



RESUMEN EJECUTIVO “ESTUDIO DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA PRESENTE EN EL ESTABLECIMIENTO EDUCATIVO CEIA”

LÍNEA MEDIO AMBIENTE

SEPTIEMBRE 2024



INTEGRANTES DEL PROYECTO

Dra. Lorena Escudero	Directora de Proyecto
Mgs. Elsa Flores	Jefa de Laboratorio
Hernán Veliz	Profesional Informático
Adriana Jiménez	Analista Químico
Ivvette González	Técnico Ambiental
Claudia Tabilo	Administrativa Financiera

Revisado por:

Dr. Pedro Galleguillos	Director Científico CICITEM
------------------------	-----------------------------

Validado por:

Rubén Rojo	Director-Gerente CICITEM
------------	--------------------------

SEPTIEMBRE DE 2024



INDICE

I.	Glosario	3
II.	Antecedentes generales del Proyecto.	4
III.	Resumen	5
IV.	Objetivos	7
IV.1.	Objetivo general	7
IV.2.	Objetivos específicos	7
V.	HITO 1: CENTRO EDUCATIVO ASPIRADO Y LIMPIO PARA COMENZAR EL PROCESO DE MONITOREO.	8
V.1.	Aspiración del polvo, utilizando aspiradores con filtro HEPA certificados.	8
V.2.	Lavado y limpieza de murallas, ventanas y otros	9
V.3.	Instalación de purificadores de aire en salas y salones del CEIA.	11
VI.	HITO 2: IDENTIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS CONTAMINANTES Y TÓXICOS PRESENTES EN EL POLVO NEGRO.	12
VI.1.	Análisis químico	14
VI.2.	Análisis Granulométrico	16
VII.	HITO 3: INSTALACIÓN DE LAS ESTACIONES DE MONITOREO DENTRO Y FUERA DEL CEIA E IMPLEMENTACIÓN DE LA PLATAFORMA EN TIEMPO REAL.	18
VII.1.	Criterios para la instalación de la estación de monitoreo	18
VII.2.	Instalación de estaciones de monitoreo meteorológico y calidad de aire.	20
VII.3.	Instalación de recolectores o muestreadores de material particulado depositado.	21
VII.4.	Capacitación de uso de tecnología y plataforma en tiempo real a la comunidad educativa.	23
VII.5.	Puesta en marcha de las estaciones y muestreadores para detectar problemas.	24
VIII.	HITO 4: DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE AIRE EN EL CEIA.	25
VIII.1.	Monitoreo meteorológico y de calidad de aire.	25
VIII.2.	Análisis in situ de muestras sólidas por espectroscopía de fluorescencia por rayos X (XRF)	26
VIII.3.	Análisis por Difracción de Rayos X (DRX)	29
VIII.4.	Análisis químicos en el laboratorio mediante absorción atómica e ICP de las muestras recolectadas de MP.	35
VIII.5.	Registro de los parámetros meteorológicos y analizar los niveles de deposición de material particulado (MP2,5, MP10 y MPS).	41
VIII.6.	Series de tiempo de Material particulado (Gravimetría).	43
VIII.7.	Material Particulado Sedimentado (MPS).	45
VIII.8.	Análisis mensual del periodo 2023 - 2024 del Monitoreo de Material Particulado.	46
VIII.9.	Análisis comparativo de lo monitoreado en la Estación fija y la Estación móvil.	48
VIII.10.	Análisis anual del periodo monitoreado de material particulado y gases.	51
VIII.11.	Diagnóstico e identificación de las posibles fuentes de contaminación.	54
IX.	HITO 5: DISEÑO DEL PROGRAMA DE MONITOREO DE CALIDAD DE AIRE.	55
IX.1.	Planificación de las futuras medidas medioambientales de calidad de aire y Desarrollo de un plan de gestión de monitoreo.	55
IX.1.1.	Ampliación de la red de vigilancia de calidad de aire en Antofagasta.	55
IX.1.2.	Propuesta de instalación de los equipos de monitoreo	57
IX.2.	Implementación de medidas de mitigación	60
IX.3.	Estudios sobre el efecto en la salud de los elementos contaminantes	65
	Evaluación de bioindicadores	65
X.	Conclusiones	67
XI.	Consideraciones importantes	69

I. GLOSARIO

Contaminante: Todo elemento, compuesto, sustancia, derivado químico o biológico, energía, radiación, vibración, ruido, o una combinación de ellos, cuya presencia en el ambiente, en ciertos niveles, concentraciones o períodos de tiempo, pueda constituir un riesgo a la salud de las personas, a la calidad de vida de la población, a la preservación de la naturaleza o a la conservación del patrimonio ambiental.

Estación de monitoreo de calidad de aire: Corresponde a una caseta que contiene diversos equipos destinados a medir las concentraciones de uno o más contaminantes en el aire y ciertos parámetros meteorológicos. Pueden clasificarse de acuerdo a su operatividad y movilidad en estaciones automáticas, manuales, mixtas y móviles.

Monitorear: Seguir periódicamente, con mediciones, la presencia de algunos componentes; en este caso, de un contaminante.

Atmósfera: Capa gaseosa que rodea la tierra. Contaminación Atmosférica: la presencia en la atmósfera de uno o más contaminantes del aire.

Material Particulado 10 y 2.5 (MP₁₀ y MP_{2,5}): Material cuyo diámetro aerodinámico es igual o menor que 10 micrones y 2,5 micrones, respectivamente. Por su pequeño tamaño son las fracciones de partículas suspendidas de mayor importancia para la protección de la salud.

Monóxido de Carbono: Gas producido por la combustión incompleta del carbón o de sustancias orgánicas. Es un contaminante de las ciudades, producido, especialmente, por los automóviles. También es el resultado de incendios forestales.

Dióxido de carbono: Gas más pesado que el aire, formado por la combinación de un átomo de carbono y dos de oxígeno, que se produce en las combustiones y que es uno de los principales causantes del efecto invernadero.

Óxido de Nitrógeno: Gases producidos por oxidación a altas temperaturas del nitrógeno del aire. Fórmula NO_x.

Dióxido de nitrógeno: El dióxido de nitrógeno es de color marrón- amarillento. Se forma como subproducto en los procesos de combustión a altas temperaturas, como en los vehículos motorizados y las plantas eléctricas. Por ello es un contaminante frecuente en zonas urbanas.

Ozono: Molécula formada por tres átomos de oxígeno. Fórmula O₃.

II. ANTECEDENTES GENERALES DEL PROYECTO

El proyecto "Estudio de la Contaminación Atmosférica Presente en el Establecimiento Educativo", es una iniciativa que presentó el Centro de Investigación Científico y Tecnológico, CICITEM, al Fondo de Innovación para la Competitividad FIC y manifestada en resolución N°105 de fecha 17 de octubre 2022. La iniciativa se enmarca en las Líneas priorizadas por la región de Antofagasta, Protección y sostenibilidad ambiental e Innovación Social. El proyecto se adjudicó por un monto de transferencia de \$271.135.000, para la iniciativa Cód. BIP 40046174-0.

El presente proyecto se desarrolla en el Centro Educativo Integral de Adultos y Jóvenes CEIA B-32, establecimiento ubicado frente al puerto de Antofagasta. Esta iniciativa implementó un plan de vigilancia atmosférica con el fin de diagnosticar y monitorear en tiempo real la calidad del aire e identificar elementos contaminantes que contenga este material particulado (MP).



III. RESUMEN



Históricamente, Antofagasta ha sido la principal región en que se ha desarrollado una gran actividad de explotación de recursos mineros de cobre y la exportación de estos por vía portuaria. La Minería, como actividad económica se ubica entre los procesos productivos con mayor generación de contaminación ambiental, con gran potencial de producir efectos nocivos a la salud de las personas y el ecosistema.

Un caso emblemático, lo constituyen las denuncias de vecinos del sector del puerto de Antofagasta que indican la presencia de un polvo negro fino, de origen y composición desconocida que se deposita en sus techos, ventanas y general en las superficies del sector. Esto fue respaldado por un estudio del Instituto de Salud Pública (ISP)-2014, el cual confirmó la presencia de metales pesados en el polvo, siendo los elementos más relevantes el cobre, zinc, cadmio, arsénico y plomo.

El presente proyecto fue desarrollado en el Centro Educativo Integral de Adultos y Jóvenes CEIA B-32, establecimiento ubicado frente al puerto de Antofagasta y el cual no fue considerado en la limpieza y estudio realizado entre los años 2014 - 2017, por ser un colegio donde asisten jóvenes y adultos.

Este proyecto implementó un plan de vigilancia atmosférica que tuvo como objetivo

diagnosticar y monitorear en tiempo real la calidad del aire e identificar elementos contaminantes que contenga este material particulado (MP). Se instalaron muestreadores de MP y dos estaciones meteorológicas y de calidad de aire, siendo una de ellas móvil, con sensores robustos de alta tecnología que permitieron determinar la concentración de gases y el MP de 10 y 2,5 micrones, en zonas específicas del CEIA y sus alrededores. Por otro lado, el MP recolectado se sometió a análisis químico para determinar la presencia de metales pesados e hidrocarburos en el aire.

Como medida inicial para el estudio y la aplicación del plan de vigilancia atmosférico, la fachada, espacios internos y externos del CEIA se limpiaron y se removió el material particulado adherido, reduciendo el riesgo para las personas que realizan actividades en su interior, y se instalaron purificadores en todas las salas y salones del establecimiento.

Durante la ejecución del proyecto, se implementó una plataforma informática que permitió manejar los datos eficazmente para gestionar de forma adecuada cualquier evento de contaminación. Esta plataforma fue utilizada por la comunidad del colegio quienes participaron activamente en el proyecto, capacitándoles sobre su uso y resultados. Esta es la primera vez que se implementa este tipo de instancia en la región, resultando en una innovación social, basada en tecnología de vanguardia para el cuidado de la comunidad educativa.

Considerando que la contaminación atmosférica ha generado afectaciones en la salud y el medio ambiente en centros urbanos a nivel mundial, principalmente debido a la dispersión de contaminantes procedentes de fuentes fijas y móviles, resulta primordial

realizar un monitoreo constante de la contaminación atmosférica en Antofagasta, la que es afectada por diferentes factores tales como, rápido crecimiento, actividad minera (transporte de mineral) y alto tráfico vehicular que se ha generado en estos últimos años.

La ejecución de este proyecto, permitió realizar el monitoreo de manera continua y discreta de gases, material particulado de $MP_{2,5}$, MP_{10} , partículas totales en suspensión (PTS) y material particulado sedimentable (MPS) durante un año. Además, se cuantificó y caracterizó el contenido del material particulado mediante análisis químico por Espectrometría de Masa de Plasma (ICP-MS) y mineralógico por Difracción de rayos X (XRD).

Durante todo el periodo de monitoreo, se realizó un

análisis comparativo con las normativas primarias de calidad de aire nacionales e internacionales, con el fin de obtener información cuantitativa y realizar el análisis correspondiente respecto de límites máximos permitidos.

Con esta información se determinó la dinámica espacial y temporal de los contaminantes presentes en el aire, asociándolo con las variables meteorológicas que imperan en el área, y se propuso un plan de monitoreo y gestión de la contaminación atmosférica a largo plazo.

El monitoreo de calidad del aire tiene como objetivo generar información principalmente para evaluar el cumplimiento de las Normas de Calidad de Aire en una zona de interés, cuantificar los niveles de exposición de la población y recursos naturales a la contaminación del aire, informar y prevenir a la población sobre los niveles de contaminación y sus posibles riesgos y entregar información inmediata para la activación o desactivación de alertas o procedimientos de emergencia, derivados de una concentración de contaminantes asociada a actividades humanas y/o a fuentes naturales, que pueda representar un riesgo para la salud o el medio ambiente.

A continuación, se presentan todas las actividades realizadas durante el proyecto de monitoreo de calidad la del aire en el establecimiento CEIA.



IV. OBJETIVOS

IV.1 Objetivo general

Implementar un plan de vigilancia atmosférico mediante un sistema de monitoreo meteorológico y de calidad de aire, e identificación de elementos contaminantes mediante el análisis químico del MP10, 2,5 y de gases, que permitan evaluar la contaminación presente en el CEIA.

IV.2. Objetivos específicos

Objetivo Específico 1. Remover el material particulado depositado en los distintos espacios y fachadas del CEIA a través de aspiración de polvo y luego realizar el lavado de murallas, ventanas y pasillos.

Objetivo Específico 2. Caracterizar por medio de análisis físico-químicos en los laboratorios de CICITEM el polvo aspirado durante la limpieza de CEIA, para detectar y cuantificar elementos contaminantes.

Objetivo Específico 3. Evaluar la calidad del aire por medio de la Implementación un sistema de monitoreo de calidad de aire (gases y MP) y meteorológico, con tecnología de punta y en tiempo real en el CEIA, incluyendo capacitaciones a la comunidad educativa.

Objetivo Específico 4. Monitorear los parámetros medidos por las estaciones instaladas para evidenciar la superación de los niveles de calidad ambiental y prevenir a la comunidad del Centro.

Objetivo Específico 5. Comparar los registros mensual y anual de los contaminantes y de las variables monitoreadas con las normativas de referencia.

Objetivo Específico 6. Diseñar un programa de gestión de monitoreo de calidad de aire en la zona del CEIA.



V. HITO 1: CENTRO EDUCATIVO ASPIRADO Y LIMPIO PARA COMENZAR EL PROCESO DE MONITOREO.

V.1. Aspiración del polvo, utilizando aspiradores con filtro HEPA certificados.

Durante los meses de febrero y marzo de 2023, se realizó el muestreo y recolección de polvo del establecimiento. Las muestras de polvo recolectadas fueron clasificadas y derivadas a los distintos laboratorios para sus respectivos análisis. Algunas de las muestras fueron enviadas al laboratorio certificado ALS para realizar un análisis químico completo mediante Espectrometría de Plasma Inducido (ICP) el cual permite la identificación y detección de trazas de metales y elementos contaminantes. Otro set de muestras fue enviada al laboratorio de MAINI de la Universidad Católica del Norte para el análisis de difracción de rayos X (DRX), para determinar su composición mineralógica. Por otra parte, en las dependencias de CICITEM se analizaron muestras por Espectrofotometría de Absorción Atómica y determinó la distribución del tamaño de partícula, utilizando el equipo Microtrac.



Figura 1. Polvos recolectados en el CEIA.

V.2. Lavado y limpieza de murallas, ventanas y otros

Se realizó el proceso de limpieza del colegio. La empresa seleccionada se encargó de realizar el lavado de murallas, ventanas, techos y sectores varios del establecimiento, además de eliminar los desechos que tenían en exceso en el colegio.



Figura 2. Proceso de limpieza en el establecimiento del CEIA.



Figura 3. Progreso del proceso de limpieza del establecimiento.

V.3. Instalación de purificadores de aire en salas y salones del CEIA.

Durante el mes de abril, se preparó el contrato de comodato, para la entrega de los purificadores de aire instalados en el CEIA. El trámite fue gestionado en la CMDS y está registrado en el sistema de hoja de ruta de la municipalidad.

La entrega se formalizó por medio de un acta que fue firmada por la directora del establecimiento Mercedes Orellana y la directora del proyecto Lorena Escudero.



Figura 4. Entrega inicial de los purificadores de aire establecimiento.

VI. HITO 2: IDENTIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS CONTAMINANTES Y TÓXICOS PRESENTES EN EL POLVO NEGRO.

Las muestras de polvo fueron recolectadas mediante aspiración utilizando equipos adquiridos para este proyecto. Se emplearon aspiradoras portátiles marca Makita, modelo DVC660ZX3 equipadas con filtros "de alta eficiencia en la captura de partículas" (HEPA por sus siglas en inglés "High Efficiency Particle Arresting") (Figura 5). Estos filtros están diseñados para capturar esporas de moho, polvo, ácaros del polvo, la caspa de mascotas y otros alérgenos (A.D.A.M., 2023).



Figura 5. Aspiradora (a la izquierda) y filtro HEPA (a la derecha) utilizados para la recolección de polvo en el establecimiento educacional.

El plan de muestreo contempló la toma de 16 muestras de polvo distribuidas en las zonas 1, 2, 3, 4 y 5 del establecimiento, las que se pueden observar en la Figura 6.

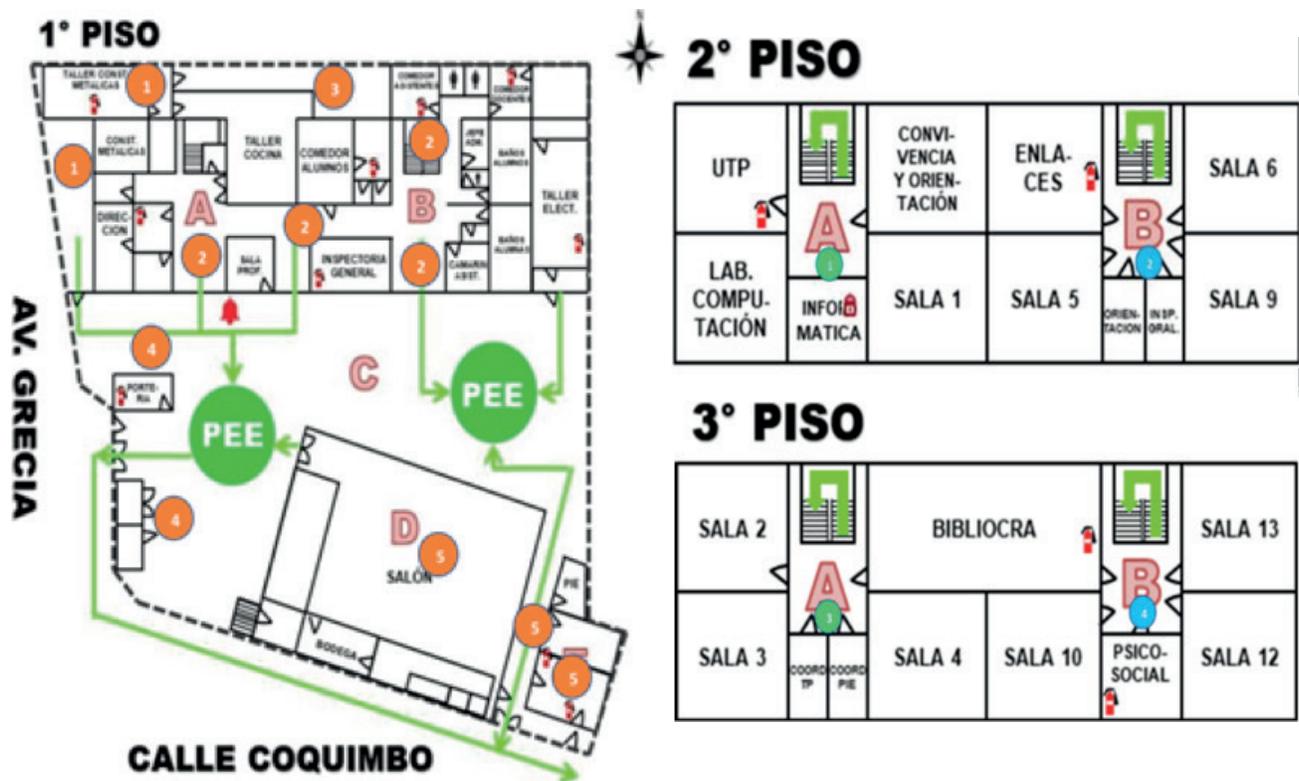


Figura 6. Plano del establecimiento educacional y zonas de muestreo (1, 2, 3, 4 y 5) en 3 plantas.

VI.1. Análisis químico

A continuación, se presenta un resumen con los resultados de análisis de algunos elementos químicos presentes en polvos recolectados al interior del CEIA, obtenidos en el presente estudio.

Tabla V.1. Resumen estadístico de los resultados químicos de elementos de interés en el polvo recolectado en el establecimiento CEIA.

Elemento	Promedio (mg/kg)	Máximo (mg/kg)	Mínimo (mg/kg)	Mediana (mg/kg)	Desviación media absoluta (DMA) (mg/kg)
Aluminio (Al)	11.281	19.829	8.058	10.469	1.890
Antimonio (Sb)	23	71	11	16	12
Arsénico (As)	138	316	73	126	49
Bario (Ba)	446	630	244	463	95
Berilio (Be)	3	3	2	3	1
Bismuto (Bi)	13	39	5	8	8
Boro (B)	144	242	81	139	39
Cadmio (Cd)	26	83	13	19	14
Calcio (Ca)	68.006	106.584	45.708	62.958	14.667
Cromo (Cr)	89	131	65	86	17
Cobalto (Co)	22	29	15	22	3
Cobre (Cu)	11.141	27.653	5.606	9.326	4.592
Hierro (Fe)	60.663	85.492	41.095	54.584	12.940
Plomo (Pb)	941	3.697	265	593	638
Litio (Li)	195	254	121	198	36
Magnesio (Mg)	9.771	11.514	7.134	9.894	1.042
Manganeso (Mn)	680	939	488	634	121
Mercurio (Hg)	0	0	0	0	0
Molibdeno (Mo)	113	226	54	88	45
Níquel (Ni)	44	60	25	46	8
Fósforo (P)	2.675	7.959	1.729	2.157	994
Potasio (K)	2.780	3.703	1.906	2.788	317
Selenio (Se)	3	7	2	2	1
Plata (Ag)	17	57	7	11	10
Sodio (Na)	16.429	24.542	4.478	17.573	5.762
Estroncio (Sr)	260	479	169	229	71
Telurio (Te)	0	0	0	0	0
Talio (Tl)	0	0	0	0	0
Estaño (Sn)	76	436	25	43	20
Titanio (Ti)	956	1.375	547	946	179
Uranio (U)	2	2	2	2	0
Vanadio (V)	72	95	50	73	11
Zinc (Zn)	10.869	31.670	4.581	8.810	4.941

La actividad industrial y minera libera al ambiente metales tóxicos como Plomo (Pb), Mercurio (Hg), Cadmio (Cd), Arsénico (As) y Cromo (Cr), que dependiendo de su biodisponibilidad pueden resultar muy dañinos para la salud humana y para la mayoría de las formas de vida. De acuerdo con el promedio de los resultados químicos obtenidos del polvo acumulado por un largo periodo en el establecimiento CEIA (Tabla V.1), los porcentajes de los elementos peligrosos de interés que se encontraron en este polvo, como Cobre (Cu), Hierro (Fe) y Zinc (Zn) se muestran en Figura 7. Además, el 2% del polvo contiene otros elementos de interés en menor porcentaje (Figura 8), los cuales, aunque están presentes en menor cantidad, también pueden causar un daño grave a la salud y al medioambiente.

