cumplimentarlos.

Entre los objetivos generales recomendados por la OMS [75] se encuentran los siguientes:

- Determinar la exposición y evaluar el impacto en la salud de la población.
- Informar al público acerca de la calidad del aire y del incremento de amenazas.
- Determinar conformidades con estándares nacionales o internacionales.
- Proveer información para el manejo de la calidad del aire, el planeamiento del tráfico y del uso del suelo.
- Identificar tendencias de los ecosistemas naturales.
- Identificar y ubicar recursos naturales.
- Orientar políticas de desarrollo y priorización de acciones de manejo.
- Desarrollar y validar herramientas de administración (Sistemas de Información Geográfica y Modelos).
- Evaluar el impacto de recursos sobre áreas y puntos.
- Apreciación de tendencias para identificar problemas futuros o progresos versus objetivos de administración y control.

Según la US. EPA [74], los objetivos generales deben ser:

- Evaluar el cumplimiento de los estándares de calidad de aire y/o el progreso logrado en este sentido.
- Activar procedimientos de control para prevenir o aliviar episodios de contaminación.
- Observar las tendencias de la contaminación en una región, incluyendo áreas no urbanas.
- Proveer bases de datos para investigación y evaluación de los efectos urbanos, de uso de tierras y transporte.
- Dar bases para planeación; desarrollo y evaluación de estrategias de control; y desarrollo y validación de modelos de difusión.

Con base en lo anterior, la US. EPA establece cuatro diferentes tipos de monitoreo:

- **Monitoreo de Cumplimiento de Normas:** Se realiza con el objetivo primordial de evaluar el cumplimiento de los estándares de calidad de aire y/o el progreso obtenido al aplicar medidas de control

- **Monitoreo de Episodios de Emergencia:** Se realiza con el fin de activar procedimientos de control para prevenir o aliviar episodios de contaminación.
- **Monitoreo de Tendencias:** Se realiza para proveer bases de datos para investigación y evaluación de los efectos urbanos, de uso de tierras y transporte.
- **Monitoreo de Investigación:** Las redes de monitoreo de calidad de aire relacionadas con los efectos sobre la salud están diseñadas en estaciones de doble objetivo: para determinar concentraciones de contaminantes en periodos de 24 horas y para determinar estándares de contaminación a largo plazo (mayores a 24 h).

Teniendo en cuenta los objetivos generales anteriores, la US. EPA sugiere que las redes de monitoreo deben estar diseñadas con estaciones que persigan uno de los seis siguientes objetivos específicos:

- Detectar las mayores concentraciones esperadas en el área cubierta por la red de monitoreo.
- Hallar las concentraciones representativas en áreas de alta densidad poblacional.
- Mostrar el impacto de grandes fuentes en los niveles de polución ambiental.
- Detectar niveles de concentración de background.
- Estudiar el transporte regional de contaminantes sobre áreas pobladas.
- Detectar el impacto sobre la población y los bienes en zonas rurales y remotas.

Por otra parte, Martínez y Romieu [76] nombra los aspectos que se deben considerar en el diseño de un sistema de monitoreo de calidad de aire, los cuales son:

- Definición de objetivos.
- Definición de parámetros a medir.
- Definición de número y sitios de muestreo.
- Determinación de tiempos de muestreos.
- Selección de equipo de muestreo.

Luego de definir los objetivos, es necesario definir los parámetros a medir [77].

En la práctica, el número y distribución de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire dependerán del área de cobertura, la variabilidad espacial de los contaminantes medidos y de los datos requeridos [78].

Para distribuir y ubicar esos sitios, Martínez y Romieu [76] recomiendan tener en cuenta los siguientes factores: a) Población afectada, b) medio ambiente afectado, c) escala geográfica del problema a considerar, d) fuentes y emisiones del área delimitada, e) meteorología, y f) topografía del área.

Se debe recalcar que no existe una reglamentación básica para el diseño de una RMCA, dado que las decisiones sobre el número y ubicación de los sitios de monitoreo, están sometidas a los objetivos y a las restricciones de recursos. Una RMCA casi nunca está orientada a un solo objetivo, por lo tanto, los sitios seleccionados pueden obedecer a dos o más objetivos a la vez, sin embargo, se debe procurar que sea posible contrastar resultados entre varios sitios, sin duplicar esfuerzos. La meta principal de diseño es asegurar la mayor cantidad de información con el mínimo esfuerzo.

En particular, una Red de Monitoreo de Investigación se relaciona a un tipo de red de vigilancia con los efectos sobre la salud humana y el medio ambiente. Una red de este tipo requiere que en los sitios de monitoreo se puedan determinar las concentraciones a las cuales están expuestos los grupos de población bajo estudio. Las RMCA relacionadas con los efectos sobre la salud están diseñadas con doble objetivo, para determinar concentraciones de contaminantes en periodos de 24 horas y para determinar estándares de contaminación a largo plazo (mayores a 24 hs).

Dado que para armar una Red de Monitoreo de Calidad de Aire se necesita de equipos de monitoreo para poder muestrear y cuantificar la contaminación, en el siguiente apartado se detallarán los equipos básicos que se pueden utilizar para esta tarea.

1.5.1 EQUIPAMIENTO PARA MONITOREAR MATERIAL PARTICULADO

A continuación, se describen los diferentes tipos de equipos que se utilizan para muestrear y medir material particulado, a fin de conocer sus ventajas y desventajas para luego proponerlos a la hora de diseñar la red de monitoreo.

Los equipos utilizados para monitorear material particulado se dividen en 2 tipos:

a) Monitoreadores manuales: son métodos discontinuos, donde la toma de muestras y el análisis de laboratorio se da en dos pasos separados. En términos generales, la toma de muestra consiste en la recolección de la muestra con un equipo en el que el aire es forzado a pasar a través de un filtro colocado en un soporte hermético, donde se recoge la muestra. Existen diferentes instrumentos para la obtención de las diferentes fracciones del MP.

b) Monitoreo continuo: a diferencia de los equipos manuales, los muestreadores automáticos dan valores de concentración de MP en el campo. Hay varios tipos de equipos de monitoreo automático para MP, y los más utilizados son:

- Monitores de atenuación beta "BAM".
- Microbalanza oscilante (TEOM) para la medición de la masa.
- Fotómetros láser de dispersión de luz.

Otra característica que generalmente tienen los equipos automáticos en comparación con el equipo de muestreo manual, es el bajo tiempo de respuesta, que puede ser desde horas hasta minutos o segundos. Por tanto, la información proporcionada puede ser considerada como "continua". Esto representa la principal ventaja de los instrumentos continuos, su capacidad de proporcionar mediciones de tiempo real, que no es posible en los métodos manuales basados en filtros.

Los monitoreadores continuos pretenden:

1. Proporcionar una mejor resolución temporal para comprender mejor las fuentes y causas de las concentraciones de MP elevadas en la atmósfera.
2. Facilitar la notificación pública de la calidad del aire.
3. Reducir costos de operación.
4. Implementar estrategias de control periódicas.

Por lo expuesto hasta aquí, un programa de monitoreo y evaluación de la calidad de aire completo e integral debe combinar tres herramientas fundamentales: monitoreo de contaminantes atmosféricos, modelado de dispersión de contaminantes e inventario de emisiones.

En este trabajo se propone el uso de estas tres herramientas de forma sinérgica (y constante actualización a futuro) para evaluar el aporte que producen las centrales térmicas a los niveles de MP ambiental de la región del Gran La Plata.

En primer lugar, se confecciona un inventario de las emisiones de MP de las centrales térmicas ubicadas en la región de estudio, para luego poder ejecutar, con estos datos, el modelo de dispersión de contaminantes, a fin de detectar las zonas de mayor concentración de MP y así definir estrategias de monitoreo mediante el diseño de una RMCA. Con el objetivo general de estimar el aporte de MP por parte de las CTs a los niveles ambientales en la región.

2. OBJETIVOS

Objetivos generales: Evaluar el aporte de las centrales térmicas emplazadas en el Gran La Plata sobre los niveles de material particulado ambiental de la región, en función de sus emisiones y de la meteorología regional.

Objetivos específicos:

- Elaborar un inventario de emisiones de las centrales térmicas de la región, para MP₁₀ y MP_{2.5}, a fin de obtener los datos de emisiones que se introducen en la modelación de calidad de aire.
- Evaluar la dispersión y la distribución del material particulado, a través del sistema de modelado AERMOD, para identificar los puntos calientes de mayor concentración de MP.
- En base a los dos primeros objetivos específicos, se propone diseñar una RMCA que permita estimar el aporte, por parte de las centrales térmicas, a los niveles ambientales de MP₁₀ y MP_{2.5} para la región del Gran La Plata.

3. METODOLOGÍA

En respuesta a los objetivos planteados, la explicación metodológica incluye el desarrollo del inventario de las emisiones de MP de las cuatro centrales térmicas ubicadas en el Gran La Plata, a fin de estimar el aporte de la concentración, tanto de MP₁₀ como MP_{2.5}, que liberan al ambiente estas instalaciones. Luego, se describe la configuración adoptada en el sistema de modelado AERMOD, en el cual se utiliza lo calculado en el inventario de emisiones atmosféricas como información del caudal de emisión del MP. A continuación, se explica la metodología utilizada para el diseño de la red de monitoreo de calidad de aire. Finalmente, se describe cómo es posible estimar el aporte de las centrales térmicas a los niveles MP ambiental, en base un registro histórico de datos de monitoreo de estos contaminantes como punto de partida.

3.1. CONFECCIÓN DEL INVENTARIO DE EMISIÓN

Las fuentes fijas a inventariar, como se dijo anteriormente, corresponden a los conductos que canalizan las emisiones de las centrales térmicas emplazadas en el Gran La Plata, entre ellas: Central Térmica Ensenada de Barragán (CTEB), Central Térmica El Dique (CTED) y Central Térmica La Plata Cogeneración I (LPC I) y Central Térmica La Plata Cogeneración II (LPC II).

En base a lo presentado en la introducción, se definió en primer lugar, el objetivo, el propósito y el alcance que tendrá el inventario (Tabla 3). Definir claramente estos parámetros ayuda a optimizar los recursos y obtener mejores resultados para darle buena utilización a los datos.

Objetivo	Cuantificar las emisiones de Material Particulado (MP ₁₀ y MP _{2.5}).
Propósito	Generar información de soporte para la modelación de la calidad del aire.
Alcance	Emisiones de material particulado generadas por las fuentes fijas de las CTs, emplazadas en el Gran La Plata, durante los últimos años.

Tabla 3: Definición del objetivo, propósito y alcance adoptados para realizar el inventario.

Se realizó una intensa búsqueda bibliográfica en sitios web que incluye información técnica de las empresas proveedoras [43-45], para recopilar la información pertinente al funcionamiento de las Centrales Térmicas (como son el tiempo de operación, el combustible utilizado) y a las características de los conductos de emisión (como son la altura y diámetro, caudal de emisión, etc), estos últimos datos se presentan en la siguiente sección.

Para realizar el inventario se adopta el enfoque Bottom-Up (de abajo hacia arriba) y dentro de la cual se aplicó la metodología que relaciona el factor de emisión (FE) con el factor de actividad (FA).

El factor de emisión es un valor que vincula cuánta cantidad de un contaminante es liberado a la atmósfera (MP para este trabajo) por cantidad de energía generada, que para este caso de estudio tendrá unidades de masa por energía. Este dato numérico depende del combustible utilizado y se obtiene a partir de tablas ya elaboradas por la US. EPA.

Las emisiones de las centrales térmicas son estimadas aquí de forma conservadora, por ejemplo, sin tener en cuenta los sistemas de remoción comúnmente utilizados en estos procesos, de modo de representar el peor escenario esperable.

De esta manera se asumen que las centrales térmicas solo funcionan con combustible gasoil. Esto, además, simplifica los cálculos a realizar. Los factores de emisiones correspondientes para las centrales térmicas que funcionan mediante turbinas de combustión se muestran en la Tabla 4 [41].

Por otro lado, para calcular el FA se necesita conocer cuánta energía produce cada central térmica. Esto se obtiene en base a la potencia instalada de cada empresa y al tiempo de funcionamiento que sostiene a lo largo del año.

La potencia instalada de una empresa representa la cantidad de energía que puede ser generada por unidad de tiempo (segundo), en condiciones ideales. Multiplicando la potencia (P) que posee cada CT, por el tiempo de operación (t) es posible obtener la energía (E) que produce cada instalación

(Ecuación 3). Una vez obtenida esta información, se lo multiplica por el FE, y se obtiene el caudal másico de emisión de material particulado que genera cada CT.

Para el tiempo de operación se supone un funcionamiento de 12 horas por día, 6 días a la semana.

$$FA: E \text{ [GWh]} = P \text{ [GW]} * t \text{ [h]} \quad \text{Ecuación 3}$$

	Potencia instalada (MW)	Tiempo de operación (hs)	Factor de actividad (GWh/año)	Factor de emisión MP ₁₀ (g/GWh)	Factor de emisión MP _{2.5} (g/GWh)
CTEB	567	3456	1959.552	36000	9000
CTED	68	3456	235.008	36000	9000
LPC I	128	3456	442.368	36000	9000
LPC II	85	3456	293.76	36000	9000

Tabla 4: Resumen de los datos utilizados para la elaboración del inventario.

Tanto el tiempo de operación como los factores de emisiones son considerados iguales para cada central térmica, Lo que varía es la potencia instalada en cada instalación y esto hace que varíe el factor de actividad, o sea, la energía que produce e inyecta a la red pública cada central térmica. Por ende, a mayor generación de energía, mayor emisión de contaminantes.

3.2. CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE MODELADO AERMOD

En este trabajo, se utilizó el sistema de modelado AERMOD para simular, en simultáneo, la dispersión de material particulado de las emisiones de todos los conductos de las centrales térmicas. Para su funcionamiento, el sistema de modelado debe ser alimentado por tres archivos de información:

- 1) *Datos de emisión y datos de las fuentes*: la información de emisión es lo que se estimó a través del inventario de emisiones, y para los datos de las fuentes se recurre a una intensa búsqueda bibliográfica [42-44] y estimaciones mediante el procesamiento de imágenes satelitales.
- 2) *Meteorológico*: generado a través del preprocesador AERMET a partir de datos de variables meteorológicas observadas, respecto a los años 2015-2019, y brindadas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) correspondiente a la estación meteorológica AERO LP, y finalmente,
- 3) *Topografía digital*: generado a partir de un modelo de elevación digital extraído del sitio web del Instituto de Geografía Nacional (IGN) [79].

