

# Tecnologías de medición de contaminantes aéreos

## Autor

Rafael Torres M  
Email: [rtorres@bcn.cl](mailto:rtorres@bcn.cl)  
Tel.: (56) 32 226 3912

Nº SUP: 132121

Documentos disponibles en:  
<https://atp.bcn.cl>

## Resumen

Nuestro país posee una red de medición de los índices Primarios de Calidad del Aire. La determinación de la concentración de Material Particulado (MP) es la más demandante porque requiere la separación de MP de componentes particulados dos tipos de material con diámetros aerodinámicos<sup>1</sup> menores que 10 micrones<sup>2</sup> (MP<sub>10</sub>) y con diámetros menores que 2,5 micrones (MP<sub>2,5</sub>).

En la actualidad se utilizan dos tecnologías, la llamada “atenuación beta” basada en la reducción de la radiación beta de un emisor calibrado al pasar a través de un filtro cubierto con MP<sub>10</sub> y el método de pipeta vibratoria (TEOM) que se basa en el cambio de la frecuencia con que vibra una pipeta sobre la cual se deposita MP<sub>2,5</sub>. Los registros obtenidos se promedian en distintos períodos de tiempo para determinar los Índices de Calidad del Aire.

Finalmente se ofrecen algunas reflexiones sobre la precisión del algoritmo de promedios para capturar episodios transientes que tienen el potencial de afectar el sistema broncopulmonar.

## Introducción

Este informe, elaborado en respuesta a una solicitud parlamentaria, es un análisis de los sistemas y tecnologías de medición para la determinación del Índice de Calidad Primaria del Aire en nuestro país. Enfocándose en las consecuencias que, de la legislación actual, se derivan en la resolución de conflictos con las localidades afectadas por episodios transitorios de afectación por masas de aire contaminado.

En su elaboración se consultó la legislación nacional y extranjera sobre la determinación de la calidad del aire, se entrevistaron ejecutivos de empresas proveedoras de sistemas de medición de material particulado en el aire<sup>3</sup> y al Gerente de Operaciones de Algoritmos y Mediciones<sup>4</sup> empresa encargada de operar los sistemas de medición de material particulado en el aire en nuestro país.

También se consultaron los manuales de operación de los sistemas de medición y se estudiaron los principios físicos y la tecnología electromecánica utilizada para su construcción y operación, así como

<sup>1</sup> El diámetro dinámico es aquella forma que ofrece al aire la misma resistencia que una esfera del diámetro de referencia.

<sup>2</sup> Un micrón ( $\mu\text{m}$ ) es una millonésima de metro (una milésima de milímetro)

<sup>3</sup> Carlos Saúl. Gerente General de Ambiente y Tecnología Ltda. Comunicación personal. En: <http://bcn.cl/2ta58>. Noviembre 2021.

<sup>4</sup> Miguel Carrasco, Gerente de Operaciones. Algoritmos y Mediciones Ambientales SpA. Comunicación personal. En: <http://bcn.cl/2ta5b>. Noviembre 2021.

las bases anatómicas y fisiológicas involucradas en la respuesta fisiológica del organismo humano a la exposición a aire contaminado con polvo, gases y aerosoles contaminantes.

Las traducciones inglés-español son del autor.

## I. Contexto general

---

La Provincia de Huasco (Región de Atacama), como otras de las regiones del norte de nuestro país, es asiento de una vigorosa actividad minera, que -por supuesto- requiere grandes cantidades de energía eléctrica, provista -principalmente- por centrales térmicas energizadas por combustibles fósiles. Además requiere puertos y caminos para la exportación y transporte de sus productos, y para la importación y transporte de sus insumos. También es intensiva en mano de obra y cercanas a las faenas mineras hay poblados. La actividad minera produce una gran cantidad de residuos que contaminan el aire, el agua y la tierra, y con ello afectan la salud de las personas. Para salvaguardar la salud de la población, se han establecido protocolos para determinar la calidad del entorno humano. En este informe se abordan aquellos correspondientes a la calidad del aire.

## II. Índices de calidad del aire, métricas y tecnologías de medición en Chile

---

Según el Ministerio del Medio Ambiente (MMA), la “*Norma Primaria de Calidad Ambiental es aquella que establece los valores de las concentraciones y períodos, máximos o mínimos permisibles de elementos, compuestos, sustancias, derivados químicos o biológicos, energías, radiaciones, vibraciones, ruidos o combinación de ellos, cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la vida o la salud de la población*”<sup>5</sup>. Las tecnologías autorizadas por el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) para medir la cantidad de material particulado (MP) en el aire, se basan en la recolección de éste desde el medio ambiente, por un período determinado en un sustrato de microfibra de cuarzo (filtro). Luego de la medición la concentración de material particulado, es expresada en  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ . Los cálculos se basan en la cantidad de MP presente en el filtro y el volumen total de aire que ha pasado a través de aquél, es decir es el promedio de MP acumulado en el filtro durante el período de recolección. Los filtros son debidamente almacenados de acuerdo con su posterior uso.