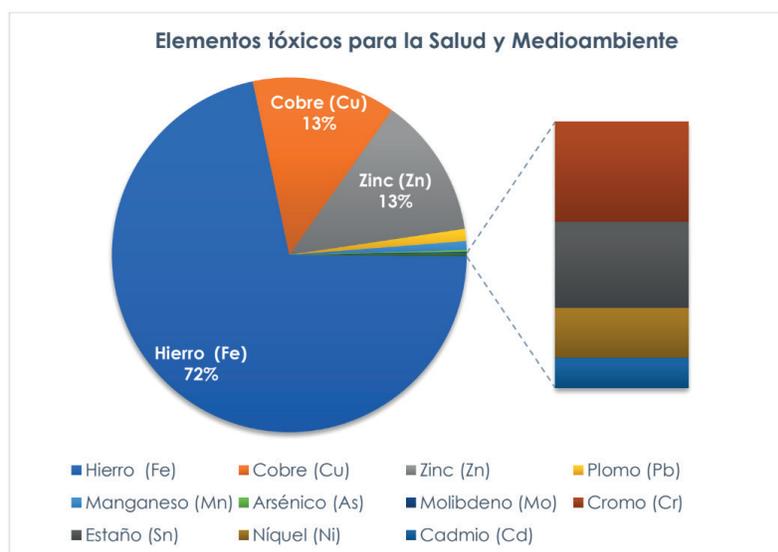


Figura 7. Porcentaje de metales pesados en mayor proporción que se encuentran en el polvo del CEIA.

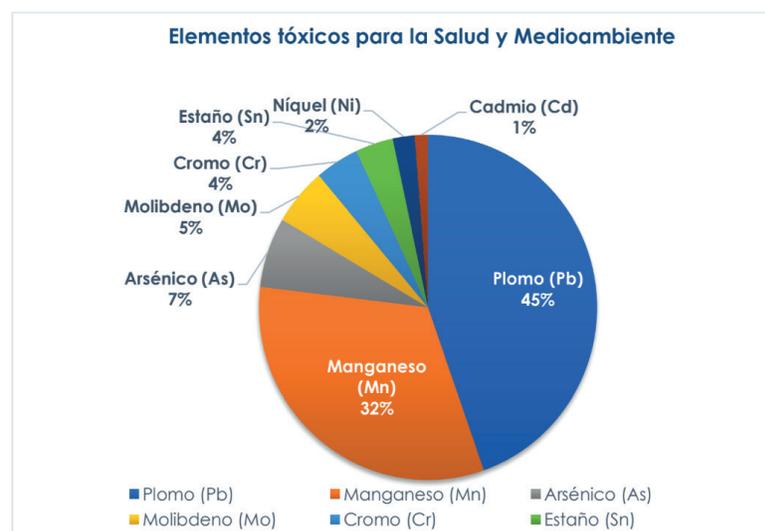


Figura 8. Porcentaje de metales pesados y elementos tóxicos en menor proporción.

De acuerdo a los resultados obtenidos para las muestras de polvo tomadas en el CEIA, se evidenció la presencia de elementos tóxicos relativamente elevados, tales como el Hierro (Fe) 72%, Cobre (Cu) 13% y Zinc (Zn) 13%. En menor proporción, pero igualmente significativo, se encontró Plomo (Pb), Arsénico (As), Molibdeno (Mo), Manganeseo (Mn), Cadmio (Cd), Cromo (Cr) y Níquel (Ni).

Las concentraciones de plomo (Pb) contenidas en el polvo del CEIA superan, en todas las muestras recolectadas los límites establecidos por la normativa de calidad de aire del D.S N°136. Las concentraciones de algunas muestras exceden más de 10 veces el límite permitido de esta norma, principalmente en el polvo recolectado de los puntos que son cercanos a las vías de tránsito principales y los techos.

VI.2. Análisis Granulométrico.

La distribución del tamaño de partículas de las muestras se analizó por difracción láser utilizando el equipo Microtrac S3500 (Figura 9), empleando como medio de dispersión agua desionizada. Antes de realizar el análisis se aplicó por 60 segundos ultrasonido esto para asegurar que no hubiera partículas aglomeradas en las muestras. Cabe señalar que cada medición se realizó en triplicado, y los resultados entregados representan el promedio obtenido de las tres mediciones realizadas para cada muestra.



Figura 9. Equipo Microtrac S3500

Tabla 2. Porcentajes de tamaños pequeños en las muestras de CEIA.

ID MUESTRA	1 µm	2,5 µm	5 µm	10 µm
CEIA1 (%)	0,003	1,916	4,47	8,86
CEIA2 (%)	0,000	1,764	4,50	9,57
CEIA3 (%)	0,000	0,889	3,01	6,75
CEIA4 (%)	0,190	2,848	6,21	12,15
CEIA5 (%)	1,118	4,490	9,12	18,20
CEIA6 (%)	0,588	3,660	7,46	13,55
CEIA7 (%)	0,013	2,179	5,15	9,88
CEIA8 (%)	0,040	2,701	6,06	11,48
CEIA11 (%)	0,300	2,926	6,31	12,80
CEIA12 (%)	0,012	2,088	4,82	9,20
CEIA13 (%)	1,023	4,523	9,05	16,71
CEIA14 (%)	1,173	4,849	9,49	17,82
CEIA15 (%)	0,390	3,291	6,70	11,64
CEIA16 (%)	0,000	1,808	4,31	8,56

Respecto a la tabla anterior se determina que en promedio el 11,94 % de las muestras analizadas corresponde a un tamaño de 10 µm o menor, y el 2,85 % a un tamaño de 2,5 µm o menor.

VII. HITO 3: INSTALACIÓN DE LAS ESTACIONES DE MONITOREO DENTRO Y FUERA DEL CEIA E IMPLEMENTACIÓN DE LA PLATAFORMA EN TIEMPO REAL.

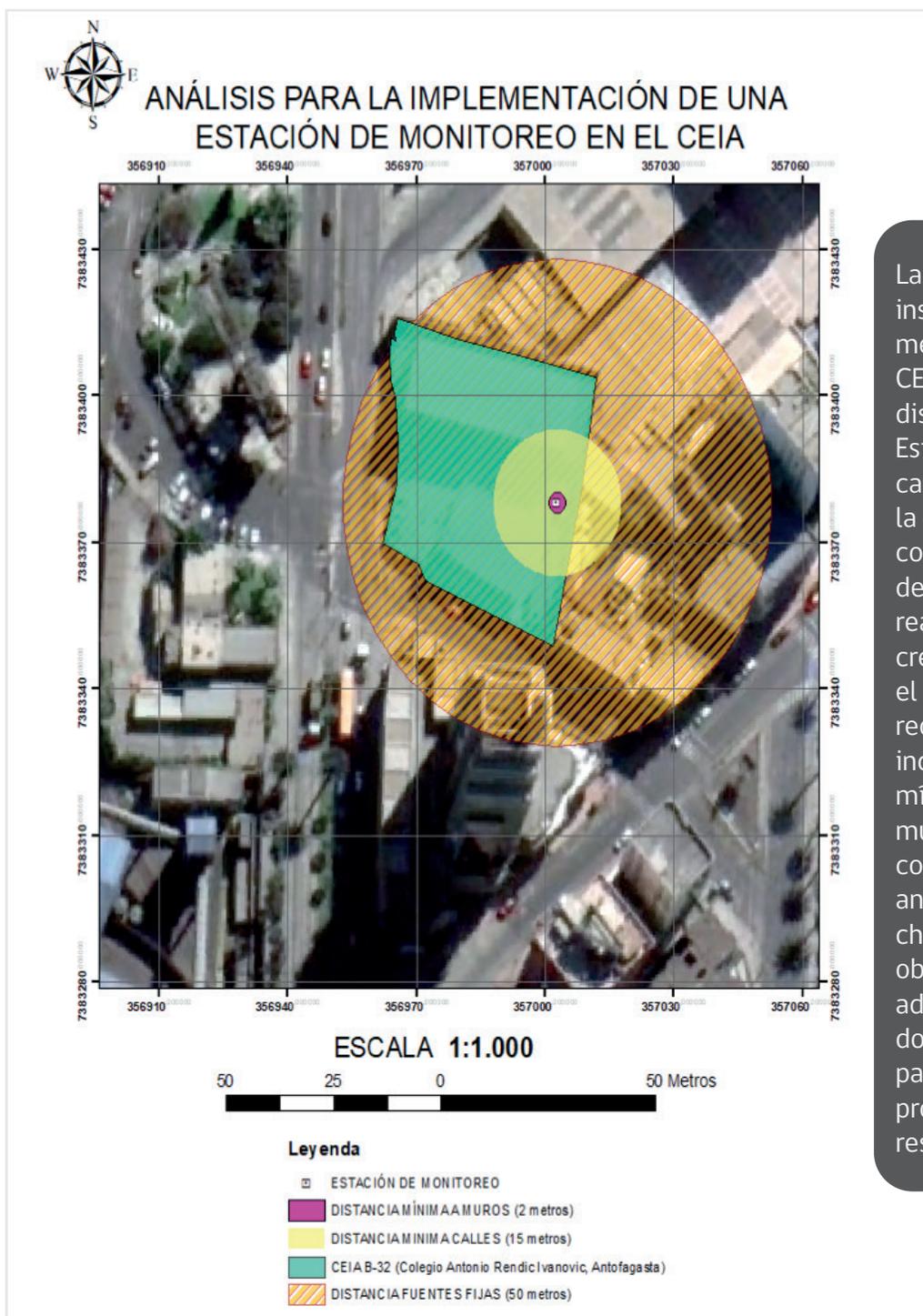
VII.1. Criterios para la instalación de la estación de monitoreo

Para la instalación de la estación de monitoreo en el CEIA, se evaluaron dos posibles ubicaciones. Este análisis se realizó con la finalidad de cumplir los requerimientos técnicos necesarios para que las estaciones de monitoreo sean clasificadas como EMRP (Estación de monitoreo de MP con representatividad poblacional) tal como se indica en la Tabla 3.

Tabla 3. Criterios para la implementación de una estación de monitoreo fija.

Cumpliendo los siguientes criterios:	
✓	Evitar emplazar en zonas de topografía compleja (Valle quebradas, pendiente, etc.)
✓	Suelo despejado (Considerar características meteorológicas y régimen de viento) En caso de vientos predominantes se debe considerar velocidad y dirección del viento.
✓	Distancia mínima 1 metro entre colectores.
✓	Distancia mínima de 2 metros de paredes verticales.
✓	Evitar ubicación de la estación en lugares de obstrucciones a circulación del viento (Arboles, edificios, muros, vegetación, etc.) En caso de obstáculo:
i)	Se recomienda una distancia entre colectores 10 veces la altura del obstáculo mayor que estén en la misma dirección.
ii)	Árbol de obstáculo, se recomienda considerar una distancia de 20 m de la línea de goteo de el árbol y a 10 m de la rama más larga si esta es un obstáculo reductor del flujo.
✓	La estación de monitoreo deberá estar emplazada en zonas donde la población pasa gran parte del tiempo (Residencial y comercial)
✓	Distancia mínima de 15 metros de la calle o avenida (Flujo =<2500 vehículos/día)
✓	Distancia mínima de 50 metros de salida de un sistema de calefacción o fuentes fijas.
✓	Altura de 2 metros a 15 metros m.s.n.m.
✓	Distancia mínima de 5 metros de Chimeneas.

En base a la información proporcionada en la tabla anterior, se realizaron análisis de los posibles puntos de instalación de la estación de monitoreo en el software ArcGIS. En el análisis siguiente, se muestra la ubicación seleccionada para la instalación de la estación de monitoreo.



Justificación:

La estación de monitoreo se instaló en una plataforma de 4 metros de altura en el patio del CEIA, a más de 2 metros de distancia del muro vertical. Esta ubicación cumple con las características requeridas para la construcción de la estructura como soporte de las estaciones de monitoreo. Además, se realizó un análisis en ARCGIS, creando un buffer para verificar el cumplimiento de los requisitos solicitados, incluyendo las distancias mínimas respecto a calles, muros y fuentes fijas. Se consideró que en el área analizada no existen chimeneas, fuentes fijas ni obstáculos reductores de flujo, además de que es un lugar donde la población pasa gran parte del tiempo debido a la proximidad a zonas residenciales y comerciales.

Fuente: Elaboración Propia
(ArcGIS, 2023).

VII.2. Instalación de estaciones de monitoreo meteorológico y calidad de aire.

La estación fija de monitoreo meteorológico y de calidad de aire fue instalada con éxito en el Centro de Educación Integral de Adultos CEIA (Figura 10.a.). Además, se llevó a cabo la instalación de la estación móvil en el primer punto de muestreo, situado en las instalaciones de CICITEM en el barrio industrial La Negra (Figura 10.b.).

a)



b)



Figura 10. a) Estación Fija instalada en el CEIA (Estación compacta conectada BWS500 con sensor AQT530, WXT536 y GMP252). **b)** Estación móvil instalada en La Negra (Estación compacta conectada BWS500 con sensor AQT530, WXT536 y GMP252).

VII.3. Instalación de recolectores o muestreadores de material particulado depositado

Los equipos recolectores fueron montados e instalados en la plataforma conforme a los requerimientos especificados en la Tabla 3, quedando de la siguiente manera:

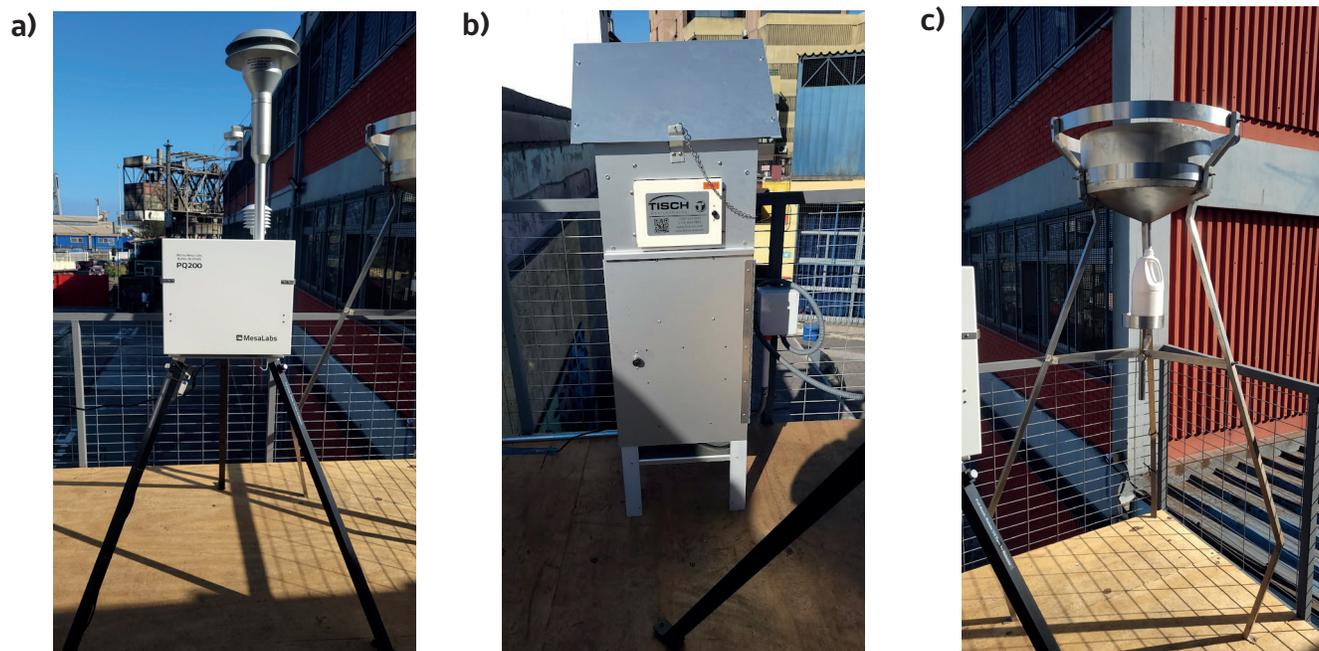


Figura 11. Equipos instalados en la estación de monitoreo. **a)** Recolector BGI PQ200 para MP2,5 y 10. **b)** Recolector TE-5170 TISCH para Partículas Totales Suspendidas. **c)** Colector de Material Particulado Sedimentado.

A continuación, en la Figura 12, se observa la estación meteorológica y de calidad de aire junto a los equipos recolectores de material particulado, ya montados en la plataforma, lo cual permitió avanzar a la siguiente etapa: muestreo de calidad de aire en el centro educativo CEIA.



Figura 12. Equipos de monitoreo de calidad de aire y meteorológico instalados en la plataforma.

VII.4. Capacitación de uso de tecnología y plataforma en tiempo real a la comunidad educativa.

A finales del mes de junio 2023 se llevó a cabo el taller informativo de capacitación a la comunidad educativa del CEIA, tal como se muestra en la Figura 13. En el taller se abordó la importancia del proyecto, así como la implementación y funcionamiento de los equipos instalados en el establecimiento y el reporte de datos de la estación de monitoreo, Este taller generó involucramiento de la comunidad educativa con el proyecto.



Figura 13. Taller informativo de capacitación a la comunidad educativa del CEIA.

VII.5. Puesta en marcha de las estaciones y muestreadores para detectar problemas.

Con todo lo anterior mencionado, se consideran cumplidas las actividades previas y necesarias para llevar a cabo el objetivo 3 "Evaluar la calidad del aire por medio de la implementación un sistema de monitoreo de calidad de aire (gases y MP) y meteorológico, con tecnología de punta y en tiempo real en el CEIA, incluyendo capacitaciones a la comunidad educativa". De esta manera, se da inicio a la puesta en marcha de las estaciones y muestreadores para el monitoreo meteorológico, de calidad de aire, gases y material particulado en el CEIA, tal como se ilustra en la figura 14.



Figura 14: Puesta en marcha de las estaciones y muestreadores.

VIII. HITO 4: DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE AIRE EN EL CEIA.

VIII.1. Monitoreo meteorológico y de calidad de aire.

A continuación, se presentan las concentraciones promedio estacionales de los gases contaminantes y Material Particulado correspondientes al periodo 2023-2024 obtenidas de la estación fija instalada en el CEIA a través de la plataforma de Vaisala. Los datos se detallan en las Tablas 4 y 5

Tabla 4. Concentraciones promedio de las estaciones meteorológicas de gases contaminantes.

Concentraciones promedio de Gases Contaminantes					
Estaciones meteorológicas	CO ₂ (µg/m ³)	CO (µg/m ³)	NO (µg/m ³)	NO ₂ (µg/m ³)	O ₃ (µg/m ³)
Invierno	699.494,35	110,69	2,35	12,59	42,39
Primavera	700.894,68	88,21	0,72	13,77	38,28
Verano	663.869,91	89,21	0,60	21,52	23,38
Otoño	680.842,36	108,67	1,95	22,35	26,71

Tabla 5. Promedios estacionales de las concentraciones de material particulado obtenidas de la estación fija - Vaisala del periodo 2023-2024.

Concentraciones promedio de Material Particulado			
Estaciones Meteorológicas	MP ₁ (µg/m ³)	MP _{2,5} (µg/m ³)	MP ₁₀ (µg/m ³)
Invierno	6,20	17,26	34,05
Primavera	3,75	14,26	27,85
Verano	3,37	12,21	25,73
Otoño	6,88	17,68	33,00

VIII.2. Análisis in situ de muestras sólidas por espectroscopía de fluorescencia por rayos X (XRF)

Durante todo el periodo de monitoreo en el CEIA, se recolectaron muestras de material particulado sedimentado (MPS) de diversas zonas, tanto al interior como al exterior del establecimiento educativo, con el fin de identificar elementos contaminantes mediante análisis químico. A continuación, en la tabla 6 se detallan las coordenadas de los puntos de muestreo.

Tabla 6. Coordenadas de todos los puntos muestreados durante el periodo 2023-2024, asociados a material particulado sedimentado (MPS) al interior y exterior del CEIA.