A efectos de la implementación del sistema de modelado se detallan los siguientes tópicos y datos de entrada utilizados para la simulación:

1) Ubicación Geográfica y características de los conductos

La ubicación y las características estructurales de los conductos involucrados se encuentran en la Tabla 5. Dicha información ha sido oportunamente generada por Puliafito y colaboradores para la confección de un inventario nacional [80], y adaptada para este trabajo.

CONDUCTO						
ID	Ubicación		Altura (m)	Diámetro interno (m)	Velocidad salida gas (m/s)	Temp. salida gas (K)
	Coordenada X (m E)	Coordenada Y (m S)				
CTEB1	412948.00	6142158.00	40	4.4	26.00	790.0
CTEB2	412979.00	6142196.00	40	4.4	26.00	790.0
LPCI	416859.08	6139715.51	36	4.0	15.53	654.6
LPCI2	416868.00	6139704.00	36	4.0	15.53	654.6
LPCI3	416896.58	6139682.93	36	4.0	15.53	654.6
LPCI4	416909.73	6139673.82	36	4.0	15.53	654.6
LPCII	415697.00	6138730.00	40	3.5	15.53	654.0
CTED 1	414794.00	6138736.00	12	4.4	15.47	654.4
CTED 2	414813.00	6138719.00	12	4.4	15.47	654.4
CTED 3	414820.44	6138681.07	12	4.4	15.47	654.4
CTED 4	414835.00	6138667.00	12	4.4	15.47	654.4

Tabla 5: Ubicación geográfica y características de los conductos a modelar.

2) Dominio y grilla de receptores

Para efectos de la implementación del sistema de modelación con AERMOD, se consideró una grilla de 11.2 km x 8.7 km con cuadrículas de 50 x 50 m cada una, como se resume en la Tabla 6 y se visualiza en la Figura 6. Este espaciado de cuadrícula es el recomendado por la legislación a fin de obtener receptores en zonas de máxima concentración esperable.

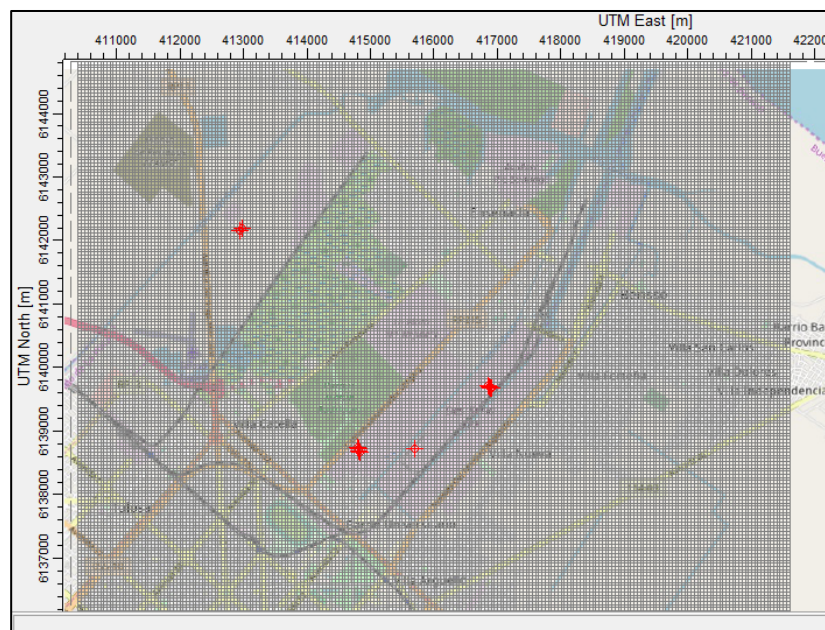


Figura 6: Grilla de receptores implementada para la ejecución de AERMOD, los puntos rojos corresponden a las fuentes de emisión de cada central térmica.

Parámetros del dominio y la grilla		Valores seleccionados para la simulación con AERMOD
Proyección del mapa		UTM
Zona UTM		21S
Datum		WSG-84
Esquina SW (x,y)	Este (m)	410401.16
	Norte (m)	6136119.50
Número de celdas en la grilla (nx, ny)		225, 175
Espacio entre cuadrículas (m)		50

Tabla 6: Parámetros del dominio y grilla utilizados en AERMOD.

3) Uso del Suelo – Terreno

Las características topográficas del dominio a modelar son fundamentales para evaluar correctamente la dispersión de los contaminantes. Para obtener la elevación del terreno de la zona de estudio se elaboró un Modelo de Elevación Digital (más conocido como DEM, por sus siglas en inglés) con 5 metros de resolución y se lo cargo en el sistema de modelado AERMOD en el preprocesador del terreno, AERMAP. De esta manera, se obtienen las elevaciones del terreno, junto a las de los receptores y a las de las fuentes. Se utilizó coeficiente de dispersión urbano.

4) Información meteorológica

Se utilizó un set de datos meteorológicos horarios, de superficie, que comprendía desde el 1 de enero de 2015 hasta el 31 de diciembre de 2019, pertenecientes a la estación número 87593 del aeropuerto La Plata, provistos por el SMN. La estación más cercana a la región de estudio, que mide el perfil de la atmósfera para registrar datos de altura de diferentes variables meteorológicas, es la de Ezeiza. Esta estación se encuentra emplazada aproximadamente a 62 km desde la estación AERO La Plata, por tal motivo se decide aplicar en este trabajo la opción “*Estimar los datos de altura con los datos de superficie*” que ofrece la versión View de AERMOD, para una mejor representación del escenario de estudio.

3.3. DISEÑO DE LA RED DE MONITOREO DE CALIDAD DE AIRE

No existen documentos que estandaricen una metodología para el diseño de redes de monitoreo. Sin embargo, existen varios procedimientos de selección de los sitios en donde se debe instalar un sistema de monitoreo atmosférico, que van desde la elaboración de una cuadrícula del área a monitorear, colocando los sitios de monitoreo en las aristas de la cuadrícula, hasta el uso de complejo modelos estadísticos que proporcionan el número y la distribución óptima de los sitios de monitoreo [81]. Cualquier decisión depende de los objetivos generales de monitoreo.

Martínez & Romieu [76] establecen que lo primero en el diseño y la implementación de cualquier sistema de monitoreo es la definición de todos los objetivos que se pretenden, y derivar luego de estos los requerimientos de datos que se necesitan para llevarlos a cabo.

En este sentido, la RMCA propuesta en este trabajo será de investigación, cuyo **objetivo general** es determinar concentraciones de material particulado en periodos de 24 horas y determinar estándares de contaminación con promedios anuales, tal como lo dispone la normativa argentina para este tipo de contaminante.

A su vez, y en línea con lo expuesto hasta aquí, los **objetivos específicos** a alcanzar son:

- Obtener una mejor descripción de la distribución de los niveles de MP de la región.
- Estimar el aporte de las emisiones de MP de las centrales térmicas.
- Evidenciar la relevancia de las CTs en los niveles de MP ambiental.

La red de investigación requiere que se ubiquen puntos de monitoreo para que los datos resultantes, sean acordes al objetivo establecido a la hora de diseñar la red. Por lo tanto, las estaciones se establecen en puntos donde se considere pertinente la evaluación del aporte por parte de las CTs al MP ambiental de la región.

Los parámetros a medir son las concentraciones ambientales de material particulado, en sus diferentes fracciones (MP_{10} y $MP_{2.5}$). Otros parámetros ambientales que se tendrán que conocer serán los parámetros meteorológicos y topográficos que, dependiendo del objetivo de estudio, tendrán una gran injerencia en el mismo [76]. Entre ellos se encuentra dirección y velocidad del viento, temperatura, humedad, precipitación y radiación solar. Estos últimos parámetros ya se encuentran contemplados a la hora de simular la dispersión del MP mediante el sistema de modelado AERMOD.

El objetivo de la ubicación de las estaciones de monitoreo es hacer coincidir correctamente la escala espacial representada por la muestra de aire monitoreado, con la escala espacial más apropiada para el objetivo de monitoreo de la estación. En este sentido, la RMCA aquí propuesta será de escala urbana. A continuación, se presentan algunas consideraciones para el monitoreo en apoyo a los estudios del aporte de las CT.

- La estación debe estar ubicada en zonas que sean representativas para analizar las instalaciones que son objeto de estudio o cerca de ella;
- La frecuencia de muestreo debe ser suficiente para caracterizar la calidad del aire en función del tiempo; y
- El sistema de vigilancia debe ser flexible y responder a las condiciones de emergencia con datos disponibles a corto plazo.

Es importante mencionar que al evaluar la inversión que se requerirá para establecer una red de monitoreo atmosférico, se tendrán que contemplar además de los costos de inversión, los costos de operación en los que se deben incluir requerimientos de laboratorio, personal especializado, transporte, costos de mantenimiento y costos de reposición de equipo, y todo el proceso de almacenamiento, procesamiento de datos y generación de información [82].

Ya definidos los objetivos de monitoreo, los parámetros que se necesitan monitorear y delimitada el área de estudio se tomará como meta la organización temporal y distribución espacial de los puntos de monitoreo, o de colección de muestras dentro del área de estudio, de manera que sean

representativos de la calidad del aire de un lugar determinado para poder compararlos con los estándares de calidad del aire, por lo que el siguiente paso dentro de la estrategia de monitoreo será definir la localización y determinación del número de estaciones de monitoreo o sitios de muestreo que se requieran para cumplir con los objetivos [76].

Las ubicaciones de las estaciones de muestreo se definen en función del área que se desee cubrir y de los objetivos que se pretendan alcanzar.

En general el número final de estaciones seleccionadas se eligen en función de:

- La población que habita en el área de que se pretende vigilar
- La problemática existente en el área que se define con base al tipo de zonas que conforman esa área y de los resultados obtenidos de tomar en cuenta los factores y consideraciones para elegir localizaciones de zonas de muestreo.
- Los recursos económicos, humanos y tecnologías disponibles.

En este caso se propone un diseño de RMCA ideal, sin tener en cuenta los recursos económicos y/o humanos, pero en la práctica se irá ajustando a los recursos disponibles.

Para el diseño de nuestra RMCA se propone la aplicación de sistemas de monitoreo automáticos. A la hora de instalar estos muestreadores automáticos en la ubicación de los sitios de muestreo, se deben tener algunas consideraciones prácticas:

- Fácil acceso
- Seguridad contra robos y daños
- Infraestructura
- Libre de obstáculos

Al momento de preseleccionar los sitios de monitoreo se deben tener en cuenta diferentes factores para la tomar la decisión de la ubicación final. Estos factores son:

- *Influencia de fuentes cercanas:* como puede ser el flujo vehicular o instalaciones del polo petroquímico. Se detallan a continuación en la Figura 6.
- *Seguridad:* Debido a la alta inversión económica que demandan los equipos se deben resguardar ante la posibilidad de robos y vandalismo. Se recomienda que la altura de toma de muestra sea entre 1.5–4.0 m
- *Acceso al sitio:* el personal destinado debe tener fácil acceso para recolectar las muestras, calibrar los equipos y realizar mantenimiento. Para equipos automáticos se debe contar con acceso a una conexión telefónica y de internet, además de contar con energía eléctrica segura.
- *Distancia a obstáculos:* no podrá haber obstáculos que afecten el movimiento del aire en el sitio, ni fuentes de emisión que puedan invalidar las muestras por el arrastre a la toma del muestreador de las emisiones de alguna fuente.
- *Registro histórico de datos:* es indispensable reunir toda la información disponible sobre la calidad del aire.

Se pueden seguir diferentes métodos para la ubicación de los sitios como por ejemplos dividir las zonas por medio de una cuadrícula, colocando puntos de muestreo en las intersecciones de cada

retícula cuadrada, cuyos lados se recomienda que midan 1 km de longitud, para la mayoría de los parámetros ambientales [76].

El método utilizado en este trabajo para la ubicación de las estaciones de monitoreo, consiste en generar circunferencias de 200 metros de radio, con centro en sitios donde se superponen los factores antes mencionados, entre ellos, mayor concentración de contaminantes emitidos por las CTs (obtenidos mediante los resultados de la modelación), mayor densidad poblacional, mayor circulación vehicular, cercanía a otras empresas contaminantes, accesibilidad al sitio, entre otros.

Giuliani [26], describe las potenciales fuentes contaminantes de MP presentes en el polo petroquímico de La Plata, las cuales deben ser consideradas a la hora diseñar la red.

Estas fuentes potenciales contaminantes de MP son [26]:

- Petrocuyo, es una de las principales productoras de polipropileno de Argentina, se encuentra en línea recta entre LPC II y CT el dique.
- Siderar, es una industria metalúrgica, se encuentra a metros de CTEB.
- Copetro, calcina carbón de coque de petróleo, subproducto derivado de la refinación del petróleo, que se utiliza como combustible en la industria metalúrgica, especialmente para la producción de hierro y acero.
- Maleic S.A., una planta química destinada a la producción de anhídrido maleico.
- Gases de Ensenada S.A. (GESA), producción de gases como oxígeno, nitrógeno y argón.

En la siguiente figura, se observan todas las instalaciones consideradas para el diseño de la RMCA. En amarillo se ven las centrales térmicas incluidas en la simulación y en verde las restantes instalaciones relevantes (Figura 7).



Figura 7: CTs y otras fuentes fijas de MP. Estas últimas no fueron incluidas en la modelización (por no contar con datos de emisiones) pero sí deben ser consideradas a la hora del diseño de la RMCA.

Además, se deben tener en cuenta, las zonas de mayor tránsito vehicular (Figura 8), que representa a otras de las fuentes relevantes en la región, y a las zonas urbanizadas en la región de estudio.

