

Santiago, 02 de julio de 2021
VPO-DMA-069-2022

Señora
María Heloisa Rojas Corradi
Ministra del Medio Ambiente

Presente

Ref.: Resolución Ex. N°313/2024, que establece plazo para aportar antecedentes técnicos, científicos, sociales y económicos sobre la actualización del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví.

Mat.: Aporta Antecedentes al proceso de Revisión y actualización del PPDA CQP.

De nuestra consideración:

JUAN CARLOS MONCKEBERG FERNANDEZ, chileno, cédula nacional de identidad N°13.038.782-9, en representación, de AES Andes S.A. (en adelante, “AES”), RUT 94.272.000-9, y de Empresa Eléctrica Ventanas SpA, RUT 96.814.370-0, ambos domiciliados para estos efectos en Los Conquistadores N°1730, piso 10, Comuna de Providencia, Región Metropolitana de Santiago, a Ud. respetuosamente viene a señalar:

Ambas empresas, adhieren a la necesidad de avanzar en la revisión y actualización del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví (“PPDA CQP”) y manifiesta su total disponibilidad para participar y aportar antecedentes relevantes que permitan elaborar un instrumento que se ajuste a la ley, a los antecedentes de hecho, y que contenga un conjunto de medidas proporcionales y razonables que permitan el efectivo logro de sus objetivos.

Que, dentro del plazo de sesenta días hábiles, establecido por la Resolución Ex. N°313/2024, publicada con fecha 04 de abril de 2024 para aportar antecedentes técnicos, científicos, sociales y económicos sobre la actualización del PPDA CQP, venimos en aportar mediante la presente algunos antecedentes y comentarios a considerar en el proceso, a saber:

I. Antecedentes Preliminares.

Como es de su conocimiento, el Complejo Termoeléctrico Ventanas (en adelante, e indistintamente el “Complejo” o “CTV”), se ubica en un área industrializada, coexistiendo con una refinera de cobre, diversos terminales marítimos como el de GNL y una serie de instalaciones de la industria petroquímica, como la de ENAP.

La operación de sus unidades ha estado amparada por la normativa vigente y se ha adecuado constantemente a las modificaciones de la misma, en efecto, la última modificación sustantiva se produjo con la reciente entrada en vigencia del nuevo Plan de Descontaminación de la zona, el cual mi representada ha cumplido a cabalidad.

El CTV estaba conformado por cuatro unidades de generación de energía eléctrica a partir de la combustión de carbón, de las cuales, conforme al proceso de descarbonización de la matriz energética nacional, sólo 2 unidades se encuentran en operación, a saber:

- (i) Ventanas 1 (“V1”), se encuentra desconectada, con motivo de su retiro y cese de operaciones definitivo a partir del 30 de junio de 2022, conforme lo aprobado por la Comisión Nacional de Energía, mediante su Resolución Exenta N°555, de fecha 22 de julio de 2022,
- (ii) Ventanas 2 (“V2”), se encuentra desconectada, con motivo de su retiro y cese de operaciones definitivo a partir del 31 de diciembre de 2023, conforme lo aprobado por la Comisión Nacional de Energía, mediante Resolución Exenta N° 482, de 12 de octubre de 2023,
- (iii) Ventanas 3 (“V3”); operativa y,
- (iv) Ventanas 4 (“V4”), operativa.

Estas dos últimas unidades pertenecen a la Empresa Eléctrica Ventanas SpA. y han sido puestas a disposición para que cesen su operación a carbón a contar del día 1 de enero de 2025, en la fecha más temprana que la seguridad, suficiencia y economía del sistema lo permita.

Es importante considerar que las emisiones atmosféricas producto del proceso de termogeneración se liberan a la atmósfera en su totalidad en altura, a unos 95 metros de altura aproximadamente. Esto es fundamental, puesto que ello asegura una dispersión de las emisiones en una cota de aire muy superior al suelo –donde se emplazan las viviendas, escuelas y demás infraestructura de uso humano–.

La altura asegura así una dispersión que reduce radicalmente los impactos de las emisiones sobre las personas. Esto marca una diferencia relevante respecto de otras fuentes de emisiones existentes en la zona.

II. Marco Normativo Aplicable.

El CTV se encuentra sujeto a una profusa regulación destinada a proteger la salud de la población y el medio ambiente, así como a múltiples instrumentos de gestión ambiental adoptados a lo largo del tiempo. Esto ha significado que hoy el CTV cuente con robustas medidas de mitigación y planes operacionales destinados a la protección del medio ambiente y de la salud de la población. A continuación, se detallan las normas y estándares más importantes que hoy existen en cuanto a la mitigación de las emisiones de SO₂ y en lo relativo a los planes operacionales destinados a enfrentar episodios críticos.

La actividad del CTV se encuentra sujeta, en primer lugar, a las distintas resoluciones de calificación ambiental (en adelante, “RCA”). Estas RCA fijaron límites de emisión aplicables a todo el Complejo, especialmente en lo que respecta al SO₂. Sin embargo, estos límites se volvieron aún más estrictos con la dictación y publicación del Decreto Supremo N° 13 de 2011, del Ministerio del Medio Ambiente, que Establece la Norma de Emisión para las Centrales Termoeléctricas (en adelante, “DS N° 13/11”). Dicha norma, que regula la emisión de MP, SO₂, NO_x y Hg, fijó los siguientes límites de emisión:

Tabla N° 1. Límites de emisión para fuentes emisoras existentes, Combustible sólido

Parámetro	Límite aplicable (mg/Nm ³)
MP	50
SO ₂	400
NO _x	500
Hg	0,1

Fuente: art. 4 DS N° 13/11

A su vez, en el año 2019, entró en vigencia el actual Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para las Comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví (PPDA CQP), publicado en el Diario Oficial con fecha 30 de marzo de 2019. Este instrumento impuso límites de emisión al CTV aún más estrictos a los autorizados ambientalmente e incluso redujo aún más el límite de material particulado ya establecido por el D.S. N°13/11, reduciéndolo a 20 mg/Nm³.

Tabla N° 3. Emisiones máximas permitidas para el CTV

EMISIONES MÁXIMAS PERMITIDAS	EMISIONES DE MP (t/año)	EMISIONES DE SO ₂ (t/año)	EMISIONES DE NO _x (t/año)
Antes de la publicación del presente decreto.	844	8.877	11.096
Desde la publicación del presente decreto.	212	5.579	7.523
En el plazo de 3 años contado desde la publicación del presente decreto.	212	5.326	7.523

Fuente: art. 12 DS N°105/18

Como se aprecia en la tabla anterior, el PPDA estableció un máximo de emisión en toneladas por año. Así, la operación del CTV quedó sujeta a una limitación adicional en sus emisiones.

III. Normas en proceso de revisión relacionadas.

Cabe señalar, que a través de la Resolución Exenta N°130 de fecha 12 de febrero 2020, se dio inicio al proceso de revisión del DS N°13/11. Este proyecto de modificación considera la reducción de los límites de emisiones vigentes para MP, NO_x, SO₂ y Hg e, incorpora límites de emisión para los metales Níquel y Vanadio además de establecer plazos de cumplimiento específicos¹, que permitan la adecuación de las unidades de generación para dar cumplimiento a los nuevos límites propuestos. Se hace presente que la implementación de medidas de mitigación como, por ejemplo, la instalación de nuevo equipamiento para el abatimiento de contaminantes tarda en promedio de 3 a 4 años desde su conceptualización a su materialización final.

El proyecto definitivo de actualización de la norma de emisión fijaría los siguientes límites de emisión:

Tabla N° 2. Límites de emisión para fuentes existentes propuestos en proyecto definitivo

Parámetro	Límite aplicable (mg/Nm ³)
MP	20
SO ₂	200
NO _x	200
Hg	0,005
Ni	1,0
V	5,0

Fuente: Presentación Comité Operativo Ampliado, Sesión N°6/2024, MMA

Paralelamente, está en revisión por parte del Ministerio de Medio Ambiente la Norma de Calidad Primaria de MP2.5, D.S. N°12 de 2011. Actualmente se cuenta aprobado el anteproyecto de la norma, estando en etapa de evaluación por parte del Consejo Nacional para la Sustentabilidad y Cambio Climático.

Por lo anterior, consideramos que es de suma relevancia para el éxito del nuevo PPDA tener en consideración en este proceso, las normas en revisión antes señaladas y sus plazos de implementación.

¹ Plazos de cumplimiento: 5 años desde el 1° de enero siguiente a la entrada en vigencia para MP, SO₂ y NO_x; 1 año desde el 1° de enero siguiente a la entrada en vigencia para Hg y, 5 años desde el 1° de enero siguiente a la entrada en vigencia para Ni y V.

IV. Emisiones del CTV.

El CTV opera por debajo de las emisiones máximas permitidas por el PPDA CQP. Esto se debe a que las unidades han adoptado una moderna y eficiente tecnología de mitigación de emisiones atmosféricas.

En efecto, las unidades V3 y V4 del CTV cuentan con filtros de mangas, un dispositivo capaz de capturar partículas sólidas en suspensión (polvo), que permite la retención de casi la totalidad del material particulado que se produce en el proceso de combustión. Esto les permite operar en concentraciones muy por debajo de los 20 mg/Nm³. Asimismo, estas unidades cuentan desulfurizadores, con tecnología de inyección de cal. Se trata de equipos que emplean la cal como reactante para capturar el SO₂, produciendo yeso, el que se captura junto a la ceniza del carbón, este proceso permite reducir las emisiones hasta en un 74,5%, tal como consta en la siguiente tabla. A todo lo anterior se suma una baja emisión de NOx.

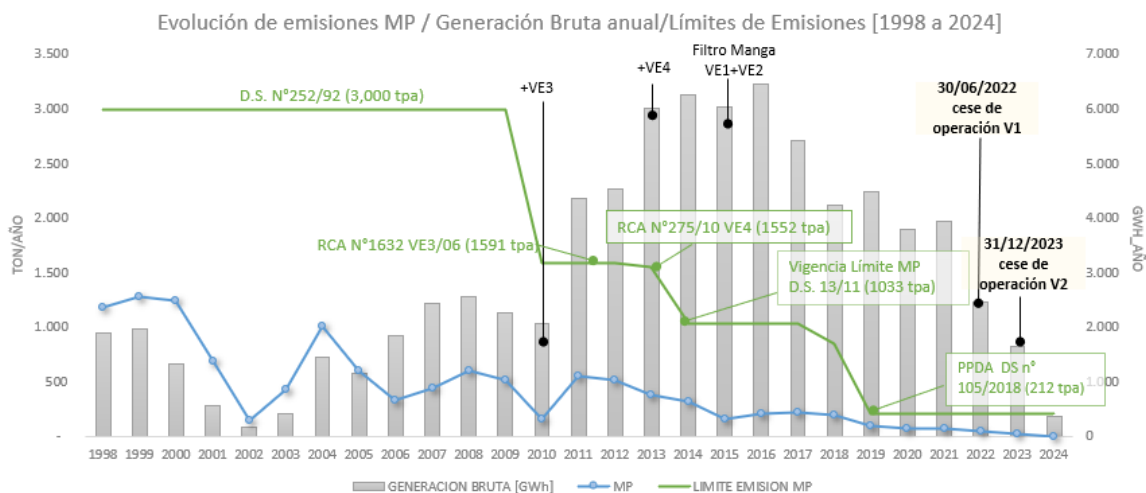
Tabla N° 4. Porcentaje de abatimiento Dióxido de Azufre Unidades V3 y V4

Unidad	% Abatimiento SO ₂
Ventanas 3	74,5%
Ventanas 4	74,5%

Fuente: VPO-DMA-082/2020 Actualización de Plan Operacional de AES Andes de fecha 9 de julio 2020.

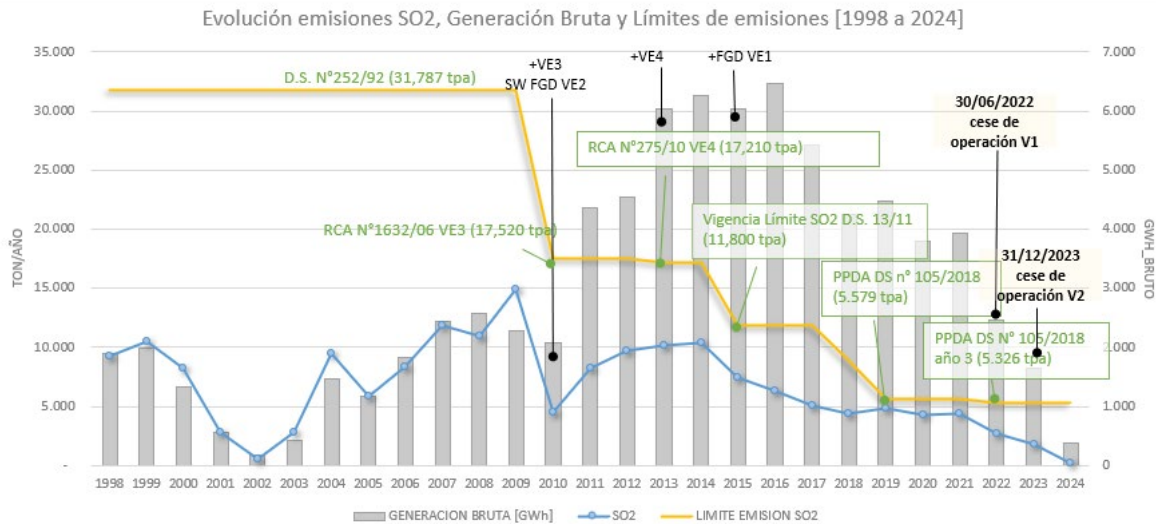
Estas medidas han permitido que el CTV haya logrado una fuerte reducción de sus emisiones de MP, SO₂ y NOx. Lo anterior consta en los siguientes gráficos:

Gráfico N°1. Reducción de emisiones de MP en CTV, período 1998 a 2024



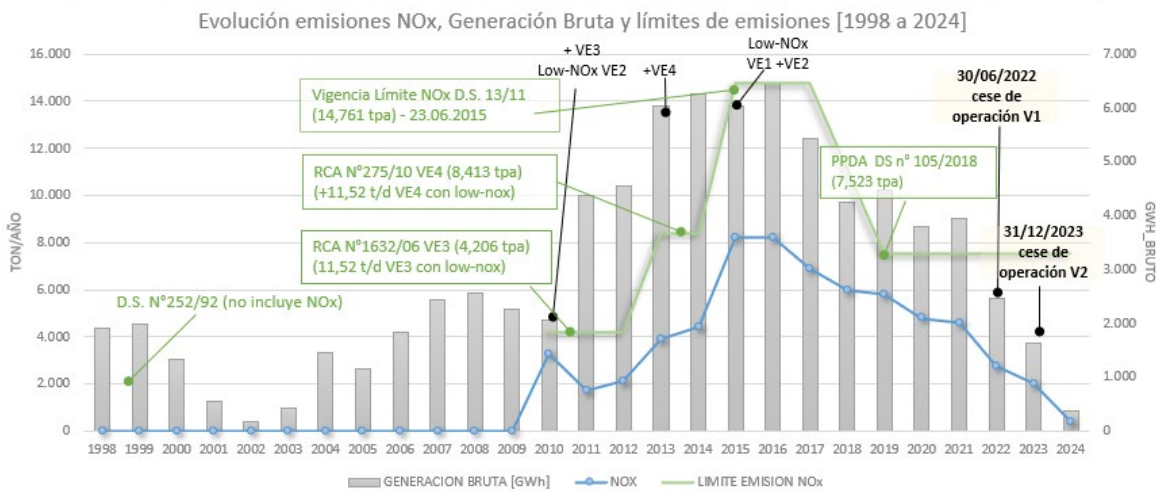
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico N°2. Reducción de emisiones de SO₂ en CTV, período 1998 a 2024



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico N°3. Reducción de emisiones de NO_x en CTV, período 1998 a 2024



Fuente: Elaboración propia.

De los gráficos, presentados previamente, se puede apreciar claramente como las emisiones tanto de MP, SO₂ y NO_x, han ido disminuyendo a lo largo de los años, explicado por una disminución en las concentraciones de estos contaminantes a la salida de la chimenea.

Por último, se debe señalar que todo lo anterior ha significado para esta parte un fuerte plan de inversiones en el CTV con el objeto de implementar mejoras en sus sistemas de abatimiento y control de emisiones aéreas.

El CTV ha avanzado a pasos acelerados en el proceso de descarbonización, tal como se señaló anteriormente, adelantando la salida de funcionamiento de V1 y V2 y comprometiendo en las fechas ya indicadas la salida de las demás unidades, adelantando los plazos originalmente establecidos, con la consecuente reducción de sus emisiones totales. Ahora bien, de acuerdo a lo señalado antes, el CTV con sus unidades V3 y V4, cumple con los límites de emisiones máxicas establecidos en el PPDA CQP:

Tabla N°5. Emisiones máxicas autorizadas V3 y V4, toneladas año

Unidad	MP	SO ₂	NO _x
CTV (V3 y V4)	212	5.579	7.523

Fuente: art. 12 DS N°105/18

V. Emisiones Fugitivas del CTV.

A lo expuesto en los puntos anteriores, se suma el trabajo implementado en el proceso de cumplimiento del artículo 29 de PPDA respecto de la obligación de **“contar con un sistema que impida la dispersión del material hacia el exterior de la instalación”** (énfasis agregado).

Considerando que el CTV cuenta con una cancha de acopio y manejo de carbón, la empresa adoptó e implementó las medidas ordenadas, desarrollando en forma previa una consultoría que permitiera caracterizar la situación basal anterior a la aplicación de las medidas exigidas.

Todo lo anterior fue aprobado mediante la Resolución N°00045 de la Secretaría Regional Ministerial de Salud (SRMS) de la Región de Valparaíso de fecha 02 de junio 2022. Dicha resolución autoriza el Sistema de control y dispersión de material hacia el exterior de la instalación y estableció como mecanismo de verificación de efectividad de la Cancha de almacenamiento de carbón del CTV un Plan de Muestreo de Material Particulado Sedimentable, que consistió en la instalación de 4 estaciones de colectores pasivos (Cancha de Carbón, Galo Herrera, MPS Bajo y MPS Alto) en o cerca de las estaciones del Complejo, el que luego de haber cumplido con las mediciones establecidas por la autoridad, ha permitido concluir que las medidas de control de la dispersión de las partículas de carbón, adoptadas por el CTV son efectivas.

En suma, como podemos ver, la adopción de distintos mecanismos de regulación ambiental, sumado al compromiso con la mejor gestión de sus impactos ambientales, ha significado que el CTV hoy cuente con tecnología de punta y estrictos protocolos de funcionamiento. La operación cumple la normativa ambiental aplicable.

VI. Antecedentes Técnicos que se acompañan.

Complementando lo expuesto en los puntos anteriores, tenemos a bien aportar los siguientes antecedentes técnicos que esperamos puedan tenerse presente dentro del proceso de análisis, revisión y actualización del PPDA CQP, a saber:

1.- Cuarto Informe de Caracterización Integral del MPS colectado en 4 estaciones de colectores pasivos (Cancha de Carbón, Galo Herrera, MPS Bajo y MPS Alto) en o cerca de las estaciones del Complejo Termoeléctrico costa de AES Andes correspondiente al período de marzo – junio 2023, elaborado por la Dra. María Eugenia Cisternas S.

2.- Tercer Informe de Caracterización Integral del MPS colectado en 4 estaciones de colectores pasivos (Cancha de Carbón, Galo Herrera, MPS Bajo y MPS Alto) en o cerca de las estaciones del Complejo Termoeléctrico costa de AES Andes correspondiente al período de diciembre 2022 – marzo 2023, elaborado por la Dra. María Eugenia Cisternas S.

3.- Segundo Informe de Caracterización Integral del MPS colectado en 4 estaciones de colectores pasivos (Cancha de Carbón, Galo Herrera, MPS Bajo y MPS Alto) en o cerca de las estaciones del Complejo Termoeléctrico costa de AES Andes correspondiente al período de octubre – diciembre 2022, elaborado por la Dra. María Eugenia Cisternas S.

4.- Primer Informe de Caracterización Integral del MPS colectado en 4 estaciones de colectores pasivos (Cancha de Carbón, Galo Herrera, MPS Bajo y MPS Alto) en o cerca de las estaciones del Complejo Termoeléctrico costa de AES Andes correspondiente al período de mayo – septiembre 2022, elaborado por la Dra. María Eugenia Cisternas S.

•
Todo lo señalado anteriormente, así como los antecedentes aportados, constituyen elementos técnicos elaborados en forma objetiva y científica que esperamos puedan tenerse presente dentro del proceso de análisis, revisión y actualización del PPDA CQP.

Como empresa, seguiremos atentos al avance del proceso y siempre disponibles para ir analizando los cambios y haciéndonos partícipes del proceso de revisión y actualización.

Sin otro particular saluda atentamente a Usted,

Juan Carlos Monckeberg Fernández

AES Andes S.A.

Empresa Eléctrica Ventanas SpA.

INFORME DE CARACTERIZACION INTEGRAL DEL MPS
COLECTADO EN 4 ESTACIONES CON COLECTORES
PASIVOS (CANCHA CARBÓN, GALO HERRERA, MPS
BAJO Y MPS ALTO) EN O CERCA DE LAS
INSTALACIONES DEL COMPLEJO TERMoeLECTRICO
VENTANAS DE AES-ANDES. Mes 7, 8 y 9 (diciembre
2022-marzo 2023). PUCHUNVAVI, 5° REGION, CHILE
Dra. María Eugenia Cisternas S

Fecha Informe: 9 de mayo de
2023

Tabla de contenido

RESUMEN EJECUTIVO	3
1 INTRODUCCIÓN	5
2 OBJETIVOS	7
2.1 METODOLOGÍA DE MUESTREO Y ANÁLISIS DEL MPS	8
2.2 INSTALACIÓN DE COLECTORES PASIVOS Y RECOLECCIÓN DE MUESTRAS.....	8
2.3 REMOCIÓN DEL MPS DESDE LAS BOTELLAS, DETERMINACIÓN DE LA MASA DEL MPS TOTAL, SOLUBLE E INSOLUBLE ...	9
2.4 ESTUDIO COMPOSICIONAL DEL MPS INSOLUBLE Y CUANTIFICACIÓN DE LA FRACCIÓN CORRESPONDIENTE A CARBÓN. .	9
3 MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS	10
3.1 CARACTERIZACIÓN GRANULOMÉTRICA DEL MPS	10
3.2 IDENTIFICACIÓN DE COMPONENTES DEL MPS INSOLUBLE MEDIANTE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA (SEM/EDS)	10
3.3 DETERMINACIÓN PORCENTUAL DE TIPOS DE PARTÍCULAS ANTRÓPICAS EN EL MPS.....	11
4 RESULTADOS MPS SOLUBLE	13
4.1 MASA DE MPS SOLUBLE	13
4.2 TASA DE CONCENTRACIÓN MPS SOLUBLE.....	13
4.3 TASA DE SEDIMENTACIÓN MPS SOLUBLE	14
5 RESULTADOS MPS INSOLUBLE	17
5.1 GRANULOMETRÍA DE MPS INSOLUBLE	17
5.2 COMPOSICIÓN DEL MPS INSOLUBLE	17
5.3 MASA Y PORCENTAJE EN MASA DE LOS COMPONENTES DEL MPS INSOLUBLE	19
5.4 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL MPS INSOLUBLE	21
6 RESULTADOS REFERIDOS AL COMPONENTE CARBÓN DEL MPS INSOLUBLE	23
6.1 MASA, PORCENTAJE Y TAMAÑO DE PARTÍCULAS DE CARBÓN.....	23
6.2 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL CARBÓN	24
7 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	26
7.1 COMPONENTES ANTRÓPICOS Y SU PROPORCIÓN EN EL MPS	26
7.2 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL MPS TOTAL	27
7.3 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL CARBÓN	30
8 CONCLUSIONES	33
8.1 TASA DE SEDIMENTACIÓN MENSUAL MPS	33
8.2 TASA DE SEDIMENTACIÓN DIARIA DEL MPS SOLUBLE	33
8.3 GRANULOMETRÍA MPS INSOLUBLE	33
8.4 COMPONENTES DEL MPS INSOLUBLE.....	33
8.5 CARBÓN EN EL MPS	34
8.6 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL CARBÓN	34
9 REFERENCIAS	36

LISTA DE TABLAS

TABLA 1 MASA MPS SOLUBLE (MG) MEDIDA Y NORMALIZADA A 30 DÍAS DURANTE LOS 3 MESES DE MONITOREO DEL PERÍODO DICIEMBRE 2022-MARZO 2023	13
TABLA 2 VARIACIÓN TASA DE SEDIMENTACIÓN MENSUAL MPS SOLUBLE, EFECTIVA Y NORMALIZADA A 30 DÍAS (DICIEMBRE 2022-MARZO 2023)	14

TABLA 3 TASA DE SEDIMENTACIÓN DIARIA MPS SOLUBLE CALCULADA POR DÍA EFECTIVO (DICIEMBRE 2022-MARZO 2023)	15
TABLA 4 TAMAÑO PARTÍCULAS MPS INSOLUBLE EN LAS 4 ESTACIONES DURANTE LOS 3 MESES DE MONITOREO (DICIEMBRE 2022-MARZO 2023)	17
TABLA 5 MASA POR TIPO DE PARTÍCULA EN LAS 4 ESTACIONES, EN LOS 3 MESES DE MONITOREO DEL PERÍODO DICIEMBRE 2022-MARZO 2023	20
TABLA 6 PORCENTAJE EN MASA POR TIPO DE PARTÍCULA EN LAS 4 ESTACIONES, EN LOS 3 MESES DE MONITOREO DEL PERÍODO DICIEMBRE 2022-MARZO 2023	20
TABLA 7 MASA Y PORCENTAJE PROMEDIO DE COMPONENTES EN MPS INSOLUBLE (DICIEMBRE 2022 A MARZO 2023).....	20
TABLA 8 TASA DE SEDIMENTACIÓN DE MPS INSOLUBLE MENSUAL Y DIARIA EN EL PERÍODO DICIEMBRE 2022-MARZO 2023.....	21
TABLA 9 PORCENTAJE (EN MASA) DEL CARBÓN EN EL MPS INSOLUBLE EN LAS 4 ESTACIONES (DICIEMBRE 2022-MARZO 2023)	24
TABLA 10 TAMAÑO MÍNIMO Y MÁXIMO (EN MICRONES) DE LAS PARTÍCULAS DE CARBÓN, PERÍODO DICIEMBRE 2022-MARZO 2023	24
TABLA 11 TASA SEDIMENTACIÓN CARBÓN POR ESTACIÓN EN EL PERÍODO DICIEMBRE 2022-MARZO 2023.....	25
TABLA 12 VALORES LÍMITES DE TASA DE SEDIMENTACIÓN DE MPS (MG/M ² /DÍA)	28
TABLA 13 TASA DE SEDIMENTACIÓN DIARIA DE MPS SOLUBLE, INSOLUBLE Y TOTAL EN LAS 4 ESTACIONES Y EN LOS 3 MESES DE MONITOREO	29

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 UBICACIÓN ESPACIAL SOBRE IMAGEN GOOGLE EARTH DE LAS 4 ESTACIONES DE MONITOREO	6
FIGURA 2 MODELO DE COLECTOR PASIVO INSTALADO EN 4 ESTACIONES DEL CTV.....	9
FIGURA 3 CONCENTRACIÓN (G/L) COMPARADA DEL MPS SOLUBLE EN EL PERÍODO DICIEMBRE 2022-MARZO 2023	14
FIGURA 4 MASA DE CARBÓN REGISTRADA EN LAS 4 ESTACIONES Y VARIABILIDAD EN EL PERÍODO DICIEMBRE DE 2022-MARZO 2023.	23
FIGURA 5 EVOLUCIÓN PORCENTUAL (% EN MASA) DE LOS COMPONENTES DEL MPS INSOLUBLE EN LAS 4 ESTACIONES (PERÍODO DICIEMBRE 2022-MARZO 2023).....	26
FIGURA 6 TASA DE SEDIMENTACIÓN MENSUAL Y DIARIA DEL MPS EN LAS 4 ESTACIONES (DICIEMBRE 2022-MARZO 2023)	30
FIGURA 7 TASA SEDIMENTACIÓN CARBÓN DIARIA EN LAS 4 ESTACIONES (DICIEMBRE 2022-MARZO 2023)	31

LISTA DE LAMINAS

LÁMINA 1. A: SEM/BSE; B: SEM/EDS MAPPING DE C, O, AL, SI, FE, CU Y S; C ; C: MAPPING DE C	19
---	----

RESUMEN EJECUTIVO

El presente Informe se enmarca en el Plan de Muestreo de Material Particulado Sedimentable (MPS) de 12 meses de duración, autorizado mediante la Resolución N° 00045 (02 de junio 2022) de la Secretaría Regional Ministerial de Salud (SRMS) de la Región de Valparaíso, cuyo objetivo principal es evaluar la eficacia del Sistema de Control de dispersión de material, específicamente de las partículas de carbón, hacia el exterior del Complejo Termoeléctrico Ventanas.

El Plan de Muestreo considera la caracterización del MPS depositado mensualmente en 4 Estaciones provistas de colectores pasivos, durante 1 año, con informes trimestrales de resultados. Las Estaciones son: Cancha Carbón, ubicada al interior de la cancha de acopio de carbón del CTV; Galo Herrera, ubicada fuera de la cancha, aunque dentro de las dependencias de AES-Andes; MPS Bajo, localizada dentro del área de protección de la pantalla deflectora y MPS Alto, dispuesta cerca del área de protección de la pantalla deflectora. Las dos últimas estaciones se ubican en el sector La Greda.

Las variables ambientales principales consideradas en el Plan de Monitoreo son: 1) el porcentaje de carbón presente en el MPS insoluble; 2) la variación del porcentaje de carbón en las cuatro estaciones; 3) el gradiente de dispersión del carbón desde la cancha de acopio de este material, hacia las 3 otras estaciones.

Este informe presenta los resultados de los meses 7, 8 y 9 (diciembre 2022-enero 2023, enero-febrero 2023 y febrero-marzo 2023) del Programa de Monitoreo por un año, comprometido por AES-Andes. En la Estación Galo Herrera no hubo registro del MPS en el tercer mes, motivado por la sustracción del colector.

Las conclusiones de este tercer período monitoreo son:

- 1) La Tasa de Sedimentación diaria del MPS total supera el valor límite de 150 mg/m² /día que precisa la norma secundaria para la Cuenca del Río Huasco (D.E. N°4/92) en:
 - Estación Cancha Carbón en los tres meses monitoreados (diciembre 2022-marzo 2023)
 - Estación Galo Herrera, sobrepasa levemente el límite en el primer mes (diciembre 2022-enero 2023)
 - Estación MPS Bajo en el primer mes (diciembre 2022-enero 2023)
 - Estación MPS Alto en los 3 meses del período (diciembre 2022-marzo 2023).
- 2) El MPS insoluble consta de partículas antrópicas (residuos de combustión de carbón, carbón crudo y partículas metálicas tipo sulfuros de Cu), con componentes naturales (briznas de vegetales) en proporción muy minoritaria (entre 1,9% a 2,9%, valores promedio tres meses).
- 3) El carbón es el segundo componente más abundante del MPS insoluble en todas las Estaciones, después de los residuos de combustión. El porcentaje promedio de carbón en los 3 meses de monitoreo es significativamente más alto en la Estación Cancha Carbón (45,8%), disminuyendo drásticamente a 16,3% en la Estación Galo Herrera, a 5,6% en la Estación MPS Bajo y solo 2,3% en la Estación MPS Alto.

- 4) La Tasa de Sedimentación del Carbón (promedio 3 meses: 252,124 mg/m²/día) sobrepasa el límite diario de 150 mg/m²/día (norma D.E. N°4/1992) solamente en la Estación Cancha Carbón en los 3 meses.
- 5) La Tasa promedio de Sedimentación del Carbón en las restantes tres Estaciones es considerablemente más baja que en la Estación Cancha Carbón 17,385 mg/m²/día efectivo en Galo Herrera; 7,109 mg/m²/día efectivo en MPS Bajo y solo 3,333 mg/m²/día efectivo en MPS Alto.

Como el aporte de partículas de carbón desde la cancha de carbón se reduce considerablemente hacia zonas externas, la Tasa promedio de Sedimentación del Carbón decrece abruptamente en 93,1% en la Estación Galo Herrera, en 97,2% en la Estación MPS Bajo y en 98,7 en la Estación MPS Alto. Se concluye, entonces, que las medidas de control de la dispersión de las partículas de carbón, adoptadas por AES-Andes son efectivas.

1 INTRODUCCIÓN

A solicitud de AES-Andes, a través del Departamento Gestión Ambiental Complejo Centro, Geo-Forensic SpA realizará la caracterización integral del Material Particulado Sedimentable (MPS), con particular énfasis en la participación del carbón dispersado desde la cancha de acopio de este material hacia sectores ubicados en las cercanías de las instalaciones de Complejo Termoeléctrico Ventanas (CTV), Comuna de Puchuncaví, Región de Valparaíso. Este estudio se enmarca en un Plan de Muestreo de Material Particulado Sedimentable (MPS) de 12 meses de duración.

El Plan de Muestreo de Material Particulado Sedimentable fue autorizado mediante la Resolución N° 00045 de la Secretaría Regional Ministerial de Salud (SRMS) de la Región de Valparaíso fechada el 02 de junio 2022. Dicha resolución autoriza el *Sistema de control y dispersión de material hacia el exterior de la instalación y su mecanismo de verificación de efectividad de la Cancha de almacenamiento de carbón* del Complejo Termoeléctrico Ventanas, (CTV) propiedad de AES ANDES S.A. El material al que hace referencia corresponde única y exclusivamente al *manejo de carbones Bituminosos y Sub-bituminosos acopiados en la cancha de carbón del CTV*.

En la Figura 1 se señala la ubicación espacial sobre imagen Google Earth de las 4 Estaciones de Monitoreo indicadas en la Resolución N° 00045 del SRMS.

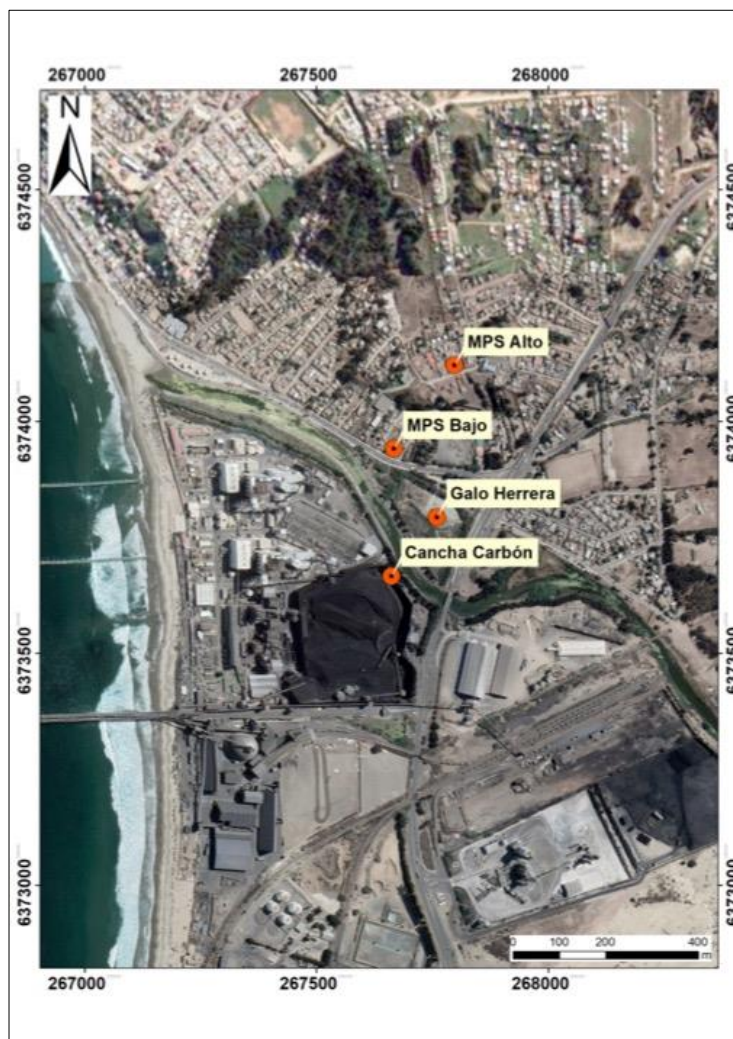


Figura 1 Ubicación espacial sobre imagen Google Earth de las 4 Estaciones de Monitoreo

- Estación Cancha Carbón (coordenadas geográficas 267662.17 E; 6373667.19 S), ubicada al interior de la cancha de acopio de carbón.
- Estación Galo Herrera, (coordenadas geográficas 267760,87 E y 6373794.17 S) localizada fuera de la cancha, aunque dentro de las dependencias de AES ANDES.
- Estación MPS Bajo (coordenadas geográficas N), 267669 E, 6373931 N) ubicada dentro del área de protección de la pantalla deflectora.
- Estación MPS Alto (coordenadas geográficas 267774 E; 6374087 N), ubicada cerca del área de protección de la pantalla deflectora.

Las Estaciones MPS Alto y MPS Bajo están ubicadas en el poblado La Greda.

Las variables ambientales principales consideradas en el Plan de Monitoreo son:

- 1) El porcentaje de carbón presente en el MPS insoluble.
- 2) La variación del porcentaje de carbón en las cuatro estaciones.
- 3) El gradiente de dispersión del carbón desde la cancha de acopio de este material, hacia las 3 otras estaciones del Plan de Muestreo de MPS.

El presente Informe, el 3° Informe Trimestral desde el inicio del Monitoreo por un año comprometido por AES-Andes, se hace cargo de los resultados obtenidos en los meses 7 (diciembre 2022-enero 2023), 8 (enero-febrero 2023) y 9 (febrero-marzo 2023). Se hace presente que en la Estación Galo Herrera no hubo registro del MPS en el mes 9 (febrero-marzo 2023) debido a robo del colector completo.

Las citas de los dos Informes previos (Cisternas, 2022 y Cisternas, 2023) se encuentran en la sección Referencias.

2 OBJETIVOS

El Objetivo Principal del Plan de monitoreo es evaluar la eficacia del Sistema de Control de dispersión de material, específicamente de las partículas de carbón, hacia el exterior del Complejo Termoeléctrico Ventanas.

Las principales tareas a desarrollar para cumplir el Objetivo Principal son:

- Monitorear y caracterizar la cantidad de MPS acumulada en cada colector, con indicación de la Tasa de sedimentación del MPS soluble e insoluble.
- Monitorear y caracterizar la cantidad de MPS correspondiente a las partículas de carbón, con indicación de la masa acumulada en cada colector y cálculo de la Tasa de Sedimentación del Carbón expresada en $\text{mg}/\text{m}^2/\text{mes}$ y $\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$.
- Determinar la variación espacial y temporal de las Tasas de Sedimentación de carbón, considerando las variaciones en las 4 estaciones y variaciones en el lapso de tiempo considerado entre la instalación y la remoción de los colectores para el período que se informa.

Como Objetivo Secundario se aborda la comparación de las Tasas de Sedimentación del carbón con normas nacionales e internacionales.

Los parámetros que fueron utilizados para caracterizar el estado y evolución de las variables ambientales son:

- Masa soluble total
- Masa insoluble total
- Masa insoluble carbón
- Tasa de Sedimentación del MPS
- Tasa de Sedimentación del Carbón

2.1 METODOLOGÍA DE MUESTREO y ANÁLISIS DEL MPS

El término MPS (*Settleable Particulate Matter*, en inglés) se refiere a cualquier material compuesto de partículas lo suficientemente pequeñas como para pasar a través de una pantalla de 1 mm y lo suficientemente grandes como para depositarse desde el aire, en virtud de su peso, en el contenedor (Norma ASTM D 1739 – 98)¹.

2.2 Instalación de colectores pasivos y recolección de muestras

Para recolectar el Material Particulado Sedimentable se utilizaron colectores pasivos (Figura 2), con un radio de 0,249 m.

La empresa SGS Chile Ltda., fue la responsable de la instalación y mantención de los 4 colectores pasivos. El período aconsejado de recolección del MPS es del orden de 27 a 32 días, sin embargo en condiciones climáticas desfavorables, por ejemplo fuertes lluvias, las botellas de recolección pueden ser removidas y guardadas mientras dura el mal tiempo y, tras esto, recolocadas nuevamente en los colectores.

La remoción de las botellas desde los 4 colectores pasivos está a cargo de la Empresa SGS, quien envía mensualmente las botellas al Instituto de Geología Económica (GEA) de la Universidad de Concepción.

¹ Standard Test Method for Collection and Measurement of Dustfall (*Settleable Particulate Matter*)¹



Figura 2 Modelo de Colector pasivo instalado en 4 Estaciones del CTV.

2.3 Remoción del MPS desde las botellas, determinación de la masa del MPS total, soluble e insoluble

En el Instituto GEA, las botellas colectoras son tratadas con ultrasonido para retirar toda la masa adherida a la superficie interna. Posteriormente, se procede a:

- Determinación de sólidos insolubles: una vez removida toda la masa de las botellas colectoras se procede a la filtración de sólidos, utilizando un filtro de membrana de 0,45 micrones. Posteriormente, los sólidos son secados a 40°C y luego pesados, hasta peso constante.
- Determinación de sólidos solubles: Los sólidos solubles fueron determinados en la solución remanente de la filtración, según la norma ASTM D 1739 – 98.
- Determinar la granulometría de las partículas en la fracción insoluble mediante difracción laser.
- Entrega de la fracción insoluble a Geo-Forensic SpA.

2.4 Estudio composicional del MPS Insoluble y cuantificación de la fracción correspondiente a carbón.

Una vez recibidas las muestras de la fracción insoluble del MPS, por parte Geo-Forensic se procede al estudio integral de componentes mediante Microscopía Electrónica (SEM), con énfasis en el estudio del *componente carbón*.

3 MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS

3.1 Caracterización granulométrica del MPS

El análisis granulométrico de la masa total insoluble es realizado por el Instituto de Geología Económica Aplicada (GEA) de la Universidad de Concepción mediante el método de difracción láser en húmedo. El equipo utilizado es un analizador granulométrico láser Fritsch modelo Analysette 22 Microtec Plus. El análisis se realiza en húmedo, con aplicación de ultrasonido para obtener la máxima dispersión de partículas. El equipo posee un rango de medición de 0,08 a 2000 micrones (μm).

3.2 Identificación de componentes del MPS Insoluble mediante microscopía electrónica (SEM/EDS)

Considerando que las partículas del MPS tienen tamaño micrométrico, la caracterización textural y composicional de los diferentes tipos de partículas presentes en el MPS insoluble se realiza mediante microscopio electrónico de barrido (SEM)

El equipo utilizado corresponde a un TSCAN, VEGA III, equipado con detector de electrones retro-dispersados (Modo BSE), detector de electrones secundarios (Modo SE) y detector de rayos x de energía dispersiva (Modo EDS). Este equipo pertenece al Centro de Microscopía Avanzada del Bío-Bío (CMA), ubicado en dependencias de la Universidad de Concepción.

En un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM: Scanning Electron Microscopy por sus siglas en inglés) el bombardeo de electrones sobre la muestra produce varias formas simultáneas de radiación, entre ellas, la emisión de electrones secundarios (SE), electrones retro-dispersados (BSE) y emisión de rayos X. Cada una de esas formas de radiación es capturada por un detector específico.

Detector SE versus detector BSE

La imagen entregada por el SEM se genera por la interacción del haz de electrones que “barre” un área determinada sobre la superficie de la muestra. La detección de los electrones secundarios o retro-dispersados en un gran número de puntos sobre el área barrida, previa transformación electrónica, genera la imagen que se visualiza en una pantalla y es fotografiada mediante una cámara adosada al equipo.

El detector SE es ideal para generar imágenes SEM de alta resolución que permiten obtener detalles de la morfología y textura superficial de las partículas. El detector BSE ofrece una imagen de menor resolución, pero tiene la ventaja de que es sensible a las variaciones en el número atómico de los

elementos presentes en la superficie, permitiendo discriminar sobre la imagen partículas de diferente composición.

Cada imagen SEM incorporada en este estudio contiene información impresa de las condiciones de trabajo (voltaje de aceleración de electrones, distancia de trabajo, magnificación) y una escala gráfica que permite identificar el tamaño de las partículas. La intensidad del haz de electrones utilizada fluctuó entre 10 y 12 mV.

Detector EDS para determinación química de componentes

El detector EDS analiza los rayos X generados por el bombardeo de electrones mediante la espectroscopía de rayos X de energía dispersa (EDS por sus siglas en inglés). Permite identificar los elementos presentes en el punto de incidencia del haz de electrones sobre una partícula, o en un área previamente determinada que será barrida por el haz de electrones. Se obtiene así un espectro con los *peaks* de los elementos presentes en el punto de incidencia, con dato del porcentaje elemental o en masa de esos elementos. O bien, si se combina con la detección de electrones retro-dispersados en un área, se obtiene una suerte de “mapa” con la distribución de los elementos presentes en la muestra (herramienta *mapping*).

Los espectros EDS aplicados a los objetivos de este estudio, aportan información invaluable para diferenciar la naturaleza de las partículas sólidas, es decir distinguir carbón crudo, de residuos de combustión, de otras partícula metálicas o bien de partículas vegetales.

Como material de referencia para la identificación de los diferentes tipos de residuos de combustión fueron utilizados los estudios de Suarez -Ruiz et al. 2017² y Valentim et al. 2018³. Para la identificación composicional de fases cristalinas mediante SEM se utilizó el trabajo de Severin, 2004⁴.

Montaje de las muestras para el estudio mediante microscopio electrónico

Las muestras fueron montadas en porta muestras de aluminio de 11 mm de diámetro (pines), recubiertos con cinta adhesiva de doble cara de carbono. El montaje de las partículas se realiza teniendo precaución que éstas no se superpongan entre sí, ya que eso puede afectar el espectro EDS de las partículas de interés. El análisis de las muestras se realizó sin grafitización previa de los porta muestras.

3.3 Determinación porcentual de tipos de partículas antrópicas en el MPS

² Suarez-Ruiz, I. et al. (2017) Development of a petrographic classification of fly-ash components from coal combustion and co-combustion. (An ICCP Classification System, Fly-Ash Working Group – Commission III.). *Inter. Jour. Coal Geology*, 183: 188-203.

³ Valentim, et al. 2018. Undifferentiated Inorganics in Coal Fly Ash and Bottom Ash: Calciphères, magnesiocalciphères and Magnesiaspheres. *Minerals* 2018, 8, 140; doi:10.3390/min8040140.

⁴ Severin, K. 2004. Energy Dispersive Spectrometry of Common Rock Forming Minerals. Kluwer Acad. Pu. 219 p.

Para determinar el porcentaje de partículas identificadas en el MPS Insoluble se utiliza un programa digital que emula un contador automático de puntos. Mediante este programa se determinó la relación porcentual relativa, en volumen, de las partículas naturales y antrópicas presentes en las muestras, utilizando para ello 3 imágenes SEM por muestra, obtenidas con el detector BSE a baja magnificación (100x) y alta resolución.

El porcentaje en masa de los componentes fue determinado utilizando valores de densidad promedio para los diferentes tipos de partículas, como se indica a continuación:

Partículas naturales:

- Briznas de vegetales⁵: 1,5 g/cm³

Partículas antrópicas:

- Partículas de carbón⁶: 1,4 g/cm³ (valores fluctúan entre 1,47 y 1,29 g/cm³)
- Residuos de Combustión⁷: 2,5 g/cm³ (valores fluctúan entre 1,9 a 2,9 g/cm³)
- Partículas Metálicas⁸: 5,0 g/cm³ (sulfuros de Cu-Fe: 4,9 g/cm³; Magnetita: 5,2 g/cm³)

⁵ Saiah, R., Perrin, B. & Rigal, L. 2010. Improvement of thermal properties of fires clays by introduction of vegetable matter. *J. Building Physics*, 34 (2): 124-142. doi.org/10.1177/1744259109360059

⁶ Wood, G., Kehn T., Carter, D. & Culberston, W. Coal Resource Classification System of the US Geological Survey. Geological Survey Circular 891. <http://pubs.usgs.gov/circ/c891/table2.htm>

⁷ Feng, S. & Li, Y. Study on coal fly ash classified by bulk density. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1732 012127. doi.org/10.1088/1742-6596/1732/1/012127

⁸ Minerals Densities. The Engineering Toolbox (www.engineeringtoolbox.com)

4 RESULTADOS MPS soluble

4.1 Masa de MPS soluble

En la Tabla 1 se indica la masa de MPS Soluble determinado en las muestras del período que se informa, considerando los días efectivos de acumulación de MPS. Nótese que en el último mes de este período (mes 9 del Monitoreo: 9 febrero a 9 marzo 2023) no hubo registro en la Estación Galo Herrera por robo del colector completo.

Fecha de Inicio	Fecha Final	Estación	Período de Muestreo en días efectivos	Masa soluble medida (g)	Masa soluble medida (mg)	Masa soluble normalizada a 30 días (mg)
16-12-22	09-01-23	Cancha Carbón	24	0,1345	134,5	168,1
16-12-22	09-01-23	Galo Herrera	24	0,1209	120,9	151,1
09-12-22	09-01-23	MPS Bajo	31	0,1691	169,1	163,6
09-12-22	09-01-23	MPS Alto	31	0,0718	71,8	69,5
09-01-23	09-02-23	Cancha Carbón	31	0,1453	145,3	140,6
09-01-23	09-02-23	Galo Herrera	31	0,1163	116,3	112,5
09-01-23	08-02-23	MPS Bajo	30	0,1033	103,3	103,3
09-01-23	08-02-23	MPS Alto	30	0,1358	135,8	135,8
09-02-23	09-03-23	Cancha Carbon	28	0,4367	436,7	467,9
		Galo Herrera	sin registro			
08-02-23	09-03-23	MPS Bajo	29	0,1133	113,3	117,2
08-02-23	09-03-23	MPS Alto	29	0,1571	157,1	162,5

Tabla 1 Masa MPS Soluble (mg) medida y normalizada a 30 días durante los 3 meses de monitoreo del período diciembre 2022-marzo 2023

4.2 Tasa de Concentración MPS soluble

En la Figura 3 se grafica la concentración de solubles en las estaciones para el período diciembre 2022-marzo 2023 (mes 7, 8 y 9). En el mes 4 (septiembre-octubre) los valores son más altos en la Estación Cancha Carbón y significativamente más bajos las restantes 3 estaciones. El mes 5 (octubre-noviembre) las comparaciones se entorpecen por las diferencias en el tiempo de acumulación del MPS en las diferentes Estaciones. En el mes 6 (noviembre diciembre) se aprecia mayor Tasa de Concentración de MPS soluble en la Estación MPS Bajo, seguido de la estación Cancha Carbón Galo Herrera, mientras que la Estación MPS Alto muestra la menor concentración.

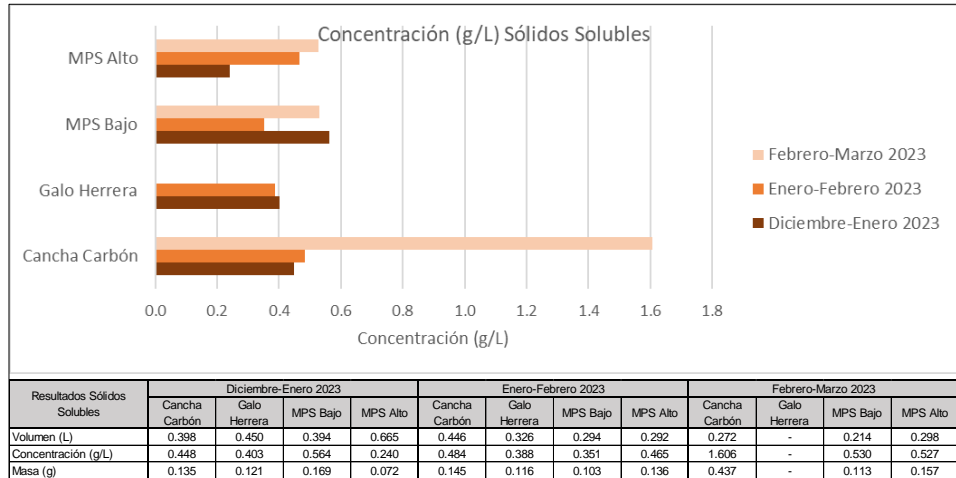


Figura 3 Concentración (g/L) comparada del MPS soluble en el período diciembre 2022-marzo 2023

4.3 Tasa de Sedimentación MPS Soluble

En la Tabla 2 se registra la Tasas de Sedimentación mensual del MPS soluble, calculada tomando en consideración los días efectivos para cada período y valores derivados de normalizar a mes 30 días, como sugiere la norma secundaria de la Cuenca del Río Huasco (D.E. N°4/92). Las diferencias observadas hacen aconsejable que en lo sucesivo el tiempo de recolección en los colectores pasivos respete el período de 30 días, para que los resultados se ajusten a la Tasa de Sedimentación real.

Fecha de Inicio	Fecha Final	Estación	Período de Muestreo en días efectivos	Tasa de Sedimentación MPS soluble (mg/m2/mes efectivo)	Tasa de Sedimentación MPS soluble (mg/m2/mes 30 días)
16-12-22	09-01-23	Cancha Carbón	24	690,517	863,146
16-12-22	09-01-23	Galo Herrera	24	620,695	775,868
09-12-22	09-01-23	MPS Bajo	31	868,151	840,146
09-12-22	09-01-23	MPS Alto	31	368,618	356,727
09-01-23	09-02-23	Cancha Carbón	31	745,963	721,900
09-01-23	09-02-23	Galo Herrera	31	597,079	577,818
09-01-23	08-02-23	MPS Bajo	30	530,337	530,337
09-01-23	08-02-23	MPS Alto	30	697,191	697,191
09-02-23	09-03-23	Cancha Carbon	28	2241,997	2402,139
		Galo Herrera		sin registro	
08-02-23	09-03-23	MPS Bajo	29	581,677	601,735
08-02-23	09-03-23	MPS Alto	29	806,544	834,356
		Promedio Tasa de Sedimentación MPS soluble (mg/m2/mes 30 días)			
		Cancha Carbón	1329,062		
		Galo Herrera *	676,843		
		MPS Bajo	657,406		
		MPS Alto	629,424		
		* promedio solo 2 meses			

Tabla 2 Variación Tasa de Sedimentación mensual MPS soluble, efectiva y normalizada a 30 días (diciembre 2022-marzo 2023)

La Tabla 3 registra la Tasa de Sedimentación diaria del MPS soluble. Los resultados muestran que:

- Estación Cancha Carbón: registra valores comparativamente bajos en el primer y segundo mes de este período (28,772 mg/m²/día efectivo y 24,063 mg/m²/día efectivo, respectivamente), mientras que en el tercer mes del período se registra un notorio incremento (80,071 mg/m²/día efectivo), del orden del 178,3% respecto al primer mes y de 232,8% respecto al segundo mes.
- Estación Galo Herrera: registra un decrecimiento del orden de 25,5% en el segundo mes (19,261 mg/m²/día efectivo), respecto del primer mes (25,862 mg/m²/día efectivo), En el tercer mes no hay registro por robo del colector.
- Estación MPS Bajo: en el primer mes se registra el valor más alto (28,005 mg/m²/día efectivo), el cual decrece del orden de 36,9% en el segundo mes (19,261 mg/m²/día efectivo), para aumentar levemente (13,5%) en el tercer mes (20,058 mg/m²/día efectivo).
- Estación MPS Alto: la Tasa se incrementa desde el primer mes (11,891 mg/m²/día efectivo) en 95,4% en el segundo mes (23,240 mg/m²/día efectivo) y en 19,7% desde el segundo al tercer mes (27,812 mg/m²/día efectivo).

Fecha de Inicio	Fecha Final	Estación	Período de Muestreo en días efectivos	Tasa de Sedimentación MPS soluble (mg/m ² /día efectivo)
16-12-22	09-01-23	Cancha Carbón	24	28,772
16-12-22	09-01-23	Galo Herrera	24	25,862
09-12-22	09-01-23	MPS Bajo	31	28,005
09-12-22	09-01-23	MPS Alto	31	11,891
09-01-23	09-02-23	Cancha Carbon	31	24,063
09-01-23	09-02-23	Galo Herrera	31	19,261
09-01-23	08-02-23	MPS Bajo	30	17,678
09-01-23	08-02-23	MPS Alto	30	23,240
09-02-23	09-03-23	Cancha Carbon	28	80,071
sin registro		Galo Herrera	sin registro	
08-02-23	09-03-23	MPS Bajo	29	20,058
08-02-23	09-03-23	MPS Alto	29	27,812
		PROMEDIO Tasa de Sedimentación MPS soluble (mg/m ² /día efectivo)		
		Cancha Carbón	44,302	
		Galo Herrera *	22,561	
		MPS Bajo	21,914	
		MPS Alto	20,981	
		* promedio solo 2 meses		

Tabla 3 Tasa de Sedimentación diaria MPS soluble calculada por día efectivo (diciembre 2022-marzo 2023)

El mayor valor promedio se registra en la Estación Cancha Carbón (44,302 mg/m²/día efectivo), seguido de Estación Galo Herrera (22,561 mg/m²/día efectivo), Estación MPS Bajo (21,914 mg/m²/día efectivo) y Estación MPS Alto (20,981 mg/m²/día efectivo). Los resultados muestran que,

con relación a la Tasa de Sedimentación diaria en la Estación Cancha Carbón, ésta se reduce prácticamente a la mitad en las otras 3 Estaciones.

5 RESULTADOS MPS insoluble

5.1 Granulometría de MPS insoluble

Los resultados del análisis granulométrico mediante difracción láser se presentan en la Tabla 4 (tamaño partículas en micrones).

Estación	Granulometría (µm)	Diciembre 2022- Enero 2023	Enero-Febrero 2023	Febrero-Marzo 2023	Promedio por Estación
Cancha Carbón	Mín	0,322	0,088	0,264	0,225
	Máx	305,746	305,746	205,462	272,318
Galo Herrera	Mín	0,355	0,291	-	0,323
	Máx	250,637	205,462	-	228,050
MPS Bajo	Mín	0,088	0,264	0,291	0,214
	Máx	168,429	152,496	186,026	168,984
MPS Alto	Mín	0,322	0,088	0,088	0,166
	Máx	113,184	113,184	113,184	113,184

Tabla 4 Tamaño partículas MPS insoluble en las 4 Estaciones durante los 3 meses de monitoreo (diciembre 2022-marzo 2023)

El tamaño mínimo promedio de las partículas es mayor en la Estación Galo Herrera, similar en las Estaciones Cancha Carbón y MPS Bajo y menor en la Estación MPS Alto.

Con relación al tamaño máximo, los valores promedio por estación permiten constatar una reducción sostenida del tamaño en función de la lejanía a la Estación Cancha Carbón. Así, la reducción del tamaño máximo es de un 16,3% en la Estación Galo Herrera, de 37,9% en la Estación MPS Bajo y de 58,4% en la Estación MPS Alto.

5.2 Composición del MPS insoluble

Los tipos de partículas reconocidas en las muestras son mayoritariamente antrópicas y, de manera muy subordinada, se observan partículas naturales que corresponden a partículas vegetales tipos brizas de pastizal.

La identificación de los tipos de partículas en el *MPS Insoluble*, dado su tamaño, se hizo mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), utilizando imágenes BSE de alta resolución, en combinación con imágenes en la modalidad *mapping*.

La inspección de las muestras con el Modo BSE permite identificar los diferentes tipos de partículas, gracias a que este detector contrasta, mediante la tonalidad en la imagen, la diferente composición de las partículas. De este modo, de acuerdo a la tonalidad observada en la imagen, se identifican los siguientes tipos de partículas:

1. Partículas gris oscuro-negro: corresponden a partículas de carbón crudo (sin evidencias de combustión) y chars (residuos de combustión con carbono remanente). También se ven de esta tonalidad las partículas de vegetales, las cuales se identifican por su forma (angosta y alargada), muy diferente a las partículas carbonosas (carbón y residuos de combustión).

2. Partículas gris medio: corresponden a residuos de combustión de composición aluminosilicatada, de forma esférica (cenosferas), prismática (mineroides feldespáticos y silíceos) o en granos compuestos (cenoesferas más mineroides).
3. Partículas gris claro: ferrosferas (forma esférica, contenido alto de Fe).
4. Partículas blanco brillante: minerales metálicos en la forma de óxidos de Fe (magnetita, hematita), sulfuros de Fe (pirita) y sulfuros de Cu-Fe (calcopirita).

A modo de ejemplo, en la Lámina 1-A se presenta una imagen SEM/BSE donde se identifican los diferentes componentes mencionados, de acuerdo a su tonalidad de gris.

En la Lámina 1-B se presenta una imagen BSE obtenida mediante la herramienta “mapping” del SEM/EDS, la cual posibilita realizar un mapeo areal por elementos a definir por el usuario. En este estudio se utilizó esta herramienta para conocer la distribución en el muestra de los elementos carbono (C), sílice (Si), aluminio (Al), hierro (Fe), cobre (Cu) y azufre (S) y con eso confirmar la composición de los componentes observados.

En la Lámina 1-C se presenta una imagen BSE con la distribución del elemento carbono (C).

Mediante el *mapping* por diferentes elementos fue posible identificar los siguientes tipos de partículas:

- Solo Si (color amarillo): partículas de sílice (cuarzo) formadas en la fase final del proceso de combustión del carbón (mineroides silíceos).
- Si + Al (color amarillo + color verde): partículas aluminosilicatadas formadas en la fase final del proceso de combustión del carbón (cenoesferas y mineroides de feldespato K y plagioclasa).
- Solo C (color rojo): partículas de carbón.
- C + Si + Al (color rojo + color amarillo + color verde): chars.
- S + Fe (color anaranjado + color azul): partículas de sulfuro de Fe (pirita).
- S+ Cu + Fe (color naranja + color ciclamen + color azul): sulfuro de Cu-Fe (calcopirita).
- O +Fe (color celeste + color azul): Oxido de Fe (magnetita/hematita).

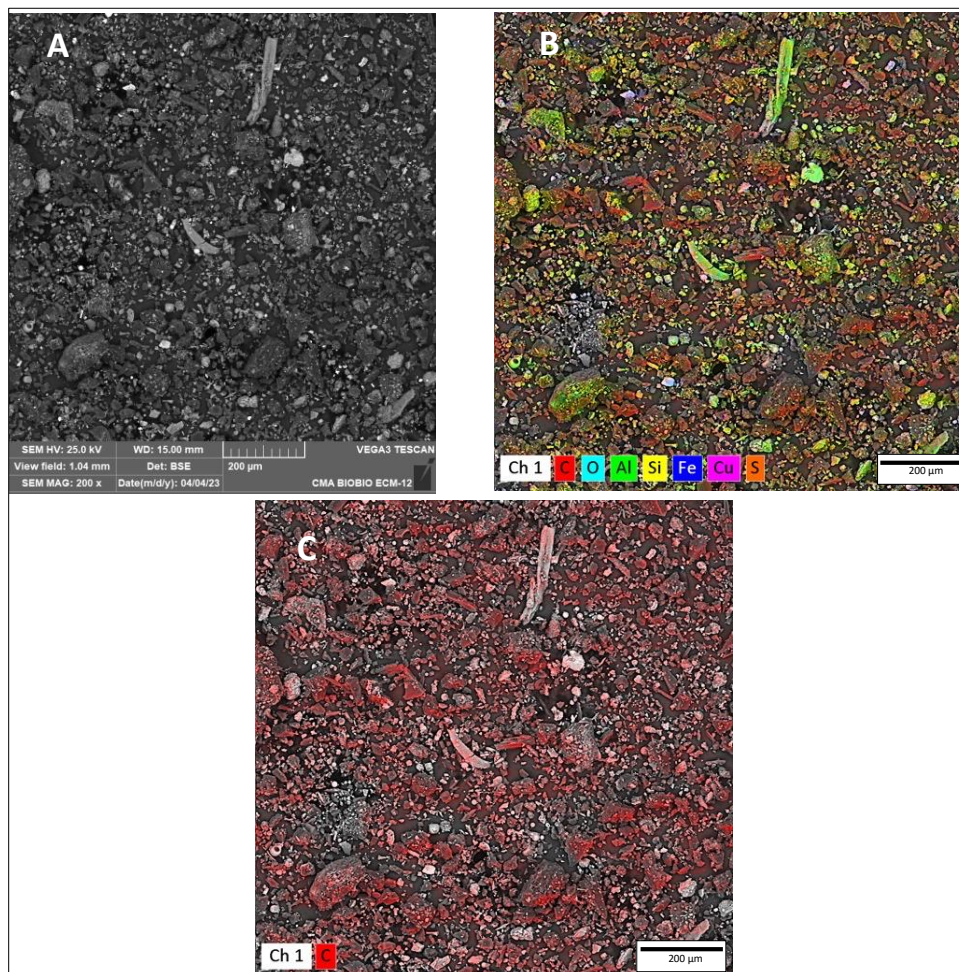


Lámina 1. A: SEM/BSE; B: SEM/EDS mapping de C, O, Al, Si, Fe, Cu y S; C: mapping de C

Información de detalle de la composición del MPS insoluble para cada una de las muestras estudiadas en este período (diciembre 2022-marzo 2023) está contenida en Fichas por muestra, las cuales se incorporarán como Anexo al Informe Anual.

5.3 Masa y porcentaje en masa de los componentes del MPS insoluble

La determinación porcentual en volumen de cada uno de los componentes del *MPS insoluble* se realizó mediante software especializado, contabilizando los diferentes tipos de componentes sobre 3 imágenes SEM/BSE por muestra. Una vez determinado el porcentaje (en volumen) de cada componente en cada muestra, se calculó la masa, multiplicando el porcentaje en volumen por el valor de densidad asignado a cada tipo de partícula⁹ (referencias en sección 2.4), normalizando el valor obtenido a la masa total colectada en la estación correspondiente (Tabla 5).

⁹

Brizas de vegetales: 1,5 g/cm³

Partículas de carbón: 1,4 g/cm³

Residuos de Combustión: 2,5 g/cm³ (los valores de densidad fluctúan entre 1,9 a 2,9 g/cm³)

Partículas Metálicas: 5,0 g/cm³ (sulfuros de Cu-Fe: 4,9 /cm³; Magnetita: 5,2 g/cm³)

Masa por tipo de partícula (g)	Diciembre 2022-Enero 2023				Enero-Febrero 2023				Febrero-Marzo 2023			
	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto
Partículas de carbón	1,524	0,105	0,086	0,019	1,310	0,074	0,021	0,022	1,165	sin registro	0,020	0,017
Residuos de combustión	1,161	0,419	0,871	1,149	1,342	0,389	0,352	1,085	1,338		0,439	1,007
Partículas metálicas	0,264	0,045	0,175	0,076	0,260	0,030	0,019	0,055	0,085		0,018	0,041
Vegetales	0,069	0,014	0,034	0,013	0,092	0,015	0,009	0,031	0,093		0,011	0,017
Total Colectado	3,019	0,582	1,166	1,257	3,004	0,510	0,401	1,193	2,681		0,488	1,083

Tabla 5 Masa por tipo de partícula en las 4 Estaciones, en los 3 meses de monitoreo del período diciembre 2022-marzo 2023

Una vez determinada la masa de los diferentes componentes, se procedió a determinar el porcentaje (en masa), con el propósito de determinar cuáles componentes tienen mayor influencia sobre la masa total del MPS Insoluble (Tabla 6).

Porcentaje por tipo de partícula (%)	Diciembre 2022-Enero 2023				Enero-Febrero 2023				Febrero-Marzo 2023			
	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto
Partículas de carbón	50,471	18,040	7,346	3,574	43,597	14,595	5,292	1,835	43,443	sin registro	4,068	1,603
Residuos de combustión	38,470	71,958	74,729	87,690	44,684	76,438	87,705	90,919	49,910		89,940	93,016
Partículas metálicas	8,760	7,677	15,015	7,196	8,649	5,984	4,761	4,626	3,180		3,787	3,793
Vegetales	2,299	2,326	2,910	1,540	3,069	2,983	2,242	2,621	3,466		2,205	1,589

Tabla 6 Porcentaje en masa por tipo de partícula en las 4 Estaciones, en los 3 meses de monitoreo del período diciembre 2022-marzo 2023.