Puntos de muestreo de MPS				
ZONA DE MUESTREO	FECHA	UTM E	UTM N	OBSERVACIÓN
Interior CEIA	26-07-2023	356993	7383371	Calle Coquimbo
	26-07-2023	356997	7383388	Unidad dental móvil
	26-07-2023	356970	7383380	Av. Grecia
	31-08-2023	357000	7383386	Plataforma
	20-09-2023	356989	7383359	Calle Coquimbo
	20-09-2023	356998	7383381	Unidad dental móvil
	20-09-2023	356970	7383379	Av. Grecia
	01-12-2023	356989	7383359	Calle Coquimbo
	01-12-2023	356998	7383381	Unidad dental móvil
	01-12-2023	356970	7383379	Av. Grecia
Exterior CEIA	01-12-2023	357000	7383386	Plataforma
	14-12-2023	356981	7383109	Costanera sur
Interior CEIA	07-02-2024	356912	7383421	Plaza Puerto
	04-03-2024	356969	7383387	Garita guardia
	04-03-2024	356973	7383381	Entrada Gimnasio
	15-05-2024	357001	7383386	Plataforma
	15-05-2024	356999	7383383	Unidad dental móvil
	15-05-2024	356989	7383359	Calle Coquimbo
Exterior CEIA	15-05-2024	356970	7383379	Av. Grecia
	10-06-2024	357053	7383681	Ex Jardín infantil Semillita
	12-06-2024	356934	7382540	Unimarc Av. Brasil
	07-06-2024	576330	7767125	Avenida - Entrada CEIA
Interior CEIA	11-07-2024	357317	7381652	3ra Compañía de Bomberos
	11-07-2024	356970	7383379	Av. Grecia

Georreferenciación de Muestras Internas:

Se recolectaron muestras en seis puntos al interior del CEIA en; (1) Calle Coquimbo, (2) Av. Grecia, (3) Unidad dental móvil, (4) Plataforma, (5) Garita guardia, (6) Entrada gimnasio, los cuales se pueden ver georreferenciados a continuación y la fecha de muestreo se detalla en la tabla anterior.

ZONA DE MUESTREO DE MATERIAL PARTICULADO SEDIMENTADO (MPS) AL INTERIOR DEL CEIA



Zona de recolección de muestras de material particulado sedimentado del periodo comprendido en el monitoreo al interior del CEIA.



Referencia espacial
 Nombre: WGS 1984 Web Mercator Auxiliary Sphere
 PCS: WGS 1984 Web Mercator Auxiliary Sphere



Figura 15. Georreferenciación de muestras al interior del CEIA.
 Fuente: Elaboración propia. ArcGIS Pro.

Georreferenciación de Muestras Externas:

Se recolectaron muestras en distintos sectores al exterior del CEIA, las cuales fueron recolectadas en: (1) Residencias Frente al Mall Plaza, (2) Plaza puerto, (3) Costanera sur, (4) Ex Jardín Infantil Semillita, (5) Unimarc Av. Brasil, los cuales se muestran georreferenciados a continuación, cabe destacar que se recolectó una muestra por lugar y sus fechas asociadas al muestreo se detallan en la Tabla 6.



Figura 16. Georreferenciación de muestras al exterior del CEIA.
Fuente: Elaboración propia. ArcGIS Pro.

VIII.3. Análisis por Difracción de Rayos X (DRX)

Las muestras de polvo sedimentado recolectadas en los distintos puntos al interior y exterior del CEIA fueron analizadas por medio de difracción de rayos X, con el objetivo de determinar la composición mineralógica. En las siguientes tablas, se encuentran la comparación del contenido de las muestras recolectadas durante el periodo de monitoreo.

Tabla 7. Análisis difracción de rayos X Muestra Calle Coquimbo.

Composición Mineralógica Muestra Calle Coquimbo					
Mineral/ compuesto	Fórmula empírica	26-07-2023	20-09-2023	01-12-2023	15-05-2024
		% Abundancia	% Abundancia	% Abundancia	% Abundancia
Halita	NaCl	9,7	19,1	23,5	8,2
Yeso	CaSO ₄ · 2H ₂ O	7,3	8,4	14,2	5,1
Calcita	CaCO ₃	23,5	21,9	26,3	20,5
Cuarzo	SiO ₂	16,0	10,6	14,4	15,0
Clorita	(Mg ₅ Al)(Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	10,5	-	-	9,2
Albita	NaAlSi ₃ O ₈	28,8	29,8	20,0	24,4
Muscovita	KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂	-	9,1	-	5,8
Ortoclasa	KAlSi ₃ O ₈	-	-	-	2,9
Hematita	Fe ₂ O ₃	3,1	0,7	-	-
Magnetita	Fe ₃ O ₄	1,2	0,4	0,2	1,6
Ilmenita	FeTiO ₃	-	-	1,5	-
Calcosiderita	CuFe ₆ (PO ₄) ₄ (OH) ₈ · 4H ₂ O	-	-	-	7,4

Tabla 8. Análisis difracción de rayos X Muestra Avenida Grecia.

Composición Mineralógica Muestra Avenida Grecia						
Mineral/ compuesto	Fórmula empírica	26-07-2023	20-09-2023	01-12-2023	15-05-2024	11-07-2024
		% Abundancia	% Abundancia	% Abundancia	% Abundancia	% Abundancia
Halita	NaCl	16,8	7,8	6,5	7,9	-
Calcita	CaCO ₃	10,4	9,7	14,6	10,1	14,7
Yeso	CaSO ₄ 2H ₂ O	6,3	6,7	6,9	6,9	4,6
Anhidrita	CaSO ₄	1,6	-	3,0	-	1,4
Hornblenda	Na _{0,5} (Ca _{0,75} Na _{0,25}) 2Mg ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂	-	-	1,0	-	-
Anortita	(Ca,Na)(Si,Al) ₄ O ₈	-	-	-	-	24,1
Cuarzo	SiO ₂	13,6	10,0	8,5	14,1	21,0
Albita	NaAlSi ₃ O ₈	23,3	36,7	33,7	31,8	-
Ortoclasa	KAlSi ₃ O ₈	13,3	14,1	4,7	7,7	6,8
Caolinita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	11,5	-	-	-	-
Clorita	(Mg ₅ Al) (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	-	8,4	14,9	-	-
Muscovita	KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂	-	4,5	-	11,3	9,3
Clorita	(Mg ₅ Al) (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	-	-	-	4,7	6,1
Hematita	Fe ₂ O ₃	-	1,3	5,3	-	-
Magnetita	Fe ₃ O ₄	1,9	0,4	1,1	2,2	1,8
Pirita	FeS ₂	-	-	-	1,4	2,5
Esfalerita	ZnS	1,4	0,5	-	1,4	-
Calcosiderita	CuFe ₆ (PO ₄) ₄ (OH) ₈ 4H ₂ O	-	-	-	0,6	4,2
Calcopirita	CuFeS ₂	-	-	-	-	2,0
Calcosina	Cu ₂ S	-	-	-	-	1,6

Tabla 9. Análisis difracción de rayos X Muestra Unidad Dental móvil.

Composición Mineralógica Muestra Unidad Dental Móvil					
Mineral/ compuesto	Fórmula empírica	26-07-2023	20-09-2023	01-12-2023	15-05-2024
		% Abundancia	% Abundancia	% Abundancia	% Abundancia
Bassanita	CaSO ₄ · 0.5H ₂ O	-	-	-	0,7
Halita	NaCl	14,5	25,3	12,4	13,1
Calcita	CaCO ₃	13,8	15,4	18,7	10,3
Yeso	CaSO ₄ · 2H ₂ O	11,8	13,5	5,5	9,3
Albita	NaAlSi ₃ O ₈	32,1	24,4	34,0	27,2
Clorita	(Mg ₅ Al)(Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	16,5	12,0	8,3	10,0
Muscovita	KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂	-	-	-	8,1
Ortoclasa	KAlSi ₃ O ₈	-	-	8,5	-
Magnetita	Fe ₃ O ₄	1,4	1,1	0,9	1,1
Pirita	FeS ₂	-	-	-	0,1
Esfalerita	ZnS	-	-	-	0,6
Calcosiderita	CuFe ₆ (PO ₄) ₄ (OH) ₈ · 4H ₂ O	-	-	-	4,2

Tabla 10. Análisis difracción de rayos X Muestra superficie Plataforma equipos CEIA

Composición Mineralógica Muestra Plataforma				
Mineral/compuesto	Fórmula empírica	31-08-2023	01-12-2023	15-05-2024
		% Abundancia	% Abundancia	% Abundancia
Halita	NaCl	23,9	42,1	1,9
Albita	NaAlSi3O8	23,1	-	36,1
Calcita	CaCO3	17,1	11,5	13,8
Yeso	CaSO4 · 2H2O	13,4	9,7	-
Muscovita	KAl2Si3AlO10(OH)2	5,0	-	12,2
Cuarzo	SiO2	12,1	8,8	15,5
Anortita	(Ca,Na)(Si,Al)4O8	-	27,3	-
Clorita	(Mg5Al)(Si, Al)4·10(OH)8	-	-	7,0
Ortoclasa	KAlSi3O8	-	-	7,6
Magnetita	Fe3O4	3,2	0,6	1,5
Hematita	Fe2O3	2,2	-	-
Pirita	FeS2	-	-	2,2
Esfalerita	ZnS	-	-	0,2
Calcosiderita	CuFe6(PO4)4(OH)8 · 4H2O	-	-	2,0

En cuanto a las muestras recolectadas de Clínica dental móvil, calle Coquimbo y nuestra Plataforma en el CEIA, los resultados evidenciaron similar composición mineralógica que incluye principalmente minerales relacionados con Aluminio (Albita y Clorita), Hierro (Hematita y Magnetita), Silicio (Cuarzo), Calcio y Sulfato. Cabe resaltar que también se encontraron compuestos sulfurados de Zinc, como la Esfalerita y Calcosiderita un mineral, Fosfato hidratado de Cobre y Hierro. En las muestras del polvo recolectado en el sector de Avenida Grecia se encontraron compuestos relacionados a Sulfuro de Cobre, tales como Calcopirita y Calcosina.

A continuación, en la Tabla 11 se observa la composición química de otros puntos de recolección de MPS al interior del CEIA.

Tabla 11. Análisis difracción de rayos X de las muestras recolectadas en garita de seguridad y entrada del gimnasio.

Mineral /Compuesto	Formula Empírica	Entrada Gimnasio (04-03-24)	Garita Colegio (04-03-24)
		Abundancia %	Abundancia %
Halita	NaCl	18.4	9.5
Calcita	CaCO ₃	13.0	11.1
Anhidrita	CaSO ₄	-	1.8
Yeso	CaSO ₄ ·2H ₂ O	12.0	7.9
Cuarzo	SiO ₂	12.9	12.1
Clorita	(Mg ₅ Al)(Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	8.9	6.0
Albita	NaAlSi ₃ O ₈	27.0	37.2
Muscovita	KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂	1.3	6.1
Ortoclasa	KAlSi ₃ O ₈	3.2	6.1
Magnetita	Fe ₃ O ₄	1.4	1.4
Calcopirita	CuFeS ₂	0.5	-
Covelina	CuS	-	0.4
Wurtzita	ZnS	-	0.5
Esfalerita	ZnS	1.5	-

La composición mineralógica del polvo recolectado en la entrada de colegio (garita de seguridad y entrada del gimnasio), evidenció principalmente compuestos relacionados con Aluminio y Silicio (Albita, Moscovita, Ortoclasa y Clorita), Hierro (Magnetita), Silicio (cuarzo), sales de Calcio (Calcita, Anhidrita y Yeso), Sodio (NaCl). Además, se evidenció en estas muestras la presencia de minerales relacionados con sulfuros de Cobre (Calcopirita y Covelina) y con sulfuros de Zinc (Wurtzita y Esfalerita).

Muestras recolectadas exterior CEIA:

Los resultados de las muestras de polvo sedimentado recolectadas en el exterior del CEIA, como las muestras de Costanera Sur, Avenida Grecia y Plaza Puerto se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 12. Análisis difracción de rayos X de las muestras recolectadas al exterior del CEIA.

Composición Mineralógica de muestras recolectadas al exterior del CEIA							
Mineral /Compuesto	Fórmula Empírica	Costanera sur	Plaza puerto	Avenida Entrada CEIA	Ex Jardín semillita	Unimarc Av. Brasil	3ra Compañía de Bomberos
		14-12-2023	07-02-2024	07-06-2024	10-06-2024	12-06-2024	11-07-2024
		% Abundancia	% Abundancia	% Abundancia	% Abundancia	% Abundancia	% Abundancia
Calcita	CaCO ₃	24,6	11,3	15,8	12,3	13,6	8,6
Halita	NaCl	10,7	14,2	3,8	2,0	6,3	3,9
Yeso	CaSO ₄ 2H ₂ O	9,8	-	4,0	3,0	1,0	4,0
Hornblenda	K ₃ Na ₅ Ca ₁₇ Mg ₃₆ Fe ₁₁ Fe ₅ Ti ₂ Al ₁₉ Si ₆₄ O ₂₂ (OH)	-	-	-	1,4	-	2,7
Hidroxilapatita	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH)	-	-	-	-	-	9,3
Albita	(Na,Ca)Al(SiAl) ₃ O ₈	19,8	23,2	34,8	35,9	33,2	27,6
Cuarzo	SiO ₂	12,7	12,0	13,6	16,0	16,8	8,1
Ortoclasa	KAlSi ₃ O ₈	10,6	8,6	9,3	5,4	7,6	7,5
Clorita	(Mg ₅ Al)(Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	7,4	14,3	7,5	6,3	13,8	9,2
Muscovita	KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂	1,4	9,0	6,6	13,8	2,7	4,0
Cristobalita	SiO ₂	-	3,1	-	-	-	-
Hematita	Fe ₂ O ₃	2,8	2,1	2,0	2,9	4,6	-
Magnetita	Fe ₃ O ₄	0,2	0,5	1,0	0,2	0,4	1,8
Pirita	FeS ₂	-	-	1,5	-	-	-
Covelina	CuS	-	1,7	-	-	-	-
Chalcantita	CuSO ₄ 5H ₂ O	-	-	0,2	-	-	-
Calcosiderita	CuFe ₆ (PO ₄) ₄ (OH) ₈ 4H ₂ O	-	-	-	-	-	5,4
Esfalerita	ZnS	-	-	-	0,8	0,1	-

Los resultados de las muestras recolectadas en el exterior evidenciaron principalmente la presencia de minerales relacionados con Aluminio (Albita y Clorita), Hierro (Hematita y Magnetita), Silicio (Cuarzo y Cristobalita), Calcio y Sulfato. Para las muestras de Avenida Grecia y Plaza Puerto estas contenían minerales relacionados con sulfuros de Cobre (covelina) y con sulfuros de Zinc (Esfalerita), además de Calcosiderita un mineral, fosfato hidratado de Cobre y Hierro.

VIII.4. Análisis químicos en el laboratorio mediante absorción atómica e ICP de las muestras recolectadas de MP.

Las muestras de material particulado (MP) recolectadas, desde los equipos de PQ200 para MP_{2,5} y MP₁₀, del equipo HIVOL 3000 para partículas totales en suspensión (PTS) y del recolector para material particulado sedimentable (MPS), fueron enviadas a análisis químico al laboratorio certificado de ALS Life Sciences Division y al Laboratorio de Análisis químico de CICITEM. Todos los análisis fueron desarrollados bajo estándares de la U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Standard Methods for the Examination y normativas chilenas.

Tabla 13. Promedio de las Concentraciones mensuales de elementos químicos en MP_{2,5}.

Concentraciones mensuales de elementos contaminantes presentes en muestras de Material Particulado 2.5 l m														
Año	Mes	Aluminio (Al) (µg/m³)	Arsénico (As) (µg/m³)	Bario (Ba) (µg/m³)	Cadmio (Cd) (µg/m³)	Cobalto (Co) (µg/m³)	Cobre (Cu) (µg/m³)	Cromo (Cr) (µg/m³)	Hierro (Fe) (µg/m³)	Manganeso (Mn) (µg/m³)	Molibdeno (Mo) (µg/m³)	Níquel (Ni) (µg/m³)	Plomo (Pb) (µg/m³)	Zinc (Zn) (µg/m³)
2023	Julio	0,551	0,025	0,094	0,000	0,002	0,076	0,198	7,721	0,028	0,000	0,058	0,124	0,086
	Agosto	0,790	0,569	0,040	0,000	0,005	0,089	0,122	6,821	0,267	0,000	0,105	0,144	0,325
	Septiembre	0,618	0,527	0,000	0,000	0,006	0,018	0,032	0,912	0,000	0,008	0,238	0,197	0,423
	Octubre	0,278	0,007	0,000	0,000	0,031	0,011	0,010	0,134	0,002	0,000	0,046	0,039	0,160
	Noviembre	0,228	0,027	0,000	0,000	0,102	0,007	0,002	0,000	0,004	0,000	0,000	0,002	0,036
	Diciembre	0,518	0,004	0,004	0,003	0,000	0,030	0,012	0,224	0,004	0,001	0,004	0,033	0,085
2024	Enero	0,450	0,066	0,008	0,001	0,000	0,037	0,008	0,313	0,003	0,001	0,010	0,014	0,081
	Febrero	0,329	0,000	0,005	0,000	0,000	0,014	0,007	0,168	0,004	0,004	0,003	0,008	0,045
	Marzo	0,086	0,002	0,006	0,000	0,000	0,016	0,007	0,238	0,005	0,002	0,004	0,017	0,053
	Abril	0,079	0,001	0,004	0,000	0,000	0,014	0,006	0,161	0,003	0,000	0,003	0,003	0,023
	Mayo	0,183	0,004	0,008	0,000	0,000	0,019	0,011	0,180	0,004	0,001	0,004	0,014	0,030
	Junio	0,401	0,007	0,006	0,000	0,000	0,033	0,009	0,329	0,010	0,001	0,005	0,016	0,050

Tabla 14. Promedio de las Concentraciones mensuales de elementos químicos en MP₁₀.

Concentraciones mensuales de elementos contaminantes presentes en muestras de Material Particulado 10 l m														
Año	Mes	Aluminio (Al) (µg/m³)	Arsénico (As) (µg/m³)	Bario (Ba) (µg/m³)	Cadmio (Cd) (µg/m³)	Cobalto (Co) (µg/m³)	Cobre (Cu) (µg/m³)	Cromo (Cr) (µg/m³)	Hierro (Fe) (µg/m³)	Manganeso (Mn) (µg/m³)	Molibdeno (Mo) (µg/m³)	Níquel (Ni) (µg/m³)	Plomo (Pb) (µg/m³)	Zinc (Zn) (µg/m³)
2023	Julio	0,741	0,031	0,109	0,000	0,001	0,098	0,248	1,698	0,043	0,001	0,003	0,200	0,108
	Agosto	1,140	4,171	0,053	0,000	0,005	0,372	0,138	7,371	0,291	0,000	0,087	0,234	0,259
	Septiembre	0,762	0,156	0,000	0,001	0,014	0,056	0,000	0,656	0,000	0,011	0,356	0,206	0,221
	Octubre	0,703	0,016	0,049	0,000	0,129	0,000	0,000	0,000	0,008	0,000	0,000	0,000	0,051
	Noviembre	0,515	0,032	0,000	0,000	0,178	0,042	0,004	0,196	0,009	0,000	0,001	0,005	0,080
	Diciembre	0,625	0,005	0,014	0,000	0,000	0,109	0,019	0,604	0,009	0,003	0,006	0,031	0,128
2024	Enero	0,555	0,083	0,008	0,003	0,003	0,065	0,011	0,571	0,007	0,003	0,005	0,020	0,077
	Febrero	0,410	0,004	0,011	0,001	0,000	0,048	0,007	0,444	0,007	0,001	0,004	0,011	0,048
	Marzo	0,180	0,003	0,013	0,000	0,000	0,059	0,008	0,551	0,006	0,001	0,004	0,018	0,095
	Abril	0,197	0,005	0,014	0,000	0,000	0,058	0,007	0,733	0,011	0,003	0,004	0,007	0,049
	Mayo	0,300	0,005	0,015	0,000	0,000	0,083	0,011	0,676	0,012	0,004	0,004	0,015	0,055
	Junio	0,518	0,009	0,017	0,000	0,000	0,077	0,012	0,802	0,017	0,003	0,005	0,019	0,073

Tabla 15. Promedio de las Concentraciones mensuales de elementos químicos en PTS.

Concentraciones mensuales de elementos contaminantes presentes en muestras de Partículas Totales en Suspensión (PTS)														
Año	Mes	Aluminio (Al) (µg/m³)	Arsénico (As) (µg/m³)	Bario (Ba) (µg/m³)	Cadmio (Cd) (µg/m³)	Cobalto (Co) (µg/m³)	Cobre (Cu) (µg/m³)	Cromo (Cr) (µg/m³)	Hierro (Fe) (µg/m³)	Manganeso (Mn) (µg/m³)	Molibdeno (Mo) (µg/m³)	Níquel (Ni) (µg/m³)	Plomo (Pb) (µg/m³)	Zinc (Zn) (µg/m³)
2023	Julio	0,161	0,004	0,001	0,000	0,000	0,052	0,027	0,266	0,000	0,001	0,000	0,007	0,034
	Agosto	0,539	0,574	0,003	0,000	0,000	0,240	0,031	1,147	0,003	0,000	0,020	0,048	0,130
	Septiembre	0,531	0,205	0,001	0,000	0,000	0,133	0,025	0,896	0,002	0,003	0,033	0,024	0,076
	Octubre	0,032	0,000	0,001	0,000	0,000	0,014	0,000	0,075	0,001	0,000	0,000	0,001	0,009
	Diciembre	0,038	0,001	0,001	0,000	0,000	0,031	0,001	0,079	0,001	0,001	0,000	0,001	0,009
	2024	Enero	0,031	0,000	0,001	0,000	0,000	0,020	0,000	0,056	0,001	0,001	0,000	0,001
Febrero		0,030	0,000	0,001	0,000	0,002	0,020	0,000	0,060	0,001	0,000	0,000	0,001	0,005
Marzo		0,033	0,000	0,002	0,000	0,000	0,015	0,000	0,072	0,001	0,000	0,000	0,001	0,005
Abril		0,053	0,001	0,011	0,000	0,000	0,021	0,001	0,117	0,002	0,001	0,000	0,001	0,014
Mayo		0,038	0,000	0,004	0,000	0,001	0,019	0,000	0,083	0,001	0,001	0,000	0,001	0,008
Junio		0,064	0,001	0,003	0,000	0,000	0,030	0,001	0,157	0,003	0,001	0,000	0,002	0,002

Tabla 16. Concentraciones mensuales de elementos químicos en el MPS.