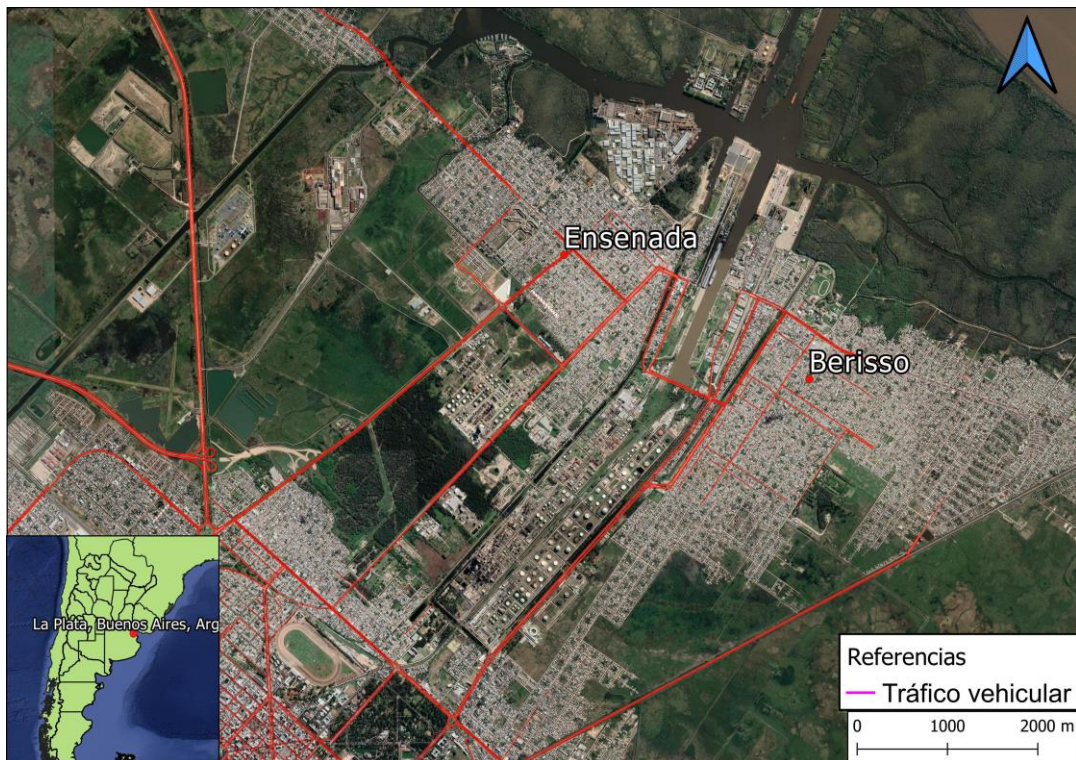


Figura 8: Visualización de las calles más transitadas (Rojo: tráfico intenso; Naranja: tráfico medio; Verde: tránsito fluido) y de las regiones urbanizadas en la zona de Ensenada y Berisso. Fuente: QuickMap Services, Google Road, QGIS).

3.4. ESTIMACIÓN DEL APOORTE DE LAS CENTRALES TÉRMICAS A LOS NIVELES DE MATERIAL PARTICULADO AMBIENTAL

Luego de realizar la simulación de la dispersión, del MP emitido por las CTs, a través del software AERMOD ViewTM en el cual se utilizaron como datos de emisión calculados mediante el inventario de emisiones atmosféricas; y luego de definir los sitios de monitoreo y puesta en marcha de la RMCA, se recurre a la estimación del aporte que producen las CTs al MP de la región, tal como se esquematiza en la Figura 9.

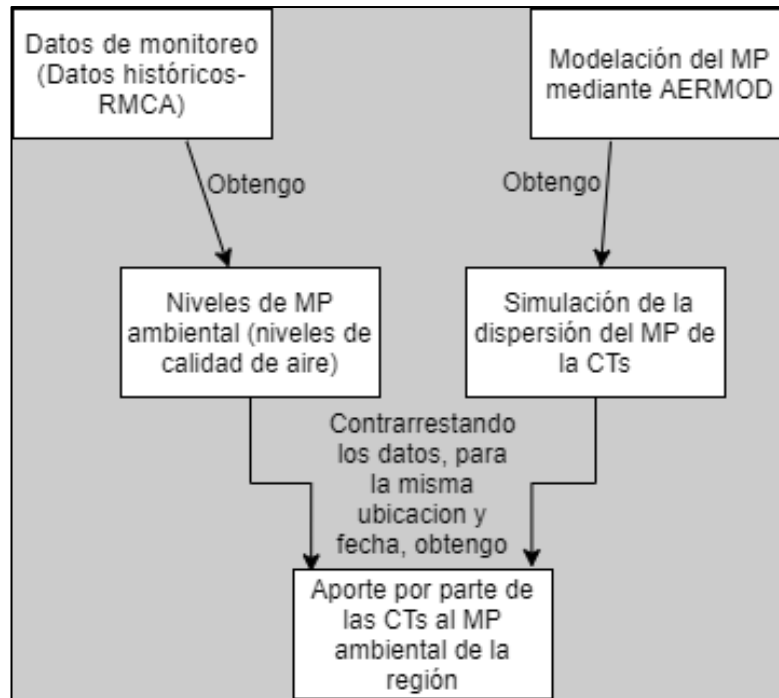


Figura 9: Esquema de cómo realizar la estimación del aporte de las CTs al MP ambiental de la región.

Para una primera estimación del aporte de MP de las centrales térmicas de la región se recurre al registro histórico de datos de este contaminante, y se los compara con los datos obtenidos a través de la simulación con AERMOD para la misma ubicación en donde se hizo el monitoreo de los datos reportados, para el mismo período de estudio (2015-2019). De esta manera, para tener noción del orden de magnitud que aportan las CTs a los niveles de concentración de MP ambiental, se hace una estimación inicial del aporte de las CTs al MP, comparando los datos estimados en la simulación correspondientes solo a las CTs con los datos ambientales de MP representativos del aporte de múltiples fuentes, tal como lo esquematiza la Figura 8.

Esta estimación, se tiene que ir actualizando con el correr del tiempo, luego de que entre en funcionamiento la nueva RMCA. Se debe ir correlacionando el dato medido de la nueva red con nuevas simulaciones realizadas, a medida que se va actualizando el inventario y la información meteorológica. De esta manera se podrá ir teniendo el aporte de las CTs al MP ambiental, de manera actualizada. También, se podrán incluir inventarios de otras fuentes de emisiones, para tener una estimación más certera del aporte al MP ambiental, no solo de las CTs si no de todas las instalaciones potencialmente contaminantes.

La primera estimación del aporte de las centrales al MP ambiental, se realizó a través de la comparación de los resultados estimados con AERMOD con registros históricos de datos de MP ambiental de la región de estudio.

Los trabajos que reportan datos ambientales de MP para la región son los siguientes:

- Tesis doctoral, L. Massolo (2004) “Exposición a contaminantes atmosféricos y factores de riesgo asociados a la calidad de aire en La Plata y alrededores” [83].

- Trabajo de maestría, Singh, Davinderjit, "Human Health Risk Characterization of Petroleum Coke Calcining Facility Emissions" (2016) [84].
- Tesis Doctoral, D. Giuliani (2020) "Especiación de compuestos asociados a material particulado (MP₁₀ y MP_{2.5}) en La Plata y alrededores: metales, hidrocarburos policíclicos aromáticos, simples y derivados. Evaluación del riesgo asociado" [26].

4. RESULTADOS

En esta sección, en primer lugar, se presentan los resultados del inventario de emisión de material particulado, tanto para MP₁₀ como MP_{2.5}, correspondiente a las cuatro CTs emplazadas en el Gran La Plata.

Luego, se exponen los resultados del modelado, mostrando gráficamente las isopletas, y las zonas de mayor concentración de los contaminantes en cuestión, para luego definir y presentar el diseño de la RMCA propuesta. Finalmente, se realiza la primera aproximación de la estimación de los aportes de las CTs a los niveles de MP ambiental de la región.

4.1. INVENTARIO DE EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO DE LAS CENTRALES TÉRMICAS

En la Tabla 7, se presentan los resultados del inventario de emisiones tanto para MP₁₀ como MP_{2.5} de las CTs del Gran La Plata. Estos resultados se expresan como caudal másico, cuyas unidades son masa de MP emitido por unidad de tiempo.

ID-CT	Caudal Másico MP ₁₀ (g/s)	Caudal Masico MP _{2.5} (g/s)
CTEB	2.24	0.56
CTED	0.27	0.07
LPC I	0.51	0.13
LPC II	0.34	0.08

Tabla 7: Caudales másicos de emisión, tanto para MP₁₀ como para MP_{2.5}, para cada central térmica, en gramos por segundo.

Vale aclarar que estos resultados corresponden al total de las emisiones generadas por las centrales térmicas. Por lo que, para obtener el caudal másico que canaliza cada CT por cada uno de sus conductos, se debe considerar la cantidad de conductos de cada instalación, presentados anteriormente en la Tabla 5.

Como se observa en la Tabla 7, la CTEB (central térmica Ensenada de Barragán) es la que mayor cantidad de MP genera, comparada con las demás centrales. Esto se debe a que esta instalación representa el 1.4% de la generación eléctrica de toda Argentina, siendo una de las más importantes para el país.

4.2. MODELIZACIÓN DE LA DISPERSIÓN

Un previo análisis de los vientos y de la topografía de la región de estudio es necesario para sumar elementos de análisis a las isopletras obtenidas con el software AERMOD ViewTM. La rosa de vientos para el período 2015-2019 (Figura 10), y las estacionales de verano (Figura 11) e invierno (Figura 12), son presentadas aquí. Las Figuras 10, 11 y 12, evidencian que en el área de estudio predominaron los vientos del Este, Sur, y Norte, respectivamente con velocidades de entre 3.6 y 5.7 m/s para todos los casos. Los vientos calmos por su parte, se presentaron en 8.3%, 7.8% y 8.7% para el promedio 2015-2019, verano e invierno, respectivamente. Estos porcentajes siempre que sean bajos, de unas pocas unidades de probabilidad de ocurrencia, se muestran como una condición favorable para la zona de estudio, dado que este tipo de condición de calma, combinados con la presencia de zonas urbanas y de otras fuentes de emisión, pueden comprometer la calidad del aire provocando eventos nocivos para la salud de la población, al no favorecer la dispersión del MP [85].

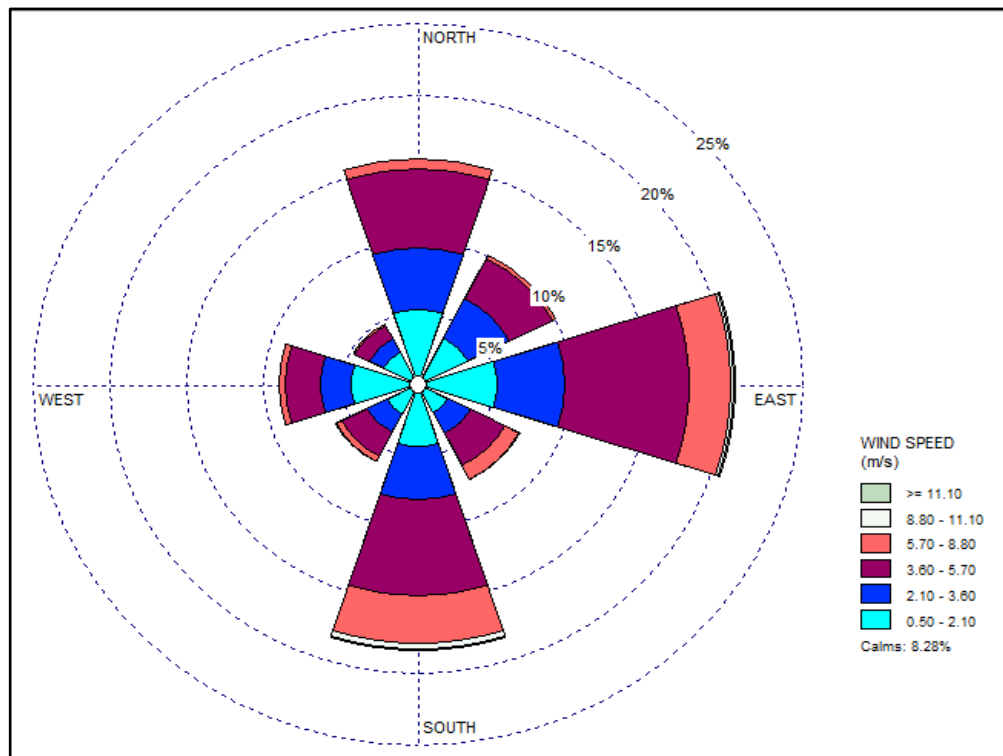


Figura 10: Rosa de vientos para el período 2015-2019, considerando el conjunto de datos completo. Elaborado con WRPLOT ViewTM.

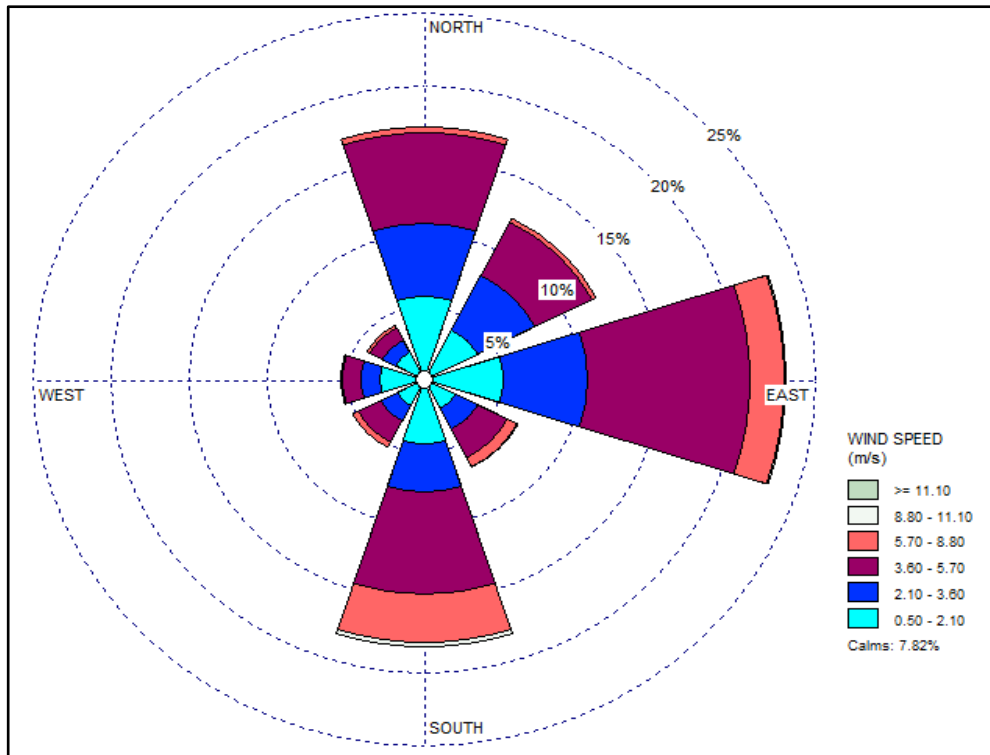


Figura 11: Rosa de vientos para el período 2015-2019, considerando solo la estación **verano** (diciembre, enero, febrero). Elaborado con WRPLOT View™.