El componente que, porcentualmente, más aporta a la masa del MPS insoluble, corresponde a residuos de combustión de carbón (ceniza volante) en todas las Estaciones de monitoreo, especialmente en la Estación MPS Alto. En la Estación Cancha Carbón solo en el primer mes de este período de monitoreo (diciembre 2022-marzo 2023) el porcentaje de residuos de combustión es menor que el porcentaje de partículas de carbón.

El segundo componente más abundante corresponde a partículas de carbón, con porcentaje significativamente más alto en la Estación Cancha Carbón.

Para una mejor comparación de los resultados, en la Tabla 7 se presentan los valores promedio de la masa, y porcentaje en que cada componente aporta el MPS insoluble.

Masa promedio (g) por tipo de componente en MPS insoluble	Masa promedio por estación				Porcentaje (%) promedio por tipo de componente en MPS insoluble	Porcentaje promedio por estación			
	Cancha Carbón	Galo Herrera*	MPS Bajo	MPS Alto		Cancha Carbón	Galo Herrera*	MPS Bajo	MPS Alto
Partículas de carbón	1,333	0,090	0,042	0,019	Partículas de carbón	45,837	16,318	5,569	2,337
Residuos de combustión	1,281	0,404	0,554	1,080	Residuos de combustión	44,355	74,198	84,125	90,541
Partículas metálicas	0,203	0,038	0,071	0,057	Partículas metálicas	6,863	6,830	7,854	5,205
Vegetales	0,085	0,014	0,018	0,020	Vegetales	2,945	2,655	2,452	1,917
Galo Herrera * promedio masa solo 2 meses					Galo Herrera * Porcentaje promedio solo 2 meses				

Tabla 7 Masa y Porcentaje promedio de componentes en MPS insoluble (diciembre 2022 a marzo 2023)

De la comparación de los resultados contenidos en Tabla 7 y Tabla 8, se destaca que:

- Los residuos de combustión de carbón contribuyen en promedio a la masa total del MPS insoluble con 1,3 g en la Estación Cancha Carbón y solo 0,4 g en la Estación Galo Herrera. En las Estaciones MPS Bajo y MPS Alto, contribuyen en promedio a la masa total con 0,6 g y 1,1 g, respectivamente. En términos porcentuales representan el 90,5% del MPS Insoluble en la Estación MPS Alto y solo el 44,4% en la Estación Cancha Carbón.

- El carbón aporta en promedio entre 1,3 gramos en la Estación Cancha Carbón y solo 0,02 g en la Estación MPS Alto. El porcentaje promedio de carbón más alto se registra en la Estación Cancha Carbón (45,8%) y el más bajo en la Estación MPS Alto (2,3%).
- Las partículas metálicas aportan al *MPS insoluble* con 0,2 g en la Estación Cancha Carbón y con valores que fluctúan entre 0,071 g y 0,039 g, en las restantes 3 Estaciones. Están presentes en porcentaje más alto en la Estación MPS Bajo (7,9%), con valores similares en la Estación Cancha Carbón (6,9%) y Galo Herrera (6,8%) y porcentaje más bajo (5,2%) en La Estación MPS Alto.
- Los restos vegetales presentan un porcentaje comparativamente más alto en la Estación Cancha Carbón (2,9%) y Galo Herrera (2,7%) y porcentajes más bajos en las Estaciones MPS Bajo (2,5%) y MPS Alto (1,9%). Su aporte a la masa del *MPS insoluble* varía entre 0,085 g en la Estación Cancha Carbón y entre 0,020 y 0,014 g en las estaciones restantes.

5.4 Tasa de Sedimentación del MPS insoluble

En la Tabla 8 se presentan las variables utilizadas para el cálculo de la Tasa de Sedimentación del MPS Insoluble en cada una de las 4 Estaciones durante cada mes de monitoreo en el período diciembre 2022-marzo 2023. Nótese la diferencia que se establece entre la Tasa de Sedimentación calculada utilizando el número de días de acumulación efectiva (columna A) y la Tasa de Sedimentación normalizada a mes de 30 días (columna B). La Tasa de Sedimentación diaria (Columna C) se ha calculado sobre la base del número días efectivos de acumulación del MPS.

Fecha de Inicio	Fecha Final	Estación	Período de Muestreo en días efectivos	A Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m2/mes efectivo)	B Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m2/mes de 30 días)	C Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m2/día efectivo)
16-12-22	09-01-23	Cancha Carbón	24	15498,374	19372,968	645,766
16-12-22	09-01-23	Galo Herrera	24	2987,447	3734,308	124,477
09-12-22	09-01-23	MPS Bajo	31	5984,648	5791,595	193,053
09-12-22	09-01-23	MPS Alto	31	6451,324	6243,217	208,107
09-01-23	09-02-23	Cancha Carbon	31	15424,445	14926,882	497,563
09-01-23	09-02-23	Galo Herrera	31	2615,749	2531,370	84,379
09-01-23	08-02-23	MPS Bajo	30	2058,715	2058,715	68,624
09-01-23	08-02-23	MPS Alto	30	6125,318	6125,318	204,177
09-02-23	09-03-23	Cancha Carbon	28	13762,072	14745,077	491,503
sin registro		Galo Herrera		sin registro		
08-02-23	09-03-23	MPS Bajo	29	2503,315	2589,636	86,321
08-02-23	09-03-23	MPS Alto	29	5559,043	5750,734	191,691
			Promedio Periodo	Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m2/mes efectivo)	Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m2/mes de 30 días)	Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m2/día efectivo)
			Cancha Carbón	14894,964	16348,309	544,944
			Galo Herrera	2801,598	3132,839	104,428
			MPS Bajo	3515,559	3479,982	115,999
			MPS Alto	6045,228	6039,756	201,325

Tabla 8 Tasa de Sedimentación de MPS Insoluble mensual y diaria en el período diciembre 2022-marzo 2023.

Considerando los valores diarios de la Tasa de Sedimentación del MPS insoluble (Columna C de la Tabla 8), se destaca que:

- Estación Cancha de Carbón: respecto al primer mes (645,766 mg/m²/día efectivo) se observa decrecimiento de 22,9% en el segundo mes (497,563 mg/m²/día efectivo) y de 1,2 % del segundo al tercer mes (491,503 mg/m²/día efectivo).
- Estación Galo Herrera: respecto al primer mes (124,477 mg/m²/día efectivo) muestra un decrecimiento significativo en el segundo mes (84,379 mg/m²/día efectivo) del orden de 32,2%. En el tercer mes no hubo registro por robo del colector.

- Estación MPS Bajo: la tasa de sedimentación registrada en el primer mes (193,053 mg/m²/día efectivo) decrece en un 64,5% en el segundo mes (68,624 mg/m²/día efectivo) y se incrementa en 25,8% en el tercer mes (86,321 mg/m²/día efectivo). Pese a ese incremento, en el tercer mes la tasa se reduce en 55,3% respecto al primer mes.
- Estación MPS Alto: la tasa de sedimentación en el primer mes (208,107 mg/m²/día efectivo) decrece levemente (1,9%) en el segundo mes (204,177 mg/m²/día) y en el tercer mes (191,691 mg/m²/día efectivo) decrece un 6,1% respecto al mes 2.

Los valores diarios promedio (3 meses) de la Tasa de Sedimentación diaria del MPS insoluble, indican que el mayor valor promedio se registra en la Estación Cancha Carbón, seguido de Estación MPS Alto, Estación MPS Bajo y Estación Galo Herrera. Con respecto a la Estación Cancha Carbón, la tasa de Sedimentación diaria promedio del MPS insoluble se reduce en 80,8% en la Estación Galo Herrera, 78,7% en la Estación MPS Bajo y en 63,1% en la Estación MPS Alto.

6 RESULTADOS REFERIDOS AL COMPONENTE CARBÓN DEL MPS INSOLUBLE

Esta sección hace referencia en particular al componente “carbón” del MPS Insoluble, dado que constituye la variable principal del monitoreo estipulado en la Resolución 0045/22 del SRMS que rige el estudio.

Como se indicó en la sección anterior (ver Tabla 5, 6 y 7), el carbón es el segundo componente más abundante en el MPS insoluble.

6.1 Masa, porcentaje y tamaño de partículas de carbón

La masa de carbón es significativamente más alta en la Estación Cancha Carbón, con un valor promedio (3 meses) de 1,333 g. La masa de carbón disminuye significativamente en la Estación Galo Herrera (promedio 0,090 g), ubicada 150 m al NNE-SSW de la Estación Cancha Carbón y, sigue disminuyendo, en las Estaciones MPS Bajo (0,042 g) y MPS Alto (0,019) ubicadas a 275 m al NNW-SSE y 475 m al NNE-SSW de la E. Cancha Carbón (Figura 4).

En términos porcentuales, en la Estación Galo Herrera se acumula solo un 6,8%, en la Estación MPS Bajo solo un 3,2% y en la Estación MPS Alto solo un 1,4% de la masa que se registra en la Estación Cancha Carbón.

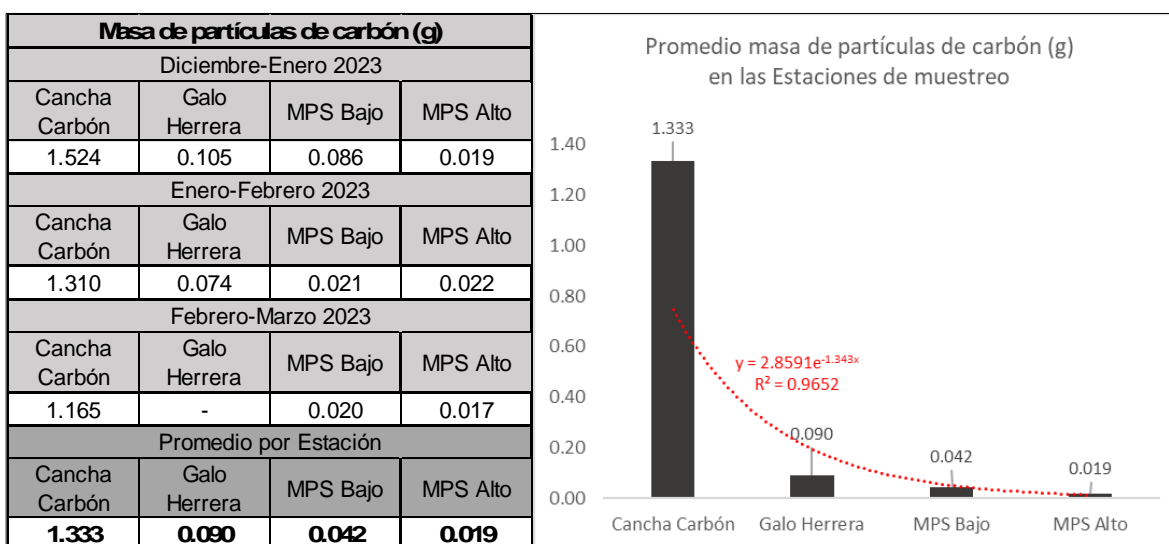


Figura 4 Masa de carbón registrada en las 4 estaciones y variabilidad en el período diciembre de 2022-marzo 2023.

En la Tabla 9 se presenta el porcentaje en masa de carbón, respecto del MPS insoluble, para cada Estación por mes de monitoreo, además del porcentaje en masa promedio. En todas las Estaciones se registra una leve disminución del porcentaje de carbón, desde el primer al tercer mes.

Porcentaje (% en masa) del carbón	Diciembre 2022-Enero 2023				Enero-Febrero 2023				Febrero-Marzo 2023			
	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto
	50,47	18,04	7,35	3,57	43,60	14,60	5,29	1,83	43,44	-	4,07	1,60
				Promedio por estación	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto				
					45,84	16,32	5,57	2,34				

Tabla 9 Porcentaje (en masa) del carbón en el MPS Insoluble en las 4 Estaciones (diciembre 2022-marzo 2023)

Los resultados promedio por Estación del porcentaje (en masa) del carbón (Tabla 9) señalan una disminución muy significativa desde la Estación Cancha Carbón en función de la distancia que la separa de las otras Estaciones, así en la Estación MPS Alto, la más alejada, el porcentaje de carbón se ha reducido en 94,9%, en la Estación MPS Bajo en 87,9% y en la Estación Galo Herrera, la más cercana, en 64,4%.

La Tabla 10 contiene los valores del tamaño máximo y mínimo (micrones) de las partículas de carbón para las 4 Estaciones durante los 3 meses de monitoreo del período diciembre 2022-marzo 2023. El mayor tamaño máximo promedio se registra en la Estación Cancha Carbón (236,6 μm) y el menor tamaño máximo promedio (110,4 μm) se registra en la Estación MPS Alto, la más alejada de la cancha de acopio de carbones utilizados en el Complejo Termoeléctrico Ventanas.

		Rango de tamaño (Min-Máx) de Partículas de Carbón (μm)		Promedio Tamaño Máximo de Partículas de Carbón (μm)
Período diciembre 2022-enero 2023	Cancha Carbón	8,5	288,4	236,6
Período enero-febrero 2023		14,2	221,7	
Período febrero-marzo 2023		12,4	199,7	
Período diciembre 2022-enero 2023	Galo Herrera	15,5	83,7	132,2
Período enero-febrero 2023		16,0	180,8	
Período febrero-marzo 2023		-	-	
Período diciembre-enero 2023	MPS Bajo	23,3	211,4	157,7
Período enero-febrero 2023		15,8	152,4	
Período febrero-marzo 2023		16,6	109,3	
Período diciembre 2022-enero 2023	MPS Alto	26,2	103,5	110,4
Período enero-febrero 2023		28,7	118,0	
Período febrero-marzo 2023		51,1	109,8	

Tabla 10 Tamaño mínimo y máximo (en micrones) de las partículas de carbón, período diciembre 2022-marzo 2023

6.2 Tasa de Sedimentación del Carbón

En la Tabla 11 se indica la Tasa de Sedimentación del Carbón diaria, calculada sobre la base de los días efectivos de acumulación en los colectores pasivos de las 4 Estaciones en los 3 meses de monitoreo del período diciembre 2022.-marzo 2023.

Fecha de Inicio	Fecha Final	Estación	Período de Muestreo en días efectivos	Tasa de Sedimentación carbón (mg/m ² /día efectivo)
16-12-22	09-01-23	Cancha Carbón	24	325,924
16-12-22	09-01-23	Galo Herrera	24	22,456
09-12-22	09-01-23	MPS Bajo	31	14,182
09-12-22	09-01-23	MPS Alto	31	3,179
09-01-23	09-02-23	Cancha Carbón	31	216,923
09-01-23	09-02-23	Galo Herrera	31	12,315
09-01-23	08-02-23	MPS Bajo	30	3,632
09-01-23	08-02-23	MPS Alto	30	3,746
09-02-23	09-03-23	Cancha Carbon	28	213,524
sin registro		Galo Herrera		'---
08-02-23	09-03-23	MPS Bajo	29	3,512
08-02-23	09-03-23	MPS Alto	29	3,072
			Promedio Período	Tasa de Sedimentación carbón (mg/m ² /día efectivo)
			Cancha Carbón	252,124
			Galo Herrera	17,385
			MPS Bajo	7,109
			MPS Alto	3,333

Tabla 11 Tasa Sedimentación Carbón por Estación en el período diciembre 2022-marzo 2023

Considerando los valores diarios de la Tasa de Sedimentación del Carbón MPS, destaca que en las Estaciones Cancha Carbón, Galo Herrera y MPS Bajo las Tasas de Sedimentación de Carbón decrecen significativamente desde el primer mes al segundo, manteniéndose los valores relativamente constantes en el tercer mes.

- Cancha Carbón: registra los valores más altos, en comparación con las restantes Estaciones. La Tasa de Sedimentación del carbón del primer mes (325,924 mg/m²/día efectivo), disminuye en 33,4% en el segundo mes (216,923 mg/m²/día efectivo) y en 1,6% en el tercer mes (213,524 mg/m²/día efectivo).
- Galo Herrera: la tasa del primer mes (22,456 mg/m²/día efectivo) disminuye significativamente en 45,2% en el segundo mes (12,315 mg/m²/día efectivo). En el tercer mes no hay registro a causa del robo del colector.
- MPS Bajo: la tasa del primer mes (14,182 mg/m²/día efectivo) disminuye significativamente en 74.4% en el segundo mes (3,632) y entre el segundo y tercer mes (3,512 mg/m²/día efectivo) disminuye 3,3%.
- MPS Alto: registra la tasa más baja de todas las estaciones en cada mes de monitoreo. En el segundo mes (3,746 mg/m²/día efectivo) la tasa se incrementa levemente en 17,8% respecto del primer mes (3,779 mg/m²/día efectivo) y luego decrece en 18% en el tercer mes (3,072 mg/m²/día efectivo), alcanzando el valor más bajo del período.

7 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

7.1 Componentes antrópicos y su proporción en el MPS

Los 4 colectores pasivos de MPS están emplazados en, o cerca de las instalaciones del Complejo Termoeléctrico Ventanas de propiedad de AES Andes. En las cercanías existen además numerosas instalaciones industriales.

En la Figura 5 se representan gráficamente los componentes del MPS Insoluble en cada Estación, por mes de monitoreo. Como se observa, el componente prioritario del MPS corresponde a residuos de combustión industrial de carbón. En segundo componente es el carbón, el cual tiene mayor presencia en la Estación Cancha Carbón y Estación Galo Herrera, disminuyendo drásticamente su presencia en las Estaciones MPS Bajo y MPS Alto, las más alejadas de los sectores donde se acopia o transporta carbón.

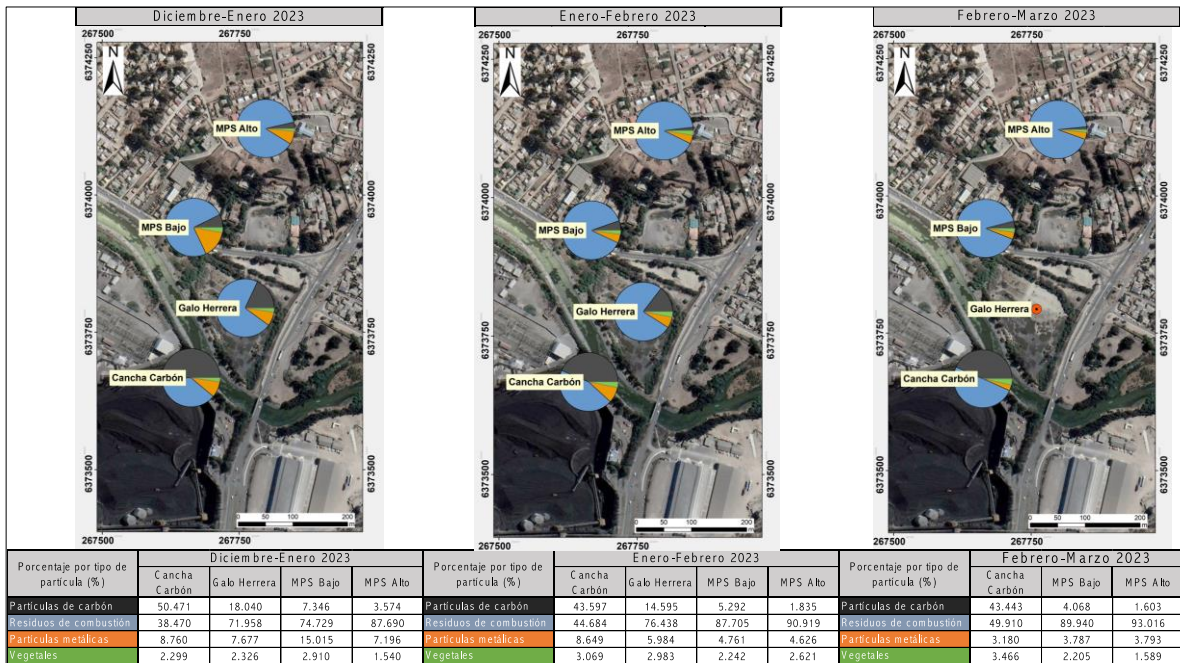


Figura 5 Evolución porcentual (% en masa) de los componentes del MPS Insoluble en las 4 Estaciones (período diciembre 2022-marzo 2023)

Al considerar los porcentajes promedio de los 3 componentes antrópicos respecto al orden de participación en el MPS insoluble (ver Tabla 7), destaca que:

- Residuos de Combustión: provienen de la actividad industrial del CTV con sus actuales 3 centrales termoeléctricas a carbón: Aporte promedio al MPS total entre 90,5% (E. MPS Alto) y 44,4% (E. Cancha Carbón).
- Partículas de carbón: corresponden a polvo movilizado por el viento desde los lugares de transporte y acopio del carbón utilizado en la alimentación de las 3 centrales: Aporte promedio al MPS total entre 45,8% (Estación Cancha Carbón) y 2,3% (E. MPS Alto). El porcentaje de carbón, tomando como referencia la Estación Cancha Carbón, se reduce en

64,4% en la Estación Galo Herrera, en 87,9% en la Estación MPS Bajo y 94,9% en la Estación MPS Ato.

- Partículas metálicas: dada su composición mineralógica provienen probablemente de los lugares de acopio de concentrado de cobre: Aporte promedio al MPS total entre 7,9% (Estación MPS Bajo) y 5,2% (Estación MPS Alto). Las Estaciones Cancha Carbón y Galo Herrera contienen porcentaje similar (6,9% y 6,8%, respectivamente)

7.2 Tasa de Sedimentación del MPS total

Numerosos estudios han identificado al MPS como responsable de la transferencia de contaminantes. Las repercusiones del MPS en el medio ambiente pueden tener efecto sobre la fotosíntesis de las plantas, la acidificación de suelos y masas de agua, la degradación del entorno habitable y generar daño en la salud de la fauna (incluyendo las personas). A la hora de determinar la política ambiental local y soluciones de gestión, es crucial determinar las tasas de sedimentación del MPS, la(s) fuente(s) de la contaminación y la distribución desde ella(s).

Tradicionalmente, el MPS ha sido monitoreado gravimétricamente utilizando colectores pasivos. Hay una amplia variedad de colectores en uso en todo el mundo (cuencos, cilindros o embudos horizontales de boca abierta) que, por lo general operan con recolección del MPS mensual. La Tasa de Sedimentación de sólidos no disueltos (MPS Insoluble), aunque a veces también se incluyen los sólidos disueltos (MPS Soluble), se puede expresar por día ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$), por mes de 30 días ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{mes}$) o por año ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{año}$). Considerando que a menudo las condiciones operativas de las fuentes de origen son episódicas, o bien ocurren condiciones meteorológicas anormales o ambas, la expresión de la Tasa de Sedimentación anual se considera más representativa.

Con el fin de gestionar y minimizar los efectos adversos de las partículas sedimentables (MPS), varios países, entre ellos Chile, han establecido los estándares máximos permitidos. Estos estándares varían según el país y, a veces, el estado, como ocurre en Estados Unidos, Canadá y Brasil. La Tabla 14 (tomada de Vallack & Shillito, 1998) resume los umbrales estándar establecidos por Agencias Ambientales en países europeos, América del Norte y Argentina.

2738 H. W. VALLACK and D. E. SHILLITO

Table 1. Examples of dust deposition standards outside the U.K. (as $\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

Argentina	Annual average	333
Australia (W. Australia)	Loss of amenity first perceived	133
	Unacceptable reduction in air quality	333
Canada		
Alberta	Annual average	180
Manitoba	Annual average	153
	(maximum acceptable)	266
	(maximum desirable)	200
Newfoundland	Annual average	153
	Monthly average	233
Ontario	Annual average	170
	Monthly average	200
Finland	Annual average	333
Germany	Long-term average	350*
	Short-term average	650*
Spain	Annual average	200
U.S.A.		
Kentucky	Annual average	196
Louisiana	Annual average	262
Maryland	Annual average	183
Mississippi	Monthly average (above background)	175
Montana	Annual average (residential areas)	196
New York	During any 12 months no more than	
	5% of 30 d values to exceed	100
	and 84% to be below	130
North Dakota	3 Monthly average	196
Pennsylvania	Annual average	267
	Monthly average	500
Washington	Annual average	183
Wyoming	Monthly average	170

* Combined weight of dissolved and undissolved deposits.

Tabla 12 Valores límites de Tasa de Sedimentación de MPS ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$)

En el caso de Brasil, existe una norma del Estado de Minas Gerais (COPAM N°1/81) para áreas industrializadas que fija el valor límite en $10 \text{ g}/\text{m}^2/\text{mes}$, que corresponde a $333 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{día}$. En un trabajo relativamente reciente, Santos et al. (2017), estudian diferentes áreas industriales de estados brasileños (Minas Gerais, Río de Janeiro, Amapá y Vitoria) validando ese valor límite.

Chile no dispone de norma primaria para material particulado sedimentable MPS, por lo que se acostumbra utilizar como referencia el nivel límite definido en la norma secundaria por la cual se rige la Tercera Región (Cuenca del Río Huasco). Es una norma de calidad de aire en lo que respecta a polvo sedimentable, publicada en el D. E. N°4/1992 del Ministerio de Agricultura, que fija como Tasa de Sedimentación límite diaria el valor $150 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{día}$ como concentración media aritmética mensual, o bien $100 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{día}$ como concentración media aritmética anual.

En la Tabla 13 se resume la información de la Tasa de Sedimentación diaria ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$ efectivo) del MPS soluble, insoluble y total para las 4 Estaciones y los 3 meses de monitoreo del período diciembre 2022-marzo 2023 (corresponden a los meses 7, 8 y 9 desde el inicio del monitoreo), así como los valores promedio para el período.

Fecha de Inicio	Fecha Final	Estación	Período de Muestreo en días efectivos	Tasa de Sedimentación MPS soluble (mg/m ² /día efectivo)	Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m ² /día efectivo)	Tasa de Sedimentación MPS total (mg/m ² /día efectivo)	
16-12-22	09-01-23	Cancha Carbón	24	28,772	645,766	674,537	
16-12-22	09-01-23	Galo Herrera	24	25,862	124,477	150,339	
09-12-22	09-01-23	MPS Bajo	31	28,005	193,053	221,058	
09-12-22	09-01-23	MPS Alto	31	11,891	208,107	219,998	
09-01-23	09-02-23	Cancha Carbon	31	24,063	497,563	521,626	
09-01-23	09-02-23	Galo Herrera	31	19,261	84,379	103,640	
09-01-23	08-02-23	MPS Bajo	30	17,678	68,624	86,302	
09-01-23	08-02-23	MPS Alto	30	23,240	204,177	227,417	
09-02-23	09-03-23	Cancha Carbon	28	80,071	491,503	571,574	
sin registro		Galo Herrera		--	--	--	
08-02-23	09-03-23	MPS Bajo	29	20,058	86,321	106,379	
08-02-23	09-03-23	MPS Alto	29	27,812	191,691	219,503	
				TASAS PROMEDIO PERÍODO	Tasa de Sedimentación MPS soluble (mg/m ² /día efectivo)	Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m ² /día efectivo)	Tasa de Sedimentación MPS total (mg/m ² /día efectivo)
				Cancha Carbón	44,302	544,944	589,246
				Galo Herrera	22,561	104,428	126,989
				MPS Bajo	21,914	115,999	137,913
				MPS Alto	20,981	201,325	222,306

Tabla 13 Tasa de Sedimentación diaria de MPS soluble, insoluble y total en las 4 Estaciones y en los 3 meses de monitoreo

En la Figura 6 se indican los valores de la Tasa de Sedimentación mensual (mg/m²/mes) y diaria (mg/m²/día efectivo) para el MPS Soluble, Insoluble y Total en las 4 Estaciones, durante los 3 meses de monitoreo del período diciembre 2022-marzo 2023. Las líneas rojas expresan:

- valor máximo mensual (mes 30 días) y diario de 150 mg/m²/día indicado en el D.E. N°4/1992 (cuenca Río Huasco).
- Valor máximo mensual (mes 30 días) y diario de 333 mg/m²/día estipulado en la norma brasileña para áreas industriales COPAM N° 1/81.

Considerando la Tasa de sedimentación mensual y diaria del MPS Total, como se observa en el gráfico de la Figura 6;

- 1) Las estaciones que sobrepasan el límite indicado en la norma Cuenca del Río Huasco (D.E. N°4/92) son:
 - Estación Cancha Carbón en los tres meses de monitoreo del período diciembre 2022-marzo 2023 (mes 7, 8 y 9 desde inicio monitoreo).
 - Estación Galo Herrera prácticamente en el límite en el primer mes del período (diciembre 2022-marzo 2023).
 - Estación MPS Bajo y Estación MPS Alto en el primer mes del período (diciembre 2022-marzo 2023).
 - Estación MPS Alto en los tres meses del actual período de monitoreo (diciembre 2022-marzo 2023).
- 2) Las estaciones que sobrepasan el límite indicado en la norma brasileña COPAM N° 1/81 para áreas industrializadas son:
 - Estación Cancha Carbón en los tres meses del actual período de monitoreo (diciembre 2022-marzo 2023).

Al respecto, se hace notar que la Estación Cancha Carbón se ubica “dentro” de un área industrial por tanto no debería sorprender que sobrepase la norma brasileña.

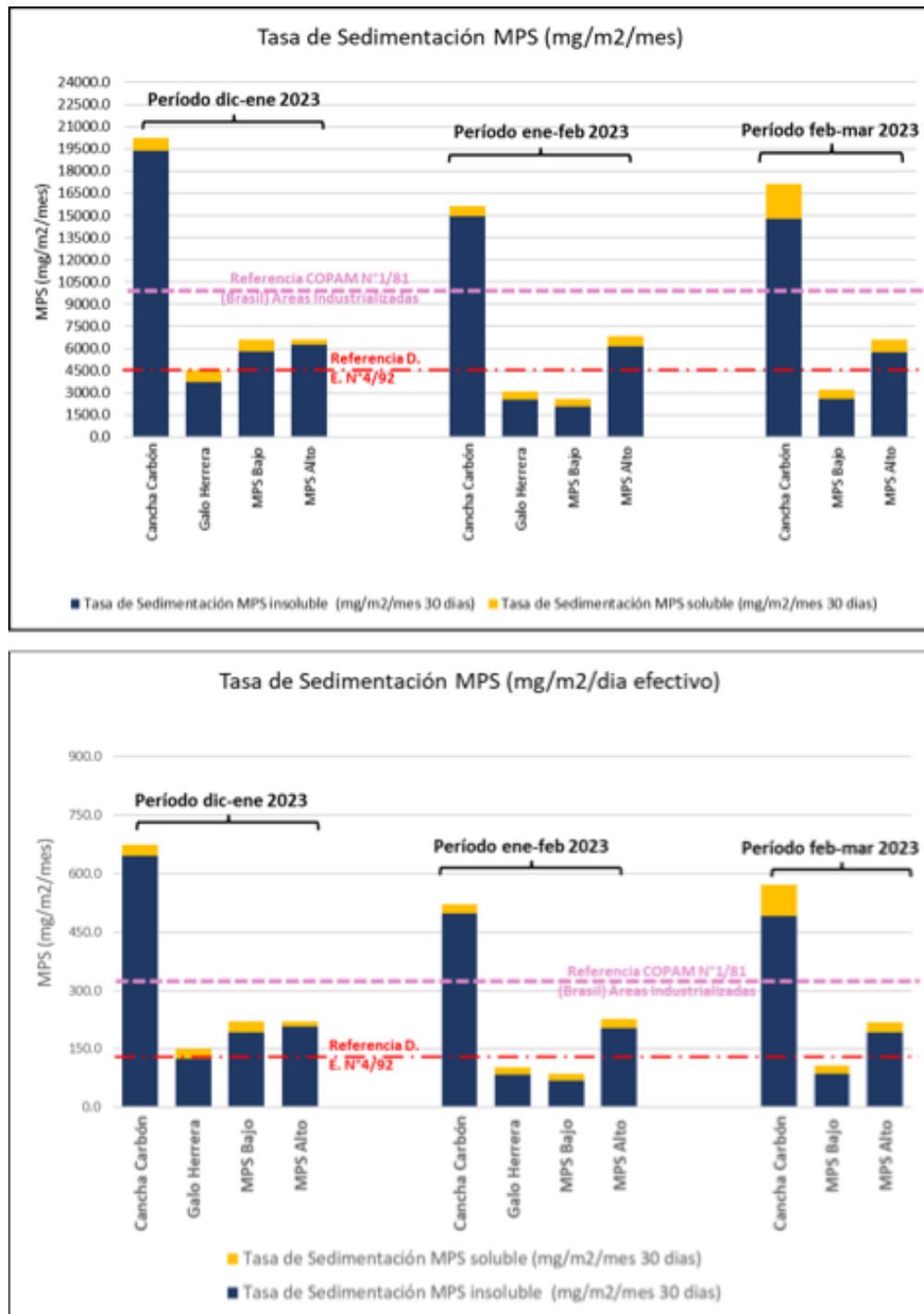


Figura 6 Tasa de Sedimentación mensual y diaria del MPS en las 4 Estaciones (diciembre 2022-marzo 2023)

7.3 Tasa de Sedimentación del Carbón

Por sus características físicas y el tamaño de los fragmentos, el carbón particulado es susceptible de ser erosionado por la acción del viento dentro y fuera de las instalaciones industriales que lo utilizan

o manejan. En ese sentido, la erosión eólica que lo afecte provocará efectos similares a los que ocurren en los botaderos de minas o en los relaves de minerales.

En el área monitoreada, como es evidente y esperable, el mayor contenido de carbón se registra en la Estación Cancha Carbón, lugar de acopio y movimiento de los carbones que serán utilizados en el proceso de termo-generación del CTC y muy probablemente, lugar de origen de las partículas de carbón (menores de 1mm de diámetro) que forman parte del MPS insoluble. La Estación Cancha Carbón está ubicada dentro de la dependencia del mismo nombre, adyacente a la membrana deflectora que protege los sectores externos de la dispersión de partículas de carbón desde la cancha de acopio.

Como se aprecia en el gráfico de la Figura 7, la Tasa de Sedimentación del Carbón en la Estación Cancha Carbón supera el valor máximo diario permitido para la cuenca del Río Huasco (D.E N° 4/91) en los tres meses del monitoreo que se informa (diciembre 2022-marzo 2023). La Tasa de Sedimentación del Carbón en la Estación Cancha Carbón está por debajo del límite aceptado para áreas industriales de la norma brasileña COPAM N°1/81 en los tres meses de monitoreo del período diciembre 2022-marzo 2023.

En las restantes 3 Estaciones, Galo Herrera, MPS Bajo y MPS Alto, ubicadas a una distancia de 150 m, 275 m y 475 m, respectivamente, de la Estación Cancha Carbón, las Tasas de Sedimentación de carbón son considerablemente menores (Figura 7) y en ninguno de los 3 meses de monitoreo sobrepasan el límite diario de 150 mg/m²/día que precisa el D.E. 4/91 del Ministerio de Agricultura (norma Cuenca del Río Huasco).

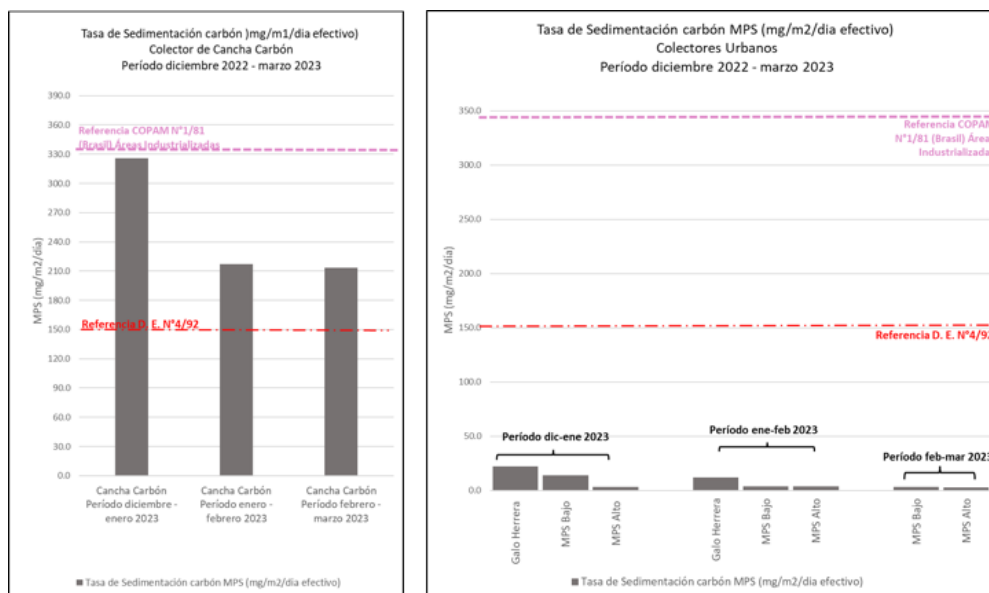


Figura 7 Tasa Sedimentación Carbón diaria en las 4 Estaciones (diciembre 2022-marzo 2023)

Considerando el promedio de la Tasa de Sedimentación del Carbón diaria registrada en la Estación Cancha Carbón (promedio: 252,124 mg/m²/día efectivo), se constata una significativa reducción de ésta, del orden de 93,2% en la Estación Galo Herrera (promedio: 17,385 mg/m²/día efectivo), 96,8% en la Estación MPS Bajo (promedio: 7,109 mg/m²/día efectivo) y 98,6% en la Estación MPS Alto (promedio: 3,333 mg/m²/día efectivo). Como las Estaciones Galo Herrera, MPS Bajo y MPS Alto están ubicadas a una distancia de 150 m, 275 m y 475 m, respectivamente, de la Estación Cancha

de Carbón, se concluye que la disminución está determinada por la efectividad de las medidas de control de la dispersión de las partículas de carbón, adoptadas por AES-Andes.

8 CONCLUSIONES

8.1 Tasa de Sedimentación mensual MPS

El grueso de la Tasa de Sedimentación total está determinado por la Tasa de Sedimentación del MPS insoluble, que representa el 92,5% en la Estación Cancha Carbón, 82,2% en la Estación Galo Herrera, 84,1% en la Estación MPS Bajo y 90,6% en la Estación MPS Alto.

- 1) Los valores más altos de Tasa de Sedimentación mensual del período diciembre 2022-marzo 2023 en los 3 meses de monitoreo (mes 7, 8 y 9 desde el inicio del monitoreo) se registran en la Estación Cancha Carbón, con valor promedio de 17677,370 mg/m²/mes 30 días), seguido de la Estación MPS Alto con valor promedio de 6669,180 mg/m²/mes 30 días. Los valores promedio más bajos se registran en la Estación Galo Herrera con 3809,682 mg/m²/mes 30 días y Estación MPS Bajo con 4137,388 mg/m²/mes 30 días.
- 2) La Tasa de Sedimentación diaria del MPS total supera el valor límite de 150 mg/m² /día que precisa la norma secundaria para la Cuenca del Río Huasco (D.E. N°4/92) en:
 - Estación Cancha Carbón en los tres meses monitoreados (diciembre 2022-marzo 2023)
 - Estación Galo Herrera, sobrepasa levemente el límite en el primer mes (diciembre 2022-enero 2023)
 - Estación MPS Bajo en el primer mes (diciembre 2022-enero 2023)
 - Estación MPS Alto en los 3 meses del período (diciembre 2022-marzo 2023).

8.2 Tasa de Sedimentación diaria del MPS soluble

El mayor valor promedio se registra en la Estación Cancha Carbón (44,302 mg/m²/día efectivo), reduciéndose significativamente, prácticamente a la mitad, en las restantes 3 Estaciones: Estación Galo Herrera (22,561 mg/m²/día efectivo), Estación MPS Bajo (21,914 mg/m²/día efectivo) y Estación MPS Alto (20,981 mg/m²/día efectivo).

8.3 Granulometría MPS Insoluble

El tamaño mínimo promedio de las partículas es relativamente uniforme en todas las Estaciones (promedio 0,232 μm). Con relación al tamaño máximo, los valores promedio por estación permiten constatar una reducción sostenida del tamaño en función de la lejanía a la Estación Cancha Carbón (promedio 272,318 μm). Así, el tamaño máximo se reduce en 16,3% en la Estación Galo Herrera (promedio 228,050 μm), en 37,9% en la Estación MPS Bajo (promedio 168,984 μm) y 58,4% en la Estación MPS Alto (promedio 113,184 μm).

8.4 Componentes del MPS insoluble

- 1) Mayoritariamente está compuesto de partículas antrópicas. Componentes naturales, como restos de vegetales, representan solo entre 2,9% y 1,9% del MPS Insoluble (promedio período).
- 2) Los residuos de combustión son el principal componente del MPS en todas las Estaciones. La Estación MPS Alto presenta el porcentaje promedio más alto de residuos de combustión

(90,5%), seguido de la Estación MPS Bajo (84,1%), Galo Herrera (74,2%) y Cancha Carbón (44,4%).

- El carbón es el segundo componente más abundante del MPS insoluble. El porcentaje promedio de carbón en los 3 meses de monitoreo es significativamente más alto en la Estación Cancha Carbón (45,8%), disminuyendo de manera sostenida a medida que aumenta la distancia a las instalaciones del CTV -se reduce en 64,4% en la Estación Galo Herrera, en 87,9% en la Estación MPS Bajo y 94,9% en la Estación MPS Alto.
- 3) Partículas metálicas del tipo sulfuros de Cu-Fe y Sulfuros de Cu están presentes en porcentaje relativamente similar en las 4 Estaciones, 7,9% en la Estación MPS Bajo, 6,9% en la Estación Cancha Carbón, 6,8% en la Estación Galo Herrera y 5,2% en la Estación MPS Alto.

8.5 Carbón en el MPS

- 1) El porcentaje promedio de carbón en los 3 meses de monitoreo (respecto al MPS insoluble) es significativamente más alto en la Estación Cancha Carbón (45,8%), disminuyendo de manera sostenida a medida que aumenta la distancia a las instalaciones del CTV: disminuye en 64,4% en Estación Galo Herrera (promedio 16,3%) en 87,9% en Estación MPS Bajo (promedio 5,6%) y en 94,9% en la Estación MPS Alto (promedio 2,3%).
- 2) El tamaño máximo promedio de las partículas de carbón es mayor en la Estación Cancha Carbón, donde alcanza 236,573 μm , disminuyendo sostenidamente en función de la lejanía a la Estación Cancha Carbón: 132,225 μm en Estación Galo Herrera, 157,687 μm en Estación MPS Bajo y 110,428 en Estación MPS Alto. Los valores registrados representan, respecto al tamaño máximo promedio en la Estación Cancha Carbón, un decrecimiento de 44,1% en Estación Galo Herrera, un 33,3% en Estación MPS Bajo y 53,3% en Estación MPS Alto.

8.6 Tasa de Sedimentación del Carbón

- 1) La Tasa de Sedimentación del Carbón sobrepasa el límite diario de 150 $\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$ (norma secundaria del Río Huasco, D.E. N°4/92) solamente en la Estación Cancha Carbón en los 3 meses del período de monitoreo que se informa (diciembre 2022-marzo 2023). En el resto de la Estaciones, la Tasa de Sedimentación del Carbón es considerablemente más baja, representando (promedio 3 meses) menos del 10% del límite diario máximo, en los tres meses de monitoreo.
- 2) Considerando el promedio de la Tasa de Sedimentación del Carbón diaria registrada en la Estación Cancha Carbón en los 3 meses (252,124 $\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$ efectivo), se constata una significativa reducción de ésta en las restantes 3 Estaciones, reducción que está determinada por la presencia de las pantallas perimetrales en torno a la cancha de carbón.

En conclusión, como las Estaciones Galo Herrera, MPS Bajo y MPS Alto están ubicadas a una distancia de 150 m, 275 m y 475 m, respectivamente, de la Estación Cancha Carbón, los resultados respecto a la *variable carbón* del MPS permiten constatar una relación directa entre la distancia a la fuente de origen de las partículas de carbón y la disminución del tamaño de partículas, del porcentaje de carbón en el MPS y de las Tasas de Sedimentación de Carbón.

Se hace notar que la Tasa de Sedimentación del carbón en la Estación Galo Herrera , la más cercana a las canchas de carbón, equivale solo al 6,8% de la tasa registrada en la Estación Cancha Carbón. Se concluye, entonces, que las medidas de control de la dispersión de las partículas de carbón, adoptadas por AES-Andes son efectivas.

9 Referencias

- Cisternas, 2022. 1° Informe de caracterización integral del MPS colectado en 4 Estaciones con colectores pasivos (Cancha Carbón, Galo Herrera, MPS Bajo y MPS Alto) en o cerca de las Instalaciones del Complejo Termoeléctrico Ventanas de AES-Andes. Mes 1, 2 y 3 del Monitoreo Anual. Puchuncaví, 5° Región, Chile. Informe Inédito para AES-Andes, 26 p. Noviembre 2022.
- Cisternas, 2023. 2° Informe de caracterización integral del MPS colectado en 4 Estaciones con colectores pasivos (Cancha Carbón, Galo Herrera, MPS Bajo y MPS Alto) en o cerca de las Instalaciones del Complejo Termoeléctrico Ventanas de AES-Andes. Mes 4 y 5 del Monitoreo Anual. Puchuncaví, 5° Región, Chile. Informe Inédito para AES-Andes, 31 p. Abril 2023.
- D. N°4/1992 Exento del Ministerio de Agricultura. Normas de Calidad del Aire para Material Particulado Sedimentable en la Cuenca del Río Huasco III Región.
- Feng, S. & Li, Y. Study on coal fly ash classified by bulk density. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1732 012127. doi.org/10.1088/1742-6596/1732/1/012127.
- D.E. N°223/2015 del Ministerio del Medio Ambiente, Instrucciones Generales sobre la Elaboración del Plan de Seguimiento de Variables Medioambientales.
- Minerals Densities. The Engineering Toolbox (www.engineeringtoolbox.com)
- Saiah, R., Perrin, B. & Rigal, L. 2010. Improvement of thermal properties of fires clays by introduction of vegetable matter. *J. Building Physics*, 34 (2): 124-142. doi.org/10.1177/1744259109360059.
- Santos, J.M. Reis, N.C., Galvão E.S., Silveira, A., Goulart, E. V. & Lima, A. T. 2017. Source apportionment of settleable particles in an impacted urban and industrialized region in Brazil. *Environ Sci Pollut Res* 4(27): 22026-22039.
- Severin, K. 2004. Energy Dispersive Spectrometry of Common Rock Forming Minerals. Kluwer Acad. Pu. 219 p.
- Suarez-Ruiz, I. et al. (2017) Development of a petrographic classification of fly-ash components from coal combustion and co-combustion. (An ICCP Classification System, Fly-Ash Working Group – Commission III.). *Inter. Jour. Coal Geology*, 183: 188-203.
- Valentim, et al. 2018. Undifferentiated Inorganics in Coal Fly Ash and Bottom Ash: Calciphères, magnesiocalciphères and Magnesiasphères. *Minerals* 2018, 8, 140; doi:10.3390/min8040140.
- Vallack, H. W. & Shillito, D. E. 1998. Suggested guidelines for deposited ambient dust. *Atmospheric Environment* Vol. 32 (16,): 737—2744.
- Wood, G., Kehn T., Carter, D. & Culberston, W. Coal Resource Classification System of the US Geological Survey. Geological Survey Circular 891. <http://pubs.usgs.gov/circ/c891/table2.htm>



Dra. María Eugenia Cisternas S.
Geóloga-Mineralogista
GEO-FORENSIC SpA
09 de mayo de 2023

INFORME DE CARACTERIZACION INTEGRAL DEL MPS
COLECTADO EN 4 ESTACIONES CON COLECTORES
PASIVOS (CANCHA CARBÓN, GALO HERRERA, MPS
BAJO Y MPS ALTO) EN O CERCA DE LAS
INSTALACIONES DEL COMPLEJO TERMOELECTRICO
VENTANAS DE AES-ANDES. Mes 10, 11 y 12 (marzo-
abril, abril-mayo, mayo junio 2023). PUCHUNVAVI, 5°
REGION, CHILE

Dra. María Eugenia Cisternas S

Fecha Informe: 27 agosto

Tabla de contenido

RESUMEN EJECUTIVO	3
1 INTRODUCCIÓN	5
2 OBJETIVOS.....	7
2.1 METODOLOGÍA DE MUESTREO Y ANÁLISIS DEL MPS	8
2.2 INSTALACIÓN DE COLECTORES PASIVOS Y RECOLECCIÓN DE MUESTRAS.....	8
2.3 REMOCIÓN DEL MPS DESDE LAS BOTELLAS, DETERMINACIÓN DE LA MASA DEL MPS TOTAL, SOLUBLE E INSOLUBLE ...	9
2.4 ESTUDIO COMPOSICIONAL DEL MPS INSOLUBLE Y CUANTIFICACIÓN DE LA FRACCIÓN CORRESPONDIENTE A CARBÓN. .	9
3 MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS	10
3.1 CARACTERIZACIÓN GRANULOMÉTRICA DEL MPS	10
3.2 IDENTIFICACIÓN DE COMPONENTES DEL MPS INSOLUBLE MEDIANTE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA (SEM/EDS)	10
3.3 DETERMINACIÓN PORCENTUAL DE TIPOS DE PARTÍCULAS ANTRÓPICAS EN EL MPS.....	11
4 RESULTADOS MPS SOLUBLE	13
4.1 MASA DE MPS SOLUBLE	13
4.2 TASA DE CONCENTRACIÓN MPS SOLUBLE.....	13
4.3 TASA DE SEDIMENTACIÓN MPS SOLUBLE	14
5 RESULTADOS MPS INSOLUBLE	17
5.1 GRANULOMETRÍA DE MPS INSOLUBLE	17
5.2 COMPOSICIÓN DEL MPS INSOLUBLE	17
5.3 MASA Y PORCENTAJE EN MASA DE LOS COMPONENTES DEL MPS INSOLUBLE	20
5.4 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL MPS INSOLUBLE	21
6 RESULTADOS REFERIDOS AL COMPONENTE CARBÓN DEL MPS INSOLUBLE	24
6.1 MASA, PORCENTAJE Y TAMAÑO DE PARTÍCULAS DE CARBÓN.....	24
6.2 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL CARBÓN	25
7 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	27
7.1 COMPONENTES ANTRÓPICOS Y SU PROPORCIÓN EN EL MPS	27
7.2 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL MPS TOTAL	28
7.3 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL CARBÓN	32
8 CONCLUSIONES	34
8.1 TASA DE SEDIMENTACIÓN MPS TOTAL.....	34
8.2 TASA DE SEDIMENTACIÓN DIARIA DEL MPS SOLUBLE	34
8.3 GRANULOMETRÍA MPS INSOLUBLE	34
8.4 COMPONENTES DEL MPS INSOLUBLE.....	34
8.5 TASA DE SEDIMENTACIÓN DIARIA DEL MPS INSOLUBLE	35
8.6 CARBÓN EN EL MPS.....	35
8.7 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL CARBÓN	35
9 REFERENCIAS.....	37

LISTA DE TABLAS

TABLA 1 MASA MPS SOLUBLE (MG) MEDIDA Y NORMALIZADA A 30 DÍAS DURANTE LOS 3 MESES DE MONITOREO DEL PERÍODO MARZO-JUNIO 2023	13
TABLA 2 VARIACIÓN TASA DE SEDIMENTACIÓN MENSUAL MPS SOLUBLE, EFECTIVA Y NORMALIZADA A 30 DÍAS (MARZO A JUNIO 2023).....	14
TABLA 3 TASA DE SEDIMENTACIÓN DIARIA MPS SOLUBLE CALCULADA POR DÍA EFECTIVO (MARZO-JUNIO 2023)	15
TABLA 4 TAMAÑO PARTÍCULAS MPS INSOLUBLE EN LAS 4 ESTACIONES DURANTE LOS 3 MESES DE MONITOREO (MARZO A JUNIO 2023).....	17
TABLA 5 MASA POR TIPO DE PARTÍCULA EN LAS 4 ESTACIONES, EN LOS 3 MESES DE MONITOREO DEL PERÍODO MARZO-JUNIO 2023	20
TABLA 6 PORCENTAJE EN MASA POR TIPO DE PARTÍCULA EN LAS 4 ESTACIONES, EN LOS 3 MESES DE MONITOREO DEL PERÍODO MARZO-JUNIO 2023.	20
TABLA 7 MASA Y PORCENTAJE PROMEDIO DE COMPONENTES EN MPS INSOLUBLE (MARZO-JUNIO 2023)	21
TABLA 8 TASA DE SEDIMENTACIÓN DE MPS INSOLUBLE MENSUAL Y DIARIA EN EL PERÍODO MARZO-JUNIO 2023.	22
TABLA 9 PORCENTAJE (EN MASA) DEL CARBÓN EN EL MPS INSOLUBLE EN LAS 4 ESTACIONES (MARZO-JUNIO 2023)	24
TABLA 10 TAMAÑO MÍNIMO Y MÁXIMO (EN MICRONES) DE LAS PARTÍCULAS DE CARBÓN, PERÍODO MARZO-JUNIO 2023.....	25
TABLA 11 TASA SEDIMENTACIÓN CARBÓN POR ESTACIÓN EN EL PERÍODO MARZO-JUNIO 2023	26
TABLA 12 VALORES LÍMITES DE TASA DE SEDIMENTACIÓN DE MPS (MG/M ² /DÍA)	29
TABLA 13 TASA DE SEDIMENTACIÓN DIARIA DE MPS SOLUBLE, INSOLUBLE Y TOTAL EN LAS 4 ESTACIONES EN EL PERÍODO MARZO-JUNIO 2023	30

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 UBICACIÓN ESPACIAL SOBRE IMAGEN GOOGLE EARTH DE LAS 4 ESTACIONES DE MONITOREO	6
FIGURA 2 MODELO DE COLECTOR PASIVO INSTALADO EN 4 ESTACIONES DEL CTV.....	9
FIGURA 3 CONCENTRACIÓN (G/L) COMPARADA DEL MPS SOLUBLE EN EL PERÍODO MARZO A JUNIO 2023	14
FIGURA 4 MASA DE CARBÓN REGISTRADA EN LAS 4 ESTACIONES Y VARIABILIDAD EN EL PERÍODO MARZO-JUNIO 2023.....	24
FIGURA 5 EVOLUCIÓN PORCENTUAL (% EN MASA) DE LOS COMPONENTES DEL MPS INSOLUBLE EN LAS 4 ESTACIONES (PERÍODO MARZO-JUNIO 2023)	27
FIGURA 6 TASA DE SEDIMENTACIÓN MENSUAL Y DIARIA DEL MPS EN LAS 4 ESTACIONES EN EL PERÍODO MARZO-JUNIO 2023) ..	31
FIGURA 7 TASA SEDIMENTACIÓN CARBÓN DIARIA EN LAS 4 ESTACIONES (MARZO-JUNIO 2023).....	32

LISTA DE LAMINAS

LÁMINA 1. A: SEM/BSE; B: SEM/EDS MAPPING DE C, O, AL, SI, FE, CU Y S; C ; C: MAPPING DEL ELEMENTO CARBONO (C) .	19
---	----

RESUMEN EJECUTIVO

El presente Informe se enmarca en el Plan de Muestreo de Material Particulado Sedimentable (MPS) de 12 meses de duración, autorizado mediante la Resolución N° 00045 (02 de junio 2022) de la Secretaría Regional Ministerial de Salud

(SRMS) de la Región de Valparaíso, el cual se extiende por un trimestre adicional a fin de compensar pérdida de datos ocurridas en algunas campañas, esto fue informado por AES Andes a la SEREMI de Salud de viña del mar mediante carta VPO-DMA-073 del del 26 de abril de 2023. El objetivo del Plan de Monitoreo es evaluar la eficacia del Sistema de Control de dispersión de material, específicamente de las partículas de carbón, hacia el exterior del Complejo Termoeléctrico Ventanas.

El Plan de Muestreo considera la caracterización del MPS depositado mensualmente en 4 Estaciones provistas de colectores pasivos, con informes trimestrales de resultados. Las Estaciones son: Cancha Carbón, ubicada al interior de la cancha de acopio de carbón del CTV; Galo Herrera, ubicada fuera de la cancha, aunque dentro de las dependencias de AES-Andes; MPS Bajo, localizada dentro del área de protección de la pantalla deflectora y MPS Alto, dispuesta cerca del área de protección de la pantalla deflectora. Las dos últimas estaciones se ubican en el sector La Greda.

Las variables ambientales principales consideradas en el Plan de Monitoreo son: 1) el porcentaje de carbón presente en el MPS insoluble; 2) la variación del porcentaje de carbón en las cuatro estaciones; 3) el gradiente de dispersión del carbón desde la cancha de acopio de este material, hacia las 3 otras estaciones.

Este informe presenta los resultados de los meses 10, 11 y 12 (marzo-abril, abril-mayo y mayo-junio del 2023) del Programa de Monitoreo de 15 meses comprometido por AES-Andes. En la Estación Galo Herrera no hubo registro del MPS en el primer mes (marzo-abril 2023), motivado por la sustracción del colector.

Las conclusiones de este cuarto período monitoreo son:

- 1) La Tasa de Sedimentación diaria del MPS total supera el valor límite de 150 mg/m² /día que precisa la norma secundaria para la Cuenca del Río Huasco (D.E. N°4/92) en:
 - Estación Cancha Carbón en los tres meses del período.
 - Estación Galo Herrera, sobrepasa levemente el límite en el segundo mes (abril-mayo 2023).
 - Estación MPS Bajo en el segundo mes (abril-mayo 2023).
 - Estación MPS Alto en los tres meses del período.
- 2) El MPS insoluble consta de partículas antrópicas (residuos de combustión de carbón, carbón crudo y partículas metálicas tipo sulfuros de Cu y Cu-Fe), con componentes naturales (briznas de vegetales) en proporción muy minoritaria (entre 1,6% a 4,2%, valores promedio tres meses).
- 3) El carbón es el segundo componente más abundante del MPS insoluble en todas las Estaciones, después de los residuos de combustión. El porcentaje promedio de carbón en los 3 meses de monitoreo es significativamente más alto en la Estación Cancha Carbón (47,8%), disminuyendo drásticamente a 7,2% en la Estación Galo Herrera, a 2,3% en la Estación MPS Bajo y solo 1,1% en la Estación MPS Alto.

- 4) La Tasa de Sedimentación del Carbón (promedio 3 meses: 550,328 mg/m²/día) sobrepasa el límite diario de 150 mg/m²/día (norma D.E. N°4/1992) solamente en la Estación Cancha Carbón en los 3 meses.
- 5) La Tasa promedio de Sedimentación del Carbón en las restantes tres Estaciones es considerablemente más baja que en la Estación Cancha Carbón: 8,325 mg/m²/día efectivo en Galo Herrera, 2,679 mg/m²/día efectivo en MPS Bajo y solo 2,347 mg/m²/día efectivo en MPS Alto.

Como el aporte de partículas de carbón desde la cancha de carbón se reduce considerablemente hacia zonas externas, la Tasa promedio de Sedimentación del Carbón decrece abruptamente en 98,5% en la Estación Galo Herrera, en 99,5% en la Estación MPS Bajo y en 99,6% en la Estación MPS Alto. Se concluye, entonces, que las medidas de control de la dispersión de las partículas de carbón, adoptadas por AES-Andes son efectivas.

1 INTRODUCCIÓN

A solicitud de AES-Andes, a través del Departamento Gestión Ambiental Complejo Centro, Geo-Forensic SpA realizará la caracterización integral del Material Particulado Sedimentable (MPS), con particular énfasis en la participación del carbón dispersado desde la cancha de acopio de este material hacia sectores ubicados en las cercanías de las instalaciones de Complejo Termoeléctrico Ventanas (CTV), Comuna de Puchuncaví, Región de Valparaíso. Este estudio se enmarca en un Plan de Muestreo de Material Particulado Sedimentable (MPS) de 12 meses de duración, el cual se extiende por un trimestre adicional a fin de compensar perdida de datos ocurridas en algunas campañas, esto fue informado por AES Andes a la SEREMI de Salud de viña del mar mediante carta VPO-DMA-073 del del 26 de abril de 2023.

El Plan de Muestreo de Material Particulado Sedimentable fue autorizado mediante la Resolución N° 00045 de la Secretaría Regional Ministerial de Salud (SRMS) de la Región de Valparaíso fechada el 02 de junio 2022. Dicha resolución autoriza el *Sistema de control y dispersión de material hacia el exterior de la instalación y su mecanismo de verificación de efectividad de la Cancha de almacenamiento de carbón* del Complejo Termoeléctrico Ventanas, (CTV) propiedad de AES ANDES S.A. El material al que hace referencia corresponde única y exclusivamente al *manejo de carbones Bituminosos y Sub-bituminosos acopiados en la cancha de carbón del CTV*.

En la Figura 1 se señala la ubicación espacial sobre imagen Google Earth de las 4 Estaciones de Monitoreo indicadas en la Resolución N° 00045 del SRMS.



Figura 1 Ubicación espacial sobre imagen Google Earth de las 4 Estaciones de Monitoreo

- Estación Cancha Carbón (coordenadas geográficas 267662.17 E; 6373667.19 S), ubicada al interior de la cancha de acopio de carbón.
- Estación Galo Herrera, (coordenadas geográficas 267760,87 E y 6373794.17 S) localizada fuera de la cancha, aunque dentro de las dependencias de AES ANDES.
- Estación MPS Bajo (coordenadas geográficas N), 267669 E, 6373931 N) ubicada dentro del área de protección de la pantalla deflectora.
- Estación MPS Alto (coordenadas geográficas 267774 E; 6374087 N), ubicada cerca del área de protección de la pantalla deflectora.

Las Estaciones MPS Alto y MPS Bajo están ubicadas en el poblado La Greda.

Las variables ambientales principales consideradas en el Plan de Monitoreo son:

- 1) El porcentaje de carbón presente en el MPS insoluble.
- 2) La variación del porcentaje de carbón en las cuatro estaciones.
- 3) El gradiente de dispersión del carbón desde la cancha de acopio de este material, hacia las 3 otras estaciones del Plan de Muestreo de MPS.

El presente Informe, el 4° Informe Trimestral desde el inicio del Monitoreo, se hace cargo de los resultados obtenidos en los meses 10 (marzo-abril 2023), 11 (abril-mayo 2023) y 12 (mayo-junio 2023). Se hace presente que en la Estación Galo Herrera no hubo registro del MPS en el mes 10 (febrero-marzo 2023) debido a la sustracción del colector.

Las citas de los tres Informes previos (Cisternas, 2022 y Cisternas, 2023a y 2023b) se encuentran en la sección Referencias.

2 OBJETIVOS

El Objetivo Principal del Plan de monitoreo es evaluar la eficacia del Sistema de Control de dispersión de material, específicamente de las partículas de carbón, hacia el exterior del Complejo Termoeléctrico Ventanas.

Las principales tareas a desarrollar para cumplir el Objetivo Principal son:

- Monitorear y caracterizar la cantidad de MPS acumulada en cada colector, con indicación de la Tasa de sedimentación del MPS soluble e insoluble.
- Monitorear y caracterizar la cantidad de MPS correspondiente a las partículas de carbón, con indicación de la masa acumulada en cada colector y cálculo de la Tasa de Sedimentación del Carbón expresada en $\text{mg}/\text{m}^2/\text{mes}$ y $\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$.
- Determinar la variación espacial y temporal de las Tasas de Sedimentación de carbón, considerando las variaciones en las 4 estaciones y variaciones en el lapso de tiempo considerado entre la instalación y la remoción de los colectores para el período que se informa.

Como Objetivo Secundario se aborda la comparación de las Tasas de Sedimentación del carbón con normas nacionales e internacionales.

Los parámetros que fueron utilizados para caracterizar el estado y evolución de las variables ambientales son:

- Masa soluble total
- Masa insoluble total
- Masa insoluble carbón
- Tasa de Sedimentación del MPS
- Tasa de Sedimentación del Carbón

2.1 METODOLOGÍA DE MUESTREO y ANÁLISIS DEL MPS

El término MPS (*Settleable Particulate Matter*, en inglés) se refiere a cualquier material compuesto de partículas lo suficientemente pequeñas como para pasar a través de una pantalla de 1 mm y lo suficientemente grandes como para depositarse desde el aire, en virtud de su peso, en el contenedor (Norma ASTM D 1739 – 98)¹.

2.2 Instalación de colectores pasivos y recolección de muestras

Para recolectar el Material Particulado Sedimentable se utilizaron colectores pasivos (Figura 2), con un radio de 0,249 m.

La empresa SGS Chile Ltda., fue la responsable de la instalación y mantención de los 4 colectores pasivos. El período aconsejado de recolección del MPS es del orden de 27 a 32 días, sin embargo en condiciones climáticas desfavorables, por ejemplo fuertes lluvias, las botellas de recolección pueden ser removidas y guardadas mientras dura el mal tiempo y, tras esto, recolocadas nuevamente en los colectores.

La remoción de las botellas desde los 4 colectores pasivos está a cargo de la Empresa SGS, quien envía mensualmente las botellas al Instituto de Geología Económica (GEA) de la Universidad de Concepción.

¹ Standard Test Method for Collection and Measurement of Dustfall (Settleable Particulate Matter)¹



Figura 2 Modelo de Colector pasivo instalado en 4 Estaciones del CTV.

2.3 Remoción del MPS desde las botellas, determinación de la masa del MPS total, soluble e insoluble

En el Instituto GEA, las botellas colectoras son tratadas con ultrasonido para retirar toda la masa adherida a la superficie interna. Posteriormente, se procede a:

- Determinación de sólidos insolubles: una vez removida toda la masa de las botellas colectoras se procede a la filtración de sólidos, utilizando un filtro de membrana de 0,45 micrones. Posteriormente, los sólidos son secados a 40°C y luego pesados, hasta peso constante.
- Determinación de sólidos solubles: Los sólidos solubles fueron determinados en la solución remanente de la filtración, según la norma ASTM D 1739 – 98.
- Determinar la granulometría de las partículas en la fracción insoluble mediante difracción laser.
- Entrega de la fracción insoluble a Geo-Forensic SpA.

2.4 Estudio composicional del MPS Insoluble y cuantificación de la fracción correspondiente a carbón.

Una vez recibidas las muestras de la fracción insoluble del MPS, por parte Geo-Forensic se procede al estudio integral de componentes mediante Microscopía Electrónica (SEM), con énfasis en el estudio del *componente carbón*.

3 MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS

3.1 Caracterización granulométrica del MPS

El análisis granulométrico de la masa total insoluble es realizado por el Instituto de Geología Económica Aplicada (GEA) de la Universidad de Concepción mediante el método de difracción láser en húmedo. El equipo utilizado es un analizador granulométrico láser Fritsch modelo Analysette 22 Microtec Plus. El análisis se realiza en húmedo, con aplicación de ultrasonido para obtener la máxima dispersión de partículas. El equipo posee un rango de medición de 0,08 a 2000 micrones (μm).

3.2 Identificación de componentes del MPS Insoluble mediante microscopía electrónica (SEM/EDS)

Considerando que las partículas del MPS tienen tamaño micrométrico, la caracterización textural y composicional de los diferentes tipos de partículas presentes en el MPS insoluble se realiza mediante microscopio electrónico de barrido (SEM)

El equipo utilizado corresponde a un TSCAN, VEGA III, equipado con detector de electrones retro-dispersados (Modo BSE), detector de electrones secundarios (Modo SE) y detector de rayos x de energía dispersiva (Modo EDS). Este equipo pertenece al Centro de Microscopía Avanzada del Bío-Bío (CMA), ubicado en dependencias de la Universidad de Concepción.

En un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM: Scanning Electron Microscopy por sus siglas en inglés) el bombardeo de electrones sobre la muestra produce varias formas simultáneas de radiación, entre ellas, la emisión de electrones secundarios (SE), electrones retro-dispersados (BSE) y emisión de rayos X. Cada una de esas formas de radiación es capturada por un detector específico.

Detector SE versus detector BSE

La imagen entregada por el SEM se genera por la interacción del haz de electrones que “barre” un área determinada sobre la superficie de la muestra. La detección de los electrones secundarios o retro-dispersados en un gran número de puntos sobre el área barrida, previa transformación electrónica, genera la imagen que se visualiza en una pantalla y es fotografiada mediante una cámara adosada al equipo.