Concentraciones mensuales de elementos contaminantes presentes en muestras de Material Particulado Sedimentables (MPS)															
Año	Mes	Aluminio (Al) (µg/m³)	Arsénico (As) (µg/m³)	Bario (Ba) (µg/m³)	Cadmio (Cd) (µg/m³)	Cromo (Cr) (µg/m³)	Cobalto (Co) (µg/m³)	Cobre (Cu) (µg/m³)	Hierro (Fe) (µg/m³)	Plomo (Pb) (µg/m³)	Manganeso (Mn) (µg/m³)	Mercurio (Hg) (µg/m³)	Molibdeno (Mo) (µg/m³)	Níquel (Ni) (µg/m³)	Zinc (Zn) (µg/m³)
2023	Julio	2,751	0,021	0,097	0,003	0,056	0,005	1,238	8,177	0,057	0,157	0,000	0,020	0,051	1,192
	Septiembre	5,464	0,035	0,000	0,005	0,000	0,007	2,457	15,553	0,154	0,000	0,000	0,000	0,062	1,977
	Octubre	60,822	0,481	4,043	0,073	1,453	0,184	66,164	227,398	1,509	3,817	0,008	0,531	2,636	31,969
	Noviembre	1,151	0,007	0,049	0,001	0,020	0,002	0,816	2,808	0,025	0,037	0,000	0,009	0,014	0,943
	Diciembre	2,681	0,035	0,029	0,003	0,073	0,005	2,559	10,200	0,066	0,147	0,000	0,039	0,033	1,312
2024	Enero	3,831	0,052	0,212	0,005	0,156	0,008	3,739	14,609	0,136	0,235	0,000	0,046	0,080	2,307
	Febrero	4,772	0,037	0,012	0,004	0,144	0,009	4,084	15,297	0,097	-	0,000	0,046	0,098	1,903
	Marzo	2,334	0,032	0,015	0,002	0,321	0,029	2,457	9,764	0,053	0,000	0,000	0,034	0,732	1,054
	Abril	4,172	0,001	0,026	0,009	0,065	0,015	1,848	0,206	0,073	-	0,000	0,000	0,180	3,806

Material particulado Sedimentado (MPS)

Los elementos químicos identificados en muestras de Material Particulado Sedimentado (MPS), fueron comparados con normativas internacionales, como la Ordenanza Suiza y el Primer Reglamento Alemán^{1,2}, (Tabla 17), donde los resultados obtenidos de algunos elementos contaminantes como el plomo, arsénico, cadmio, níquel y zinc, se representan en las figuras 17 a 22.

Tabla 17: Valores de Normas nacionales e internacionales para elementos de interés en el MPS.

	Promedio (mg/m²*día)							
	Cadmio (Cd)	Hierro (Fe)	Plomo (Pb)	Talio (Tl)	Zinc (Zn)	Arsénico (As)	Níquel (Ni)	Mercurio (Hg)
D.S N° 4/1992 desde segunda quincena de Dic- Ago	-	60	-	-	-			
D.S N° 4/1992 Sep -Oct - Nov y primera quincena de Dic.	-	30	-	-	-			
Ordenanza Confederación Suiza**	0,002	-	0,1	0,002	0,4			
Reglamento Alemán***	0,002		0,1	0,002		0,004	0,015	0,001

*Artículo 4, D.S N°4/1992, del Ministerio de Agricultura.

** Ordenanza Sobre Control de Contaminación del Aire (OAPC), 1985, que regula la concentración de ciertos elementos en el Material Particulado Sedimentable, como promedio aritmético anual.

***Primer Reglamento Administrativo General relativo a la Ley Federal de Control de Inmisiones (Instrucciones técnicas sobre control de calidad del aire - TA Luft, 2002)

¹ Ordenanza Suiza Sobre Control de Contaminación del Aire (OAPC), 1985, que regula la concentración de ciertos elementos en el Material Particulado Sedimentable, como promedio aritmético anual.

² Primer Reglamento Alemán Administrativo General relativo a la Ley Federal de Control de Inmisiones (Instrucciones técnicas sobre control de calidad del aire - TA Luft, 2002).

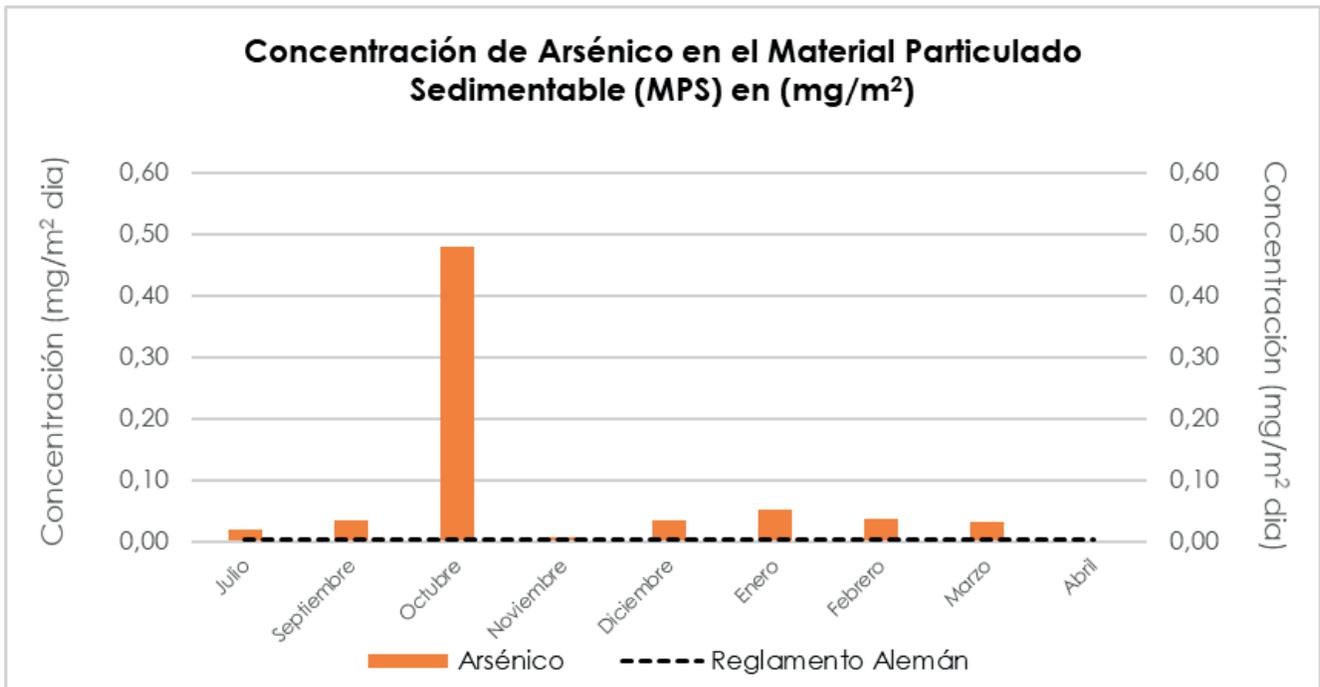


Figura 17. Análisis mensual de Arsénico presente en las muestras de MPS, comparado con el Reglamento Alemán.

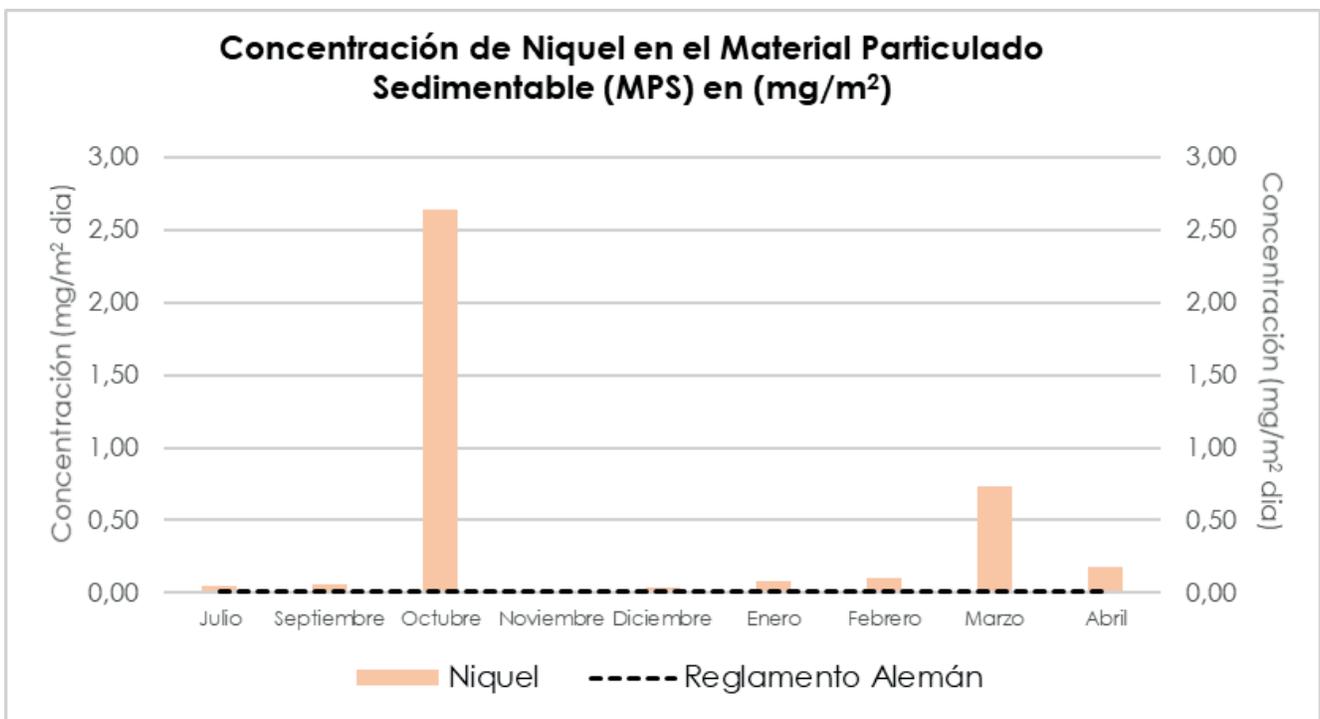


Figura 18. Análisis mensual de Níquel presente en las muestras de MPS, comparado con el Reglamento Alemán.

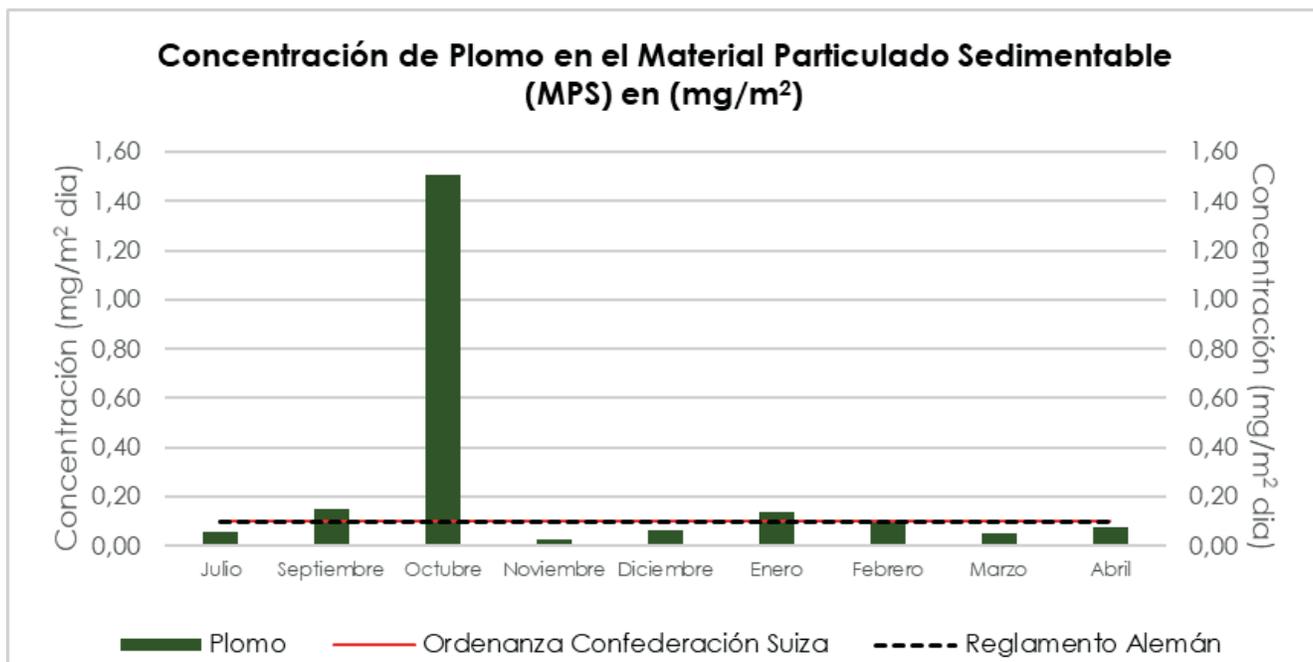


Figura 19. Análisis mensual de Plomo presente en las muestras MPS, comparado con las normativas de la Ordenanza Suiza y el Reglamento Alemán.

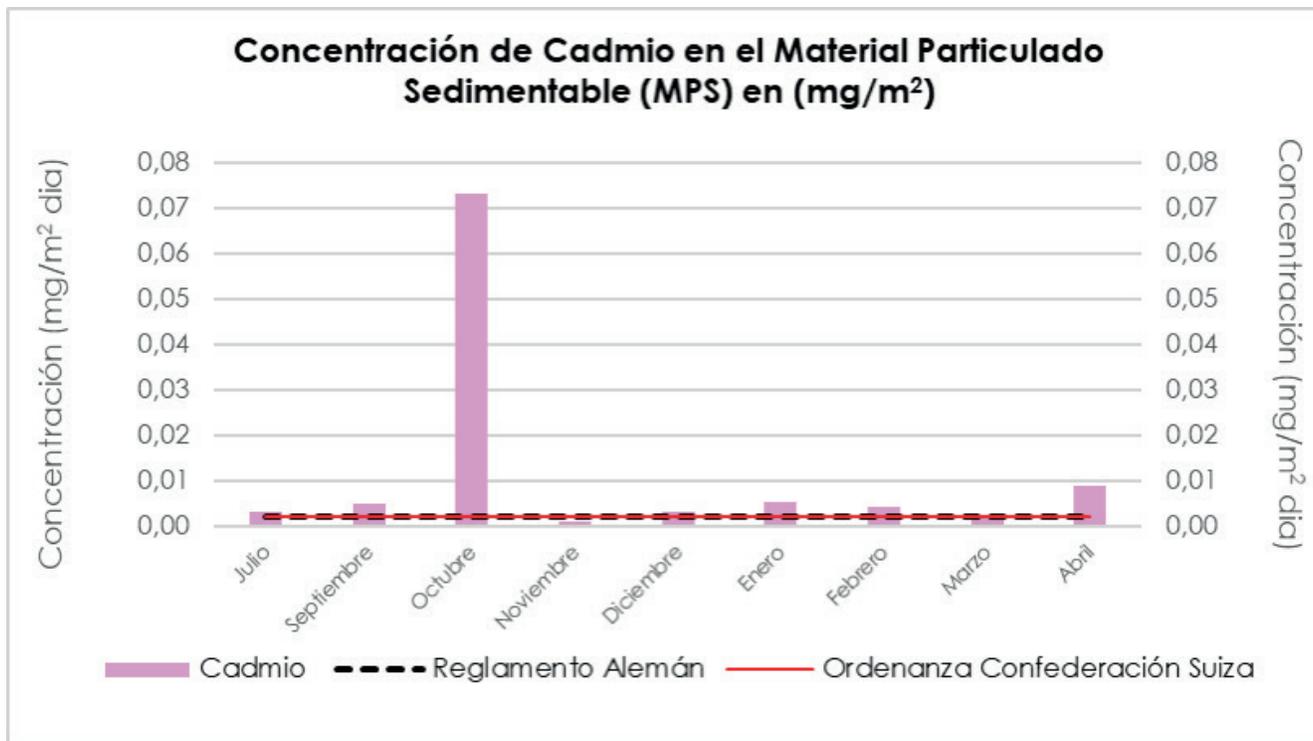


Figura 20. Análisis mensual de Cadmio presente en las muestras MPS, comparado con las normativas del Ordenanza Suiza y el Reglamento Alemán.

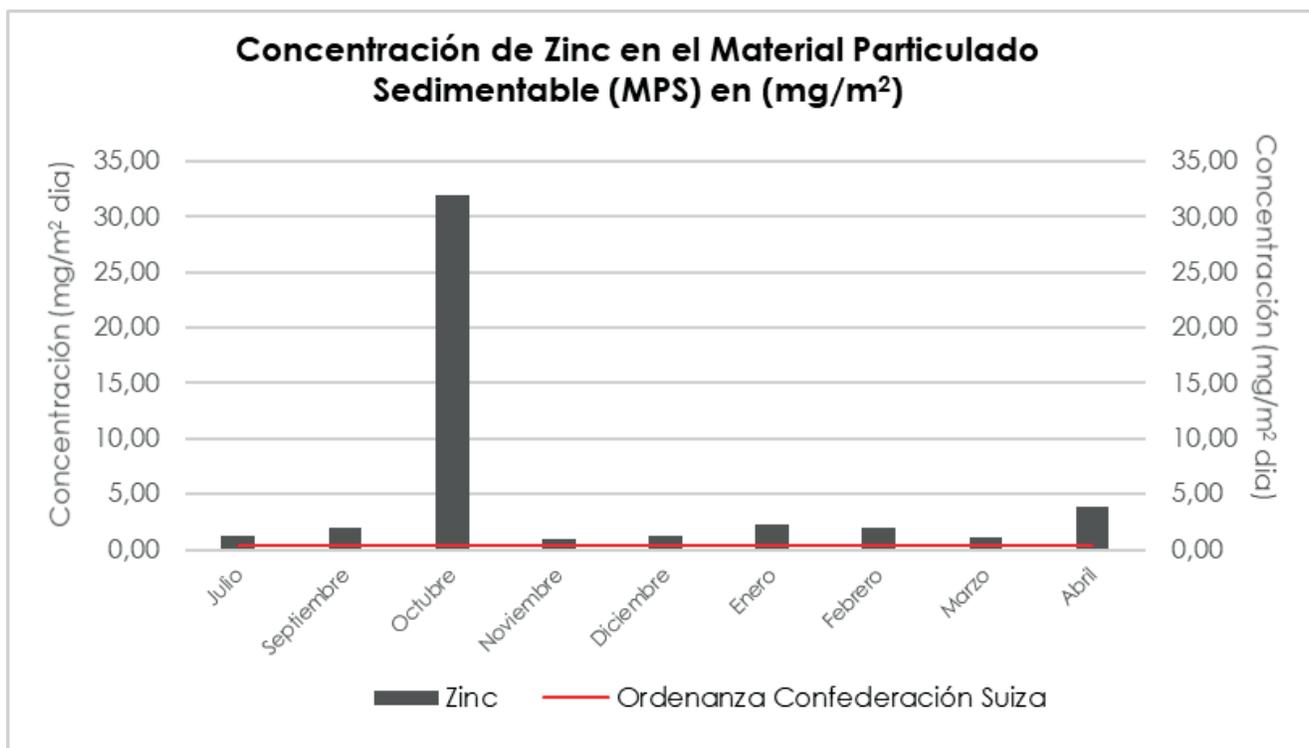


Figura 21. Análisis mensual de Zinc presente en las muestras MPS, comparado con las normativas del Ordenanza Suiza.