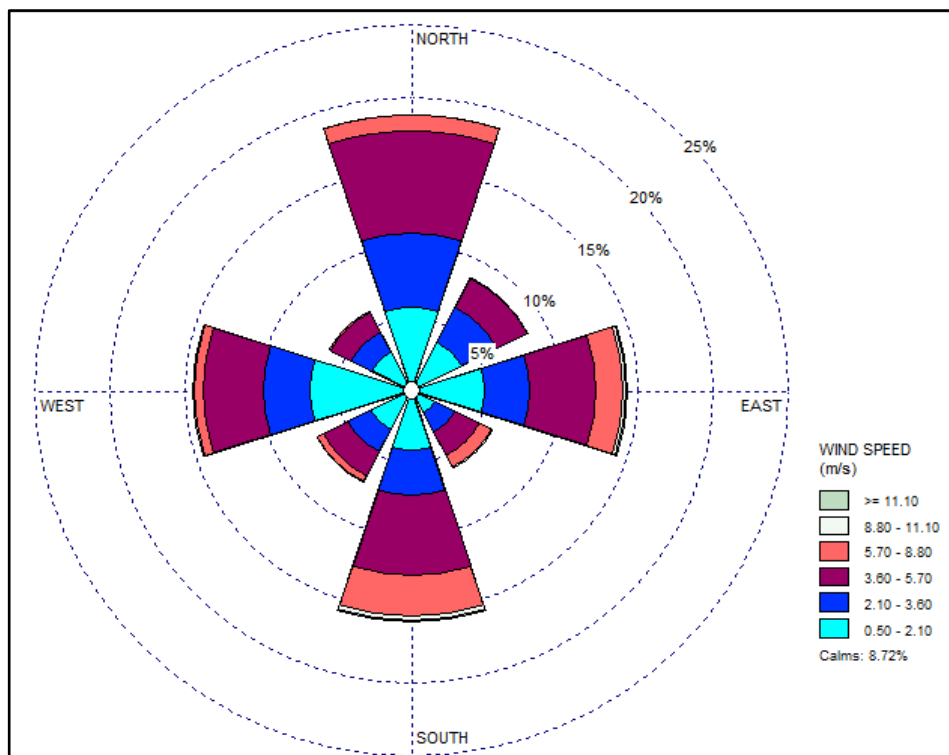


Figura 12: Rosa de vientos para el período 2015-2019, considerando solo el período **invernal** (junio, julio, agosto). Elaborado con WRPLOT View™.

Dado que la velocidad y la dirección de los vientos influyen considerablemente en la dispersión o dilución de los contaminantes emitidos, es que los resultados obtenidos en la simulación son comparados con las rosas de vientos elaboradas.

Si bien, otras variables como temperatura, radiación solar y estabilidad atmosférica, entre otras, son de interés para el estudio de la dispersión de los contaminantes, su análisis escapa a los objetivos de este trabajo.

Respecto a las características topográficas del área de estudio, se observó que existen zonas diferenciadas por la altura sobre el nivel del mar, comprendidas entre -1.1 m (Min.) y 41.6 m (Max.) snm (Figura 13). Las condiciones del terreno pueden influir en la dispersión y transporte del MP, en líneas generales, para zonas de topografía simple se consigue un flujo libre en la dirección predominante del viento y un flujo turbulento en las zonas con topografía compleja [86].

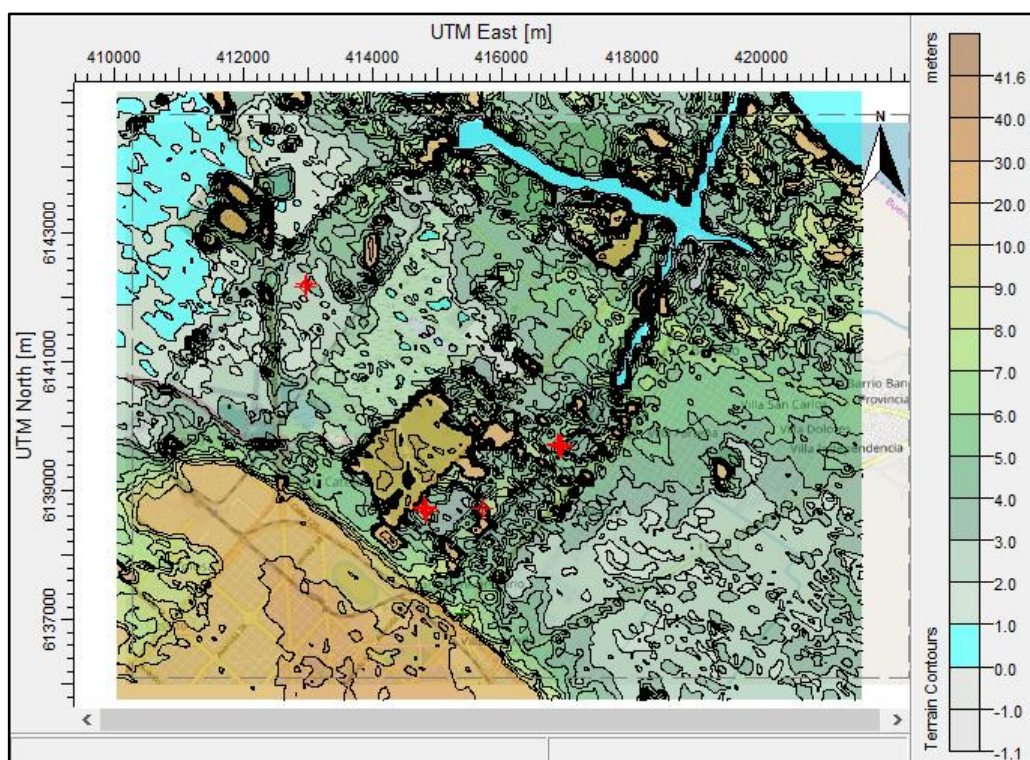


Figura 13: Características topográficas de la región de estudio correspondiente a un DEM elaborado. Los puntos rojos corresponden a las fuentes fijas incluidas en la modelación.

La topografía, juega un rol fundamental en la dinámica atmosférica, siendo de obstáculo a las corrientes de aire que transportan el MP y/o cambiar la cantidad de radiación solar recibida por la superficie terrestre a lo largo del día, lo que a su vez influye en la generación de diferencias de presión atmosférica que producen movimientos de masas de aire [87].

A continuación, se muestran las plumas de dispersión resultantes de la modelización de MP₁₀ y MP_{2.5}. El objetivo es detectar las zonas de mayor concentración de MP a fin de identificar las zonas más representativas para la ubicación de las estaciones de monitoreo, en el marco del diseño de una RMCA eficiente.

Se presentan los resultados promediados para un periodo anual en primer lugar, y para un promedio de 24 hs en segundo lugar. Tal como lo dispone el marco normativo de la PBA para el MP [37]. También, se realizó un análisis considerando sólo los meses de verano, como así también, considerando solo el periodo invernal, ambos casos por separado, para el periodo cubierto entre 2015 a 2019.

❖ SIMULACIÓN DEL MP₁₀

La Figura 14 representa el promedio anual de la dispersión de MP₁₀, emitida desde las cuatro centrales térmicas bajo estudio, considerando el conjunto completo de datos meteorológicos comprendido entre el 1 de enero del 2015 y el 31 de diciembre del 2019.

Dado que las mayores emisiones son presentadas por la CTEB, es que se observan áreas más grandes entorno a dicha fuente que evidencian las concentraciones en aire más elevadas de MP₁₀ respecto a las otras centrales bajo estudio. Aunque también, se observan pequeñas áreas de este rango de concentraciones sobre las otras CTs. Las localizaciones para tal caso se direccionan hacia el Norte, Este y Sur de la fuente, en respuesta a los patrones meteorológicos de la región (considerando la rosa de los vientos de la Figura 10). El máximo de concentración para dicha simulación es de 0.1 µg/m³, se halla en las cercanías de CTEB, y se encuentra por debajo de los valores normados.

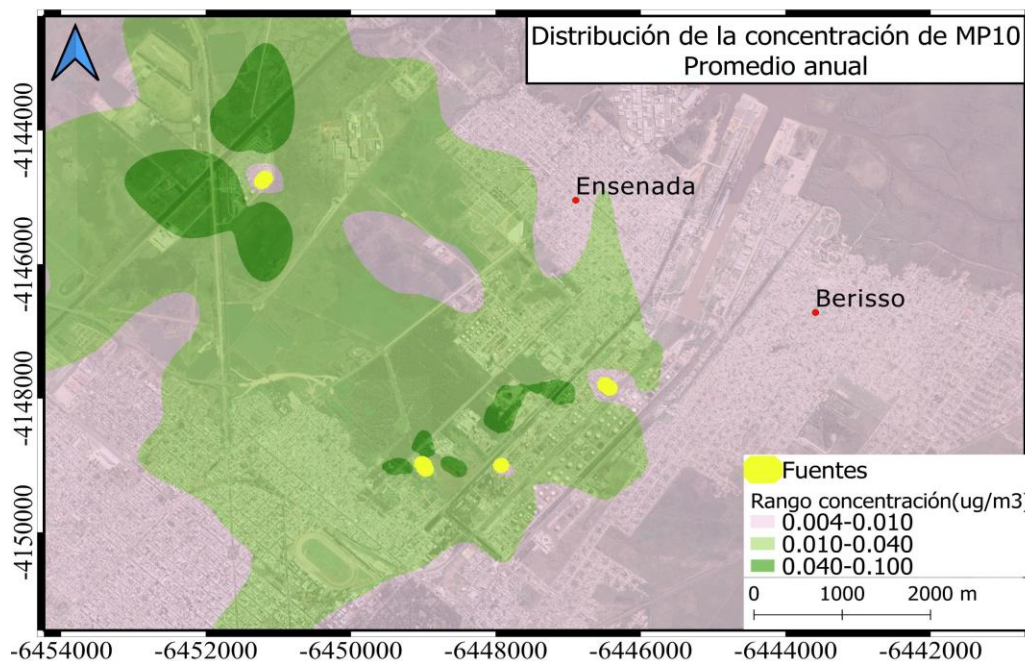


Figura 14: Concentración [µg/m³] de Material Particulado menor a 10 micras, para un promedio anual, utilizando set de datos meteorológicos comprendido de 2015 a 2019. Imagen procesada con QGIS.

Ahora, en lo que se refiere al promedio de 24 hs para MP₁₀ en la región de estudio, la Figura 15 muestra que las áreas con concentraciones mayores o iguales a 0.03 µg/m³ son más extensas que en el promedio anual, por presentarse con una mayor frecuencia los valores altos en este promedio temporal. Para un periodo de 24 horas, el modelo predice las máximas concentraciones de 1.12 µg/m³, también en las cercanías de CTEB, encontrándose estos valores por debajo de los niveles permitidos en el Decreto 1074/18 de la PBA.

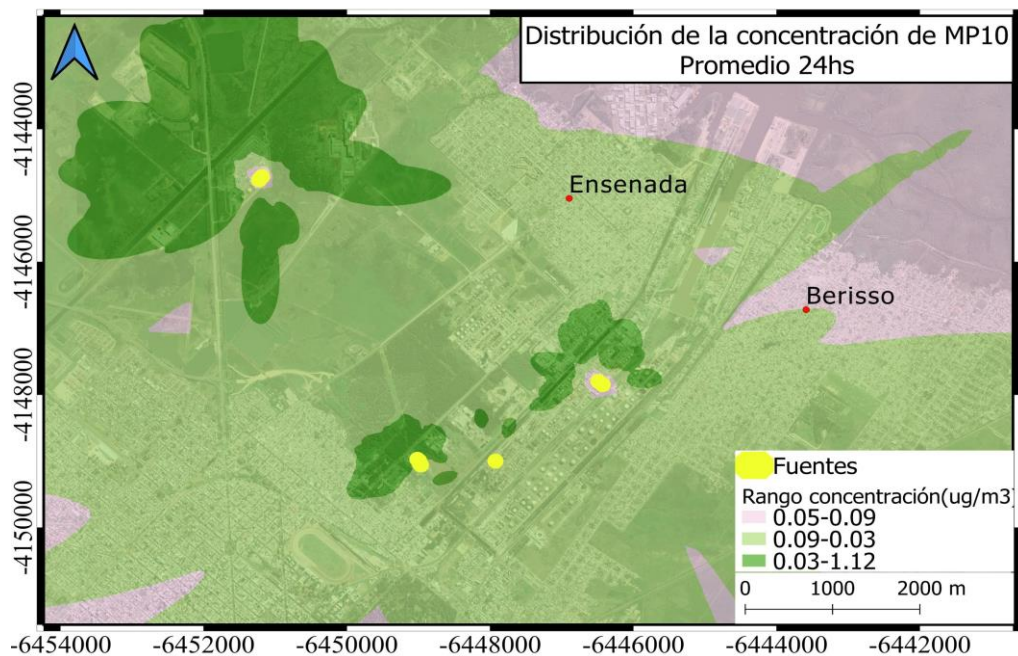


Figura 15: Concentración [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] de Material Particulado menor a 10 micras, para un promedio de 24 hs, utilizando set de datos meteorológicos comprendido de 2015 a 2019. Imagen procesada con QGIS.

También, se evaluó la dispersión considerando solo la estación verano, por un lado, como así también de forma aparte considerando solo los meses invernales, ambos comprendidos desde el año 2015 al año 2019, como se muestra en las Figuras 16 y 17, respectivamente. Como se observa, la trayectoria seguida por el MP_{10} emitido se encuentra fuertemente influenciada por las direcciones predominantes de los vientos (como es observa en la rosa de los vientos presentada anteriormente en la Figura 11) y afectada por la topografía del lugar, que permite alejarse de las fuentes de emisión en mayor medida cuando el relieve es menos complejo.

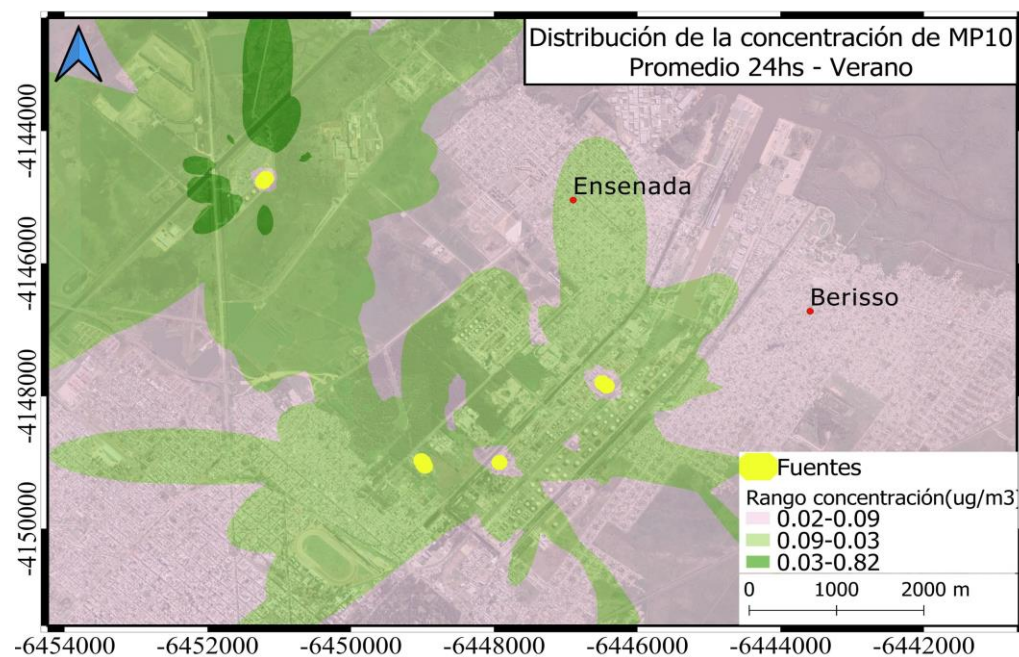


Figura 16: Concentración [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] de Material Particulado menor a 10 micras, para un promedio de 24 hs, considerando solo la estación de verano del 2015 al 2019. Imagen procesada con QGIS.