Las tecnologías utilizadas en Chile son:

### 1. Absorción de Radiación Beta<sup>6</sup>:

El medidor beta funciona midiendo la radiación beta antes y después de recolectar MP's en un medio filtrante. El instrumento mide a través de un área limpia del medio filtrante durante un período fijo para determinar la línea de base (por ejemplo, 2 minutos), luego avanza esa área del filtro a un aparato de muestreo durante otro período de tiempo determinado (por ejemplo, de 8 a 9 minutos) y finalmente regresará al detector para una lectura final. La diferencia en el recuento beta se puede correlacionar directamente con la masa de partículas a través de la calibración del instrumento, utilizando un medio filtrante que contiene una masa conocida de un material similar a las partículas. Este protocolo de

<sup>5</sup> Ministerio del Medio Ambiente (MMA). Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA). En: <https://sinca.mma.gob.cl/index.php/pagina/index/id/norma>. Noviembre 2021.

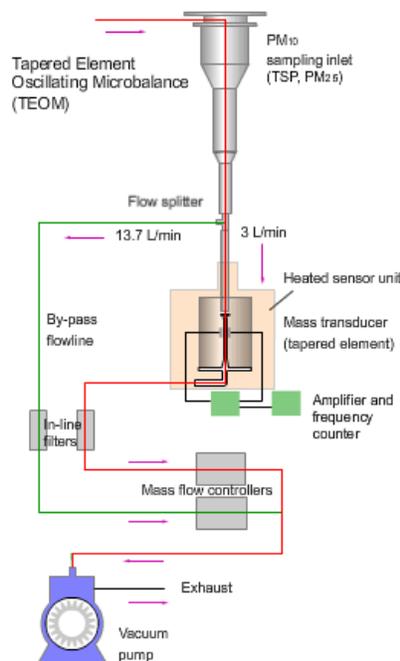
<sup>6</sup> La radiación beta es la emisión de electrones ( $\text{b}^-$ ) o positrones ( $\text{b}^+$ ) de alta energía que son emitidos desde el núcleo de algunos radionucleótidos, una forma de emisión radiactiva llamada decaimiento beta, que normalmente ocurre en núcleos atómicos que poseen demasiados neutrones, lo que afecta su estabilidad.

medición paso a paso debe realizarse cada 15 minutos para cumplir con los requisitos de informes de datos<sup>7</sup>.

## 2. Variación de Frecuencia de Oscilación con la Masa:

La frecuencia de resonancia (frecuencia natural de oscilación) de una barra es función de su masa<sup>8</sup>. La tecnología conocida como Microbalanza de Pipeta Cónica Oscilante (Tapered Element Oscillating Microbalance – TEOM)<sup>9</sup>, aprovecha esta propiedad para determinar la cantidad de MP depositado sobre un filtro del calibre indicado, según el diámetro aerodinámico de las partícula que se desea medir (MP<sub>10</sub> o MP<sub>2,5</sub>), que se posiciona en la parte superior de la pipeta (ver Fig. 1).

Figura 1. Microbalanza oscilatoria con pipeta cónica (TEOM)



Fuente: “Tapered element oscillating microbalance”

Así, en la medida que se deposita MP sobre el filtro, cambia la masa del sistema y -por tanto- cambia su frecuencia de resonancia. Un sistema piezoeléctrico -electrónicamente controlado- de alta sensibilidad hace un seguimiento modificando los parámetros eléctricos que mantienen al sistema en condición de resonancia. La cantidad de masa depositada se determina utilizando funciones conocidas que relacionan la variación de la masa con la variación de frecuencia y ésta con los parámetros eléctricos que mantienen el sistema en condición resonante, logrando así un seguimiento continuo de la cantidad de masa que se deposita sobre el filtro. Finalmente, como se conoce el volumen de aire que ha circulado por el sistema, es posible determinar la concentración de MP por metro cúbico de aire<sup>10</sup>.