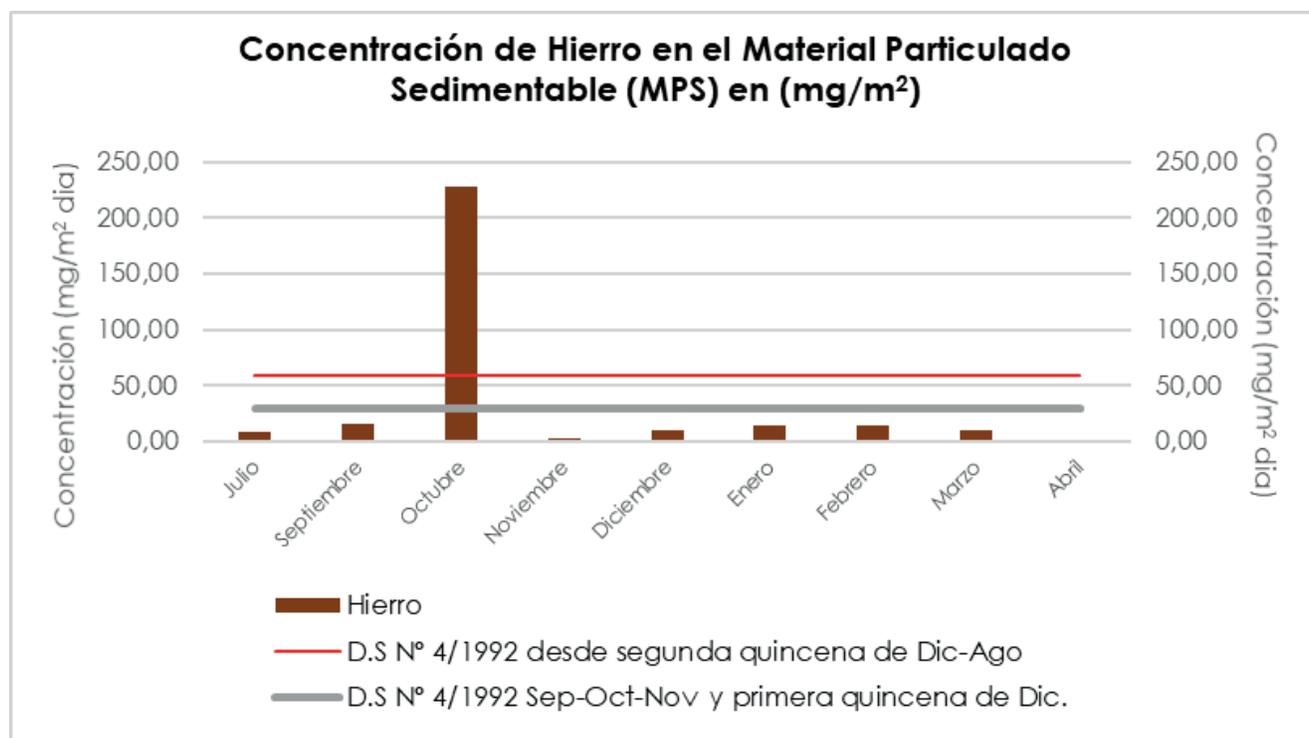


Figura 22. Análisis mensual de Hierro presente en las muestras de MPS, comparado con las normativas del decreto D.S. N°4/1992 del Ministerio de Agricultura.

El análisis comparativo de las concentraciones de los elementos presentados en los gráficos a continuación, reflejan que los resultados obtenidos en el MPS por elemento (Arsénico, Níquel, Plomo, Cadmio, Hierro y Zinc), en la mayoría de los casos analizados superan las ordenanzas suiza y alemana, siendo en algunos meses el doble de la concentración permitida. En relación, a la concentración de hierro comparada con el decreto D.S. N° 4/1992 del Ministerio de Agricultura que establece normas de calidad del aire para MPS en la cuenca del río Huasco III región para la concentración de hierro, los datos recolectados se encuentran dentro del límite permitido.

VIII.5. Registro de los parámetros meteorológicos y analizarlos niveles de deposición de material particulado (MP2,5, MP10 y MPS).

Promedios Meteorológicos:

Durante el periodo 2023-2024 de monitoreo de calidad de aire y meteorología, se llevó a cabo un registro mensual de los parámetros meteorológicos como se observa en las siguientes tablas:

Tabla 18. Promedios mensuales meteorológicos del periodo 2023 - 2024 de la estación fija - CEIA.

Estación Fija (CEIA)		2023						2024						
		Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio
Promedios meteorológicos	Temperatura del aire (°C)	17,46	18,83	17,13	17,00	17,96	19,57	21,28	22,61	20,67	19,26	16,07	15,9	14,72
	Humedad relativa (%HR)	68,89	69,47	72,46	73,99	70,95	71,98	74,03	73,97	76,08	74,57	74,21	72,03	68,62
	Presión del aire (hPa)	1014,65	1014,34	1014,21	1014,52	1013,53	1012,38	1012,41	1011,84	1012,31	1013,18	1014,78	1015,33	1016,08
	Velocidad del viento (m/s)	0,88	0,98	1,18	1,24	1,34	1,33	1,30	1,09	0,94	0,84	0,8	0,71	0,78
	Velocidad máxima del viento (m/s)	2,82	3,03	3,49	3,58	3,85	3,79	3,64	3,17	2,79	2,59	2,58	2,41	2,73

Tabla 19. Promedios mensuales meteorológicos registrados en la Estación Móvil - La Negra

Estación móvil - La Negra		2023			
		Julio	Agosto	Septiembre	Octubre
Promedios meteorológicos	Temperatura del aire (°C)	13,59	14,27	15,06	15,05
	Humedad relativa (%HR)	72,23	72,23	69,09	70,60
	Presión del aire (hPa)	963,61	963,26	962,90	963,04
	Velocidad del viento (m/s)	1,09	1,40	1,54	1,64
	Velocidad máxima del viento (m/s)	3,47	4,10	4,26	4,23

Tabla 20. Promedios meteorológicos mensuales registrados en la Estación Móvil - Universidad Santo Tomás.

Estación móvil Universidad Santo Tomás		2023	2024				
		Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Promedios meteorológicos	Temperatura del aire (°C)	20,24	21,38	22,55	20,7	19,24	16,26
	Humedad relativa (%HR)	71,75	72,9	73,72	74,79	73,35	73,87
	Presión del aire (hPa)	1010,25	1008,67	1008,46	1008,78	1009,64	1009,67
	Velocidad del viento (m/s)	1,23	1,23	1,13	1,04	1,00	1,06
	Velocidad máxima del viento (m/s)	4,09	4,06	3,64	3,34	3,24	3,43

Tabla 21. Promedios meteorológicos mensuales registrados en la Estación Móvil - 3ra Compañía de bomberos.

Estación Móvil 3ra Compañía de Bomberos		2024	
		Mayo	Junio
Promedios meteorológicos	Temperatura del aire (°C)	15,28	15,33
	Humedad relativa (%HR)	74,99	73,20
	Presión del aire (hPa)	1008,65	1008,61
	Velocidad del viento (m/s)	1,25	1,33
	Velocidad máxima del viento (m/s)	2,96	3,11

VIII.6. Series de tiempo de Material particulado (Gravimetría).

A continuación, se presentan los registros en series de tiempo de Material particulado $MP_{2.5}$ y MP_{10} (Figura 23 y 24) y Partículas Totales en Suspensión (PTS) (Figura 25) del periodo 2023 - 2024, obtenido a través de los equipos recolectores instalados en el CEIA.

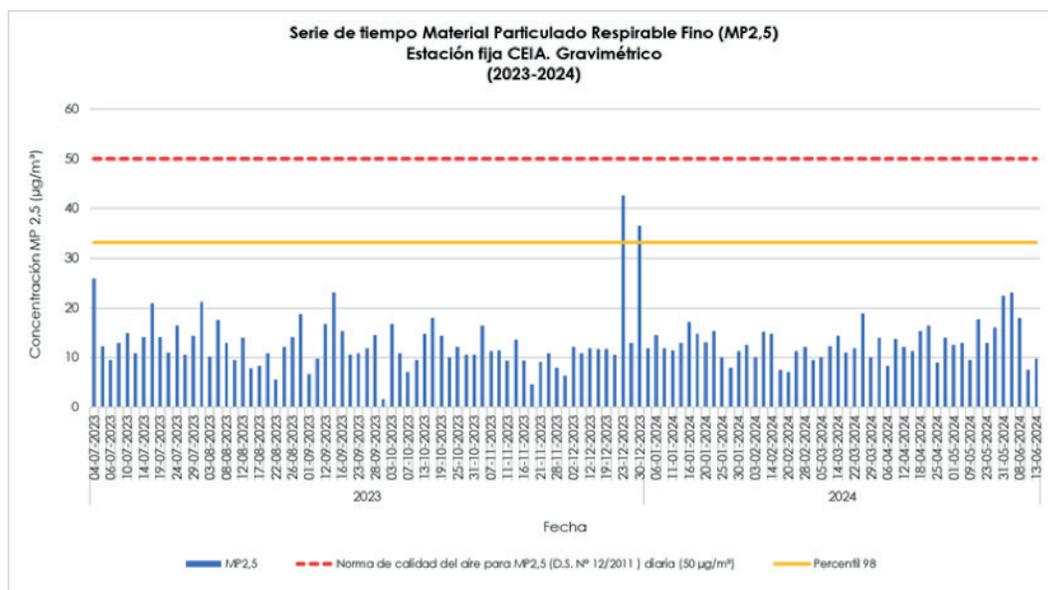


Figura 23. Serie de tiempo de material particulado respirable fino ($MP_{2.5}$) del periodo 2023 - 2024. Estación fija- Gravimetría. Figura 23. Serie de tiempo de material particulado respirable fino ($MP_{2.5}$) del periodo 2023 - 2024. Estación fija- Gravimetría.

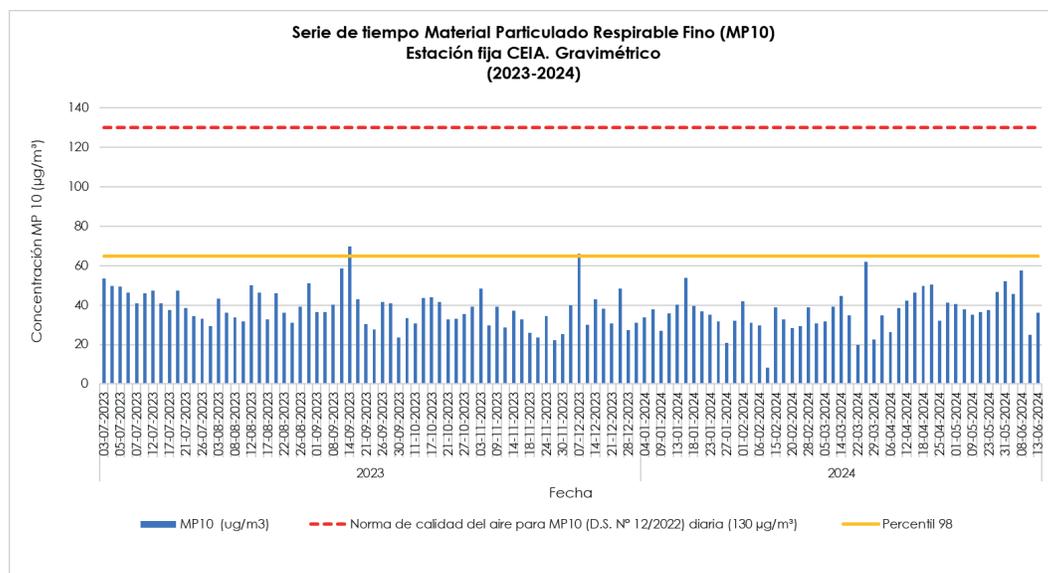


Figura 24. Serie de tiempo de material particulado respirable fino (MP_{10}) del periodo 2023 - 2024. Estación fija- Gravimetría.

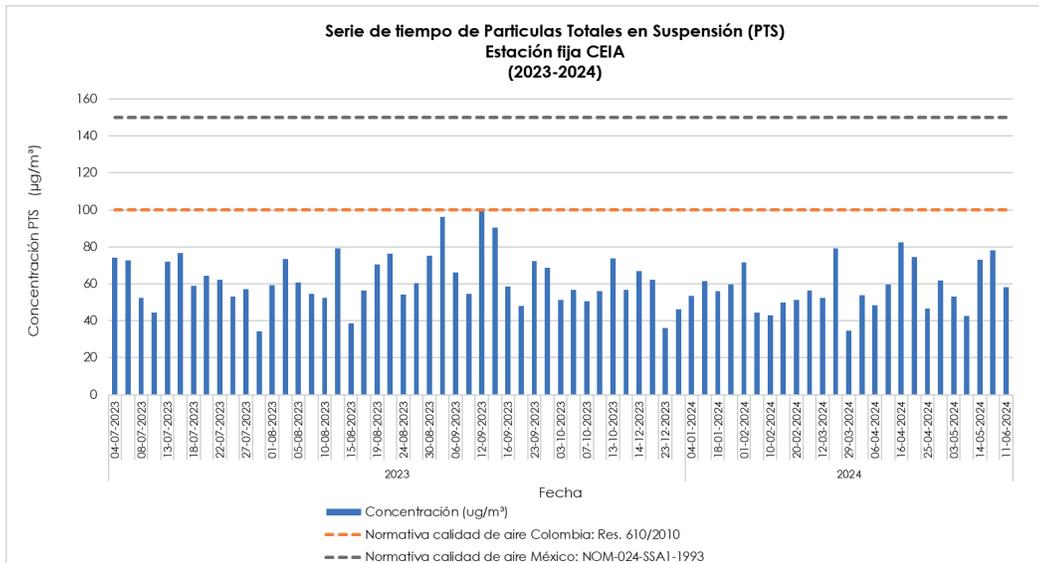


Figura 25. Serie de tiempo de partículas totales en suspensión (PTS) del periodo 2023 - 2024. Estación fija- Gravimetría.

De acuerdo con los datos registrados y comparados con las normativas nacionales anuales y diarias vigentes; se observa que para los niveles medidos de $\text{MP}_{2.5}$ se registraron seis superaciones de la normativa anual. Sin embargo, no se observaron superaciones en la normativa diaria. La normativa indica que existe superación cuando el percentil 98 de los promedios diarios registrados durante un año, es mayor a 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, o cuando el promedio trianual de las concentraciones anuales supera los 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

En cambio, para los niveles medidos de MP_{10} se registraron diez superaciones de la normativa anual. No se observaron superaciones en la normativa diaria. De acuerdo a la normativa se considera una superación cuando antes de terminar un año calendario, el número de días con concentraciones diarias registradas, superan los 7 días con concentraciones mayores o igual a 130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

En cuanto a los niveles de PTS no se observó superación en relación a las normativas internacionales con las cuales se compararon, ya que no existen normativas nacionales para este contaminante.

VIII.7. Material Particulado Sedimentado (MPS).

También durante este periodo se llevó a cabo el muestreo y monitoreo de Material Particulado Sedimentado que llega por dispersión al colector que está instalado en el CEIA, del cual se obtiene la Tasa de depositación mediante el método gravimétrico. Los resultados obtenidos durante todo el periodo de monitoreo se presentan en la tabla 22 y figura 26.

Tabla 22. Tasa de depositación mensual del Material Particulado Sedimentado.

Año	Mes	Tasa de depositación (mg/m ² día)	Norma de referencia - New South Wales (133 mg/m ² *día)	Norma mensual de referencia (Wyoming, EEUU), de 170 mg/m ² *día
2023	Septiembre	37,44	133	170
	Octubre	68,30	133	170
	Noviembre	47,59	133	170
	Diciembre	40,81	133	170
2024	Enero	58,28	133	170
	Febrero	39,24	133	170
	Marzo	32,16	133	170
	Abril	40,51	133	170
	Mayo	47,79	133	170
	Junio	30,68	133	170

Los resultados se encontraron dentro de los límites permitidos como la normativa internacional de referencia mensual de Wyoming, EEUU y de New South Wales. Solo se observó un aumento en los meses de octubre 2023 y enero 2024.

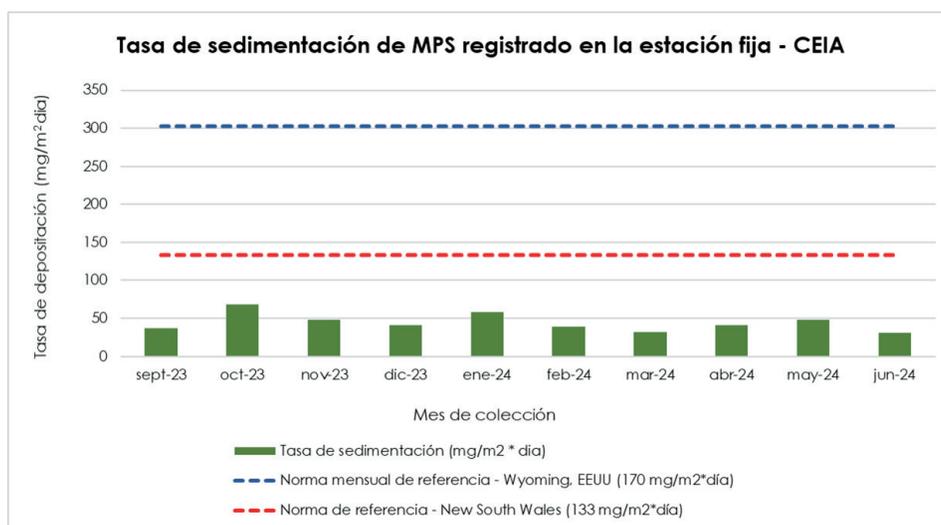


Figura 26. Tasa de sedimentación de MPS, estación fija con el Colector de MPS de septiembre 2023 a junio 2024.

VIII.8. Análisis mensual del periodo 2023 - 2024 del Monitoreo de Material Particulado.

Los resultados de los promedios mensuales de la concentración de material particulado 2,5 micras durante el monitoreo, se detectó la superación de la normativa chilena anual en tres oportunidades, en el mes de septiembre 2023 y en los meses de mayo y junio 2024. En relación, a la concentración de MP_{10} y PTS no se detectó superación de normativas vigentes actuales en Chile e internacionales, respectivamente.

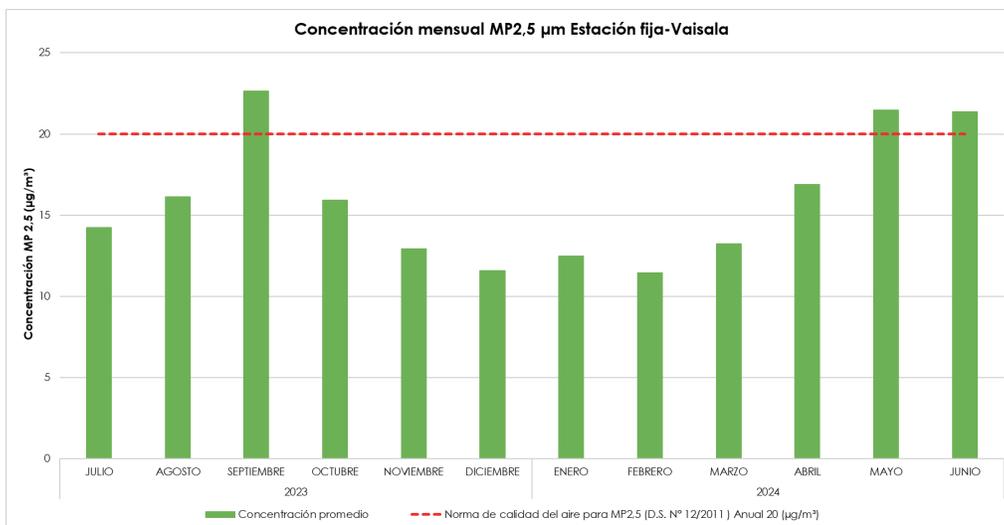


Figura 27. Gráfico de promedios mensuales de material particulado respirable fino ($MP_{2.5}$) del periodo 2023-2024. Estación Fija - Vaisala.

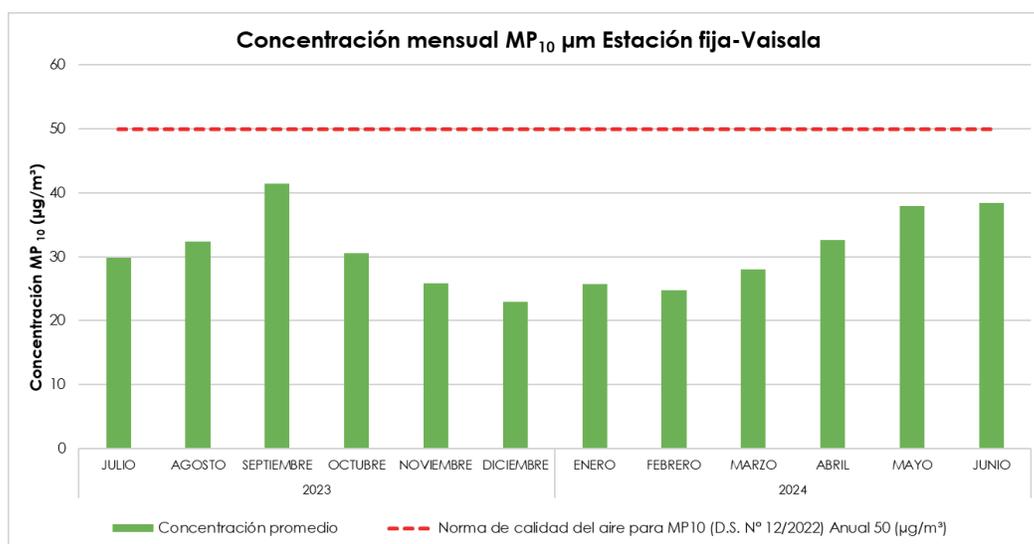


Figura 28. Gráfico de promedios mensuales de material particulado respirable fino (MP_{10}) del periodo 2023-2024. Estación fija - Vaisala.