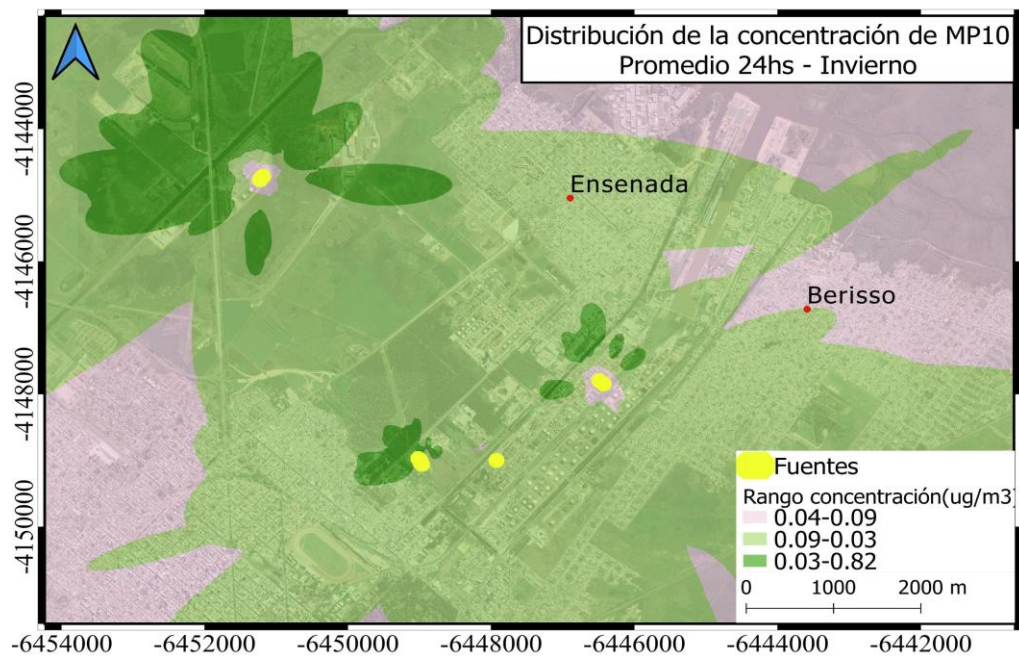


Figura 17: Concentración [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] de Material Particulado menor a 10 micras, para un promedio de 24 hs, considerando solo la estación invernal del 2015 al 2019. Imagen procesada con QGIS.

❖ SIMULACIÓN DEL $\text{MP}_{2.5}$

La Figura 18 representa el promedio anual de la dispersión del $\text{MP}_{2.5}$, considerando el conjunto completo de datos meteorológicos comprendido desde el 1 de enero del 2015 al 31 de diciembre del 2019.

Dado que las mayores emisiones son presentadas por la CTEB, es que se observan áreas más grandes entorno a dicha fuente que evidencian las concentraciones en aire más elevadas de $\text{MP}_{2.5}$ respecto a las otras centrales bajo estudio. Aunque también, se observan pequeñas áreas de este rango de concentraciones sobre las otras CTs. Las localizaciones para tal caso se direccionan hacia el Norte, Este y Sur de la fuente, en respuesta a los patrones meteorológicos de la región (considerando la rosa de los vientos de la Figura 10).

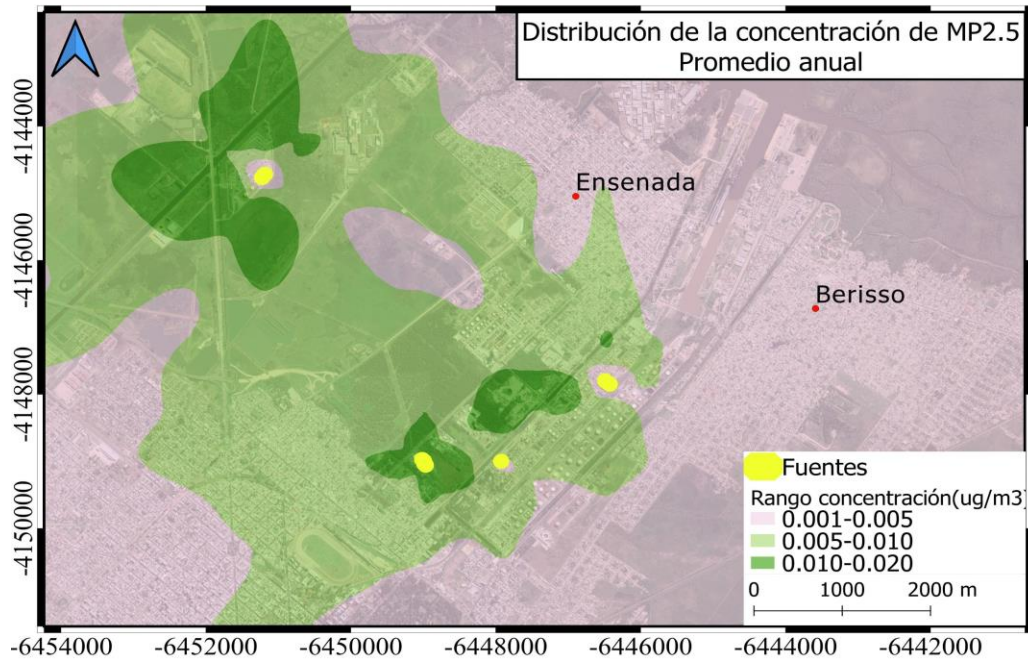


Figura 18: Concentración [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] de Material Particulado menor a 2.5 micras, para un promedio anual, utilizando set de datos meteorológicos comprendido de 2015 a 2019. Imagen procesada con QGIS.

En lo que se refiere al promedio de 24 hs de concentraciones de $\text{MP}_{2.5}$ se muestra el mapa de isoconcentraciones en la Figura 19. La máxima concentración de $0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ se halló en las cercanías de CTEB, cumpliendo con los valores normados.

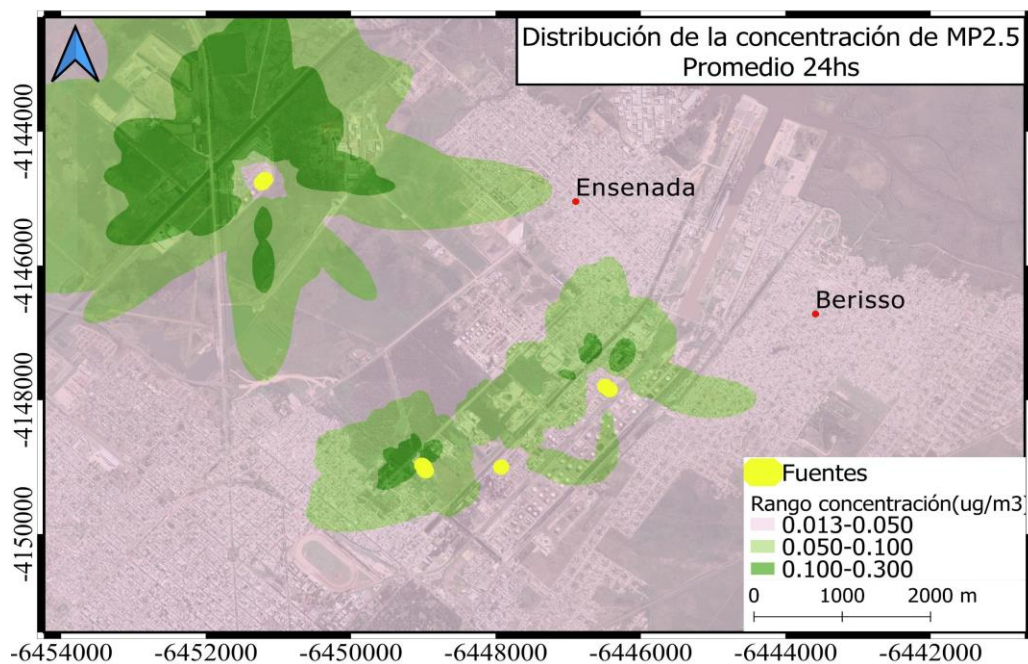


Figura 19: Concentración [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] de Material Particulado menor a 2.5 micras, para un promedio de 24 hs, utilizando set de datos meteorológicos comprendido de 2015 a 2019. Imagen procesada con QGIS.

Al igual que para MP_{10} , para $MP_{2.5}$ se evaluó la dispersión considerando solo la estación verano, como así también solo los meses invernales, siempre para los años comprendidos del 2015 al 2019, como se observa en la figura 20 y 21, respectivamente. Los máximos de concentración fueron de $0.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para ambos casos.

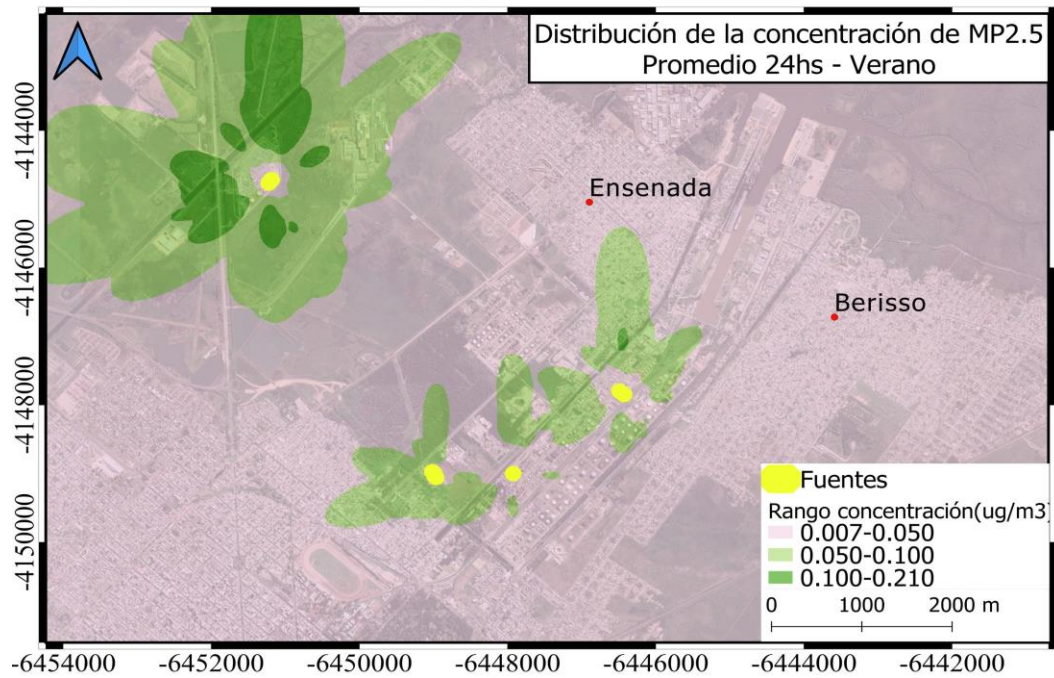


Figura 20: Concentración [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] de Material Particulado menor a 2.5 micras, para un promedio de 24 hs, considerando solo la estación de verano del 2015 al 2019. Imagen procesada con QGIS.

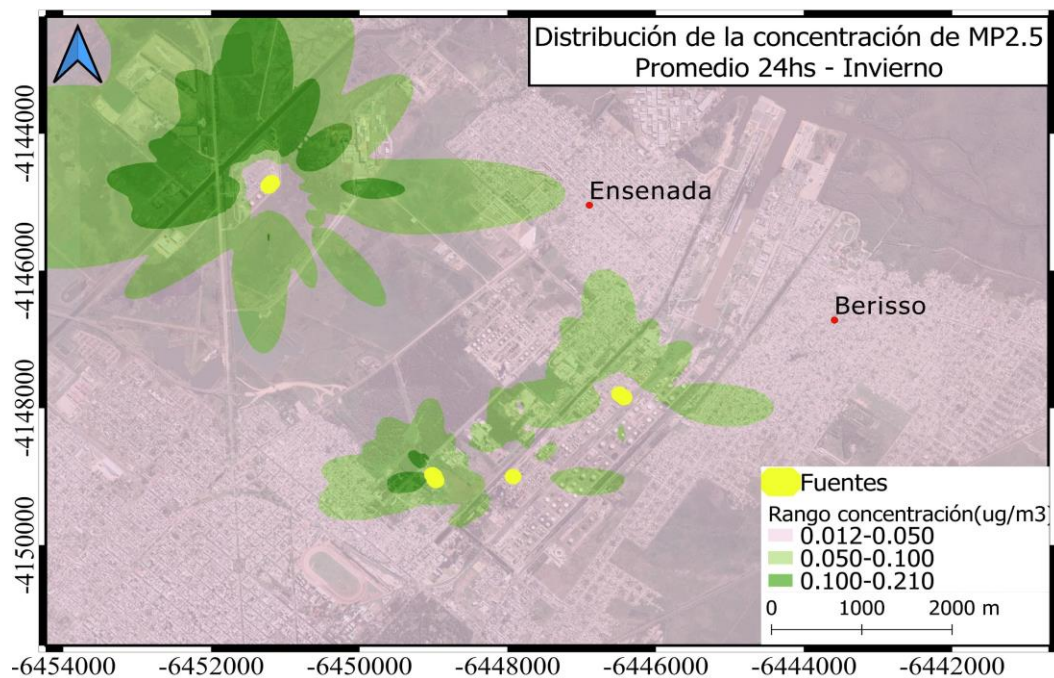


Figura 21: Concentración [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] de Material Particulado menor a 2.5 micras, para un promedio de 24 hs, considerando solo la estación invernal del 2015 al 2019. Imagen procesada con QGIS.

El área que abarca la isopleta de mayor concentración en entornos a la CTEB debe su gran tamaño a la magnitud de emisión de dicha instalación.