El detector SE es ideal para generar imágenes SEM de alta resolución que permiten obtener detalles de la morfología y textura superficial de las partículas. El detector BSE ofrece una imagen de menor resolución, pero tiene la ventaja de que es sensible a las variaciones en el número atómico de los

elementos presentes en la superficie, permitiendo discriminar sobre la imagen partículas de diferente composición.

Cada imagen SEM incorporada en este estudio contiene información impresa de las condiciones de trabajo (voltaje de aceleración de electrones, distancia de trabajo, magnificación) y una escala gráfica que permite identificar el tamaño de las partículas. La intensidad del haz de electrones utilizada fluctuó entre 10 y 12 mV.

Detector EDS para determinación química de componentes

El detector EDS analiza los rayos X generados por el bombardeo de electrones mediante la espectroscopía de rayos X de energía dispersa (EDS por sus siglas en inglés). Permite identificar los elementos presentes en el punto de incidencia del haz de electrones sobre una partícula, o en un área previamente determinada que será barrida por el haz de electrones. Se obtiene así un espectro con los *peaks* de los elementos presentes en el punto de incidencia, con dato del porcentaje elemental o en masa de esos elementos. O bien, si se combina con la detección de electrones retro-dispersados en un área, se obtiene una suerte de “mapa” con la distribución de los elementos presentes en la muestra (herramienta *mapping*).

Los espectros EDS aplicados a los objetivos de este estudio, aportan información invaluable para diferenciar la naturaleza de las partículas sólidas, es decir distinguir carbón crudo, de residuos de combustión, de otras partícula metálicas o bien de partículas vegetales.

Como material de referencia para la identificación de los diferentes tipos de residuos de combustión fueron utilizados los estudios de Suarez -Ruiz et al. 2017² y Valentim et al. 2018³. Para la identificación composicional de fases cristalinas mediante SEM se utilizó el trabajo de Severin, 2004⁴.

Montaje de las muestras para el estudio mediante microscopio electrónico

Las muestras fueron montadas en porta muestras de aluminio de 11 mm de diámetro (pines), recubiertos con cinta adhesiva de doble cara de carbono. El montaje de las partículas se realiza teniendo precaución que éstas no se superpongan entre sí, ya que eso puede afectar el espectro EDS de las partículas de interés. El análisis de las muestras se realizó sin grafitización previa de los porta muestras.

3.3 Determinación porcentual de tipos de partículas antrópicas en el MPS

² Suarez-Ruiz, I. et al. (2017) Development of a petrographic classification of fly-ash components from coal combustion and co-combustion. (An ICCP Classification System, Fly-Ash Working Group – Commission III.). *Inter. Jour. Coal Geology*, 183: 188-203.

³ Valentim, et al. 2018. Undifferentiated Inorganics in Coal Fly Ash and Bottom Ash: Calciphères, magnesiocalciphères and Magnesiaspheres. *Minerals* 2018, 8, 140; doi:10.3390/min8040140.

⁴ Severin, K. 2004. Energy Dispersive Spectrometry of Common Rock Forming Minerals. Kluwer Acad. Pu. 219 p.

Para determinar el porcentaje de partículas identificadas en el MPS Insoluble se utiliza un programa digital que emula un contador automático de puntos. Mediante este programa se determinó la relación porcentual relativa, en volumen, de las partículas naturales y antrópicas presentes en las muestras, utilizando para ello 3 imágenes SEM por muestra, obtenidas con el detector BSE a baja magnificación (100x) y alta resolución.

El porcentaje en masa de los componentes fue determinado utilizando valores de densidad promedio para los diferentes tipos de partículas, como se indica a continuación:

Partículas naturales:

- Briznas de vegetales⁵: 1,5 g/cm³

Partículas antrópicas:

- Partículas de carbón⁶: 1,4 g/cm³ (valores fluctúan entre 1,47 y 1,29 g/cm³)
- Residuos de Combustión⁷: 2,5 g/cm³ (valores fluctúan entre 1,9 a 2,9 g/cm³)
- Partículas Metálicas⁸: 5,0 g/cm³ (sulfuros de Cu-Fe: 4,9 g/cm³; magnetita: 5,2 g/cm³)

⁵ Saiah, R., Perrin, B. & Rigal, L. 2010. Improvement of thermal properties of fires clays by introduction of vegetable matter. *J. Building Physics*, 34 (2): 124-142. doi.org/10.1177/1744259109360059

⁶ Wood, G., Kehn T., Carter, D. & Culberston, W. Coal Resource Classification System of the US Geological Survey. Geological Survey Circular 891. <http://pubs.usgs.gov/circ/c891/table2.htm>

⁷ Feng, S. & Li, Y. Study on coal fly ash classified by bulk density. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1732 012127. doi.org/10.1088/1742-6596/1732/1/012127

⁸ Minerals Densities. The Engineering Toolbox (www.engineeringtoolbox.com)

4 RESULTADOS MPS soluble

4.1 Masa de MPS soluble

En la Tabla 1 se indica la masa de MPS Soluble determinado en las muestras del período que se informa, considerando los días efectivos de acumulación de MPS. Nótese que en el primer mes de este período (mes 10 del Monitoreo: 9 marzo a 10 abril 2023) no hubo registro en la Estación Galo Herrera por sustracción del colector.

Fecha de Inicio	Fecha Final	Estación	Período de Muestreo en días efectivos	Masa soluble medida (g)	Masa soluble medida (mg)	Masa soluble normalizada a 30 días (mg)
09-03-23	10-04-23	Cancha Carbón	32	0,2595	259,5	243,3
sin registro			-	-	-	-
09-03-23	10-04-23	MPS Bajo	32	0,0943	94,3	88,4
09-03-23	10-04-23	MPS Alto	32	0,1476	147,6	138,4
10-04-23	09-05-23	Cancha Carbón	29	0,3892	389,2	402,6
17-04-23	15-05-23	Galo Herrera	28	0,0741	74,1	79,4
10-04-23	09-05-23	MPS Bajo	29	0,0823	82,3	85,1
10-04-23	09-05-23	MPS Alto	29	0,0903	90,3	93,4
09-05-23	09-06-23	Cancha Carbón	31	0,1985	198,5	192,1
15-05-23	12-06-23	Galo Herrera	28	0,0157	15,7	16,8
09-05-23	09-06-23	MPS Bajo	31	0,019	19	18,4
09-05-23	09-06-23	MPS Alto	31	0,0226	22,6	21,9

Tabla 1 Masa MPS Soluble (mg) medida y normalizada a 30 días durante los 3 meses de monitoreo del período marzo-junio 2023

4.2 Tasa de Concentración MPS soluble

En la Figura 3 se grafica la concentración de solubles en las estaciones para el período marzo 2023 a junio 2023 (mes 10, 11 y 12). En los 3 meses de monitoreo (marzo-abril; abril-mayo y mayo-junio) la concentración de solubles es significativamente más alta en la Estación Cancha Carbón respecto de las restantes estaciones. Le sigue la Estación MPS Alto, con concentración de solubles más alta que la Estación MPS Bajo y Estación Galo Herrera (esta última con registro solo en los meses de abril-mayo y mayo-junio, dado que no hubo registro en el mes marzo-abril por sustracción del colector).

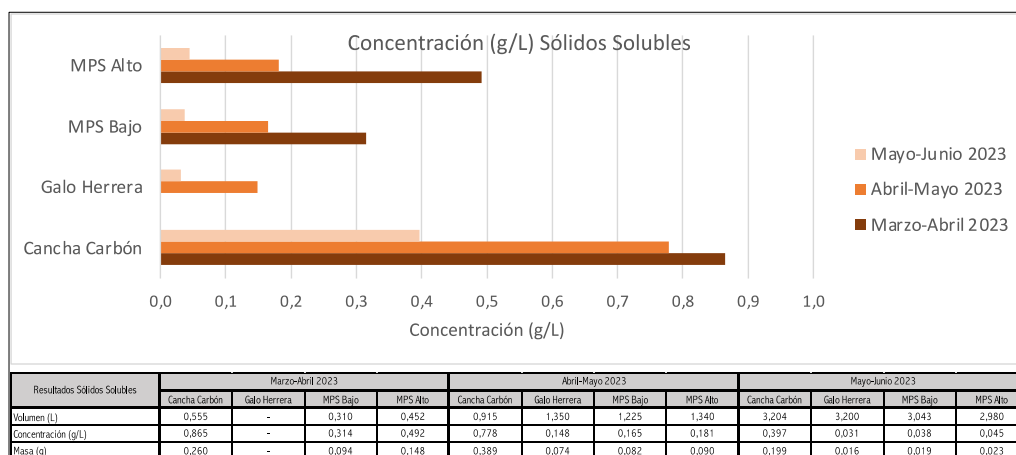


Figura 3 Concentración (g/L) comparada del MPS soluble en el período marzo a junio 2023

4.3 Tasa de Sedimentación MPS Soluble

La Tabla 2 registra las Tasas de Sedimentación mensual del MPS soluble, calculada tomando en consideración los días efectivos para cada período y valores derivados de normalizar a mes 30 días, como sugiere la norma secundaria de la Cuenca del Río Huasco (D.E. N°4/92). Las diferencias observadas hacen aconsejable que en lo sucesivo el tiempo de recolección en los colectores pasivos respete el período de 30 días, para que los resultados se ajusten a la Tasa de Sedimentación real.

Fecha de Inicio	Fecha Final	Estación	Período de Muestreo en días efectivos	Tasa de Sedimentación MPS soluble (mg/m2/mes efectivo)	Tasa de Sedimentación MPS soluble (mg/m2/mes 30 días)
09-03-23	10-04-23	Cancha Carbón	32	1332,261	1249,0
-	-	Galo Herrera	-	-	-
09-03-23	10-04-23	MPS Bajo	32	484,132	453,9
09-03-23	10-04-23	MPS Alto	32	757,771	710,4
10-04-23	09-05-23	Cancha Carbón	29	1998,134	2067,0
17-04-23	15-05-23	Galo Herrera	28	380,426	407,6
10-04-23	09-05-23	MPS Bajo	29	422,524	437,1
10-04-23	09-05-23	MPS Alto	29	463,596	479,6
09-05-23	09-06-23	Cancha Carbon	31	1019,089	986,2
15-05-23	12-06-23	Galo Herrera	28	80,603	86,4
09-05-23	09-06-23	MPS Bajo	31	97,545	94,4
09-05-23	09-06-23	MPS Alto	31	116,027	112,3
		Promedio Tasa de Sedimentación MPS soluble (mg/m2/mes 30 días)			
		Cancha Carbón		1434,1	
		Galo Herrera*		247,0	
		MPS Bajo		328,5	
		MPS Alto		434,1	
		*promedio solo 2 meses			

Tabla 2 Variación Tasa de Sedimentación mensual MPS soluble, efectiva y normalizada a 30 días (marzo a junio 2023)

La Tabla 3 registra la Tasa de Sedimentación diaria del MPS soluble. Los resultados muestran que:

- Estación Cancha Carbón: registra valores comparativamente bajos en el primer y tercer mes de este período (41,633 mg/m²/día efectivo y 32,974 mg/m²/día efectivo, respectivamente), mientras que en el segundo mes del período se registra un notorio incremento (68,901mg/m²/día efectivo), del orden del 65,5% respecto al primer mes,; en el tercer mes la tasa vuelve a disminuir en 52,3%.
- Estación Galo Herrera: registra un significativo decrecimiento de 78,1% en el tercer mes (2,879 mg/m²/día efectivo), respecto del segundo mes (13,587 mg/m²/día efectivo). En el primer mes no hubo registro por sustracción del colector.
- Estación MPS Bajo: en el primer mes se registra el valor más alto (15,129 mg/m²/día efectivo), el cual decrece 3,7% en el segundo mes (14,570 mg/m²/día efectivo) y 79,2% en el tercer mes (3,147 mg/m²/día efectivo), respecto del mes 1.
- Estación MPS Alto: en el primer mes se registra el valor más alto (23,680 mg/m²/día efectivo), el cual decrece 32,5% en el segundo mes (15,986 mg/m²/día efectivo) y 84,2% en el tercer mes (3,743 mg/m²/día efectivo), respecto del mes 1.

En conclusión, en todas las Estaciones se registra un notable decrecimiento de la Tasa de Sedimentación del MPS soluble en el tercer mes (mayo-junio 2023) del período de monitoreo.

Fecha de Inicio	Fecha Final	Estación	Período de Muestreo en días efectivos	Tasa de Sedimentación MPS soluble (mg/m ² /día efectivo)
09-03-23	10-04-23	Cancha Carbón	32	41,633
-	-	Galo Herrera	-	
09-03-23	10-04-23	MPS Bajo	32	15,129
09-03-23	10-04-23	MPS Alto	32	23,680
10-04-23	09-05-23	Cancha Carbón	29	68,901
17-04-23	15-05-23	Galo Herrera	28	13,587
10-04-23	09-05-23	MPS Bajo	29	14,570
10-04-23	09-05-23	MPS Alto	29	15,986
09-05-23	09-06-23	Cancha Carbon	31	32,874
15-05-23	12-06-23	Galo Herrera	28	2,879
09-05-23	09-06-23	MPS Bajo	31	3,147
09-05-23	09-06-23	MPS Alto	31	3,743
		Promedio Tasa de Sedimentación MPS soluble (mg/m ² /día efectivo)		
		Cancha Carbón	47,803	
		Galo Herrera*	8,233	
		MPS Bajo	10,949	
		MPS Alto	10,852	
		*promedio solo 2 meses		

Tabla 3 Tasa de Sedimentación diaria MPS soluble calculada por día efectivo (marzo-junio 2023)

Con relación a los valores promedio de la Tasa de Sedimentación del MPS soluble, el mayor valor promedio se registra en la Estación Cancha Carbón (47,803 mg/m²/día efectivo). Las Estaciones MPS Bajo y Alto registran valores promedio similares (10,949 mg/m²/día efectivo y 10,852 mg/m²/día

efectivo, respectivamente), significativamente inferiores a la Estación Cancha Carbón. La Estación Galo Herrera registra el menor valor promedio (8,233 mg/m²/día efectivo, promedio 2 meses) de las 4 Estaciones. Los resultados muestran que, la Tasa de Sedimentación diaria de MPS soluble es más alta en la Estación Cancha Carbón y se reduce significativamente, del orden de 79% en las otras 3 Estaciones. En todas las Estaciones se registran un significativo decrecimiento de las Tasas de Sedimentación soluble en el mes 3 (mayo-junio 2023).

5 RESULTADOS MPS insoluble

5.1 Granulometría de MPS insoluble

Los resultados del análisis granulométrico mediante difracción láser del material particulado que constituye el MPS insoluble se presentan en la Tabla 4 (tamaño partículas en micrones).

Estación	Granulometría (µm)	Marzo-Abril 2023	Abril-Mayo 2023	Mayo-Junio 2023	Promedio por Estación
Cancha Carbón	Mín	0,088	0,088	0,088	0,088
	Máx	186,026	113,184	125,01	141,407
Galo Herrera	Mín	-	0,291	0,322	0,307
	Máx	-	186,026	152,496	169,261
MPS Bajo	Mín	0,088	0,088	0,088	0,088
	Máx	337,690	125,01	152,496	205,065
MPS Alto	Mín	0,088	0,322	0,088	0,166
	Máx	125,01	226,928	84,007	145,315

Tabla 4 Tamaño partículas MPS insoluble en las 4 Estaciones durante los 3 meses de monitoreo (marzo a junio 2023)

El tamaño mínimo promedio de las partículas es mayor en la Estación Galo Herrera, seguido de la Estación MPS Alto. El tamaño mínimo es similar en las Estaciones Cancha Carbón y MPS Bajo.

Con relación al tamaño máximo, los valores promedio por estación son ligeramente más altos en las Estaciones MPS Alto y Galo Herrera, que en las Estaciones MPS Alto y Cancha Carbón.

5.2 Composición del MPS insoluble

Los tipos de partículas reconocidas en las muestras son mayoritariamente antrópicas y, de manera muy subordinada, se observan partículas naturales que corresponden a partículas vegetales tipos brizas de pastizal.

La identificación de los tipos de partículas en el *MPS Insoluble*, dado su tamaño, se hizo mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), utilizando imágenes BSE de alta resolución, en combinación con imágenes en la modalidad *mapping*.

La inspección de las muestras con el Modo BSE permite identificar los diferentes tipos de partículas, gracias a que este detector contrasta, mediante la tonalidad en la imagen, la diferente composición de las partículas. De este modo, de acuerdo a la tonalidad observada en la imagen, se identifican los siguientes tipos de partículas:

1. Partículas gris oscuro-negro: corresponden a partículas de carbón crudo (sin evidencias de combustión) y chars (residuos de combustión con carbono remanente). También se ven de esta tonalidad las partículas de vegetales, las cuales se identifican por su forma (angosta y alargada), muy diferente a las partículas carbonosas (carbón y residuos de combustión).

2. Partículas gris medio: corresponden a residuos de combustión de composición aluminosilicatada, de forma esférica (cenosferas), prismática (mineroides feldespáticos y silíceos) o en granos compuestos (cenoesferas más mineroides).
3. Partículas gris claro: ferroesferas (forma esférica, contenido alto de Fe).
4. Partículas blanco brillante: minerales metálicos en la forma de óxidos de Fe (magnetita, hematita), sulfuros de Fe (pirita) y sulfuros de Cu-Fe (calcopirita).

A modo de ejemplo, en la Lámina 1-A se presenta una imagen SEM/BSE donde se identifican los diferentes componentes mencionados, de acuerdo a su tonalidad de gris.

En la Lámina 1-B se presenta una imagen BSE obtenida mediante la herramienta “mapping” del SEM/EDS, la cual posibilita realizar un mapeo areal por elementos a definir por el usuario. En este estudio se utilizó esta herramienta para conocer la distribución en el muestra de los elementos carbono (C), sílice (Si), aluminio (Al), hierro (Fe), cobre (Cu) y azufre (S) y con eso confirmar la composición de los componentes observados.

En la Lámina 1-C se presenta una imagen BSE con la distribución, solamente, del elemento carbono (C).

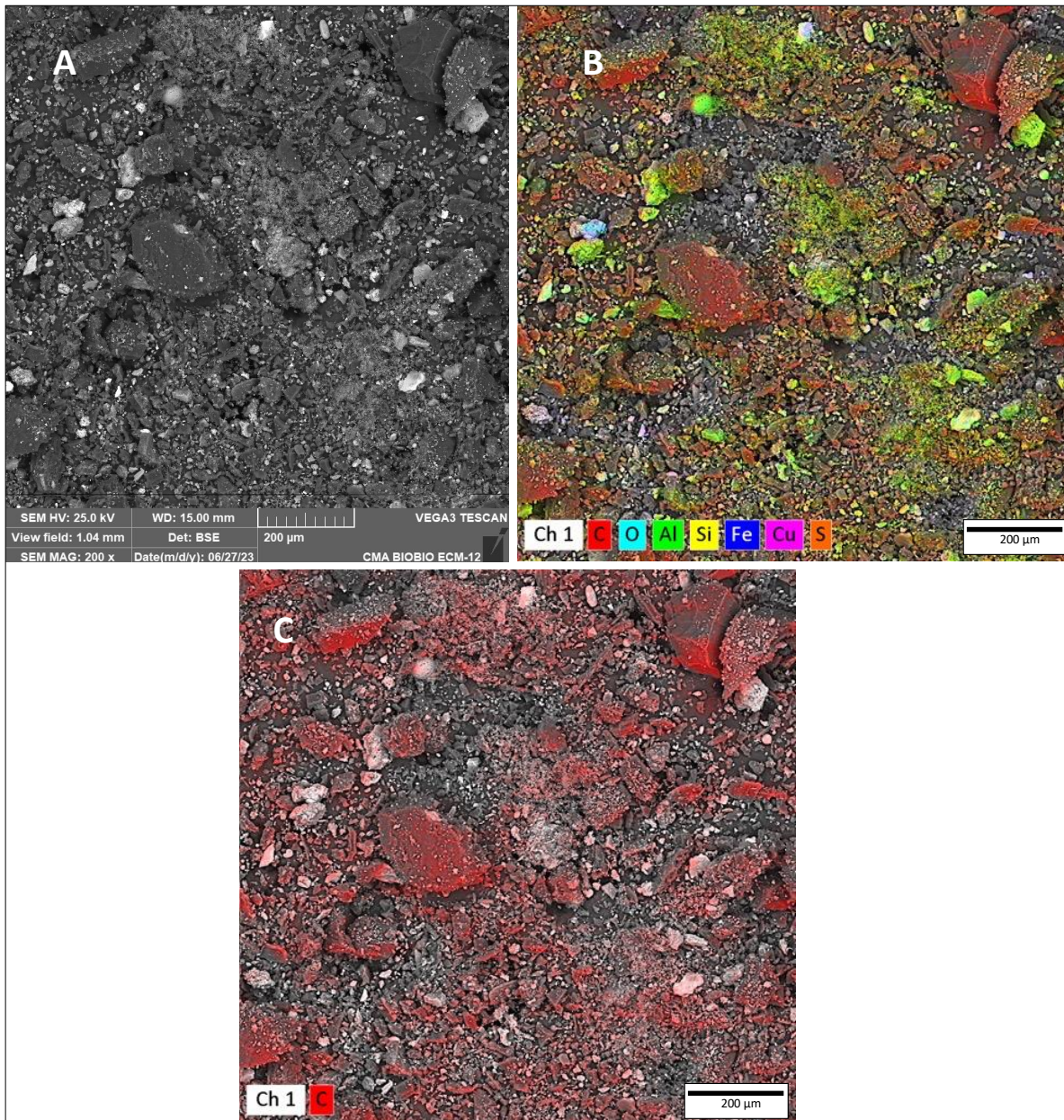


Lámina 1. A: SEM/BSE; B: SEM/EDS mapping de C, O, Al, Si, Fe, Cu y S; C; C: mapping del elemento carbono (C)

Mediante el *mapping* por diferentes elementos fue posible identificar los siguientes tipos de partículas:

- Solo Si (color amarillo): partículas de sílice (cuarzo) formadas en la fase final del proceso de combustión del carbón (mineroides silíceos).
- Si + Al (color amarillo + color verde): partículas alumino-silicatadas formadas en la fase final del proceso de combustión del carbón (cenosferas y mineroides de feldespato K y plagioclasa).
- Solo C (color rojo): partículas de carbón.
- C + Si + Al (color rojo + color amarillo + color verde): chars.

- S + Fe (color anaranjado + color azul): partículas de sulfuro de Fe (pirita).
- S+ Cu + Fe (color naranja + color ciclamen + color azul): sulfuro de Cu-Fe (calcopirita).
- O +Fe (color celeste + color azul): Oxido de Fe (magnetita/hematita).

Información de detalle de la composición del MPS insoluble para cada una de las muestras estudiadas en este período (marzo-junio 2023) está contenida en Fichas por muestra, las cuales se incorporarán como Anexo al Informe Anual.

5.3 Masa y porcentaje en masa de los componentes del MPS insoluble

La determinación porcentual en volumen de cada uno de los componentes del *MPS insoluble* se realizó mediante software especializado, contabilizando los diferentes tipos de componentes sobre 3 imágenes SEM/BSE por muestra. Una vez determinado el porcentaje (en volumen) de cada componente en cada muestra, se calculó la masa, multiplicando el porcentaje en volumen por el valor de densidad asignado a cada tipo de partícula⁹ (referencias en sección 2.4), normalizando el valor obtenido a la masa total colectada en la estación correspondiente (Tabla 5).

Masa por tipo de partícula (g)	Marzo-Abril 2023				Abril-Mayo 2023				Mayo-Junio 2023			
	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto
Partículas de carbón	2,352	sin registro	0,001	0,013	2,079	0,050	0,034	0,018	5,469	0,040	0,011	0,010
Residuos de combustión	1,878		0,061	1,358	2,247	0,654	0,819	1,187	4,978	0,364	0,401	0,820
Partículas metálicas	0,152		0,001	0,072	0,368	0,061	0,129	0,072	0,672	0,083	0,044	0,087
Vegetales	0,171		0,004	0,016	0,104	0,010	0,030	0,017	0,207	0,020	0,021	0,023
Total colectado	4,552		0,066	1,459	4,798	0,775	1,013	1,294	11,326	0,508	0,477	0,940

Tabla 5 Masa por tipo de partícula en las 4 Estaciones, en los 3 meses de monitoreo del período marzo-junio 2023

Una vez determinada la masa de los diferentes componentes, se procedió a determinar el porcentaje (en masa), con el propósito de determinar cuáles componentes tienen mayor influencia sobre la masa total del MPS Insoluble (Tabla 6).

Porcentaje por tipo de partícula (%)	Marzo-Abril 2023				Abril-Mayo 2023				Mayo-Junio 2023			
	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto
Partículas de carbón	51,660	sin registro	1,015	0,913	43,323	6,489	3,382	1,425	48,286	7,975	2,365	1,053
Residuos de combustión	41,247		92,547	93,050	46,839	84,283	80,913	91,704	43,949	71,761	83,972	87,238
Partículas metálicas	3,340		1,017	4,922	7,673	7,895	12,762	5,548	5,937	16,331	9,307	9,293
Vegetales	3,753		5,422	1,116	2,165	1,332	2,943	1,323	1,827	3,933	4,356	2,416

Tabla 6 Porcentaje en masa por tipo de partícula en las 4 Estaciones, en los 3 meses de monitoreo del período marzo-junio 2023.

⁹

Briznas de vegetales: 1,5 g/cm³

Partículas de carbón: 1,4 g/cm³

Residuos de Combustión: 2,5 g/cm³ (los valores de densidad fluctúan entre 1,9 a 2,9 g/cm³)

Partículas Metálicas: 5,0 g/cm³ (sulfuros de Cu-Fe: 4,9 /cm³; Magnetita: 5,2 g/cm³)

El componente que, porcentualmente, más aporta a la masa del MPS insoluble, corresponde a residuos de combustión de carbón (ceniza volante) en todas las Estaciones de monitoreo, incluida la Estación Cancha Carbón en el segundo mes de monitoreo abril-mayo 2023).

El segundo componente más abundante corresponde a partículas de carbón, con porcentaje significativamente más alto en la Estación Cancha Carbón, decreciendo significativamente en las restantes 3 Estaciones, en función de la distancia a las canchas de carbón.

Para una mejor comparación de los resultados, en la Tabla 7 se presentan los valores promedio de la masa, y porcentaje en que cada componente aporta el MPS insoluble.

Masa por tipo de partícula (g) promedio (3 meses) por tipo de componente en MPS insoluble	Masa promedio por estación				Porcentaje por tipo de partícula (%) promedio por tipo de componente en MPS insoluble	Porcentaje promedio 3 meses por estación			
	Cancha Carbón	Galo Herrera*	MPS Bajo	MPS Alto		Cancha Carbón	Galo Herrera*	MPS Bajo	MPS Alto
Partículas de carbón	3,300	0,045	0,015	0,014	Partículas de carbón	47,756	7,232	2,254	1,130
Residuos de combustión	3,034	0,509	0,427	1,122	Residuos de combustión	44,012	78,022	85,811	90,664
Partículas metálicas	0,398	0,072	0,058	0,077	Partículas metálicas	5,650	12,113	7,695	6,588
Vegetales	0,161	0,015	0,018	0,019	Vegetales	2,582	2,633	4,240	1,618
* Masa promedio solo 2 meses					* Porcentaje promedio solo 2 meses				

Tabla 7 Masa y Porcentaje promedio de componentes en MPS insoluble (marzo-junio 2023)

De la comparación de los resultados contenidos en Tabla 7, destaca que:

- Los residuos de combustión de carbón contribuyen en promedio a la masa total del *MPS insoluble* con 3,034 g en la Estación Cancha Carbón y solo 0,427 g en la Estación MPS Bajo. En las Estaciones Galo Herrera y MPS Alto, contribuyen en promedio a la masa total con 0,509 g y 1,122 g, respectivamente. En términos porcentuales representan el 90,7% del MPS Insoluble en la Estación MPS Alto y solo el 44,0% en la Estación Cancha Carbón.
- El carbón aporta en promedio a la masa total del *MPS insoluble* entre 3,3 gramos en la Estación Cancha Carbón y solo 0,014 g en la Estación MPS Alto. El porcentaje promedio de carbón más alto se registra en la Estación Cancha Carbón (47,8%) y el más bajo en la Estación MPS Alto (1,1%).
- Las partículas metálicas aportan al *MPS insoluble* con 0,398 g en la Estación Cancha Carbón y con valores que fluctúan entre 0,077 g y 0,058 g, en las restantes 3 Estaciones. Están presentes en porcentaje más alto en la Estación Galo Herrera (12,1%) y más bajo en la Estación Cancha Carbón (5,7%). En las Estaciones MPS Bajo y MPS Alto, el porcentaje es similar (7,7% y 6,6%, respectivamente).
- Los restos vegetales aportan *MPS insoluble* entre 0,161 g (E. Cancha Carbón) y 0,015 g (E. Galo Herrera). El porcentaje de participación es comparativamente más alto en la Estación MPS Bajo (4,2%) y más bajo en la Estación MPS Alto (1,6%). En las Estaciones Cancha Carbón y Galo Herrera los porcentajes son similares (2,6%).

5.4 Tasa de Sedimentación del MPS insoluble

En la Tabla 8 se presentan las variables utilizadas para el cálculo de la Tasa de Sedimentación del MPS Insoluble en cada una de las 4 Estaciones durante cada mes de monitoreo en el período marzo-junio 2023. Nótese la diferencia que se establece entre la Tasa de Sedimentación calculada utilizando el número de días de acumulación efectiva (columna A) y la Tasa de Sedimentación normalizada a mes de 30 días (columna B). La Tasa de Sedimentación diaria (Columna C) se ha calculado sobre la base del número días efectivos de acumulación del MPS.

Fecha de Inicio	Fecha Final	Estación	Período de Muestreo en días efectivos	A	B	C
				Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m ² /mes efectivo)	Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m ² /mes de 30 días)	Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m ² /día efectivo)
09-03-23	10-04-23	Cancha Carbón	32	23371,803	21911,1	730,369
		Galo Herrera		sin registro		
09-03-23	10-04-23	MPS Bajo	32	337,301	316,2	10,541
09-03-23	10-04-23	MPS Alto	32	7492,489	7024,2	234,140
10-04-23	09-05-23	Cancha Carbón	29	24632,701	25482,1	849,403
17-04-23	15-05-23	Galo Herrera	28	3980,866	4265,2	142,174
10-04-23	09-05-23	MPS Bajo	29	5198,126	5377,4	179,246
10-04-23	09-05-23	MPS Alto	29	6643,847	6872,9	229,098
09-05-23	09-06-23	Cancha Carbon	31	58146,113	56270,4	1875,681
15-05-23	12-06-23	Galo Herrera	28	2606,507	2792,7	93,090
09-05-23	09-06-23	MPS Bajo	31	2448,895	2369,9	78,997
09-05-23	09-06-23	MPS Alto	31	4824,888	4669,2	155,642
			Promedio Petríodo	Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m ² /mes efectivo)	Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m ² /mes de 30 días)	Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m ² /día efectivo)
			Cancha Carbón	35383,539	34554,534	1151,818
			Galo Herrera	3293,687	3528,950	117,632
			MPS Bajo	2661,441	2687,830	89,594
			MPS Alto	6320,408	6188,800	206,293

Tabla 8 Tasa de Sedimentación de MPS Insoluble mensual y diaria en el período marzo-junio 2023.

Considerando los valores diarios de la Tasa de Sedimentación del *MPS insoluble* (Columna C de la Tabla 8), se destaca que:

- Estación Cancha de Carbón: respecto al primer mes (730,369 mg/m²/día efectivo) se observa un incremento de 16,3% en el segundo mes (849,403 mg/m²/día efectivo) y de 120,8% entre el segundo y tercer mes (1875,681 mg/m²/día efectivo).
- Estación Galo Herrera: entre el segundo mes (142,174 mg/m²/día efectivo) y el tercer mes (93,090 mg/m²/día efectivo) la Tasa de Sedimentación del *MPS insoluble* decrece un 34,5%. En el primer mes no hubo registro por sustracción del colector.
- Estación MPS Bajo: la tasa de sedimentación registrada en el primer mes (10,541 mg/m²/día efectivo) es la más baja del período y se incrementa considerablemente en 1600,5% el segundo mes (179,246 mg/m²/día efectivo); en el tercer mes decrece un 50,0% (89,594 mg/m²/día efectivo), sin embargo, sigue siendo 749,9% más alta que en el mes 1.
- Estación MPS Alto: la tasa de sedimentación en el primer mes (234,140 mg/m²/día efectivo) decrece levemente (2,2%) en el segundo mes (229,098 mg/m²/día) y en el tercer mes (155,642 mg/m²/día efectivo) decrece un 32,1% respecto al mes 2.

Los valores diarios promedio (3 meses) de la Tasa de Sedimentación diaria del *MPS insoluble*, indican que el mayor valor promedio se registra en la Estación Cancha Carbón, seguido de Estación MPS Alto, Estación Galo Herrera y Estación MPS Bajo, donde se registra en menor valor. Con respecto a la Estación Cancha Carbón, la tasa de Sedimentación diaria promedio del *MPS insoluble* se reduce 89,8% en la Estación Galo Herrera, 92,2% en la Estación MPS Bajo y 82,1% en la Estación MPS Alto.

6 RESULTADOS REFERIDOS AL COMPONENTE CARBÓN DEL MPS INSOLUBLE

Esta sección hace referencia en particular al componente “carbón” del MPS Insoluble, dado que constituye la variable principal del monitoreo estipulado en la Resolución 0045/22 del SRMS que rige el estudio.

Como se indicó en la sección anterior (ver Tabla 5, 6 y 7), el carbón es el segundo componente más abundante en el MPS insoluble.

6.1 Masa, porcentaje y tamaño de partículas de carbón

La masa de carbón es significativamente más alta en la Estación Cancha Carbón, con un valor promedio (3 meses) de 3,300 g. La masa de carbón disminuye significativamente en la Estación Galo Herrera (promedio 0,045 g), ubicada 150 m al NNE-SSW de la Estación Cancha Carbón y, sigue disminuyendo en las Estaciones MPS Bajo (0,015 g) y MPS Alto (0,014), ubicadas a 275 m al NNW-SSE y 475 m al NNE-SSW de la E. Cancha Carbón (Figura 4).

En comparación a la masa de carbón que se acumula en la Estación Cancha Carbón (3,3 g promedio en el período), la masa de carbón decrece 86,4% en la Estación Galo Herrera (0,045 g promedio), 99,5% en la Estación MPS Bajo (0,015 g promedio) y 99,6% en la Estación MPS Alto (0,014 promedio).

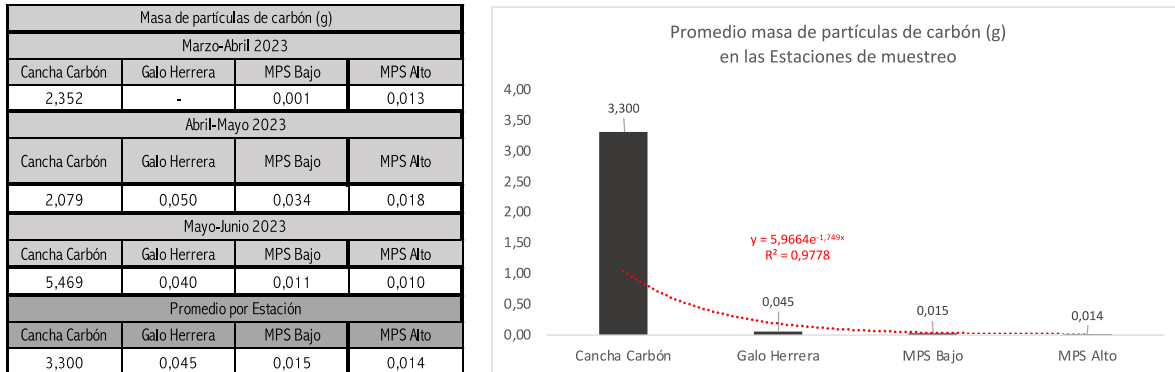


Figura 4 Masa de carbón registrada en las 4 estaciones y variabilidad en el período marzo-junio 2023.

En la Tabla 9 se presenta el porcentaje en masa de carbón, respecto del *MPS insoluble*, para cada Estación por mes de monitoreo, además del porcentaje en masa promedio. Los porcentajes en cada mes de Monitoreo fluctúan entre 51,7% y 43,3% en la Estación Cancha Carbón, entre 6,5% y 8,0% en la Estación Galo Herrera, entre 1,0% y 3,4% en la Estación MPS Bajo y entre 1,0 y 2,4% en la Estación MPS Alto.

Porcentaje (% en masa) del carbón	marzo-abril 2023				abril-mayo 2023				mayo-junio 2023			
	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto
	51,66	sin registro	1,01	0,91	43,32	6,49	3,38	1,43	48,29	7,98	2,36	1,05
				Promedio por estación	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto				
					47,76	7,23	2,25	1,13				

Tabla 9 Porcentaje (en masa) del carbón en el MPS Insoluble en las 4 Estaciones (marzo-junio 2023)

Los resultados promedio, por Estación, del porcentaje (en masa) del carbón (Tabla 9) señalan una disminución muy significativa del porcentaje de carbón desde la Estación Cancha Carbón, en función de la distancia que la separa de las otras Estaciones. Así, en la Estación MPS Alto, la más alejada, el porcentaje de carbón se ha reducido en 97,6%, en la Estación MPS Bajo en 95,3% y en la Estación Galo Herrera, la más cercana, en 84,9%.

La Tabla 10 contiene los valores del tamaño máximo y mínimo (micrones) de las partículas de carbón para las 4 Estaciones, durante los 3 meses de monitoreo del período marzo-junio 2023. El mayor tamaño máximo promedio se registra en la Estación Galo Herrera (131,2 μm) y el menor tamaño máximo promedio (73,9 μm) se registra en la Estación MPS Alto, la más alejada de la cancha de acopio de carbones utilizados en el Complejo Termoeléctrico Ventanas.

		Rango de tamaño (Min-Max) de Partículas de Carbón (μm)		Promedio Tamaño Máximo de Partículas de Carbón (μm)
Período marzo-abril 2023	Cancha Carbón	17,4	154,5	116,7
Período abril-mayo 2023		16,2	88,7	
Período mayo-junio 2023		8,8	107,0	
Período abril-mayo 2023	Galo Herrera	10,2	116,0	131,2
Período mayo-junio 2023		12,2	146,5	
Período marzo-abril 2023	MPS Bajo	33,3	87,2	118,4
Período abril-mayo 2023		7,3	123,1	
Período mayo-junio 2023		10,7	145,1	
Período marzo-abril 2023	MPS Alto	21,1	69,8	73,9
Período abril-mayo 2023		15,5	84,0	
Período mayo-junio 2023		23,1	67,9	

Tabla 10 Tamaño mínimo y máximo (en micrones) de las partículas de carbón, período marzo-junio 2023

6.2 Tasa de Sedimentación del Carbón

En la Tabla 11 se indica la Tasa de Sedimentación diaria del Carbón, calculada sobre la base de los días efectivos de acumulación en los colectores pasivos de las 4 Estaciones, en los 3 meses de monitoreo del período marzo-junio 2023.

Fecha de Inicio	Fecha Final	Estación	Período de Muestreo en días efectivos	Tasa de Sedimentación carbón (mg/m ² /día efectivo)
09-03-23	10-04-23	Cancha Carbón	32	377,308
09-03-23	10-04-23	MPS Bajo	32	0,107
09-03-23	10-04-23	MPS Alto	32	2,137
10-04-23	09-05-23	Cancha Carbón	29	367,986
17-04-23	15-05-23	Galo Herrera	28	9,226
10-04-23	09-05-23	MPS Bajo	29	6,063
10-04-23	09-05-23	MPS Alto	29	3,266
09-05-23	09-06-23	Cancha Carbon	31	905,691
15-05-23	12-06-23	Galo Herrera	28	7,424
09-05-23	09-06-23	MPS Bajo	31	1,868
09-05-23	09-06-23	MPS Alto	31	1,639
				Tasa de Sedimentación promedio carbón (mg/m ² /día efectivo)
			Cancha Carbón	550,328
			Galo Herrera	8,325
			MPS Bajo	2,679
			MPS Alto	2,347

Tabla 11 Tasa Sedimentación Carbón por Estación en el período marzo-junio 2023

Considerando los valores diarios de la Tasa de Sedimentación del Carbón MPS, la evolución en el período de monitoreo es diferente entre las 4 Estaciones. Así,

- En la Estación Cancha Carbón, la Tasa de Sedimentación del Carbón es considerablemente más alta en **el mes 3** (905,691 mg/m²/día efectivo) que en el mes 1 (377,308 mg/m²/día efectivo) y mes 2 (367,986 mg/m²/día efectivo). El aumento en **el mes 3** puede ser atribuido a efectos operacionales del manejo de la cancha de carbón según lo señalado por AES Andes.
- En la Estación Galo Herrera, (registro solo en mes 2 y mes 3), la tasa es mayor en el mes 2 (9,226) que en el mes 3 /7,424 mg/m²/día efectivo).
- En la Estación MPS Bajo la Tasa de Sedimentación del carbón es anómalamente baja (0,107 mg/m²/día efectivo) en el mes 1 y muestra el **mayor valor en el mes 2** (6,063 mg/m²/día efectivo).
- MPS Alto: En el mes 1 y 3 la Tasa de Sedimentación de Carbón tiene valores de rango similar (2,137 mg/m²/día efectivo y 1,639 mg/m²/día efectivo, respectivamente) y en el mes 2 **registra el mayor valor** (3,266 mg/m²/día efectivo).

7 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

7.1 Componentes antrópicos y su proporción en el MPS

Los 4 colectores pasivos de MPS están emplazados en, o cerca de las instalaciones del Complejo Termoeléctrico Ventanas de propiedad de AES Andes. En las cercanías existen, además, numerosas instalaciones industriales.

En la Figura 5 se representan gráficamente los componentes del MPS Insoluble en cada Estación, por mes de monitoreo. Como se observa, el componente prioritario del MPS corresponde a residuos de combustión industrial de carbón. El segundo componente es el carbón, el cual tiene mayor presencia en la Estación Cancha Carbón y Estación Galo Herrera, disminuyendo drásticamente su presencia en las Estaciones MPS Bajo y MPS Alto, las más alejadas de los sectores donde se acopia o transporta carbón.

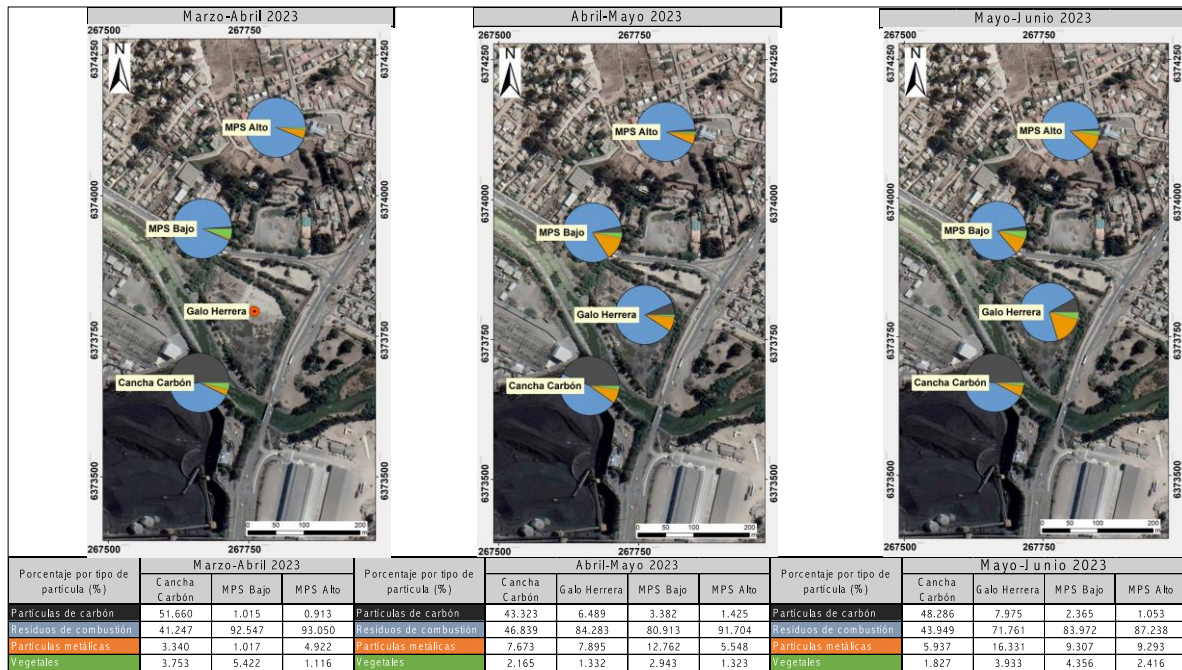


Figura 5 Evolución porcentual (% en masa) de los componentes del MPS Insoluble en las 4 Estaciones (período marzo-junio 2023)

Al considerar los porcentajes promedio de los 3 componentes antrópicos respecto al orden de participación en el MPS insoluble (ver Tabla 7), destaca que:

- Residuos de Combustión: provienen de la actividad industrial del CTV con sus actuales 3 centrales termoeléctricas a carbón activas: Aporte promedio al MPS total entre 90,7% (E. MPS Alto) y 44,0% (E. Cancha Carbón).
- Partículas de carbón: corresponden a polvo movilizado por el viento desde los lugares de transporte y acopio del carbón utilizado en la alimentación de las 3 centrales: Aporte promedio al MPS total entre 47,8% (Estación Cancha Carbón) y 1,1% (E. MPS Alto). El porcentaje de carbón, tomando como referencia la Estación Cancha Carbón, se reduce en

84,6% en la Estación Galo Herrera, en 95,3% en la Estación MPS Bajo y 97,6% en la Estación MPS Ato.

- Partículas metálicas: dada su composición mineralógica provienen probablemente de los lugares de acopio de concentrado de cobre: Aporte promedio al *MPS total* entre 12,1% (Estación Galo Herrera) y 5,7% (Estación Cancha Carbón). Las Estaciones MPS Bajo y MPS Alto contienen porcentaje relativamente similar (7,7% y 6,6%, respectivamente)

7.2 Tasa de Sedimentación del MPS total

Numerosos estudios han identificado al MPS como responsable de la transferencia de contaminantes. Las repercusiones del MPS en el medio ambiente pueden tener efecto sobre la fotosíntesis de las plantas, la acidificación de suelos y masas de agua, la degradación del entorno habitable y generar daño en la salud de la fauna (incluyendo las personas). A la hora de determinar la política ambiental local y soluciones de gestión, es crucial determinar las tasas de sedimentación del MPS, la(s) fuente(s) de la contaminación y la distribución desde ella(s).

Tradicionalmente, el MPS ha sido monitoreado gravimétricamente utilizando colectores pasivos. Hay una amplia variedad de colectores en uso en todo el mundo (cuencos, cilindros o embudos horizontales de boca abierta) que, por lo general operan con recolección del MPS mensual. La Tasa de Sedimentación de sólidos no disueltos (MPS Insoluble), aunque a veces también se incluyen los sólidos disueltos (MPS Soluble), se puede expresar por día ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$), por mes de 30 días ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{mes}$) o por año ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{año}$). Considerando que a menudo las condiciones operativas de las fuentes de origen son episódicas, o bien ocurren condiciones meteorológicas anormales o ambas, la expresión de la Tasa de Sedimentación anual se considera más representativa.

Con el fin de gestionar y minimizar los efectos adversos de las partículas sedimentables (MPS), varios países, entre ellos Chile, han establecido los estándares máximos permitidos. Estos estándares varían según el país y, a veces, el estado, como ocurre en Estados Unidos, Canadá y Brasil. La Tabla 14 (tomada de Vallack & Shillito, 1998) resume los umbrales estándar establecidos por Agencias Ambientales en países europeos, América del Norte y Argentina.

2738 H. W. VALLACK and D. E. SHILLITO

Table 1. Examples of dust deposition standards outside the U.K. (as $\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

Argentina	Annual average	333
Australia (W. Australia)	Loss of amenity first perceived	133
	Unacceptable reduction in air quality	333
Canada		
Alberta	Annual average	180
Manitoba	Annual average	153
	(maximum acceptable)	266
	(maximum desirable)	200
Newfoundland	Annual average	153
	Monthly average	233
Ontario	Annual average	170
	Monthly average	200
Finland	Annual average	333
Germany	Long-term average	350*
	Short-term average	650*
Spain	Annual average	200
U.S.A.		
Kentucky	Annual average	196
Louisiana	Annual average	262
Maryland	Annual average	183
Mississippi	Monthly average (above background)	175
Montana	Annual average (residential areas)	196
New York	During any 12 months no more than	
	5% of 30 d values to exceed	100
	and 84% to be below	130
North Dakota	3 Monthly average	196
Pennsylvania	Annual average	267
	Monthly average	500
Washington	Annual average	183
Wyoming	Monthly average	170

* Combined weight of dissolved and undissolved deposits.

Tabla 12 Valores límites de Tasa de Sedimentación de MPS ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$)

En el caso de Brasil, existe una norma del Estado de Minas Gerais (COPAM N°1/81) para áreas industrializadas que fija el valor límite en $10 \text{ g}/\text{m}^2/\text{mes}$, que corresponde a $333 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{día}$. En un trabajo relativamente reciente, Santos et al. (2017), estudian diferentes áreas industriales de estados brasileños (Minas Gerais, Río de Janeiro, Amapá y Vitoria) validando ese valor límite.

Chile no dispone de norma primaria para material particulado sedimentable MPS, por lo que se acostumbra utilizar como referencia el nivel límite definido en la norma secundaria por la cual se rige la Tercera Región (Cuenca del Río Huasco). Es una norma de calidad de aire en lo que respecta a polvo sedimentable, publicada en el D. E. N°4/1992 del Ministerio de Agricultura, que fija como Tasa de Sedimentación límite diaria el valor $150 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{día}$ como concentración media aritmética mensual, o bien $100 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{día}$ como concentración media aritmética anual.

En la Tabla 13 se resume la información de la Tasa de Sedimentación diaria ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$ efectivo) del *MPS soluble*, *MPS insoluble* y *MPS total* para las 4 Estaciones y los 3 meses de monitoreo del período marzo-junio 2023 (corresponden a los meses 10, 11 y 12 desde el inicio del monitoreo), así como los valores promedio para el período. Se indica, además, el porcentaje de la Tasa de Sedimentación del MPS soluble e insoluble, respecto a la Tasa de Sedimentación del MPS total.

Fecha de Inicio	Fecha Final	Estación	Período de Muestreo en días efectivos	Tasa de Sedimentación MPS soluble (mg/m ² /día efectivo)	Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m ² /día efectivo)	Tasa de Sedimentación MPS total (mg/m ² /día efectivo)
09-03-23	10-04-23	Cancha Carbón	32	41,633	730,369	772,002
	sin registro	Galo Herrera	-	-	-	-
09-03-23	10-04-23	MPS Bajo	32	15,129	10,541	25,670
09-03-23	10-04-23	MPS Alto	32	23,680	234,140	257,821
10-04-23	09-05-23	Cancha Carbón	29	68,901	849,403	918,305
17-04-23	15-05-23	Galo Herrera	28	13,587	142,174	155,760
10-04-23	09-05-23	MPS Bajo	29	14,570	179,246	193,816
10-04-23	09-05-23	MPS Alto	29	15,986	229,098	245,084
09-05-23	09-06-23	Cancha Carbon	31	32,874	1875,681	1908,555
15-05-23	12-06-23	Galo Herrera	28	2,879	93,090	95,968
09-05-23	09-06-23	MPS Bajo	31	3,147	78,997	82,143
09-05-23	09-06-23	MPS Alto	31	3,743	155,642	159,384
			TASAS PROMEDIO PERÍODO	Tasa de Sedimentación MPS soluble (mg/m ² /día)	Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m ² /día)	Tasa de Sedimentación MPS total (mg/m ² /día)
			Cancha Carbón	47,803	1151,818	1199,621
			Galo Herrera*	8,233	117,632	125,864
			MPS Bajo	10,949	89,594	100,543
			MPS Alto	10,852	154,720	165,572
			*promedio solo 2 meses			
			PORCENTAJE RESPECTO AL MPS TOTAL	MPS soluble vs MPS Total (%)	MPS insoluble vs MPS Total (%)	
			Cancha Carbón	4,0	96,0	
			Galo Herrera	6,5	93,5	
			MPS Bajo	10,9	89,1	
			MPS Alto	6,6	93,4	

Tabla 13 Tasa de Sedimentación diaria de MPS soluble, insoluble y total en las 4 Estaciones en el período marzo-junio 2023

En la Figura 6 se indican los valores de la Tasa de Sedimentación mensual (mg/m²/mes) y diaria (mg/m²/día efectivo) para el MPS soluble, insoluble y total en las 4 Estaciones, durante los 3 meses de monitoreo del período marzo-junio 2023. Las líneas rojas expresan:

- Valor máximo mensual (4500 mg/m²/mes 30 días) y diario (150 mg/m²/día) indicado en el D.E. N°4/1992 (Cuenca Río Huasco).
- Valor máximo mensual (9999 mg/m²/mes 30 días) y diario (333 mg/m²/día) estipulado en la norma brasileña para áreas industriales COPAM N° 1/81.

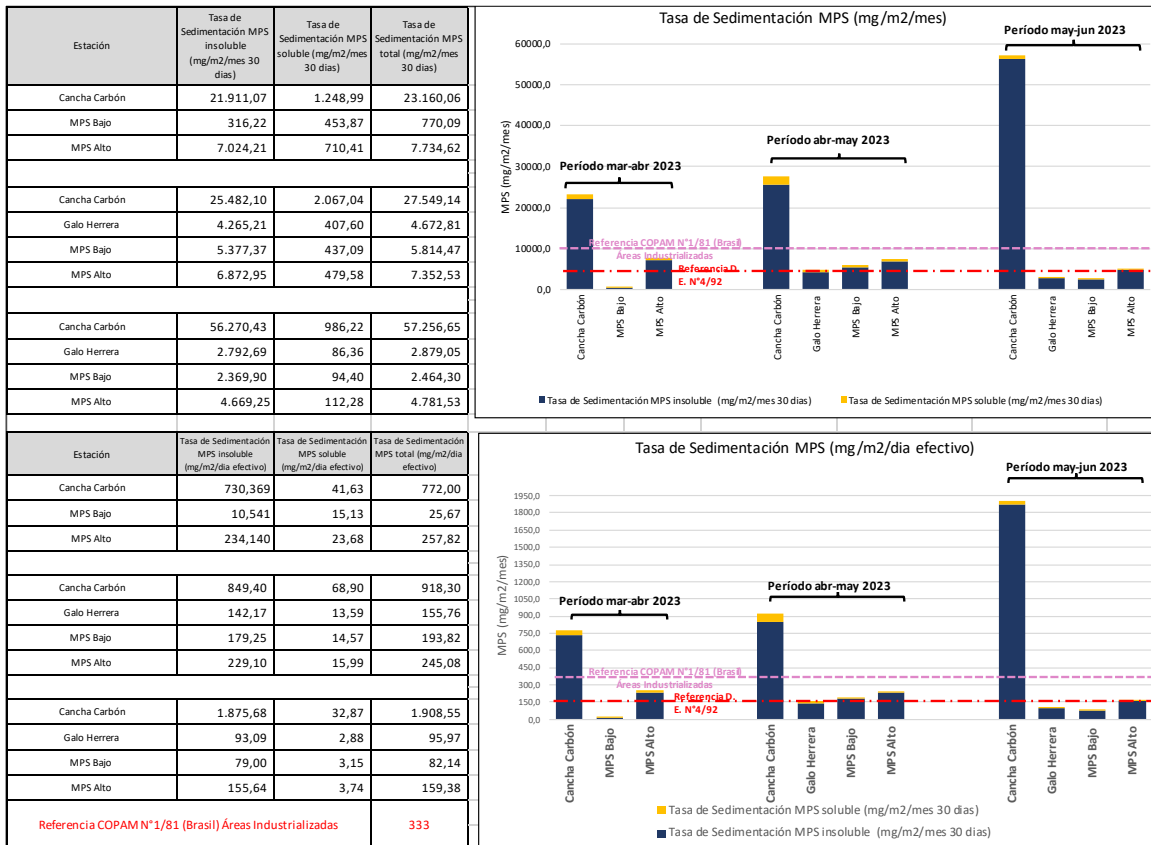


Figura 6 Tasa de Sedimentación mensual y diaria del MPS en las 4 Estaciones en el período marzo-junio 2023)

Considerando la Tasa de sedimentación mensual y diaria del MPS Total durante el período marzo-junio 2023 (Figura 6), se concluye que:

- Las estaciones que sobrepasan el límite indicado en la norma Cuenca del Río Huasco (D.E. N°4/92) son:
 - Estación Cancha Carbón en los tres meses de monitoreo.
 - Estación Galo Herrera, prácticamente en el límite en el mes 2 del período.
 - Estación MPS Bajo en el mes 2 del período.
 - Estación MPS Alto en los 3 meses de monitoreo.
- Las estaciones que sobrepasan el límite indicado en la norma brasileña COPAM N° 1/81 para áreas industrializadas son:
 - Estación Cancha Carbón en los tres meses del período de monitoreo.

Al respecto, se hace notar que la Estación Cancha Carbón se ubica “dentro” de un área industrial, por tanto, no debería sorprender que sobrepase la norma brasileña.

7.3 Tasa de Sedimentación del Carbón

Por sus características físicas y el tamaño de los fragmentos, el carbón particulado es susceptible de ser erosionado por la acción del viento dentro y fuera de las instalaciones industriales que lo utilizan o manejan. En ese sentido, la erosión eólica que lo afecte provocará efectos similares a los que ocurren en los botaderos de minas o en los relaves de minerales.

En el área monitoreada, como es evidente y esperable, el mayor contenido de carbón se registra en la Estación Cancha Carbón, lugar de acopio y movimiento de los carbones que serán utilizados en el proceso de termo-generación del CTC y muy probablemente, lugar de origen de las partículas de carbón (menores de 1mm de diámetro) que forman parte del MPS insoluble. La Estación Cancha Carbón está ubicada dentro de la dependencia del mismo nombre, adyacente a la membrana deflectora que protege los sectores externos de la dispersión de partículas de carbón desde la cancha de acopio.

Como se aprecia en el gráfico de la Figura 7, la Tasa de Sedimentación del Carbón en la Estación Cancha Carbón supera el valor máximo diario permitido para la cuenca del Río Huasco (D.E N° 4/91) en los tres meses del monitoreo que se informa (marzo-junio 2023), así como también, el límite aceptado para áreas industriales de la norma brasileña COPAM N°1/81 en el mismo período.

En las restantes 3 Estaciones, Galo Herrera, MPS Bajo y MPS Alto, ubicadas a una distancia de 150 m, 275 m y 475 m, respectivamente, de la Estación Cancha Carbón, las Tasas de Sedimentación de carbón son considerablemente menores (Figura 7) y en ninguno de los 3 meses de monitoreo sobrepasan el límite diario de 150 mg/m²/día que precisa el D.E. 4/91 del Ministerio de Agricultura (norma Cuenca del Río Huasco).

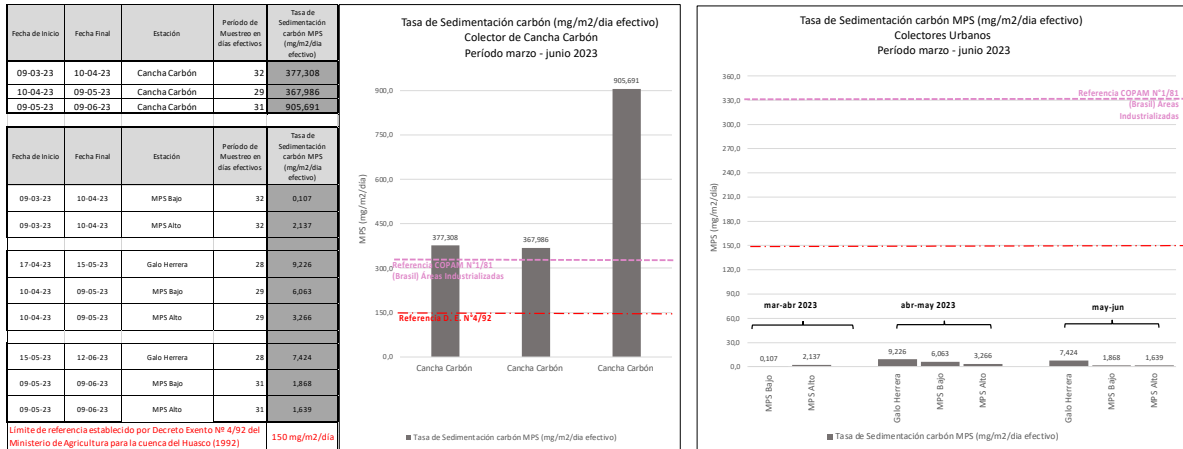


Figura 7 Tasa Sedimentación Carbón diaria en las 4 Estaciones (marzo-junio 2023)

Como fue reportado en la Tabla 11, los valores promedio de la Tasa de Sedimentación del Carbón son: Estación Cancha Carbón: 550,328 mg/m²/día efectivo; Estación Galo Herrera: 8,325 mg/m²/día efectivo; Estación MPS Bajo: 2,679 mg/m²/día efectivo; Estación MPS Alto: 2,347 mg/m²/día efectivo. Así, se constata una significativa reducción de la Tasa de sedimentación de Carbón en función de la distancia a la fuente del carbón del orden de 98,5% en la Estación Galo Herrera de 99,5% (distancia de 150 m) en la Estación MPS Bajo (distancia de 275 m) y 99,6% en la Estación MPS

Alto (distancia 475 m). Se concluye entonces, que la disminución de la Tasa de Sedimentación del Carbón está determinada por la efectividad de las medidas de control de la dispersión de las partículas de carbón, adoptadas por AES-Andes.

8 CONCLUSIONES

8.1 Tasa de Sedimentación MPS total

- 1) Los valores más altos de la Tasa de Sedimentación del *MPS total* en los 3 meses de monitoreo del período que se informa (marzo-junio 2023), correspondientes a los meses 7, 8 y 9 desde el inicio del monitoreo, se registran en la Estación Cancha Carbón.
- 2) Las estaciones que sobrepasan el límite diario de $150 \text{ mg/m}^2/\text{día}$ indicado en la norma Cuenca del Río Huasco (D.E. N°4/92) en el período monitoreo de 3 meses (marzo-abril; abril-mayo; mayo-junio) son:
 - Estación Cancha Carbón en los 3 meses de monitoreo (valores entre $1908,55 \text{ mg/m}^2/\text{día}$ y $772,00 \text{ mg/m}^2/\text{día}$).
 - Estación Galo Herrera, prácticamente en el límite ($155,76 \text{ mg/m}^2/\text{día}$) en el mes 2 del período (abril-mayo 2023).
 - Estación MPS Bajo en el mes 2 del período ($193,82 \text{ mg/m}^2/\text{día}$ en abril-mayo 2023).
 - Estación MPS Alto en los 3 meses de monitoreo (valores entre $257,82 \text{ mg/m}^2/\text{día}$ y $159,38 \text{ mg/m}^2/\text{día}$).
- 3) El grueso de la Tasa de Sedimentación del *MPS total* está determinado por la Tasa de Sedimentación del *MPS insoluble*, que representa el 96,0% en la Estación Cancha Carbón, 93,5% en la Estación Galo Herrera, 89,1% en la Estación MPS Bajo y 93,4% en la Estación MPS Alto.

8.2 Tasa de Sedimentación diaria del MPS soluble

El mayor valor promedio se registra en la Estación Cancha Carbón ($47,803 \text{ mg/m}^2/\text{día}$ efectivo), mientras que en las restantes 3 Estaciones es significativamente menor, fluctuando entre $8,233$ y $10,949 \text{ mg/m}^2/\text{día}$ efectivo. En todas las Estaciones se registra un notable decrecimiento de la Tasa de Sedimentación del *MPS soluble* en el tercer mes (mayo-junio 2023) del período de monitoreo.

8.3 Granulometría MPS Insoluble

El tamaño mínimo promedio de las partículas idéntico en las Estaciones Cancha Carbón y MPS Bajo (promedio $0,088 \mu\text{m}$) y algo mayor en las Estaciones Galo Herrera y MPS Alto (promedio $0,307 \mu\text{m}$ y $0,166 \mu\text{m}$, respectivamente).

Con relación al tamaño máximo, el mayor valor promedio se registra en la Estación MPS Bajo ($205,065 \mu\text{m}$), seguido de la Estación Galo Herrera ($169,261 \mu\text{m}$). En las Estaciones Cancha Carbón y MPS Alto, los valores promedio son similares ($141,407 \mu\text{m}$ y $145,315 \mu\text{m}$, respectivamente).

8.4 Componentes del MPS insoluble

- 1) Mayoritariamente está compuesto de partículas antrópicas. Componentes naturales, como restos de vegetales, representan solo entre 4,2% (Estación MPS Bajo) y 1,6% del *MPS Insoluble* (Estación MPS Alto).

- 2) Los residuos de combustión son el principal componente del MPS en todas las Estaciones, excepto Estación Cancha Carbón. La Estación MPS Alto registra el porcentaje promedio más alto de residuos de combustión (90,7%), seguido de la Estación MPS Bajo (85,8%), Galo Herrera (78,0%) y Cancha Carbón (44,0%).
- 3) El carbón es el segundo componente más abundante del MPS insoluble, especialmente en la Estación Cancha Carbón, donde representa el 47,8% del MPS insoluble, disminuyendo drásticamente en las restantes 3 Estaciones hasta un 1,1% en la Estación MPS Alto.
- 4) Partículas metálicas del tipo sulfuros de Cu-Fe y Sulfuros de Cu están presentes en las 4 Estaciones, representando entre un 12,1% (Estación Galo Herrera) y 5,7% (Estación Cancha Carbón) del MPS insoluble.

8.5 Tasa de Sedimentación diaria del MPS insoluble

- 1) El mayor valor promedio se registra en la Estación Cancha Carbón (1151,818 mg/m²/día). En las restantes 3 Estaciones la tasa disminuye drásticamente, fluctuando entre 154,720 mg/m²/día (E. MPS Alto) y 89,594 mg/m²/día (E. MPS Bajo).
- 2) Con respecto a la Estación Cancha Carbón, la Tasa de Sedimentación diaria promedio del MPS insoluble se reduce 89,8% en la Estación Galo Herrera, 92,2% en la Estación MPS Bajo y 82,1% en la Estación MPS Alto.

8.6 Carbón en el MPS

- 1) La masa de carbón que se acumula mensualmente en las 4 Estaciones de Monitoreo es baja, fluctuando entre unos pocos gramos (E. Cancha Carbón) y centésimas de gramo (E. Galo Herrera, E. MPS Bajo y E. MPS Alto).
- 2) El valor promedio de la masa de carbón acumulada mensualmente en la Estación Cancha Carbón es de 3,3 g y disminuye drásticamente a solo centésimas de gramo en las restantes 3 Estaciones: 0,045 g en E. Galo Herrera, 0,015 g en E. MPS Bajo y 0.014 en E. MPS Alto.
- 3) El porcentaje (en masa) promedio de carbón, respecto al MPS insoluble, es significativamente más alto en la Estación Cancha Carbón (47,8%), disminuyendo drásticamente a 7,2% en la Estación Galo Herrera, a 2,3% en la Estación MPS Bajo y 1,1% en la Estación MPS Alto.
- 4) El tamaño máximo promedio de las partículas de carbón fluctúa entre 131,2 µm (Estación Galo Herrera) y 73,9 µm (Estación MPS Alto).

8.7 Tasa de Sedimentación del Carbón

- 1) En la Estación Cancha Carbón se registran los mayores valores de la Tasa de Sedimentación del carbón en los 3 meses. En particular, registra un fuerte aumento en el tercer mes del

período (mayo-junio) donde se incrementa entre 140 y 146 % respecto a los dos meses precedentes. El valor promedio en los tres meses es de 550,328 mg/m²/día.