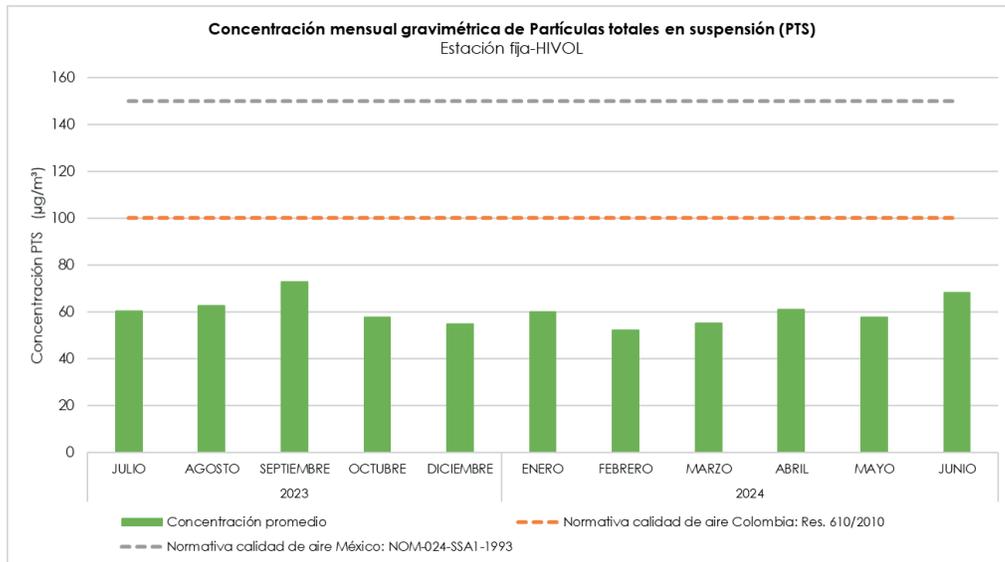


Figura 29. Gráfico de promedios mensuales de partículas totales en suspensión (PTS) del periodo 2023-2024. Estación fija - Vaisala

VIII.9. Análisis comparativo de lo monitoreado en la Estación fija y la Estación móvil.

Se realizaron análisis comparativos de las concentraciones de material particulado y de gases contaminantes, con los datos obtenidos de la estación fija ubicada en el CEIA y la estación móvil que estuvo instalada en diferentes puntos de monitoreo (Parque industrial La Negra - Universidad Santo Tomás- Estación de Bomberos).

A continuación, se presentan los gráficos de barras asociados al análisis comparativo.

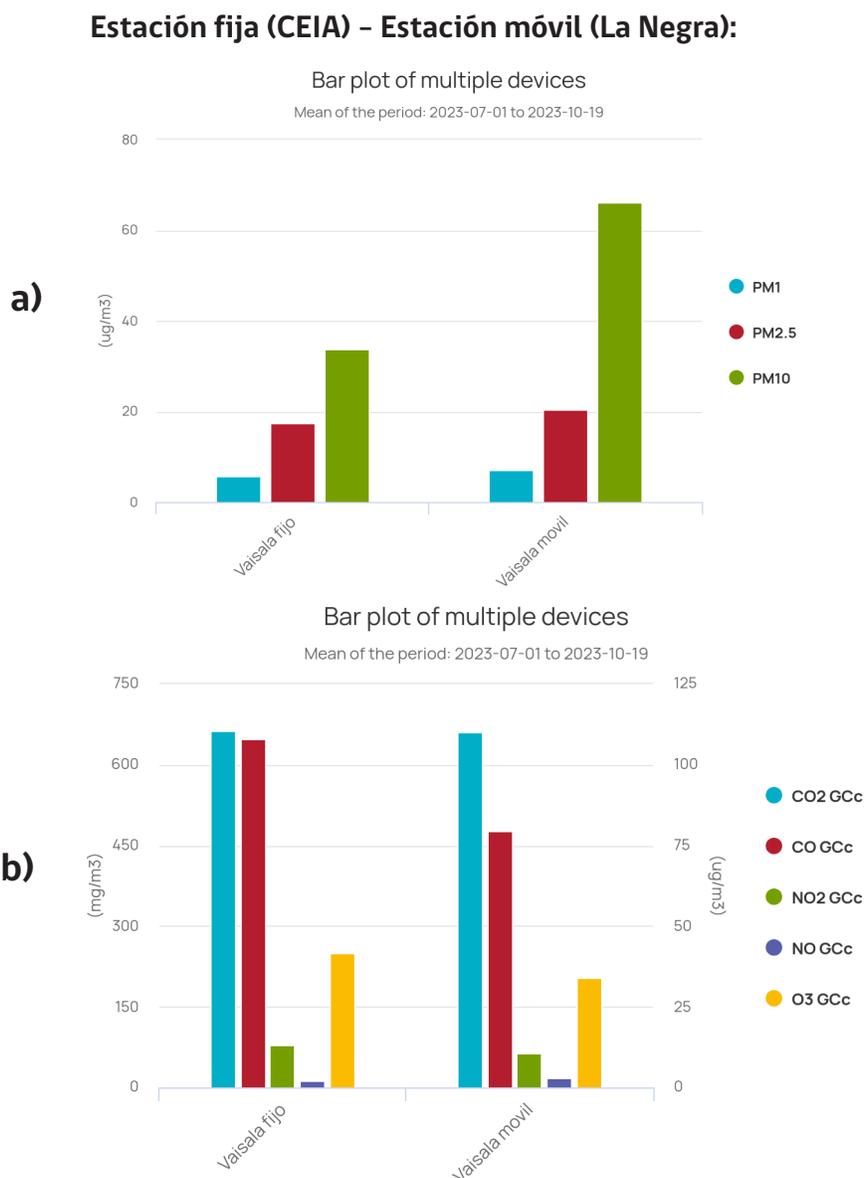


Figura 30. Gráficos comparativos entre la Estación fija (CEIA) y móvil (La Negra) **a)** Comparativa de Material particulado **b)** Comparativa de Gases contaminantes.

Estación fija (CEIA) – Estación móvil (Universidad Santo Tomás):

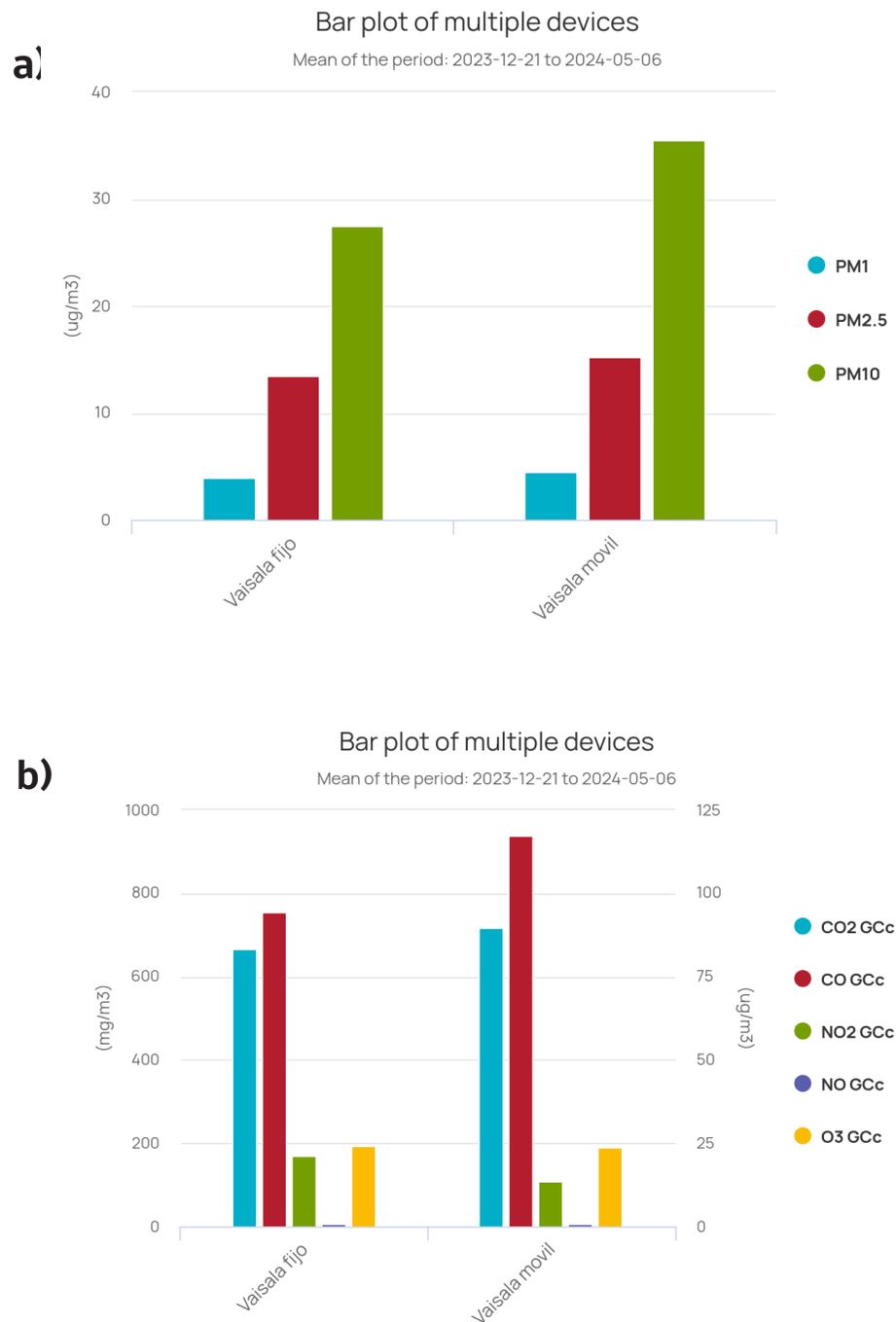


Figura 31. Gráficos comparativos entre la Estación fija (CEIA) y móvil (Universidad Santo Tomás) a) Comparativa de Material particulado b) Comparativa de Gases contaminantes.

Estación fija (CEIA) y Estación móvil (3era Compañía de Bomberos):

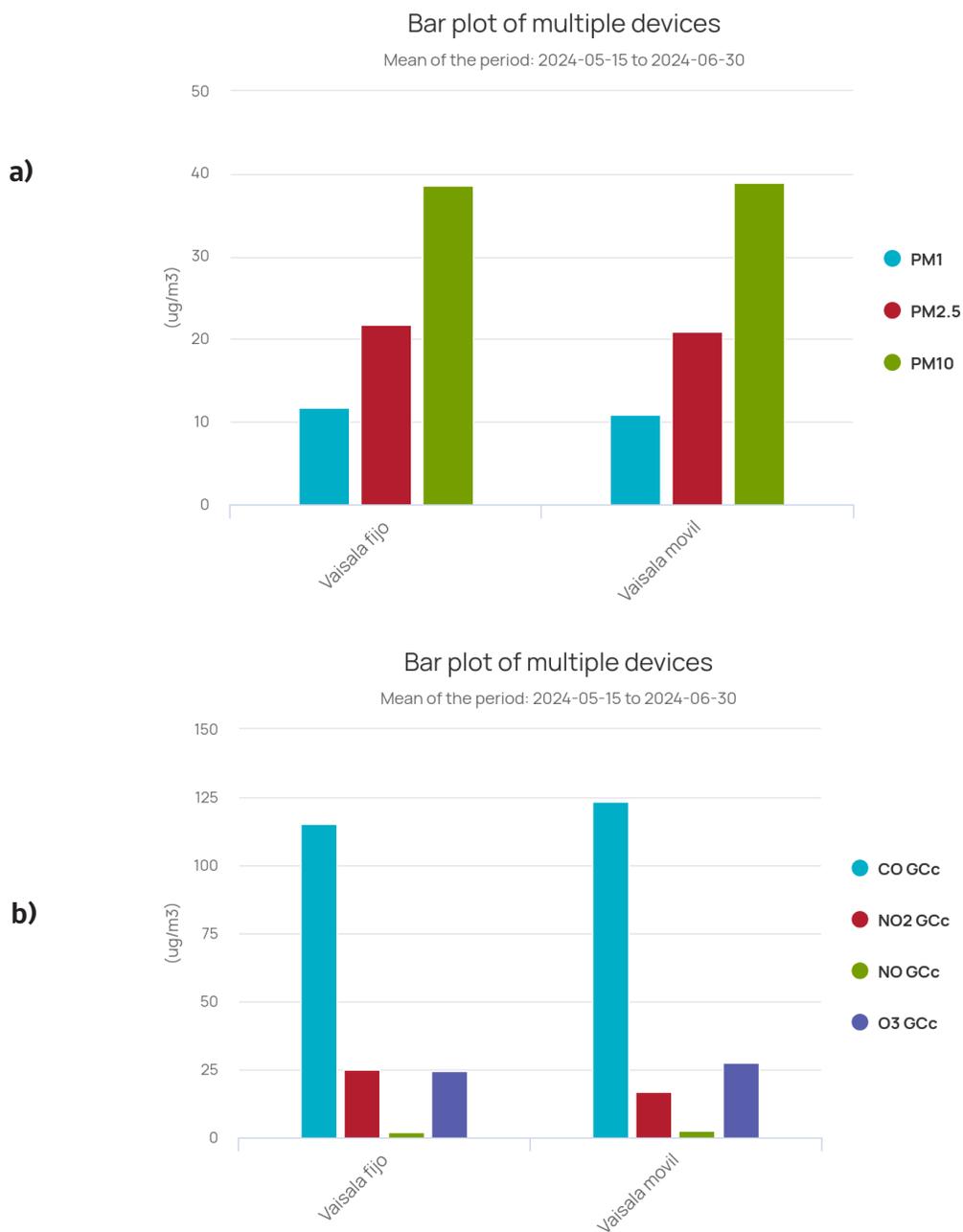


Figura 32. Gráficos comparativos entre la Estación fija (CEIA) y Estación móvil (3era Compañía de Bomberos) **a)** Comparativa de Material particulado **b)** Comparativa de Gases contaminantes.

Las mediciones realizadas en los distintos puntos de la ciudad, comparados con los datos obtenidos en el CEIA no mostraron diferencias significativas y la tendencia en las concentraciones de material particulado y gases fue la misma en ambas estaciones. En los tres análisis comparativos se puede observar que la tendencia respecto al comportamiento de las concentraciones es similar en los cuatro puntos monitoreados.

VIII.10. Análisis anual del periodo monitoreado de material particulado y gases.

A continuación, en las tablas 23 a 25, se presenta la información resumida con el propósito de mostrar de manera global los monitoreos en cada estación durante todo el periodo de monitoreo, incluyendo las normativas asociadas correspondientes.

Tabla 23. Resumen Monitoreo de calidad del aire del material particulado 2,5 micras. **a)** Análisis del Monitoreo continuo con las normativas primarias de calidad del aire para MP_{2,5} Diaria. **b)** Análisis del monitoreo discreto con las normativas primarias de la calidad del aire para MP_{2,5} Anual.

a)

Estación	Periodo	MP _{2,5} Vaisala ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
		Percentil 98 24hrs	
		Valor monitoreado	Porcentaje de la Norma (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Estación Fija CEIA	Julio 2023 - junio 2024	37,06	74,1 %

b)

Estación	Periodo	MP _{2,5} Gravimetría ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
		Valor promedio monitoreado	Porcentaje de la Norma (20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Estación Fija CEIA	Julio 2023 - junio 2024	12,84	64,9 %

Tabla 24. Resumen Monitoreo de Calidad del Aire del material particulado 10 micras. a) Análisis del Monitoreo continuo con las normativas primarias de calidad del aire para MP₁₀ Diaria. b) Análisis del monitoreo discreto con las normativas primarias de la calidad del aire para MP₁₀ Anual.

a)

Estación	Periodo	MP10 Vaisala ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
		Percentil 98 24hrs	
		Valor monitoreado	Porcentaje de la Norma (130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Estación Fija CEIA	Julio 2023- junio 2024	57,6	44.3%

b)

Estación	Periodo	MP10 Gravimetría ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
		Valor promedio monitoreado	Porcentaje de la Norma (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Estación Fija CEIA	Julio 2023- junio 2024	37,9	75,7%

En base a este análisis normativo se observa que los porcentajes obtenidos asociados a las diversas normas ambientales se encuentran bajo los estándares nacionales. Sin embargo, cabe destacar que para material particulado MP10, las concentraciones obtenidas mediante gravimetría, al analizarse con la normativa anual (monitoreo discreto) arroja un porcentaje de 75,7% el cual se aproxima a la categoría de zona latente, dado que la medición de las concentraciones de los contaminantes se encuentran entre el 80%-100% de la norma, se declara zona latente.

Tabla 25. Resumen Monitoreo de Calidad del Aire de Gases contaminantes. **a)** Análisis del Monitoreo con las normativas primarias de calidad del aire nacionales de 1 hora para Monóxido de Carbono (CO). **b)** Análisis del monitoreo con las normativas primarias de la calidad del aire nacionales de 1 hora para Dióxido de Nitrógeno (NO₂). **c)** Análisis del monitoreo con las normativas primarias de la calidad del aire nacionales de 8 horas para Ozono (O₃).

a)

Estación	Periodo	Monóxido de Carbono - CO ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$)	
		Percentil 99 1 hora	
		Valor monitoreado	Porcentaje de la Norma (30mg/m ³ N)
Estación Fija CEIA	Julio 2023 - junio 2024	0,33	1,1%

b)

Estación	Periodo	Dióxido de Nitrógeno - NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$)	
		Percentil 99 1 hora	
		Valor monitoreado	Porcentaje de la Norma (400 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$)
Estación Fija CEIA	Julio 2023 - junio 2024	42,81	10,6%

c)

Estación	Periodo	Ozono - O ₃ ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$)	
		Percentil 99 8 hora	
		Valor monitoreado	Porcentaje de la Norma (120 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$)
Estación Fija CEIA	Julio 2023- junio 2024	51,79	43,2%

En cuanto a los porcentajes alcanzados de los gases contaminantes normados, estos se encuentran dentro de los límites permisibles, y con menos del 50 % del alcance a las normativas.

VIII.11. Diagnóstico e identificación de las posibles fuente de contaminación.

Identificación de las posibles fuentes de contaminación

Para poder identificar las posibles fuentes de contaminación que rodean al establecimiento CEIA, es necesario realizar un modelo conceptual del problema de contaminación, que consiste en describir de manera escrita o gráfica la secuencia de los contaminantes desde la fuente (o fuentes) hasta los receptores genéricos de interés, según la secuencia:

FUENTE ➡ LIBERACIÓN ➡ MIGRACIÓN ➡ PUNTO DE CONTACTO ➡ RECEPTOR.

En la **Figura 33** se presenta el Modelo conceptual diseñado para este estudio.

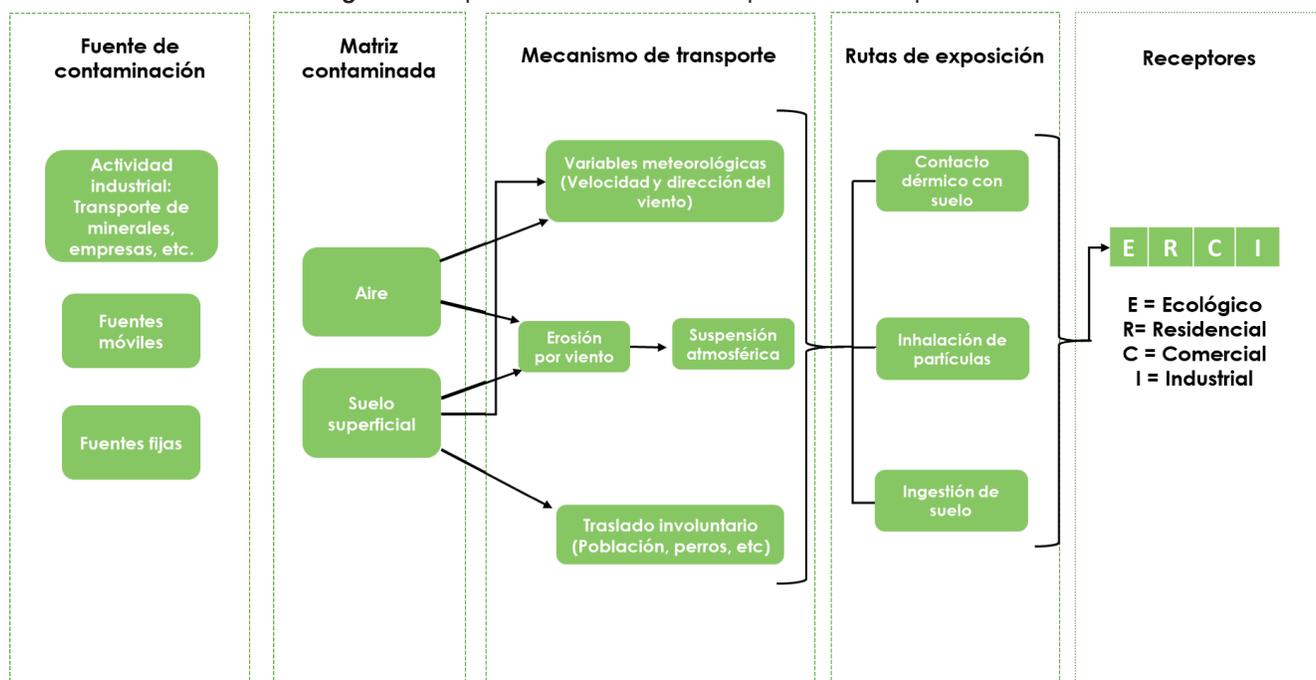


Figura 33. Modelo conceptual del problema de Contaminación presente en la zona del establecimiento CEIA.