<sup>7</sup> “Beta Attenuation Technology for Particulate Matter Measurement”. Disponible en: <http://bcn.cl/2t50j>. Noviembre 2021

<sup>8</sup> “Quartz Crystal Oscillator”. Disponible en: <https://www.electronics-tutorials.ws/oscillator/crystal.html>. Noviembre 2021.

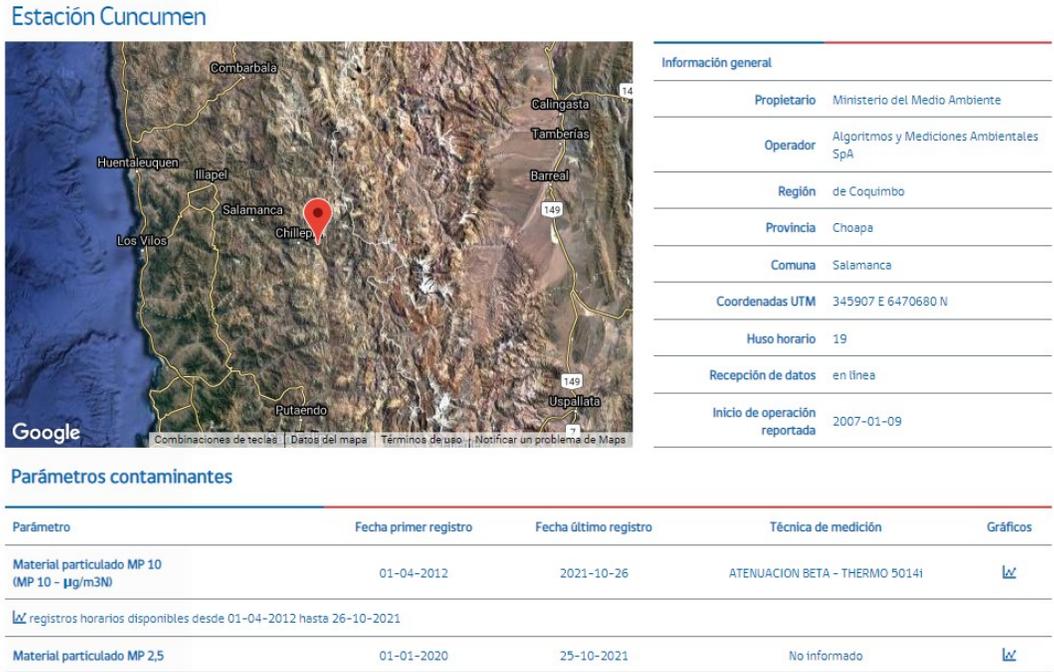
<sup>9</sup> Queensland Government. “Tapered element oscillating microbalance”. <https://www.qld.gov.au/environment/pollution/monitoring/air/air-monitoring/measuring/oscillating-microbalance>. Noviembre 2021.

<sup>10</sup> “Airborne particles. Continuo us monitoring”. Disponible en: <http://bcn.cl/2ta5m>. Noviembre 2021.

Aunque este sistema es capaz de realizar mediciones continuas, necesariamente debe sufrir interrupciones para las operaciones de reemplazo del filtro en la pipeta cónica una vez que el material acumulado en el filtro reduce la sensibilidad del sistema y hace necesario reemplazarlo.

A modo de ejemplo, en las figuras 2A, 2B y 2C se presentan registro mensuales de MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub> respectivamente en la Estación Cuncumén (registro típico representativo) según datos obtenidos con las tecnologías arriba descritas.

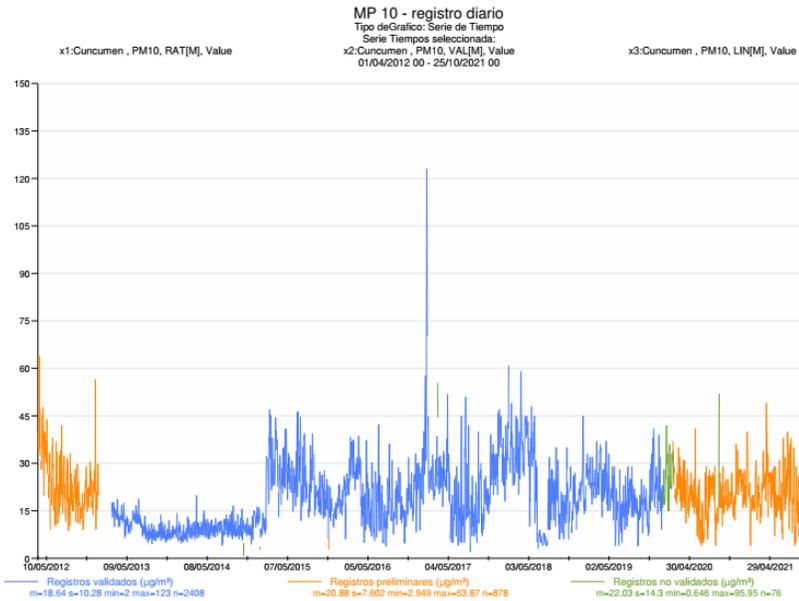
Figura 2A. Registro de Material Particulado en Estación Cuncumén<sup>11</sup>