- 2) En el resto de la Estaciones, la Tasa de Sedimentación del Carbón es considerablemente más baja que en la Estación Cancha Carbón, con valores promedio de 8,325 mg/m²/día en la E. Galo Herrera), 2,679 mg/m²/día en la E. MPS Bajo y de 2,347 mg/m²/día en la E. MPS Alto..
- 3) Con relación al valor promedio registrado en la Estación Cancha Carbón, la Tasa promedio de Sedimentación del Carbón decrece abruptamente en 98,5% en la Estación Galo Herrera, en 99,5% en la Estación MPS Bajo y en 99,6% en la Estación MPS Alto, lo que verifica la efectividad de las pantallas perimetrales en torno a la cancha de carbón.

Como las Estaciones Galo Herrera, MPS Bajo y MPS Alto están ubicadas a una distancia de 150 m, 275 m y 475 m, respectivamente, de la Estación Cancha Carbón, los resultados respecto a la *variable carbón* del MPS permiten constatar una relación directa entre la distancia a la fuente de origen de las partículas de carbón, el porcentaje de carbón en el MPS y de Tasas de Sedimentación de Carbón. Se concluye, entonces, que las medidas de control de la dispersión de las partículas de carbón, adoptadas por AES-Andes son efectivas.

9 REFERENCIAS

- Cisternas, 2022. 1° Informe de caracterización integral del MPS colectado en 4 Estaciones con colectores pasivos (Cancha Carbón, Galo Herrera, MPS Bajo y MPS Alto) en o cerca de las Instalaciones del Complejo Termoeléctrico Ventanas de AES-Andes. Mes 1, 2 y 3 del Monitoreo Anual. Puchuncaví, 5° Región, Chile. Informe Inédito para AES-Andes, 26 p. Noviembre 2022.
- Cisternas, 2023a. 2° Informe de caracterización integral del MPS colectado en 4 Estaciones con colectores pasivos (Cancha Carbón, Galo Herrera, MPS Bajo y MPS Alto) en o cerca de las Instalaciones del Complejo Termoeléctrico Ventanas de AES-Andes. Mes 4 y 5 del Monitoreo Anual. Puchuncaví, 5° Región, Chile. Informe Inédito para AES-Andes, 31 p. Abril 2023.
- Cisternas 2023b. 3° Informe de caracterización integral del MPS colectado en 4 Estaciones con colectores pasivos (Cancha Carbón, Galo Herrera, MPS Bajo y MPS Alto) en o cerca de las Instalaciones del Complejo Termoeléctrico Ventanas de AES-Andes. Mes 7, 8 y 9 del Monitoreo Anual. Puchuncaví, 5° Región, Chile. Informe Inédito para AES-Andes, 28 p. Mayo 2023.
- D. N°4/1992 Exento del Ministerio de Agricultura. Normas de Calidad del Aire para Material Particulado Sedimentable en la Cuenca del Río Huasco III Región.
- Feng, S. & Li, Y. Study on coal fly ash classified by bulk density. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1732 012127. doi.org/10.1088/1742-6596/1732/1/012127.
- D.E. N°223/2015 del Ministerio del Medio Ambiente, Instrucciones Generales sobre la Elaboración del Plan de Seguimiento de Variables Medioambientales.
- Minerals Densities. The Engineering Toolbox (www.engineeringtoolbox.com)
- Saiah, R., Perrin, B. & Rigal, L. 2010. Improvement of thermal properties of fires clays by introduction of vegetable matter. *J. Building Physics*, 34 (2): 124-142. doi.org/10.1177/1744259109360059.
- Santos, J.M. Reis, N.C., Galvão E.S., Silveira, A., Goulart, E. V. & Lima, A. T. 2017. Source apportionment of settleable particles in an impacted urban and industrialized region in Brazil. *Environ Sci Pollut Res* 4(27): 22026-22039.
- Severin, K. 2004. Energy Dispersive Spectrometry of Common Rock Forming Minerals. Kluwer Acad. Pu. 219 p.
- Suarez-Ruiz, I. et al. (2017) Development of a petrographic classification of fly-ash components from coal combustion and co-combustion. (An ICCP Classification System, Fly-Ash Working Group – Commission III.). *Inter. Jour. Coal Geology*, 183: 188-203.
- Valentim, et al. 2018. Undifferentiated Inorganics in Coal Fly Ash and Bottom Ash: Calciphères, magnesiocalciphères and Magnesiaspheres. *Minerals* 2018, 8, 140; doi:10.3390/min8040140.
- Vallack, H. W. & Shillito, D. E. 1998. Suggested guidelines for deposited ambient dust. *Atmospheric Environment* Vol. 32 (16,): 737—2744.
- Wood, G., Kehn T., Carter, D. & Culberston, W. Coal Resource Classification System of the US Geological Survey. Geological Survey Circular 891. <http://pubs.usgs.gov/circ/c891/table2.htm>



Dra. María Eugenia Cisternas S.
Geóloga-Mineralogista
GEO-FORENSIC SpA
27 de agosto de 2023

2° INFORME DE CARACTERIZACION INTEGRAL DEL
MPS COLECTADO EN 4 ESTACIONES CON
COLECTORES PASIVOS (CANCHA CARBÓN, GALO
HERRERA, MPS BAJO Y MPS ALTO) EN O CERCA DE
LAS INSTALACIONES DEL COMPLEJO
TERMoeLECTRICO VENTANAS DE AES-ANDES. Mes 4,
5 y 6 (oct-dic 2022). PUCHUNVAVI, 5° REGION, CHILE
Dra. María Eugenia Cisternas S

Fecha Informe: 18 abril 2023

Tabla de contenido

RESUMEN EJECUTIVO	3
1 INTRODUCCIÓN	5
2 OBJETIVOS	7
3 METODOLOGÍA DE MUESTREO Y ANÁLISIS DEL MPS	8
3.1 INSTALACIÓN DE COLECTORES PASIVOS Y RECOLECCIÓN DE MUESTRAS	8
3.2 REMOCIÓN DEL MPS DESDE LAS BOTELLAS, DETERMINACIÓN DE LA MASA DEL MPS TOTAL, SOLUBLE E INSOLUBLE ..	9
3.3 ESTUDIO COMPOSICIONAL DEL MPS INSOLUBLE Y CUANTIFICACIÓN DE LA FRACCIÓN CORRESPONDIENTE A CARBÓN.	9
4 MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS	9
4.1 CARACTERIZACIÓN GRANULOMÉTRICA DEL MPS.....	9
4.2 IDENTIFICACIÓN DE COMPONENTES DEL MPS INSOLUBLE MEDIANTE MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA (SEM/EDS).....	9
4.3 DETERMINACIÓN PORCENTUAL DE TIPOS DE PARTÍCULAS ANTRÓPICAS EN EL MPS	11
5 RESULTADOS MPS SOLUBLE	12
5.1 MASA DE MPS SOLUBLE.....	12
5.2 TASA DE CONCENTRACIÓN MPS SOLUBLE	12
5.3 TASA DE SEDIMENTACIÓN MPS SOLUBLE.....	13
6 RESULTADOS MPS INSOLUBLE	15
6.1 GRANULOMETRÍA DE MPS INSOLUBLE.....	15
6.2 COMPOSICIÓN DEL MPS INSOLUBLE	15
6.3 MASA Y PORCENTAJE EN MASA DE LOS COMPONENTES DEL MPS INSOLUBLE	17
6.4 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL MPS INSOLUBLE.....	19
7 RESULTADOS REFERIDOS AL COMPONENTE CARBÓN DEL MPS INSOLUBLE	20
7.1 MASA, PORCENTAJE Y TAMAÑO DE PARTÍCULAS DE CARBÓN	20
7.2 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL CARBÓN	21
8 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	23
8.1 COMPONENTES ANTRÓPICOS Y SU PROPORCIÓN EN EL MPS.....	23
8.2 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL MPS TOTAL.....	24
8.3 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL CARBÓN	26
9 CONCLUSIONES	29
9.1 TASA DE SEDIMENTACIÓN MPS TOTAL.....	29
9.2 TASA DE SEDIMENTACIÓN DIARIA DEL MPS SOLUBLE.....	29
9.3 GRANULOMETRÍA MPS INSOLUBLE.....	29
9.4 COMPONENTES DEL MPS INSOLUBLE	29
9.5 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL MPS INSOLUBLE.....	30
9.6 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL MPS TOTAL.....	30
9.7 CARBÓN EN EL MPS	30
9.8 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL CARBÓN	30
10 REFERENCIAS	31
LISTA DE TABLAS	
TABLA 1 MASA MPS SOLUBLE (MG) EN LAS 4 ESTACIONES DURANTE LOS 2 MESES DE MONITOREO DEL PERÍODO OCTUBRE- DICIEMBRE 2022	12

TABLA 2 TASA DE SEDIMENTACIÓN MENSUAL MPS SOLUBLE, EFECTIVA Y NORMALIZADA A 30 DÍAS. PERÍODO OCTUBRE-DICIEMBRE 2022	13
TABLA 3 TASA DE SEDIMENTACIÓN DIARIA MPS SOLUBLE CALCULADA POR DÍA EFECTIVO. PERÍODO OCTUBRE-DICIEMBRE 2022) 14	
TABLA 4 TAMAÑO PARTÍCULAS MPS INSOLUBLE EN LAS 4 ESTACIONES DURANTE LOS 2 MESES DE MONITOREO DEL PERÍODO OCTUBRE-DICIEMBRE 2022	15
TABLA 5 MASA POR TIPO DE PARTÍCULA EN LAS 4 ESTACIONES, EN LOS 2 MESES DE MONITOREO DEL PERÍODO OCTUBRE-DICIEMBRE 2022	18
TABLA 6 PORCENTAJE EN MASA POR TIPO DE PARTÍCULA EN LAS 4 ESTACIONES, EN LOS 2 MESES DE MONITOREO DEL PERÍODO OCTUBRE-DICIEMBRE 2022	18
TABLA 7 MASA Y PORCENTAJE PROMEDIO (2 MESES) DE COMPONENTES EN MPS INSOLUBLE. PERÍODO OCTUBRE-DICIEMBRE 2022	18
TABLA 8 TASA DE SEDIMENTACIÓN DE MPS INSOLUBLE MENSUAL Y DIARIA EN EL PERÍODO OCTUBRE-DICIEMBRE 2022.	19
TABLA 9 PORCENTAJE (EN MASA) DEL CARBÓN EN EL MPS INSOLUBLE EN LAS 4 ESTACIONES EN EL PERÍODO OCTUBRE-DICIEMBRE DE 2022	21
TABLA 10 TAMAÑO MÍNIMO Y MÁXIMO (EN MICRONES) DE LAS PARTÍCULAS DE CARBÓN EN EL PERÍODO OCTUBRE-DICIEMBRE DE 2022	21
TABLA 11 TASA SEDIMENTACIÓN CARBÓN EN LAS 4 ESTACIONES EN LOS 2 MESES DE MONITOREO DEL PERÍODO OCTUBRE-DICIEMBRE DE 2022.....	22
TABLA 12 EJEMPLOS DE VALORES LÍMITES DE TASA DE SEDIMENTACIÓN DE MPS (MG/M ² /DÍA)	25
TABLA 13 TASA DE SEDIMENTACIÓN DIARIA DE MPS SOLUBLE, INSOLUBLE Y TOTAL EN LOS 2 MESES DE MONITOREO. PERÍODO OCTUBRE-DICIEMBRE 2022	25

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 UBICACIÓN ESPACIAL SOBRE IMAGEN GOOGLE EARTH DE LAS 4 ESTACIONES DE MONITOREO	6
FIGURA 2 MODELO DE COLECTOR PASIVO INSTALADO EN 4 ESTACIONES DEL CTV	8
FIGURA 3 CONCENTRACIÓN (G/L) COMPARADA DEL MPS SOLUBLE EN LAS 4 ESTACIONES. PERÍODO OCTUBRE-DICIEMBRE 2022 13	
FIGURA 4 MASA DE CARBÓN REGISTRADA EN LAS 4 ESTACIONES Y VARIABILIDAD EN EL PERÍODO OCTUBRE-DICIEMBRE DE 2022 .	20
FIGURA 5 EVOLUCIÓN PORCENTUAL (% EN MASA) DE LOS COMPONENTES DEL MPS INSOLUBLE EN LAS 4 ESTACIONES. PERÍODO OCTUBRE-DICIEMBRE DE 2022	23
FIGURA 6 TASA DE SEDIMENTACIÓN MENSUAL Y DIARIA DEL MPS EN LAS 4 ESTACIONES. PERÍODO OCTUBRE-DICIEMBRE 2022. 26	
FIGURA 7 TASA SEDIMENTACIÓN CARBÓN DIARIA EN LAS 4 ESTACIONES. PERÍODO OCTUBRE-DICIEMBRE 2022)	27

LISTA DE LAMINAS

LÁMINA 1. A: SEM/BSE; B: SEM/EDS MAPPING DE C, O, AL, SI, FE, CU Y S; C ; C: MAPPING DE CARBONO (C)	17
---	----

RESUMEN EJECUTIVO

El presente Informe se enmarca en el Plan de Muestreo de Material Particulado Sedimentable (MPS) de 12 meses de duración, autorizado mediante la Resolución N° 00045 (02 de junio 2022) de la Secretaría Regional Ministerial de Salud (SRMS) de la Región de Valparaíso, cuyo objetivo principal es evaluar la eficacia del Sistema de Control de dispersión de material, específicamente de las partículas de carbón, hacia el exterior del Complejo Termoeléctrico Ventanas.

El Plan de Muestreo considera la caracterización del MPS depositado mensualmente en 4 colectores pasivos durante 1 año, con informes trimestrales de resultados. Los colectores se ubican: 01 al interior de la cancha de carbón (Estación Cancha Carbón), 01 fuera de la cancha, aunque dentro de las dependencias de AES ANDES (Estación Galo Herrera), y 02 ubicados en la comunidad en el sector de la greda bajo (MPS Bajo) y la greda alto (MPS Alto)

Las variables ambientales principales consideradas en el Plan de Monitoreo son: 1) el porcentaje de carbón presente en el MPS insoluble; 2) la variación del porcentaje de carbón en las cuatro estaciones; 3) el gradiente de dispersión del carbón desde la cancha de acopio de este material, hacia las 3 otras estaciones.

Este informe presenta los resultados de los meses 5 y 6 de monitoreo (octubre-noviembre y noviembre-diciembre 2022), referidos a la caracterización del MPS soluble, insoluble y total, con especial énfasis en el componente carbón del MPS. El mes 4 (septiembre-octubre 2022) no está considerado en este Informe, dado que las muestras, fueron extraviadas por la empresa Chileexpress. Hecho informado por AES Andes mediante carta VPO-DMA-069-2023 del 17-04-2023.

Las conclusiones de esta fase del monitoreo son:

- 1) La Tasa de Sedimentación diaria del MPS total supera el valor límite de 150 mg/m² /día que precisa la norma secundaria para la Cuenca del Río Huasco (D.E. N°4/92) en:
 - Estación Cancha Carbón en los dos meses monitoreados (octubre-noviembre y noviembre-diciembre 2022)
 - Estación Galo Herrera y Estación MPS Greda Alto en el período octubre-noviembre 2022.
- 2) El MPS insoluble está compuesto mayoritariamente de partículas antrópicas (residuos de combustión de carbón, carbón crudo y partículas metálicas tipo sulfuros de Cu), con componentes naturales (briznas de vegetales) en proporción muy minoritaria (entre 1,7% a 7,1%, valores promedio dos meses).
- 3) El carbón es el segundo componente más abundante del MPS insoluble en todas las estaciones, después de los residuos de combustión. El porcentaje promedio de carbón en los 2 meses de monitoreo es significativamente más alto en la Estación Cancha de Carbón (45,3%), disminuyendo de manera sostenida a medida que aumenta la distancia a las instalaciones del CTV: 4,3 veces en Estación Galo Herrera, 20,2 veces en Estación MPS Bajo y 18,4 veces en la Estación MPS Alto.

- 4) La Tasa de Sedimentación del Carbón sobrepasa el límite diario de $150 \text{ mg/m}^2/\text{día}$ (norma DE N°4/92) solamente en la Estación Cancha Carbón en los dos meses de monitoreo (octubre-noviembre y noviembre-diciembre).
- 5) En las restantes tres Estaciones, Galo Herrera, MPS Bajo y MPS Alto, la Tasa de Sedimentación de carbón es considerablemente más baja que el límite diario máximo de $150 \text{ mg/m}^2/\text{día}$ indicado en la norma secundaria del Río Huasco (D.E. N°4/92).
- 6) El aporte de partículas de carbón desde la Cancha Carbón al MPS insoluble se reduce considerablemente hacia zonas externas, lo que se refleja en que la Tasa promedio de Sedimentación del Carbón decrece 14,8 veces en la Estación Galo Herrera, de 63,3 veces en la Estación MPS Bajo y de 137,5 veces en la Estación MPS Alto.

1 INTRODUCCIÓN

A solicitud de AES-Andes, a través del Departamento Gestión Ambiental Complejo Centro, Geo-Forensic SpA realizará la caracterización integral del Material Particulado Sedimentable (MPS), con particular énfasis en la participación del carbón dispersado desde la cancha de acopio de este material hacia sectores ubicados en las cercanías de las instalaciones de Complejo Termoeléctrico Ventanas (CTV), Comuna de Puchuncaví, Región de Valparaíso. Este estudio se enmarca en un Plan de Muestreo de Material Particulado Sedimentable (MPS) de 12 meses de duración.

El Plan de Muestreo de Material Particulado Sedimentable fue autorizado mediante la Resolución N° 00045 de la Secretaría Regional Ministerial de Salud (SRMS) de la Región de Valparaíso fechada el 02 de junio 2022. Dicha resolución autoriza el *Sistema de control y dispersión de material hacia el exterior de la instalación y su mecanismo de verificación de efectividad de la Cancha de almacenamiento de carbón* del Complejo Termoeléctrico Ventanas, (CTV) propiedad de AES ANDES S.A. El material al que hace referencia corresponde única y exclusivamente al *manejo de carbones Bituminosos y Sub-bituminosos acopiados en la cancha de carbón del CTV*.

En la Figura 1 se señala la ubicación espacial sobre imagen Google Earth de las 4 Estaciones de Monitoreo indicadas en la Resolución N° 00045 del SRMS.



Figura 1 Ubicación espacial sobre imagen Google Earth de las 4 Estaciones de Monitoreo

- Estación Cancha carbón (coordenadas geográficas 267662.17 E; 6373667.19 S), ubicada al interior de la cancha de acopio de carbón.
- Estación Galo Herrera, (coordenadas geográficas 267760,87 E y 6373794.17 S) localizada fuera de la cancha, aunque dentro de las dependencias de AES ANDES.
- Estación MPS Bajo (coordenadas geográficas N), 267669 E, 6373931 N) ubicada dentro del área de protección de la pantalla deflectora.
- Estación MPS Alto (coordenadas geográficas 267774 E; 6374087 N), ubicada cerca del área de protección de la pantalla deflectora.

Las Estaciones MPS Alto y MPS Bajo están ubicadas en el poblado La Greda.

Las variables ambientales principales consideradas en el Plan de Monitoreo son:

- 1) El porcentaje de carbón presente en el MPS insoluble.
- 2) La variación del porcentaje de carbón en las cuatro estaciones.

3) El gradiente de dispersión del carbón desde la cancha de acopio de este material, hacia las 3 otras estaciones del Plan de Muestreo de MPS.

El presente Informe se hace cargo de los resultados obtenidos en los meses 5 y 6 de monitoreo (período mediados de octubre a mediados de diciembre 2022). Las botellas colectoras del MPS, correspondientes al mes 4 (mediados de septiembre a mediados de octubre), fueron extraviadas por la empresa Chilexpress, encargada por SGS del transporte a los laboratorios del Instituto GEA de la Universidad de Concepción.

2 OBJETIVOS

El Objetivo Principal del Plan de monitoreo es evaluar la eficacia del Sistema de Control de dispersión de material, específicamente de las partículas de carbón, hacia el exterior del Complejo Termoeléctrico Ventanas.

Las principales tareas a desarrollar para cumplir el Objetivo Principal son:

- Monitorear y caracterizar la cantidad de MPS acumulada en cada colector, con indicación de la Tasa de sedimentación del MPS soluble e insoluble.
- Monitorear y caracterizar la cantidad de MPS correspondiente a las partículas de carbón, con indicación de la masa acumulada en cada colector y cálculo de la Tasa de Sedimentación del Carbón expresada en $\text{mg}/\text{m}^2/\text{mes}$ y $\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$.
- Determinar la variación espacial y temporal de las Tasas de Sedimentación de carbón, considerando las variaciones en las 4 estaciones y variaciones en el lapso de tiempo considerado entre la instalación y la remoción de los colectores para el período que se informa.

Como Objetivo Secundario se aborda la comparación de las Tasas de Sedimentación del carbón con normas nacionales e internacionales.

Los parámetros que fueron utilizados para caracterizar el estado y evolución de las variables ambientales son:

- Masa soluble total
- Masa insoluble total
- Masa insoluble carbón
- Tasa de Sedimentación del MPS
- Tasa de Sedimentación del Carbón

3 METODOLOGÍA DE MUESTREO y ANÁLISIS DEL MPS

El término MPS (*Settleable Particulate Matter*, en inglés) se refiere a cualquier material compuesto de partículas lo suficientemente pequeñas como para pasar a través de una pantalla de 1 mm y lo suficientemente grandes como para depositarse desde el aire, en virtud de su peso, en el contenedor (Norma ASTM D 1739 – 98)¹.

3.1 Instalación de colectores pasivos y recolección de muestras

Para recolectar el Material Particulado Sedimentable se utilizaron colectores pasivos (Figura 2), con un radio de 0,249 m.

La empresa SGS Chile Ltda., fue la responsable de la instalación y mantención de los 4 colectores pasivos. El período aconsejado de recolección del MPS es del orden de 27 a 32 días, sin embargo en condiciones climáticas desfavorables, por ejemplo fuertes lluvias, las botellas de recolección pueden ser removidas y guardadas mientras dura el mal tiempo y, tras esto, recolocadas nuevamente en los colectores.

La remoción de las botellas desde los 4 colectores pasivos está a cargo de la Empresa SGS, quien envía mensualmente las botellas al Instituto de Geología Económica (GEA) de la Universidad de Concepción.



Figura 2 Modelo de Colector pasivo instalado en 4 Estaciones del CTV.

¹ Standard Test Method for Collection and Measurement of Dustfall (Settleable Particulate Matter)¹

3.2 Remoción del MPS desde las botellas, determinación de la masa del MPS total, soluble e insoluble

En el Instituto GEA, las botellas colectoras son tratadas con ultrasonido para retirar toda la masa adherida a la superficie interna. Posteriormente, se procede a:

- Determinación de sólidos insolubles: una vez removida toda la masa de las botellas colectoras se procede a la filtración de sólidos, utilizando un filtro de membrana de 0,45 micrones. Posteriormente, los sólidos son secados a 40°C y luego pesados, hasta peso constante.
- Determinación de sólidos solubles: Los sólidos solubles fueron determinados en la solución remanente de la filtración, según la norma ASTM D 1739 – 98.
- Determinar la granulometría de las partículas en la fracción insoluble mediante difracción laser.
- Entrega de la fracción insoluble a Geo-Forensic SpA.

3.3 Estudio composicional del MPS Insoluble y cuantificación de la fracción correspondiente a carbón.

Una vez recibidas las muestras de la fracción insoluble del MPS, por parte Geo-Forensic se procede al estudio integral de componentes mediante Microscopía Electrónica (SEM), con énfasis en el estudio del *componente carbón*.

4 MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS

4.1 Caracterización granulométrica del MPS

El análisis granulométrico de la masa total insoluble es realizado por el Instituto de Geología Económica Aplicada (GEA) de la Universidad de Concepción mediante el método de difracción láser en húmedo. El equipo utilizado es un analizador granulométrico láser Fritsch modelo Analysette 22 Microtec Plus. El análisis se realiza en húmedo, con aplicación de ultrasonido para obtener la máxima dispersión de partículas. El equipo posee un rango de medición de 0,08 a 2000 micrones (μm).

4.2 Identificación de componentes del MPS Insoluble mediante microscopía electrónica (SEM/EDS)

Considerando que las partículas del MPS tienen tamaño micrométrico, la caracterización textural y composicional de los diferentes tipos de partículas presentes en el MPS insoluble se realiza mediante microscopio electrónico de barrido (SEM)

El equipo utilizado corresponde a un TSCAN, VEGA III, equipado con detector de electrones retro-dispersados (Modo BSE), detector de electrones secundarios (Modo SE) y detector de rayos x de energía dispersiva (Modo EDS). Este equipo pertenece al Centro de Microscopía Avanzada del Bío-Bío (CMA), ubicado en dependencias de la Universidad de Concepción.

En un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM: Scanning Electron Microscopy por sus siglas en inglés) el bombardeo de electrones sobre la muestra produce varias formas simultáneas de radiación, entre ellas, la emisión de electrones secundarios (SE), electrones retro-dispersados (BSE) y emisión de rayos X. Cada una de esas formas de radiación es capturada por un detector específico.

Detector SE versus detector BSE

La imagen entregada por el SEM se genera por la interacción del haz de electrones que “barre” un área determinada sobre la superficie de la muestra. La detección de los electrones secundarios o retro-dispersados en un gran número de puntos sobre el área barrida, previa transformación electrónica, genera la imagen que se visualiza en una pantalla y es fotografiada mediante una cámara adosada al equipo.

El detector SE es ideal para generar imágenes SEM de alta resolución que permiten obtener detalles de la morfología y textura superficial de las partículas. El detector BSE ofrece una imagen de menor resolución, pero tiene la ventaja de que es sensible a las variaciones en el número atómico de los elementos presentes en la superficie, permitiendo discriminar sobre la imagen partículas de diferente composición.

Cada imagen SEM incorporada en este estudio contiene información impresa de las condiciones de trabajo (voltaje de aceleración de electrones, distancia de trabajo, magnificación) y una escala gráfica que permite identificar el tamaño de las partículas. La intensidad del haz de electrones utilizada fluctuó entre 10 y 12 mV.

Detector EDS para determinación química de componentes

El detector EDS analiza los rayos X generados por el bombardeo de electrones mediante la espectroscopía de rayos X de energía dispersa (EDS por sus siglas en inglés). Permite identificar los elementos presentes en el punto de incidencia del haz de electrones sobre una partícula, o en un área previamente determinada que será barrida por el haz de electrones. Se obtiene así un espectro con los *peaks* de los elementos presentes en el punto de incidencia, con dato del porcentaje elemental o en masa de esos elementos. O bien, si se combina con la detección de electrones retro-dispersados en un área, se obtiene una suerte de “mapa” con la distribución de los elementos presentes en la muestra (*herramienta mapping*).

Los espectros EDS aplicados a los objetivos de este estudio, aportan información invaluable para diferenciar la naturaleza de las partículas sólidas, es decir distinguir carbón crudo, de residuos de combustión, de otras partícula metálicas o bien de partículas vegetales.

Como material de referencia para la identificación de los diferentes tipos de residuos de combustión fueron utilizados los estudios de Suarez -Ruiz et al. 2017² y Valentim et al. 2018³. Para la identificación composicional de fases cristalinas mediante SEM se utilizó el trabajo de Severin, 2004⁴.

Montaje de las muestras para el estudio mediante microscopio electrónico

Las muestras fueron montadas en porta muestras de aluminio de 11 mm de diámetro (pines), recubiertos con cinta adhesiva de doble cara de carbono. El montaje de las partículas se realiza teniendo precaución que éstas no se superpongan entre sí, ya que eso puede afectar el espectro EDS de las partículas de interés. El análisis de las muestras se realizó sin grafitización previa de los porta muestras.

4.3 Determinación porcentual de tipos de partículas antrópicas en el MPS

Para determinar el porcentaje de partículas identificadas en el MPS Insoluble se utiliza un programa digital que emula un contador automático de puntos. Mediante este programa se determinó la relación porcentual relativa, en volumen, de las partículas naturales y antrópicas presentes en las muestras, utilizando para ello 3 imágenes SEM por muestra, obtenidas con el detector BSE a baja magnificación (100x) y alta resolución.

El porcentaje en masa de los componentes fue determinado utilizando valores de densidad promedio para los diferentes tipos de partículas, como se indica a continuación:

Partículas naturales:

- Briznas de vegetales⁵: 1,5 g/cm³

Partículas antrópicas:

- Partículas de carbón⁶: 1,4 g/cm³ (valores fluctúan entre 1,47 y 1,29 g/cm³)
- Residuos de Combustión⁷: 2,5 g/cm³ (valores fluctúan entre 1,9 a 2,9 g/cm³)
- Partículas Metálicas⁸: 5,0 g/cm³ (sulfuros de Cu-Fe: 4,9 g/cm³; Magnetita: 5,2 g/cm³)

² Suarez-Ruiz, I. et al. (2017) Development of a petrographic classification of fly-ash components from coal combustion and co-combustion. (An ICCP Classification System, Fly-Ash Working Group – Commission III.). *Inter. Jour. Coal Geology*, 183: 188-203.

³ Valentim, et al. 2018. Undifferentiated Inorganics in Coal Fly Ash and Bottom Ash: Calciphères, magnesiocalciphères and Magnesiaspheres. *Minerals* 2018, 8, 140; doi:10.3390/min8040140.

⁴ Severin, K. 2004. Energy Dispersive Spectrometry of Common Rock Forming Minerals. Kluwer Acad. Pu. 219 p.

⁵ Saiah, R., Perrin, B. & Rigal, L. 2010. Improvement of thermal properties of fires clays by introduction of vegetable matter. *J. Building Physics*, 34 (2): 124-142. doi.org/10.1177/1744259109360059

⁶ Wood, G., Kehn T., Carter, D. & Culberston, W. Coal Resource Classification System of the US Geological Survey. Geological Survey Circular 891. <http://pubs.usgs.gov/circ/c891/table2.htm>

⁷ Feng, S. & Li, Y. Study on coal fly ash classified by bulk density. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1732 012127. doi.org/10.1088/1742-6596/1732/1/012127

⁸ Minerals Densities. The Engineering Toolbox (www.engineeringtoolbox.com)

5 RESULTADOS MPS soluble

5.1 Masa de MPS soluble

En la Tabla 1 se indica la masa de MPS Soluble determinado en las muestras del período que se informa (mes 5 y mes 6, período octubre-diciembre 2022), considerando los días efectivos de acumulación de MPS.

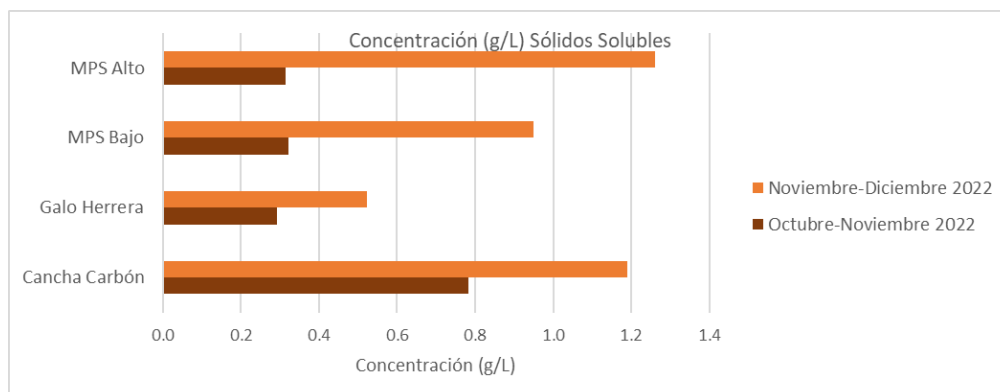
Nótese que en el mes 5 (octubre-noviembre) hay una variación substancial en el período de acumulación del MPS en las Estaciones Cancha de Carbón y Galo Herrera debido a la toma de los accesos a AES-Costa, lo cual impidió a SGS el ingreso oportuno para retirar las botellas. En el caso particular de la estación Galo Herrera (*) se constató intervención en el sitio del colector, razón por la cual fue necesario eliminar el MPS acumulado e instalar una nueva botella con fecha 27 de octubre 2022.

Fecha de Inicio	Fecha Final	Estación	Período de Muestreo en días efectivos	Masa MPS soluble medida (mg)
13-10-22	17-11-22	Cancha Carbon	35	234,5
27-10-22	17-11-22	Galo Herrera	21	87,4
13-10-22	11-11-22	MPS Bajo	29	96,4
13-10-22	11-11-22	MPS Alto	29	94,7
17-11-22	16-12-22	Cancha Carbon	29	331,0
17-11-22	16-12-22	Galo Herrera	29	186,9
11-11-22	09-12-22	MPS Bajo	28	121,5
11-11-22	09-12-22	MPS Alto	28	93,3

Tabla 1 Masa MPS Soluble (mg) en las 4 Estaciones durante los 2 meses de monitoreo del período octubre-diciembre 2022

5.2 Tasa de Concentración MPS soluble

En la Figura 3 se grafica la concentración de solubles en todas las estaciones para el período octubre-diciembre 2022 (mes 5 y 6). En el período octubre-noviembre (mes 5) los valores son más altos en la Estación Cancha Carbón y significativamente más bajas las restantes 3 estaciones. En el período noviembre-diciembre (mes 6) las comparaciones se entorpecen por las diferencias en el tiempo de acumulación del MPS en las diferentes Estaciones.



Resultados Sólidos Solubles	Octubre-Noviembre 2022				Noviembre-Diciembre 2022			
	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto
Volumen (L)	0.384	0.498	0.338	0.414	0.278	0.358	0.128	0.074
Concentración (g/L)	0.782	0.291	0.321	0.316	1.191	0.522	0.949	1.261
Masa (g)	0.235	0.087	0.096	0.095	0.331	0.187	0.122	0.093

Figura 3 Concentración (g/L) comparada del MPS soluble en las 4 Estaciones. Período octubre-diciembre 2022

5.3 Tasa de Sedimentación MPS Soluble

En la Tabla 2 se registra la Tasas de Sedimentación mensual del MPS soluble, calculada tomando en consideración los días efectivos para cada período y valores derivados de normalizar a mes 30 días, como sugiere la norma secundaria de la Cuenca del Río Huasco (D.E. N°4/92). Las diferencias observadas hacen aconsejable que en lo sucesivo el tiempo de recolección en los colectores pasivos respete el período de 30 días, para que los resultados se ajusten a la Tasa de Sedimentación real.

Fecha de Inicio	Fecha Final	Estación	Período de Muestreo en días efectivos	Tasa de Sedimentación MPS soluble (mg/m ² /mes efectivo)	Tasa de Sedimentación MPS soluble (mg/m ² /mes 30 días)
13-10-22	17-11-22	Cancha Carbon	35	1203,912	1031,9
27-10-22	17-11-22	Galo Herrera	21	448,707	641,0
13-10-22	11-11-22	MPS Bajo	29	486,185	503,0
13-10-22	11-11-22	MPS Alto	29	494,913	512,0
17-11-22	16-12-22	Cancha Carbon	29	1699,338	1757,9
17-11-22	16-12-22	Galo Herrera	29	959,536	992,6
11-11-22	09-12-22	MPS Bajo	28	478,998	513,2
11-11-22	09-12-22	MPS Alto	28	623,775	668,3

Tabla 2 Tasa de Sedimentación mensual MPS soluble, efectiva y normalizada a 30 días. Período octubre-diciembre 2022

La Tabla 3 registra la Tasa de Sedimentación diaria del MPS soluble. Los resultados muestran que:

- Estación Cancha Carbón: registra valores comparativamente más altos en el período noviembre-diciembre (58,598 mg/m²/día efectivo) que en el mes anterior (34,397 mg/m²/día efectivo);
- Estación Galo Herrera: registra incremento significativo en el período noviembre-diciembre (33,087 mg/m²/día efectivo), con respecto al mes anterior (21,367 mg/m²/día efectivo).
- Estación MPS Bajo: los valores son similares en los 2 meses (rango entre 16,765 mg/m²/día efectivo a 17,107 mg/m²/día efectivo).
- Estación MPS Alto: registra moderado incremento en período noviembre-diciembre (22,278 mg/m²/día efectivo) respecto al período octubre-noviembre (17,066 mg/m²/día efectivo).

6 RESULTADOS MPS insoluble

6.1 Granulometría de MPS insoluble

Los resultados del análisis granulométrico mediante difracción láser se presentan en la Tabla 4 (tamaño partículas en micrones).

Estación	Granulometría (µm)	Octubre- Noviembre 2022	Noviembre- Diciembre 2022	Promedio por Estación en 2 meses
Cancha Carbón	Mín	0,264	0,291	0,278
	Máx	305,746	337,690	321,718
Galo Herrera	Mín	0,291	0,355	0,323
	Máx	186,026	226,928	206,477
MPS Bajo	Mín	0,322	0,322	0,322
	Máx	250,637	168,429	209,533
MPS Alto	Mín	0,322	0,291	0,307
	Máx	113,184	113,184	113,184

Tabla 4 Tamaño partículas MPS insoluble en las 4 Estaciones durante los 2 meses de monitoreo del período octubre-diciembre 2022

El tamaño mínimo de las partículas de carbón durante los 2 meses de monitoreo es similar en todas las Estaciones (promedio 0,315 micrones).

Con relación al tamaño máximo, los valores promedio por estación permiten constatar una reducción sostenida del tamaño en función de la lejanía a la Estación Cancha Carbón. Así, la reducción del tamaño máximo es de 1,6 veces en la Estación Galo Herrera, 1,5 veces en la Estación MPS Bajo y 2,8 veces en la Estación MPS Alto.

6.2 Composición del MPS insoluble

Los tipos de partículas reconocidas en las muestras son mayoritariamente antrópicas y, de manera muy subordinada, se observan partículas naturales que corresponden a partículas vegetales tipos brizas de pastizal.

La identificación de los tipos de partículas en el *MPS Insoluble*, dado su tamaño, se hizo mediante microscopía Electrónica de Barrido (SEM), utilizando imágenes BSE de alta resolución, en combinación con imágenes en la modalidad *mapping*.

La inspección de las muestras con el Modo BSE permite identificar los diferentes tipos de partículas, gracias a que este detector contrasta, mediante la tonalidad en la imagen, la diferente composición de las partículas. De este modo, de acuerdo a la tonalidad observada en la imagen, se identifican los siguientes tipos de partículas:

1. Partículas gris oscuro-negro: corresponden a partículas de carbón crudo (sin evidencias de combustión) y chars (residuos de combustión con carbono remanente). También se ven de esta

tonalidad las partículas de vegetales, las cuales se identifican por su forma (angosta y alargada), muy diferente a las partículas carbonosas (carbón y residuos de combustión).

2. Partículas gris medio: corresponden a residuos de combustión de composición alumino-silicatada, de forma esférica (cenosferas), prismática (mineroides feldespáticos y silíceos) o en granos compuestos (cenosferas más mineroides).
3. Partículas gris claro: ferrosferas (forma esférica, contenido alto de Fe).
4. Partículas blanco brillante: minerales metálicos en la forma de óxidos de Fe (magnetita, hematita), sulfuros de Fe (pirita) y sulfuros de Cu-Fe (calcopirita).

A modo de ejemplo, en la Lámina 1-A se presenta una imagen SEM/BSE donde se identifican los diferentes componentes mencionados, de acuerdo a su tonalidad de gris.

En la Lámina 1-B se presenta una imagen BSE obtenida mediante la herramienta “mapping” del SEM/EDS, la cual posibilita realizar un mapeo areal por elementos a definir por el usuario. En este estudio se utilizó esta herramienta para conocer la distribución en el muestra de los elementos carbono (C), sílice (Si), aluminio (Al), hierro (Fe), cobre (Cu) y azufre (S) y con eso confirmar la composición de los componentes observados. En la Lámina 1-C se presenta una imagen BSE con la distribución del elemento carbono (C). Mediante el *mapping* por diferentes elementos fue posible identificar los siguientes tipos de partículas:

- Solo Si (color amarillo): partículas de sílice (cuarzo) formadas en la fase final del proceso de combustión del carbón (mineroides silíceos).
- Si + Al (color amarillo + color verde): partículas alumino-silicatadas formadas en la fase final del proceso de combustión del carbón (cenosferas y mineroides de feldespato K y plagioclasa).
- Solo C (color rojo): partículas de carbón.
- C + Si + Al (color rojo + color amarillo + color verde): chars.
- S + Fe (color anaranjado + color azul): partículas de sulfuro de Fe (pirita).
- S+ Cu + Fe (color naranja + color ciclamen + color azul): sulfuro de Cu-Fe (calcopirita).
- O +Fe (color celeste + color azul): Oxido de Fe (magnetita/hematita).

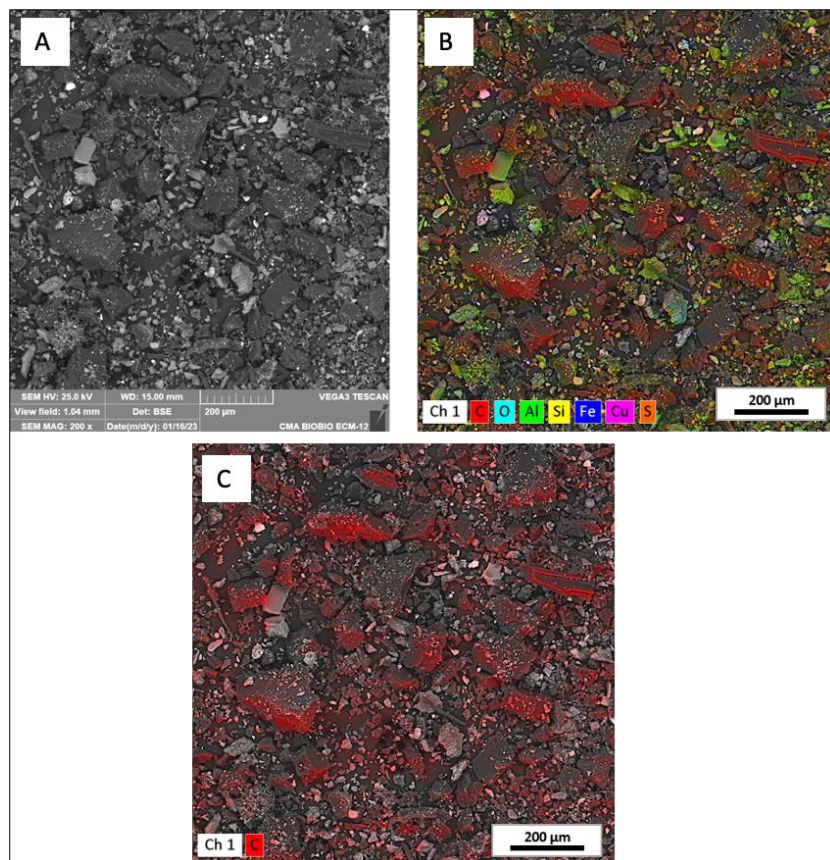


Lámina 1. A: SEM/BSE; B: SEM/EDS mapping de C, O, Al, Si, Fe, Cu y S; C: C: mapping de Carbono (C)

Información de detalle de la composición del MPS insoluble para cada una de las muestras estudiadas en este período (octubre-diciembre 2022) está contenida en Fichas por muestra, las cuales se incorporarán como Anexo al Informe Anual.

6.3 Masa y porcentaje en masa de los componentes del MPS insoluble

La determinación porcentual en volumen de cada uno de los componentes del *MPS insoluble* se realizó mediante software especializado, contabilizando los diferentes tipos de componentes sobre 3 imágenes SEM/BSE por muestra. Una vez determinado el porcentaje (en volumen) de cada componente en cada muestra, se calculó la masa, multiplicando el porcentaje en volumen por el valor de densidad asignado a cada tipo de partícula⁹ (referencias en sección 2.4), normalizando el valor obtenido a la masa total colectada en la estación correspondiente (Tabla 5).

⁹

Brizas de vegetales: 1,5 g/cm³

Partículas de carbón: 1,4 g/cm³

Residuos de Combustión: 2,5 g/cm³ (los valores de densidad fluctúan entre 1,9 a 2,9 g/cm³)

Partículas Metálicas: 5,0 g/cm³ (sulfuros de Cu-Fe: 4,9 /cm³; Magnetita: 5,2 g/cm³)

Masa por tipo de partícula (g)	Octubre-Noviembre 2022				Noviembre-Diciembre 2022			
	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto
Partículas de carbón	0,892	0,052	0,019	0,008	1,228	0,061	0,012	0,006
Residuos de combustión	0,978	0,451	0,451	0,760	0,926	0,362	0,286	0,456
Partículas metálicas	0,109	0,078	0,039	0,064	0,184	0,046	0,023	0,022
Vegetales	0,124	0,026	0,016	0,016	0,212	0,022	0,005	0,010

Tabla 5 Masa por tipo de partícula en las 4 Estaciones, en los 2 meses de monitoreo del período octubre-diciembre 2022

Una vez determinada la masa de los diferentes componentes, se procedió a determinar el porcentaje (en masa), con el propósito de determinar cuáles componentes tienen mayor influencia sobre la masa total del MPS Insoluble (Tabla 6).

Porcentaje por tipo de partícula (%)	Octubre-Noviembre 2022				Noviembre-Diciembre 2022			
	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto
Partículas de carbón	42,413	8,605	0,906	3,627	48,129	12,373	3,574	1,293
Residuos de combustión	46,508	74,249	89,592	85,948	36,318	73,780	87,690	92,188
Partículas metálicas	5,196	12,784	7,590	7,463	7,225	9,360	7,196	4,508
Vegetales	5,884	4,361	1,912	2,962	8,328	4,486	1,540	2,011

Tabla 6 Porcentaje en masa por tipo de partícula en las 4 Estaciones, en los 2 meses de monitoreo del período octubre-diciembre 2022

El componente que, porcentualmente, más aporta a la masa del MPS insoluble, corresponde a residuos de combustión de carbón (ceniza volante) en todas las Estaciones de monitoreo, especialmente en la Estación MPS Alto.

El segundo componente más abundante corresponde a partículas de carbón, con valores significativamente más altos en la Estación Cancha Carbón.

Para una mejor comparación de los resultados, en la Tabla 7 se presentan los valores promedio de la masa, y porcentaje en que cada componente aporta el MPS insoluble.

Masa por tipo de partícula (g) promedio (2 meses) por tipo de componente en MPS insoluble	Masa promedio 2 meses por estación				Porcentaje por tipo de partícula (%) promedio (2 meses) por tipo de componente en MPS insoluble	Porcentaje promedio 2 meses por estación			
	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto		Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto
Partículas de carbón	1,060	0,057	0,015	0,007	Partículas de carbón	45,271	10,489	2,240	2,460
Residuos de combustión	0,952	0,407	0,368	0,608	Residuos de combustión	41,413	74,015	88,641	89,068
Partículas metálicas	0,147	0,062	0,031	0,043	Partículas metálicas	6,210	11,072	7,393	5,985
Vegetales	0,168	0,024	0,010	0,013	Vegetales	7,106	4,424	1,726	2,487

Tabla 7 Masa y Porcentaje promedio (2 meses) de componentes en MPS insoluble. Período octubre-diciembre 2022

De la comparación de los resultados contenidos en la Tabla 7, se destaca que:

- Los residuos de combustión contribuyen en alto porcentaje al *MPS insoluble* en la Estación MPS Alto y Estación MPS Bajo (promedio dos meses: 89,1% y 88,6%, respectivamente); los porcentajes más bajos se registran en la Estación Cancha Carbón (promedio dos meses 41,4%).
- Las partículas de carbón contribuyen significativamente al *MPS insoluble* en la Estación Cancha Carbón (promedio dos meses 45,3%) y con porcentajes muy bajos en la Estación MPS Alto y MPS Bajo (promedio dos meses: 2,5% y 2,2%, respectivamente).

- Las partículas metálicas aportan al *MPS insoluble* en porcentaje más alto en las estaciones Galo Herrera y MPS Bajo (promedio dos meses: 11,1% y 7,4%, respectivamente) y más bajos en Cancha Carbón y MPS Alto (promedio dos meses: 6,2% y 6,0%, respectivamente).
- Los restos vegetales presentan un porcentaje comparativamente más alto en la estación Cancha Carbón y Galo Herrera (promedio dos meses: 7,1% y 4,4%) y porcentajes más bajos en MPS Alto y MPS Bajo (promedio dos meses: 2,5% y 1,7%, respectivamente).

6.4 Tasa de Sedimentación del MPS insoluble

En la Tabla 8 se presentan las variables utilizadas para el cálculo de la Tasa de Sedimentación del MPS Insoluble en cada una de las 4 Estaciones durante el período octubre a diciembre 2022. Nótese la diferencia que se establece entre la Tasa de Sedimentación calculada utilizando el número de días de acumulación efectiva (columna A) y la Tasa de Sedimentación normalizada a mes de 30 días (columna B). La Tasa de Sedimentación diaria (Columna C) se ha calculado sobre la base del número días efectivos de acumulación del MPS.

				A	B	C
Fecha de Inicio	Fecha Final	Estación	Período de Muestreo en días efectivos	Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m ² /mes efectivo)	Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m ² /mes 30 días)	Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m ² /día efectivo)
13-10-22	17-11-22	Cancha Carbon	35	10801,321	9258,3	308,609
27-10-22	17-11-22	Galo Herrera	21	3116,822	4452,6	148,420
13-10-22	11-11-22	MPS Bajo	29	2694,811	2787,7	92,925
13-10-22	11-11-22	MPS Alto	29	4352,564	4502,7	150,088
17-11-22	16-12-22	Cancha Carbon	29	13117,761	13570,1	452,337
17-11-22	16-12-22	Galo Herrera	29	2521,284	2608,2	86,941
11-11-22	09-12-22	MPS Bajo	28	1673,155	1792,7	59,756
11-11-22	09-12-22	MPS Alto	28	2540,793	2722,3	90,743
		PROMEDIO 2 MESES		Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m ² /mes efectivo)	Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m ² /mes 30 días)	Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m ² /día efectivo)
		Cancha Carbon		11959,541	11414,186	380,473
		Galo Herrera		2819,053	3530,414	117,680
		MPS Bajo		2183,983	2290,201	76,340
		MPS Alto		3446,679	3612,465	120,416

Tabla 8 Tasa de Sedimentación de MPS Insoluble mensual y diaria en el período octubre-diciembre 2022.

Considerando los valores diarios de la Tasa de Sedimentación del MPS insoluble, se destaca que:

- En el período octubre-noviembre (mes 5) se registra un incremento (46%) de la Tasa de Sedimentación del MPS insoluble solamente en la Estación Cancha Carbón.
- Los valores promedio (2 meses) de la Tasa de Sedimentación diaria del MPS insoluble, indican que el mayor valor promedio se registra en la Estación Cancha Carbón (380,473 mg/m²/día efectivo), el cual decrece 5 veces en la Estación MPS Bajo, donde se registra en menor valor.

7 RESULTADOS REFERIDOS AL COMPONENTE CARBÓN DEL MPS INSOLUBLE

Esta sección hace referencia en particular al componente “carbón” del MPS Insoluble, dado que constituye la variable principal del monitoreo estipulado en la Resolución 0045/22 del SRMS que rige el estudio.

Como se indicó en la sección anterior (ver Tabla 5, 6 y 7), el carbón es el segundo componente más abundante en el MPS insoluble.

7.1 Masa, porcentaje y tamaño de partículas de carbón

La masa de carbón es significativamente más alta en la Estación Cancha Carbón, con un valor promedio (2 meses) de 0,707 g, el cual disminuye en 18,6 veces en la Estación Galo Herrera (ubicada 150 m al NNE-SSW), en 70,7 veces en la Estación MPS Bajo (ubicada a 275 m al NNW-SSE de la Estación Cancha Carbón) y en 141,4 veces en la Estación MPS Alto (ubicada a 475 m al NNE-SSW de la E. Cancha Carbón (Figura 4).

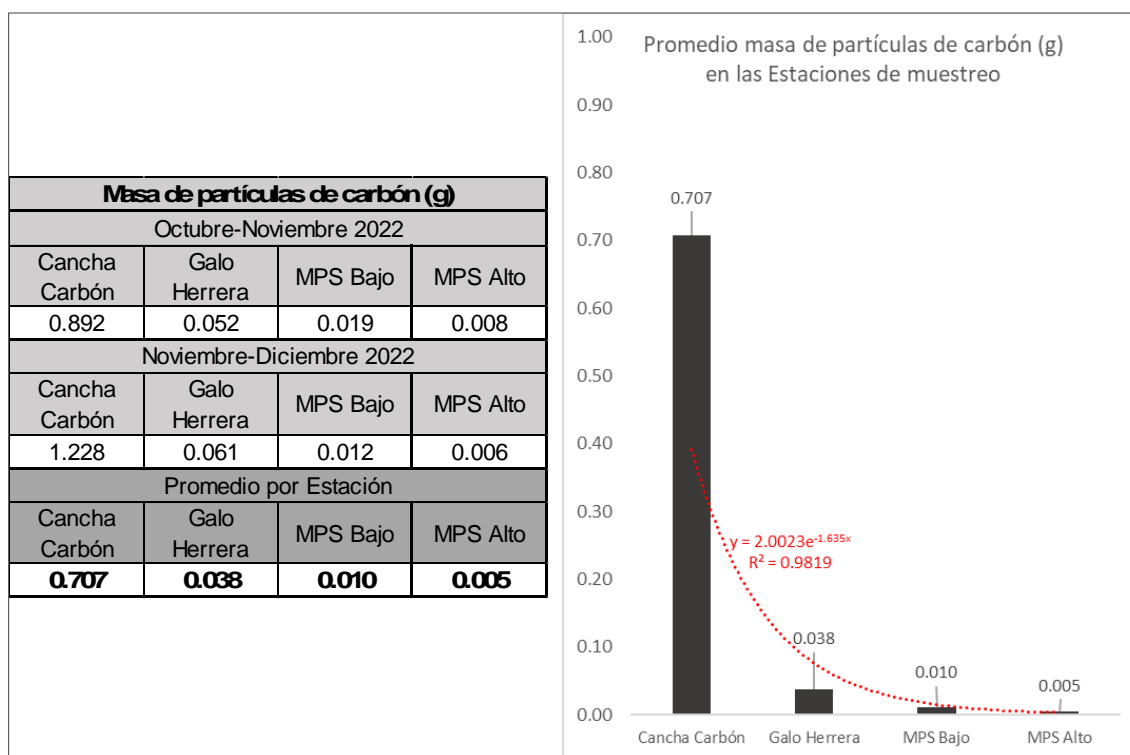


Figura 4 Masa de carbón registrada en las 4 estaciones y variabilidad en el período octubre-diciembre de 2022

En la Tabla 9 se presenta el porcentaje en masa de carbón, respecto del MPS insoluble, para cada Estación por mes de monitoreo, además del porcentaje en masa promedio (2 meses) para cada Estación.

Porcentaje (% en masa) del carbón	Octubre-Noviembre 2022				Noviembre-Diciembre 2022			
	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto
	42,41	8,60	0,91	3,63	48,13	12,37	3,57	1,29
				Promedio por estación	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto
					45,27	10,49	2,24	2,46

Tabla 9 Porcentaje (en masa) del carbón en el MPS Insoluble en las 4 Estaciones en el período octubre-diciembre de 2022

La Tabla 10 contiene los valores del tamaño máximo y mínimo (micrones) de las partículas de carbón para las 4 Estaciones durante los 2 meses de monitoreo del período octubre-diciembre 2022. El mayor tamaño máximo promedio se registra en la Estación Cancha Carbón (295,1 μm) y el menor tamaño máximo promedio (59,5 μm) se registra en la Estación MPS Alto, la más alejada de la cancha de acopio de carbones utilizados en el Complejo Termoeléctrico Ventanas.

		Rango de tamaño (Min-Max) de Partículas de Carbón (μm)		Promedio Tamaño Máximo de Partículas de Carbón (μm)
Periodo octubre-noviembre2022	Cancha Carbón	12,7	314,8	295,1
Periodo noviembre-diciembre2022		11,9	275,5	
Periodo octubre-noviembre2022	Galo Herrera	14,9	166,1	155,8
Periodo noviembre-diciembre2022		20,1	145,5	
Periodo octubre-noviembre2022	MPS Bajo	22,5	246,7	161,2
Periodo noviembre-diciembre2022		23,3	75,6	
Periodo octubre-noviembre2022	MPS Alto	19,5	66,1	59,5
Periodo noviembre-diciembre2022		9,9	52,9	

Tabla 10 Tamaño mínimo y máximo (en micrones) de las partículas de carbón en el período octubre-diciembre de 2022

7.2 Tasa de Sedimentación del Carbón

En la Tabla 11 se indica la Tasa de Sedimentación del Carbón diaria, calculada sobre la base de los días efectivos de acumulación en los colectores pasivos de las 4 Estaciones en los 2 meses de monitoreo del período octubre-diciembre 2022.

8 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

8.1 Componentes antrópicos y su proporción en el MPS

Los 4 colectores pasivos de MPS están emplazados en, o cerca de las instalaciones del Complejo Termoeléctrico Ventanas de propiedad de AES Andes. En las cercanías existen además numerosas instalaciones industriales.

En la Figura 5 se representan gráficamente los componentes del MPS Insoluble en cada Estación, por mes de monitoreo. Como se observa, el componente prioritario del MPS corresponde a residuos de combustión industrial de carbón. En segundo componente es el carbón, el cual tiene mayor presencia en la Estación Cancha Carbón y Estación Galo Herrera, disminuyendo drásticamente su presencia en las Estaciones MPS Bajo y MPS Alto, las más alejadas de los sectores donde se acopia o transporta carbón.



Figura 5 Evolución porcentual (% en masa) de los componentes del MPS Insoluble en las 4 Estaciones. Período octubre-diciembre de 2022

En orden de participación en el MPS, los 3 componentes antrópicos corresponden a:

- Residuos de Combustión: provienen de la actividad industrial del CTC con sus actuales 3 centrales termoeléctricas a carbón. El aporte al MPS insoluble es significativamente más alto en las Estaciones MPS Bajo y Alto y considerablemente menor en la Estación Cancha Carbón.
- Partículas de carbón: corresponden a polvo movilizado por el viento desde los lugares de transporte y acopio del carbón utilizado en la alimentación de las 3 centrales. El aporte al MPS insoluble es mayor en la Estación Cancha Carbón y disminuye significativamente en las otras 3 estaciones, particularmente en las estaciones MPS Bajo y MPS Alto.
- Partículas metálicas: dada su composición mineralógica provienen probablemente de los lugares de acopio de concentrado de cobre. La mayor participación porcentual se registra en la E. Galo Herrera.

8.2 Tasa de Sedimentación del MPS total

Tradicionalmente, el MPS ha sido monitoreado gravimétricamente utilizando colectores pasivos. Hay una amplia variedad de colectores en uso en todo el mundo (cuencos, cilindros o embudos horizontales de boca abierta) que, por lo general operan con recolección del MPS mensual. La Tasa de Sedimentación de sólidos no disueltos (MPS Insoluble), aunque a veces también se incluyen los sólidos disueltos (MPS Soluble), se puede expresar por día ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$), por mes de 30 días ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{mes}$) o por año ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{año}$). Considerando que a menudo las condiciones operativas de las fuentes de origen son episódicas, o bien ocurren condiciones meteorológicas anormales o ambas, la expresión de la Tasa de Sedimentación anual se considera más representativa.

Con el fin de gestionar y minimizar los efectos adversos de las partículas sedimentables (MPS), varios países, entre ellos Chile, han establecido los estándares máximos permitidos. Estos estándares varían según el país y, a veces, el estado, como ocurre en Estados Unidos, Canadá y Brasil. La Tabla 14 (tomada de Vallack & Shillito, 1998) resume los umbrales estándar establecidos por Agencias Ambientales en países europeos, América del Norte y Argentina.

2738 H. W. VALLACK and D. E. SHILLITO

Table 1. Examples of dust deposition standards outside the U.K. (as $\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

Argentina	Annual average	333
Australia (W. Australia)	Loss of amenity first perceived	133
	Unacceptable reduction in air quality	333
Canada		
Alberta	Annual average	180
Manitoba	Annual average	153
	(maximum acceptable)	266
	(maximum desirable)	200
Newfoundland	Annual average	153
	Monthly average	233
Ontario	Annual average	170
	Monthly average	200
Finland	Annual average	333
Germany	Long-term average	350*
	Short-term average	650*
Spain	Annual average	200
U.S.A.		
Kentucky	Annual average	196
Louisiana	Annual average	262
Maryland	Annual average	183
Mississippi	Monthly average (above background)	175
Montana	Annual average (residential areas)	196
New York	During any 12 months no more than	
	5% of 30 d values to exceed	100
	and 84% to be below	130
North Dakota	3 Monthly average	196
Pennsylvania	Annual average	267
	Monthly average	500
Washington	Annual average	183
Wyoming	Monthly average	170

* Combined weight of dissolved and undissolved deposits.

Tabla 12 Ejemplos de valores límites de Tasa de Sedimentación de MPS ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$)

En el caso de Brasil, existe una norma del Estado de Minas Gerais (COPAM N°1/81) para áreas industrializadas que fija el valor límite en $10 \text{ g}/\text{m}^2/\text{mes}$, que corresponde a $333 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{día}$. En un trabajo relativamente reciente, Santos et al. (2017), estudian diferentes áreas industriales de estados brasileños (Minas Gerais, Río de Janeiro, Amapá y Vitoria) validando ese valor límite.

Chile no dispone de norma primaria para material particulado sedimentable MPS, por lo que se acostumbra utilizar como referencia el nivel límite definido en la norma secundaria por la cual se rige la Tercera Región (Cuenca del Río Huasco). Es una norma de calidad de aire en lo que respecta a polvo sedimentable, publicada en el D. E. N°4/1992 del Ministerio de Agricultura, que fija como Tasa de Sedimentación límite diaria el valor $150 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{día}$ como concentración media aritmética mensual, o bien $100 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{día}$ como concentración media aritmética anual.

En la Tabla 13 se resume la información de la Tasa de Sedimentación diaria ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$ efectivo) del MPS soluble, insoluble y total para las 4 Estaciones en los 2 meses de monitoreo (mes 5 y 6) del período octubre-diciembre 2022.

Fecha de Inicio	Fecha Final	Estación	Período de Muestreo en días efectivos	Tasa de Sedimentación MPS soluble ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$ efectivo)	Tasa de Sedimentación MPS insoluble ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$ efectivo)	Tasa de Sedimentación MPS total ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$ efectivo)
13-10-22	17-11-22	Cancha Carbon	35	34,397	308,609	343,007
27-10-22	17-11-22	Galo Herrera	21	21,367	148,420	169,787
13-10-22	11-11-22	MPS Bajo	29	16,765	92,925	109,690
13-10-22	11-11-22	MPS Alto	29	17,066	150,088	167,154
17-11-22	16-12-22	Cancha Carbon	29	58,598	452,337	510,934
17-11-22	16-12-22	Galo Herrera	29	33,087	86,941	120,028
11-11-22	09-12-22	MPS Bajo	28	17,107	59,756	76,863
11-11-22	09-12-22	MPS Alto	28	22,278	90,743	113,020

Tabla 13 Tasa de Sedimentación diaria de MPS soluble, insoluble y total en los 2 meses de monitoreo. Período octubre-diciembre 2022

En la Figura 6 se indican los valores de la Tasa de Sedimentación mensual ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{mes}$) y diaria ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$ efectivo) para el MPS Soluble, Insoluble y Total en las 4 Estaciones, durante los 2 meses de monitoreo del período octubre-diciembre 2022. Las líneas rojas expresan:

- valor máximo mensual (mes 30 días) y diario de $150 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{día}$ indicado en el D.E. N°4/1992 (cuenca Río Huasco).
- Valor máximo mensual (mes 30 días) y diario de $333 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{día}$ estipulado en la norma brasileña para áreas industriales COPAM N° 1/81.

Considerando la Tasa de sedimentación diaria del MPS Total (Figura 6, derecha):

- 1) Las estaciones que sobrepasan el límite de $150 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{día}$ indicado en la norma Cuenca del Río Huasco (D.E. N°4/92) son:
 - Estación Cancha Carbón en los 2 meses de monitoreo del período octubre-diciembre 2022.
 - Estación Galo Herrera en el período octubre-noviembre 2022.
 - Estación MPS Alto en el período octubre-noviembre 2022.
 -
- 2) Las estaciones que sobrepasan el límite de $333 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{día}$ indicado en la norma brasileña COPAM N° 1/81 para áreas industrializadas son:
 - Estación Cancha Carbón en los 2 meses de monitoreo del período octubre-diciembre 2022.

Al respecto, se hace notar que la Estación Cancha Carbón se ubica “dentro” de un área industrial por tanto no debería sorprender que sobrepase la norma brasileña.

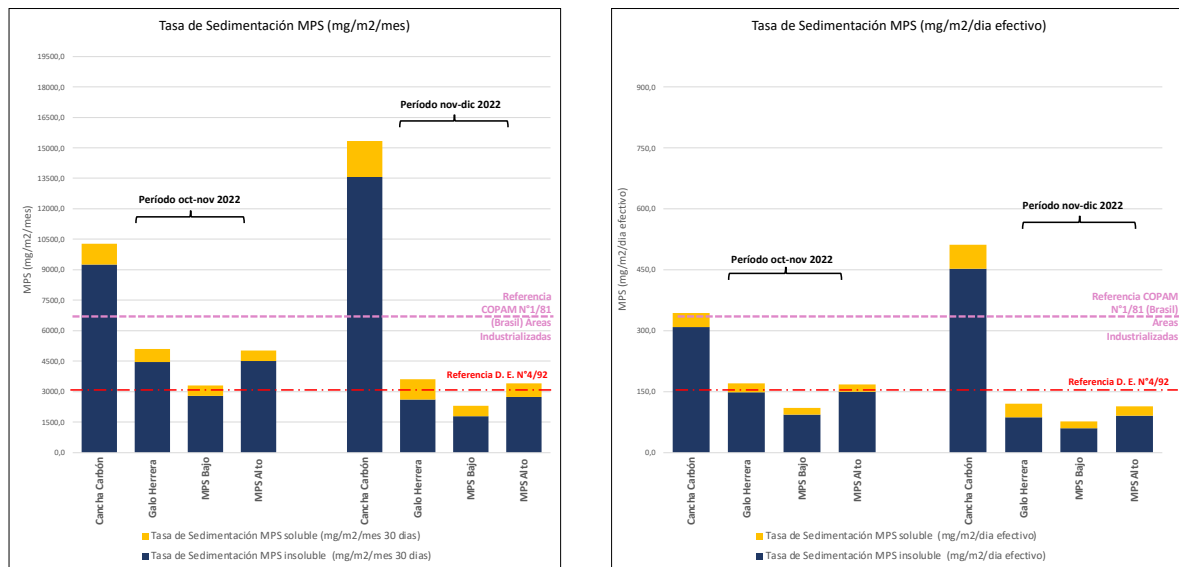


Figura 6 Tasa de Sedimentación mensual y diaria del MPS en las 4 Estaciones. Período octubre-diciembre 2022

8.3 Tasa de Sedimentación del Carbón

En el área monitoreada, como es evidente y esperable, el mayor contenido de carbón se registra en la Estación Cancha Carbón, lugar de acopio y movimiento de los carbones que serán utilizados en la el proceso de termo-generación del CTC y muy probablemente, lugar de origen de las partículas

de carbón (menores de 1mm de diámetro) que forman parte del MPS insoluble. La Estación Cancha Carbón está ubicada dentro de la dependencia del mismo nombre, adyacente a la malla deflectora que protege los sectores externos de la dispersión de partículas de carbón desde la cancha de acopio.

Como se aprecia en el gráfico de la Figura 7, la Tasa de Sedimentación del Carbón en la Estación Cancha Carbón supera el valor máximo diario permitido para la cuenca del Río Huasco (D.E N° 4/91) solo en el mes noviembre-diciembre. La Tasa de Sedimentación del Carbón en la Estación Cancha Carbón está por debajo del límite aceptado para áreas industriales de la norma brasileña COPAM N°1/81 en los 2 meses de monitoreo del período octubre-diciembre 2022.

En las restantes 3 Estaciones, Galo Herrera, MPS Bajo y MPS Alto, ubicadas a una distancia de 150 m, 275 m y 475 m, respectivamente, de la Estación Cancha de Carbón, las Tasas de Sedimentación de carbón son considerablemente menores (Figura 7) en los 2 meses de monitoreo que el límite diario de 150 mg/m²/día que precisa el D.E. 4/91 del Ministerio de Agricultura (norma Cuenca del Río Huasco).