De acuerdo a la figura anterior; las posibles fuentes de contaminación que fueron identificadas en la zona, están relacionadas con la actividad industrial de transporte de minerales y empresas de transporte en general. También identificamos fuentes móviles, evidenciadas por transporte público y privado de la zona, especialmente camiones que se trasladan al puerto y tránsito vehicular residencial (autos, camionetas, entre otros). La contaminación que generan las fuentes móviles está relacionada con las emisiones abrasivas por la fricción de los frenos y neumáticos con el pavimento, que aumentan las partículas finas emitidas por motores de combustión interna tales como vehículos diésel y de gasolina de inyección directa, sin filtros en sus sistemas de escape. Por último, las llamadas fuentes fijas, que puedan generar contaminación en la zona, que corresponden a establecimientos de comidas con hornos, parrillas y otros.

IX. HITO 5: DISEÑO DEL PROGRAMA DE MONITOREO DE CALIDAD DE AIRE.

IX.1. Planificación de las futuras medidas medioambientales de calidad de aire y desarrollo de un plan de gestión de monitoreo.

IX.1.1. Ampliación de la red de vigilancia de calidad de aire en Antofagasta.

La ejecución de este proyecto, permitió realizar el monitoreo continuo de material particulado de $MP_{2,5}$, MP_{10} , partículas totales en suspensión (PTS) y material particulado sedimentable (MPS) durante un año.

Durante todo el periodo de monitoreo, se realizó un análisis comparativo con las normativas primarias de calidad de aire tanto nacionales como internacionales, con el fin de observar si los límites máximos permitidos son superados. Por medio de los análisis comparativos en relación al periodo anual y diario, no se evidenció la superación de normativas para el monitoreo continuo (Estación Vaisala, medición en tiempo real), para el $MP_{2,5}$ y MP_{10} .

Sin embargo, el análisis para el monitoreo discreto (Gravimétrico) para el material particulado respirable MP_{10} , el porcentaje respecto al análisis realizado con la normativa primaria de calidad de aire anual de acuerdo al percentil 98, alcanzó un 75,7%, el cual es cercano a los niveles de una zona latente, donde se considera que si las concentraciones de los contaminantes se encuentran dentro de un rango entre el 80% - 100% de la norma, se declara zona latente.

Es importante destacar, que según las normativas primarias de calidad de aire asociadas a material particulado tanto para $MP_{2,5}$ como para MP_{10} se establecen criterios de superación con el análisis de promedios de concentraciones diarios, anuales y trianuales. De acuerdo a la normativa para MP_{10} , se considerará sobrepasada la norma primaria de calidad ambiental como concentración anual, cuando el promedio aritmético de tres

años calendarios consecutivos, en cualquier estación monitorea calificada como EMRP, sea mayor o igual a 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En cuanto a la normativa para $MP_{2,5}$ se considerará sobrepasada cuando el promedio trianual de las concentraciones anuales sea mayor a 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en cualquier estación monitorea calificada como EMRP.

Considerando los requisitos de las normativas y los resultados obtenidos, se propone en este Plan de gestión, ampliar el tiempo de monitoreo en el CEIA por 24 meses y además aumentar el número de equipos recolectores de material particulado con la instalación de 4 nuevos puntos de monitoreo en la ciudad de Antofagasta. Si bien se llevó a cabo el análisis anual y diario, es necesario generar el análisis trianual junto con la ampliación de la red de monitoreo de calidad de aire en Antofagasta para evaluar y comparar los resultados con las normativas que establecen registros para periodos de tres años.

El objetivo principal del presente plan es proponer un diseño de red para el monitoreo de calidad de aire en la ciudad de Antofagasta, con el propósito de evaluar de manera precisa la calidad de aire en el área urbana.

Los beneficios de la implementación y ampliación de la red de monitoreo de calidad del aire son múltiples y se enfocan en obtener información relevante en materia ambiental para la toma de decisiones y analizar el cumplimiento de las regulaciones ambientales nacionales e internacionales para proteger la salud de la población.

Se define como red de monitoreo de la calidad del aire, a la articulación de dos o más equipos

e instrumentos, permitiendo la medición de la concentración de contaminante teniendo presente una mayor cobertura de superficie geográfica.

Zona de emplazamiento de la red de monitoreo de Calidad de Aire

Para determinar los sitios de monitoreo se consideraron los siguientes criterios:

- Representatividad: Se consideran centros educacionales los cuales se encuentran emplazados en el sector norte, centro y sur con el fin de tener una red de monitoreo en los diversos sectores de la ciudad y analizar el impacto asociado.
- Fuentes de Emisión: Al estar distribuidas en diversos sectores de la ciudad, permitiría identificar la afectación de las diversas fuentes industriales y fuentes móviles de la ciudad.
- Topografía y Clima: En cuanto a la topografía y clima de los sitios propuestos se considera un lugar apropiado y seguro para la instalación de los equipos de monitoreo de calidad de aire.
- Accesibilidad y Seguridad: Dado que se deben resguardar los equipos, se consideran estos establecimientos adecuados para que las estaciones de monitoreo sean accesibles para mantenimiento y seguros contra vandalismo o interferencia (Figura 34).

A continuación, se presenta la georreferenciación de los lugares propuestos para el emplazamiento de las estaciones de Monitoreo de calidad de Aire en la ciudad de Antofagasta:

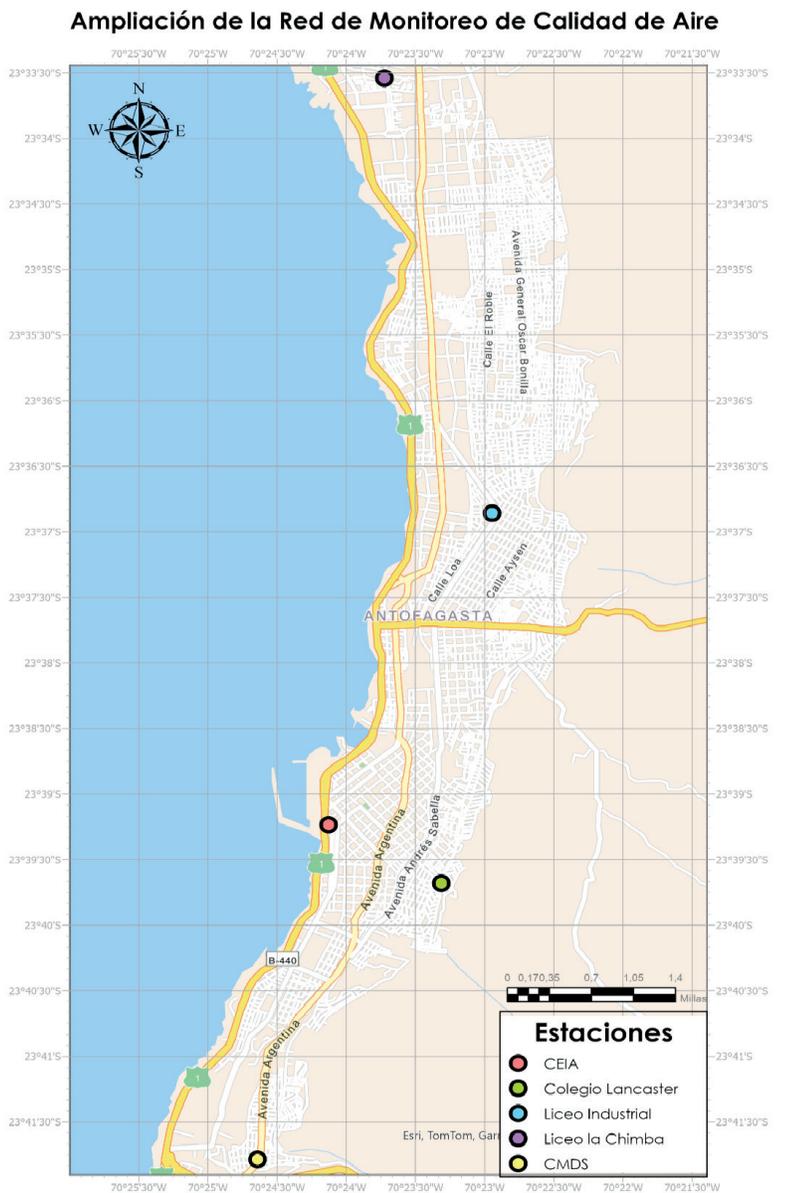


Figura 34. Red de monitoreo de Calidad de Aire en Antofagasta.
Fuente: Elaboración propia (ArcGIS Pro).

IX.1.2. Propuesta de instalación de los equipos de monitoreo

Los resultados de los análisis químicos realizados en muestras de filtros recolectados por los equipos de muestreo de material particulado $MP_{2,5}$ y MP_{10} presentan un contenido de Arsénico (As) que supera, solo en algunos meses, la concentración máxima establecida por la Norma primaria de calidad de aire de As, para MP_{10} , aprobada recientemente.

Además, el análisis de los resultados químicos de las muestras recolectadas de material particulado $MP_{2,5}$, MP_{10} , partículas totales en suspensión (PTS) y material particulado sedimentable (MPS), evidenció la presencia de algunos metales como Aluminio, Hierro, Cobre, Zinc, Níquel y Cromo.

Por otro lado, el análisis comparativo de los elementos químicos identificados en muestras de Material Particulado Sedimentado (MPS), comparado con normativas internacionales, como la Ordenanza Suiza y el Primer Reglamento Alemán, evidenció una superación en las concentraciones máximas permitidas de algunos elementos contaminantes como el Plomo, Arsénico, Cadmio, Níquel y Zinc.

La composición mineralógica del polvo recolectado en la entrada de colegio (garita de seguridad y entrada del gimnasio), evidenció principalmente compuestos de tipo mineral relacionados con Aluminio y Silicio (Albita, Moscovita, Ortoclasa y Clorita), Hierro (Magnetita), Silicio (Cuarzo), sales de Calcio (Calcita, Anhidrita y Yeso), Sodio (NaCl). Además, se evidenció en estas muestras la presencia de minerales relacionado con sulfuros de cobre (Calcopirita y Covelina) y con sulfuros de Zinc (Wurtzita y Esfalerita).

Con los resultados descritos anteriormente, se hace necesario seguir recolectando el material particulado con equipos certificados y con representatividad poblacional. La zona de emplazamiento fue determinada, considerando tener una mayor y óptima cobertura de la dispersión del material particulado

Aunque sabemos que la ampliación la red de vigilancia de calidad de aire implica un alto costo, esta inversión resulta necesaria para obtener la información mínima necesaria, con el fin de evaluar dinámicas de contaminación en los distintos puntos de la ciudad y comparar con los niveles registrados en el establecimiento escolar CEIA.

La comparación de la calidad de aire en los distintos puntos de monitoreo permitirá identificar las áreas de la ciudad con niveles altos de contaminantes que pueden causar enfermedades respiratorias, cardiovasculares y otros problemas de salud. La información obtenida a través de esta red es fundamental, en nuestra región que posee características únicas, para la investigación sobre efectos de la contaminación del aire, sobre el medio ambiente y la salud humana; además proporcionaría información base para el desarrollo de nuevas tecnologías para su mitigación.

Los equipos que proponemos para ampliar la red de monitoreo son de dos tipos: continuo y discreto. Los sistemas continuos, proporcionan mediciones en tiempo real de parámetros meteorológicos y de calidad de aire como $MP_{2,5}$ y MP_{10} , y gases tales como Monóxido de Carbono (CO), Ozono (O₃), Dióxido de Nitrógeno (NO₂) y Dióxido de Azufre (SO₂). El monitoreo discreto utiliza muestreadores activos (usan bombas para aspirar aire) o pasivos que permiten tomar muestras en el lugar, las cuales son enviadas para análisis químicos a laboratorios para determinar el contenido o composición del material particulado. A continuación, se presenta una descripción general de los equipos propuestos para la ampliación de la red de monitoreo de calidad del aire en la ciudad de Antofagasta:

Monitoreo Continuo – Equipos De Monitoreo En Tiempo Real

- Estación compacta BWS500 con sensor meteorológica (WXT536) y sensores de calidad de aire como AQT530 y GMP252.

Monitoreo Discreto – Equipos Recolectores De Material Particulado

- BGI - PQ200, Muestreador de material particulado de 2,5 μm
- Muestreador de alto volumen para material particulado 10 μm
- Material particulado Sedimentable (MPS)

Equipo de diagnóstico de alta gama

- Lidar WINDCUBE
- Monitor Ambiental de Multi-Metales XACT 625i

La distribución de los equipos para implementar la ampliación de la red de monitoreo en los puntos identificados de acuerdo a los criterios establecidos anteriormente (Figura 34), se presenta a continuación:

Estación de monitoreo Liceo La Chimba

En este punto se instalará un equipo de monitoreo continuo en tiempo real, en el cual se midan todos los parámetros de calidad de aire y además los meteorológicos, con el fin de establecer una comparación del estado de la calidad de aire en esta zona, debido a la presencia del ex Vertedero de la Chimba. Con este equipo podremos monitorear la calidad de aire, principalmente usando la medición de los gases en la ciudad de Antofagasta, y ver hasta qué punto afecta la dispersión de los posibles contaminantes.

Junto a lo mencionado anteriormente, se instalarán los equipos de monitoreo discreto de material particulado:

- Muestreador de alto volumen para material particulado 10 μm
- BGI - PQ200, Muestreador de material particulado de 2,5 μm
- Recolector de Material Particulado Sedimentable (MPS)

Para caracterizar y cuantificar el contenido del material particulado, mediante análisis químico y de difracción de rayos X y para calcular como varia la tasa de depositación en este punto del MPS, en el caso que ocurran los incendios en el ex - vertedero.

Estación de monitoreo Liceo Industrial

En este punto se instalará un equipo de monitoreo continuo en tiempo real, en el cual se midan todos los parámetros de calidad de aire y además los meteorológicos, debido a que en esta zona se ha observado en ocasiones emanación de distintos gases. La medición de gases permitirá hacer un control de los gases y alertar a la población con un tiempo anticipado.

En este punto, además se instalarán los equipos de monitoreo discreto de material particulado:

- Muestreador de alto volumen para material particulado 10 μm
- BGI - PQ200, Muestreador de material particulado de 2,5 μm
- Recolector de Material Particulado Sedimentable (MPS)

Con el fin de caracterizar y cuantificar el contenido del material particulado (MP2,5 y 10 micras), mediante análisis químico y de difracción de rayos X y calcular la tasa de depositación del MPS.

CMDS Coviefi

En este punto, al igual que en los puntos anteriores de la Chimba y Liceo Industrial se instalará un equipo de monitoreo continuo en tiempo real, en el cual se midan todos los parámetros de calidad de aire y además los meteorológicos, con el fin de establecer una comparación del estado de la calidad de aire en esta zona, y la influencia que tiene la cercanía al sector industrial de La Negra, en la dispersión de contaminantes a la ciudad, debido a que la mayoría de las masas de aire provienen del sector suroeste y oeste, pero existe la posibilidad de que masas de aire provenientes de La Negra alcancen la zona.

También deberán ser instalados los equipos de monitoreo discreto de material particulado:

- Muestreador de alto volumen para material particulado 10 μm
- BGI - PQ200, Muestreador de material particulado de 2,5 μm
- Recolector de Material Particulado Sedimentable (MPS)

Con el fin de caracterizar y cuantificar el contenido del material particulado (MP2,5 y 10 micras), mediante análisis químico y de difracción de rayos X y calcular la tasa de depositación del MPS.

Colegio Lancaster

En este punto se instalará el equipo recolector de material particulado sedimentable para determinar la dinámica de la tasa de depositación en este punto, y evaluar la dispersión de contaminantes del material particulado desde el norte, noreste y sureste. El MPS recolectado será caracterizado y cuantificado mediante análisis químico y de difracción de rayos X, para luego ser comparados con los resultados obtenidos de los demás puntos establecidos en la red de monitoreo.

Equipos De Diagnóstico De Alta Gama

Para comprender y entender la dinámica de la calidad del aire es necesario realizar mediciones en diferentes partes de la atmósfera. La combinación de las mediciones en superficie con la elaboración de perfiles de la capa límite proporciona información fiable sobre la que se puede actuar con confianza, lo que permite a las comunidades tomar mejores decisiones.

La ubicación del equipo **Lidar WindCube**, deberá ser emplazado en un lugar donde permita la conexión con los sensores de las estaciones de monitoreo continuo, ya que debe recibir datos de MP y retrodispersión para realizar los cálculos a través de un factor de correlación y de esta manera al identificar los lugares de emisión que originan la contaminación.

- **Monitoreo De Metales En El Aire**

En esta propuesta de Plan de monitoreo, se sugiere incluir el **Monitor Ambiental de Multi-Metales XACT 625i**, un equipo avanzado que permite medir de forma semicontinua los niveles de metales en el aire, ya que utiliza un rollo de filtro de muestra y realiza el análisis por fluorescencia de rayos X no destructiva (XRF). Este equipo permite caracterizar los niveles de concentración contaminantes asociados a MP10, en especial de Arsénico (As), Cobre (Cu), Plomo (Pb), entre otros, con el objeto de comprender la dinámica atmosférica de los metales y metaloides, puede aportar a generar antecedentes que aporten al proceso de elaboración de la nuevas Normas Primaria de Calidad de aire a nivel nacional.

El Monitor Ambiental de Multi-Metales XACT 625i será instalado por un periodo de cuatro meses en cada punto establecido en la red de monitoreo, con el fin de cuantificar in situ los contaminantes de cada zona.

IX.2. Implementación de medidas de mitigación en CEIA

Las medidas de mitigación son acciones o estrategias diseñadas para reducir, controlar o prevenir los efectos negativos de un problema, en este caso, la contaminación atmosférica. En términos generales, la mitigación se refiere a cualquier esfuerzo que busca disminuir la severidad o el impacto de un problema ambiental.

Implementar medidas de mitigación en el área del CEIA son fundamentales dado su impacto profundo en la salud. Las medidas permitirán la reducción de enfermedades respiratorias, debido a que la contaminación del aire, como el Ozono a nivel del suelo, el Dióxido de Nitrógeno y las partículas en suspensión, está vinculada a enfermedades respiratorias crónicas y agudas, como el asma y la bronquitis. Lo mismo pasa con las enfermedades cardiovasculares ya que la contaminación del aire aumenta el riesgo de este tipo de enfermedades, como infartos e hipertensión.

Por otro lado, implementar medidas de mitigación asegura el cumplimiento de normativas de calidad de aire, evitando sanciones y promoviendo prácticas responsables.

El monitoreo durante un año del polvo negro en el establecimiento CEIA evidenció que la concentración de material particulado 2,5 y 10 micras, se encuentran dentro de los límites permitidos por las Normativas ambientales. Sin embargo, este polvo sedimentado o material particulado negro sí presenta algunos elementos químicos contaminantes como Aluminio, Zinc, Cobre y Arsénico, además alto contenido de Hierro.

Para evitar que este polvo pueda afectar a la comunidad educativa del CEIA y se siga depositando o sedimentando en el establecimiento, es que se buscaron alternativas de mitigación y planes de

limpieza constante en el CEIA, ya que estas medidas son una parte esencial de cualquier estrategia integral para crear un entorno más saludable y sostenible.

- **Programa de limpieza CEIA**

El principal objetivo de mantener una limpieza constante en el CEIA, es para evitar que este material fino negro se acumule en el establecimiento. Para esto se propone remover el material particulado depositado en los distintos espacios y fachadas del CEIA a través de aspiración de polvo y luego realizar el lavado de murallas, ventanas y pasillos (se sugiere sacar y eliminar paneles de la entrada, sector Avenida Grecia).

- **Limpieza Trimestral**

Se propone una limpieza trimestral que permita aspirar todo el polvo que se acumule en las ventanas y pisos del colegio. Además, con una barredora se deberá limpiar el piso de los patios del establecimiento. Los puntos críticos de limpieza deben ser:

- Zona Pie
- Salas de clases
- Oficinas de profesores, inspectores y dirección
- Salas de esparcimiento (salas utilizadas como casino)
- Biblioteca y salón principal.
- Zona de almacenaje de utensilios de limpieza y materiales educativos.
- Bodegas
- Baños

- **Limpieza Semestral**

La limpieza semestral se deberá realizar cuando los alumnos, docentes y administrativos estén en período de vacaciones. El procedimiento de esta limpieza consistirá en un lavado profundo de murallas y pisos. Se deberán lavar los techos y eliminar todos los elementos que permitan la acumulación del polvo. Es recomendable que todo el proceso y coordinación de las actividades de limpiezas puedan ser coordinadas por los administrativos del establecimiento en conjunto con el equipo de profesionales de CICITEM, esto con la finalidad de obtener las muestras de polvo para ser analizadas y caracterizadas. Por otro lado, la empresa encargada de realizar esta actividad, se deberá hacer cargo de la gestión y disposición de todos los residuos generados producto de la limpieza. Implementar medidas para evitar los efectos de la polución del aire son necesarias y se deben comenzar aplicar lo antes posible. Dentro de algunas medidas son "designar y ampliar espacios verdes en las zonas urbanas".

- **SISTEMAS DE DESCONTAMINACIÓN CREADO POR BIOFILTRO.**

Implementar medidas para evitar los efectos de la polución del aire son necesarias y se deben comenzar aplicar lo antes posible. Dentro de algunas medidas son "designar y ampliar espacios verdes en las zonas urbanas".