Más allá de que los niveles de concentraciones de MP ambiental son relativamente bajas, y de que en verano se evidencia mayor dispersión y dilución sobre la región de Berisso y Ensenada, es importante observar el patrón de distribución tanto de MP₁₀ como de MP_{2.5} que se representa en cada una de las plumas y que se repite en casi todas las visualizaciones, en respuesta a los patrones meteorológicos de la región de estudio.

4.3. RED DE MONITOREO DE CALIDAD DE AIRE DE MATERIAL PARTICULADO PARA LA REGIÓN

En base a todo lo expuesto hasta aquí (resultados de la modelación, identificación de las zonas densamente pobladas y de otras fuentes contaminantes) se propone el diseño de una Red de Monitoreo de Calidad de Aire que incluye 5 (cinco) sitios de ubicación para los equipos de monitoreo.

Como se mencionó anteriormente, para el diseño de la RMCA se fueron solapando diferentes factores como se detalla en la Figura 22. A partir de los resultados de la modelación (Figura 22a), mas el solapamiento de fuentes externas como es el tráfico vehicular (Figura 22b) y fuentes de los diferentes rubros que integran el polo petroquímico (Figura 22c) se decidió proponer las ubicaciones de las estaciones de monitoreo en los círculos que se visualización en la Figura 22d.

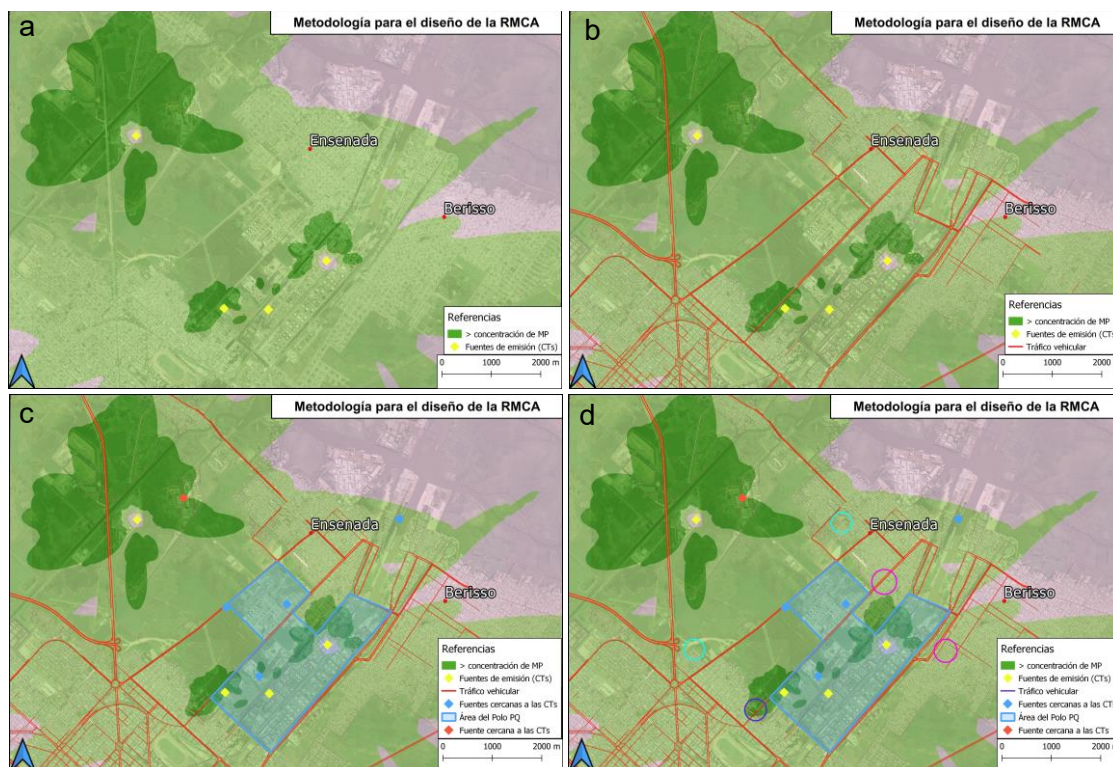


Figura 22: Metodología implementada que dio como resultado el diseño de la RMCA.

Finalmente, los sitios de monitoreo que responden a los objetivos planteados (estimar el aporte de las CTs) se identifican en la Figura 23 y se describen en la Tabla 8.



Figura 23: Radios de ubicación de los sitios de monitoreo para que contempla el diseño de la RMCA propuesta.

Con la RMCA propuesta será posible estimar los aportes de las diferentes fuentes de emisión, ya que se podrá discriminar el aporte de cada una en base a la dirección del viento del periodo de monitoreo, factor que es determinante en el transporte del contaminante. Por ejemplo, cuando el viento sople hacia el sur, los sitios de monitoreo al sur de CTEB (círculos turquesas, Figura 23), serán representativos para estimar el aporte de dicha fuente a la vez que no monitorea las emisiones del polo petroquímico.

El equipo de monitoreo de preferencia a utilizar en la red, tanto para MP_{10} como para $MP_{2.5}$, será un equipo de monitoreo automático ya que brinda concentraciones de MP rápidamente y proporciona una mejor resolución temporal para comprender mejor las fuentes y causas de las concentraciones de MP elevadas en la atmósfera, facilita la notificación pública de la calidad del aire, reduce costos de operación y da la posibilidad de implementar estrategias de control periódicas.

Se propone también la inclusión de equipos de medición de variables meteorológicas en el sitio de monitoreo número 2 (Tabla 8), con sensores de velocidad y dirección del viento, humedad relativa, temperatura, precipitación y presión atmosférica. Tomar medidas de variables meteorológicas en este punto podría ampliar la descripción de la zona de estudio, previendo sumar también datos de la estación meteorológica emplazada en la FCAG-UNLP, y los propios de la estación AERO LP.

Todos los sitios propuestos, pueden encontrar factibilidad de instalación de los equipos monitores por encontrarse emplazados a priori en regiones urbanizadas (acceso a electricidad, predios privados, entre otros).

Con respecto al tiempo de muestreo, cada estación automática operará de manera permanente las 24 horas del día, todos los días del año, generando promedios cada 24 horas, tal como regula la legislación. Prestando atención a eventos adversos que se puedan generar en cualquier horario.

A continuación, se presentan los sitios seleccionados para ubicar los equipos de monitoreo. Se resumen la cantidad, las calles aproximadas a ubicar los equipos de monitoreo automático.

Sitio N°	ID	Ubicación (calles)	Cercanía a otras fuentes
1	LPCI-Berisso	Puerto entre Nápoles y Callao	Tráfico vehicular, polo petroquímico
2	LPCI-Ensenada	Guemes y camino Ing Humet	Tráfico vehicular, polo petroquímico
3	CTEB-Ensenada	Quinata y L. Contarelli	Siderar, polo petroquímico, tráfico vehicular
4	CTEB	Cercanías a Cno. Rivadavia y c. 127	Tráfico vehicular, polo petroquímico
5	CTED	Calle 126 y camino Ing Humet	Tráfico vehicular, polo petroquímico

Tabla 8: Resumen de las cantidad y ubicación de los sitios de monitoreo. Los colores de las dos primeras columnas hacen referencia al mismo color de los círculos de las ubicaciones de los sitios de la Figura 23.

Se debe prestar atención a las actividades de control y evaluación de la calidad de los datos monitoreados, ya que las actividades de investigación sobre el ambiente o la salud humana pueden dar lugar a decisiones políticas y a una vigilancia potencialmente relacionada con el cumplimiento de normas. La incertidumbre de estos datos de investigación debe conocerse y cuantificarse.

4.4. APORTES DE LAS CENTRALES TÉRMICAS A LOS NIVELES DE MATERIAL PARTICULADO AMBIENTAL

Una estimación inicial del aporte de las centrales térmicas al MP ambiental, se realiza mediante la comparación de las estimaciones realizadas en la sección 4.2 con el software AERMOD ViewTM, con registros históricos de MP en la región de estudio, en sitios receptores asociados a los sitios de monitoreo de dichos registros históricos.

Si bien el registro data desde 1999, sólo se utilizaron para el propósito de la estimación inicial, aquellos presentados en la Tabla 9 y Tabla 10, ya que coincide el periodo de tiempo muestreado con el promedio calculado tanto en la modelación como en la muestra observada. Las concentraciones observadas corresponden a un monitoreo realizado por Giuliani [26], en donde se midió tanto MP₁₀ como MP_{2.5} en una estación de monitoreo ubicada en las instalaciones de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN) correspondientes a las coordenadas 415379.00 m X, 6137102.00 m Y.

En primer lugar, a partir de la Tabla 9, se realiza la estimación considerando el promedio de observaciones y estimaciones de forma anual, esto representaría el *mejor* escenario, ya que, considerando este promedio, las concentraciones de los contaminantes siempre resultan menores. Luego, en la Tabla 10 se presentan los resultados, tanto observados como estimados, considerando un promedio de 24 hs, lo que supone un peor escenario. De esta forma se obtendrá el rango estimado del aporte de las centrales térmicas a los niveles de MP ambiental, para el punto receptor en donde Giuliani realizó las observaciones, que corresponden a los emplazamientos de la UTN La Plata.

Fracción de MP	Fecha	Ubicación	Concentración observada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Promedio	Concentración estimada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
MP ₁₀	2015	UTN	4.6E+01 – 6.9E+01	Media Anual	1.5E-02
MP ₁₀	2017	UTN	3.9E+01 – 6.9E+01	Media Anual	1.6E-02
MP ₁₀	2018	UTN	2.8E+01 – 4.6E+01	Media Anual	1.4E-02
MP ₁₀	2019	UTN	1.6E+01 – 2.3E+01	Media Anual	1.6E-02
MP _{2.5}	2015	UTN	5.4E+00 – 5.4E+00	Media Anual	3.7E-03
MP _{2.5}	2017	UTN	2.3E+01 – 4.7E+01	Media Anual	4.1E-03
MP _{2.5}	2018	UTN	1.6E+01 – 3.6E+01	Media Anual	3.6E-03
MP _{2.5}	2019	UTN	1.2E+01 – 1.7E+01	Media Anual	3.9E-03

Tabla 9: Resumen de datos utilizados para realizar la estimación del aporte por parte de las CTs al MP ambiental de la región, en lo que se refiere al promedio anual.

En base a los cálculos realizados, el aporte de las centrales térmicas a los niveles MP ambiental en el sitio receptor de la UTN, resultó ser entre un 0.06 y un 0.04 % para MP₁₀ y entre 0.04 y 0.03 % para MP_{2.5}.

Ahora si se toma en cuenta las observaciones realizadas por Giuliani [26], en la que se monitoreo los niveles de MP con un promedio de 24 hs, se observan los valores presentes en la Tabla 10.

Fracción de MP	Fecha	Ubicación	Concentración observada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Promedio	Concentración estimada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
MP ₁₀	28/5/2015	UTN	6.9E+01	24 hs	2.7E-02
MP ₁₀	17/11/2017	UTN	2.4E+01	24 hs	3.6E-02
MP ₁₀	27/8/2018	UTN	1.4E+01	24 hs	4.5E-02
MP ₁₀	19/9/2018	UTN	1.9E+01	24 hs	4.5E-02
MP ₁₀	9/10/2018	UTN	2.3E+01	24 hs	1.6E-03
MP ₁₀	3/12/2018	UTN	2.8E+01	24 hs	5.0E-03
MP ₁₀	5/12/2018	UTN	2.8E+01	24 hs	2.3E-03
MP ₁₀	6/12/2018	UTN	3.2E+01	24 hs	8.6E-03
MP ₁₀	7/12/2018	UTN	4.6E+01	24 hs	3.7E-02
MP ₁₀	28/3/2019	UTN	2.3E+01	24 hs	9.6E-03
MP ₁₀	29/4/2019	UTN	1.9E+01	24 hs	1.5E-02
MP ₁₀	2/5/2019	UTN	4.6E+00	24 hs	3.5E-02
MP ₁₀	6/6/2019	UTN	1.8E+01	24 hs	5.9E-02
MP _{2.5}	5/9/2018	UTN	1.7E+01	24 hs	1.0E-02
MP _{2.5}	3/10/2018	UTN	8.3E+00	24 hs	8.7E-04
MP _{2.5}	5/10/2018	UTN	1.1E+01	24 hs	6.6E-03
MP _{2.5}	27/11/2018	UTN	1.1E+01	24 hs	3.5E-04
MP _{2.5}	1/4/2019	UTN	1.7E+01	24 hs	1.2E-02
MP _{2.5}	23/4/2019	UTN	5.6E+00	24 hs	2.2E-04

Tabla 10: Resumen de datos utilizados para realizar la estimación del aporte por parte de las CTs al MP ambiental de la región, en lo que se refiere al promedio de 24 horas.

En base a los cálculos realizados, el aporte de las centrales térmicas a los niveles de MP ambiental en el sitio receptor de la UTN es de un 0.162 % para MP₁₀ y de un 0.0354 % para MP_{2.5}.

En resumen, los rangos de aportes de entre 0.05 a 0.16% se presentan como estimación inicial para el MP₁₀ y rangos de 0.03 a 0.04 % se presentan como estimación inicial del aporte de las CTs para el MP_{2.5}.

Una vez en funcionamiento la RMCA, ya se puede volver a estimar el aporte de las CTs a los niveles de MP ambiental, en las correspondientes estaciones de monitoreo propuestas, bajo la premisa de que las mediciones obtenidas por la RMCA definida en la sección 4.3 son representativas para la región de estudio al contemplar zonas de máximos de concentración de las diferentes fracciones de MP por aporte de las CTs, y de otras fuentes también.

Finalmente, en base a la ubicación de los sitios de monitoreo, una vez en funcionamiento y ya con datos de la RMCA, la manera de actualizar la estimación es la siguiente: Los datos reportados por la RMCA correspondientes a las observaciones serán comparados con los datos obtenidos mediante el modelado de la dispersión del MP. Los datos utilizados para el modelado provienen del inventario de emisiones, el cual debe ser actualizado constantemente en base al combustible y el tiempo de operación de las CTs. Además, de contar con mayor información, de emisiones de fuentes cercanas, se las podrá incluir en el nuevo inventario y el resultado del aporte de las CTs será cada vez más descriptivo de la realidad, evidenciando un círculo virtuoso de estimación y cálculo. Sumado a esto, con la nueva red propuesta en funcionamiento reportando los datos continuos del monitoreo y con los nuevos parámetros, los cuales se reformulan en el tiempo teniendo en cuenta las variables meteorológicas, involucrados en la modelación y parámetros de emisión abarcados en el inventario se podrá ir ajustando con mayor exactitud la estimación del aporte de cada CT al MP ambiental. La implementación de estas herramientas de forma sinérgica en un ciclo virtuoso de constante actualización se esquematiza, a continuación, en la Figura 24.