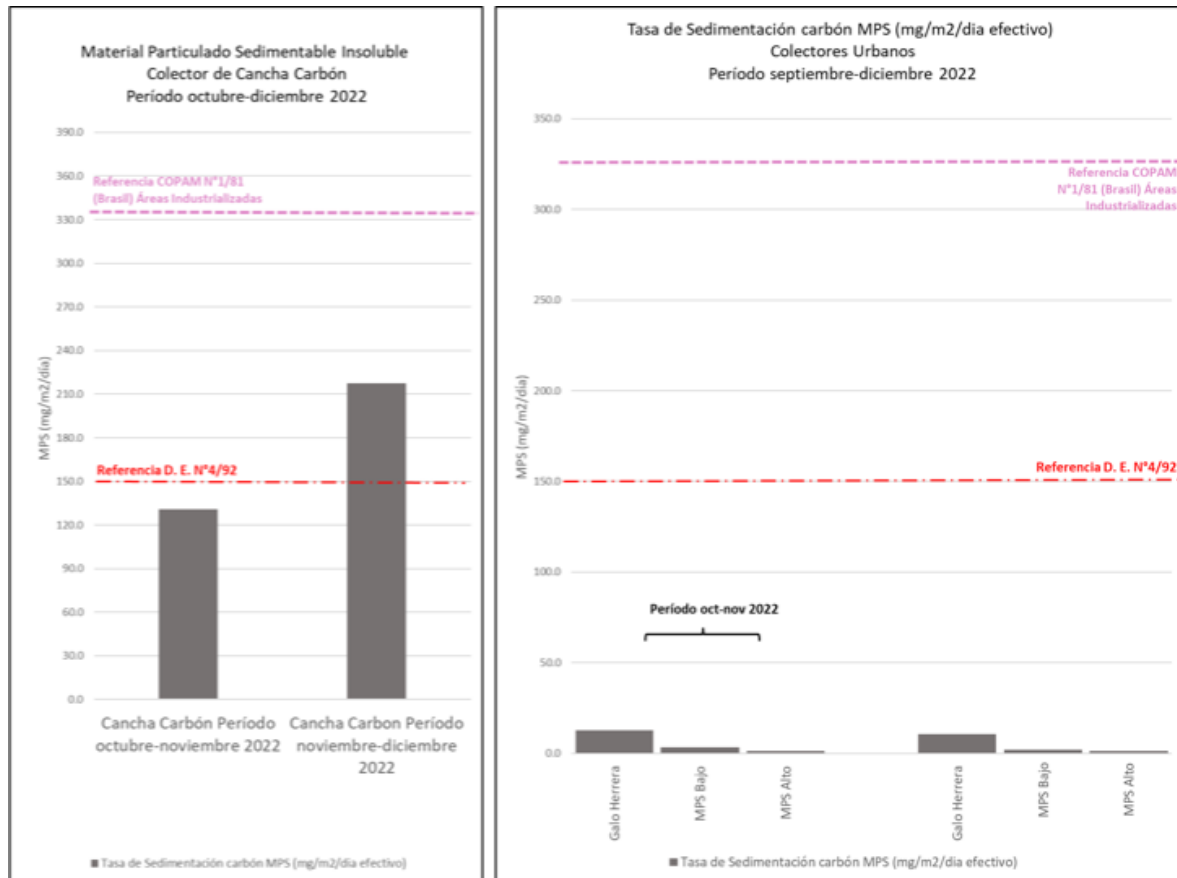


Figura 7 Tasa Sedimentación Carbón diaria en las 4 Estaciones. Periodo octubre-diciembre 2022)

Considerando el promedio de la Tasa de Sedimentación del Carbón diaria registrada en la Estación Cancha Carbón (promedio: 116,082 mg/m²/día efectivo), se constata una significativa reducción de ésta, del orden de 14,8 veces en la Estación Galo Herrera, 63,2 veces en la Estación MPS Bajo y 137,5 veces en la Estación MPS Alto. Como las Estaciones Galo Herrera, MPS Bajo y MPS Alto están

ubicadas a una distancia de 150 m, 275 m y 475 m, respectivamente, de la Estación Cancha de Carbón, se concluye que la disminución está determinada por la efectividad de las medidas de control de la dispersión de las partículas de carbón, adoptadas por AES-Andes.

9 CONCLUSIONES

9.1 Tasa de Sedimentación MPS Total

- 1) Los valores más altos de Tasa de Sedimentación mensual en los 2 meses de monitoreo (mes 5 y 6) del período noviembre-diciembre 2022 se registran en la Estación Cancha Carbón.
- 2) La Tasa de Sedimentación diaria del MPS total supera el valor límite de 150 mg/m² /día que precisa la norma secundaria para la Cuenca del Río Huasco (D.E. N°4/92) en:
 - Estación Cancha Carbón en los 2 meses monitoreados (noviembre-diciembre 2022)
 - Estación Galo Herrera noviembre (mes 5).
 - Estación MPS Alto en el período noviembre (mes 5).

9.2 Tasa de Sedimentación diaria del MPS soluble

El mayor valor promedio se registra en la Estación Cancha Carbón (46,498 mg/m²/día efectivo), el cual se reduce en 1,7 veces en la Estación Galo Herrera, en 2,4 veces en la Estación MPS Alto y en 2,7 veces en la Estación MPS Bajo.

9.3 Granulometría MPS Insoluble

El tamaño mínimo promedio de las partículas es relativamente uniforme en todas las Estaciones (promedio 0,315 µm). Con relación al tamaño máximo, los valores promedio por estación permiten constatar una reducción sostenida del tamaño en función de la lejanía a la Estación Cancha Carbón. Así, la reducción del tamaño máximo es de 1,6 veces en la Estación Galo Herrera, 1,5 veces en la Estación MPS Bajo y 2,8 veces en la Estación MPS Alto.

9.4 Componentes del MPS insoluble

- 1) Mayoritariamente está compuesto de partículas antrópicas. Componentes naturales, como restos de vegetales, representan solo entre 1,7% a 7,1% del MPS Insoluble (valores promedio 2 meses).
- 2) Los residuos de combustión son el principal componente del MPS en todas las Estaciones. La Estación MPS Alto presenta el porcentaje promedio más alto de residuos de combustión (89,1%), seguido de la Estación MPS Bajo (88,6%), Galo Herrera (74,0%) y Cancha Carbón (41,4%).
- 3) El carbón es el segundo componente más abundante del MPS insoluble. El porcentaje promedio fluctúa entre 45,3% en la Estación Cancha Carbón y 2,2% en la Estación MPS Bajo.
 - Partículas metálicas del tipo sulfuros de Cu-Fe y Sulfuros de Cu aportan al *MPS insoluble* en porcentaje más alto en las estaciones Galo Herrera y MPS Bajo (promedio dos meses: 11,1% y 7,4%, respectivamente) y más bajos en Cancha Carbón y MPS Alto (promedio dos meses: 6,2% y 6,0%, respectivamente).

9.5 Tasa de Sedimentación del MPS insoluble

- 1) Considerando el valor promedio para los dos meses de monitoreo (período octubre-noviembre y noviembre-diciembre), la mayor tasa diaria se registra en la Estación Cancha Carbón (380,473 mg/m²/día efectivo), el cual decrece 5 veces en la Estación MPS Bajo, donde se registra en menor valor.

9.6 Tasa de Sedimentación del MPS total

- 1) El límite diario de 150 mg/m²/día indicado en la norma Cuenca del Río Huasco (D.E. N°4/92) es sobrepasado en las estaciones Estación Cancha Carbón en los 2 meses de monitoreo y en las Estaciones Galo Herrera y Estación MPS Alto en el período octubre-noviembre 2022.

9.7 Carbón en el MPS

- 1) Respecto al MPS insoluble, el porcentaje promedio de carbón en los 2 meses de monitoreo es significativamente más alto en la Estación Cancha Carbón (47%), disminuyendo de manera sostenida a medida que aumenta la distancia a las instalaciones del CTV: 4,3 veces en Estación Galo Herrera, 20,2 veces en Estación MPS Bajo y 18,4 veces en la Estación MPS Alto.
- 2) El tamaño máximo promedio (dos meses) de las partículas de carbón es mayor en la Estación Cancha Carbón (295,1 µm), disminuyendo sostenidamente en función de la lejanía a la Estación Cancha Carbón: 1,9 veces en Estación Galo Herrera, 1,8 veces en Estación MPS Bajo y 5 veces en Estación MPS Alto.

9.8 Tasa de Sedimentación del Carbón

- 1) La Tasa de Sedimentación del Carbón sobrepasa el límite diario de 150 mg/m²/día (norma secundaria del Río Huasco, D.E. N°4/92) solamente en la Estación Cancha Carbón en el período noviembre-diciembre (mes 6). En el resto de la Estaciones, la Tasa de Sedimentación del Carbón es considerablemente más baja que el límite diario máximo, disminuyendo progresivamente a medida que aumenta la distancia a las canchas de carbón.
- 2) Considerando el promedio de la Tasa de Sedimentación del Carbón diaria registrada en la Estación Cancha Carbón, (116,082 mg/m²/día) se constata una significativa reducción de ésta, del orden de 14,8 veces en la Estación Galo Herrera, de 63,3 veces en la Estación MPS Bajo y de 137,5 veces en la Estación MPS Alto.

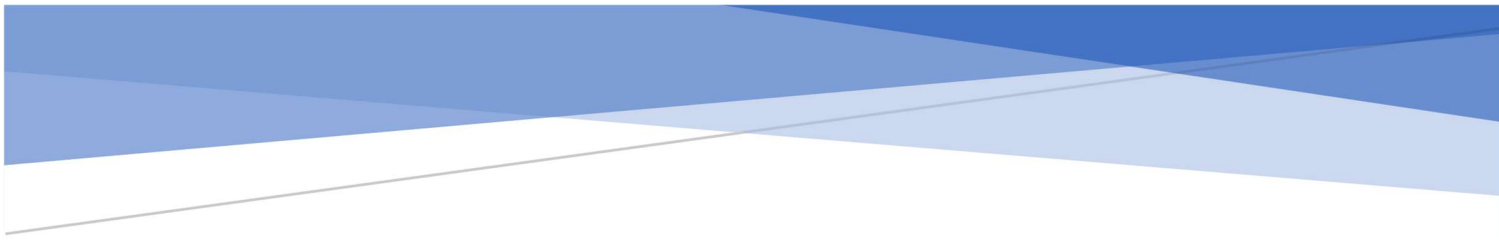
En conclusión, como las Estaciones Galo Herrera, MPS Bajo y MPS Alto están ubicadas a una distancia de 150 m, 275 m y 475 m, respectivamente, de la Estación Cancha de Carbón, los resultados respecto a la *variable carbón* del MPS permiten constatar una relación directa entre la distancia a la fuente de origen de las partículas de carbón y la disminución del tamaño de partículas, del porcentaje de carbón en el MPS y de las Tasas de Sedimentación de Carbón. Se concluye, entonces, que las medidas de control de la dispersión de las partículas de carbón, adoptadas por AES-Andes son efectivas.

10 Referencias

- D. N°4/1992 Exento del Ministerio de Agricultura. Normas de Calidad del Aire para Material Particulado Sedimentable en la Cuenca del Río Huasco III Región.
- Feng, S. & Li, Y. Study on coal fly ash classified by bulk density. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1732 012127. doi.org/10.1088/1742-6596/1732/1/012127.
- D.E. N°223/2015 del Ministerio del Medio Ambiente, Instrucciones Generales sobre la Elaboración del Plan de Seguimiento de Variables Medioambientales.
- Minerals Densities. The Engineering Toolbox (www.engineeringtoolbox.com)
- Saiah, R., Perrin, B. & Rigal, L. 2010. Improvement of thermal properties of fires clays by introduction of vegetable matter. *J. Building Physics*, 34 (2): 124-142. doi.org/10.1177/1744259109360059.
- Santos, J.M. Reis, N.C., Galvão E.S., Silveira, A., Goulart, E. V. & Lima, A. T. 2017. Source apportionment of settleable particles in an impacted urban and industrialized region in Brazil. *Environ Sci Pollut Res* 4(27): 22026-22039.
- Severin, K. 2004. Energy Dispersive Spectrometry of Common Rock Forming Minerals. Kluwer Acad. Pu. 219 p.
- Suarez-Ruiz, I. et al. (2017) Development of a petrographic classification of fly-ash components from coal combustion and co-combustion. (An ICCP Classification System, Fly-Ash Working Group – Commission III.). *Inter. Jour. Coal Geology*, 183: 188-203.
- Valentim, et al. 2018. Undifferentiated Inorganics in Coal Fly Ash and Bottom Ash: Calciphères, magnesiocalciphères and Magnesiaspheres. *Minerals* 2018, 8, 140; doi:10.3390/min8040140.
- Vallack, H. W. & Shillito, D. E. 1998. Suggested guidelines for deposited ambient dust. *Atmospheric Environment* Vol. 32 (16,): 737—2744.
- Wood, G., Kehn T., Carter, D. & Culberston, W. Coal Resource Classification System of the US Geological Survey. Geological Survey Circular 891. <http://pubs.usgs.gov/circ/c891/table2.htm>



Dra. María Eugenia Cisternas S.
Geóloga-Mineralogista
GEO-FORENSIC SpA
18 abril 2023



INFORME DE CARACTERIZACION INTEGRAL DEL MPS
COLECTADO EN 4 ESTACIONES CON COLECTORES
PASIVOS (CANCHA CARBÓN, GALO HERRERA, MPS
BAJO Y MPS ALTO) EN O CERCA DE LAS
INSTALACIONES DEL COMPLEJO TERMoeLECTRICO
VENTANAS DE AES-ANDES. PUCHUNVAVI, 5° REGION,
CHILE

Dra. María Eugenia Cisternas S

Fecha Informe: 22 noviembre

María Eugenia Cisternas
mecisternas@geo-forensic.com; mecistern@gmail.com

Tabla de contenido

RESUMEN EJECUTIVO	3
1 INTRODUCCIÓN	5
2 OBJETIVOS	7
3 METODOLOGÍA DE MUESTREO Y ANÁLISIS DEL MPS	8
3.1 INSTALACIÓN DE COLECTORES PASIVOS Y RECOLECCIÓN DE MUESTRAS.....	8
3.2 REMOCIÓN DEL MPS DESDE LAS BOTELLAS, DETERMINACIÓN DE LA MASA DEL MPS TOTAL, SOLUBLE E INSOLUBLE.....	9
3.3 ESTUDIO COMPOSICIONAL DEL MPS INSOLUBLE Y CUANTIFICACIÓN DE LA FRACCIÓN CORRESPONDIENTE A CARBÓN.....	9
4 MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS.....	9
4.1 CARACTERIZACIÓN GRANULOMÉTRICA DEL MPS	9
4.2 IDENTIFICACIÓN DE COMPONENTES DEL MPS INSOLUBLE MEDIANTE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA (SEM/EDS)	9
4.3 DETERMINACIÓN PORCENTUAL DE TIPOS DE PARTÍCULAS ANTRÓPICAS EN EL MPS.....	11
5 RESULTADOS MPS SOLUBLE, INSOLUBLE Y TOTAL	12
5.1 MASA DE MPS SOLUBLE, INSOLUBLE Y TOTAL	12
5.2 MASA MPS SOLUBLE Y TASA DE CONCENTRACIÓN	12
5.3 TASA DE SEDIMENTACIÓN MPS SOLUBLE, INSOLUBLE Y TOTAL.....	13
6 RESULTADOS MPS INSOLUBLE	15
6.1 GRANULOMETRÍA DE MPS INSOLUBLE RECOLECTADO EN CADA ESTACIÓN DE MONITOREO.....	15
6.2 COMPOSICIÓN DEL <i>MPS INSOLUBLE</i>	15
6.3 MASA Y PORCENTAJE EN MASA DE LOS COMPONENTES DEL <i>MPS INSOLUBLE</i>	17
6.4 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL PMS INSOLUBLE.....	19
7 RESULTADOS REFERIDOS AL COMPONENTE CARBÓN DEL MPS INSOLUBLE	20
7.1 CARBÓN: MASA, PORCENTAJE Y TAMAÑO DE PARTÍCULAS.....	20
7.2 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL CARBÓN	21
8 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	23
8.1 COMPONENTES ANTRÓPICOS Y SU PROPORCIÓN EN EL MPS.....	23
8.2 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL MPS INSOLUBLE	24
8.3 TASA DE SEDIMENTACIÓN DE CARBÓN	26
9 CONCLUSIONES.....	28
9.1 TASA DE SEDIMENTACIÓN MPS TOTAL.....	28
9.2 GRANULOMETRÍA MPS INSOLUBLE	28
9.3 COMPONENTES DEL MPS INSOLUBLE	28
9.4 CARBÓN EN EL MPS	29
9.5 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL CARBÓN.....	29
10 REFERENCIAS	30

LISTA DE TABLAS

TABLA 1 MPS SOLUBLE, INSOLUBLE Y TOTAL (MG) EN LAS 4 ESTACIONES DURANTE LOS 3 MESES DE MONITOREO	12
TABLA 2 VARIACIÓN TASA DE SEDIMENTACIÓN MENSUAL (MPS INSOLUBLE, SOLUBLE Y TOTAL) EFECTIVA Y NORMALIZADA A 30 DÍAS	14
TABLA 3 TASA DE SEDIMENTACIÓN DIARIA (MPS INSOLUBLE, SOLUBLE Y TOTAL) CALCULADA POR DÍA EFECTIVO	14
TABLA 4 TAMAÑO MÍN. Y MÁX. DE PARTÍCULAS EN LAS 4 ESTACIONES POR MES DE MONITOREO	15
TABLA 5 MASA POR TIPO DE PARTÍCULA EN LAS 4 ESTACIONES, EN LOS 3 MESES DE MONITOREO	18
TABLA 6 PORCENTAJE EN MASA POR TIPO DE PARTÍCULA EN LAS 4 ESTACIONES, EN LOS 3 MESES DE MONITOREO	18
TABLA 7 MASA Y PORCENTAJE PROMEDIO (3 MESES) DE COMPONENTES EN MPS INSOLUBLE	18
TABLA 8 TASA DE SEDIMENTACIÓN DE MPS INSOLUBLE EXPRESADA EN MG/M ² /MES Y MG/M ² /DÍA	19
TABLA 9 PORCENTAJES (EN MASA) DEL CARBÓN EN EL MPS INSOLUBLE	20
TABLA 10 TAMAÑO MÍNIMO Y MÁXIMO (EN MICRONES) DE LAS PARTÍCULAS DE CARBÓN.....	21
TABLA 11 TASA SEDIMENTACIÓN CARBÓN EN LAS 4 ESTACIONES Y SU VARIACIÓN EN LOS 3 MESES DE MONITOREO	22
TABLA 12 VALORES LÍMITES DE TASA DE SEDIMENTACIÓN DE MPS (MG/M ² /DÍA)	25

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 UBICACIÓN ESPACIAL SOBRE IMAGEN GOOGLE EARTH DE LAS 4 ESTACIONES DE MONITOREO	5
FIGURA 2 MODELO DE COLECTOR PASIVO INSTALADO EN 4 ESTACIONES DEL CTV.....	8
FIGURA 3 CONCENTRACIÓN (G/L) COMPARADA DEL MPS SOLUBLE EN LAS 4 ESTACIONES DURANTE LOS 3 MESES DE MONITOREO	13
FIGURA 4 MASA DE CARBÓN REGISTRADA EN LAS 4 ESTACIONES Y VARIABILIDAD EN EL PERÍODO DE 3 MESES.....	20
FIGURA 5 EVOLUCIÓN PORCENTUAL (% EN MASA) DE LOS COMPONENTES DEL MPS INSOLUBLE EN LAS 4 ESTACIONES EN LOS 3 MESES DE MONITOREO.....	23
FIGURA 6 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL MPS (SOLUBLE, INSOLUBLE) EN LAS 4 ESTACIONES EN LOS 3 MESES DE MONITOREO ...	26
FIGURA 7 TASA SEDIMENTACIÓN CARBÓN EN LAS 4 ESTACIONES Y SU VARIACIÓN EN LOS 3 MESES DE MONITOREO COMPARADA CON LÍMITE FIJADO POR D.E. N°4/92	27

LISTA DE LAMINAS

LÁMINA 1. A: IMAGEN SEM/BSE; B: IMAGEN SEM/EDS OBTENIDA MEDIANTE MAPPING DE C, O, AL, SI, FE, CU Y S.....	17
---	----

RESUMEN EJECUTIVO

El presente Informe se enmarca en el Plan de Muestreo de Material Particulado Sedimentable (MPS) de 12 meses de duración, autorizado mediante la Resolución N° 00045 (02 de junio 2022) de la Secretaría Regional Ministerial de Salud (SRMS) de la Región de Valparaíso, cuyo objetivo principal es evaluar la eficacia del Sistema de Control de dispersión de material, específicamente de las partículas de carbón, hacia el exterior del Complejo Termoeléctrico Ventanas.

El Plan de Muestreo considera la caracterización del MPS depositado mensualmente en 4 colectores pasivos durante 1 año, con informes trimestrales de resultados. Los colectores se ubican: 01 al interior de la cancha de carbón (Estación Cancha Carbón), 01 fuera de la cancha, aunque dentro de las dependencias de AES ANDES (Estación Galo Herrera), y 02 ubicados en la comunidad en el sector de la greda bajo (MPS Bajo) y greda alto (MPS Alto)

Las variables ambientales principales consideradas en el Plan de Monitoreo son: 1) el porcentaje de carbón presente en el MPS insoluble; 2) la variación del porcentaje de carbón en las cuatro estaciones; 3) el gradiente de dispersión del carbón desde la cancha de acopio de este material, hacia las 3 otras estaciones.

Este informe presenta los resultados de los 3 primeros meses de monitoreo (mayo-septiembre 2022), referidos a la caracterización del MPS soluble, insoluble y total, con especial énfasis en el componente carbón del MPS.

Las conclusiones de esta primera fase del monitoreo son:

- 1) En el mes 1 se registran los valores más altos de Tasas de Sedimentación de MPS soluble e insoluble en todas las Estaciones, con decrecimiento sostenido en los dos meses siguientes. En particular, en la Estación Cancha Carbón, se registra una Tasa de Sedimentación muy alta que no se condice con los valores obtenidos en los otros 2 meses.
- 2) En la Estación Cancha Carbón (en los 3 meses) y en la Estación MPS Alto en el mes, 1 la Tasa de Sedimentación del MPS total supera el valor límite de 150 mg/m² /día que precisa la norma para la Cuenca del Río Huasco.
- 3) El MPS insoluble está compuesto mayoritariamente de partículas antrópicas (residuos de combustión de carbón, carbón crudo y partículas metálicas tipo sulfuros de Cu), con componentes naturales (briznas de vegetales) en proporción muy minoritaria (entre 1% a 3,4%).
- 4) El carbón es el segundo componente más abundante del MPS insoluble. El porcentaje promedio de carbón en los 3 meses de monitoreo es significativamente más alto en la Estación Cancha de Carbón (31,28%), disminuyendo de manera sostenida a medida que aumenta la distancia a las instalaciones del CTV: 12,69% en Estación Galo Herrera, 4,56% en Estación MPS Bajo y solo 2,71% en la Estación MPS Alto (disminución de 2,5 veces, 6,7 veces y 11, 5 veces, respectivamente).
- 5) La Tasa de Sedimentación del carbón es extremadamente alta en la Estación Cancha Carbón (418,048 mg/m²/día) en el mes 1 y disminuye drásticamente en 8,6 veces en el mes 2 y 9,5 veces en el mes 3. En las restantes 3 Estaciones, ubicadas a una distancia de 150 m, 275 m y 475 m, respectivamente, de la Estación Cancha de Carbón, las Tasas de Sedimentación de carbón son considerablemente menores, con valor promedio de 9,475 mg/m²/día en la Estación MPS Bajo, 1,421 mg/m²/día en la Estación Galo Herrera y solo 0,292 mg/m²/día en la Estación MPS Alto.

- 6) La Tasa de Sedimentación del carbón sobrepasa el límite diario de $150 \text{ mg/m}^2/\text{día}$ solamente en la Estación Cancha Carbón, en el mes 1. De acuerdo a lo informado por AES-Andes, la explicación posible de esta anomalía estaría relacionada con trabajos de mantención de las mallas protectoras en las cercanías del colector Cancha Carbón.

1 INTRODUCCIÓN

A solicitud de AES-Andes, a través del Departamento Gestión Ambiental Complejo Centro, Geo-Forensic SpA realizará la caracterización integral del Material Particulado Sedimentable (MPS), con particular énfasis en la participación del carbón dispersado desde la cancha de acopio de este material hacia sectores ubicados en las cercanías de las instalaciones de Complejo Termoeléctrico Ventanas (CTV), Comuna de Puchuncaví, Región de Valparaíso. Este estudio se enmarca en un Plan de Muestreo de Material Particulado Sedimentable (MPS) de 12 meses de duración.

El Plan de Muestreo de Material Particulado Sedimentable fue autorizado mediante la Resolución N° 00045 de la Secretaría Regional Ministerial de Salud (SRMS) de la Región de Valparaíso fechada el 02 de junio 2022. Dicha resolución autoriza el *Sistema de control y dispersión de material hacia el exterior de la instalación y su mecanismo de verificación de efectividad de la Cancha de almacenamiento de carbón* del Complejo Termoeléctrico Ventanas, (CTV) propiedad de AES ANDES S.A. El material al que hace referencia corresponde única y exclusivamente al *manejo de carbones Bituminosos y Sub-bituminosos acopiados en la cancha de carbón del CTV*.

En la Figura 1 se señala la ubicación espacial sobre imagen Google Earth de las 4 Estaciones de Monitoreo indicadas en la Resolución N° 00045 del SRMS.



Figura 1 Ubicación espacial sobre imagen Google Earth de las 4 Estaciones de Monitoreo

- Estación Cancha carbón (coordenadas geográficas 267662.17 E; 6373667.19 S), ubicada al interior de la cancha de acopio de carbón, dentro de la pantalla deflectora.
- Estación Galo Herrera, (coordenadas geográficas 267760,87 E y 6373794.17 S) localizada fuera de la cancha, aunque dentro de las dependencias de AES ANDES.
- Estación MPS Bajo (coordenadas geográficas N), 267669 E, 6373931 N) ubicada en la localidad de la greda sector bajo.
- Estación MPS Alto (coordenadas geográficas 267774 E; 6374087 N), ubicada en la localidad de la greda sector alto.

Las Estaciones MPS Alto y MPS bajo están ubicadas en el poblado La Greda.

Las variables ambientales principales consideradas en el Plan de Monitoreo son:

- 1) El porcentaje de carbón presente en el MPS insoluble.
- 2) La variación del porcentaje de carbón en las cuatro estaciones.
- 3) El gradiente de dispersión del carbón desde la cancha de acopio de este material, hacia las 3 otras estaciones del Plan de Muestreo de MPS.

El presente Informe se hace cargo de los resultados obtenidos en las 3 primeras campañas de monitoreo (período del 19 mayo al 09 septiembre del 2022).

2 OBJETIVOS

El Objetivo Principal del Plan de monitoreo es evaluar la eficacia del Sistema de Control de dispersión de material, específicamente de las partículas de carbón, hacia el exterior del Complejo Termoeléctrico Ventanas.

Las principales tareas a desarrollar para cumplir el Objetivo Principal son:

- Monitorear y caracterizar la cantidad de MPS acumulada en cada colector, con indicación de la Tasa de sedimentación del MPS soluble e insoluble.
- Monitorear y caracterizar la cantidad de MPS correspondiente a las partículas de carbón, con indicación de la masa acumulada en cada colector y cálculo de la Tasa de Sedimentación de carbón expresada en $\text{mg}/\text{m}^2/\text{mes}$ y $\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$.
- Determinar la variación espacial y temporal de las Tasas de Sedimentación de carbón, considerando las variaciones en las 4 estaciones y variaciones en el lapso de tiempo considerado entre la instalación y la remoción de los colectores para el período que se informa.

Como Objetivo Secundario se aborda la comparación de las Tasas de Sedimentación del carbón con normas nacionales e internacionales.

Los parámetros que fueron utilizados para caracterizar el estado y evolución de las variables ambientales son:

- Masa soluble total
- Masa insoluble total
- Masa insoluble carbón
- Tasa de Sedimentación del MPS
- Tasa de Sedimentación de carbón

3 METODOLOGÍA DE MUESTREO y ANÁLISIS DEL MPS

El término MPS (*Settleable Particulate Matter*, en inglés) se refiere a cualquier material compuesto de partículas lo suficientemente pequeñas como para pasar a través de una pantalla de 1 mm y lo suficientemente grandes como para depositarse desde el aire, en virtud de su peso, en el contenedor (Norma ASTM D 1739 – 98)¹.

3.1 Instalación de colectores pasivos y recolección de muestras

Para recolectar el Material Particulado Sedimentable se utilizaron colectores pasivos (Figura 2), con un radio de 0,249 m.

La empresa SGS Chile Ltda., fue la responsable de la operación y mantención de los 4 colectores pasivos. El período aconsejado de recolección del MPS es del orden de un 27 a 32 días, sin embargo en condiciones climáticas desfavorables, por ejemplo fuertes lluvias, las botellas de recolección pueden ser removidas y guardadas mientras dura el mal tiempo y, tras esto, recolocadas nuevamente en los colectores.

La instalación de los colectores y la remoción de las botellas está a cargo de la Empresa SGS, quien envía mensualmente las botellas de cada colector al Instituto de Geología Económica (GEA) de la Universidad de Concepción.



Figura 2 Modelo de Colector pasivo instalado en 4 Estaciones del CTV.

¹ Standard Test Method for Collection and Measurement of Dustfall (Settleable Particulate Matter)¹

3.2 Remoción del MPS desde las botellas, determinación de la masa del MPS total, soluble e insoluble

En el Instituto GEA, las botellas colectoras son tratadas con ultrasonido para retirar toda la masa adherida a la superficie interna. Posteriormente, se procede a:

- Determinación de sólidos insolubles: una vez removida toda la masa de las botellas colectoras se procede a la filtración de sólidos, utilizando un filtro de membrana de 0,45 micrones. Posteriormente, los sólidos son secados a 40°C y luego pesados, hasta peso constante.
- Determinación de sólidos solubles: Los sólidos solubles fueron determinados en la solución remanente de la filtración, según la norma ASTM D 1739 – 98.
- Determinar la granulometría de las partículas en la fracción insoluble mediante difracción láser
- Entrega de la fracción insoluble a Geo-Forensic SpA.

3.3 Estudio composicional del MPS Insoluble y cuantificación de la fracción correspondiente a carbón.

Una vez recibidas las muestras de la fracción insoluble del MPS, por parte Geo-Forensic se procede al estudio integral de componentes mediante Microscopía Electrónica (SEM), con énfasis en el estudio del *componente carbón*.

4 MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS

4.1 Caracterización granulométrica del MPS

El análisis granulométrico de la masa total insoluble es realizado por el Instituto de Geología Económica Aplicada (GEA) de la Universidad de Concepción mediante el método de difracción láser en húmedo. El equipo utilizado es un analizador granulométrico láser Fritsch modelo Analysette 22 Microtec Plus. El análisis se realiza en húmedo, con aplicación de ultrasonido para obtener la máxima dispersión de partículas. El equipo posee un rango de medición de 0,08 a 2000 micrones (μm).

4.2 Identificación de componentes del MPS Insoluble mediante microscopía electrónica (SEM/EDS)

Considerando que las partículas del MPS tienen tamaño micrométrico, la caracterización textural y composicional de los diferentes tipos de partículas presentes en el MPS insoluble se realiza mediante microscopio electrónico de barrido (SEM)

El equipo utilizado corresponde a un TSCAN, VEGA III, equipado con detector de electrones retro-dispersados (Modo BSE), detector de electrones secundarios (Modo SE) y detector de rayos x de energía dispersiva (Modo EDS). Este equipo pertenece al Centro de Microscopía Avanzada del Bío-Bío (CMA), ubicado en dependencias de la Universidad de Concepción.

En un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM: Scanning Electron Microscopy por sus siglas en inglés) el bombardeo de electrones sobre la muestra produce varias formas simultáneas de radiación, entre ellas, la emisión de electrones secundarios (SE), electrones retro-dispersados (BSE) y emisión de rayos X. Cada una de esas formas de radiación es capturada por un detector específico.

Detector SE versus detector BSE

La imagen entregada por el SEM se genera por la interacción del haz de electrones que “barre” un área determinada sobre la superficie de la muestra. La detección de los electrones secundarios o retro-dispersados en un gran número de puntos sobre el área barrida, previa transformación electrónica, genera la imagen que se visualiza en una pantalla y es fotografiada mediante una cámara adosada al equipo.

El detector SE es ideal para generar imágenes SEM de alta resolución que permiten obtener detalles de la morfología y textura superficial de las partículas. El detector BSE ofrece una imagen de menor resolución, pero tiene la ventaja de que es sensible a las variaciones en el número atómico de los elementos presentes en la superficie, permitiendo discriminar sobre la imagen partículas de diferente composición.

Cada imagen SEM incorporada en este estudio contiene información impresa de las condiciones de trabajo (voltaje de aceleración de electrones, distancia de trabajo, magnificación) y una escala gráfica que permite identificar el tamaño de las partículas. La intensidad del haz de electrones utilizada fluctuó entre 10 y 12 mV.

Detector EDS para determinación química de componentes

El detector EDS analiza los rayos X generados por el bombardeo de electrones mediante la espectroscopía de rayos X de energía dispersa (EDS por sus siglas en inglés). Permite identificar los elementos presentes en el punto de incidencia del haz de electrones sobre una partícula, o en un área previamente determinada que será barrida por el haz de electrones. Se obtiene así un espectro con los *peaks* de los elementos presentes en el punto de incidencia, con dato del porcentaje elemental o en masa de esos elementos. O bien, si se combina con la detección de electrones retro-dispersados en un área, se obtiene una suerte de “mapa” con la distribución de los elementos presentes en la muestra (herramienta *mapping*).

Los espectros EDS aplicados a los objetivos de este estudio, aportan información invaluable para diferenciar la naturaleza de las partículas sólidas, es decir distinguir carbón crudo, de residuos de combustión, de otras partícula metálicas o bien de partículas vegetales.

Como material de referencia para la identificación de los diferentes tipos de residuos de combustión fueron utilizados los estudios de Suarez -Ruiz et al. 2017² y Valentim et al. 2018³. Para la identificación composicional de fases cristalinas mediante SEM se utilizó el trabajo de Severin, 2004⁴.

Montaje de las muestras para el estudio mediante microscopio electrónico

Las muestras fueron montadas en porta muestras de aluminio de 11 mm de diámetro (pines), recubiertos con cinta adhesiva de doble cara de carbono. El montaje de las partículas se realiza teniendo precaución que éstas no se superpongan entre sí, ya que eso puede afectar el espectro EDS de las partículas de interés. El análisis de las muestras se realizó sin grafitización previa de los porta muestras.

4.3 Determinación porcentual de tipos de partículas antrópicas en el MPS

Para determinar el porcentaje de partículas identificadas en el MPS Insoluble se utiliza un programa digital que emula un contador automático de puntos. Mediante este programa se determinó la relación porcentual relativa, en volumen, de las partículas naturales y antrópicas presentes en las muestras, utilizando para ello 3 imágenes SEM por muestra, obtenidas con el detector BSE a baja magnificación (100x) y alta resolución.

El porcentaje en masa de los componentes fue determinado utilizando valores de densidad promedio para los diferentes tipos de partículas, como se indica a continuación:

Partículas naturales:

- Briznas de vegetales⁵: 1,5 g/cm³

Partículas antrópicas:

- Partículas de carbón⁶: 1,4 g/cm³ (valores fluctúan entre 1,47 y 1,29 g/cm³)
- Residuos de Combustión⁷: 2,5 g/cm³ (valores fluctúan entre 1,9 a 2,9 g/cm³)
- Partículas Metálicas⁸: 5,0 g/cm³ (sulfuros de Cu-Fe: 4,9 g/cm³; Magnetita: 5,2 g/cm³)

² Suarez-Ruiz, I. et al. (2017) Development of a petrographic classification of fly-ash components from coal combustion and co-combustion. (An ICCP Classification System, Fly-Ash Working Group – Commission III.). *Inter. Jour. Coal Geology*, 183: 188-203.

³ Valentim, et al. 2018. Undifferentiated Inorganics in Coal Fly Ash and Bottom Ash: Calciphères, magnesiocalciphères and Magnesiasphères. *Minerals* 2018, 8, 140; doi:10.3390/min8040140.

⁴ Severin, K. 2004. Energy Dispersive Spectrometry of Common Rock Forming Minerals. Kluwer Acad. Pu. 219 p.

⁵ Saiah, R., Perrin, B. & Rigal, L. 2010. Improvement of thermal properties of fires clays by introduction of vegetable matter. *J. Building Physics*, 34 (2): 124-142. doi.org/10.1177/1744259109360059

⁶ Wood, G., Kehn T., Carter, D. & Culberston, W. Coal Resource Classification System of the US Geological Survey. Geological Survey Circular 891. <http://pubs.usgs.gov/circ/c891/table2.htm>

⁷ Feng, S. & Li, Y. Study on coal fly ash classified by bulk density. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1732 012127. doi.org/10.1088/1742-6596/1732/1/012127

⁸ Minerals Densities. The Engineering Toolbox (www.engineeringtoolbox.com)

5 RESULTADOS MPS SOLUBLE, INSOLUBLE Y TOTAL

5.1 Masa de MPS Soluble, Insoluble y Total

En la Tabla 1 se indica la masa de MPS Soluble, Insoluble y Total determinado en las muestras del período que se informa, considerando los días efectivos de acumulación de MPS. Nótese que en el mes 1 (mayo-junio) y en mes 2 (julio-agosto), los días de permanencia de las botellas en los colectores no fueron continuos, dado que fue necesario retirar las botellas en los días de lluvia intensa y reinstalarlas una vez pasado el mal tiempo.

Los datos (Tabla 1) indican que la Estación Cancha Carbón acumula más MPS que las otras 3 Estaciones. Por otra parte, en la Estación Cancha Carbón se aprecia una considerable reducción del MPS, del orden de 10 veces en el mes 2 (julio-agosto), que se expresa tanto en el MPS soluble como insoluble.

Fecha de Inicio	Fecha Final	Estación	Período de Muestreo en días efectivos	Masa MPS soluble medida (mg)	Masa MPS insoluble medida (mg)	Masa MPS Total (mg)
19-05-22	03-06-22	Cancha Carbón	29	963,8	7079,3	8043,1
08-06-22	22-06-22					
19-05-22	03-06-22	Galo Herrera	29	181,3	591,2	772,5
08-06-22	22-06-22					
19-05-22	03-06-22	MPS Bajo	29	87	553,1	640,1
08-06-22	22-06-22					
19-05-22	03-06-22	MPS Alto	29	150,2	1100,6	1250,8
08-06-22	22-06-22					
28-06-22	08-07-22	Cancha Carbón	26	95,8	698,5	794,3
20-07-22	05-08-22					
29-06-22	08-07-22	Galo Herrera	25	50,5	344,7	395,2
20-07-22	05-08-22					
01-07-22	08-07-22	MPS Bajo	23	9,8	235,8	245,6
20-07-22	05-08-22					
01-07-22	08-07-22	MPS Alto	23	9,5	254	263,5
20-07-22	05-08-22					
09-08-22	12-09-22	Cancha Carbon	34	65,2	1163,8	1229
09-08-22	12-09-22	Galo Herrera	34	65,7	333,3	399
08-08-22	12-09-22	MPS Bajo	35	41,8	454	495,8
08-08-22	12-09-22	MPS Alto	35	36,6	384,8	421,4

Tabla 1 MPS Soluble, Insoluble y Total (mg) en las 4 Estaciones durante los 3 meses de monitoreo

5.2 Masa MPS Soluble y Tasa de Concentración

En la Figura 3 se aprecia el contraste en la concentración de solubles, con valores significativamente más altos en la Estación Cancha Carbón en el mes 1 (mayo-junio 2022), concentración que disminuye drásticamente en los dos meses siguientes (junio-julio 2022). Por otra parte, las Estaciones MPS Bajo y MPS Alto parecen tener un patrón común en los 3 meses de monitoreo.

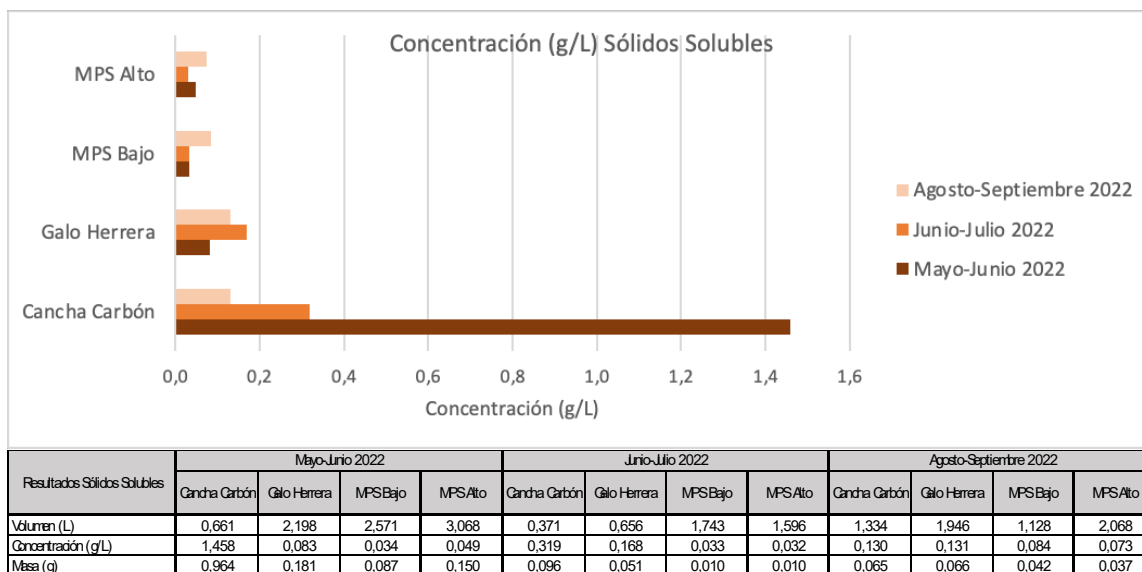


Figura 3 Concentración (g/L) comparada del MPS soluble en las 4 Estaciones durante los 3 meses de monitoreo

5.3 Tasa de sedimentación MPS Soluble, Insoluble y Total

La Tasa de Sedimentación del MPS se expresa en $\text{mg/m}^2/\text{mes}$, considerando mes de 30 días. Los colectores instalados en las 4 Estaciones tienen un radio de 0,249 m, por tanto una superficie de $0,19478172 \text{ m}^2$.

Para facilitar la comparación entre diferentes meses de monitoreo se requiere el recalcu a 30 días de la masa total (en mg) colectada, en caso que el período de recolección difiera de 30 días, situación que efectivamente ocurrió, donde el “período de recolección” fluctúa entre 23 días y 35 días.

En la Tabla 2 se muestran los resultados para las Tasas de Sedimentación del MPS soluble, insoluble y Total calculadas tomando en consideración los días efectivos para cada período y valores derivados de normalizar a mes 30 días, como sugiere la norma secundaria de la Cuenca del Río Huasco (D.E. N°4/92). Las diferencias observadas hacen aconsejable que en lo sucesivo el tiempo de recolección en los colectores pasivos respete el período de 30 días, para que los resultados se ajusten a la Tasa de Sedimentación real.

En la Tabla 3 se muestran los resultados para las Tasas de Sedimentación del MPS soluble, insoluble y Total (en $\text{mg/m}^2/\text{día}$), calculadas con los días efectivos para cada período y los valores derivados del cálculo por día, referidos al mes normalizado a mes 30 días.

Fecha de Inicio	Fecha Final	Estación	Período de Muestreo en días efectivos	Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m2/mes efectivo)	Tasa de Sedimentación MPS soluble (mg/m2/mes efectivo)	Tasa de Sedimentación MPS total (mg/m2/mes efectivo)	Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m2/mes 30 días)	Tasa de Sedimentación MPS soluble (mg/m2/mes 30 días)	Tasa de Sedimentación MPS total (mg/m2/mes 30 días)
19-05-22	03-06-22	Cancha Carbón	29	36344,786	4948,103	41292,889	37598,1	5118,7	42716,782
08-06-22	22-06-22								
19-05-22	03-06-22	Galo Herrera	29	3035,192	930,785	3965,978	3139,9	962,9	4102,736
08-06-22	22-06-22								
19-05-22	03-06-22	MPS Bajo	29	2839,589	771,120	3610,708	2937,5	797,7	3735,216
08-06-22	22-06-22								
19-05-22	03-06-22	MPS Alto	29	5650,428	446,654	6097,081	5845,3	462,1	6307,326
08-06-22	22-06-22								
28-06-22	08-07-22	Cancha Carbón	26	3586,065	491,833	4077,898	4137,8	567,5	4705,267
20-07-22	05-08-22								
29-06-22	08-07-22	Galo Herrera	25	1769,673	259,265	2028,938	2123,6	311,1	2434,725
20-07-22	05-08-22								
01-07-22	08-07-22	MPS Bajo	23	1210,586	48,773	1259,358	1579,0	63,6	1642,641
20-07-22	05-08-22								
01-07-22	08-07-22	MPS Alto	23	1304,024	50,313	1354,337	1700,9	65,6	1766,526
20-07-22	05-08-22								
09-08-22	12-09-22	Cancha Carbón	34	5974,893	334,734	6309,627	5272,0	295,4	5567,318
09-08-22	12-09-22	Galo Herrera	34	1711,146	337,301	2048,447	1509,8	297,6	1807,453
08-08-22	12-09-22	MPS Bajo	35	2330,814	187,903	2518,717	1997,8	161,1	2158,900
08-08-22	12-09-22	MPS Alto	35	1975,545	214,599	2190,144	1693,3	183,9	1877,266

Tabla 2 Variación Tasa de Sedimentación mensual (MPS insoluble, soluble y Total) efectiva y normalizada a 30 días

Fecha de Inicio	Fecha Final	Estación	Período de Muestreo en días efectivos	Tasa de Sedimentación MPS soluble (mg/m2/día efectivo)	Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m2/día efectivo)	Tasa de Sedimentación MPS total (mg/m2/día efectivo)
19-05-22	03-06-22	Cancha Carbón	29	170,624	1253,268	1423,893
08-06-22	22-06-22					
19-05-22	03-06-22	Galo Herrera	29	32,096	104,662	136,758
08-06-22	22-06-22					
19-05-22	03-06-22	MPS Bajo	29	26,590	97,917	124,507
08-06-22	22-06-22					
19-05-22	03-06-22	MPS Alto	29	15,402	194,842	210,244
08-06-22	22-06-22					
28-06-22	08-07-22	Cancha Carbón	26	18,917	137,926	156,842
20-07-22	05-08-22					
29-06-22	08-07-22	Galo Herrera	25	10,371	70,787	81,158
20-07-22	05-08-22					
01-07-22	08-07-22	MPS Bajo	23	2,121	52,634	54,755
20-07-22	05-08-22					
01-07-22	08-07-22	MPS Alto	23	2,188	56,697	58,884
20-07-22	05-08-22					
09-08-22	12-09-22	Cancha Carbon	34	9,845	175,732	185,577
09-08-22	12-09-22	Galo Herrera	34	9,921	50,328	60,248
08-08-22	12-09-22	MPS Bajo	35	5,369	66,595	71,963
08-08-22	12-09-22	MPS Alto	35	6,131	56,444	62,576

Tabla 3 Tasa de Sedimentación diaria (MPS insoluble, soluble y Total) calculada por día efectivo

En términos generales, en el período de 3 meses todas las Estaciones acusan reducción de las Tasas de Sedimentación, tanto del MPS soluble como insoluble, desde los máximos observados en el mes 1.

En particular, la Estación Cancha Carbón muestra un destacado decrecimiento de la Tasa de Sedimentación, del orden de 9 y 8,6 veces en el mes 2 y 3, respectivamente. Por otra parte, la Estación MPS Alto, muestra una reducción del orden de 3,5 y 3,4 veces en los meses 2 y 3, respectivamente.

Las Estaciones Galo Herrera y MPS Bajo muestran decrecimiento del MPS en el mes 2, con disminución entre 1,7 a 2,3 veces.

En el mes 3, respecto al mes 2, se observa un leve incremento en la Tasa de Sedimentación en las Estaciones Cancha Carbón (18,3%), MPS Bajo (30%) y MPS Alto. (6%). La Estación Galo Herrera es la única que muestra un decrecimiento (25,8%) en el mes 3, respecto al mes 2.

6 RESULTADOS MPS insoluble

En el presente estudio el MPS insoluble fue estudiado desde el punto de vista de su granulometría y composición.

6.1 Granulometría de MPS insoluble recolectado en cada Estación de Monitoreo

Los resultados del análisis granulométrico mediante difracción láser se presentan en la Tabla 4 (tamaño partículas en micrones).

Estación	Granulometría (µm)	Mayo-Junio 2022	Junio-Julio 2022	Agosto-Septiembre 2022	PROMEDIO POR ESTACIÓN EN 3 MESES
Cancha Carbón	Mín	0,098	0,088	0,098	0,095
	Máx	168,429	226,928	168,429	187,929
Galo Herrera	Mín	0,098	0,098	0,098	0,098
	Máx	250,637	168,429	250,637	223,234
MPS Bajo	Mín	0,098	0,088	0,098	0,095
	Máx	337,690	168,429	337,690	281,270
MPS Alto	Mín	0,098	0,088	0,098	0,095
	Máx	152,496	113,184	152,496	139,392

Tabla 4 Tamaño mín. y máx. de partículas en las 4 Estaciones por mes de monitoreo

Los resultados presentados en la Tabla 4 muestran un tamaño mínimo similar de las partículas de carbón en las 4 Estaciones, durante los 3 meses de monitoreo (Promedio 0,095 µm), mientras que el tamaño máximo promedio fluctúa entre 139,392 µm (Estación MPS Alto) y 281,270 µm (Estación MPS Bajo).

6.2 Composición del MPS insoluble

Los tipos de partículas reconocidas en las muestras son mayoritariamente antrópicas y, de manera muy subordinada, se observan partículas naturales que corresponden a partículas vegetales tipos briznas de pastizal.

La identificación de los tipos de partículas en el *MPS Insoluble*, dado su tamaño, se hizo mediante microscopía Electrónica de Barrido (SEM), utilizando imágenes BSE de alta resolución, en combinación con imágenes en la modalidad *mapping*.

La inspección de las muestras con el Modo BSE permite identificar los diferentes tipos de partículas, gracias a que este detector contrasta, mediante la tonalidad en la imagen, la diferente composición de las partículas. De este modo, de acuerdo a la tonalidad observada en la imagen, se identifican los siguientes tipos de partículas:

1. Partículas gris oscuro-negro: corresponden a partículas de carbón crudo (sin evidencias de combustión) y chars (residuos de combustión con carbono remanente). También se ven de esta

tonalidad las partículas de vegetales, las cuales se identifican por su forma (angosta y alargada), muy diferente a las partículas carbonosas (carbón y residuos de combustión).

2. Partículas gris medio: corresponden a residuos de combustión de composición aluminosilicatada, de forma esférica (cenosferas), prismática (mineroides feldespáticos y silíceos) o en granos compuestos (cenosferas más mineroides).
3. Partículas gris claro: ferrosferas (forma esférica, contenido alto de Fe).
4. Partículas blanco brillante: minerales metálicos en la forma de óxidos de Fe (magnetita, hematita), sulfuros de Fe (pirita) y sulfuros de Cu-Fe (calcopirita).

A modo de ejemplo, en la Lámina 1-A se presenta una imagen SEM/BSE donde se identifican los diferentes componentes mencionados, de acuerdo a su tonalidad de gris.

En la Lámina 1-B se presenta una imagen BSE obtenida mediante la herramienta "mapping" del SEM/EDS, la cual posibilita realizar un mapeo areal por elementos a definir por el usuario. En este estudio se utilizó esta herramienta para conocer la distribución en el muestra de los elementos carbono (C), sílice (Si), aluminio (Al), hierro (Fe), cobre (Cu) y azufre (S) y con eso confirmar la composición de los componentes observados. En la Lámina 1-C se presenta una imagen BSE con la distribución del elemento carbono (C). Mediante el *mapping* por diferentes elementos fue posible identificar los siguientes tipos de partículas:

- Solo Si (color amarillo): partículas de sílice (cuarzo) formadas en la fase final del proceso de combustión del carbón (mineroides silíceos).
- Si + Al (color amarillo + color verde): partículas aluminosilicatadas formadas en la fase final del proceso de combustión del carbón (cenosferas y mineroides de feldespato K y plagioclasa).
- Solo C (color rojo): partículas de carbón.
- C + Si + Al (color rojo + color amarillo + color verde): chars.
- S + Fe (color anaranjado + color azul): partículas de sulfuro de Fe (pirita).
- S+ Cu + Fe (color naranja + color ciclamen + color azul): sulfuro de Cu-Fe (calcopirita).
- O +Fe (color celeste + color azul): Oxido de Fe (magnetita/hematita).

Información de detalle de la composición del MPS insoluble para cada una de las muestras estudiadas en este período (mayo-septiembre 2022) está contenida en Fichas por muestra, las cuales se incorporarán como Anexo al Informe Anual.

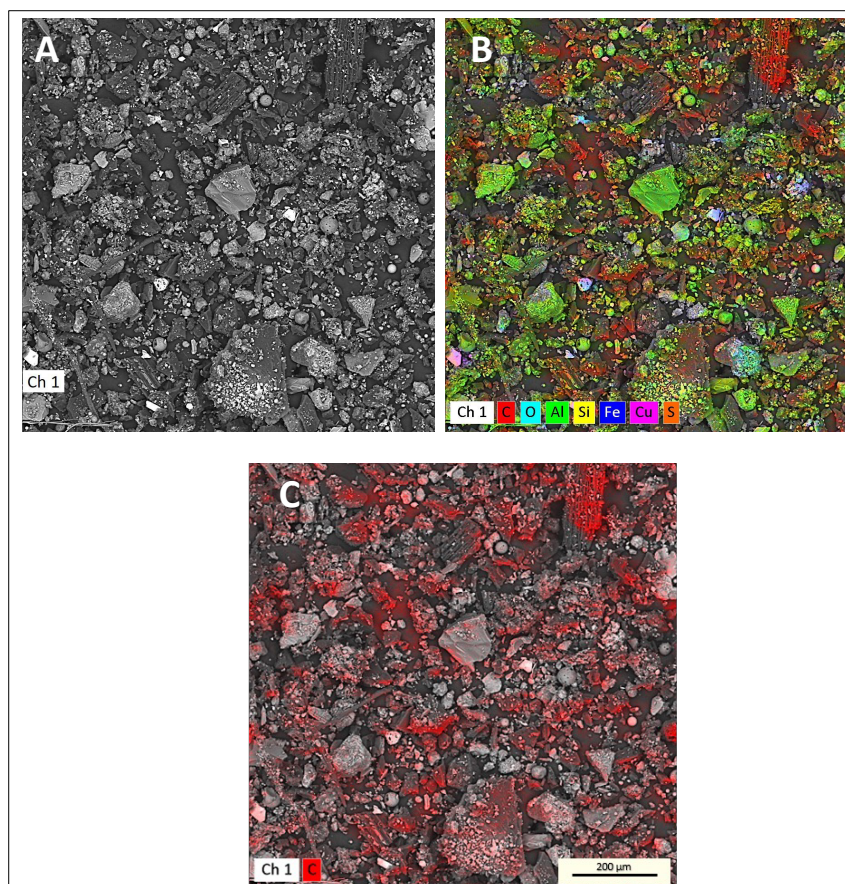


Lámina 1. A: SEM/BSE; B: SEM/EDS mapping de C, O, Al, Si, Fe, Cu y S; C: mapping de C

6.3 Masa y porcentaje en masa de los componentes del *MPS insoluble*

La determinación porcentual en volumen de cada uno de los componentes del *MPS insoluble* se realizó mediante software especializado, contabilizando los diferentes tipos de componentes sobre 3 imágenes SEM/BSE por muestra. Una vez determinado el porcentaje (en volumen) de cada componente en cada muestra, se calculó la masa, multiplicando el porcentaje en volumen por el valor de densidad asignado a cada tipo de partícula⁹ (referencias en sección 2.4), normalizando el valor obtenido a la masa total colectada en la estación correspondiente (Tabla 5).

⁹

Brizas de vegetales: 1,5 g/cm³

Partículas de carbón: 1,4 g/cm³

Residuos de Combustión: 2,5 g/cm³ (los valores de densidad fluctúan entre 1,9 a 2,9 g/cm³)

Partículas Metálicas: 5,0 g/cm³ (sulfuros de Cu-Fe: 4,9 /cm³; Magnetita: 5,2 g/cm³)

Masa por tipo de partícula (g)	Mayo-Junio 2022				Junio-Julio 2022				Agosto-Septiembre 2022			
	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto
Partículas de carbón	2,361	0,101	0,046	0,033	0,247	0,043	0,007	0,009	0,292	0,028	0,012	0,006
Residuos de combustión	4,061	0,410	0,446	0,964	0,410	0,270	0,210	0,226	0,731	0,261	0,394	0,339
Partículas metálicas	0,579	0,068	0,053	0,089	0,027	0,017	0,007	0,013	0,105	0,031	0,035	0,026
Vegetales	0,077	0,013	0,009	0,014	0,015	0,014	0,013	0,006	0,036	0,013	0,013	0,013
Total colectado (g)	7,079	0,591	0,553	1,101	0,699	0,345	0,236	0,254	1,164	0,333	0,454	0,385

Tabla 5 Masa por tipo de partícula en las 4 Estaciones, en los 3 meses de monitoreo

Una vez determinada la masa de los diferentes componentes, se procedió a determinar el porcentaje (en masa), con el propósito de determinar cuáles componentes tienen mayor influencia sobre la masa total del MPS Insoluble (Tabla 6).

El componente que, porcentualmente, más aporta a la masa del MPS insoluble, corresponde a residuos de combustión de carbón (ceniza volante) en todas las Estaciones de monitoreo, especialmente en la Estación MPS Alto.

El segundo componente más abundante corresponde a partículas de carbón, con valores significativamente más altos en la Estación Cancha Carbón y Estación Galo Herrera, ambas dentro de las dependencias del CTV.

Porcentaje por tipo de partícula (%)	Mayo-Junio 2022				Porcentaje por tipo de partícula (%)	Junio-Julio 2022				Porcentaje por tipo de partícula (%)	Agosto-Septiembre 2022			
	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto		Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto		Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto
Partículas de carbón	33,357	17,021	8,280	3,037	Partículas de carbón	35,361	12,577	2,837	3,526	Partículas de carbón	25,116	8,467	2,567	1,554
Residuos de combustión	57,370	69,340	80,637	87,579	Residuos de combustión	58,637	78,350	88,858	89,117	Residuos de combustión	62,776	78,374	86,767	88,220
Partículas metálicas	8,184	11,505	9,546	8,117	Partículas metálicas	3,832	5,037	2,856	5,093	Partículas metálicas	9,004	9,155	7,720	6,865
Vegetales	1,090	2,135	1,537	1,267	Vegetales	2,171	4,036	5,449	2,265	Vegetales	3,103	4,003	2,946	3,361

Tabla 6 Porcentaje en masa por tipo de partícula en las 4 Estaciones, en los 3 meses de monitoreo

Para una mejor comparación de los resultados, en la Tabla 7 se presentan los valores promedio del porcentaje y masa, en que cada componente aporta el MPS insoluble.

Masa (g) promedio (3 meses) por tipo de componente en MPS insoluble	MASA PROMEDIO 3 MESES POR ESTACIÓN				Porcentaje (en masa) promedio (3 meses) por tipo de componente en MPS insoluble	% PROMEDIO 3 MESES POR ESTACIÓN			
	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto		Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto
Residuos de combustión	1,734	0,314	0,350	0,510	Residuos de combustión	59,594	75,355	85,421	88,305
Partículas de carbón	0,967	0,057	0,021	0,016	Partículas de carbón	31,278	12,688	4,562	2,706
Partículas metálicas	0,237	0,039	0,032	0,043	Partículas metálicas	7,007	8,566	6,707	6,691
Vegetales	0,237	0,039	0,032	0,043	Vegetales	2,121	3,391	3,311	2,297

Tabla 7 Masa y Porcentaje promedio (3 meses) de componentes en MPS insoluble

De la comparación (Tabla 7) se destaca que:

- Los residuos de combustión de carbón contribuyen en promedio a la masa total del MPS insoluble con 1,7 g en la Estación Cancha Carbón y solo 0,3 g en la Estación Galo Herrera. Representan el 88,305% del MPS Insoluble en la Estación MPS Alto y solo el 59,594% en la Estación Cancha Carbón.
- El carbón aporta en promedio entre 0,967 gramos en la Estación Cancha Carbón y solo 0,016 g en la Estación MPS Alto. El porcentaje de carbón, el segundo componente en mayor proporción relativa, muestra un porcentaje promedio más alto en la Estación Cancha Carbón (31,278%) y más bajo en la Estación MPS Alto (2,706 %).
- Las partículas metálicas aportan al *MPS insoluble* con 0,237 g en la Estación Cancha Carbón y con valores similares entre 0,032 g y 0,043 g en las restantes 3 estaciones. Están presentes en

porcentaje significativamente similar en las 4 estaciones, variando entre 6,691% (estación MPS Alto) y 8,566% (Estación Galo Herrera).

- Los restos vegetales representan un porcentaje relativamente similar en las 4 estaciones, variando entre 3,391% en la Estación Galo Herrera y 2,121% en la estación Cancha Carbón. Su aporte a la masa del *MPS insoluble* varía entre 0,043 g en la Estación Cancha Carbón y entre 0,013 y 0,011 g en las estaciones restantes.

6.4 Tasa de sedimentación del PMS insoluble

En la Tabla 8 se presentan las variables utilizadas para el cálculo de la Tasa de Sedimentación del *MPS Insoluble* en cada una de las 4 Estaciones durante el período de 3 meses de monitoreo. Nótese la diferencia que se establece entre la Tasa de Sedimentación calculada utilizando el número de días de acumulación efectiva (columna A) y la Tasa de Sedimentación normalizada a mes de 30 días (columna B). La Tasa de Sedimentación diaria (Columna C) se ha calculado sobre la base del número días efectivos de acumulación del MPS.

Fecha de Inicio	Fecha Final	Estación	Período de Muestreo en días efectivos	A Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m ² /mes efectivo)	B Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m ² /mes 30 días)	C Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m ² /día efectivo)
19-05-22	03-06-22	Cancha Carbón	29	36344,786	37598,1	1253,268
08-06-22	22-06-22					
19-05-22	03-06-22	Galo Herrera	29	3035,192	3139,9	104,662
08-06-22	22-06-22					
19-05-22	03-06-22	MPS Bajo	29	2839,589	2937,5	97,917
08-06-22	22-06-22					
19-05-22	03-06-22	MPS Alto	29	5650,428	5845,3	194,842
08-06-22	22-06-22					
28-06-22	08-07-22	Cancha Carbón	26	3586,065	4137,8	137,926
20-07-22	05-08-22					
29-06-22	08-07-22	Galo Herrera	25	1769,673	2123,6	70,787
20-07-22	05-08-22					
01-07-22	08-07-22	MPS Bajo	23	1210,586	1579,0	52,634
20-07-22	05-08-22					
01-07-22	08-07-22	MPS Alto	23	1304,024	1700,9	56,697
20-07-22	05-08-22					
09-08-22	12-09-22	Cancha Carbón	34	5974,893	5272,0	175,732
09-08-22	12-09-22	Galo Herrera	34	1711,146	1509,8	50,328
08-08-22	12-09-22	MPS Bajo	35	2330,814	1997,8	66,595
08-08-22	12-09-22	MPS Alto	35	1975,545	1693,3	56,444

Tabla 8 Tasa de sedimentación de MPS Insoluble expresada en mg/m²/mes y mg/m²/día

Como indican los datos de la Tabla 8, la Tasa de Sedimentación del *MPS Insoluble* es significativamente más alta en la Estación Cancha Carbón en los 3 meses de monitoreo, con un valor muy alto en el mes 1. Sin embargo, se aprecia una importante reducción en los meses siguientes, 9 veces en el mes 2 y 7 veces en el mes 3 respecto al mes 1.

En las restantes 3 Estaciones se observa así mismo reducción de la Tasa de Sedimentación del MPS Insoluble en los 3 meses monitoreados.

7 RESULTADOS REFERIDOS AL COMPONENTE CARBÓN DEL MPS INSOLUBLE

Esta sección hace referencia en particular al componente “carbón” del MPS Insoluble, dado que constituye la variable principal del monitoreo estipulado en la Resolución 0045/22 del SRMS que rige el estudio.

Como se indicó en la sección anterior (ver Tabla 5, 6 y 7), el carbón es el segundo componente más abundante en el MPS insoluble.

7.1 Carbón: Masa, porcentaje y tamaño de partículas

La masa de carbón es significativamente más alta en la Estación Cancha Carbón, con un valor promedio (3 meses) de 0,967 g, el cual disminuye drásticamente en la Estación Galo Herrera (ubicada 150 m al NNE-SSW) a un valor promedio de 0,057 g, es decir se constata una reducción de 17 veces entre ambas estaciones. La reducción en la masa promedio de carbón prosigue hacia la Estación MPS Bajo (ubicada a 275 m al NNW-SSE de la Estación Cancha Carbón), donde se registra una masa promedio de 0,021 g. El valor masa de carbón promedio más bajo -0,016 g- se registra en la Estación MPS Alto (ubicada a 475 m al NNE-SSW de la E. Cancha Carbón), indicando una reducción de 60 veces respecto a la masa promedio registrada en la Estación Cancha Carbón (Figura 4).

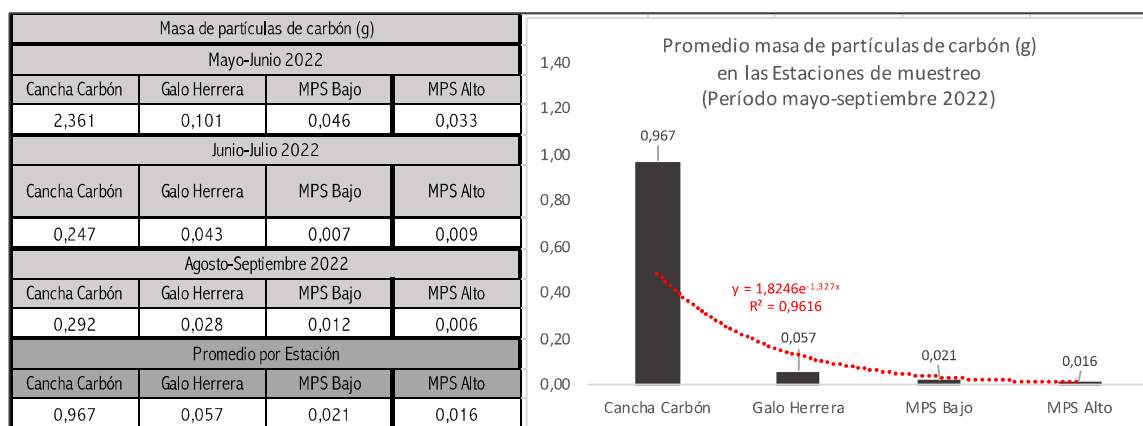


Figura 4 Masa de carbón registrada en las 4 estaciones y variabilidad en el período de 3 meses

En la Tabla 9 se presenta el porcentaje en masa de carbón respecto del MPS insoluble, para cada Estación por mes de monitoreo, además del porcentaje promedio (3 meses) para cada Estación.

Porcentaje (% en masa) del carbón	Mayo-Junio 2022				Junio-Julio 2022				Agosto-Septiembre 2022			
	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto
	33,357	17,021	8,280	3,037	35,361	12,577	2,837	3,526	25,116	8,467	2,567	1,554
	Promedio por Estación				Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto				
					31,28	12,69	4,56	2,71				

Tabla 9 Porcentajes (en masa) del carbón en el MPS Insoluble

La Tabla 10 contiene los valores del tamaño máximo y mínimo (micrones) de las partículas de carbón para las 4 Estaciones durante los 3 meses de monitoreo. El mayor tamaño máximo promedio se registra en la Estación MPS Bajo (224,4 μm) seguido de la Estación Cancha Carbón (220,1 μm). El menor tamaño máximo promedio (90,2 μm) se registra en la Estación MPS Alto, la más alejada de la cancha de acopio de carbones utilizados en el Complejo Termoeléctrico Ventanas.