Fuente: Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire, SINCA

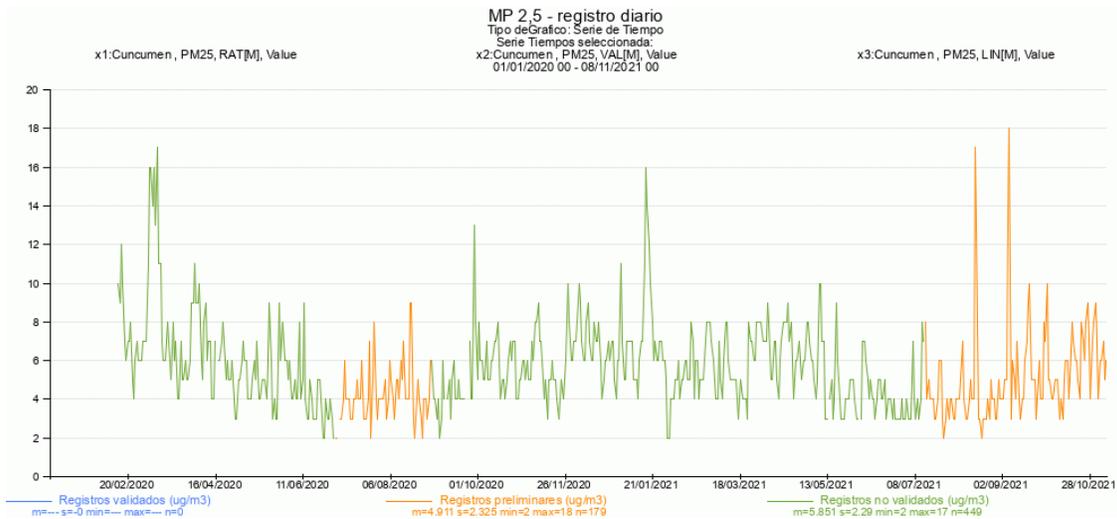
Figura 2B. Registro de Material Particulado MP<sub>10</sub> en Estación Cuncumén

<sup>11</sup> Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire, SINCA. Estación Cuncumén. Disponible en: <http://bcn.cl/2ta5u>. Noviembre 2021.



Fuente: Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire, SINCA

Figura 2C. Registro de Material Particulado MP<sub>2,5</sub> en Estación Cuncumén



Fuente: Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire, SINCA

En la figura 2B para MP<sub>10</sub>, **cada par (X,Y)** - es decir cada par (**fecha, concentración**)- corresponde al promedio mensual de las concentraciones MP<sub>10</sub> en los años muestreados. Así, se observan en las gráficas, significativas variaciones en los valores medidos de un muestreo a otro.

Según la información entregada en las figuras y 2B y 2C, los registros graficados corresponden a los promedios de las lecturas diarias. Por otra parte, los parámetros para determinar la calidad del aire son -como se observa en la Tabla 1 para MP<sub>2,5</sub>- calculados **según promedios** de diferentes periodos de tiempo. Los criterios de emergencia, por ejemplo, son determinados en función de **“la concentración de 24 horas”**, es decir el promedio de 24 horas.