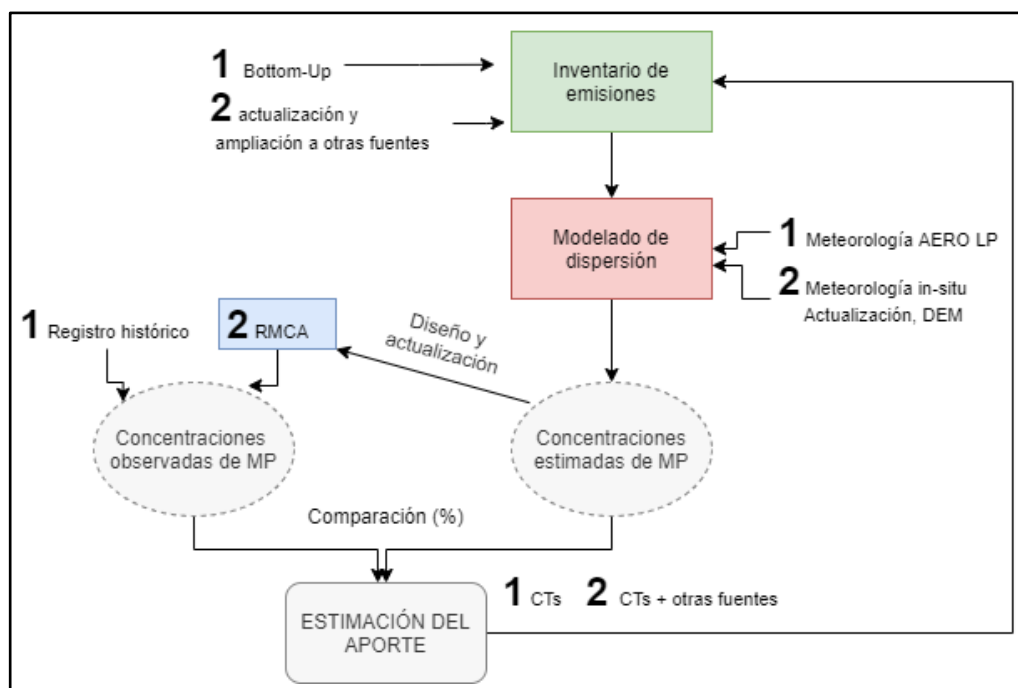


Figura 24: Flujograma que resume la implementación de forma sinérgica del inventario de emisiones, el modelado de dispersión y el monitoreo de material particulado, para el diseño de una RMCA con el objetivo final de estimar el aporte a los niveles MP por parte de las CTs, y de otras fuentes. Los números 1 y 2, hacen referencia al numero de iteración del ciclo virtuoso.

Cabe destacar que, si en la simulación se tuviera en cuenta la mayor cantidad de fuentes de emisión de MP, en base a las estaciones de monitoreo, se podrá estimar el aporte a los niveles de MP (u otro contaminante) de las diversas fuentes, evaluar el peso de cada una, y así tener una descripción cada vez más realista de la contaminación atmosférica de la región. Asimismo, con la nueva RMCA se podrá contar con valores a tiempos de monitoreo iguales a la de los modelos y de esta manera se podrá hacer la correspondencia adecuada y con diferentes promedios de evaluación.

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se pudo utilizar, integrar y aplicar las tres herramientas que proponen, tanto la EPA como la OMS, para diseñar una red de monitoreo de calidad de aire de investigación con 5 estaciones de monitoreo que permita estimar el aporte de las centrales térmicas de la región del Gran La Plata a los niveles de material particulado ambiental en función del modelado de la dispersión del MP emitido por las CTs, que a su vez depende del inventario de emisiones atmosféricas.

Estas tres herramientas se complementan de forma sinérgica en un ciclo virtuoso, el cual se debe ir actualizando constantemente para tener una descripción cada vez más completa de la dinámica del escenario de estudio, en cuanto a las emisiones de las CTs y de otras fuentes (como perspectiva a futuro), la meteorología, la dispersión del MP, entre otras variables. En este mismo sentido, la actualización del inventario, y por ende la de las emisiones, no sólo se realiza en base al combustible y tiempo de funcionamiento en el que operan las centrales térmicas, sino también que la inclusión de otras fuentes de material particulado, permitirá obtener simulaciones de la dispersión de los contaminantes en forma actualizada y discriminada para cada fuente lo que permitirá ir contrastando con las concentraciones observadas de las estaciones de monitoreo, de manera tal, que será posible obtener el aporte de cada fuente de forma individual, como así también ir actualizando el diseño de la RMCA en base a la nuevas fuentes incorporadas.

Este esquema sinérgico no solo permitirá tener un control y vigilancia de la calidad del aire sino también, permitirá estimar el aporte al MP ambiental, de las centrales térmicas y de otras fuentes contaminantes emplazadas (tanto del tráfico vehicular como fuentes fijas) en la región de alcance de las estaciones de monitoreo. El contar con mayor información bondadosa y descriptiva de la región de estudio, para cada una de las herramientas aplicadas en este trabajo, permitirá alcanzar una representación más realista y completa.

Existen diversas metodologías propuestas para el diseño de una red de monitoreo. Sin embargo, se espera que la RMCA propuesta cumpla, con el objetivo general de estimar el aporte de las CTs a los niveles de MP de la región.

Finalmente, la integración de estas herramientas permitió llevar a cabo una estimación inicial, a partir de un registro de observaciones obtenido mediante un monitoreo ubicado en los emplazamientos de la UTN La Plata, punto lejano a las CTs pero que sirve para tener noción del orden de aporte al MP por parte de estas instalaciones. El aporte resultó ser de entre 0.04 % y el 0.16% para MP₁₀ y entre 0.04 y 0.03 % para MP_{2.5}. El aporte resulta bajo debido a la lejanía del punto de monitoreo con las CTs. La mejora en cuanto a ubicación y puntos de monitoreo, tiempos de monitoreo de la red, etc, va a ayudar a encontrar valores más representativos de la realidad. Con la RMCA propuesta, y la

actualización constante de la información de entrada en cada una de las herramientas, dichas estimaciones de aporte podrán ser optimizadas para las CTs, como así también para otras fuentes u otros contaminantes a incorporar.

La metodología empleada en este trabajo constituye una guía aplicable tanto para la evaluación de los sitios para la ubicación de las estaciones de monitoreo de calidad del aire, como para la evaluación del aporte de determinadas instalaciones a los niveles de contaminación del aire.

Además, se debe destacar que, si bien la industria de la energía resulta imponente en el tamaño de sus instalaciones para la población general, los aportes estimados (como fase inicial en este trabajo) son bajos, y evidencian el peso de otras fuentes en la región de estudio que ameritan ser investigadas. Una descripción completa del aporte de las fuentes de emisión en la región de estudio, permitirá converger a una mejor comprensión de la misma y conducirá a la toma de medidas de gestión efectivas.

Finalmente, mencionar que todas las concentraciones de material particulado estimadas en este trabajo durante la modelación se encuentran en cumplimiento con los valores normados por el Decreto 1074/18 de la PBA.

6. BIBLIOGRAFÍA

1. Ley Nacional 20.284/73 de la Rep. Argentina en [LEY N° 20.284 - Plan de prevención de situaciones críticas de contaminación atmosféricas](#).
2. Prevención de enfermedades a través de entornos saludables: una evaluación global de la carga de morbilidad derivada de los riesgos ambientales, Organización Mundial de la Salud, 2016. en http://www.who.int/quantifying_ehimpacts/publications/preventing-disease/en/
3. Contaminación del aire ambiental: una evaluación global de la exposición y la carga de morbilidad, Organización Mundial de la Salud, 2016. en <http://www.who.int/phe/publications/air-pollution-global-assessment/en/>
4. OPS/OMS | Contaminación del Aire Ambiental) <https://www.paho.org/es/temas/calidad-aire-salud/calidad-aire-ambiente>
5. WHO (2013). Revisión de evidencia sobre aspectos sanitarios de la contaminación atmosférica - Proyecto REVIHAAP. Centro Europeo de la OMS para el Medio Ambiente y la Salud, Bonn, Oficina Regional de la OMS para Europa, Organización Mundial de la Salud 2013. 309 pp. www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0004/193108/REVIHAAP-Final-technical-report-final-version.pdf
6. POPE III, C. Arden; DOCKERY, Douglas W. Efectos sobre la salud de la contaminación atmosférica por partículas finas: líneas que conectan. *Journal of the air & waste management association*, 2006, vol. 56, no 6, p. 709-742.
7. RÜCKERL, Regina, et al. Efectos sobre la salud de la contaminación atmosférica por partículas: una revisión de las pruebas epidemiológicas. *Inhalation toxicology*, 2011, vol. 23, no 10, p. 555-592.
8. LIPPMANN, Morton, et al. Iniciativa Nacional de Toxicidad de los Componentes de las Partículas (NPACT, por sus siglas en inglés): estudios epidemiológicos y toxicológicos integrados de los efectos sobre la salud de los componentes de las partículas. Informe de investigación (Instituto de Efectos sobre la Salud), 2013, no 177, p. 5-13.
9. Karagulian, F., Belis, C. A., Dora, C. F. C., Prüss-Ustün, A. M., Bonjour, S., Adair-Rohani, H., & Amann, M. (2015). Contributions to cities' ambient particulate matter (PM): A systematic review of local source contributions at global level. *Atmospheric Environment*, 120, 475–483. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2015.08.087>
10. Lippmann, M. (2014, April 4). Toxicological and epidemiological studies of cardiovascular effects of ambient air fine particulate matter (PM2.5) and its chemical components: Coherence and public health implications. *Critical Reviews in Toxicology*, Vol. 44, pp. 299–347. <https://doi.org/10.3109/10408444.2013.861796>
11. LU, Feng, et al. Revisión sistemática y meta-análisis de los efectos adversos para la salud de la contaminación ambiental por PM2.5 y PM10 en la población china. *Investigación ambiental*, 2015, vol. 136, p. 196-204.
12. Wong, C. M., Vichit-Vadakan, N., Kan, H., Qian, Z., Vajanapoom, N., Ostro, B., ... Liu, W. (2008). Public Health and Air Pollution in Asia (PAPA): A multicity study of short-term effects of air pollution on mortality. *Environmental Health Perspectives*, 116(9), 148 1195–1202. <https://doi.org/10.1289/ehp.11257> .
13. JANSSEN, N. A. H., et al. Efectos a corto plazo de las PM2,5, PM10 y PM2.5-10 en la mortalidad diaria en los Países Bajos. *Science of the Total Environment*, 2013, vol. 463, p. 20-26.

14. GORAI, Amit, et al. Asociación entre la contaminación del aire ambiente y la prevalencia del asma en diferentes grupos de población que residen en el este de Texas, Estados Unidos. *International journal of environmental research and public health*, 2016, vol. 13, no 4, p. 378.
15. PATEL, Molini M., et al. Contaminantes atmosféricos relacionados con el tráfico y marcadores exhalados de inflamación de las vías respiratorias y estrés oxidativo en adolescentes de la ciudad de Nueva York. *Environmental research*, 2013, vol. 121, p. 71-78.
16. ROMIEU, Isabelle, et al. Estudio multicidad de la contaminación del aire y la mortalidad en América Latina (el estudio ESCALA). Informe de investigación (Instituto de Efectos sobre la Salud), 2012, no 171, p. 5-86.
17. ANDERSON, H., et al. Exposición a largo plazo a la contaminación del aire exterior y la prevalencia del asma: meta-análisis de estudios de prevalencia multicomunitarios. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2013, vol. 6, no 1, p. 57-68.
18. NEWBY, David E., et al. Expert position paper on air pollution and cardiovascular disease. *European heart journal*, 2014, vol. 36, no 2, p. 83-93.
19. ROY, Ananya, et al. The cardiopulmonary effects of ambient air pollution and mechanistic pathways: a comparative hierarchical pathway analysis. *PLoS One*, 2014, vol. 9, no 12, p. e114913.
20. BRUNEKREEF, Bert, et al. Effects of long-term exposure to traffic-related air pollution on respiratory and cardiovascular mortality in the Netherlands: the NLCS-AIR study. Research report (Health Effects Institute), 2009, no 139, p. 5-71; discussion 73-89.
21. HAMRA, Ghassan B., et al. Outdoor particulate matter exposure and lung cancer: a systematic review and meta-analysis. *Environmental health perspectives*, 2014, vol 122, no 9, p. 906-911.
22. LI, Chengqian, et al. MECHANISMS IN ENDOCRINOLOGY: Main air pollutants and diabetes-associated mortality: a systematic review and meta-analysis. *European journal of endocrinology*, 2014, vol. 171, no 5, p. R183-R190.
23. EZE, Ikenna C., et al. Association between ambient air pollution and diabetes mellitus in Europe and North America: systematic review and meta-analysis. *Environmental health perspectives*, 2015, vol. 123, no 5, p. 381-389.
24. Mészáros, Erno. Libro *Fundamentals of Atmospheric Aerosol Chemistry*. Akadémiai Kiadó, 1999.
25. Agencias de Protección Ambiental, Estados Unidos. US, EPA. “Conceptos básicos sobre el material particulado”. (n.d). accedido 20 noviembre 2020. desde <https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles>
26. Giuliani, Daniela. 2020. Tesis Doctoral “Especiación de compuestos asociados a material particulado (MP₁₀ y MP_{2.5}) en La Plata y alrededores: metales, hidrocarburos policíclicos aromáticos, simples y derivados. Evaluación del riesgo asociado” <https://doi.org/10.35537/10915/110949>
27. US.EPA. (2009). Integrated Science Assessment for Particulate Matter. U.S. Environmental Protection Agency EPA/600/R-08/139F, (December 2009), 938. Retrieved from <https://cfpub.epa.gov/ncea/risk/recorderdisplay.cfm?deid=216546#Download>
28. Vallero, D. (2014). The Science of Air Pollution. *Fundamentals of Air Pollution*, 43–81. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-401733-7.00003-7>
29. WHO. (2005). Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. World Health Organization, WHO/SDE/PH(Global update 2005). Retrieved from https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69477/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf;jsessionid=D984E0D32F3FA3C11D9E13E9E8C69736?sequence=1