		Rango de tamaño (Min-Max) de Partículas de Carbón (μm)		Promedio Tamaño Máximo de Partículas de Carbón (μm)
Periodo mayo-junio 2022	Cancha Carbón	14,4	119,8	220,1
Periodo junio-julio 2022		13,3	215,7	
Periodo agosto-septiembre 2022		17,3	324,8	
Periodo mayo-junio 2022	Galo Herrera	17,1	263,5	157,6
Periodo junio-julio 2022		11,2	100,7	
Periodo agosto-septiembre 2022		14,7	108,5	
Periodo mayo-junio 2022	MPS Bajo	10,7	186,2	224,4
Periodo junio-julio 2022		16,3	325,4	
Periodo agosto-septiembre 2022		11,7	161,5	
Periodo mayo-junio 2022	MPS Alto	29,8	131,6	90,2
Periodo junio-julio 2022		30,8	62,1	
Periodo agosto-septiembre 2022		24,0	76,9	

Tabla 10 Tamaño mínimo y máximo (en micrones) de las partículas de carbón

7.2 Tasa de sedimentación del carbón

En la Tabla 11 se indica la Tasa de Sedimentación del Carbón, calculada sobre la base de los días efectivos de acumulación en los colectores pasivos de las 4 Estaciones en los 3 meses de monitoreo.

En el mes 1, la Tasa de Sedimentación de Carbón en la Estación Cancha Carbón es extremadamente alta y no se condice con la registrada en los meses siguientes -se reduce 8,6 veces en el mes 2 y 9,5 veces en el mes 3-.

En las restantes 3 Estaciones, Galo Herrera, MPS Bajo y MPS Alto, ubicadas a una distancia de 150 m, 275 m y 475 m, respectivamente, de la Estación Cancha de Carbón, las Tasas de Sedimentación de Carbón son considerablemente menores, congruentes con su mayor distancia a la fuente de aporte.

Fecha de Inicio	Fecha Final	Estación	Periodo de Muestreo en días efectivos	Tasa de Sedimentación carbón (mg/m ² /día efectivo)
19-05-22	03-06-22	Cancha Carbón	29	418,048
08-06-22	22-06-22			
19-05-22	03-06-22	Galo Herrera	29	17,814
08-06-22	22-06-22			
19-05-22	03-06-22	MPS Bajo	29	8,108
08-06-22	22-06-22			
19-05-22	03-06-22	MPS Alto	29	5,917
08-06-22	22-06-22			
28-06-22	08-07-22	Cancha Carbón	26	48,772
20-07-22	05-08-22			
29-06-22	08-07-22	Galo Herrera	25	8,903
20-07-22	05-08-22			
01-07-22	08-07-22	MPS Bajo	23	1,493
20-07-22	05-08-22			
01-07-22	08-07-22	MPS Alto	23	1,999
20-07-22	05-08-22			
09-08-22	12-09-22	Cancha Carbon	34	44,137
09-08-22	12-09-22	Galo Herrera	34	4,262
08-08-22	12-09-22	MPS Bajo	35	1,710
08-08-22	12-09-22	MPS Alto	35	0,877
TASA SEDIMENTACIÓN DE CARBÓN PROMEDIO (mg/m ² /día efectivo)				
		Cancha Carbon	170,319	
		Galo Herrera	1,421	
		MPS Bajo	9,475	
		MPS Alto	0,292	

Tabla 11 Tasa Sedimentación Carbón en las 4 Estaciones y su variación en los 3 meses de monitoreo

8 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

8.1 Componentes antrópicos y su proporción en el MPS

Los 4 colectores pasivos de MPS están emplazados en o cerca de las instalaciones del Complejo Termoeléctrico Ventanas de propiedad de AES Andes. En las cercanías existen además numerosas instalaciones industriales.

En la Figura 5 se representan gráficamente los componentes del MPS Insoluble en cada Estación, por mes de monitoreo. Como se observa en la figura 5, el componente prioritario del MPS corresponde a residuos de combustión industrial de carbón. En segundo componente es el carbón, el cual tiene mayor presencia en la Estación Cancha Carbón y Estación Galo Herrera, disminuyendo drásticamente su presencia en las Estaciones MPS Bajo y MPS Alto, las más alejadas de los sectores donde se acopia o transporta carbón.

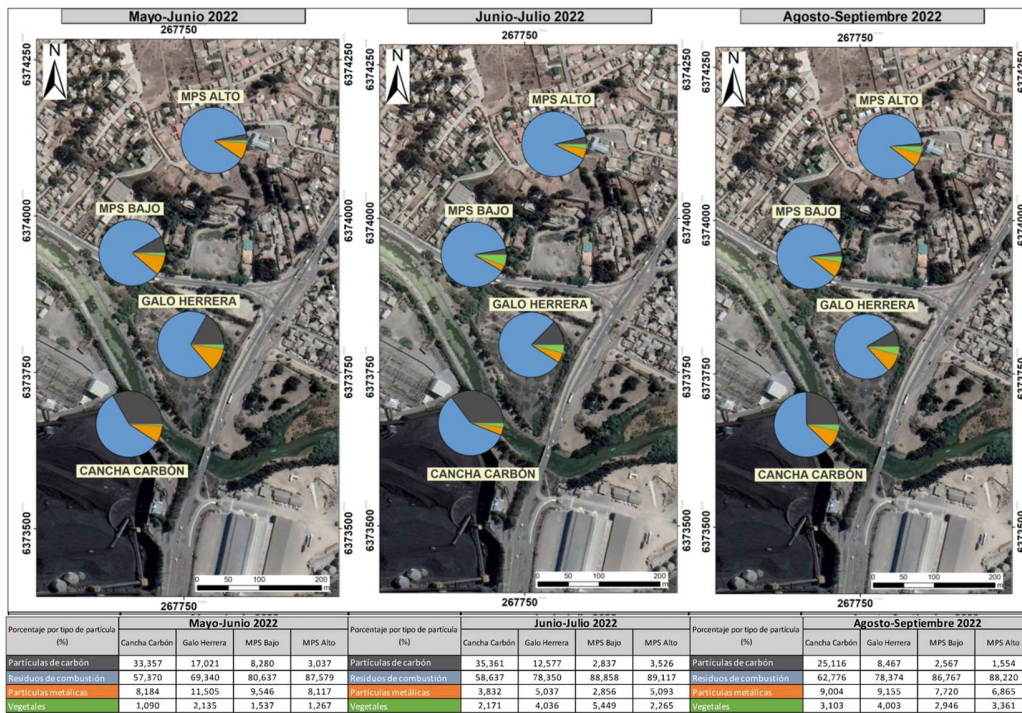


Figura 5 Evolución porcentual (% en masa) de los componentes del MPS Insoluble en las 4 Estaciones en los 3 meses de monitoreo

En orden de participación en el MPS, los 3 componentes antrópicos son:

- Residuos de Combustión: provienen de la actividad industrial del CTC con sus actuales 3 centrales termoeléctricas a carbón: % promedio entre 88,305 (E. MPS Alto) y 59,594 (E. Cancha Carbón)
- Partículas de carbón: corresponden a polvo movilizado por el viento desde los lugares de transporte y acopio del carbón utilizado en la alimentación de las 3 centrales: %MPS promedio entre 31,278% (E. Cancha Carbón) y 2,706% (E. MPS Alto).

- Partículas metálicas: dada su composición mineralógica provienen probablemente de los lugares de acopio de concentrado de cobre: % promedio entre 8,566% (E. Galo Herrera) y 6,691% (E. MPS Alto).

8.2 Tasa de Sedimentación del MPS Insoluble

Numerosos estudios han identificado al MPS como responsable de la transferencia de contaminantes. Las repercusiones del MPS en el medio ambiente pueden tener efecto sobre la fotosíntesis de las plantas, la acidificación de suelos y masas de agua, la degradación del entorno habitable y generar daño en la salud de la fauna (incluyendo las personas). A la hora de determinar la política ambiental local y soluciones de gestión, es crucial determinar las tasas de sedimentación del MPS, la(s) fuente(s) de la contaminación y la distribución desde ella(s).

Tradicionalmente, el MPS ha sido monitoreado gravimétricamente utilizando colectores pasivos. Hay una amplia variedad de colectores en uso en todo el mundo (cuencos, cilindros o embudos horizontales de boca abierta) que, por lo general operan con recolección del MPS mensual. La Tasa de Sedimentación de sólidos no disueltos (MPS Insoluble), aunque a veces también se incluyen los sólidos disueltos (MPS Soluble), se puede expresar por día ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$), por mes de 30 días ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{mes}$) o por año ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{año}$). Considerando que a menudo las condiciones operativas de las fuentes de origen son episódicas, o bien ocurren condiciones meteorológicas anormales o ambas, la expresión de la Tasa de Sedimentación anual se considera más representativa.

Con el fin de gestionar y minimizar los efectos adversos de las partículas sedimentables (MPS), varios países, entre ellos Chile, han establecido los estándares máximos permitidos. Estos estándares varían según el país y, a veces, el estado, como ocurre en Estados Unidos, Canadá y Brasil. La Tabla 14 (tomada de Vallack & Shillito, 1998) resume los umbrales estándar establecidos por Agencias Ambientales en países europeos, América del Norte y Argentina.

2738 H. W. VALLACK and D. E. SHILLITO

Table 1. Examples of dust deposition standards outside the U.K. (as $\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

Argentina	Annual average	333
Australia (W. Australia)	Loss of amenity first perceived	133
	Unacceptable reduction in air quality	333
Canada		
Alberta	Annual average	180
Manitoba	Annual average	153
	(maximum acceptable)	266
	(maximum desirable)	200
Newfoundland	Annual average	153
	Monthly average	233
Ontario	Annual average	170
	Monthly average	200
Finland	Annual average	333
Germany	Long-term average	350 ^a
	Short-term average	650 ^a
Spain	Annual average	200
U.S.A.		
Kentucky	Annual average	196
Louisiana	Annual average	262
Maryland	Annual average	183
Mississippi	Monthly average (above background)	175
Montana	Annual average (residential areas)	196
New York	During any 12 months no more than	
	5% of 30 d values to exceed	100
	and 84% to be below	130
North Dakota	3 Monthly average	196
Pennsylvania	Annual average	267
	Monthly average	500
Washington	Annual average	183
Wyoming	Monthly average	170

^a Combined weight of dissolved and undissolved deposits.

Tabla 12 Valores límites de Tasa de Sedimentación de MPS ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$)

En el caso de Brasil, existe una norma del Estado de Minas Gerais (COPAM N°1/81) para áreas industrializadas que fija el valor límite en $10 \text{ g}/\text{m}^2/\text{mes}$, que corresponde a $333 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{día}$. En un trabajo relativamente reciente, Santos et al. (2017), estudia diferentes áreas industriales de estados brasileños (Minas Gerais, Río de Janeiro, Amapá y Vitoria) validando ese valor límite.

Chile no dispone de norma primaria para material particulado sedimentable MPS, por lo que se acostumbra utilizar como referencia el nivel límite definido en la norma secundaria por la cual se rige la Tercera Región (Cuenca del Río Huasco). Es una norma de calidad de aire en lo que respecta a polvo sedimentable, publicada en el D. E. N°4/1992 del Ministerio de Agricultura, que fija como Tasa de Sedimentación límite diaria el valor $150 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{día}$ como concentración media aritmética mensual, o bien $100 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{día}$ como concentración media aritmética anual.

En la Figura 6 se indican los valores de la Tasa de Sedimentación ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{mes}$) para el MPS Soluble, Insoluble y Total en las 4 Estaciones durante los 3 meses de monitoreo. Las líneas rojas expresan:

- valor máximo mensual aceptado en Chile, calculado para mes de 30 días, utilizando el valor máximo diario de $150 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{día}$ indicado en el D.E. N°4/1992.
- Valor máximo mensual aceptado en Brasil para áreas industriales, calculado utilizando el valor máximo diario de $333 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{día}$ estipulado en la norma COPAM N° 1/81)

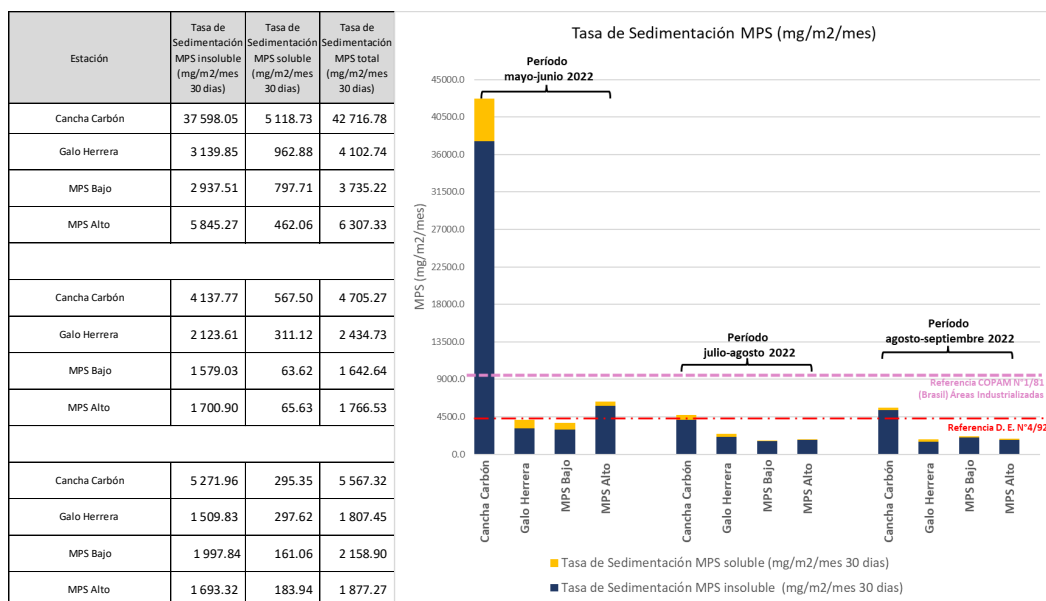


Figura 6 Tasa de Sedimentación del MPS (soluble, insoluble) en las 4 Estaciones en los 3 meses de monitoreo

Considerando la Tasa de sedimentación del MPS Total, como se observa en el gráfico de la Figura 6, las estaciones que sobrepasan el límite indicado en la norma Cuenca del Río Huasco (D.E. N°4/92) son:

- Estación Cancha Carbón en el mes 1, 2 y 3
- Estación MPS Alto solo en el mes 1

8.3 Tasa de Sedimentación de carbón

Por sus características físicas y el tamaño de los granos, el carbón particulado es susceptible de ser erosionado por la acción del viento dentro y fuera de las instalaciones industriales que lo utilizan o manejan. En ese sentido, la erosión eólica que lo afecte provocará efectos similares a los que ocurren en los botaderos de minas o en los relaves de minerales.

En el área monitoreada, como es evidente y esperable, el mayor contenido de carbón se registra en la Estación Cancha Carbón, lugar de acopio y movimiento de los carbones que serán utilizados en el proceso de termo-generación del CTC y muy probablemente, lugar de origen de las partículas de carbón (menores de 1mm de diámetro) que forman parte del MPS insoluble. La Estación Cancha Carbón está ubicada dentro de la dependencia del mismo nombre, adyacente a la membrana deflectora que protege los sectores externos de la dispersión de partículas de carbón desde la cancha de acopio.

Como se aprecia en el gráfico de la Figura 7, *solamente* en el mes 1, la Tasa de Sedimentación de carbón en la Estación Cancha Carbón supera el máximo de MPS diario permitido para la cuenca del Río Huasco (D.E N° 4/91), así como también, la norma brasileña para áreas industriales (COPAM N°1/81).

En las restantes 3 Estaciones, Galo Herrera, MPS Bajo y MPS Alto, ubicadas a una distancia de 150 m, 275 m y 475 m, respectivamente, de la Estación Cancha de Carbón, las Tasas de Sedimentación de carbón son considerablemente menores (Figura 7) y en ninguno de los 3 meses de monitoreo sobrepasan el límite diario de 150 mg/m²/día que precisa el D.E. 4/91 del Ministerio de Agricultura (norma Cuenca del Río Huasco).

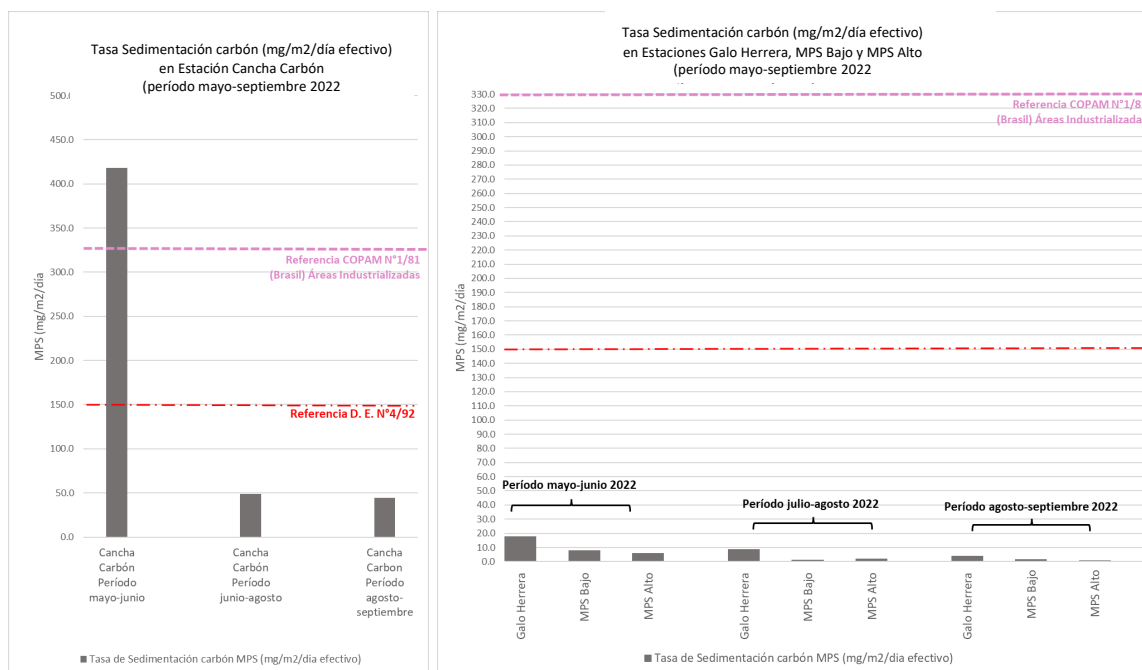


Figura 7 Tasa Sedimentación Carbón en las 4 Estaciones y su variación en los 3 meses de monitoreo comparada con límite fijado por D.E. N°4/92

La amplia diferencia entre la Tasa de Sedimentación de carbón en la Estación Cancha Carbón entre el mes 1 y meses 2 y 3 puede ser explicada por uno o más de los siguientes eventos:

- Menor humedad de los carbones almacenado en el mes de mayo 2022.
- Posibles trabajos de retiro de carbón desde la cara Nor-oriente de la cancha del CTV.
- Aumento de ráfagas de viento, tras las cuales sedimenta más carbón
- Mayor sedimentación de carbón asociada a trabajos de reparación/recambio de las mallas perimetrales.

De acuerdo a información proporcionada por AES-Andes, justamente en el mes de mayo se efectuaron trabajos de retiro y cambio de malla en el sector donde está instalado el colector Cancha Carbón, por lo cual, esta parece ser la causa más probable de la alta Tasa de Sedimentación de carbón en el mes 1.

9 CONCLUSIONES

9.1 Tasa de sedimentación MPS Total

- 7) Los valores más altos de Tasa de Sedimentación en los 3 meses de monitoreo se observan en el mes 1 en todas las Estaciones, sin embargo, son considerablemente más altos en la Estación Cancha Carbón.
- 8) En el mes 2 y 3, todas las Estaciones acusan reducción de las Tasas de Sedimentación, desde los máximos observados en el mes 1. La máxima disminución se registra en la Estación Cancha Carbón, donde la Tasa de Sedimentación se reduce del orden de 9 veces en el mes 2 y 8,6 veces en el mes 3. En las otras estaciones la disminución de las Tasas de Sedimentación en considerablemente menor (entre 5 a 2 veces).
- 9) La Estación Cancha Carbón, en los 3 meses y la Estación MPS Alto, en el mes 1, superan el valor límite de $150 \text{ mg/m}^2 / \text{día}$ que precisa la norma para la Cuenca del Río Huasco.

Los puntos señalados sugieren un comportamiento anómalo del MPS en la Estación Cancha Carbón, discordante con las otras 3 estaciones. Esta discordancia puede ser explicada por trabajos de mantenimiento durante mayo 2022 en las mallas perimetrales cercanas al colector pasivo.

9.2 Granulometría MPS Insoluble

Los resultados de la granulometría laser señalan valores mínimos uniformes en todas las Estaciones durante los 3 meses de monitoreo (promedio $0,095 \mu\text{m}$), mientras que el tamaño máximo de partículas promedio fluctúa entre $139,392 \mu\text{m}$ (Estación MPS Alto) y $281,270 \mu\text{m}$ (Estación MPS Bajo).

9.3 Componentes del MPS insoluble

- 1) Mayoritariamente está compuesto de partículas antrópicas. Componentes naturales, como restos de vegetales, representan solo entre 1,0% a 3,4% del MPS Insoluble.
- 2) Los residuos de combustión son el principal componente del MPS en todas las Estaciones, excepto en la Estación Cancha Carbón, en los 3 meses de Monitoreo. La Estación MPS Alto presenta el porcentaje más alto de residuos de combustión (promedio de 88,305%).
- 3) El carbón es el segundo componente más abundante del MPS insoluble, con valores significativamente más altos en la Estación Cancha Carbón y Estación Galo Herrera, ambas dentro de las dependencias del CTV y, valores más bajos en Estación MPS Alto.

- 4) Partículas metálicas del tipo sulfuros de Cu están presentes en porcentaje relativamente similar en las 4 Estaciones, con porcentaje promedio levemente superior (8,566%) en la Estación Galo Herrera.

9.4 Carbón en el MPS

- 1) El porcentaje promedio de carbón en los 3 meses de monitoreo es significativamente más alto en la Estación Cancha de Carbón (31,28%), disminuyendo de manera sostenida a medida que aumenta la distancia a las instalaciones del CTV: 12,69% en Estación Galo Herrera, 4,56% en Estación MPS Bajo y solo 2,71% en la Estación MPS Alto (disminución de 2,5 veces, 6,7 veces, 11,5 veces, respectivamente).
- 2) El tamaño promedio de las partículas de carbón es mayor en las Estaciones MPS Bajo (224,4 μm), Cancha Carbón (220,1 μm) y Galo Herrera (157,6 μm), mientras que en la Estación MPS Alto, la más alejada de las Instalaciones del CTC, el tamaño promedio se reduce considerablemente (90,2 μm).

9.5 Tasa de Sedimentación del carbón

- 1) La Tasa de Sedimentación del carbón es extremadamente alta en la Estación Cancha Carbón (418,048 $\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$) en el mes 1 (coincidente con trabajos de mantención de las mallas protectoras en las cercanías del colector pasivo) y disminuye drásticamente en 8,6 veces en el mes 2 y 9,5 veces en el mes 3.
- 2) En las restantes 3 Estaciones, Galo Herrera, Ventana Bajo y Ventana Alto, ubicadas a una distancia de 150 m, 275 m y 475 m, respectivamente, de la Estación Cancha de Carbón, las Tasas de Sedimentación de carbón son considerablemente menores, con valor promedio de 9,475 $\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$ en la Estación MPS Bajo, 1,421 $\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$ en la Estación Galo Herrera y solo 0,292 $\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$ en la Estación MPS Alto.
- 3) La Tasa de Sedimentación del carbón sobrepasa el límite diario de 150 $\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$ solamente en la Estación Cancha Carbón, mes 1. De acuerdo a lo informado por AES-Andes, la explicación posible de esta anomalía estaría relacionada con trabajos de mantención de las mallas en las cercanías del colector Cancha Carbón.

10 Referencias

- D. N°4/1992 Exento del Ministerio de Agricultura. Normas de Calidad del Aire para Material Particulado Sedimentable en la Cuenca del Río Huasco III Región.
- Feng, S. & Li, Y. Study on coal fly ash classified by bulk density. J. Phys.: Conf. Ser. 1732 012127. doi.org/10.1088/1742-6596/1732/1/012127
- D.E. N°223/2015 del Ministerio del Medio Ambiente, Instrucciones Generales sobre la Elaboración del Plan de Seguimiento de Variables Medioambientales.
- Minerals Densities. The Engineering Toolbox (www.engineeringtoolbox.com)
- Saiah, R., Perrin, B. & Rigal, L. 2010. Improvement of thermal properties of fires clays by introduction of vegetable matter. J. Building Physics, 34 (2): 124-142. doi.org/10.1177/1744259109360059
- Santos, J.M. Reis, N.C., Galvão E.S., Silveira, A., Goulart, E. V. & Lima, A. T. 2017. Source apportionment of settleable particles in an impacted urban and industrialized region in Brazil. *Environ Sci Pollut Res* 4(27): 22026-22039.
- Severin, K. 2004. Energy Dispersive Spectrometry of Common Rock Forming Minerals. Kluwer Acad. Pu. 219 p.
- Suarez-Ruiz, I. et al. (2017) Development of a petrographic classification of fly-ash components from coal combustion and co-combustion. (An ICCP Classification System, Fly-Ash Working Group – Commission III.). *Inter. Jour. Coal Geology*, 183: 188-203.
- Valentim, et al. 2018. Undifferentiated Inorganics in Coal Fly Ash and Bottom Ash: Calcipheres, magnesiocalcipheres and Magnesiaspheres. *Minerals* 2018, 8, 140; doi:10.3390/min8040140.
- Vallack, H. W. & Shillito, D. E. 1998. Suggested guidelines for deposited ambient dust. *Atmospheric Environment* Vol. 32 (16,): 737—2744.
- Wood, G., Kehn T., Carter, D. & Culberston, W. Coal Resource Classification System of the US Geological Survey. Geological Survey Circular 891. <http://pubs.usgs.gov/circ/c891/table2.htm>



Dra. María Eugenia Cisternas S.
Geóloga-Mineralogista
GEO-FORENSIC SpA

INFORME DE CARACTERIZACION INTEGRAL DEL MPS
COLECTADO EN 4 ESTACIONES CON COLECTORES
PASIVOS (CANCHA CARBÓN, GALO HERRERA, MPS
BAJO Y MPS ALTO) EN O CERCA DE LAS
INSTALACIONES DEL COMPLEJO TERMoeLECTRICO
VENTANAS DE AES-ANDES. Mes 7, 8 y 9 (diciembre
2022-marzo 2023). PUCHUNVAVI, 5° REGION, CHILE
Dra. María Eugenia Cisternas S

Fecha Informe: 9 de mayo de
2023

Tabla de contenido

RESUMEN EJECUTIVO	3
1 INTRODUCCIÓN	5
2 OBJETIVOS.....	7
2.1 METODOLOGÍA DE MUESTREO Y ANÁLISIS DEL MPS	8
2.2 INSTALACIÓN DE COLECTORES PASIVOS Y RECOLECCIÓN DE MUESTRAS.....	8
2.3 REMOCIÓN DEL MPS DESDE LAS BOTELLAS, DETERMINACIÓN DE LA MASA DEL MPS TOTAL, SOLUBLE E INSOLUBLE ...	9
2.4 ESTUDIO COMPOSICIONAL DEL MPS INSOLUBLE Y CUANTIFICACIÓN DE LA FRACCIÓN CORRESPONDIENTE A CARBÓN. .	9
3 MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS	10
3.1 CARACTERIZACIÓN GRANULOMÉTRICA DEL MPS	10
3.2 IDENTIFICACIÓN DE COMPONENTES DEL MPS INSOLUBLE MEDIANTE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA (SEM/EDS)	10
3.3 DETERMINACIÓN PORCENTUAL DE TIPOS DE PARTÍCULAS ANTRÓPICAS EN EL MPS.....	11
4 RESULTADOS MPS SOLUBLE	13
4.1 MASA DE MPS SOLUBLE	13
4.2 TASA DE CONCENTRACIÓN MPS SOLUBLE.....	13
4.3 TASA DE SEDIMENTACIÓN MPS SOLUBLE	14
5 RESULTADOS MPS INSOLUBLE	17
5.1 GRANULOMETRÍA DE MPS INSOLUBLE	17
5.2 COMPOSICIÓN DEL MPS INSOLUBLE	17
5.3 MASA Y PORCENTAJE EN MASA DE LOS COMPONENTES DEL MPS INSOLUBLE	19
5.4 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL MPS INSOLUBLE	21
6 RESULTADOS REFERIDOS AL COMPONENTE CARBÓN DEL MPS INSOLUBLE	23
6.1 MASA, PORCENTAJE Y TAMAÑO DE PARTÍCULAS DE CARBÓN.....	23
6.2 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL CARBÓN	24
7 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	26
7.1 COMPONENTES ANTRÓPICOS Y SU PROPORCIÓN EN EL MPS	26
7.2 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL MPS TOTAL	27
7.3 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL CARBÓN	30
8 CONCLUSIONES	33
8.1 TASA DE SEDIMENTACIÓN MENSUAL MPS	33
8.2 TASA DE SEDIMENTACIÓN DIARIA DEL MPS SOLUBLE	33
8.3 GRANULOMETRÍA MPS INSOLUBLE	33
8.4 COMPONENTES DEL MPS INSOLUBLE.....	33
8.5 CARBÓN EN EL MPS.....	34
8.6 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL CARBÓN	34
9 REFERENCIAS.....	36

LISTA DE TABLAS

TABLA 1 MASA MPS SOLUBLE (MG) MEDIDA Y NORMALIZADA A 30 DÍAS DURANTE LOS 3 MESES DE MONITOREO DEL PERÍODO DICIEMBRE 2022-MARZO 2023	13
TABLA 2 VARIACIÓN TASA DE SEDIMENTACIÓN MENSUAL MPS SOLUBLE, EFECTIVA Y NORMALIZADA A 30 DÍAS (DICIEMBRE 2022-MARZO 2023)	14

TABLA 3 TASA DE SEDIMENTACIÓN DIARIA MPS SOLUBLE CALCULADA POR DÍA EFECTIVO (DICIEMBRE 2022-MARZO 2023)	15
TABLA 4 TAMAÑO PARTÍCULAS MPS INSOLUBLE EN LAS 4 ESTACIONES DURANTE LOS 3 MESES DE MONITOREO (DICIEMBRE 2022-MARZO 2023)	17
TABLA 5 MASA POR TIPO DE PARTÍCULA EN LAS 4 ESTACIONES, EN LOS 3 MESES DE MONITOREO DEL PERÍODO DICIEMBRE 2022-MARZO 2023	20
TABLA 6 PORCENTAJE EN MASA POR TIPO DE PARTÍCULA EN LAS 4 ESTACIONES, EN LOS 3 MESES DE MONITOREO DEL PERÍODO DICIEMBRE 2022-MARZO 2023	20
TABLA 7 MASA Y PORCENTAJE PROMEDIO DE COMPONENTES EN MPS INSOLUBLE (DICIEMBRE 2022 A MARZO 2023).....	20
TABLA 8 TASA DE SEDIMENTACIÓN DE MPS INSOLUBLE MENSUAL Y DIARIA EN EL PERÍODO DICIEMBRE 2022-MARZO 2023.....	21
TABLA 9 PORCENTAJE (EN MASA) DEL CARBÓN EN EL MPS INSOLUBLE EN LAS 4 ESTACIONES (DICIEMBRE 2022-MARZO 2023)	24
TABLA 10 TAMAÑO MÍNIMO Y MÁXIMO (EN MICRONES) DE LAS PARTÍCULAS DE CARBÓN, PERÍODO DICIEMBRE 2022-MARZO 2023	24
TABLA 11 TASA SEDIMENTACIÓN CARBÓN POR ESTACIÓN EN EL PERÍODO DICIEMBRE 2022-MARZO 2023.....	25
TABLA 12 VALORES LÍMITES DE TASA DE SEDIMENTACIÓN DE MPS (MG/M ² /DÍA)	28
TABLA 13 TASA DE SEDIMENTACIÓN DIARIA DE MPS SOLUBLE, INSOLUBLE Y TOTAL EN LAS 4 ESTACIONES Y EN LOS 3 MESES DE MONITOREO	29

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 UBICACIÓN ESPACIAL SOBRE IMAGEN GOOGLE EARTH DE LAS 4 ESTACIONES DE MONITOREO	6
FIGURA 2 MODELO DE COLECTOR PASIVO INSTALADO EN 4 ESTACIONES DEL CTV.....	9
FIGURA 3 CONCENTRACIÓN (G/L) COMPARADA DEL MPS SOLUBLE EN EL PERÍODO DICIEMBRE 2022-MARZO 2023	14
FIGURA 4 MASA DE CARBÓN REGISTRADA EN LAS 4 ESTACIONES Y VARIABILIDAD EN EL PERÍODO DICIEMBRE DE 2022-MARZO 2023.	23
FIGURA 5 EVOLUCIÓN PORCENTUAL (% EN MASA) DE LOS COMPONENTES DEL MPS INSOLUBLE EN LAS 4 ESTACIONES (PERÍODO DICIEMBRE 2022-MARZO 2023).....	26
FIGURA 6 TASA DE SEDIMENTACIÓN MENSUAL Y DIARIA DEL MPS EN LAS 4 ESTACIONES (DICIEMBRE 2022-MARZO 2023)	30
FIGURA 7 TASA SEDIMENTACIÓN CARBÓN DIARIA EN LAS 4 ESTACIONES (DICIEMBRE 2022-MARZO 2023)	31

LISTA DE LAMINAS

LÁMINA 1. A: SEM/BSE; B: SEM/EDS MAPPING DE C, O, AL, SI, FE, CU Y S; C ; C: MAPPING DE C	19
---	----

RESUMEN EJECUTIVO

El presente Informe se enmarca en el Plan de Muestreo de Material Particulado Sedimentable (MPS) de 12 meses de duración, autorizado mediante la Resolución N° 00045 (02 de junio 2022) de la Secretaría Regional Ministerial de Salud (SRMS) de la Región de Valparaíso, cuyo objetivo principal es evaluar la eficacia del Sistema de Control de dispersión de material, específicamente de las partículas de carbón, hacia el exterior del Complejo Termoeléctrico Ventanas.

El Plan de Muestreo considera la caracterización del MPS depositado mensualmente en 4 Estaciones provistas de colectores pasivos, durante 1 año, con informes trimestrales de resultados. Las Estaciones son: Cancha Carbón, ubicada al interior de la cancha de acopio de carbón del CTV; Galo Herrera, ubicada fuera de la cancha, aunque dentro de las dependencias de AES-Andes; MPS Bajo, localizada dentro del área de protección de la pantalla deflectora y MPS Alto, dispuesta cerca del área de protección de la pantalla deflectora. Las dos últimas estaciones se ubican en el sector La Greda.

Las variables ambientales principales consideradas en el Plan de Monitoreo son: 1) el porcentaje de carbón presente en el MPS insoluble; 2) la variación del porcentaje de carbón en las cuatro estaciones; 3) el gradiente de dispersión del carbón desde la cancha de acopio de este material, hacia las 3 otras estaciones.

Este informe presenta los resultados de los meses 7, 8 y 9 (diciembre 2022-enero 2023, enero-febrero 2023 y febrero-marzo 2023) del Programa de Monitoreo por un año, comprometido por AES-Andes. En la Estación Galo Herrera no hubo registro del MPS en el tercer mes, motivado por la sustracción del colector.

Las conclusiones de este tercer período monitoreo son:

- 1) La Tasa de Sedimentación diaria del MPS total supera el valor límite de 150 mg/m² /día que precisa la norma secundaria para la Cuenca del Río Huasco (D.E. N°4/92) en:
 - Estación Cancha Carbón en los tres meses monitoreados (diciembre 2022-marzo 2023)
 - Estación Galo Herrera, sobrepasa levemente el límite en el primer mes (diciembre 2022-enero 2023)
 - Estación MPS Bajo en el primer mes (diciembre 2022-enero 2023)
 - Estación MPS Alto en los 3 meses del período (diciembre 2022-marzo 2023).
- 2) El MPS insoluble consta de partículas antrópicas (residuos de combustión de carbón, carbón crudo y partículas metálicas tipo sulfuros de Cu), con componentes naturales (briznas de vegetales) en proporción muy minoritaria (entre 1,9% a 2,9%, valores promedio tres meses).
- 3) El carbón es el segundo componente más abundante del MPS insoluble en todas las Estaciones, después de los residuos de combustión. El porcentaje promedio de carbón en los 3 meses de monitoreo es significativamente más alto en la Estación Cancha Carbón (45,8%), disminuyendo drásticamente a 16,3% en la Estación Galo Herrera, a 5,6% en la Estación MPS Bajo y solo 2,3% en la Estación MPS Alto.

- 4) La Tasa de Sedimentación del Carbón (promedio 3 meses: 252,124 mg/m²/día) sobrepasa el límite diario de 150 mg/m²/día (norma D.E. N°4/1992) solamente en la Estación Cancha Carbón en los 3 meses.
- 5) La Tasa promedio de Sedimentación del Carbón en las restantes tres Estaciones es considerablemente más baja que en la Estación Cancha Carbón 17,385 mg/m²/día efectivo en Galo Herrera; 7,109 mg/m²/día efectivo en MPS Bajo y solo 3,333 mg/m²/día efectivo en MPS Alto.

Como el aporte de partículas de carbón desde la cancha de carbón se reduce considerablemente hacia zonas externas, la Tasa promedio de Sedimentación del Carbón decrece abruptamente en 93,1% en la Estación Galo Herrera, en 97,2% en la Estación MPS Bajo y en 98,7 en la Estación MPS Alto. Se concluye, entonces, que las medidas de control de la dispersión de las partículas de carbón, adoptadas por AES-Andes son efectivas.

1 INTRODUCCIÓN

A solicitud de AES-Andes, a través del Departamento Gestión Ambiental Complejo Centro, Geo-Forensic SpA realizará la caracterización integral del Material Particulado Sedimentable (MPS), con particular énfasis en la participación del carbón dispersado desde la cancha de acopio de este material hacia sectores ubicados en las cercanías de las instalaciones de Complejo Termoeléctrico Ventanas (CTV), Comuna de Puchuncaví, Región de Valparaíso. Este estudio se enmarca en un Plan de Muestreo de Material Particulado Sedimentable (MPS) de 12 meses de duración.

El Plan de Muestreo de Material Particulado Sedimentable fue autorizado mediante la Resolución N° 00045 de la Secretaría Regional Ministerial de Salud (SRMS) de la Región de Valparaíso fechada el 02 de junio 2022. Dicha resolución autoriza el *Sistema de control y dispersión de material hacia el exterior de la instalación y su mecanismo de verificación de efectividad de la Cancha de almacenamiento de carbón* del Complejo Termoeléctrico Ventanas, (CTV) propiedad de AES ANDES S.A. El material al que hace referencia corresponde única y exclusivamente al *manejo de carbones Bituminosos y Sub-bituminosos acopiados en la cancha de carbón del CTV*.

En la Figura 1 se señala la ubicación espacial sobre imagen Google Earth de las 4 Estaciones de Monitoreo indicadas en la Resolución N° 00045 del SRMS.



Figura 1 Ubicación espacial sobre imagen Google Earth de las 4 Estaciones de Monitoreo

- Estación Cancha Carbón (coordenadas geográficas 267662.17 E; 6373667.19 S), ubicada al interior de la cancha de acopio de carbón.
- Estación Galo Herrera, (coordenadas geográficas 267760,87 E y 6373794.17 S) localizada fuera de la cancha, aunque dentro de las dependencias de AES ANDES.
- Estación MPS Bajo (coordenadas geográficas N), 267669 E, 6373931 N) ubicada dentro del área de protección de la pantalla deflectora.
- Estación MPS Alto (coordenadas geográficas 267774 E; 6374087 N), ubicada cerca del área de protección de la pantalla deflectora.

Las Estaciones MPS Alto y MPS Bajo están ubicadas en el poblado La Greda.

Las variables ambientales principales consideradas en el Plan de Monitoreo son:

- 1) El porcentaje de carbón presente en el MPS insoluble.
- 2) La variación del porcentaje de carbón en las cuatro estaciones.
- 3) El gradiente de dispersión del carbón desde la cancha de acopio de este material, hacia las 3 otras estaciones del Plan de Muestreo de MPS.

El presente Informe, el 3° Informe Trimestral desde el inicio del Monitoreo por un año comprometido por AES-Andes, se hace cargo de los resultados obtenidos en los meses 7 (diciembre 2022-enero 2023), 8 (enero-febrero 2023) y 9 (febrero-marzo 2023). Se hace presente que en la Estación Galo Herrera no hubo registro del MPS en el mes 9 (febrero-marzo 2023) debido a robo del colector completo.

Las citas de los dos Informes previos (Cisternas, 2022 y Cisternas, 2023) se encuentran en la sección Referencias.

2 OBJETIVOS

El Objetivo Principal del Plan de monitoreo es evaluar la eficacia del Sistema de Control de dispersión de material, específicamente de las partículas de carbón, hacia el exterior del Complejo Termoeléctrico Ventanas.

Las principales tareas a desarrollar para cumplir el Objetivo Principal son:

- Monitorear y caracterizar la cantidad de MPS acumulada en cada colector, con indicación de la Tasa de sedimentación del MPS soluble e insoluble.
- Monitorear y caracterizar la cantidad de MPS correspondiente a las partículas de carbón, con indicación de la masa acumulada en cada colector y cálculo de la Tasa de Sedimentación del Carbón expresada en $\text{mg}/\text{m}^2/\text{mes}$ y $\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$.
- Determinar la variación espacial y temporal de las Tasas de Sedimentación de carbón, considerando las variaciones en las 4 estaciones y variaciones en el lapso de tiempo considerado entre la instalación y la remoción de los colectores para el período que se informa.

Como Objetivo Secundario se aborda la comparación de las Tasas de Sedimentación del carbón con normas nacionales e internacionales.

Los parámetros que fueron utilizados para caracterizar el estado y evolución de las variables ambientales son:

- Masa soluble total
- Masa insoluble total
- Masa insoluble carbón
- Tasa de Sedimentación del MPS
- Tasa de Sedimentación del Carbón

2.1 METODOLOGÍA DE MUESTREO y ANÁLISIS DEL MPS

El término MPS (*Settleable Particulate Matter*, en inglés) se refiere a cualquier material compuesto de partículas lo suficientemente pequeñas como para pasar a través de una pantalla de 1 mm y lo suficientemente grandes como para depositarse desde el aire, en virtud de su peso, en el contenedor (Norma ASTM D 1739 – 98)¹.

2.2 Instalación de colectores pasivos y recolección de muestras

Para recolectar el Material Particulado Sedimentable se utilizaron colectores pasivos (Figura 2), con un radio de 0,249 m.

La empresa SGS Chile Ltda., fue la responsable de la instalación y mantención de los 4 colectores pasivos. El período aconsejado de recolección del MPS es del orden de 27 a 32 días, sin embargo en condiciones climáticas desfavorables, por ejemplo fuertes lluvias, las botellas de recolección pueden ser removidas y guardadas mientras dura el mal tiempo y, tras esto, recolocadas nuevamente en los colectores.

La remoción de las botellas desde los 4 colectores pasivos está a cargo de la Empresa SGS, quien envía mensualmente las botellas al Instituto de Geología Económica (GEA) de la Universidad de Concepción.

¹ Standard Test Method for Collection and Measurement of Dustfall (*Settleable Particulate Matter*)¹



Figura 2 Modelo de Colector pasivo instalado en 4 Estaciones del CTV.

2.3 Remoción del MPS desde las botellas, determinación de la masa del MPS total, soluble e insoluble

En el Instituto GEA, las botellas colectoras son tratadas con ultrasonido para retirar toda la masa adherida a la superficie interna. Posteriormente, se procede a:

- Determinación de sólidos insolubles: una vez removida toda la masa de las botellas colectoras se procede a la filtración de sólidos, utilizando un filtro de membrana de 0,45 micrones. Posteriormente, los sólidos son secados a 40°C y luego pesados, hasta peso constante.
- Determinación de sólidos solubles: Los sólidos solubles fueron determinados en la solución remanente de la filtración, según la norma ASTM D 1739 – 98.
- Determinar la granulometría de las partículas en la fracción insoluble mediante difracción laser.
- Entrega de la fracción insoluble a Geo-Forensic SpA.

2.4 Estudio composicional del MPS Insoluble y cuantificación de la fracción correspondiente a carbón.

Una vez recibidas las muestras de la fracción insoluble del MPS, por parte Geo-Forensic se procede al estudio integral de componentes mediante Microscopía Electrónica (SEM), con énfasis en el estudio del *componente carbón*.

3 MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS

3.1 Caracterización granulométrica del MPS

El análisis granulométrico de la masa total insoluble es realizado por el Instituto de Geología Económica Aplicada (GEA) de la Universidad de Concepción mediante el método de difracción láser en húmedo. El equipo utilizado es un analizador granulométrico láser Fritsch modelo Analysette 22 Microtec Plus. El análisis se realiza en húmedo, con aplicación de ultrasonido para obtener la máxima dispersión de partículas. El equipo posee un rango de medición de 0,08 a 2000 micrones (μm).

3.2 Identificación de componentes del MPS Insoluble mediante microscopía electrónica (SEM/EDS)

Considerando que las partículas del MPS tienen tamaño micrométrico, la caracterización textural y composicional de los diferentes tipos de partículas presentes en el MPS insoluble se realiza mediante microscopio electrónico de barrido (SEM)

El equipo utilizado corresponde a un TSCAN, VEGA III, equipado con detector de electrones retro-dispersados (Modo BSE), detector de electrones secundarios (Modo SE) y detector de rayos x de energía dispersiva (Modo EDS). Este equipo pertenece al Centro de Microscopía Avanzada del Bío-Bío (CMA), ubicado en dependencias de la Universidad de Concepción.

En un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM: Scanning Electron Microscopy por sus siglas en inglés) el bombardeo de electrones sobre la muestra produce varias formas simultáneas de radiación, entre ellas, la emisión de electrones secundarios (SE), electrones retro-dispersados (BSE) y emisión de rayos X. Cada una de esas formas de radiación es capturada por un detector específico.

Detector SE versus detector BSE

La imagen entregada por el SEM se genera por la interacción del haz de electrones que “barre” un área determinada sobre la superficie de la muestra. La detección de los electrones secundarios o retro-dispersados en un gran número de puntos sobre el área barrida, previa transformación electrónica, genera la imagen que se visualiza en una pantalla y es fotografiada mediante una cámara adosada al equipo.

El detector SE es ideal para generar imágenes SEM de alta resolución que permiten obtener detalles de la morfología y textura superficial de las partículas. El detector BSE ofrece una imagen de menor resolución, pero tiene la ventaja de que es sensible a las variaciones en el número atómico de los

elementos presentes en la superficie, permitiendo discriminar sobre la imagen partículas de diferente composición.

Cada imagen SEM incorporada en este estudio contiene información impresa de las condiciones de trabajo (voltaje de aceleración de electrones, distancia de trabajo, magnificación) y una escala gráfica que permite identificar el tamaño de las partículas. La intensidad del haz de electrones utilizada fluctuó entre 10 y 12 mV.

Detector EDS para determinación química de componentes

El detector EDS analiza los rayos X generados por el bombardeo de electrones mediante la espectroscopía de rayos X de energía dispersa (EDS por sus siglas en inglés). Permite identificar los elementos presentes en el punto de incidencia del haz de electrones sobre una partícula, o en un área previamente determinada que será barrida por el haz de electrones. Se obtiene así un espectro con los *peaks* de los elementos presentes en el punto de incidencia, con dato del porcentaje elemental o en masa de esos elementos. O bien, si se combina con la detección de electrones retro-dispersados en un área, se obtiene una suerte de “mapa” con la distribución de los elementos presentes en la muestra (herramienta *mapping*).

Los espectros EDS aplicados a los objetivos de este estudio, aportan información invaluable para diferenciar la naturaleza de las partículas sólidas, es decir distinguir carbón crudo, de residuos de combustión, de otras partícula metálicas o bien de partículas vegetales.

Como material de referencia para la identificación de los diferentes tipos de residuos de combustión fueron utilizados los estudios de Suarez -Ruiz et al. 2017² y Valentim et al. 2018³. Para la identificación composicional de fases cristalinas mediante SEM se utilizó el trabajo de Severin, 2004⁴.

Montaje de las muestras para el estudio mediante microscopio electrónico

Las muestras fueron montadas en porta muestras de aluminio de 11 mm de diámetro (pines), recubiertos con cinta adhesiva de doble cara de carbono. El montaje de las partículas se realiza teniendo precaución que éstas no se superpongan entre sí, ya que eso puede afectar el espectro EDS de las partículas de interés. El análisis de las muestras se realizó sin grafitización previa de los porta muestras.

3.3 Determinación porcentual de tipos de partículas antrópicas en el MPS

² Suarez-Ruiz, I. et al. (2017) Development of a petrographic classification of fly-ash components from coal combustion and co-combustion. (An ICCP Classification System, Fly-Ash Working Group – Commission III.). *Inter. Jour. Coal Geology*, 183: 188-203.

³ Valentim, et al. 2018. Undifferentiated Inorganics in Coal Fly Ash and Bottom Ash: Calciphères, magnesiocalciphères and Magnesiaspheres. *Minerals* 2018, 8, 140; doi:10.3390/min8040140.

⁴ Severin, K. 2004. Energy Dispersive Spectrometry of Common Rock Forming Minerals. Kluwer Acad. Pu. 219 p.

Para determinar el porcentaje de partículas identificadas en el MPS Insoluble se utiliza un programa digital que emula un contador automático de puntos. Mediante este programa se determinó la relación porcentual relativa, en volumen, de las partículas naturales y antrópicas presentes en las muestras, utilizando para ello 3 imágenes SEM por muestra, obtenidas con el detector BSE a baja magnificación (100x) y alta resolución.

El porcentaje en masa de los componentes fue determinado utilizando valores de densidad promedio para los diferentes tipos de partículas, como se indica a continuación:

Partículas naturales:

- Briznas de vegetales⁵: 1,5 g/cm³

Partículas antrópicas:

- Partículas de carbón⁶: 1,4 g/cm³ (valores fluctúan entre 1,47 y 1,29 g/cm³)
- Residuos de Combustión⁷: 2,5 g/cm³ (valores fluctúan entre 1,9 a 2,9 g/cm³)
- Partículas Metálicas⁸: 5,0 g/cm³ (sulfuros de Cu-Fe: 4,9 g/cm³; Magnetita: 5,2 g/cm³)

⁵ Saiah, R., Perrin, B. & Rigal, L. 2010. Improvement of thermal properties of fires clays by introduction of vegetable matter. *J. Building Physics*, 34 (2): 124-142. doi.org/10.1177/1744259109360059

⁶ Wood, G., Kehn T., Carter, D. & Culberston, W. Coal Resource Classification System of the US Geological Survey. Geological Survey Circular 891. <http://pubs.usgs.gov/circ/c891/table2.htm>

⁷ Feng, S. & Li, Y. Study on coal fly ash classified by bulk density. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1732 012127. doi.org/10.1088/1742-6596/1732/1/012127

⁸ Minerals Densities. The Engineering Toolbox (www.engineeringtoolbox.com)

4 RESULTADOS MPS soluble

4.1 Masa de MPS soluble

En la Tabla 1 se indica la masa de MPS Soluble determinado en las muestras del período que se informa, considerando los días efectivos de acumulación de MPS. Nótese que en el último mes de este período (mes 9 del Monitoreo: 9 febrero a 9 marzo 2023) no hubo registro en la Estación Galo Herrera por robo del colector completo.

Fecha de Inicio	Fecha Final	Estación	Período de Muestreo en días efectivos	Masa soluble medida (g)	Masa soluble medida (mg)	Masa soluble normalizada a 30 días (mg)
16-12-22	09-01-23	Cancha Carbón	24	0,1345	134,5	168,1
16-12-22	09-01-23	Galo Herrera	24	0,1209	120,9	151,1
09-12-22	09-01-23	MPS Bajo	31	0,1691	169,1	163,6
09-12-22	09-01-23	MPS Alto	31	0,0718	71,8	69,5
09-01-23	09-02-23	Cancha Carbón	31	0,1453	145,3	140,6
09-01-23	09-02-23	Galo Herrera	31	0,1163	116,3	112,5
09-01-23	08-02-23	MPS Bajo	30	0,1033	103,3	103,3
09-01-23	08-02-23	MPS Alto	30	0,1358	135,8	135,8
09-02-23	09-03-23	Cancha Carbon	28	0,4367	436,7	467,9
		Galo Herrera	sin registro			
08-02-23	09-03-23	MPS Bajo	29	0,1133	113,3	117,2
08-02-23	09-03-23	MPS Alto	29	0,1571	157,1	162,5

Tabla 1 Masa MPS Soluble (mg) medida y normalizada a 30 días durante los 3 meses de monitoreo del período diciembre 2022-marzo 2023

4.2 Tasa de Concentración MPS soluble

En la Figura 3 se grafica la concentración de solubles en las estaciones para el período diciembre 2022-marzo 2023 (mes 7, 8 y 9). En el mes 4 (septiembre-octubre) los valores son más altos en la Estación Cancha Carbón y significativamente más bajos las restantes 3 estaciones. El mes 5 (octubre-noviembre) las comparaciones se entorpecen por las diferencias en el tiempo de acumulación del MPS en las diferentes Estaciones. En el mes 6 (noviembre diciembre) se aprecia mayor Tasa de Concentración de MPS soluble en la Estación MPS Bajo, seguido de la estación Cancha Carbón Galo Herrera, mientras que la Estación MPS Alto muestra la menor concentración.

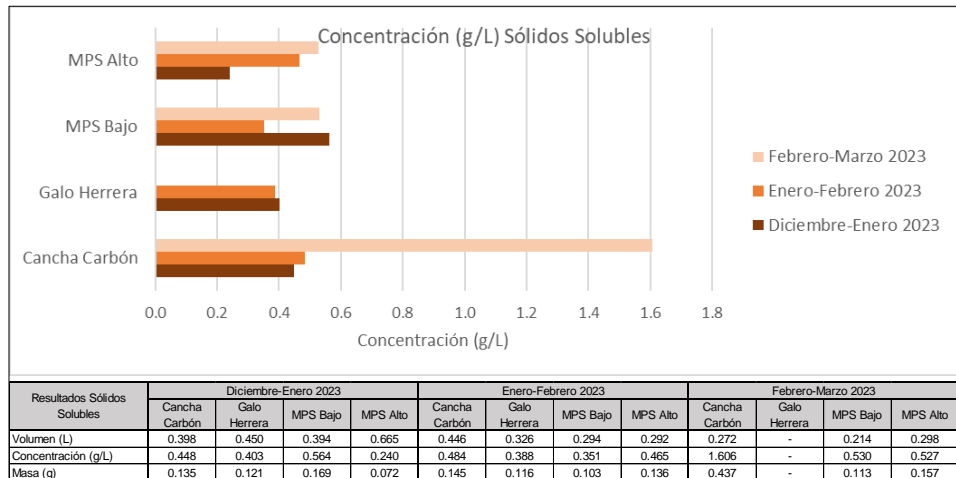


Figura 3 Concentración (g/L) comparada del MPS soluble en el período diciembre 2022-marzo 2023

4.3 Tasa de Sedimentación MPS Soluble

En la Tabla 2 se registra la Tasas de Sedimentación mensual del MPS soluble, calculada tomando en consideración los días efectivos para cada período y valores derivados de normalizar a mes 30 días, como sugiere la norma secundaria de la Cuenca del Río Huasco (D.E. N°4/92). Las diferencias observadas hacen aconsejable que en lo sucesivo el tiempo de recolección en los colectores pasivos respete el período de 30 días, para que los resultados se ajusten a la Tasa de Sedimentación real.

Fecha de Inicio	Fecha Final	Estación	Período de Muestreo en días efectivos	Tasa de Sedimentación MPS soluble (mg/m2/mes efectivo)	Tasa de Sedimentación MPS soluble (mg/m2/mes 30 días)
16-12-22	09-01-23	Cancha Carbón	24	690,517	863,146
16-12-22	09-01-23	Galo Herrera	24	620,695	775,868
09-12-22	09-01-23	MPS Bajo	31	868,151	840,146
09-12-22	09-01-23	MPS Alto	31	368,618	356,727
09-01-23	09-02-23	Cancha Carbón	31	745,963	721,900
09-01-23	09-02-23	Galo Herrera	31	597,079	577,818
09-01-23	08-02-23	MPS Bajo	30	530,337	530,337
09-01-23	08-02-23	MPS Alto	30	697,191	697,191
09-02-23	09-03-23	Cancha Carbon	28	2241,997	2402,139
		Galo Herrera		sin registro	
08-02-23	09-03-23	MPS Bajo	29	581,677	601,735
08-02-23	09-03-23	MPS Alto	29	806,544	834,356
		Promedio Tasa de Sedimentación MPS soluble (mg/m2/mes 30 días)			
		Cancha Carbón	1329,062		
		Galo Herrera *	676,843		
		MPS Bajo	657,406		
		MPS Alto	629,424		
		* promedio solo 2 meses			

Tabla 2 Variación Tasa de Sedimentación mensual MPS soluble, efectiva y normalizada a 30 días (diciembre 2022-marzo 2023)

La Tabla 3 registra la Tasa de Sedimentación diaria del MPS soluble. Los resultados muestran que:

- Estación Cancha Carbón: registra valores comparativamente bajos en el primer y segundo mes de este período (28,772 mg/m²/día efectivo y 24,063 mg/m²/día efectivo, respectivamente), mientras que en el tercer mes del período se registra un notorio incremento (80,071 mg/m²/día efectivo), del orden del 178,3% respecto al primer mes y de 232,8% respecto al segundo mes.
- Estación Galo Herrera: registra un decrecimiento del orden de 25,5% en el segundo mes (19,261 mg/m²/día efectivo), respecto del primer mes (25,862 mg/m²/día efectivo), En el tercer mes no hay registro por robo del colector.
- Estación MPS Bajo: en el primer mes se registra el valor más alto (28,005 mg/m²/día efectivo), el cual decrece del orden de 36,9% en el segundo mes (19,261 mg/m²/día efectivo), para aumentar levemente (13,5%) en el tercer mes (20,058 mg/m²/día efectivo).
- Estación MPS Alto: la Tasa se incrementa desde el primer mes (11,891 mg/m²/día efectivo) en 95,4% en el segundo mes (23,240 mg/m²/día efectivo) y en 19,7% desde el segundo al tercer mes (27,812 mg/m²/día efectivo).

Fecha de Inicio	Fecha Final	Estación	Período de Muestreo en días efectivos	Tasa de Sedimentación MPS soluble (mg/m ² /día efectivo)
16-12-22	09-01-23	Cancha Carbón	24	28,772
16-12-22	09-01-23	Galo Herrera	24	25,862
09-12-22	09-01-23	MPS Bajo	31	28,005
09-12-22	09-01-23	MPS Alto	31	11,891
09-01-23	09-02-23	Cancha Carbon	31	24,063
09-01-23	09-02-23	Galo Herrera	31	19,261
09-01-23	08-02-23	MPS Bajo	30	17,678
09-01-23	08-02-23	MPS Alto	30	23,240
09-02-23	09-03-23	Cancha Carbon	28	80,071
sin registro		Galo Herrera	sin registro	
08-02-23	09-03-23	MPS Bajo	29	20,058
08-02-23	09-03-23	MPS Alto	29	27,812
		PROMEDIO Tasa de Sedimentación MPS soluble (mg/m ² /día efectivo)		
		Cancha Carbón	44,302	
		Galo Herrera *	22,561	
		MPS Bajo	21,914	
		MPS Alto	20,981	
		* promedio solo 2 meses		

Tabla 3 Tasa de Sedimentación diaria MPS soluble calculada por día efectivo (diciembre 2022-marzo 2023)

El mayor valor promedio se registra en la Estación Cancha Carbón (44,302 mg/m²/día efectivo), seguido de Estación Galo Herrera (22,561 mg/m²/día efectivo), Estación MPS Bajo (21,914 mg/m²/día efectivo) y Estación MPS Alto (20,981 mg/m²/día efectivo). Los resultados muestran que,

con relación a la Tasa de Sedimentación diaria en la Estación Cancha Carbón, ésta se reduce prácticamente a la mitad en las otras 3 Estaciones.

5 RESULTADOS MPS insoluble

5.1 Granulometría de MPS insoluble

Los resultados del análisis granulométrico mediante difracción láser se presentan en la Tabla 4 (tamaño partículas en micrones).

Estación	Granulometría (µm)	Diciembre 2022- Enero 2023	Enero-Febrero 2023	Febrero-Marzo 2023	Promedio por Estación
Cancha Carbón	Mín	0,322	0,088	0,264	0,225
	Máx	305,746	305,746	205,462	272,318
Galo Herrera	Mín	0,355	0,291	-	0,323
	Máx	250,637	205,462	-	228,050
MPS Bajo	Mín	0,088	0,264	0,291	0,214
	Máx	168,429	152,496	186,026	168,984
MPS Alto	Mín	0,322	0,088	0,088	0,166
	Máx	113,184	113,184	113,184	113,184

Tabla 4 Tamaño partículas MPS insoluble en las 4 Estaciones durante los 3 meses de monitoreo (diciembre 2022-marzo 2023)

El tamaño mínimo promedio de las partículas es mayor en la Estación Galo Herrera, similar en las Estaciones Cancha Carbón y MPS Bajo y menor en la Estación MPS Alto.

Con relación al tamaño máximo, los valores promedio por estación permiten constatar una reducción sostenida del tamaño en función de la lejanía a la Estación Cancha Carbón. Así, la reducción del tamaño máximo es de un 16,3% en la Estación Galo Herrera, de 37,9% en la Estación MPS Bajo y de 58,4% en la Estación MPS Alto.

5.2 Composición del MPS insoluble

Los tipos de partículas reconocidas en las muestras son mayoritariamente antrópicas y, de manera muy subordinada, se observan partículas naturales que corresponden a partículas vegetales tipos brizas de pastizal.

La identificación de los tipos de partículas en el *MPS Insoluble*, dado su tamaño, se hizo mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), utilizando imágenes BSE de alta resolución, en combinación con imágenes en la modalidad *mapping*.

La inspección de las muestras con el Modo BSE permite identificar los diferentes tipos de partículas, gracias a que este detector contrasta, mediante la tonalidad en la imagen, la diferente composición de las partículas. De este modo, de acuerdo a la tonalidad observada en la imagen, se identifican los siguientes tipos de partículas:

1. Partículas gris oscuro-negro: corresponden a partículas de carbón crudo (sin evidencias de combustión) y chars (residuos de combustión con carbono remanente). También se ven de esta tonalidad las partículas de vegetales, las cuales se identifican por su forma (angosta y alargada), muy diferente a las partículas carbonosas (carbón y residuos de combustión).

2. Partículas gris medio: corresponden a residuos de combustión de composición aluminosilicatada, de forma esférica (cenosferas), prismática (mineroides feldespáticos y silíceos) o en granos compuestos (cenoesferas más mineroides).
3. Partículas gris claro: ferrosferas (forma esférica, contenido alto de Fe).
4. Partículas blanco brillante: minerales metálicos en la forma de óxidos de Fe (magnetita, hematita), sulfuros de Fe (pirita) y sulfuros de Cu-Fe (calcopirita).

A modo de ejemplo, en la Lámina 1-A se presenta una imagen SEM/BSE donde se identifican los diferentes componentes mencionados, de acuerdo a su tonalidad de gris.

En la Lámina 1-B se presenta una imagen BSE obtenida mediante la herramienta “mapping” del SEM/EDS, la cual posibilita realizar un mapeo areal por elementos a definir por el usuario. En este estudio se utilizó esta herramienta para conocer la distribución en el muestra de los elementos carbono (C), sílice (Si), aluminio (Al), hierro (Fe), cobre (Cu) y azufre (S) y con eso confirmar la composición de los componentes observados.

En la Lámina 1-C se presenta una imagen BSE con la distribución del elemento carbono (C).

Mediante el *mapping* por diferentes elementos fue posible identificar los siguientes tipos de partículas:

- Solo Si (color amarillo): partículas de sílice (cuarzo) formadas en la fase final del proceso de combustión del carbón (mineroides silíceos).
- Si + Al (color amarillo + color verde): partículas aluminosilicatadas formadas en la fase final del proceso de combustión del carbón (cenoesferas y mineroides de feldespato K y plagioclasa).
- Solo C (color rojo): partículas de carbón.
- C + Si + Al (color rojo + color amarillo + color verde): chars.
- S + Fe (color anaranjado + color azul): partículas de sulfuro de Fe (pirita).
- S + Cu + Fe (color naranja + color ciclamen + color azul): sulfuro de Cu-Fe (calcopirita).
- O + Fe (color celeste + color azul): Oxido de Fe (magnetita/hematita).

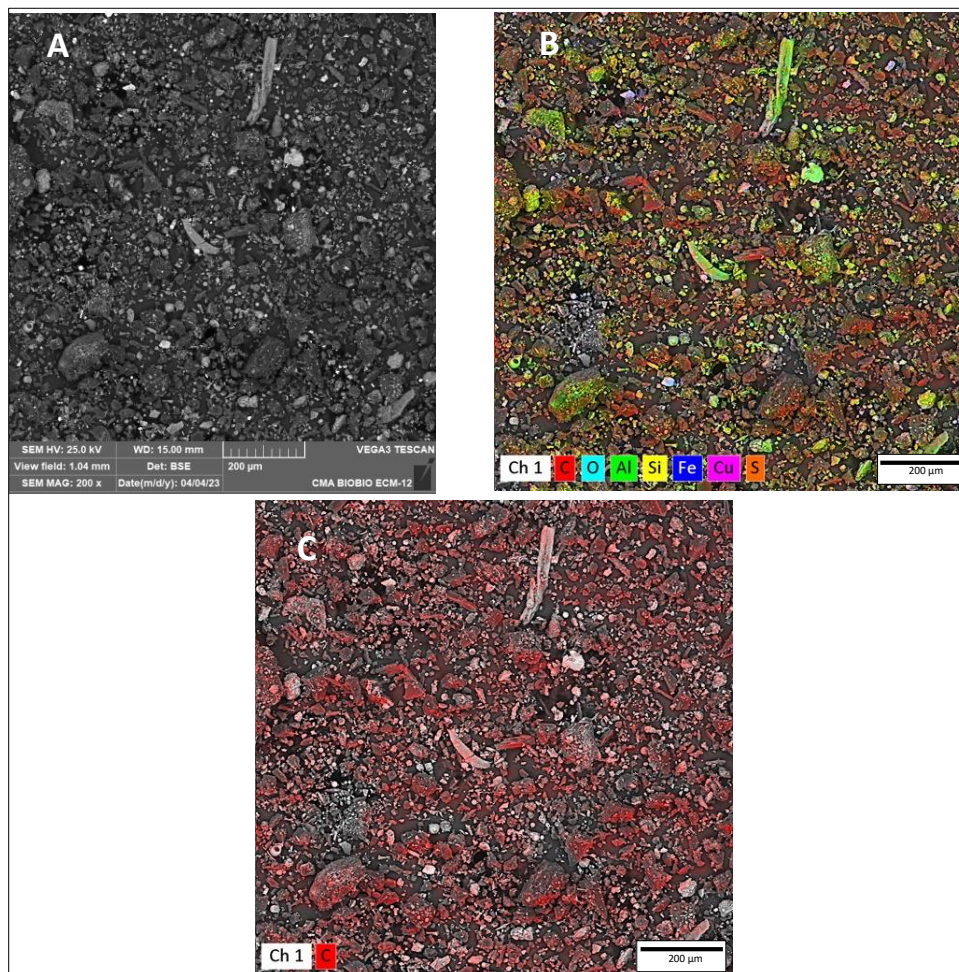


Lámina 1. A: SEM/BSE; B: SEM/EDS mapping de C, O, Al, Si, Fe, Cu y S; C: mapping de C

Información de detalle de la composición del MPS insoluble para cada una de las muestras estudiadas en este período (diciembre 2022-marzo 2023) está contenida en Fichas por muestra, las cuales se incorporarán como Anexo al Informe Anual.