- **Captura de material particulado por vegetación urbana**

Aumento en la vegetación urbana en su función de disminuir los contaminantes, como estrategia de biorremediación en ciudades que presentan contaminación atmosférica³.

El incremento de las superficies de áreas verdes en el sector del CEIA, es una alternativa de bajo costo, con buena aceptación de la sociedad en relación a otros mecanismos más restrictivos y de alto costo.

La efectividad de las áreas verdes en la prestación de servicios ecosistémicos a los ciudadanos, se reafirma con la reducción de contaminantes atmosféricos a través de la captura de gases y partículas que interactúan con la vegetación, trayendo a su vez la disminución de la exposición de la comunidad a estos contaminantes, por medio de la deposición atmosférica (transporte de un punto del aire a la superficie de la planta) y retención, en la que las plantas hacen de superficie de contacto.

De esta manera, características propias de los contaminantes particulados como la carga, la velocidad y dirección del flujo pueden ser cambiados por la vegetación, ya que crean corrientes turbulentas que ayudan con la captura de partículas en tallos, troncos y corteza de las plantas y con mayor extensión, las hojas. El tipo de área vegetativa que es más efectivo para capturar partículas es el estrato arbóreo (árboles con alturas de 5 metros) y arbustivo (vegetación mayor a 1,5 metros y menos a 5 metros), en comparación con pastos, techos y paredes verdes, ya que posee una mayor rugosidad superficial, dependiendo de la estructura y tamaño de las copas se facilita la formación de movimientos turbulentos del aire.⁴

- **Biofiltros.**

La biofiltración es un proceso biológico utilizado para el tratamiento de compuestos orgánicos volátiles e inorgánicos. Para su aplicación se utilizan microorganismos que someten a los contaminantes contenidos en el aire a una degradación biológica. Los biofiltros son también una de las tecnologías más utilizadas para el tratamiento de olores, debido a su excelente efectividad, así como a su facilidad de uso y mantenimiento.

Los sistemas biológicos de filtración de gases son una nueva tecnología desarrollada a nivel mundial, que ha generado buenos resultados en las experiencias realizadas. Sin embargo, al momento de tomar decisiones para la implementación de estos, se deben tener en cuenta algunos factores como temperatura, humedad, acidez, microorganismos y material filtrante, lo que permitirá el éxito del sistema.

³Tiwary, A. &. (2010). Air Pollution: Measurement, modelling and mitigation. Boca Raton: CRC Press.

⁴Barima, Y. A. (2014). Assesing atmospheric particulate matter distribution based on Saturation Isothermal Remanent Magnetization of herbaceous and tree leaves in a tropical urban environment. Science of the total environment. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.082>

Tabla 44. Características de los tres principales sistemas biológicos de tratamiento para emisiones atmosféricas.⁵

TIPO DE SISTEMA	BIOFILTRO	BIOLAVADOR	BIOFILTRO PERCOLADOR
Composición del medio	Microorganismos inmovilizados en soportes naturales con fuente de nutrientes.	Empaque inerte.	Soporte inerte con biopelícula en su superficie.
Circulación de agua	No hay circulación de agua.	Agua en circulación constante.	Circulación de agua continua.
Descripción	Absorción del contaminante en la biopelícula soportada en un medio natural que provee nutrientes a los microorganismos. Se usa un solo reactor.	En una torre de aspersión se disuelven los contaminantes del gas que después son degradados biológicamente en un sistema de lodos activados.	El gas se disuelve en la película de agua para entrar en contacto con los microorganismos. La absorción y la degradación suceden en un solo reactor.
Área de aplicación	Compuestos con concentraciones menores a 1 mg/L con coeficientes de Henry menores a 10.	Compuestos con concentraciones menores a 5 mg/L y coeficientes de Henry menores a 0,01.	Compuestos concentraciones menores a 0,5 mg/L con coeficiente de Henry menores a 1.
Ventajas	Alta superficie de contacto gas-líquido. Fácil arranque y operación. Bajos costos de inversión y operación. Soporta periodos sin alimentación.	Mejor control de la reacción. Posibilidad de evitar acumulación de subproductos. Equipos compactos. Baja caída de presión.	Comparables a las del biolavador.
Desventajas	Poco control sobre los fenómenos de reacción. Baja adaptación a altas fluctuaciones de flujo de gas. Mayor requerimiento de área.	Baja superficie de contacto gas-líquido. No soporta periodos sin alimentación. Genera lodo residual. Arranque complejo. Necesidad de aireación extra. Altos costos de inversión operación y mantenimiento. Necesidad de suministrar nutrientes.	Baja superficie de contacto gas-líquido. Generación de lodos. No resiste periodos sin alimentación. Necesidad de suministrar nutrientes. Arranque complejo. Altos costos de inversión, operación y mantenimiento.

▪ **FiltroVIVO**

Existen también alternativas de filtro vivo mediante el uso de plantas, este sistema de descontaminación creado por FILTROVIVO®, tiene una eficiencia superior al 90% en la eliminación del material particulado (MP) generado por el uso de calefactores domiciliarios que trabajan con diésel, biomasa vegetal y animal u otros combustibles fósiles.

Este tipo de solución permite, además, armonizar y embellecer cualquier área verde, el biofiltro que funciona como el corazón del sistema de descontaminación, está constituido básicamente por jardines verticales en forma de tótems, que capturan el material particulado del humo en su sustrato. En ese lugar se encuentran las raíces de las plantas que descomponen dichas partículas para absorberlas como nutrientes. Esto resulta en una solución basada en la naturaleza, que no genera riles al ser autolimpiante.

⁵Sánchez, S. M., & Orduz, S. A. (2014). Sistemas biológicos para el manejo ambiental: alternativas de control para contaminantes atmosféricos. Revista Agropecuaria y Agroindustrial La Angostura, 1(1), 27-34.

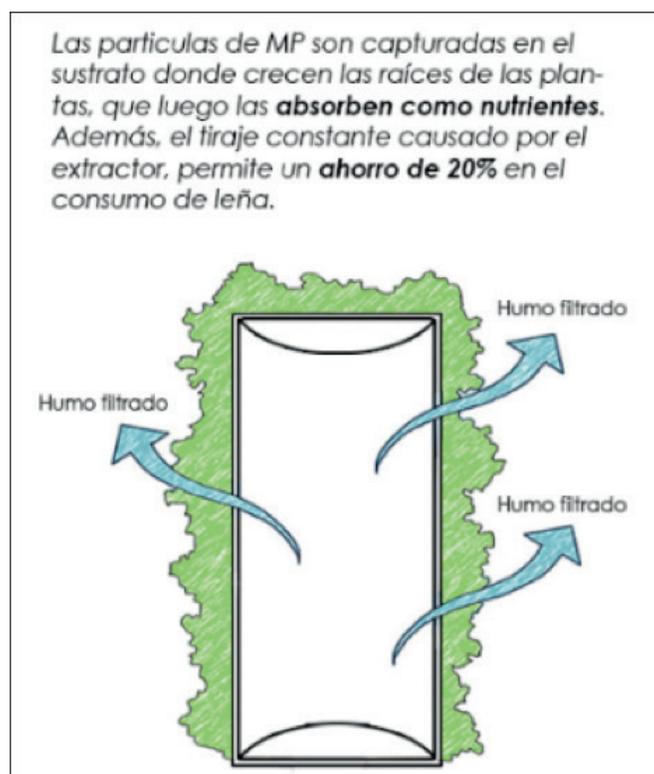


Figura 45. Sistema de funcionamiento de biofiltro en base a jardines verticales.

▪ **Pinturas degradadoras de contaminantes en el aire**

Una de estas medidas innovadoras es el uso de aditivos en las pinturas de las instalaciones del CEIA. En Chile una de las empresas que tiene esta tecnología es "PHOTIO". Photio es un aditivo nanotecnológico que se puede incorporar en pinturas, telas y plástico, y es capaz de degradar gran parte de los gases de efecto invernadero y contaminantes del aire, usando cualquier fuente de radiación, ya sea natural como el sol, o artificial como las ampollitas encendidas. Este aditivo cuenta con catalizadores en escala nanométrica que promueven una reacción fotoquímica en la superficie donde se aplica la cual utiliza como reactivos la humedad del ambiente y los gases contaminantes presentes en el lugar, generando como resultado la degradación y transformación constante de estos últimos en sustancias que ya no representan un peligro a nivel medioambiental o en la salud de las personas. Este proceso se puede entender como un proceso de "estabilización", ya que los gases son oxidados a una especie menos reactiva, y por ende menos tóxica.

Photio, es capaz de tratar de manera indirecta el material particulado, ya que no lo degrada, pero si se encarga de eliminar los gases precursores de estas partículas en suspensión, los cuales promueven su estabilidad en el ambiente. Específicamente promueve la degradación de gases como: Monóxido de Carbono (CO), Óxidos de Nitrógeno (Nox), Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), Metano (CH₄),

Dióxido de Azufre (SO₂), Amoniac (NH₃), bacterias y hongos.

Los principales beneficios son:

- Aire puro
 - No más material en suspensión
 - Mejorar la salud
-
- **Tecnología patentada, denominada VLC**

Las pinturas para pared, las cuales cuentan con la tecnología patentada, denominada VLC degrada contaminantes presentes en el aire. Este tipo de pinturas funciona bajo luz solar directa siendo muy alta a la resistencia de radiación ultravioleta. Además, es una pintura muy resistente a la corrosión de algas y hongos, por lo que es ideal para las construcciones en lugares donde el aire se encuentra contaminado por partículas de gases de escape, Óxidos de Nitrógeno y moléculas de Ozono. Existen esmaltes al agua ambientalmente amigables, utilizan residuos de poliestireno expandido y nano partículas foto catalíticas, otorgan a la superficie donde se aplique la capacidad de descontaminar el ambiente que lo rodea transformando el CO₂ (COX, NOX, SOX) y material particulado fino en compuestos indefensos para la salud. Brinda gran resistencia a los efectos causados por el agua, humedad y otras abrasiones generadas por el clima.

IX.3. Estudios sobre el efecto en la salud de los elementos contaminantes

Los impactos a la salud humana del material particulado, se producen al ingresar al organismo principalmente por medio del aire, causando procesos inflamatorios o variaciones metabólicas en el aparato respiratorio y cardiovascular, lo que influye en la morbilidad y mortalidad de las personas pertenecientes a los grupos más vulnerables de la población.

De acuerdo a lo presentado anteriormente, para el plan de gestión de monitoreo durante los 24 meses, se propone realizar estudios para evaluar cómo afecta este material particulado con presencia de algunos contaminantes a la salud de las personas utilizando algunos bioindicadores, como plantas, y/o microorganismos.

Evaluación de bioindicadores

Los contaminantes no suelen ser apreciados a simple vista. Sin embargo, existen organismos que responden a la contaminación atmosférica con cambios en su apariencia, algunos de los cuales son proporcionales a la concentración de contaminante, o acumulándolos en su interior: son los denominados bioindicadores.

Estos organismos, que pueden ser desde especies voladoras hasta especies sedentarias como los líquenes, proporcionan una información que complementa a los datos obtenidos por métodos fisicoquímicos en las estaciones de monitoreo. No todos los bioindicadores son aptos para detectar un contaminante determinado ni para su cuantificación.

El uso de organismos indicadores tiene la ventaja de aportar una serie de datos adicionales a los sistemas de monitoreo tradicionales:

- Los niveles medios de contaminación en micropoluyentes gracias a los fenómenos de bioacumulación.
- La incidencia real de contaminantes por estudios toxicológicos y eco toxicológicos.
- Un enfoque más realista del impacto en la salud ambiental y humana, ya que tendrá en cuenta los conceptos de biodisponibilidad, dosis y exposición.

Los indicadores biológicos han sido ampliamente usados para monitorizar la calidad del aire, permitiendo identificar las áreas de una ciudad con una peor calidad para, posteriormente, proponer un plan para su mitigación. El objetivo de proponer el uso de organismos como bioindicadores utilizados para el monitoreo de la calidad del aire, en concreto árboles y plantas pequeñas, musgos y líquenes, y microorganismos para detectar la contaminación atmosférica, así como los nuevos avances en el área.

Plantas y árboles pequeños

Los árboles y arbustos ornamentales se pueden usar como bioindicadores pasivos porque los contaminantes del aire se depositan en sus hojas. Estas hojas se recolectan y posteriormente, son lavadas con agua destilada y analizadas en laboratorio. Su uso a menudo está relacionado con la necesidad de cubrir una amplia zona de investigación. Estudios previos^{6,7} han evaluado la vegetación terrestre y acuática buscando el efecto bioacumulador de los metales pesados frente a las plantas, identificando concentración de metales pesados en el tejido de la vegetación como Arsénico, Cobre, Cromo, Manganeseo, Níquel, Plomo, Zinc, entre otros. Comprender la bioacumulación en plantas es crucial para desarrollar estrategias de monitoreo y mitigación de la contaminación atmosférica. Esto incluye la implementación de medidas para reducir las emisiones de contaminantes y/o la restauración de áreas afectadas.

Líquenes

Los líquenes son, hasta el momento, los bioindicadores de la calidad del aire más estudiados. Son sensibles al Dióxido de Azufre, Amoníaco, Fluoruros, metales, especies radiactivas, Hidrocarburos Clorados y lluvia ácida. También se ha demostrado que los líquenes son buenos acumuladores de metales pesados, y que las concentraciones se correlacionan bien con las concentraciones medidas en la deposición. La toxicidad del metal en los líquenes se evidencia por los efectos adversos en la integridad de la membrana celular, el contenido y la integridad de la clorofila, la fotosíntesis y la respiración, el rendimiento cuántico potencial del fotosistema II, la producción de etileno de estrés, la microestructura, las respuestas de reflectancia espectral, la resistencia a la sequía y la síntesis de varias enzimas, metabolitos secundarios y moléculas de transferencia de energía. Se ha sugerido que determinados líquenes podrían usarse para establecer gradientes de deposición atmosférica de Hg a un nivel geográfico general.

⁶ Cahuana, Lizardo, & Aduvire, Osvaldo. (2019). Bioacumulación de metales pesados en tejidos de vegetación acuática y terrestre evaluados en áreas donde existen pasivos ambientales mineros en el Perú. *Revista de Medio Ambiente y Minería*, 4(2), 19 – 36.

⁷ Judith, César, Alma & Francisco (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Revista Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10 (2009): 29 - 44.

- Sin embargo, el reemplazo de los métodos fisicoquímicos actuales de control de la calidad del aire por el **uso de bioindicadores** presenta algunas desventajas a tener en cuenta. Los métodos fisicoquímicos pueden automatizarse, mientras que todavía no se han propuesto técnicas automáticas de medición basadas en bioindicadores. Por lo tanto, la propuesta de estudio de bioindicadores son un complemento al plan de gestión de monitoreo que se está proponiendo en la continuidad del estudio de contaminación atmosférica en el CEIA y alrededores.

X. Conclusiones

Con respecto a las Normativas vigentes en Chile, durante el monitoreo realizado de julio 2023 a junio 2024, no hay superación de las normativas nacionales correspondientes a material particulado 2.5 y 10 micras y para gases O₃, CO y NO₂ y todas las concentraciones se encuentran dentro los límites permitidos.

En ninguna de las estaciones se alcanza la condición de latencia. Una zona se declara latente, cuando las concentraciones de los contaminantes se encuentran dentro de un rango entre el 80% - 100% de la norma. Los registros obtenidos durante el período son inferiores al 80% de las normativas primarias de calidad del aire vigente, sin embargo, en el monitoreo discreto para el contaminante MP₁₀, el porcentaje respecto al análisis realizado con la normativa primaria de calidad de aire anual, alcanza un **75,7%**.

Se observó que la tendencia en la dirección del viento durante todo el periodo de monitoreo es de suroeste, registrando un aumento considerable en la velocidad máxima en las épocas de primavera y verano. Sin embargo, existe una relación inversamente proporcional entre la velocidad del viento y la dispersión del material particulado. Por otro lado, se aprecia un vínculo fuerte y directamente proporcional entre el material particulado de MP_{2,5} y MP₁₀, en todas las estaciones del año. Los resultados de los análisis químicos realizados en el material particulado MP_{2,5} y MP₁₀ presentan niveles de Arsénico (As) que, en algunos meses supera la concentración máxima establecida por la Norma primaria de calidad de aire, para MP₁₀, aprobada recientemente.

Los resultados de los análisis químicos de material particulado MP_{2,5} y MP₁₀ recolectados en los equipos muestreadores presentan un contenido de plomo (Pb) que no supera lo establecido por la Norma primaria de Pb D.S. N°136 para MP₁₀.

Los resultados de los análisis químicos de las muestras recolectadas de material particulado MP_{2,5}, MP₁₀, partículas totales en suspensión (PTS) y material particulado sedimentable (MPS), evidencian la presencia de algunos metales como **Aluminio, Hierro, Cobre, Zinc, Níquel y Cromo**.

El análisis comparativo de los elementos químicos detectados en muestras de Material Particulado Sedimentado (MPS), comparado con normativas internacionales, como la Ordenanza Suiza y el Primer Reglamento Alemán, evidencian una superación en niveles estipulados por estas normativas, de algunos elementos contaminantes como el Plomo, Arsénico, Cadmio, Níquel y Zinc.

La composición mineralógica del polvo que sedimenta en el CEIA incluye principalmente minerales relacionados con Aluminio (Albita y Clorita), Hierro (Hematita y Magnetita), Silicio (Cuarzo), Calcio y Sulfato. En las muestras del polvo recolectado. Además, en el sector de los paneles solares (Avenida Grecia), se evidenció la presencia de minerales sulfurados **de cobre** (Calcopirita y Covelina) y **de Zinc** (Wurtzita y Esfalerita), los cuales no se encuentran por lo general superficialmente y se relacionan con la actividad minera (minerales presentes en concentrados de cobre).

Las posibles fuentes de contaminación que fueron identificadas en la zona están relacionadas con la actividad industrial de transporte de minerales y empresas de transporte en general. También identificamos fuentes móviles, evidenciadas por transporte público y privado de la zona, especialmente camiones que se trasladan al puerto y tránsito vehicular residencial (autos, camionetas, entre otros). La contaminación que generan las fuentes móviles está relacionada con las emisiones abrasivas por la fricción de los frenos y neumáticos con el pavimento, que aumentan las partículas finas emitidas por motores de combustión interna tales como vehículos diésel y de gasolina de inyección directa sin filtros en sus sistemas de escape. Por último, las llamadas fuentes fijas, que puedan generar contaminación en la zona, que corresponden a establecimientos de comidas con hornos, parrillas y otros.

El Plan de Gestión de Monitoreo de Calidad de Aire propuesto es un resultado del proyecto, basado en la información científica recopilada en este estudio y el cual resulta esencial y crítico para generar mayor información y conocimiento para evaluar y diagnosticar con evidencia empírica el estado y calidad del aire presente en el CEIA y en la ciudad de Antofagasta. Este Plan nos proporcionaría la información necesaria para seleccionar las mejores medidas de prevención, control y seguimiento, y poder proteger la salud y el medio ambiente en la comuna.

XI. Consideraciones importantes

Con respecto a las Normativas vigentes en Chile, durante el año de monitoreo 2023 - 2024, no se registró superación de las normativas. Sin embargo, si los datos obtenidos fueran comparados con las exigencias del **"Anteproyecto de la Norma de calidad de aire para material particulado fino MP_{2,5}, Resolución marzo 2024"**, los resultados de nuestro estudio evidenciarían niveles fuera de la normativa y superarían el criterio de excedencia de los límites fijados, que es del 80%, ya que nuestros datos de acuerdo al percentil 98 de 24 horas, el porcentaje de norma es de 97,5% y el percentil 98 anual el porcentaje es de 86,5% (Tabla a y b). De acuerdo a estos resultados, se debería desencadenar inmediatamente la elaboración de un plan de descontaminación o prevención atmosférica en la ciudad, con el fin de recuperar los niveles establecidos en la norma de calidad.

Tabla a. Análisis comparativo con Anteproyecto Norma de calidad del aire para MP2,5 (D.S. N° 12/2011) - **Diario = 38 (µg/m³)**

Estación	Periodo	MP2,5 Vaisala (µg/m ³)	
		Percentil 98 24hrs	
		Valor monitoreado	Porcentaje de la Norma (38 µg/m ³)
Estación Fija CEIA	julio 2023 - junio 2024	37,06	97,5%

Tabla b: Análisis comparativo con Anteproyecto Norma de calidad del aire para MP2,5 (D.S. N° 12/2011) - **Anual = 15 (µg/m³)**

Estación	Periodo	MP2,5 Gravimetría (µg/m ³)	
		Valor promedio monitoreado	Porcentaje de la Norma (15 µg/m ³)
Estación Fija CEIA	julio 2023 - junio 2024	12,98	86,50%

El crecimiento demográfico urbano, el aumento de las fuentes de emisión, especialmente debido al aumento de tráfico vehicular y la continua exposición de la población son factores que pueden contribuir a un incremento de casos de enfermedades, en especial de tipo respiratorio.

En resumen, **un plan de monitoreo de calidad del aire** es crucial para proteger la salud pública, cumplir con las regulaciones ambientales, educar a la comunidad y promover un entorno más saludable y sostenible.





**Resumen Ejecutivo “Estudio de la Contaminación Atmosférica Presente en el Establecimiento Educativo”
SEPTIEMBRE 2024 - www.cicitem.cl**