30. WHO. (2016). Calidad del aire ambiente (exterior) y salud. Nota Descriptiva, pp. 1–8. Retrieved from [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
31. Chen, J., Ying, Q., y Kleeman, M. (2009). Source apportionment of visual impairment during the California regional PM₁₀/PM_{2.5} air quality study. *Atmospheric Environment*, 43, 6136-6144.
32. Pope, C. A., Burnett, R. T., Thurston, G. D., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D., & Godleski, J. J. (2004). Cardiovascular Mortality and Long-Term Exposure to Particulate Air Pollution. *Circulation*, 109(1), 71–77. <https://doi.org/10.1161/01.cir.0000108927.80044.7f>
33. Gomes, E. C., & Florida-James, G. (2014). Lung Inflammation, Oxidative Stress and Air Pollution. In *Lung Inflammation*. <https://doi.org/10.5772/58252>
34. Nelin, T. D., Joseph, A. M., Gorr, M. W., & Wold, L. E. (2012). Direct and indirect effects of particulate matter on the cardiovascular system. *Toxicology Letters*, 208(3), 293–299. <https://doi.org/10.1016/J.TOXLET.2011.11.008>
35. Pope, C. A., Burnett, R. T., Turner, M. C., Cohen, A., Krewski, D., Jerrett, M., ... Thun, M. J. (2011). Lung cancer and cardiovascular disease mortality associated with ambient air pollution and cigarette smoke: Shape of the exposure-response relationships. *Environmental Health Perspectives*, 119(11), 1616–1621. <https://doi.org/10.1289/ehp.1103639>
36. Genc, S., Zadeoglulari, Z., Fuss, S. H., & Genc, K. (2012). The adverse effects of air pollution on the nervous system. *Journal of Toxicology*, Vol. 2012, pp. 1–23. <https://doi.org/10.1155/2012/782462>
37. Decreto 1074/18, PBA. Disponible en: <http://www.opds.gba.gov.ar/sites/default/files/Decreto%201074%2018.pdf>
38. INDEC. (2010). Web INDEC - Población / Censos / Censo 2010. en <https://www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel4-Tema-2-41-135>
39. Yanniello F. Conflictos Socioambientales en el Gran La Plata: una mirada comunicacional. Análisis crítico del discurso sobre la ampliación del Puerto La Plata y la contaminación del Polo Petroquímico en la prensa platense (2003-2015). Tesis doctoral. Facultad de Periodismo y Comunicación Social. UNLP. 2020.
40. Sistema Español de Inventario de Emisiones - Metodologías de estimación de emisiones. CENTRALES TERMOELÉCTRICAS DE SERVICIO PÚBLICO. s/f
41. Superintendencia del Medio Ambiente – Gobierno de Chile. “Guía de aspectos ambientales relevantes para centrales termoeléctricas”. 2014. 25 p.
42. "Sección de atmósfera - Inventario emisiones contaminantes atmosféricas en las Islas Baleares" en http://www.caib.es/sites/atmosfera/es/inventario_emisiones_contaminantes_atmosfericos_en_las_islas_baleares-10452/.
43. Pagina web "Energias de mi pais - Cenral Dique" en <http://energiasdemipais.educ.ar/marcador/central-dique/#:~:text=Lindante%20al%20Polo%20Industrial%20de,capacidad%20instalada%20de%2068%20MW.>
44. PROSPECTO YPF ENERGÍA ELÉCTRICA S.A. (constituida conforme a las leyes de la República Argentina)" 25 abr. 2019, <https://ypfsausyepro01.blob.core.windows.net/emisiones-locales/14/Attachments/25-04-2019%20Prospecto%20de%20Programa%20YPF%20EE.pdf>. Se consultó el 2 nov. 2020.
45. Pagina web “Pampa energia - Central Termica Ensenada Barragan («CTEB») en <https://ri.pampaenergia.com/nuestros-activos/electricidad/generacion/central-termica-ensenada-barragan-cteb/>

46. EPA (1999). United States. Environmental Protection Agency. Handbook for criteria pollutant inventory development: A beginner's guide for point and area sources. United States: Office of Air Quality Planning and Standards.
47. Guía para la elaboración de inventarios de emisiones atmosféricas [Recurso electrónico] / Gaitán Varón, Mauricio; Cárdenas Ruiz, Paula Andrea - Dirección de Asuntos Ambientales, Sectorial y Urbana. -- Bogotá, D.C.: Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017.
48. EEA (2016) Agencia Europea de Medio Ambiente. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016. Orientación técnica para preparar inventarios nacionales de emisiones. Luxemburgo. No. 12. ISBN 978-92-9213-806-6. ISSN: 1977-8449.
49. Guía metodológica para la estimación de emisiones de fuentes fijas, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, México, D.F., 2013.
50. Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, US EPA. "Centro de apoyo a la modelización atmosférica reglamentaria (SCRAM) - Modelos de calidad del aire". (n.d). accedido el 20 de noviembre de <https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling>
51. Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, US EPA . 2019. "Guía del usuario para el preprocesador meteorológico AERMOD (AERMET)" (nº EPA-454/B-19-028). Consultado el 20 de noviembre https://www.epa.gov/sites/production/files/2020-09/documents/aermet_userguide.pdf.
52. Cimorelli, A. J, et al. 2004. "AERMOD, description of model formulation. Staff Report", EPA-454/R03-004, Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, US EPA. Carolina del Norte, EE.UU. Consultado el 20 de noviembre. https://www3.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/aermod_mfd.pdf
53. "AERMOD View - Gaussian Plume Air Dispersion Model - Lakes Environmental." <https://www.weblakes.com/products/aermod/index.html>
54. Espinoza Cruz, C. J., 2018. "Determinación de la dispersión geográfica de los gases NO_x, CO, SO₂ y partículas (PM₁₀), emitidos por una central térmica aplicando el modelo AERMOD" . Título Profesional, Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur. Accessed November 20. <http://repositorio.untels.edu.pe/handle/UNTELS/272>
55. Porta, A.A. et al. 2018. Modelos de calidad de aire. En, Monitoreo y modelado de contaminantes atmosféricos. Efectos en la salud pública (pp. 182 - 224). Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP).
56. Liu, H., Xu, X., Rodgers, M. O., Xu, Y. "Ann" y Guensler, R. L. 2017. "MOVES-Matriz y computación distribuida para el análisis de dispersión de fuentes de línea a microescala". Journal of the Air & Waste Management Association, 67.7:763-775. <https://doi.org/10.1080/10962247.2017.1287788>
57. Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, US EPA. 2018. "Guía del usuario para el preprocesador de terreno AERMOD (AERMAP)". (Nº EPA-454/B-18-004). Consultado el 20 de noviembre https://www3.epa.gov/ttn/scram/models/aermod/aermap/aermap_userguide_v18081.pdf
58. Dirección General de Biodiversidad y Calidad Ambiental del Ministerio para la Transición Ecológica. (2019). "Análisis de herramientas de evaluación de la difusión y comportamiento de agentes químicos en el marco de la normativa de responsabilidad medioambiental". Gobierno de España. Accedido el 20 de noviembre <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/responsabilidad->

mediambiental/herramientasdeevaluaciondifusionycomportamientoagentesquimicos_251019_tcm30-177407.pdf.

59. Grisales Vargas, S.C., Cubaque López, H.A., Agudelo Cadavid, R.M., Cárdenas Monsalve, J.J., Ramírez Vélez, A.M., y Piñeros Jiménez J.G. 2016. "Anexo 5, Modelo AERMOD dispersión contaminantes en el Valle de Aburrá". Universidad de Antioquia. Accedido el 20 de noviembre http://www.udea.edu.co/wps/wcm/connect/udea/9375a71f-7fbc-41ce-9806-a27a60921ba6/Anexo+5+Modelo+AERMOD++dispersion++contaminantes+AMVA_compressed.pdf?MOD=AJPERES&CVID=n0baPr8.
60. Holmes, N. S., and Morawska, L. 2006. "Una revisión de la modelización de la dispersión y su aplicación a la dispersión de partículas: Una visión general de los diferentes modelos de dispersión disponibles". *Atmospheric Environment*, 40.30:5902-5928. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.06.003>
61. Michanowicz, A. R. 2015. "Hybrid Dispersion/ Land Use Regression Modeling for Improving Air Pollutant Concentration Estimates". Tesis doctoral, Universidad de Pittsburgh. Repositorio institucional de la Universidad de Pittsburgh. Consultado el 20 de noviembre <http://d-scholarship.pitt.edu/23582/>
62. Abril, G. A., Diez, S. C., Pignata, M. L., and Britch, J. 2016. "Concentraciones de partículas procedentes de fuentes industriales y urbanas: Validación de los resultados de la modelización de la dispersión atmosférica" *Atmospheric Pollution Research*, 7.1:180–189. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2015.08.009>
63. Gulia, S., Kumar, A., and Khare, M. 2015. "Evaluación del rendimiento de los modelos de dispersión CALPUFF y AERMOD para la evaluación de la calidad del aire de un complejo industrial." *Journal of Scientific & Industrial Research* 74: 302-307.
64. Mokhtar, M. M., Hassim, M. H., and Taib, R. M. 2014. "Evaluación del riesgo para la salud de las emisiones de una central eléctrica de carbón utilizando la modelización AERMOD". *Seguridad de los procesos y protección del medio ambiente*, 92.5:476–485. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2014.05.008>
65. Michanowicz, D. R., Shmool, J. L. C., Tunno, B. J., Tripathy, S., Gillooly, S., Kinnee, E., and Clougherty, J. E. 2016. "Un modelo híbrido de regresión del uso del suelo/AERMOD para predecir la variación intraurbana de PM_{2.5}". *Medio ambiente atmosférico*, 131:307–315. doi:10.1016/j.atmosenv.2016.01.045
66. Venkatram, A. (2008) "Introduction to aermod" *Modeling Dispersion*, 2008;1–24. <http://tools.envirolink.govt.nz/assets/Uploads/AERMOD-Introduction-AERMOD-2008.pdf>
67. Environmental M for the Atmospheric dispersion modelling [Internet]. Guía de buenas prácticas para la modelización de la dispersión atmosférica. 2017. Disponible en: <https://www.mfe.govt.nz/publications/air/good-practice-guide-atmospheric-dispersion-modelling>
68. Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, US EPA. "Air Quality Dispersion Modeling-Preferred and Recommended Models" (Modelización de la dispersión de la calidad del aire: modelos preferidos y recomendados). Consultado el 20 de noviembre <https://www.epa.gov/scram/airquality-dispersion-modeling-preferred-and-recommended-models>
69. Tartakovsky, D., Broday, D. M., and Stern, E. 2013. "Evaluación de AERMOD y CALPUFF para predecir las concentraciones ambientales de las emisiones de partículas suspendidas totales (TSP) de una cantera en un terreno complejo." *Contaminación Ambiental*, 179:138–145. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.04.023>

70. Seangkiatiyuth, K., Surapipith, V., Tantrakarnapa, K., and Lothongkum, A. W. 2011. “Aplicación del sistema de modelización AERMOD para la evaluación del impacto ambiental de las emisiones de NO₂ de un complejo cementero.” *Journal of Environmental Sciences*, 23.6:931–940. [https://doi:10.1016/s1001-0742\(10\)60499-8](https://doi:10.1016/s1001-0742(10)60499-8)
71. Caputo, M., Giménez, M., and Schlamp, M. 2003. “Intercomparación de modelos de dispersión atmosférica.” *Atmospheric Environment*, 37.18: 2435–2449. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(03\)00201-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(03)00201-2)
72. Vardoulakis, S., Fisher, B. E. A., Pericleous, K., and Gonzalez-Flesca, N. 2003. “Modelización de la calidad del aire en los cañones de las calles: una revisión” *Atmospheric Environment*, 37.2: 155–182. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00857-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00857-9)
73. Visscher A. Modelización de la dispersión del aire. Fundamentos y aplicaciones. Vol. 53, Revista de Información y Modelización Química. 2014. 662 p.
74. Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems. Volume II. Ambient Air Quality Monitoring Program. United States, Environmental Protection Agency, 2017. en <https://www3.epa.gov/ttnamti1/files/ambient/pm25/qa/Final%20Handbook%20Document%2017.pdf>
75. ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. Desarrollado por Grupo de Expertos WHO de: Desarrollo Sostenible y Ambiente Saludable (SDE), Departamento de Protección del Ambiente Humano (EHA), Programa de Medio Ambiente y Salud Ocupacional (PHE). “GUIA DE CALIDAD DEL AIRE”. Ginebra. 2000.
76. Martínez, A. P., & Romieu, I. *Introducción al Monitoreo Atmosférico*. México DF., 1997.
77. GUAYASAMÍN PILCO, L A. Trabajo final de grado de Ingeniería Ambiental “DISEÑO DE LA RED DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL CANTÓN MEJÍA”, 2018. en <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/15244/1/UPS%20-%20ST003451.pdf>
78. Toro, M., & Marín, A. (2005). Programa para el mejoramiento de la calidad del aire en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Contrato 158 de 2005. *Producción + Limpia*, 2(2), 7-22.o martin.
79. Mapa | Instituto Geográfico Nacional, MED 5m, 0008-2013-AMBA-Sector 1.1 3557-14-3-a <https://www.ign.gov.ar/NuestrasActividades/Geodesia/ModeloDigitalElevaciones/Mapa>. Consultado el 18 de Julio de 2020.
80. Puliafito, S. Enrique; Allende, David G., Castesana, Paula S., Ruggeri, María F.: High-resolution atmospheric emission inventory of the argentine energy sector. Comparison with Edgar global emission database. *Heliyon* 3 (2017) e00489. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2017.e00489> ISSN 2405-844.
81. Álvarez, V., Quiñones, E., Huertas, M., Arciniegas, C., Berdugo, J., & Ramírez, D. (2016). Metodología para la selección de sitios de monitoreo atmosférico en zonas urbanas afectadas por las emisiones de fuentes móviles. *Revista UIS Ingenierías*, Vol 15(2), 73-84.
82. Páez, C. (2008). *Gestión de la Calidad del Aire*. Quito.
83. Tesis doctoral, L. Massolo (2004) “Exposición a contaminantes atmosféricos y factores de riesgo asociados a la calidad de aire en La Plata y alrededores”.
84. Trabajo de maestría, Singh, Davinderjit, "Human Health Risk Characterization of Petroleum Coke Calcining Facility Emissions" (2016).
85. C. Ubilla and K. Yohannessen. “Contaminación atmosférica efectos en la salud respiratoria en el niño”. *Rev.Med.Clin.Condes.*, vol. 28, no. 1, pp. 111-118, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rmclc.2016.12.003>

86. A. Arrieta-Fuentes, “Dispersión de material particulado (PM10), con interrelación de factores meteorológicos y topográficos”. *Rev. Ing. Inv. Desarrollo.*, vol. 16, no. 2, pp. 43-54, 2016. <https://doi.org/10.19053/1900771X.v16.n2.2016.5445>
87. Vidal-Daza, O. A., & Pérez-Vidal, A. (2018). Estimación de la Dispersión de Contaminantes Atmosféricos Emitidos por una Industria Papelera Mediante el Modelo AERMOD. *Ingeniería*, 23(1), 31-47.