5.3 Masa y porcentaje en masa de los componentes del MPS insoluble

La determinación porcentual en volumen de cada uno de los componentes del *MPS insoluble* se realizó mediante software especializado, contabilizando los diferentes tipos de componentes sobre 3 imágenes SEM/BSE por muestra. Una vez determinado el porcentaje (en volumen) de cada componente en cada muestra, se calculó la masa, multiplicando el porcentaje en volumen por el valor de densidad asignado a cada tipo de partícula⁹ (referencias en sección 2.4), normalizando el valor obtenido a la masa total colectada en la estación correspondiente (Tabla 5).

⁹

Brizas de vegetales: 1,5 g/cm³

Partículas de carbón: 1,4 g/cm³

Residuos de Combustión: 2,5 g/cm³ (los valores de densidad fluctúan entre 1,9 a 2,9 g/cm³)

Partículas Metálicas: 5,0 g/cm³ (sulfuros de Cu-Fe: 4,9 /cm³; Magnetita: 5,2 g/cm³)

Masa por tipo de partícula (g)	Diciembre 2022-Enero 2023				Enero-Febrero 2023				Febrero-Marzo 2023			
	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto
Partículas de carbón	1,524	0,105	0,086	0,019	1,310	0,074	0,021	0,022	1,165	sin registro	0,020	0,017
Residuos de combustión	1,161	0,419	0,871	1,149	1,342	0,389	0,352	1,085	1,338		0,439	1,007
Partículas metálicas	0,264	0,045	0,175	0,076	0,260	0,030	0,019	0,055	0,085		0,018	0,041
Vegetales	0,069	0,014	0,034	0,013	0,092	0,015	0,009	0,031	0,093		0,011	0,017
Total Colectado	3,019	0,582	1,166	1,257	3,004	0,510	0,401	1,193	2,681		0,488	1,083

Tabla 5 Masa por tipo de partícula en las 4 Estaciones, en los 3 meses de monitoreo del período diciembre 2022-marzo 2023

Una vez determinada la masa de los diferentes componentes, se procedió a determinar el porcentaje (en masa), con el propósito de determinar cuáles componentes tienen mayor influencia sobre la masa total del MPS Insoluble (Tabla 6).

Porcentaje por tipo de partícula (%)	Diciembre 2022-Enero 2023				Enero-Febrero 2023				Febrero-Marzo 2023			
	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto
Partículas de carbón	50,471	18,040	7,346	3,574	43,597	14,595	5,292	1,835	43,443	sin registro	4,068	1,603
Residuos de combustión	38,470	71,958	74,729	87,690	44,684	76,438	87,705	90,919	49,910		89,940	93,016
Partículas metálicas	8,760	7,677	15,015	7,196	8,649	5,984	4,761	4,626	3,180		3,787	3,793
Vegetales	2,299	2,326	2,910	1,540	3,069	2,983	2,242	2,621	3,466		2,205	1,589

Tabla 6 Porcentaje en masa por tipo de partícula en las 4 Estaciones, en los 3 meses de monitoreo del período diciembre 2022-marzo 2023.

El componente que, porcentualmente, más aporta a la masa del MPS insoluble, corresponde a residuos de combustión de carbón (ceniza volante) en todas las Estaciones de monitoreo, especialmente en la Estación MPS Alto. En la Estación Cancha Carbón solo en el primer mes de este período de monitoreo (diciembre 2022-marzo 2023) el porcentaje de residuos de combustión es menor que el porcentaje de partículas de carbón.

El segundo componente más abundante corresponde a partículas de carbón, con porcentaje significativamente más alto en la Estación Cancha Carbón.

Para una mejor comparación de los resultados, en la Tabla 7 se presentan los valores promedio de la masa, y porcentaje en que cada componente aporta el MPS insoluble.

Masa promedio (g) por tipo de componente en MPS insoluble	Masa promedio por estación				Porcentaje (%) promedio por tipo de componente en MPS insoluble	Porcentaje promedio por estación			
	Cancha Carbón	Galo Herrera*	MPS Bajo	MPS Alto		Cancha Carbón	Galo Herrera*	MPS Bajo	MPS Alto
Partículas de carbón	1,333	0,090	0,042	0,019	Partículas de carbón	45,837	16,318	5,569	2,337
Residuos de combustión	1,281	0,404	0,554	1,080	Residuos de combustión	44,355	74,198	84,125	90,541
Partículas metálicas	0,203	0,038	0,071	0,057	Partículas metálicas	6,863	6,830	7,854	5,205
Vegetales	0,085	0,014	0,018	0,020	Vegetales	2,945	2,655	2,452	1,917
Galo Herrera * promedio masa solo 2 meses					Galo Herrera * Porcentaje promedio solo 2 meses				

Tabla 7 Masa y Porcentaje promedio de componentes en MPS insoluble (diciembre 2022 a marzo 2023)

De la comparación de los resultados contenidos en Tabla 7 y Tabla 8, se destaca que:

- Los residuos de combustión de carbón contribuyen en promedio a la masa total del MPS insoluble con 1,3 g en la Estación Cancha Carbón y solo 0,4 g en la Estación Galo Herrera. En las Estaciones MPS Bajo y MPS Alto, contribuyen en promedio a la masa total con 0,6 g y 1,1 g, respectivamente. En términos porcentuales representan el 90,5% del MPS Insoluble en la Estación MPS Alto y solo el 44,4% en la Estación Cancha Carbón.

- El carbón aporta en promedio entre 1,3 gramos en la Estación Cancha Carbón y solo 0,02 g en la Estación MPS Alto. El porcentaje promedio de carbón más alto se registra en la Estación Cancha Carbón (45,8%) y el más bajo en la Estación MPS Alto (2,3%).
- Las partículas metálicas aportan al *MPS insoluble* con 0,2 g en la Estación Cancha Carbón y con valores que fluctúan entre 0,071 g y 0,039 g, en las restantes 3 Estaciones. Están presentes en porcentaje más alto en la Estación MPS Bajo (7,9%), con valores similares en la Estación Cancha Carbón (6,9%) y Galo Herrera (6,8%) y porcentaje más bajo (5,2%) en La Estación MPS Alto.
- Los restos vegetales presentan un porcentaje comparativamente más alto en la Estación Cancha Carbón (2,9%) y Galo Herrera (2,7%) y porcentajes más bajos en las Estaciones MPS Bajo (2,5%) y MPS Alto (1,9%). Su aporte a la masa del *MPS insoluble* varía entre 0,085 g en la Estación Cancha Carbón y entre 0,020 y 0,014 g en las estaciones restantes.

5.4 Tasa de Sedimentación del MPS insoluble

En la Tabla 8 se presentan las variables utilizadas para el cálculo de la Tasa de Sedimentación del MPS Insoluble en cada una de las 4 Estaciones durante cada mes de monitoreo en el período diciembre 2022-marzo 2023. Nótese la diferencia que se establece entre la Tasa de Sedimentación calculada utilizando el número de días de acumulación efectiva (columna A) y la Tasa de Sedimentación normalizada a mes de 30 días (columna B). La Tasa de Sedimentación diaria (Columna C) se ha calculado sobre la base del número días efectivos de acumulación del MPS.

Fecha de Inicio	Fecha Final	Estación	Período de Muestreo en días efectivos	A Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m2/mes efectivo)	B Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m2/mes de 30 días)	C Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m2/día efectivo)
16-12-22	09-01-23	Cancha Carbón	24	15498,374	19372,968	645,766
16-12-22	09-01-23	Galo Herrera	24	2987,447	3734,308	124,477
09-12-22	09-01-23	MPS Bajo	31	5984,648	5791,595	193,053
09-12-22	09-01-23	MPS Alto	31	6451,324	6243,217	208,107
09-01-23	09-02-23	Cancha Carbon	31	15424,445	14926,882	497,563
09-01-23	09-02-23	Galo Herrera	31	2615,749	2531,370	84,379
09-01-23	08-02-23	MPS Bajo	30	2058,715	2058,715	68,624
09-01-23	08-02-23	MPS Alto	30	6125,318	6125,318	204,177
09-02-23	09-03-23	Cancha Carbon	28	13762,072	14745,077	491,503
		sin registro			sin registro	
08-02-23	09-03-23	MPS Bajo	29	2503,315	2589,636	86,321
08-02-23	09-03-23	MPS Alto	29	5559,043	5750,734	191,691
			Promedio Periodo	Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m2/mes efectivo)	Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m2/mes de 30 días)	Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m2/día efectivo)
			Cancha Carbón	14894,964	16348,309	544,944
			Galo Herrera	2801,598	3132,839	104,428
			MPS Bajo	3515,559	3479,982	115,999
			MPS Alto	6045,228	6039,756	201,325

Tabla 8 Tasa de Sedimentación de MPS Insoluble mensual y diaria en el período diciembre 2022-marzo 2023.

Considerando los valores diarios de la Tasa de Sedimentación del MPS insoluble (Columna C de la Tabla 8), se destaca que:

- Estación Cancha de Carbón: respecto al primer mes (645,766 mg/m²/día efectivo) se observa decrecimiento de 22,9% en el segundo mes (497,563 mg/m²/día efectivo) y de 1,2 % del segundo al tercer mes (491,503 mg/m²/día efectivo).
- Estación Galo Herrera: respecto al primer mes (124,477 mg/m²/día efectivo) muestra un decrecimiento significativo en el segundo mes (84,379 mg/m²/día efectivo) del orden de 32,2%. En el tercer mes no hubo registro por robo del colector.

- Estación MPS Bajo: la tasa de sedimentación registrada en el primer mes (193,053 mg/m²/día efectivo) decrece en un 64,5% en el segundo mes (68,624 mg/m²/día efectivo) y se incrementa en 25,8% en el tercer mes (86,321 mg/m²/día efectivo). Pese a ese incremento, en el tercer mes la tasa se reduce en 55,3% respecto al primer mes.
- Estación MPS Alto: la tasa de sedimentación en el primer mes (208,107 mg/m²/día efectivo) decrece levemente (1,9%) en el segundo mes (204,177 mg/m²/día) y en el tercer mes (191,691 mg/m²/día efectivo) decrece un 6,1% respecto al mes 2.

Los valores diarios promedio (3 meses) de la Tasa de Sedimentación diaria del MPS insoluble, indican que el mayor valor promedio se registra en la Estación Cancha Carbón, seguido de Estación MPS Alto, Estación MPS Bajo y Estación Galo Herrera. Con respecto a la Estación Cancha Carbón, la tasa de Sedimentación diaria promedio del MPS insoluble se reduce en 80,8% en la Estación Galo Herrera, 78,7% en la Estación MPS Bajo y en 63,1% en la Estación MPS Alto.

6 RESULTADOS REFERIDOS AL COMPONENTE CARBÓN DEL MPS INSOLUBLE

Esta sección hace referencia en particular al componente “carbón” del MPS Insoluble, dado que constituye la variable principal del monitoreo estipulado en la Resolución 0045/22 del SRMS que rige el estudio.

Como se indicó en la sección anterior (ver Tabla 5, 6 y 7), el carbón es el segundo componente más abundante en el MPS insoluble.

6.1 Masa, porcentaje y tamaño de partículas de carbón

La masa de carbón es significativamente más alta en la Estación Cancha Carbón, con un valor promedio (3 meses) de 1,333 g. La masa de carbón disminuye significativamente en la Estación Galo Herrera (promedio 0,090 g), ubicada 150 m al NNE-SSW de la Estación Cancha Carbón y, sigue disminuyendo, en las Estaciones MPS Bajo (0,042 g) y MPS Alto (0,019) ubicadas a 275 m al NNW-SSE y 475 m al NNE-SSW de la E. Cancha Carbón (Figura 4).

En términos porcentuales, en la Estación Galo Herrera se acumula solo un 6,8%, en la Estación MPS Bajo solo un 3,2% y en la Estación MPS Alto solo un 1,4% de la masa que se registra en la Estación Cancha Carbón.

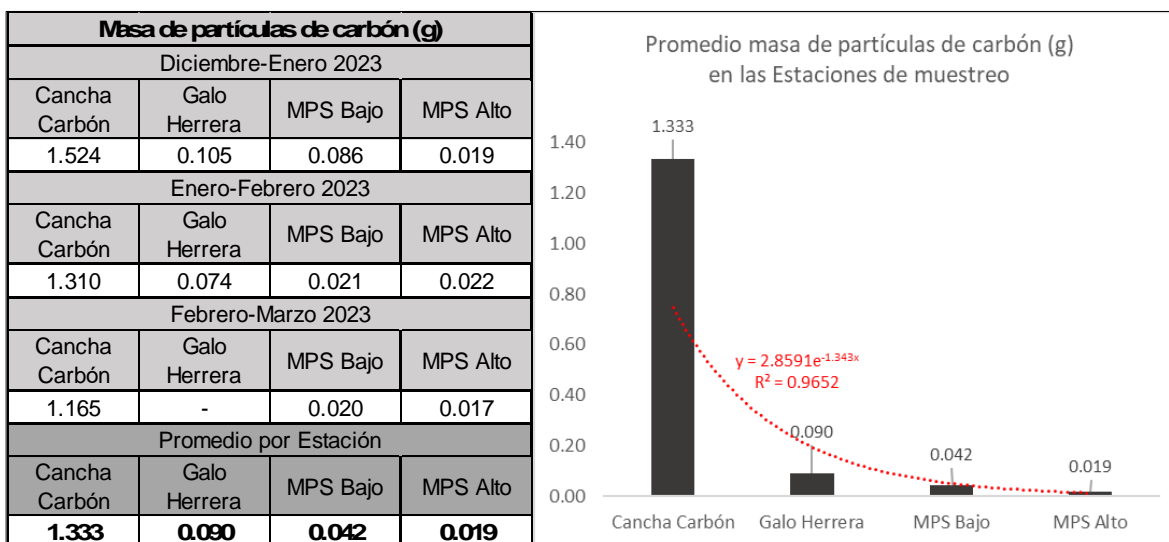


Figura 4 Masa de carbón registrada en las 4 estaciones y variabilidad en el período diciembre de 2022-marzo 2023.

En la Tabla 9 se presenta el porcentaje en masa de carbón, respecto del MPS insoluble, para cada Estación por mes de monitoreo, además del porcentaje en masa promedio. En todas las Estaciones se registra una leve disminución del porcentaje de carbón, desde el primer al tercer mes.

Porcentaje (% en masa) del carbón	Diciembre 2022-Enero 2023				Enero-Febrero 2023				Febrero-Marzo 2023			
	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto
	50,47	18,04	7,35	3,57	43,60	14,60	5,29	1,83	43,44	-	4,07	1,60
				Promedio por estación	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto				
					45,84	16,32	5,57	2,34				

Tabla 9 Porcentaje (en masa) del carbón en el MPS Insoluble en las 4 Estaciones (diciembre 2022-marzo 2023)

Los resultados promedio por Estación del porcentaje (en masa) del carbón (Tabla 9) señalan una disminución muy significativa desde la Estación Cancha Carbón en función de la distancia que la separa de las otras Estaciones, así en la Estación MPS Alto, la más alejada, el porcentaje de carbón se ha reducido en 94,9%, en la Estación MPS Bajo en 87,9% y en la Estación Galo Herrera, la más cercana, en 64,4%.

La Tabla 10 contiene los valores del tamaño máximo y mínimo (micrones) de las partículas de carbón para las 4 Estaciones durante los 3 meses de monitoreo del período diciembre 2022-marzo 2023. El mayor tamaño máximo promedio se registra en la Estación Cancha Carbón (236,6 μm) y el menor tamaño máximo promedio (110,4 μm) se registra en la Estación MPS Alto, la más alejada de la cancha de acopio de carbones utilizados en el Complejo Termoeléctrico Ventanas.

		Rango de tamaño (Min-Máx) de Partículas de Carbón (μm)		Promedio Tamaño Máximo de Partículas de Carbón (μm)
Período diciembre 2022-enero 2023	Cancha Carbón	8,5	288,4	236,6
Período enero-febrero 2023		14,2	221,7	
Período febrero-marzo 2023		12,4	199,7	
Período diciembre 2022-enero 2023	Galo Herrera	15,5	83,7	132,2
Período enero-febrero 2023		16,0	180,8	
Período febrero-marzo 2023		-	-	
Período diciembre-enero 2023	MPS Bajo	23,3	211,4	157,7
Período enero-febrero 2023		15,8	152,4	
Período febrero-marzo 2023		16,6	109,3	
Período diciembre 2022-enero 2023	MPS Alto	26,2	103,5	110,4
Período enero-febrero 2023		28,7	118,0	
Período febrero-marzo 2023		51,1	109,8	

Tabla 10 Tamaño mínimo y máximo (en micrones) de las partículas de carbón, período diciembre 2022-marzo 2023

6.2 Tasa de Sedimentación del Carbón

En la Tabla 11 se indica la Tasa de Sedimentación del Carbón diaria, calculada sobre la base de los días efectivos de acumulación en los colectores pasivos de las 4 Estaciones en los 3 meses de monitoreo del período diciembre 2022.-marzo 2023.

Fecha de Inicio	Fecha Final	Estación	Período de Muestreo en días efectivos	Tasa de Sedimentación carbón (mg/m ² /día efectivo)
16-12-22	09-01-23	Cancha Carbón	24	325,924
16-12-22	09-01-23	Galo Herrera	24	22,456
09-12-22	09-01-23	MPS Bajo	31	14,182
09-12-22	09-01-23	MPS Alto	31	3,179
09-01-23	09-02-23	Cancha Carbón	31	216,923
09-01-23	09-02-23	Galo Herrera	31	12,315
09-01-23	08-02-23	MPS Bajo	30	3,632
09-01-23	08-02-23	MPS Alto	30	3,746
09-02-23	09-03-23	Cancha Carbon	28	213,524
sin registro		Galo Herrera		'---
08-02-23	09-03-23	MPS Bajo	29	3,512
08-02-23	09-03-23	MPS Alto	29	3,072
			Promedio Período	Tasa de Sedimentación carbón (mg/m ² /día efectivo)
			Cancha Carbón	252,124
			Galo Herrera	17,385
			MPS Bajo	7,109
			MPS Alto	3,333

Tabla 11 Tasa Sedimentación Carbón por Estación en el período diciembre 2022-marzo 2023

Considerando los valores diarios de la Tasa de Sedimentación del Carbón MPS, destaca que en las Estaciones Cancha Carbón, Galo Herrera y MPS Bajo las Tasas de Sedimentación de Carbón decrecen significativamente desde el primer mes al segundo, manteniéndose los valores relativamente constantes en el tercer mes.

- Cancha Carbón: registra los valores más altos, en comparación con las restantes Estaciones. La Tasa de Sedimentación del carbón del primer mes (325,924 mg/m²/día efectivo), disminuye en 33,4% en el segundo mes (216,923 mg/m²/día efectivo) y en 1,6% en el tercer mes (213,524 mg/m²/día efectivo).
- Galo Herrera: la tasa del primer mes (22,456 mg/m²/día efectivo) disminuye significativamente en 45,2% en el segundo mes (12,315 mg/m²/día efectivo). En el tercer mes no hay registro a causa del robo del colector.
- MPS Bajo: la tasa del primer mes (14,182 mg/m²/día efectivo) disminuye significativamente en 74.4% en el segundo mes (3,632) y entre el segundo y tercer mes (3,512 mg/m²/día efectivo) disminuye 3,3%.
- MPS Alto: registra la tasa más baja de todas las estaciones en cada mes de monitoreo. En el segundo mes (3,746 mg/m²/día efectivo) la tasa se incrementa levemente en 17,8% respecto del primer mes (3,779 mg/m²/día efectivo) y luego decrece en 18% en el tercer mes (3,072 mg/m²/día efectivo), alcanzando el valor más bajo del período.

7 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

7.1 Componentes antrópicos y su proporción en el MPS

Los 4 colectores pasivos de MPS están emplazados en, o cerca de las instalaciones del Complejo Termoeléctrico Ventanas de propiedad de AES Andes. En las cercanías existen además numerosas instalaciones industriales.

En la Figura 5 se representan gráficamente los componentes del MPS Insoluble en cada Estación, por mes de monitoreo. Como se observa, el componente prioritario del MPS corresponde a residuos de combustión industrial de carbón. En segundo componente es el carbón, el cual tiene mayor presencia en la Estación Cancha Carbón y Estación Galo Herrera, disminuyendo drásticamente su presencia en las Estaciones MPS Bajo y MPS Alto, las más alejadas de los sectores donde se acopia o transporta carbón.

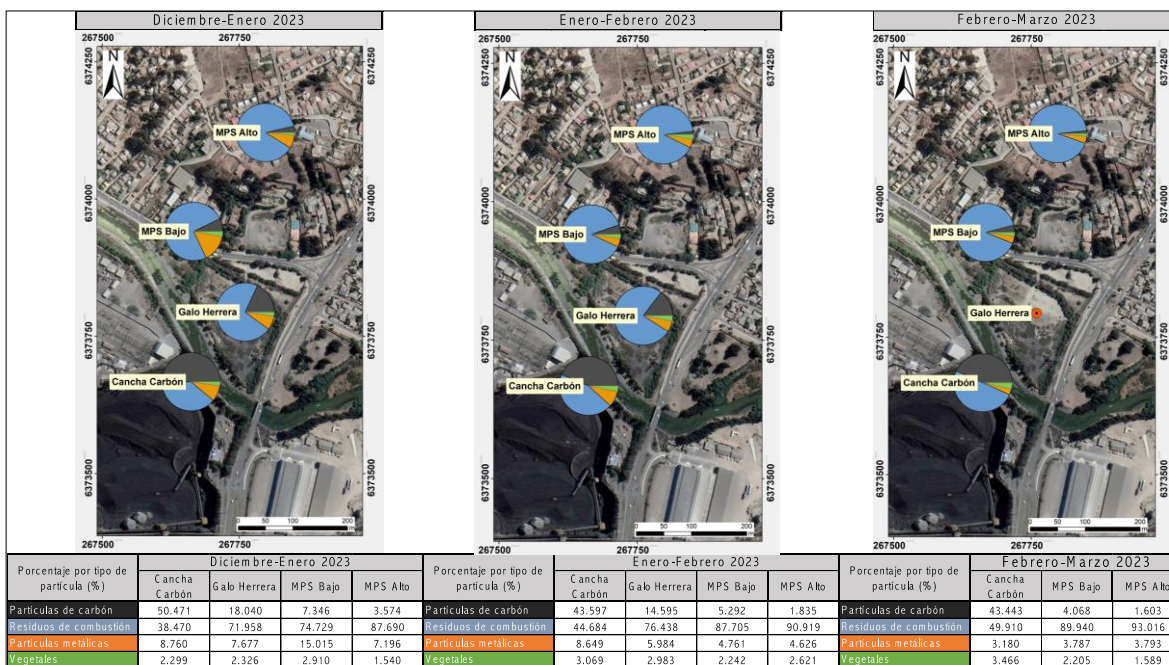


Figura 5 Evolución porcentual (% en masa) de los componentes del MPS Insoluble en las 4 Estaciones (período diciembre 2022-marzo 2023)

Al considerar los porcentajes promedio de los 3 componentes antrópicos respecto al orden de participación en el MPS insoluble (ver Tabla 7), destaca que:

- Residuos de Combustión: provienen de la actividad industrial del CTV con sus actuales 3 centrales termoeléctricas a carbón: Aporte promedio al MPS total entre 90,5% (E. MPS Alto) y 44,4% (E. Cancha Carbón).
- Partículas de carbón: corresponden a polvo movilizado por el viento desde los lugares de transporte y acopio del carbón utilizado en la alimentación de las 3 centrales: Aporte promedio al MPS total entre 45,8% (Estación Cancha Carbón) y 2,3% (E. MPS Alto). El porcentaje de carbón, tomando como referencia la Estación Cancha Carbón, se reduce en

64,4% en la Estación Galo Herrera, en 87,9% en la Estación MPS Bajo y 94,9% en la Estación MPS Ato.

- Partículas metálicas: dada su composición mineralógica provienen probablemente de los lugares de acopio de concentrado de cobre: Aporte promedio al MPS total entre 7,9% (Estación MPS Bajo) y 5,2% (Estación MPS Alto). Las Estaciones Cancha Carbón y Galo Herrera contienen porcentaje similar (6,9% y 6,8%, respectivamente)

7.2 Tasa de Sedimentación del MPS total

Numerosos estudios han identificado al MPS como responsable de la transferencia de contaminantes. Las repercusiones del MPS en el medio ambiente pueden tener efecto sobre la fotosíntesis de las plantas, la acidificación de suelos y masas de agua, la degradación del entorno habitable y generar daño en la salud de la fauna (incluyendo las personas). A la hora de determinar la política ambiental local y soluciones de gestión, es crucial determinar las tasas de sedimentación del MPS, la(s) fuente(s) de la contaminación y la distribución desde ella(s).

Tradicionalmente, el MPS ha sido monitoreado gravimétricamente utilizando colectores pasivos. Hay una amplia variedad de colectores en uso en todo el mundo (cuencos, cilindros o embudos horizontales de boca abierta) que, por lo general operan con recolección del MPS mensual. La Tasa de Sedimentación de sólidos no disueltos (MPS Insoluble), aunque a veces también se incluyen los sólidos disueltos (MPS Soluble), se puede expresar por día ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$), por mes de 30 días ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{mes}$) o por año ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{año}$). Considerando que a menudo las condiciones operativas de las fuentes de origen son episódicas, o bien ocurren condiciones meteorológicas anormales o ambas, la expresión de la Tasa de Sedimentación anual se considera más representativa.

Con el fin de gestionar y minimizar los efectos adversos de las partículas sedimentables (MPS), varios países, entre ellos Chile, han establecido los estándares máximos permitidos. Estos estándares varían según el país y, a veces, el estado, como ocurre en Estados Unidos, Canadá y Brasil. La Tabla 14 (tomada de Vallack & Shillito, 1998) resume los umbrales estándar establecidos por Agencias Ambientales en países europeos, América del Norte y Argentina.

2738 H. W. VALLACK and D. E. SHILLITO

Table 1. Examples of dust deposition standards outside the U.K. (as $\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

Argentina	Annual average	333
Australia (W. Australia)	Loss of amenity first perceived	133
	Unacceptable reduction in air quality	333
Canada		
Alberta	Annual average	180
Manitoba	Annual average	153
	(maximum acceptable)	266
	(maximum desirable)	200
Newfoundland	Annual average	153
	Monthly average	233
Ontario	Annual average	170
	Monthly average	200
Finland	Annual average	333
Germany	Long-term average	350*
	Short-term average	650*
Spain	Annual average	200
U.S.A.		
Kentucky	Annual average	196
Louisiana	Annual average	262
Maryland	Annual average	183
Mississippi	Monthly average (above background)	175
Montana	Annual average (residential areas)	196
New York	During any 12 months no more than	
	5% of 30 d values to exceed	100
	and 84% to be below	130
North Dakota	3 Monthly average	196
Pennsylvania	Annual average	267
	Monthly average	500
Washington	Annual average	183
Wyoming	Monthly average	170

* Combined weight of dissolved and undissolved deposits.

Tabla 12 Valores límites de Tasa de Sedimentación de MPS ($\text{mg/m}^2/\text{día}$)

En el caso de Brasil, existe una norma del Estado de Minas Gerais (COPAM N°1/81) para áreas industrializadas que fija el valor límite en $10 \text{ g/m}^2/\text{mes}$, que corresponde a $333 \text{ mg/m}^2/\text{día}$. En un trabajo relativamente reciente, Santos et al. (2017), estudian diferentes áreas industriales de estados brasileños (Minas Gerais, Río de Janeiro, Amapá y Vitoria) validando ese valor límite.

Chile no dispone de norma primaria para material particulado sedimentable MPS, por lo que se acostumbra utilizar como referencia el nivel límite definido en la norma secundaria por la cual se rige la Tercera Región (Cuenca del Río Huasco). Es una norma de calidad de aire en lo que respecta a polvo sedimentable, publicada en el D. E. N°4/1992 del Ministerio de Agricultura, que fija como Tasa de Sedimentación límite diaria el valor $150 \text{ mg/m}^2/\text{día}$ como concentración media aritmética mensual, o bien $100 \text{ mg/m}^2/\text{día}$ como concentración media aritmética anual.

En la Tabla 13 se resume la información de la Tasa de Sedimentación diaria ($\text{mg/m}^2/\text{día}$ efectivo) del MPS soluble, insoluble y total para las 4 Estaciones y los 3 meses de monitoreo del período diciembre 2022-marzo 2023 (corresponden a los meses 7, 8 y 9 desde el inicio del monitoreo), así como los valores promedio para el período.

Fecha de Inicio	Fecha Final	Estación	Período de Muestreo en días efectivos	Tasa de Sedimentación MPS soluble (mg/m ² /día efectivo)	Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m ² /día efectivo)	Tasa de Sedimentación MPS total (mg/m ² /día efectivo)	
16-12-22	09-01-23	Cancha Carbón	24	28,772	645,766	674,537	
16-12-22	09-01-23	Galo Herrera	24	25,862	124,477	150,339	
09-12-22	09-01-23	MPS Bajo	31	28,005	193,053	221,058	
09-12-22	09-01-23	MPS Alto	31	11,891	208,107	219,998	
09-01-23	09-02-23	Cancha Carbon	31	24,063	497,563	521,626	
09-01-23	09-02-23	Galo Herrera	31	19,261	84,379	103,640	
09-01-23	08-02-23	MPS Bajo	30	17,678	68,624	86,302	
09-01-23	08-02-23	MPS Alto	30	23,240	204,177	227,417	
09-02-23	09-03-23	Cancha Carbon	28	80,071	491,503	571,574	
sin registro		Galo Herrera		--	--	--	
08-02-23	09-03-23	MPS Bajo	29	20,058	86,321	106,379	
08-02-23	09-03-23	MPS Alto	29	27,812	191,691	219,503	
				TASAS PROMEDIO PERÍODO	Tasa de Sedimentación MPS soluble (mg/m ² /día efectivo)	Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m ² /día efectivo)	Tasa de Sedimentación MPS total (mg/m ² /día efectivo)
				Cancha Carbón	44,302	544,944	589,246
				Galo Herrera	22,561	104,428	126,989
				MPS Bajo	21,914	115,999	137,913
				MPS Alto	20,981	201,325	222,306

Tabla 13 Tasa de Sedimentación diaria de MPS soluble, insoluble y total en las 4 Estaciones y en los 3 meses de monitoreo

En la Figura 6 se indican los valores de la Tasa de Sedimentación mensual (mg/m²/mes) y diaria (mg/m²/día efectivo) para el MPS Soluble, Insoluble y Total en las 4 Estaciones, durante los 3 meses de monitoreo del período diciembre 2022-marzo 2023. Las líneas rojas expresan:

- valor máximo mensual (mes 30 días) y diario de 150 mg/m²/día indicado en el D.E. N°4/1992 (cuenca Río Huasco).
- Valor máximo mensual (mes 30 días) y diario de 333 mg/m²/día estipulado en la norma brasileña para áreas industriales COPAM N° 1/81.

Considerando la Tasa de sedimentación mensual y diaria del MPS Total, como se observa en el gráfico de la Figura 6;

- 1) Las estaciones que sobrepasan el límite indicado en la norma Cuenca del Río Huasco (D.E. N°4/92) son:
 - Estación Cancha Carbón en los tres meses de monitoreo del período diciembre 2022-marzo 2023 (mes 7, 8 y 9 desde inicio monitoreo).
 - Estación Galo Herrera prácticamente en el límite en el primer mes del período (diciembre 2022-marzo 2023).
 - Estación MPS Bajo y Estación MPS Alto en el primer mes del período (diciembre 2022-marzo 2023).
 - Estación MPS Alto en los tres meses del actual período de monitoreo (diciembre 2022-marzo 2023).
- 2) Las estaciones que sobrepasan el límite indicado en la norma brasileña COPAM N° 1/81 para áreas industrializadas son:
 - Estación Cancha Carbón en los tres meses del actual período de monitoreo (diciembre 2022-marzo 2023).

Al respecto, se hace notar que la Estación Cancha Carbón se ubica “dentro” de un área industrial por tanto no debería sorprender que sobrepase la norma brasileña.

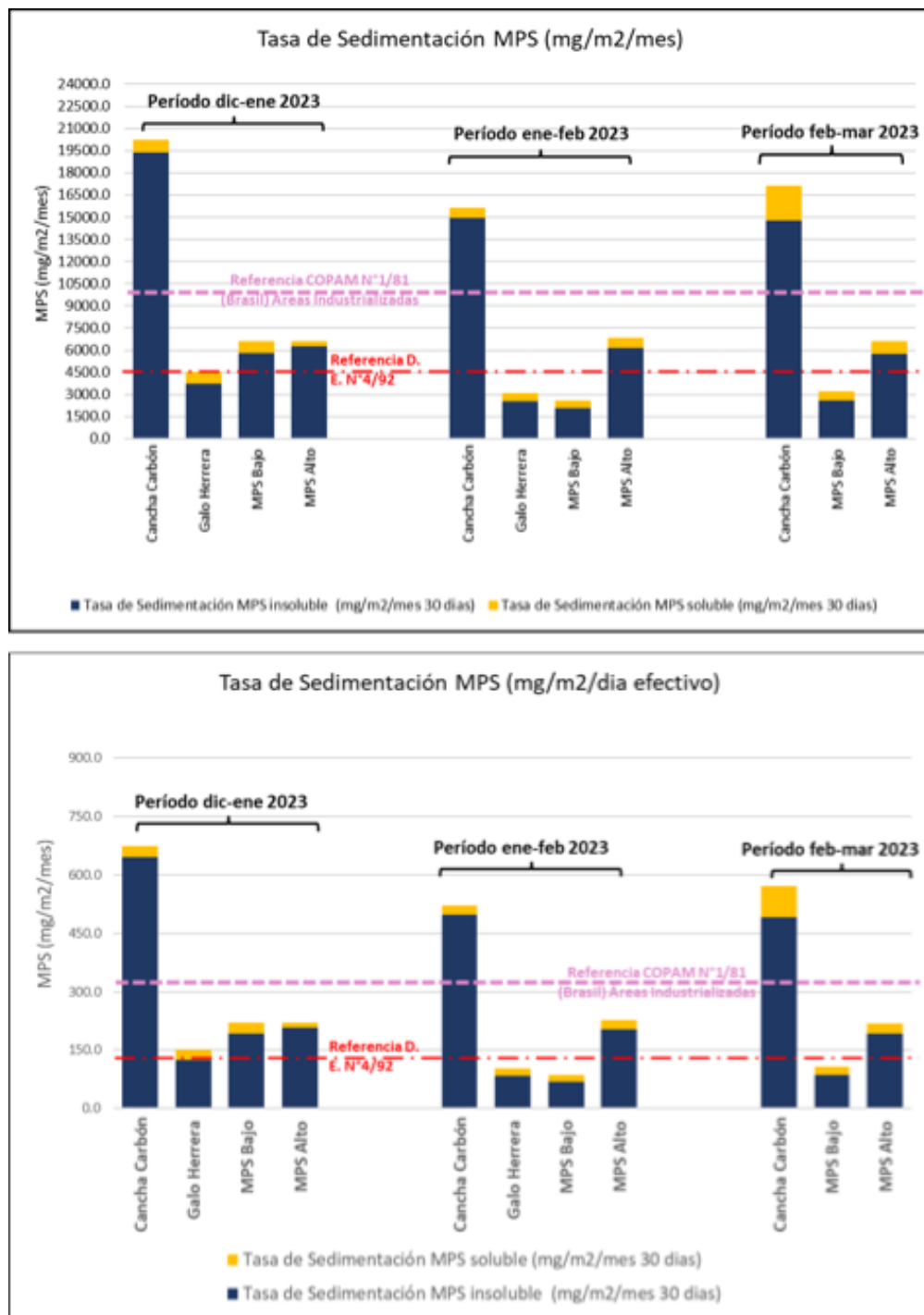


Figura 6 Tasa de Sedimentación mensual y diaria del MPS en las 4 Estaciones (diciembre 2022-marzo 2023)

7.3 Tasa de Sedimentación del Carbón

Por sus características físicas y el tamaño de los fragmentos, el carbón particulado es susceptible de ser erosionado por la acción del viento dentro y fuera de las instalaciones industriales que lo utilizan

o manejan. En ese sentido, la erosión eólica que lo afecte provocará efectos similares a los que ocurren en los botaderos de minas o en los relaves de minerales.

En el área monitoreada, como es evidente y esperable, el mayor contenido de carbón se registra en la Estación Cancha Carbón, lugar de acopio y movimiento de los carbones que serán utilizados en el proceso de termo-generación del CTC y muy probablemente, lugar de origen de las partículas de carbón (menores de 1mm de diámetro) que forman parte del MPS insoluble. La Estación Cancha Carbón está ubicada dentro de la dependencia del mismo nombre, adyacente a la membrana deflectora que protege los sectores externos de la dispersión de partículas de carbón desde la cancha de acopio.

Como se aprecia en el gráfico de la Figura 7, la Tasa de Sedimentación del Carbón en la Estación Cancha Carbón supera el valor máximo diario permitido para la cuenca del Río Huasco (D.E N° 4/91) en los tres meses del monitoreo que se informa (diciembre 2022-marzo 2023). La Tasa de Sedimentación del Carbón en la Estación Cancha Carbón está por debajo del límite aceptado para áreas industriales de la norma brasileña COPAM N°1/81 en los tres meses de monitoreo del período diciembre 2022-marzo 2023.

En las restantes 3 Estaciones, Galo Herrera, MPS Bajo y MPS Alto, ubicadas a una distancia de 150 m, 275 m y 475 m, respectivamente, de la Estación Cancha Carbón, las Tasas de Sedimentación de carbón son considerablemente menores (Figura 7) y en ninguno de los 3 meses de monitoreo sobrepasan el límite diario de 150 mg/m²/día que precisa el D.E. 4/91 del Ministerio de Agricultura (norma Cuenca del Río Huasco).

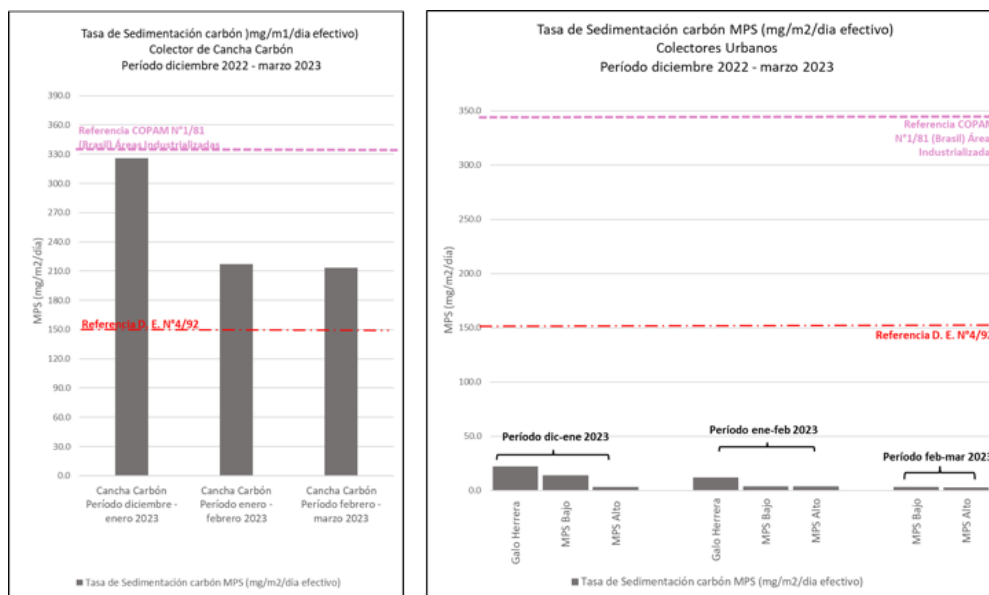


Figura 7 Tasa Sedimentación Carbón diaria en las 4 Estaciones (diciembre 2022-marzo 2023)

Considerando el promedio de la Tasa de Sedimentación del Carbón diaria registrada en la Estación Cancha Carbón (promedio: 252,124 mg/m²/día efectivo), se constata una significativa reducción de ésta, del orden de 93,2% en la Estación Galo Herrera (promedio: 17,385 mg/m²/día efectivo), 96,8% en la Estación MPS Bajo (promedio: 7,109 mg/m²/día efectivo) y 98,6% en la Estación MPS Alto (promedio: 3,333 mg/m²/día efectivo). Como las Estaciones Galo Herrera, MPS Bajo y MPS Alto están ubicadas a una distancia de 150 m, 275 m y 475 m, respectivamente, de la Estación Cancha

de Carbón, se concluye que la disminución está determinada por la efectividad de las medidas de control de la dispersión de las partículas de carbón, adoptadas por AES-Andes.

8 CONCLUSIONES

8.1 Tasa de Sedimentación mensual MPS

El grueso de la Tasa de Sedimentación total está determinado por la Tasa de Sedimentación del MPS insoluble, que representa el 92,5% en la Estación Cancha Carbón, 82,2% en la Estación Galo Herrera, 84,1% en la Estación MPS Bajo y 90,6% en la Estación MPS Alto.

- 1) Los valores más altos de Tasa de Sedimentación mensual del período diciembre 2022-marzo 2023 en los 3 meses de monitoreo (mes 7, 8 y 9 desde el inicio del monitoreo) se registran en la Estación Cancha Carbón, con valor promedio de 17677,370 mg/m²/mes 30 días), seguido de la Estación MPS Alto con valor promedio de 6669,180 mg/m²/mes 30 días. Los valores promedio más bajos se registran en la Estación Galo Herrera con 3809,682 mg/m²/mes 30 días y Estación MPS Bajo con 4137,388 mg/m²/mes 30 días.
- 2) La Tasa de Sedimentación diaria del MPS total supera el valor límite de 150 mg/m² /día que precisa la norma secundaria para la Cuenca del Río Huasco (D.E. N°4/92) en:
 - Estación Cancha Carbón en los tres meses monitoreados (diciembre 2022-marzo 2023)
 - Estación Galo Herrera, sobrepasa levemente el límite en el primer mes (diciembre 2022-enero 2023)
 - Estación MPS Bajo en el primer mes (diciembre 2022-enero 2023)
 - Estación MPS Alto en los 3 meses del período (diciembre 2022-marzo 2023).

8.2 Tasa de Sedimentación diaria del MPS soluble

El mayor valor promedio se registra en la Estación Cancha Carbón (44,302 mg/m²/día efectivo), reduciéndose significativamente, prácticamente a la mitad, en las restantes 3 Estaciones: Estación Galo Herrera (22,561 mg/m²/día efectivo), Estación MPS Bajo (21,914 mg/m²/día efectivo) y Estación MPS Alto (20,981 mg/m²/día efectivo).

8.3 Granulometría MPS Insoluble

El tamaño mínimo promedio de las partículas es relativamente uniforme en todas las Estaciones (promedio 0,232 μm). Con relación al tamaño máximo, los valores promedio por estación permiten constatar una reducción sostenida del tamaño en función de la lejanía a la Estación Cancha Carbón (promedio 272,318 μm). Así, el tamaño máximo se reduce en 16,3% en la Estación Galo Herrera (promedio 228,050 μm), en 37,9% en la Estación MPS Bajo (promedio 168,984 μm) y 58,4% en la Estación MPS Alto (promedio 113,184 μm).

8.4 Componentes del MPS insoluble

- 1) Mayoritariamente está compuesto de partículas antrópicas. Componentes naturales, como restos de vegetales, representan solo entre 2,9% y 1,9% del MPS Insoluble (promedio período).
- 2) Los residuos de combustión son el principal componente del MPS en todas las Estaciones. La Estación MPS Alto presenta el porcentaje promedio más alto de residuos de combustión

(90,5%), seguido de la Estación MPS Bajo (84,1%), Galo Herrera (74,2%) y Cancha Carbón (44,4%).

- El carbón es el segundo componente más abundante del MPS insoluble. El porcentaje promedio de carbón en los 3 meses de monitoreo es significativamente más alto en la Estación Cancha Carbón (45,8%), disminuyendo de manera sostenida a medida que aumenta la distancia a las instalaciones del CTV -se reduce en 64,4% en la Estación Galo Herrera, en 87,9% en la Estación MPS Bajo y 94,9% en la Estación MPS Alto.
- 3) Partículas metálicas del tipo sulfuros de Cu-Fe y Sulfuros de Cu están presentes en porcentaje relativamente similar en las 4 Estaciones, 7,9% en la Estación MPS Bajo, 6,9% en la Estación Cancha Carbón, 6,8% en la Estación Galo Herrera y 5,2% en la Estación MPS Alto.

8.5 Carbón en el MPS

- 1) El porcentaje promedio de carbón en los 3 meses de monitoreo (respecto al MPS insoluble) es significativamente más alto en la Estación Cancha Carbón (45,8%), disminuyendo de manera sostenida a medida que aumenta la distancia a las instalaciones del CTV: disminuye en 64,4% en Estación Galo Herrera (promedio 16,3%) en 87,9% en Estación MPS Bajo (promedio 5,6%) y en 94,9% en la Estación MPS Alto (promedio 2,3%).
- 2) El tamaño máximo promedio de las partículas de carbón es mayor en la Estación Cancha Carbón, donde alcanza 236,573 μm , disminuyendo sostenidamente en función de la lejanía a la Estación Cancha Carbón: 132,225 μm en Estación Galo Herrera, 157,687 μm en Estación MPS Bajo y 110,428 en Estación MPS Alto. Los valores registrados representan, respecto al tamaño máximo promedio en la Estación Cancha Carbón, un decrecimiento de 44,1% en Estación Galo Herrera, un 33,3% en Estación MPS Bajo y 53,3% en Estación MPS Alto.

8.6 Tasa de Sedimentación del Carbón

- 1) La Tasa de Sedimentación del Carbón sobrepasa el límite diario de 150 $\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$ (norma secundaria del Río Huasco, D.E. N°4/92) solamente en la Estación Cancha Carbón en los 3 meses del período de monitoreo que se informa (diciembre 2022-marzo 2023). En el resto de la Estaciones, la Tasa de Sedimentación del Carbón es considerablemente más baja, representando (promedio 3 meses) menos del 10% del límite diario máximo, en los tres meses de monitoreo.
- 2) Considerando el promedio de la Tasa de Sedimentación del Carbón diaria registrada en la Estación Cancha Carbón en los 3 meses (252,124 $\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$ efectivo), se constata una significativa reducción de ésta en las restantes 3 Estaciones, reducción que está determinada por la presencia de las pantallas perimetrales en torno a la cancha de carbón.

En conclusión, como las Estaciones Galo Herrera, MPS Bajo y MPS Alto están ubicadas a una distancia de 150 m, 275 m y 475 m, respectivamente, de la Estación Cancha Carbón, los resultados respecto a la *variable carbón* del MPS permiten constatar una relación directa entre la distancia a la fuente de origen de las partículas de carbón y la disminución del tamaño de partículas, del porcentaje de carbón en el MPS y de las Tasas de Sedimentación de Carbón.

Se hace notar que la Tasa de Sedimentación del carbón en la Estación Galo Herrera , la más cercana a las canchas de carbón, equivale solo al 6,8% de la tasa registrada en la Estación Cancha Carbón. Se concluye, entonces, que las medidas de control de la dispersión de las partículas de carbón, adoptadas por AES-Andes son efectivas.

9 Referencias

- Cisternas, 2022. 1° Informe de caracterización integral del MPS colectado en 4 Estaciones con colectores pasivos (Cancha Carbón, Galo Herrera, MPS Bajo y MPS Alto) en o cerca de las Instalaciones del Complejo Termoeléctrico Ventanas de AES-Andes. Mes 1, 2 y 3 del Monitoreo Anual. Puchuncaví, 5° Región, Chile. Informe Inédito para AES-Andes, 26 p. Noviembre 2022.
- Cisternas, 2023. 2° Informe de caracterización integral del MPS colectado en 4 Estaciones con colectores pasivos (Cancha Carbón, Galo Herrera, MPS Bajo y MPS Alto) en o cerca de las Instalaciones del Complejo Termoeléctrico Ventanas de AES-Andes. Mes 4 y 5 del Monitoreo Anual. Puchuncaví, 5° Región, Chile. Informe Inédito para AES-Andes, 31 p. Abril 2023.
- D. N°4/1992 Exento del Ministerio de Agricultura. Normas de Calidad del Aire para Material Particulado Sedimentable en la Cuenca del Río Huasco III Región.
- Feng, S. & Li, Y. Study on coal fly ash classified by bulk density. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1732 012127. doi.org/10.1088/1742-6596/1732/1/012127.
- D.E. N°223/2015 del Ministerio del Medio Ambiente, Instrucciones Generales sobre la Elaboración del Plan de Seguimiento de Variables Medioambientales.
- Minerals Densities. The Engineering Toolbox (www.engineeringtoolbox.com)
- Saiah, R., Perrin, B. & Rigal, L. 2010. Improvement of thermal properties of fires clays by introduction of vegetable matter. *J. Building Physics*, 34 (2): 124-142. doi.org/10.1177/1744259109360059.
- Santos, J.M. Reis, N.C., Galvão E.S., Silveira, A., Goulart, E. V. & Lima, A. T. 2017. Source apportionment of settleable particles in an impacted urban and industrialized region in Brazil. *Environ Sci Pollut Res* 4(27): 22026-22039.
- Severin, K. 2004. Energy Dispersive Spectrometry of Common Rock Forming Minerals. Kluwer Acad. Pu. 219 p.
- Suarez-Ruiz, I. et al. (2017) Development of a petrographic classification of fly-ash components from coal combustion and co-combustion. (An ICCP Classification System, Fly-Ash Working Group – Commission III.). *Inter. Jour. Coal Geology*, 183: 188-203.
- Valentim, et al. 2018. Undifferentiated Inorganics in Coal Fly Ash and Bottom Ash: Calciphères, magnesiocalciphères and Magnesiasphères. *Minerals* 2018, 8, 140; doi:10.3390/min8040140.
- Vallack, H. W. & Shillito, D. E. 1998. Suggested guidelines for deposited ambient dust. *Atmospheric Environment* Vol. 32 (16,): 737—2744.
- Wood, G., Kehn T., Carter, D. & Culberston, W. Coal Resource Classification System of the US Geological Survey. Geological Survey Circular 891. <http://pubs.usgs.gov/circ/c891/table2.htm>



Dra. María Eugenia Cisternas S.
Geóloga-Mineralogista
GEO-FORENSIC SpA
09 de mayo de 2023

INFORME DE CARACTERIZACION INTEGRAL DEL MPS
COLECTADO EN 4 ESTACIONES CON COLECTORES
PASIVOS (CANCHA CARBÓN, GALO HERRERA, MPS
BAJO Y MPS ALTO) EN O CERCA DE LAS
INSTALACIONES DEL COMPLEJO TERMOELECTRICO
VENTANAS DE AES-ANDES. Mes 10, 11 y 12 (marzo-
abril, abril-mayo, mayo junio 2023). PUCHUNVAVI, 5°
REGION, CHILE

Dra. María Eugenia Cisternas S

Fecha Informe: 27 agosto

Tabla de contenido

RESUMEN EJECUTIVO	3
1 INTRODUCCIÓN	5
2 OBJETIVOS.....	7
2.1 METODOLOGÍA DE MUESTREO Y ANÁLISIS DEL MPS	8
2.2 INSTALACIÓN DE COLECTORES PASIVOS Y RECOLECCIÓN DE MUESTRAS.....	8
2.3 REMOCIÓN DEL MPS DESDE LAS BOTELLAS, DETERMINACIÓN DE LA MASA DEL MPS TOTAL, SOLUBLE E INSOLUBLE ...	9
2.4 ESTUDIO COMPOSICIONAL DEL MPS INSOLUBLE Y CUANTIFICACIÓN DE LA FRACCIÓN CORRESPONDIENTE A CARBÓN. .	9
3 MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS	10
3.1 CARACTERIZACIÓN GRANULOMÉTRICA DEL MPS	10
3.2 IDENTIFICACIÓN DE COMPONENTES DEL MPS INSOLUBLE MEDIANTE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA (SEM/EDS)	10
3.3 DETERMINACIÓN PORCENTUAL DE TIPOS DE PARTÍCULAS ANTRÓPICAS EN EL MPS.....	11
4 RESULTADOS MPS SOLUBLE	13
4.1 MASA DE MPS SOLUBLE	13
4.2 TASA DE CONCENTRACIÓN MPS SOLUBLE.....	13
4.3 TASA DE SEDIMENTACIÓN MPS SOLUBLE	14
5 RESULTADOS MPS INSOLUBLE	17
5.1 GRANULOMETRÍA DE MPS INSOLUBLE	17
5.2 COMPOSICIÓN DEL MPS INSOLUBLE	17
5.3 MASA Y PORCENTAJE EN MASA DE LOS COMPONENTES DEL MPS INSOLUBLE	20
5.4 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL MPS INSOLUBLE	21
6 RESULTADOS REFERIDOS AL COMPONENTE CARBÓN DEL MPS INSOLUBLE	24
6.1 MASA, PORCENTAJE Y TAMAÑO DE PARTÍCULAS DE CARBÓN.....	24
6.2 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL CARBÓN	25
7 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	27
7.1 COMPONENTES ANTRÓPICOS Y SU PROPORCIÓN EN EL MPS	27
7.2 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL MPS TOTAL	28
7.3 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL CARBÓN	32
8 CONCLUSIONES	34
8.1 TASA DE SEDIMENTACIÓN MPS TOTAL.....	34
8.2 TASA DE SEDIMENTACIÓN DIARIA DEL MPS SOLUBLE	34
8.3 GRANULOMETRÍA MPS INSOLUBLE	34
8.4 COMPONENTES DEL MPS INSOLUBLE.....	34
8.5 TASA DE SEDIMENTACIÓN DIARIA DEL MPS INSOLUBLE	35
8.6 CARBÓN EN EL MPS.....	35
8.7 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL CARBÓN	35
9 REFERENCIAS.....	37

LISTA DE TABLAS

TABLA 1 MASA MPS SOLUBLE (MG) MEDIDA Y NORMALIZADA A 30 DÍAS DURANTE LOS 3 MESES DE MONITOREO DEL PERÍODO MARZO-JUNIO 2023	13
TABLA 2 VARIACIÓN TASA DE SEDIMENTACIÓN MENSUAL MPS SOLUBLE, EFECTIVA Y NORMALIZADA A 30 DÍAS (MARZO A JUNIO 2023).....	14
TABLA 3 TASA DE SEDIMENTACIÓN DIARIA MPS SOLUBLE CALCULADA POR DÍA EFECTIVO (MARZO-JUNIO 2023)	15
TABLA 4 TAMAÑO PARTÍCULAS MPS INSOLUBLE EN LAS 4 ESTACIONES DURANTE LOS 3 MESES DE MONITOREO (MARZO A JUNIO 2023).....	17
TABLA 5 MASA POR TIPO DE PARTÍCULA EN LAS 4 ESTACIONES, EN LOS 3 MESES DE MONITOREO DEL PERÍODO MARZO-JUNIO 2023	20
TABLA 6 PORCENTAJE EN MASA POR TIPO DE PARTÍCULA EN LAS 4 ESTACIONES, EN LOS 3 MESES DE MONITOREO DEL PERÍODO MARZO-JUNIO 2023.	20
TABLA 7 MASA Y PORCENTAJE PROMEDIO DE COMPONENTES EN MPS INSOLUBLE (MARZO-JUNIO 2023)	21
TABLA 8 TASA DE SEDIMENTACIÓN DE MPS INSOLUBLE MENSUAL Y DIARIA EN EL PERÍODO MARZO-JUNIO 2023.	22
TABLA 9 PORCENTAJE (EN MASA) DEL CARBÓN EN EL MPS INSOLUBLE EN LAS 4 ESTACIONES (MARZO-JUNIO 2023)	24
TABLA 10 TAMAÑO MÍNIMO Y MÁXIMO (EN MICRONES) DE LAS PARTÍCULAS DE CARBÓN, PERÍODO MARZO-JUNIO 2023.....	25
TABLA 11 TASA SEDIMENTACIÓN CARBÓN POR ESTACIÓN EN EL PERÍODO MARZO-JUNIO 2023	26
TABLA 12 VALORES LÍMITES DE TASA DE SEDIMENTACIÓN DE MPS (MG/M ² /DÍA)	29
TABLA 13 TASA DE SEDIMENTACIÓN DIARIA DE MPS SOLUBLE, INSOLUBLE Y TOTAL EN LAS 4 ESTACIONES EN EL PERÍODO MARZO-JUNIO 2023	30

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 UBICACIÓN ESPACIAL SOBRE IMAGEN GOOGLE EARTH DE LAS 4 ESTACIONES DE MONITOREO	6
FIGURA 2 MODELO DE COLECTOR PASIVO INSTALADO EN 4 ESTACIONES DEL CTV.....	9
FIGURA 3 CONCENTRACIÓN (G/L) COMPARADA DEL MPS SOLUBLE EN EL PERÍODO MARZO A JUNIO 2023	14
FIGURA 4 MASA DE CARBÓN REGISTRADA EN LAS 4 ESTACIONES Y VARIABILIDAD EN EL PERÍODO MARZO-JUNIO 2023.....	24
FIGURA 5 EVOLUCIÓN PORCENTUAL (% EN MASA) DE LOS COMPONENTES DEL MPS INSOLUBLE EN LAS 4 ESTACIONES (PERÍODO MARZO-JUNIO 2023)	27
FIGURA 6 TASA DE SEDIMENTACIÓN MENSUAL Y DIARIA DEL MPS EN LAS 4 ESTACIONES EN EL PERÍODO MARZO-JUNIO 2023) ..	31
FIGURA 7 TASA SEDIMENTACIÓN CARBÓN DIARIA EN LAS 4 ESTACIONES (MARZO-JUNIO 2023).....	32

LISTA DE LAMINAS

LÁMINA 1. A: SEM/BSE; B: SEM/EDS MAPPING DE C, O, AL, SI, FE, CU Y S; C ; C: MAPPING DEL ELEMENTO CARBONO (C) .	19
---	----

RESUMEN EJECUTIVO

El presente Informe se enmarca en el Plan de Muestreo de Material Particulado Sedimentable (MPS) de 12 meses de duración, autorizado mediante la Resolución N° 00045 (02 de junio 2022) de la Secretaría Regional Ministerial de Salud

(SRMS) de la Región de Valparaíso, el cual se extiende por un trimestre adicional a fin de compensar pérdida de datos ocurridas en algunas campañas, esto fue informado por AES Andes a la SEREMI de Salud de viña del mar mediante carta VPO-DMA-073 del del 26 de abril de 2023. El objetivo del Plan de Monitoreo es evaluar la eficacia del Sistema de Control de dispersión de material, específicamente de las partículas de carbón, hacia el exterior del Complejo Termoeléctrico Ventanas.

El Plan de Muestreo considera la caracterización del MPS depositado mensualmente en 4 Estaciones provistas de colectores pasivos, con informes trimestrales de resultados. Las Estaciones son: Cancha Carbón, ubicada al interior de la cancha de acopio de carbón del CTV; Galo Herrera, ubicada fuera de la cancha, aunque dentro de las dependencias de AES-Andes; MPS Bajo, localizada dentro del área de protección de la pantalla deflectora y MPS Alto, dispuesta cerca del área de protección de la pantalla deflectora. Las dos últimas estaciones se ubican en el sector La Greda.

Las variables ambientales principales consideradas en el Plan de Monitoreo son: 1) el porcentaje de carbón presente en el MPS insoluble; 2) la variación del porcentaje de carbón en las cuatro estaciones; 3) el gradiente de dispersión del carbón desde la cancha de acopio de este material, hacia las 3 otras estaciones.

Este informe presenta los resultados de los meses 10, 11 y 12 (marzo-abril, abril-mayo y mayo-junio del 2023) del Programa de Monitoreo de 15 meses comprometido por AES-Andes. En la Estación Galo Herrera no hubo registro del MPS en el primer mes (marzo-abril 2023), motivado por la sustracción del colector.

Las conclusiones de este cuarto período monitoreo son:

- 1) La Tasa de Sedimentación diaria del MPS total supera el valor límite de 150 mg/m² /día que precisa la norma secundaria para la Cuenca del Río Huasco (D.E. N°4/92) en:
 - Estación Cancha Carbón en los tres meses del período.
 - Estación Galo Herrera, sobrepasa levemente el límite en el segundo mes (abril-mayo 2023).
 - Estación MPS Bajo en el segundo mes (abril-mayo 2023).
 - Estación MPS Alto en los tres meses del período.
- 2) El MPS insoluble consta de partículas antrópicas (residuos de combustión de carbón, carbón crudo y partículas metálicas tipo sulfuros de Cu y Cu-Fe), con componentes naturales (briznas de vegetales) en proporción muy minoritaria (entre 1,6% a 4,2%, valores promedio tres meses).
- 3) El carbón es el segundo componente más abundante del MPS insoluble en todas las Estaciones, después de los residuos de combustión. El porcentaje promedio de carbón en los 3 meses de monitoreo es significativamente más alto en la Estación Cancha Carbón (47,8%), disminuyendo drásticamente a 7,2% en la Estación Galo Herrera, a 2,3% en la Estación MPS Bajo y solo 1,1% en la Estación MPS Alto.

- 4) La Tasa de Sedimentación del Carbón (promedio 3 meses: 550,328 mg/m²/día) sobrepasa el límite diario de 150 mg/m²/día (norma D.E. N°4/1992) solamente en la Estación Cancha Carbón en los 3 meses.
- 5) La Tasa promedio de Sedimentación del Carbón en las restantes tres Estaciones es considerablemente más baja que en la Estación Cancha Carbón: 8,325 mg/m²/día efectivo en Galo Herrera, 2,679 mg/m²/día efectivo en MPS Bajo y solo 2,347 mg/m²/día efectivo en MPS Alto.

Como el aporte de partículas de carbón desde la cancha de carbón se reduce considerablemente hacia zonas externas, la Tasa promedio de Sedimentación del Carbón decrece abruptamente en 98,5% en la Estación Galo Herrera, en 99,5% en la Estación MPS Bajo y en 99,6% en la Estación MPS Alto. Se concluye, entonces, que las medidas de control de la dispersión de las partículas de carbón, adoptadas por AES-Andes son efectivas.

1 INTRODUCCIÓN

A solicitud de AES-Andes, a través del Departamento Gestión Ambiental Complejo Centro, Geo-Forensic SpA realizará la caracterización integral del Material Particulado Sedimentable (MPS), con particular énfasis en la participación del carbón dispersado desde la cancha de acopio de este material hacia sectores ubicados en las cercanías de las instalaciones de Complejo Termoeléctrico Ventanas (CTV), Comuna de Puchuncaví, Región de Valparaíso. Este estudio se enmarca en un Plan de Muestreo de Material Particulado Sedimentable (MPS) de 12 meses de duración, el cual se extiende por un trimestre adicional a fin de compensar perdida de datos ocurridas en algunas campañas, esto fue informado por AES Andes a la SEREMI de Salud de viña del mar mediante carta VPO-DMA-073 del del 26 de abril de 2023.

El Plan de Muestreo de Material Particulado Sedimentable fue autorizado mediante la Resolución N° 00045 de la Secretaría Regional Ministerial de Salud (SRMS) de la Región de Valparaíso fechada el 02 de junio 2022. Dicha resolución autoriza el *Sistema de control y dispersión de material hacia el exterior de la instalación y su mecanismo de verificación de efectividad de la Cancha de almacenamiento de carbón* del Complejo Termoeléctrico Ventanas, (CTV) propiedad de AES ANDES S.A. El material al que hace referencia corresponde única y exclusivamente al *manejo de carbones Bituminosos y Sub-bituminosos acopiados en la cancha de carbón del CTV*.

En la Figura 1 se señala la ubicación espacial sobre imagen Google Earth de las 4 Estaciones de Monitoreo indicadas en la Resolución N° 00045 del SRMS.



Figura 1 Ubicación espacial sobre imagen Google Earth de las 4 Estaciones de Monitoreo

- Estación Cancha Carbón (coordenadas geográficas 267662.17 E; 6373667.19 S), ubicada al interior de la cancha de acopio de carbón.
- Estación Galo Herrera, (coordenadas geográficas 267760,87 E y 6373794.17 S) localizada fuera de la cancha, aunque dentro de las dependencias de AES ANDES.
- Estación MPS Bajo (coordenadas geográficas N), 267669 E, 6373931 N) ubicada dentro del área de protección de la pantalla deflectora.
- Estación MPS Alto (coordenadas geográficas 267774 E; 6374087 N), ubicada cerca del área de protección de la pantalla deflectora.

Las Estaciones MPS Alto y MPS Bajo están ubicadas en el poblado La Greda.

Las variables ambientales principales consideradas en el Plan de Monitoreo son:

- 1) El porcentaje de carbón presente en el MPS insoluble.
- 2) La variación del porcentaje de carbón en las cuatro estaciones.
- 3) El gradiente de dispersión del carbón desde la cancha de acopio de este material, hacia las 3 otras estaciones del Plan de Muestreo de MPS.

El presente Informe, el 4° Informe Trimestral desde el inicio del Monitoreo, se hace cargo de los resultados obtenidos en los meses 10 (marzo-abril 2023), 11 (abril-mayo 2023) y 12 (mayo-junio 2023). Se hace presente que en la Estación Galo Herrera no hubo registro del MPS en el mes 10 (febrero-marzo 2023) debido a la sustracción del colector.

Las citas de los tres Informes previos (Cisternas, 2022 y Cisternas, 2023a y 2023b) se encuentran en la sección Referencias.

2 OBJETIVOS

El Objetivo Principal del Plan de monitoreo es evaluar la eficacia del Sistema de Control de dispersión de material, específicamente de las partículas de carbón, hacia el exterior del Complejo Termoeléctrico Ventanas.

Las principales tareas a desarrollar para cumplir el Objetivo Principal son:

- Monitorear y caracterizar la cantidad de MPS acumulada en cada colector, con indicación de la Tasa de sedimentación del MPS soluble e insoluble.
- Monitorear y caracterizar la cantidad de MPS correspondiente a las partículas de carbón, con indicación de la masa acumulada en cada colector y cálculo de la Tasa de Sedimentación del Carbón expresada en $\text{mg}/\text{m}^2/\text{mes}$ y $\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$.
- Determinar la variación espacial y temporal de las Tasas de Sedimentación de carbón, considerando las variaciones en las 4 estaciones y variaciones en el lapso de tiempo considerado entre la instalación y la remoción de los colectores para el período que se informa.

Como Objetivo Secundario se aborda la comparación de las Tasas de Sedimentación del carbón con normas nacionales e internacionales.

Los parámetros que fueron utilizados para caracterizar el estado y evolución de las variables ambientales son:

- Masa soluble total
- Masa insoluble total
- Masa insoluble carbón
- Tasa de Sedimentación del MPS
- Tasa de Sedimentación del Carbón

2.1 METODOLOGÍA DE MUESTREO y ANÁLISIS DEL MPS

El término MPS (*Settleable Particulate Matter*, en inglés) se refiere a cualquier material compuesto de partículas lo suficientemente pequeñas como para pasar a través de una pantalla de 1 mm y lo suficientemente grandes como para depositarse desde el aire, en virtud de su peso, en el contenedor (Norma ASTM D 1739 – 98)¹.

2.2 Instalación de colectores pasivos y recolección de muestras

Para recolectar el Material Particulado Sedimentable se utilizaron colectores pasivos (Figura 2), con un radio de 0,249 m.

La empresa SGS Chile Ltda., fue la responsable de la instalación y mantención de los 4 colectores pasivos. El período aconsejado de recolección del MPS es del orden de 27 a 32 días, sin embargo en condiciones climáticas desfavorables, por ejemplo fuertes lluvias, las botellas de recolección pueden ser removidas y guardadas mientras dura el mal tiempo y, tras esto, recolocadas nuevamente en los colectores.

La remoción de las botellas desde los 4 colectores pasivos está a cargo de la Empresa SGS, quien envía mensualmente las botellas al Instituto de Geología Económica (GEA) de la Universidad de Concepción.