**Tabla 1.** Norma Primaria de Calidad del Aire

Contaminante	Período	Valor ( $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )	Criterio de Excedencia	Criterios de Emergencia
MP <sub>2,5</sub> <sup>12</sup>	Concentración de 24 horas	20	Se considerará sobrepasada la norma primaria de calidad del aire para material particulado fino respirable MP <sub>2,5</sub> , en el siguiente caso:  Cuando el promedio tri-anual de las concentraciones anuales sea mayor a 20 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ), en cualquier estación monitorea calificada como EMRP. Si el período de medición en una estación monitorea no comenzare el 1º de Enero, se considerarán los tres primeros periodos de 12 meses a partir del mes de inicio de las mediciones, hasta disponer de tres años calendario sucesivos de mediciones.	Son aquellos en que la <b>concentración de 24 horas</b> se encuentre dentro de los siguientes rangos ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) a. Alerta .....80 - 109 b. Pre-emergencia.....110 - 169 c. Emergencia.....170 o superior  Las concentraciones serán obtenidas a partir de un pronóstico de calidad del aire, o bien, en el caso que no se cuente con este pronóstico, de la constatación de las concentraciones de Material Particulado Respirable MP <sub>2,5</sub> a partir de las mediciones provenientes de alguna de las estaciones de monitoreo de calidad del aire calificadas como EMRP
	Concentración anual	50	Cuando el percentil 98 de los promedios diarios registrados durante un año, sea mayor a 50 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), en cualquier estación monitorea calificada como EMRP <sup>13</sup>	N/A
MP <sub>10</sub> <sup>14</sup>	Concentración de 24 horas	150	Se considerará sobrepasada la norma primaria anual de calidad del aire para material particulado respirable MP <sub>10</sub> , cuando la concentración anual calculada como promedio aritmético de tres años calendario consecutivos en cualquier estación monitorea clasificada como EMRP, sea mayor o igual que 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .	N/A

Fuente: Normativas oficiales indicadas a pie de página. Elaboración propia.

Por otra parte, la Tabla 2 muestra algunas características de los sistemas de medición de material particulado utilizados en nuestro país.

Tabla 2.- Sistemas de muestreo del aire

Sistema de lectura	Tiempo de respuesta	Organización de datos	Frecuencia de muestreo
1) Atenuación de radiación Beta	Minutos	Promedios horarios, diarios, mensuales, anuales.	Según programación

<sup>12</sup> DS N° 12/2010 del Ministerio del Medio Ambiente. Disponible en: <http://bcn.cl/2av6y>. Noviembre 2018.

<sup>13</sup> EMRP: Estación de monitoreo de material particulado respirable MP<sub>2,5</sub> (o MP<sub>10</sub>) con representatividad poblacional.

<sup>14</sup> Decreto 59 establece norma de calidad primaria para material particulado respirable mp<sub>10</sub>, en especial de los valores que definen situaciones de emergencia. Disponible en: <http://bcn.cl/2av6z>. Noviembre 2018

Sistema de lectura	Tiempo de respuesta	Organización de datos	Frecuencia de muestreo
2) Microbalanza oscilatoria con pipeta cónica (TEOM)	Minutos	Promedios horarios, diarios, mensuales, anuales.	Según programación

Fuente: Elaboración propia

### III. Reflexiones

La legislación relativa a los índices primarios de calidad del aire tiene como principal objetivo “...los valores de las concentraciones y períodos, máximos o mínimos permisibles de elementos, compuestos, sustancias, derivados químicos o biológicos, energías, radiaciones, vibraciones, ruidos o combinación de ellos, cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la vida o la salud de la población” y dichos valores se obtienen según un protocolo que considera promedios de valores medidos en períodos predeterminados de tiempo, siendo los promedios horarios aquellos con mayor resolución temporal.

Una consecuencia lógica de dicho protocolo, es que se podría dar el caso de un evento que arrojará cero contaminación durante media hora y otra media hora durante la cual la contaminación fuese el doble de la máxima permitida, y el promedio no superaría el máximo permitido. Lo mismo ocurriría para aquellos índices que consideran días, meses y años; situaciones que no se esperan en condiciones con condiciones relativamente estables.

Por otra parte, en situaciones inestables -con episodios extremos de contaminación de corta duración y otros de baja contaminación- muchos promedios arrojarían valores dentro de los límites aceptables, a pesar de ocurrencias críticas. Por otra parte, masas de aire, del tamaño unas pocas cuadradas, que arrastran polvo, aerosoles y gases dañinos para la salud son fenómenos transientes, que -en el peor de los casos- no son registrados si no pasan por donde hay sensores. Una situación más compleja aún puede darse si dichas masas de aire contaminado son liberadas periódicamente por alguna industria y arrastradas hacia áreas pobladas cuando la dirección del viento así lo determina. Al cabo del respectivo período de medición, el valor promedio puede enmascarar la ocurrencia de episodios críticos.

Un procedimiento que podría aportar información sobre episodios transientes que escapan a los promedios, podría ser incorporar a los antecedentes considerados para determinar el índice de calidad del aire, a los registros médicos correspondientes a las afecciones broncopulmonares, que obran en las estadísticas de los servicios de salud de aquellas comunidades que denuncian episodios críticos que afectan su salud, no capturados por los algoritmos de promediación en uso.



Creative Commons Atribución 3.0  
(CC BY 3.0 CL)