¹ Standard Test Method for Collection and Measurement of Dustfall (Settleable Particulate Matter)¹



Figura 2 Modelo de Colector pasivo instalado en 4 Estaciones del CTV.

2.3 Remoción del MPS desde las botellas, determinación de la masa del MPS total, soluble e insoluble

En el Instituto GEA, las botellas colectoras son tratadas con ultrasonido para retirar toda la masa adherida a la superficie interna. Posteriormente, se procede a:

- Determinación de sólidos insolubles: una vez removida toda la masa de las botellas colectoras se procede a la filtración de sólidos, utilizando un filtro de membrana de 0,45 micrones. Posteriormente, los sólidos son secados a 40°C y luego pesados, hasta peso constante.
- Determinación de sólidos solubles: Los sólidos solubles fueron determinados en la solución remanente de la filtración, según la norma ASTM D 1739 – 98.
- Determinar la granulometría de las partículas en la fracción insoluble mediante difracción laser.
- Entrega de la fracción insoluble a Geo-Forensic SpA.

2.4 Estudio composicional del MPS Insoluble y cuantificación de la fracción correspondiente a carbón.

Una vez recibidas las muestras de la fracción insoluble del MPS, por parte Geo-Forensic se procede al estudio integral de componentes mediante Microscopía Electrónica (SEM), con énfasis en el estudio del *componente carbón*.

3 MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS

3.1 Caracterización granulométrica del MPS

El análisis granulométrico de la masa total insoluble es realizado por el Instituto de Geología Económica Aplicada (GEA) de la Universidad de Concepción mediante el método de difracción láser en húmedo. El equipo utilizado es un analizador granulométrico láser Fritsch modelo Analysette 22 Microtec Plus. El análisis se realiza en húmedo, con aplicación de ultrasonido para obtener la máxima dispersión de partículas. El equipo posee un rango de medición de 0,08 a 2000 micrones (μm).

3.2 Identificación de componentes del MPS Insoluble mediante microscopía electrónica (SEM/EDS)

Considerando que las partículas del MPS tienen tamaño micrométrico, la caracterización textural y composicional de los diferentes tipos de partículas presentes en el MPS insoluble se realiza mediante microscopio electrónico de barrido (SEM)

El equipo utilizado corresponde a un TSCAN, VEGA III, equipado con detector de electrones retro-dispersados (Modo BSE), detector de electrones secundarios (Modo SE) y detector de rayos x de energía dispersiva (Modo EDS). Este equipo pertenece al Centro de Microscopía Avanzada del Bío-Bío (CMA), ubicado en dependencias de la Universidad de Concepción.

En un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM: Scanning Electron Microscopy por sus siglas en inglés) el bombardeo de electrones sobre la muestra produce varias formas simultáneas de radiación, entre ellas, la emisión de electrones secundarios (SE), electrones retro-dispersados (BSE) y emisión de rayos X. Cada una de esas formas de radiación es capturada por un detector específico.

Detector SE versus detector BSE

La imagen entregada por el SEM se genera por la interacción del haz de electrones que “barre” un área determinada sobre la superficie de la muestra. La detección de los electrones secundarios o retro-dispersados en un gran número de puntos sobre el área barrida, previa transformación electrónica, genera la imagen que se visualiza en una pantalla y es fotografiada mediante una cámara adosada al equipo.

El detector SE es ideal para generar imágenes SEM de alta resolución que permiten obtener detalles de la morfología y textura superficial de las partículas. El detector BSE ofrece una imagen de menor resolución, pero tiene la ventaja de que es sensible a las variaciones en el número atómico de los

elementos presentes en la superficie, permitiendo discriminar sobre la imagen partículas de diferente composición.

Cada imagen SEM incorporada en este estudio contiene información impresa de las condiciones de trabajo (voltaje de aceleración de electrones, distancia de trabajo, magnificación) y una escala gráfica que permite identificar el tamaño de las partículas. La intensidad del haz de electrones utilizada fluctuó entre 10 y 12 mV.

Detector EDS para determinación química de componentes

El detector EDS analiza los rayos X generados por el bombardeo de electrones mediante la espectroscopía de rayos X de energía dispersa (EDS por sus siglas en inglés). Permite identificar los elementos presentes en el punto de incidencia del haz de electrones sobre una partícula, o en un área previamente determinada que será barrida por el haz de electrones. Se obtiene así un espectro con los *peaks* de los elementos presentes en el punto de incidencia, con dato del porcentaje elemental o en masa de esos elementos. O bien, si se combina con la detección de electrones retro-dispersados en un área, se obtiene una suerte de “mapa” con la distribución de los elementos presentes en la muestra (herramienta *mapping*).

Los espectros EDS aplicados a los objetivos de este estudio, aportan información invaluable para diferenciar la naturaleza de las partículas sólidas, es decir distinguir carbón crudo, de residuos de combustión, de otras partícula metálicas o bien de partículas vegetales.

Como material de referencia para la identificación de los diferentes tipos de residuos de combustión fueron utilizados los estudios de Suarez -Ruiz et al. 2017² y Valentim et al. 2018³. Para la identificación composicional de fases cristalinas mediante SEM se utilizó el trabajo de Severin, 2004⁴.

Montaje de las muestras para el estudio mediante microscopio electrónico

Las muestras fueron montadas en porta muestras de aluminio de 11 mm de diámetro (pines), recubiertos con cinta adhesiva de doble cara de carbono. El montaje de las partículas se realiza teniendo precaución que éstas no se superpongan entre sí, ya que eso puede afectar el espectro EDS de las partículas de interés. El análisis de las muestras se realizó sin grafitización previa de los porta muestras.

3.3 Determinación porcentual de tipos de partículas antrópicas en el MPS

² Suarez-Ruiz, I. et al. (2017) Development of a petrographic classification of fly-ash components from coal combustion and co-combustion. (An ICCP Classification System, Fly-Ash Working Group – Commission III.). *Inter. Jour. Coal Geology*, 183: 188-203.

³ Valentim, et al. 2018. Undifferentiated Inorganics in Coal Fly Ash and Bottom Ash: Calciphères, magnesiocalciphères and Magnesiaspheres. *Minerals* 2018, 8, 140; doi:10.3390/min8040140.

⁴ Severin, K. 2004. Energy Dispersive Spectrometry of Common Rock Forming Minerals. Kluwer Acad. Pu. 219 p.

Para determinar el porcentaje de partículas identificadas en el MPS Insoluble se utiliza un programa digital que emula un contador automático de puntos. Mediante este programa se determinó la relación porcentual relativa, en volumen, de las partículas naturales y antrópicas presentes en las muestras, utilizando para ello 3 imágenes SEM por muestra, obtenidas con el detector BSE a baja magnificación (100x) y alta resolución.

El porcentaje en masa de los componentes fue determinado utilizando valores de densidad promedio para los diferentes tipos de partículas, como se indica a continuación:

Partículas naturales:

- Briznas de vegetales⁵: 1,5 g/cm³

Partículas antrópicas:

- Partículas de carbón⁶: 1,4 g/cm³ (valores fluctúan entre 1,47 y 1,29 g/cm³)
- Residuos de Combustión⁷: 2,5 g/cm³ (valores fluctúan entre 1,9 a 2,9 g/cm³)
- Partículas Metálicas⁸: 5,0 g/cm³ (sulfuros de Cu-Fe: 4,9 g/cm³; magnetita: 5,2 g/cm³)

⁵ Saiah, R., Perrin, B. & Rigal, L. 2010. Improvement of thermal properties of fires clays by introduction of vegetable matter. *J. Building Physics*, 34 (2): 124-142. doi.org/10.1177/1744259109360059

⁶ Wood, G., Kehn T., Carter, D. & Culberston, W. Coal Resource Classification System of the US Geological Survey. Geological Survey Circular 891. <http://pubs.usgs.gov/circ/c891/table2.htm>

⁷ Feng, S. & Li, Y. Study on coal fly ash classified by bulk density. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1732 012127. doi.org/10.1088/1742-6596/1732/1/012127

⁸ Minerals Densities. The Engineering Toolbox (www.engineeringtoolbox.com)

4 RESULTADOS MPS soluble

4.1 Masa de MPS soluble

En la Tabla 1 se indica la masa de MPS Soluble determinado en las muestras del período que se informa, considerando los días efectivos de acumulación de MPS. Nótese que en el primer mes de este período (mes 10 del Monitoreo: 9 marzo a 10 abril 2023) no hubo registro en la Estación Galo Herrera por sustracción del colector.

Fecha de Inicio	Fecha Final	Estación	Período de Muestreo en días efectivos	Masa soluble medida (g)	Masa soluble medida (mg)	Masa soluble normalizada a 30 días (mg)
09-03-23	10-04-23	Cancha Carbón	32	0,2595	259,5	243,3
sin registro			-	-	-	-
09-03-23	10-04-23	MPS Bajo	32	0,0943	94,3	88,4
09-03-23	10-04-23	MPS Alto	32	0,1476	147,6	138,4
10-04-23	09-05-23	Cancha Carbón	29	0,3892	389,2	402,6
17-04-23	15-05-23	Galo Herrera	28	0,0741	74,1	79,4
10-04-23	09-05-23	MPS Bajo	29	0,0823	82,3	85,1
10-04-23	09-05-23	MPS Alto	29	0,0903	90,3	93,4
09-05-23	09-06-23	Cancha Carbón	31	0,1985	198,5	192,1
15-05-23	12-06-23	Galo Herrera	28	0,0157	15,7	16,8
09-05-23	09-06-23	MPS Bajo	31	0,019	19	18,4
09-05-23	09-06-23	MPS Alto	31	0,0226	22,6	21,9

Tabla 1 Masa MPS Soluble (mg) medida y normalizada a 30 días durante los 3 meses de monitoreo del período marzo-junio 2023

4.2 Tasa de Concentración MPS soluble

En la Figura 3 se grafica la concentración de solubles en las estaciones para el período marzo 2023 a junio 2023 (mes 10, 11 y 12). En los 3 meses de monitoreo (marzo-abril; abril-mayo y mayo-junio) la concentración de solubles es significativamente más alta en la Estación Cancha Carbón respecto de las restantes estaciones. Le sigue la Estación MPS Alto, con concentración de solubles más alta que la Estación MPS Bajo y Estación Galo Herrera (esta última con registro solo en los meses de abril-mayo y mayo-junio, dado que no hubo registro en el mes marzo-abril por sustracción del colector).

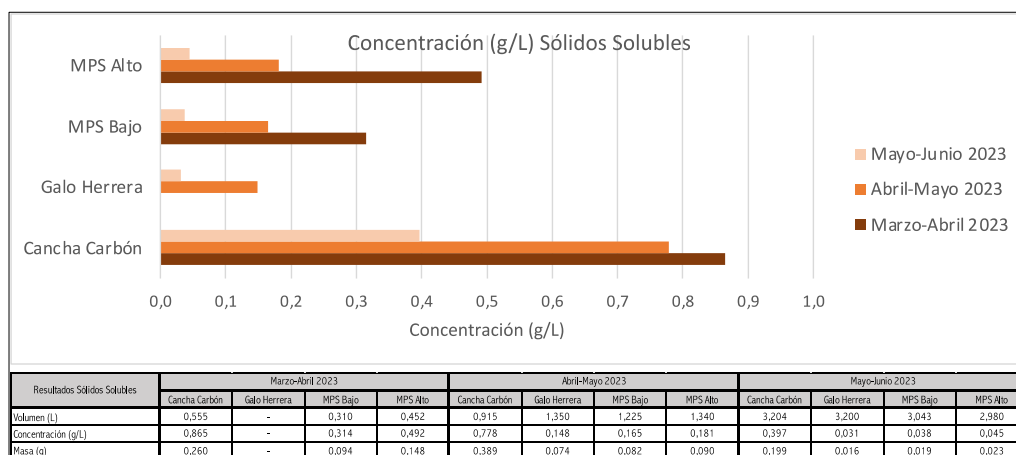


Figura 3 Concentración (g/L) comparada del MPS soluble en el período marzo a junio 2023

4.3 Tasa de Sedimentación MPS Soluble

La Tabla 2 registra las Tasas de Sedimentación mensual del MPS soluble, calculada tomando en consideración los días efectivos para cada período y valores derivados de normalizar a mes 30 días, como sugiere la norma secundaria de la Cuenca del Río Huasco (D.E. N°4/92). Las diferencias observadas hacen aconsejable que en lo sucesivo el tiempo de recolección en los colectores pasivos respete el período de 30 días, para que los resultados se ajusten a la Tasa de Sedimentación real.

Fecha de Inicio	Fecha Final	Estación	Período de Muestreo en días efectivos	Tasa de Sedimentación MPS soluble (mg/m2/mes efectivo)	Tasa de Sedimentación MPS soluble (mg/m2/mes 30 días)
09-03-23	10-04-23	Cancha Carbón	32	1332,261	1249,0
-	-	Galo Herrera	-	-	-
09-03-23	10-04-23	MPS Bajo	32	484,132	453,9
09-03-23	10-04-23	MPS Alto	32	757,771	710,4
10-04-23	09-05-23	Cancha Carbón	29	1998,134	2067,0
17-04-23	15-05-23	Galo Herrera	28	380,426	407,6
10-04-23	09-05-23	MPS Bajo	29	422,524	437,1
10-04-23	09-05-23	MPS Alto	29	463,596	479,6
09-05-23	09-06-23	Cancha Carbon	31	1019,089	986,2
15-05-23	12-06-23	Galo Herrera	28	80,603	86,4
09-05-23	09-06-23	MPS Bajo	31	97,545	94,4
09-05-23	09-06-23	MPS Alto	31	116,027	112,3
Promedio Tasa de Sedimentación MPS soluble (mg/m2/mes 30 días)					
			Cancha Carbón	1434,1	
			Galo Herrera*	247,0	
			MPS Bajo	328,5	
			MPS Alto	434,1	
*promedio solo 2 meses					

Tabla 2 Variación Tasa de Sedimentación mensual MPS soluble, efectiva y normalizada a 30 días (marzo a junio 2023)

La Tabla 3 registra la Tasa de Sedimentación diaria del MPS soluble. Los resultados muestran que:

- Estación Cancha Carbón: registra valores comparativamente bajos en el primer y tercer mes de este período (41,633 mg/m²/día efectivo y 32,974 mg/m²/día efectivo, respectivamente), mientras que en el segundo mes del período se registra un notorio incremento (68,901mg/m²/día efectivo), del orden del 65,5% respecto al primer mes,; en el tercer mes la tasa vuelve a disminuir en 52,3%.
- Estación Galo Herrera: registra un significativo decrecimiento de 78,1% en el tercer mes (2,879 mg/m²/día efectivo), respecto del segundo mes (13,587 mg/m²/día efectivo). En el primer mes no hubo registro por sustracción del colector.
- Estación MPS Bajo: en el primer mes se registra el valor más alto (15,129 mg/m²/día efectivo), el cual decrece 3,7% en el segundo mes (14,570 mg/m²/día efectivo) y 79,2% en el tercer mes (3,147 mg/m²/día efectivo), respecto del mes 1.
- Estación MPS Alto: en el primer mes se registra el valor más alto (23,680 mg/m²/día efectivo), el cual decrece 32,5% en el segundo mes (15,986 mg/m²/día efectivo) y 84,2% en el tercer mes (3,743 mg/m²/día efectivo), respecto del mes 1.

En conclusión, en todas las Estaciones se registra un notable decrecimiento de la Tasa de Sedimentación del MPS soluble en el tercer mes (mayo-junio 2023) del período de monitoreo.

Fecha de Inicio	Fecha Final	Estación	Período de Muestreo en días efectivos	Tasa de Sedimentación MPS soluble (mg/m ² /día efectivo)
09-03-23	10-04-23	Cancha Carbón	32	41,633
-	-	Galo Herrera	-	
09-03-23	10-04-23	MPS Bajo	32	15,129
09-03-23	10-04-23	MPS Alto	32	23,680
10-04-23	09-05-23	Cancha Carbón	29	68,901
17-04-23	15-05-23	Galo Herrera	28	13,587
10-04-23	09-05-23	MPS Bajo	29	14,570
10-04-23	09-05-23	MPS Alto	29	15,986
09-05-23	09-06-23	Cancha Carbon	31	32,874
15-05-23	12-06-23	Galo Herrera	28	2,879
09-05-23	09-06-23	MPS Bajo	31	3,147
09-05-23	09-06-23	MPS Alto	31	3,743
		Promedio Tasa de Sedimentación MPS soluble (mg/m ² /día efectivo)		
		Cancha Carbón	47,803	
		Galo Herrera*	8,233	
		MPS Bajo	10,949	
		MPS Alto	10,852	
		*promedio solo 2 meses		

Tabla 3 Tasa de Sedimentación diaria MPS soluble calculada por día efectivo (marzo-junio 2023)

Con relación a los valores promedio de la Tasa de Sedimentación del MPS soluble, el mayor valor promedio se registra en la Estación Cancha Carbón (47,803 mg/m²/día efectivo). Las Estaciones MPS Bajo y Alto registran valores promedio similares (10,949 mg/m²/día efectivo y 10,852 mg/m²/día

efectivo, respectivamente), significativamente inferiores a la Estación Cancha Carbón. La Estación Galo Herrera registra el menor valor promedio (8,233 mg/m²/día efectivo, promedio 2 meses) de las 4 Estaciones. Los resultados muestran que, la Tasa de Sedimentación diaria de MPS soluble es más alta en la Estación Cancha Carbón y se reduce significativamente, del orden de 79% en las otras 3 Estaciones. En todas las Estaciones se registran un significativo decrecimiento de las Tasas de Sedimentación soluble en el mes 3 (mayo-junio 2023).

5 RESULTADOS MPS insoluble

5.1 Granulometría de MPS insoluble

Los resultados del análisis granulométrico mediante difracción láser del material particulado que constituye el MPS insoluble se presentan en la Tabla 4 (tamaño partículas en micrones).

Estación	Granulometría (μm)	Marzo-Abril 2023	Abril-Mayo 2023	Mayo-Junio 2023	Promedio por Estación
Cancha Carbón	Mín	0,088	0,088	0,088	0,088
	Máx	186,026	113,184	125,01	141,407
Galo Herrera	Mín	-	0,291	0,322	0,307
	Máx	-	186,026	152,496	169,261
MPS Bajo	Mín	0,088	0,088	0,088	0,088
	Máx	337,690	125,01	152,496	205,065
MPS Alto	Mín	0,088	0,322	0,088	0,166
	Máx	125,01	226,928	84,007	145,315

Tabla 4 Tamaño partículas MPS insoluble en las 4 Estaciones durante los 3 meses de monitoreo (marzo a junio 2023)

El tamaño mínimo promedio de las partículas es mayor en la Estación Galo Herrera, seguido de la Estación MPS Alto. El tamaño mínimo es similar en las Estaciones Cancha Carbón y MPS Bajo.

Con relación al tamaño máximo, los valores promedio por estación son ligeramente más altos en las Estaciones MPS Alto y Galo Herrera, que en las Estaciones MPS Alto y Cancha Carbón.

5.2 Composición del MPS insoluble

Los tipos de partículas reconocidas en las muestras son mayoritariamente antrópicas y, de manera muy subordinada, se observan partículas naturales que corresponden a partículas vegetales tipos brizas de pastizal.

La identificación de los tipos de partículas en el *MPS Insoluble*, dado su tamaño, se hizo mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), utilizando imágenes BSE de alta resolución, en combinación con imágenes en la modalidad *mapping*.

La inspección de las muestras con el Modo BSE permite identificar los diferentes tipos de partículas, gracias a que este detector contrasta, mediante la tonalidad en la imagen, la diferente composición de las partículas. De este modo, de acuerdo a la tonalidad observada en la imagen, se identifican los siguientes tipos de partículas:

1. Partículas gris oscuro-negro: corresponden a partículas de carbón crudo (sin evidencias de combustión) y chars (residuos de combustión con carbono remanente). También se ven de esta tonalidad las partículas de vegetales, las cuales se identifican por su forma (angosta y alargada), muy diferente a las partículas carbonosas (carbón y residuos de combustión).

2. Partículas gris medio: corresponden a residuos de combustión de composición aluminosilicatada, de forma esférica (cenosferas), prismática (mineroides feldespáticos y silíceos) o en granos compuestos (cenoesferas más mineroides).
3. Partículas gris claro: ferrosferas (forma esférica, contenido alto de Fe).
4. Partículas blanco brillante: minerales metálicos en la forma de óxidos de Fe (magnetita, hematita), sulfuros de Fe (pirita) y sulfuros de Cu-Fe (calcopirita).

A modo de ejemplo, en la Lámina 1-A se presenta una imagen SEM/BSE donde se identifican los diferentes componentes mencionados, de acuerdo a su tonalidad de gris.

En la Lámina 1-B se presenta una imagen BSE obtenida mediante la herramienta “mapping” del SEM/EDS, la cual posibilita realizar un mapeo areal por elementos a definir por el usuario. En este estudio se utilizó esta herramienta para conocer la distribución en el muestra de los elementos carbono (C), sílice (Si), aluminio (Al), hierro (Fe), cobre (Cu) y azufre (S) y con eso confirmar la composición de los componentes observados.

En la Lámina 1-C se presenta una imagen BSE con la distribución, solamente, del elemento carbono (C).

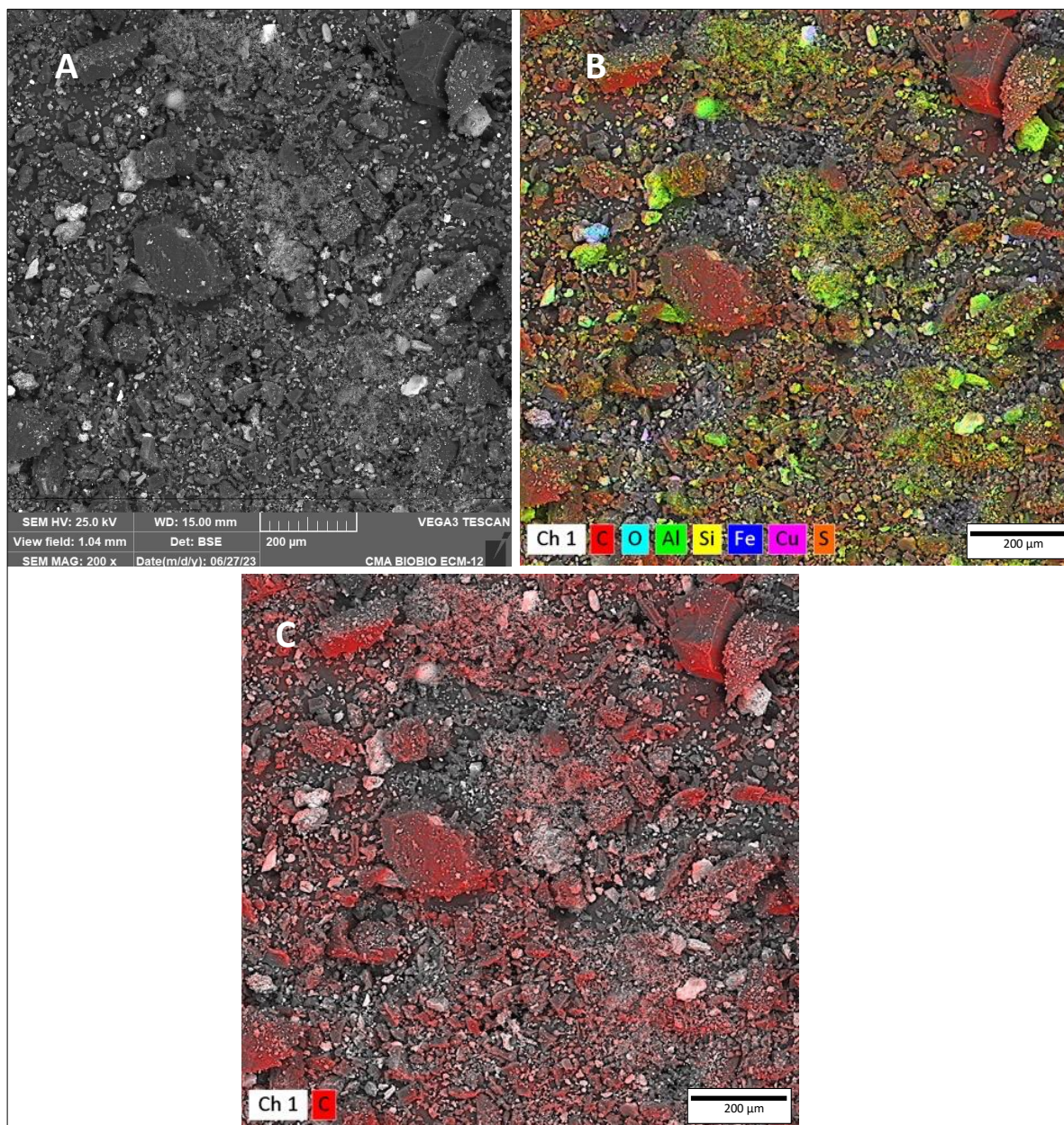


Lámina 1. A: SEM/BSE; B: SEM/EDS mapping de C, O, Al, Si, Fe, Cu y S; C; C: mapping del elemento carbono (C)

Mediante el *mapping* por diferentes elementos fue posible identificar los siguientes tipos de partículas:

- Solo Si (color amarillo): partículas de sílice (cuarzo) formadas en la fase final del proceso de combustión del carbón (mineroides silíceos).
- Si + Al (color amarillo + color verde): partículas alumino-silicatadas formadas en la fase final del proceso de combustión del carbón (cenosferas y mineroides de feldespato K y plagioclasa).
- Solo C (color rojo): partículas de carbón.
- C + Si + Al (color rojo + color amarillo + color verde): chars.

- S + Fe (color anaranjado + color azul): partículas de sulfuro de Fe (pirita).
- S+ Cu + Fe (color naranja + color ciclamen + color azul): sulfuro de Cu-Fe (calcopirita).
- O +Fe (color celeste + color azul): Oxido de Fe (magnetita/hematita).

Información de detalle de la composición del MPS insoluble para cada una de las muestras estudiadas en este período (marzo-junio 2023) está contenida en Fichas por muestra, las cuales se incorporarán como Anexo al Informe Anual.

5.3 Masa y porcentaje en masa de los componentes del MPS insoluble

La determinación porcentual en volumen de cada uno de los componentes del *MPS insoluble* se realizó mediante software especializado, contabilizando los diferentes tipos de componentes sobre 3 imágenes SEM/BSE por muestra. Una vez determinado el porcentaje (en volumen) de cada componente en cada muestra, se calculó la masa, multiplicando el porcentaje en volumen por el valor de densidad asignado a cada tipo de partícula⁹ (referencias en sección 2.4), normalizando el valor obtenido a la masa total colectada en la estación correspondiente (Tabla 5).

Masa por tipo de partícula (g)	Marzo-Abril 2023				Abril-Mayo 2023				Mayo-Junio 2023			
	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto
Partículas de carbón	2,352	sin registro	0,001	0,013	2,079	0,050	0,034	0,018	5,469	0,040	0,011	0,010
Residuos de combustión	1,878		0,061	1,358	2,247	0,654	0,819	1,187	4,978	0,364	0,401	0,820
Partículas metálicas	0,152		0,001	0,072	0,368	0,061	0,129	0,072	0,672	0,083	0,044	0,087
Vegetales	0,171		0,004	0,016	0,104	0,010	0,030	0,017	0,207	0,020	0,021	0,023
Total colectado	4,552		0,066	1,459	4,798	0,775	1,013	1,294	11,326	0,508	0,477	0,940

Tabla 5 Masa por tipo de partícula en las 4 Estaciones, en los 3 meses de monitoreo del período marzo-junio 2023

Una vez determinada la masa de los diferentes componentes, se procedió a determinar el porcentaje (en masa), con el propósito de determinar cuáles componentes tienen mayor influencia sobre la masa total del MPS Insoluble (Tabla 6).

Porcentaje por tipo de partícula (%)	Marzo-Abril 2023				Abril-Mayo 2023				Mayo-Junio 2023			
	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto
Partículas de carbón	51,660	sin registro	1,015	0,913	43,323	6,489	3,382	1,425	48,286	7,975	2,365	1,053
Residuos de combustión	41,247		92,547	93,050	46,839	84,283	80,913	91,704	43,949	71,761	83,972	87,238
Partículas metálicas	3,340		1,017	4,922	7,673	7,895	12,762	5,548	5,937	16,331	9,307	9,293
Vegetales	3,753		5,422	1,116	2,165	1,332	2,943	1,323	1,827	3,933	4,356	2,416

Tabla 6 Porcentaje en masa por tipo de partícula en las 4 Estaciones, en los 3 meses de monitoreo del período marzo-junio 2023.

⁹

Briznas de vegetales: 1,5 g/cm³

Partículas de carbón: 1,4 g/cm³

Residuos de Combustión: 2,5 g/cm³ (los valores de densidad fluctúan entre 1,9 a 2,9 g/cm³)

Partículas Metálicas: 5,0 g/cm³ (sulfuros de Cu-Fe: 4,9 /cm³; Magnetita: 5,2 g/cm³)

El componente que, porcentualmente, más aporta a la masa del MPS insoluble, corresponde a residuos de combustión de carbón (ceniza volante) en todas las Estaciones de monitoreo, incluida la Estación Cancha Carbón en el segundo mes de monitoreo abril-mayo 2023).

El segundo componente más abundante corresponde a partículas de carbón, con porcentaje significativamente más alto en la Estación Cancha Carbón, decreciendo significativamente en las restantes 3 Estaciones, en función de la distancia a las canchas de carbón.

Para una mejor comparación de los resultados, en la Tabla 7 se presentan los valores promedio de la masa, y porcentaje en que cada componente aporta el MPS insoluble.

Masa por tipo de partícula (g) promedio (3 meses) por tipo de componente en MPS insoluble	Masa promedio por estación				Porcentaje por tipo de partícula (%) promedio por tipo de componente en MPS insoluble	Porcentaje promedio 3 meses por estación			
	Cancha Carbón	Galo Herrera*	MPS Bajo	MPS Alto		Cancha Carbón	Galo Herrera*	MPS Bajo	MPS Alto
Partículas de carbón	3,300	0,045	0,015	0,014	Partículas de carbón	47,756	7,232	2,254	1,130
Residuos de combustión	3,034	0,509	0,427	1,122	Residuos de combustión	44,012	78,022	85,811	90,664
Partículas metálicas	0,398	0,072	0,058	0,077	Partículas metálicas	5,650	12,113	7,695	6,588
Vegetales	0,161	0,015	0,018	0,019	Vegetales	2,582	2,633	4,240	1,618
* Masa promedio solo 2 meses					* Porcentaje promedio solo 2 meses				

Tabla 7 Masa y Porcentaje promedio de componentes en MPS insoluble (marzo-junio 2023)

De la comparación de los resultados contenidos en Tabla 7, destaca que:

- Los residuos de combustión de carbón contribuyen en promedio a la masa total del *MPS insoluble* con 3,034 g en la Estación Cancha Carbón y solo 0,427 g en la Estación MPS Bajo. En las Estaciones Galo Herrera y MPS Alto, contribuyen en promedio a la masa total con 0,509 g y 1,122 g, respectivamente. En términos porcentuales representan el 90,7% del MPS Insoluble en la Estación MPS Alto y solo el 44,0% en la Estación Cancha Carbón.
- El carbón aporta en promedio a la masa total del *MPS insoluble* entre 3,3 gramos en la Estación Cancha Carbón y solo 0,014 g en la Estación MPS Alto. El porcentaje promedio de carbón más alto se registra en la Estación Cancha Carbón (47,8%) y el más bajo en la Estación MPS Alto (1,1%).
- Las partículas metálicas aportan al *MPS insoluble* con 0,398 g en la Estación Cancha Carbón y con valores que fluctúan entre 0,077 g y 0,058 g, en las restantes 3 Estaciones. Están presentes en porcentaje más alto en la Estación Galo Herrera (12,1%) y más bajo en la Estación Cancha Carbón (5,7%). En las Estaciones MPS Bajo y MPS Alto, el porcentaje es similar (7,7% y 6,6%, respectivamente).
- Los restos vegetales aportan *MPS insoluble* entre 0,161 g (E. Cancha Carbón) y 0,015 g (E. Galo Herrera). El porcentaje de participación es comparativamente más alto en la Estación MPS Bajo (4,2%) y más bajo en la Estación MPS Alto (1,6%). En las Estaciones Cancha Carbón y Galo Herrera los porcentajes son similares (2,6%).

5.4 Tasa de Sedimentación del MPS insoluble

En la Tabla 8 se presentan las variables utilizadas para el cálculo de la Tasa de Sedimentación del MPS Insoluble en cada una de las 4 Estaciones durante cada mes de monitoreo en el período marzo-junio 2023. Nótese la diferencia que se establece entre la Tasa de Sedimentación calculada utilizando el número de días de acumulación efectiva (columna A) y la Tasa de Sedimentación normalizada a mes de 30 días (columna B). La Tasa de Sedimentación diaria (Columna C) se ha calculado sobre la base del número días efectivos de acumulación del MPS.

Fecha de Inicio	Fecha Final	Estación	Período de Muestreo en días efectivos	A	B	C
				Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m ² /mes efectivo)	Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m ² /mes de 30 días)	Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m ² /día efectivo)
09-03-23	10-04-23	Cancha Carbón	32	23371,803	21911,1	730,369
		Galo Herrera		sin registro		
09-03-23	10-04-23	MPS Bajo	32	337,301	316,2	10,541
09-03-23	10-04-23	MPS Alto	32	7492,489	7024,2	234,140
10-04-23	09-05-23	Cancha Carbón	29	24632,701	25482,1	849,403
17-04-23	15-05-23	Galo Herrera	28	3980,866	4265,2	142,174
10-04-23	09-05-23	MPS Bajo	29	5198,126	5377,4	179,246
10-04-23	09-05-23	MPS Alto	29	6643,847	6872,9	229,098
09-05-23	09-06-23	Cancha Carbon	31	58146,113	56270,4	1875,681
15-05-23	12-06-23	Galo Herrera	28	2606,507	2792,7	93,090
09-05-23	09-06-23	MPS Bajo	31	2448,895	2369,9	78,997
09-05-23	09-06-23	MPS Alto	31	4824,888	4669,2	155,642
			Promedio Petríodo	Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m ² /mes efectivo)	Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m ² /mes de 30 días)	Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m ² /día efectivo)
			Cancha Carbón	35383,539	34554,534	1151,818
			Galo Herrera	3293,687	3528,950	117,632
			MPS Bajo	2661,441	2687,830	89,594
			MPS Alto	6320,408	6188,800	206,293

Tabla 8 Tasa de Sedimentación de MPS Insoluble mensual y diaria en el período marzo-junio 2023.

Considerando los valores diarios de la Tasa de Sedimentación del *MPS insoluble* (Columna C de la Tabla 8), se destaca que:

- Estación Cancha de Carbón: respecto al primer mes (730,369 mg/m²/día efectivo) se observa un incremento de 16,3% en el segundo mes (849,403 mg/m²/día efectivo) y de 120,8% entre el segundo y tercer mes (1875,681 mg/m²/día efectivo).
- Estación Galo Herrera: entre el segundo mes (142,174 mg/m²/día efectivo) y el tercer mes (93,090 mg/m²/día efectivo) la Tasa de Sedimentación del *MPS insoluble* decrece un 34,5%. En el primer mes no hubo registro por sustracción del colector.
- Estación MPS Bajo: la tasa de sedimentación registrada en el primer mes (10,541 mg/m²/día efectivo) es la más baja del período y se incrementa considerablemente en 1600,5% el segundo mes (179,246 mg/m²/día efectivo); en el tercer mes decrece un 50,0% (89,594 mg/m²/día efectivo), sin embargo, sigue siendo 749,9% más alta que en el mes 1.
- Estación MPS Alto: la tasa de sedimentación en el primer mes (234,140 mg/m²/día efectivo) decrece levemente (2,2%) en el segundo mes (229,098 mg/m²/día) y en el tercer mes (155,642 mg/m²/día efectivo) decrece un 32,1% respecto al mes 2.

Los valores diarios promedio (3 meses) de la Tasa de Sedimentación diaria del *MPS insoluble*, indican que el mayor valor promedio se registra en la Estación Cancha Carbón, seguido de Estación MPS Alto, Estación Galo Herrera y Estación MPS Bajo, donde se registra en menor valor. Con respecto a la Estación Cancha Carbón, la tasa de Sedimentación diaria promedio del *MPS insoluble* se reduce 89,8% en la Estación Galo Herrera, 92,2% en la Estación MPS Bajo y 82,1% en la Estación MPS Alto.

6 RESULTADOS REFERIDOS AL COMPONENTE CARBÓN DEL MPS INSOLUBLE

Esta sección hace referencia en particular al componente “carbón” del MPS Insoluble, dado que constituye la variable principal del monitoreo estipulado en la Resolución 0045/22 del SRMS que rige el estudio.

Como se indicó en la sección anterior (ver Tabla 5, 6 y 7), el carbón es el segundo componente más abundante en el MPS insoluble.

6.1 Masa, porcentaje y tamaño de partículas de carbón

La masa de carbón es significativamente más alta en la Estación Cancha Carbón, con un valor promedio (3 meses) de 3,300 g. La masa de carbón disminuye significativamente en la Estación Galo Herrera (promedio 0,045 g), ubicada 150 m al NNE-SSW de la Estación Cancha Carbón y, sigue disminuyendo en las Estaciones MPS Bajo (0,015 g) y MPS Alto (0,014), ubicadas a 275 m al NNW-SSE y 475 m al NNE-SSW de la E. Cancha Carbón (Figura 4).

En comparación a la masa de carbón que se acumula en la Estación Cancha Carbón (3,3 g promedio en el período), la masa de carbón decrece 86,4% en la Estación Galo Herrera (0,045 g promedio), 99,5% en la Estación MPS Bajo (0,015 g promedio) y 99,6% en la Estación MPS Alto (0,014 promedio).

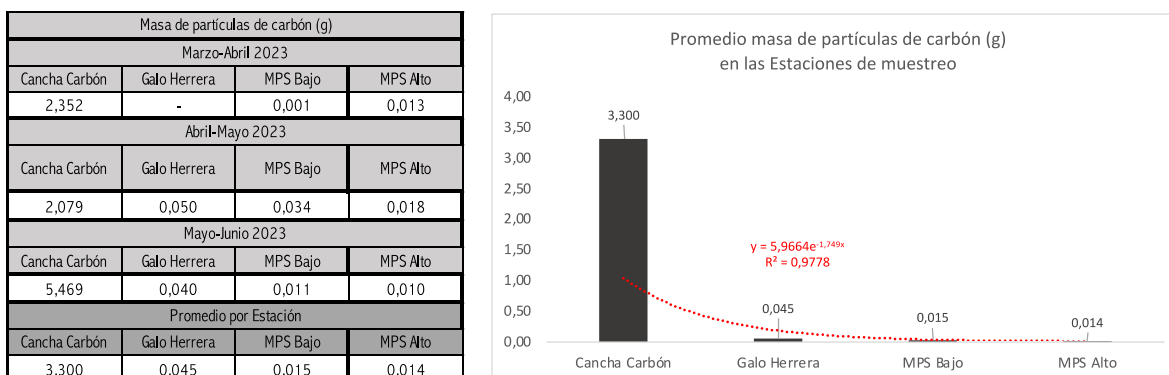


Figura 4 Masa de carbón registrada en las 4 estaciones y variabilidad en el período marzo-junio 2023.

En la Tabla 9 se presenta el porcentaje en masa de carbón, respecto del *MPS insoluble*, para cada Estación por mes de monitoreo, además del porcentaje en masa promedio. Los porcentajes en cada mes de Monitoreo fluctúan entre 51,7% y 43,3% en la Estación Cancha Carbón, entre 6,5% y 8,0% en la Estación Galo Herrera, entre 1,0% y 3,4% en la Estación MPS Bajo y entre 1,0 y 2,4% en la Estación MPS Alto.

Porcentaje (% en masa) del carbón	marzo-abril 2023				abril-mayo 2023				mayo-junio 2023			
	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto
	51,66	sin registro	1,01	0,91	43,32	6,49	3,38	1,43	48,29	7,98	2,36	1,05
				Promedio por estación	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto				
					47,76	7,23	2,25	1,13				

Tabla 9 Porcentaje (en masa) del carbón en el MPS Insoluble en las 4 Estaciones (marzo-junio 2023)

Los resultados promedio, por Estación, del porcentaje (en masa) del carbón (Tabla 9) señalan una disminución muy significativa del porcentaje de carbón desde la Estación Cancha Carbón, en función de la distancia que la separa de las otras Estaciones. Así, en la Estación MPS Alto, la más alejada, el porcentaje de carbón se ha reducido en 97,6%, en la Estación MPS Bajo en 95,3% y en la Estación Galo Herrera, la más cercana, en 84,9%.

La Tabla 10 contiene los valores del tamaño máximo y mínimo (micrones) de las partículas de carbón para las 4 Estaciones, durante los 3 meses de monitoreo del período marzo-junio 2023. El mayor tamaño máximo promedio se registra en la Estación Galo Herrera (131,2 μm) y el menor tamaño máximo promedio (73,9 μm) se registra en la Estación MPS Alto, la más alejada de la cancha de acopio de carbones utilizados en el Complejo Termoeléctrico Ventanas.

		Rango de tamaño (Min-Max) de Partículas de Carbón (μm)		Promedio Tamaño Máximo de Partículas de Carbón (μm)
Período marzo-abril 2023	Cancha Carbón	17,4	154,5	116,7
Período abril-mayo 2023		16,2	88,7	
Período mayo-junio 2023		8,8	107,0	
Período abril-mayo 2023	Galo Herrera	10,2	116,0	131,2
Período mayo-junio 2023		12,2	146,5	
Período marzo-abril 2023	MPS Bajo	33,3	87,2	118,4
Período abril-mayo 2023		7,3	123,1	
Período mayo-junio 2023		10,7	145,1	
Período marzo-abril 2023	MPS Alto	21,1	69,8	73,9
Período abril-mayo 2023		15,5	84,0	
Período mayo-junio 2023		23,1	67,9	

Tabla 10 Tamaño mínimo y máximo (en micrones) de las partículas de carbón, período marzo-junio 2023

6.2 Tasa de Sedimentación del Carbón

En la Tabla 11 se indica la Tasa de Sedimentación diaria del Carbón, calculada sobre la base de los días efectivos de acumulación en los colectores pasivos de las 4 Estaciones, en los 3 meses de monitoreo del período marzo-junio 2023.

Fecha de Inicio	Fecha Final	Estación	Período de Muestreo en días efectivos	Tasa de Sedimentación carbón (mg/m ² /día efectivo)
09-03-23	10-04-23	Cancha Carbón	32	377,308
09-03-23	10-04-23	MPS Bajo	32	0,107
09-03-23	10-04-23	MPS Alto	32	2,137
10-04-23	09-05-23	Cancha Carbón	29	367,986
17-04-23	15-05-23	Galo Herrera	28	9,226
10-04-23	09-05-23	MPS Bajo	29	6,063
10-04-23	09-05-23	MPS Alto	29	3,266
09-05-23	09-06-23	Cancha Carbon	31	905,691
15-05-23	12-06-23	Galo Herrera	28	7,424
09-05-23	09-06-23	MPS Bajo	31	1,868
09-05-23	09-06-23	MPS Alto	31	1,639
				Tasa de Sedimentación promedio carbón (mg/m ² /día efectivo)
			Cancha Carbón	550,328
			Galo Herrera	8,325
			MPS Bajo	2,679
			MPS Alto	2,347

Tabla 11 Tasa Sedimentación Carbón por Estación en el período marzo-junio 2023

Considerando los valores diarios de la Tasa de Sedimentación del Carbón MPS, la evolución en el período de monitoreo es diferente entre las 4 Estaciones. Así,

- En la Estación Cancha Carbón, la Tasa de Sedimentación del Carbón es considerablemente más alta en **el mes 3** (905,691 mg/m²/día efectivo) que en el mes 1 (377,308 mg/m²/día efectivo) y mes 2 (367,986 mg/m²/día efectivo). El aumento en **el mes 3** puede ser atribuido a efectos operacionales del manejo de la cancha de carbón según lo señalado por AES Andes.
- En la Estación Galo Herrera, (registro solo en mes 2 y mes 3), la tasa es mayor en el mes 2 (9,226) que en el mes 3 /7,424 mg/m²/día efectivo).
- En la Estación MPS Bajo la Tasa de Sedimentación del carbón es anómalamente baja (0,107 mg/m²/día efectivo) en el mes 1 y muestra el **mayor valor en el mes 2** (6,063 mg/m²/día efectivo).
- MPS Alto: En el mes 1 y 3 la Tasa de Sedimentación de Carbón tiene valores de rango similar (2,137 mg/m²/día efectivo y 1,639 mg/m²/día efectivo, respectivamente) y en el mes 2 **registra el mayor valor** (3,266 mg/m²/día efectivo).

7 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

7.1 Componentes antrópicos y su proporción en el MPS

Los 4 colectores pasivos de MPS están emplazados en, o cerca de las instalaciones del Complejo Termoeléctrico Ventanas de propiedad de AES Andes. En las cercanías existen, además, numerosas instalaciones industriales.

En la Figura 5 se representan gráficamente los componentes del MPS Insoluble en cada Estación, por mes de monitoreo. Como se observa, el componente prioritario del MPS corresponde a residuos de combustión industrial de carbón. El segundo componente es el carbón, el cual tiene mayor presencia en la Estación Cancha Carbón y Estación Galo Herrera, disminuyendo drásticamente su presencia en las Estaciones MPS Bajo y MPS Alto, las más alejadas de los sectores donde se acopia o transporta carbón.

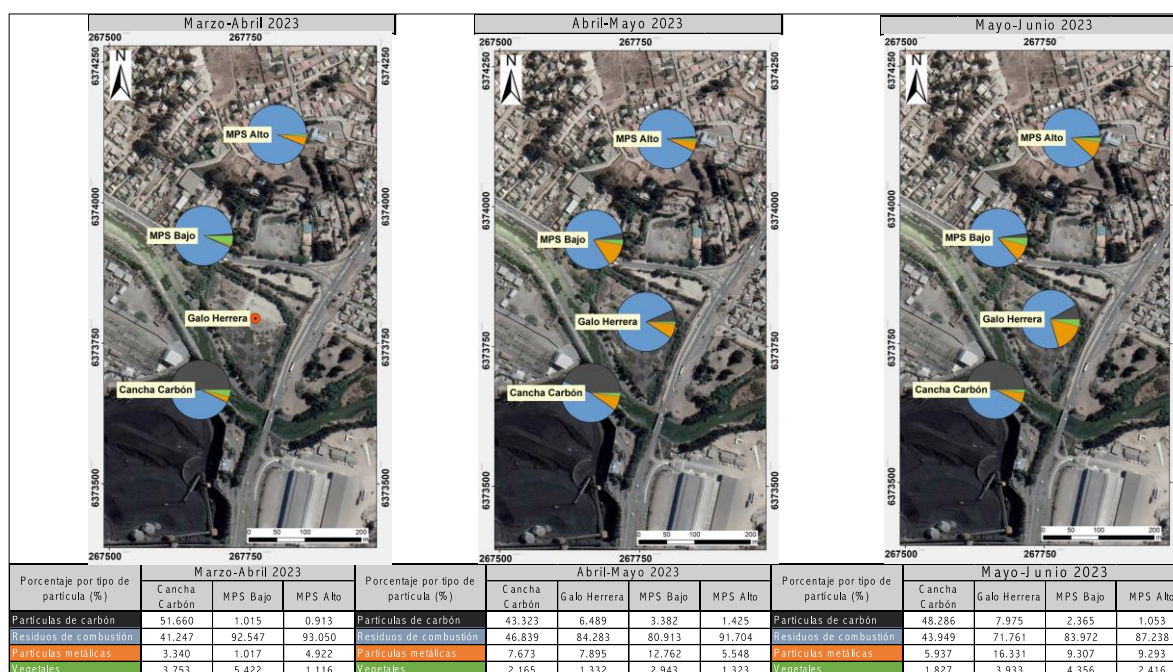


Figura 5 Evolución porcentual (% en masa) de los componentes del MPS Insoluble en las 4 Estaciones (período marzo-junio 2023)

Al considerar los porcentajes promedio de los 3 componentes antrópicos respecto al orden de participación en el MPS insoluble (ver Tabla 7), destaca que:

- Residuos de Combustión: provienen de la actividad industrial del CTV con sus actuales 3 centrales termoeléctricas a carbón activas: Aporte promedio al MPS total entre 90,7% (E. MPS Alto) y 44,0% (E. Cancha Carbón).
- Partículas de carbón: corresponden a polvo movilizado por el viento desde los lugares de transporte y acopio del carbón utilizado en la alimentación de las 3 centrales: Aporte promedio al MPS total entre 47,8% (Estación Cancha Carbón) y 1,1% (E. MPS Alto). El porcentaje de carbón, tomando como referencia la Estación Cancha Carbón, se reduce en

84,6% en la Estación Galo Herrera, en 95,3% en la Estación MPS Bajo y 97,6% en la Estación MPS Ato.

- Partículas metálicas: dada su composición mineralógica provienen probablemente de los lugares de acopio de concentrado de cobre: Aporte promedio al *MPS total* entre 12,1% (Estación Galo Herrera) y 5,7% (Estación Cancha Carbón). Las Estaciones MPS Bajo y MPS Alto contienen porcentaje relativamente similar (7,7% y 6,6%, respectivamente)

7.2 Tasa de Sedimentación del MPS total

Numerosos estudios han identificado al MPS como responsable de la transferencia de contaminantes. Las repercusiones del MPS en el medio ambiente pueden tener efecto sobre la fotosíntesis de las plantas, la acidificación de suelos y masas de agua, la degradación del entorno habitable y generar daño en la salud de la fauna (incluyendo las personas). A la hora de determinar la política ambiental local y soluciones de gestión, es crucial determinar las tasas de sedimentación del MPS, la(s) fuente(s) de la contaminación y la distribución desde ella(s).

Tradicionalmente, el MPS ha sido monitoreado gravimétricamente utilizando colectores pasivos. Hay una amplia variedad de colectores en uso en todo el mundo (cuencos, cilindros o embudos horizontales de boca abierta) que, por lo general operan con recolección del MPS mensual. La Tasa de Sedimentación de sólidos no disueltos (MPS Insoluble), aunque a veces también se incluyen los sólidos disueltos (MPS Soluble), se puede expresar por día ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$), por mes de 30 días ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{mes}$) o por año ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{año}$). Considerando que a menudo las condiciones operativas de las fuentes de origen son episódicas, o bien ocurren condiciones meteorológicas anormales o ambas, la expresión de la Tasa de Sedimentación anual se considera más representativa.

Con el fin de gestionar y minimizar los efectos adversos de las partículas sedimentables (MPS), varios países, entre ellos Chile, han establecido los estándares máximos permitidos. Estos estándares varían según el país y, a veces, el estado, como ocurre en Estados Unidos, Canadá y Brasil. La Tabla 14 (tomada de Vallack & Shillito, 1998) resume los umbrales estándar establecidos por Agencias Ambientales en países europeos, América del Norte y Argentina.

2738 H. W. VALLACK and D. E. SHILLITO

Table 1. Examples of dust deposition standards outside the U.K. (as $\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

Argentina	Annual average	333
Australia (W. Australia)	Loss of amenity first perceived	133
	Unacceptable reduction in air quality	333
Canada		
Alberta	Annual average	180
Manitoba	Annual average	153
	(maximum acceptable)	266
	(maximum desirable)	200
Newfoundland	Annual average	153
	Monthly average	233
Ontario	Annual average	170
	Monthly average	200
Finland	Annual average	333
Germany	Long-term average	350*
	Short-term average	650*
Spain	Annual average	200
U.S.A.		
Kentucky	Annual average	196
Louisiana	Annual average	262
Maryland	Annual average	183
Mississippi	Monthly average (above background)	175
Montana	Annual average (residential areas)	196
New York	During any 12 months no more than	
	5% of 30 d values to exceed	100
	and 84% to be below	130
North Dakota	3 Monthly average	196
Pennsylvania	Annual average	267
	Monthly average	500
Washington	Annual average	183
Wyoming	Monthly average	170

* Combined weight of dissolved and undissolved deposits.

Tabla 12 Valores límites de Tasa de Sedimentación de MPS ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$)

En el caso de Brasil, existe una norma del Estado de Minas Gerais (COPAM N°1/81) para áreas industrializadas que fija el valor límite en $10 \text{ g}/\text{m}^2/\text{mes}$, que corresponde a $333 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{día}$. En un trabajo relativamente reciente, Santos et al. (2017), estudian diferentes áreas industriales de estados brasileños (Minas Gerais, Río de Janeiro, Amapá y Vitoria) validando ese valor límite.

Chile no dispone de norma primaria para material particulado sedimentable MPS, por lo que se acostumbra utilizar como referencia el nivel límite definido en la norma secundaria por la cual se rige la Tercera Región (Cuenca del Río Huasco). Es una norma de calidad de aire en lo que respecta a polvo sedimentable, publicada en el D. E. N°4/1992 del Ministerio de Agricultura, que fija como Tasa de Sedimentación límite diaria el valor $150 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{día}$ como concentración media aritmética mensual, o bien $100 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{día}$ como concentración media aritmética anual.

En la Tabla 13 se resume la información de la Tasa de Sedimentación diaria ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$ efectivo) del *MPS soluble*, *MPS insoluble* y *MPS total* para las 4 Estaciones y los 3 meses de monitoreo del período marzo-junio 2023 (corresponden a los meses 10, 11 y 12 desde el inicio del monitoreo), así como los valores promedio para el período. Se indica, además, el porcentaje de la Tasa de Sedimentación del MPS soluble e insoluble, respecto a la Tasa de Sedimentación del MPS total.

Fecha de Inicio	Fecha Final	Estación	Período de Muestreo en días efectivos	Tasa de Sedimentación MPS soluble (mg/m ² /día efectivo)	Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m ² /día efectivo)	Tasa de Sedimentación MPS total (mg/m ² /día efectivo)
09-03-23	10-04-23	Cancha Carbón	32	41,633	730,369	772,002
	sin registro	Galo Herrera	-	-	-	-
09-03-23	10-04-23	MPS Bajo	32	15,129	10,541	25,670
09-03-23	10-04-23	MPS Alto	32	23,680	234,140	257,821
10-04-23	09-05-23	Cancha Carbón	29	68,901	849,403	918,305
17-04-23	15-05-23	Galo Herrera	28	13,587	142,174	155,760
10-04-23	09-05-23	MPS Bajo	29	14,570	179,246	193,816
10-04-23	09-05-23	MPS Alto	29	15,986	229,098	245,084
09-05-23	09-06-23	Cancha Carbon	31	32,874	1875,681	1908,555
15-05-23	12-06-23	Galo Herrera	28	2,879	93,090	95,968
09-05-23	09-06-23	MPS Bajo	31	3,147	78,997	82,143
09-05-23	09-06-23	MPS Alto	31	3,743	155,642	159,384
			TASAS PROMEDIO PERÍODO	Tasa de Sedimentación MPS soluble (mg/m ² /día)	Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m ² /día)	Tasa de Sedimentación MPS total (mg/m ² /día)
			Cancha Carbón	47,803	1151,818	1199,621
			Galo Herrera*	8,233	117,632	125,864
			MPS Bajo	10,949	89,594	100,543
			MPS Alto	10,852	154,720	165,572
			*promedio solo 2 meses			
			PORCENTAJE RESPECTO AL MPS TOTAL	MPS soluble vs MPS Total (%)	MPS insoluble vs MPS Total (%)	
			Cancha Carbón	4,0	96,0	
			Galo Herrera	6,5	93,5	
			MPS Bajo	10,9	89,1	
			MPS Alto	6,6	93,4	

Tabla 13 Tasa de Sedimentación diaria de MPS soluble, insoluble y total en las 4 Estaciones en el período marzo-junio 2023

En la Figura 6 se indican los valores de la Tasa de Sedimentación mensual (mg/m²/mes) y diaria (mg/m²/día efectivo) para el MPS soluble, insoluble y total en las 4 Estaciones, durante los 3 meses de monitoreo del período marzo-junio 2023. Las líneas rojas expresan:

- Valor máximo mensual (4500 mg/m²/mes 30 días) y diario (150 mg/m²/día) indicado en el D.E. N°4/1992 (Cuenca Río Huasco).
- Valor máximo mensual (9999 mg/m²/mes 30 días) y diario (333 mg/m²/día) estipulado en la norma brasileña para áreas industriales COPAM N° 1/81.

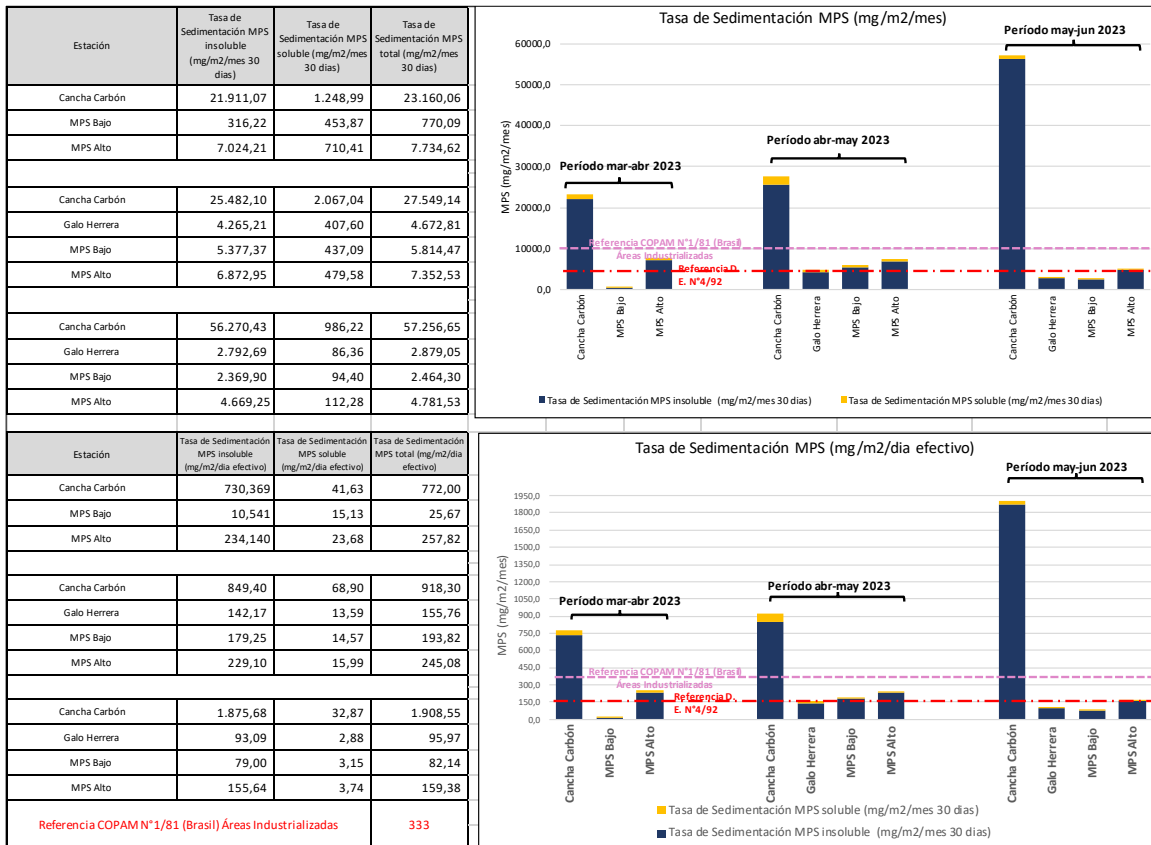


Figura 6 Tasa de Sedimentación mensual y diaria del MPS en las 4 Estaciones en el período marzo-junio 2023)

Considerando la Tasa de sedimentación mensual y diaria del MPS Total durante el período marzo-junio 2023 (Figura 6), se concluye que:

- Las estaciones que sobrepasan el límite indicado en la norma Cuenca del Río Huasco (D.E. N°4/92) son:
 - Estación Cancha Carbón en los tres meses de monitoreo.
 - Estación Galo Herrera, prácticamente en el límite en el mes 2 del período.
 - Estación MPS Bajo en el mes 2 del período.
 - Estación MPS Alto en los 3 meses de monitoreo.
- Las estaciones que sobrepasan el límite indicado en la norma brasileña COPAM N° 1/81 para áreas industrializadas son:
 - Estación Cancha Carbón en los tres meses del período de monitoreo.

Al respecto, se hace notar que la Estación Cancha Carbón se ubica “dentro” de un área industrial, por tanto, no debería sorprender que sobrepase la norma brasileña.

7.3 Tasa de Sedimentación del Carbón

Por sus características físicas y el tamaño de los fragmentos, el carbón particulado es susceptible de ser erosionado por la acción del viento dentro y fuera de las instalaciones industriales que lo utilizan o manejan. En ese sentido, la erosión eólica que lo afecte provocará efectos similares a los que ocurren en los botaderos de minas o en los relaves de minerales.

En el área monitoreada, como es evidente y esperable, el mayor contenido de carbón se registra en la Estación Cancha Carbón, lugar de acopio y movimiento de los carbones que serán utilizados en el proceso de termo-generación del CTC y muy probablemente, lugar de origen de las partículas de carbón (menores de 1mm de diámetro) que forman parte del MPS insoluble. La Estación Cancha Carbón está ubicada dentro de la dependencia del mismo nombre, adyacente a la membrana deflectora que protege los sectores externos de la dispersión de partículas de carbón desde la cancha de acopio.

Como se aprecia en el gráfico de la Figura 7, la Tasa de Sedimentación del Carbón en la Estación Cancha Carbón supera el valor máximo diario permitido para la cuenca del Río Huasco (D.E N° 4/91) en los tres meses del monitoreo que se informa (marzo-junio 2023), así como también, el límite aceptado para áreas industriales de la norma brasileña COPAM N°1/81 en el mismo período.

En las restantes 3 Estaciones, Galo Herrera, MPS Bajo y MPS Alto, ubicadas a una distancia de 150 m, 275 m y 475 m, respectivamente, de la Estación Cancha Carbón, las Tasas de Sedimentación de carbón son considerablemente menores (Figura 7) y en ninguno de los 3 meses de monitoreo sobrepasan el límite diario de 150 mg/m²/día que precisa el D.E. 4/91 del Ministerio de Agricultura (norma Cuenca del Río Huasco).

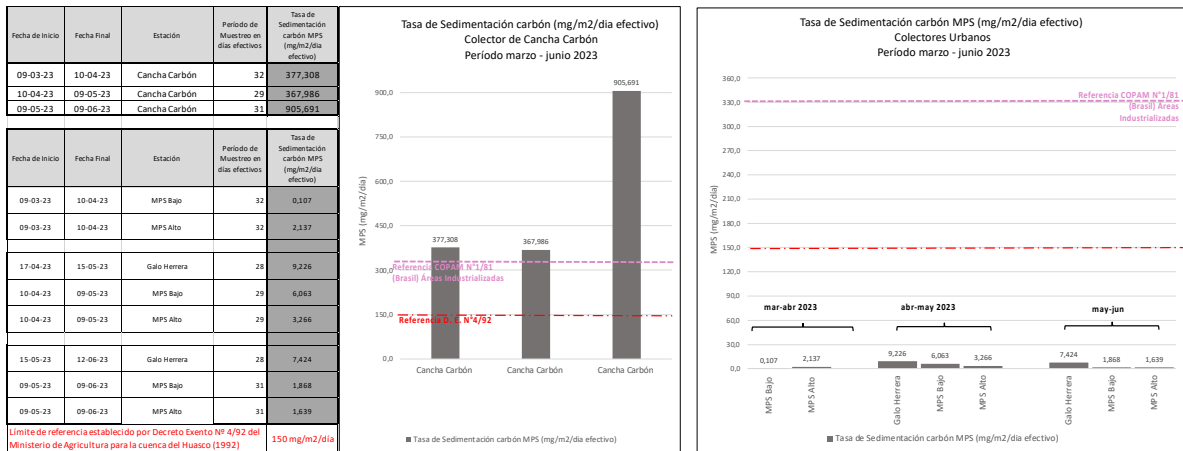


Figura 7 Tasa Sedimentación Carbón diaria en las 4 Estaciones (marzo-junio 2023)

Como fue reportado en la Tabla 11, los valores promedio de la Tasa de Sedimentación del Carbón son: Estación Cancha Carbón: 550,328 mg/m²/día efectivo; Estación Galo Herrera: 8,325 mg/m²/día efectivo; Estación MPS Bajo: 2,679 mg/m²/día efectivo; Estación MPS Alto: 2,347 mg/m²/día efectivo. Así, se constata una significativa reducción de la Tasa de sedimentación de Carbón en función de la distancia a la fuente del carbón del orden de 98,5% en la Estación Galo Herrera de 99,5% (distancia de 150 m) en la Estación MPS Bajo (distancia de 275 m) y 99,6% en la Estación MPS

Alto (distancia 475 m). Se concluye entonces, que la disminución de la Tasa de Sedimentación del Carbón está determinada por la efectividad de las medidas de control de la dispersión de las partículas de carbón, adoptadas por AES-Andes.

8 CONCLUSIONES

8.1 Tasa de Sedimentación MPS total

- 1) Los valores más altos de la Tasa de Sedimentación del *MPS total* en los 3 meses de monitoreo del período que se informa (marzo-junio 2023), correspondientes a los meses 7, 8 y 9 desde el inicio del monitoreo, se registran en la Estación Cancha Carbón.
- 2) Las estaciones que sobrepasan el límite diario de $150 \text{ mg/m}^2/\text{día}$ indicado en la norma Cuenca del Río Huasco (D.E. N°4/92) en el período monitoreo de 3 meses (marzo-abril; abril-mayo; mayo-junio) son:
 - Estación Cancha Carbón en los 3 meses de monitoreo (valores entre $1908,55 \text{ mg/m}^2/\text{día}$ y $772,00 \text{ mg/m}^2/\text{día}$).
 - Estación Galo Herrera, prácticamente en el límite ($155,76 \text{ mg/m}^2/\text{día}$) en el mes 2 del período (abril-mayo 2023).
 - Estación MPS Bajo en el mes 2 del período ($193,82 \text{ mg/m}^2/\text{día}$ en abril-mayo 2023).
 - Estación MPS Alto en los 3 meses de monitoreo (valores entre $257,82 \text{ mg/m}^2/\text{día}$ y $159,38 \text{ mg/m}^2/\text{día}$).
- 3) El grueso de la Tasa de Sedimentación del *MPS total* está determinado por la Tasa de Sedimentación del *MPS insoluble*, que representa el 96,0% en la Estación Cancha Carbón, 93,5% en la Estación Galo Herrera, 89,1% en la Estación MPS Bajo y 93,4% en la Estación MPS Alto.

8.2 Tasa de Sedimentación diaria del MPS soluble

El mayor valor promedio se registra en la Estación Cancha Carbón ($47,803 \text{ mg/m}^2/\text{día}$ efectivo), mientras que en las restantes 3 Estaciones es significativamente menor, fluctuando entre $8,233$ y $10,949 \text{ mg/m}^2/\text{día}$ efectivo. En todas las Estaciones se registra un notable decrecimiento de la Tasa de Sedimentación del *MPS soluble* en el tercer mes (mayo-junio 2023) del período de monitoreo.

8.3 Granulometría MPS Insoluble

El tamaño mínimo promedio de las partículas idéntico en las Estaciones Cancha Carbón y MPS Bajo (promedio $0,088 \mu\text{m}$) y algo mayor en las Estaciones Galo Herrera y MPS Alto (promedio $0,307 \mu\text{m}$ y $0,166 \mu\text{m}$, respectivamente).

Con relación al tamaño máximo, el mayor valor promedio se registra en la Estación MPS Bajo ($205,065 \mu\text{m}$), seguido de la Estación Galo Herrera ($169,261 \mu\text{m}$). En las Estaciones Cancha Carbón y MPS Alto, los valores promedio son similares ($141,407 \mu\text{m}$ y $145,315 \mu\text{m}$, respectivamente).

8.4 Componentes del MPS insoluble

- 1) Mayoritariamente está compuesto de partículas antrópicas. Componentes naturales, como restos de vegetales, representan solo entre 4,2% (Estación MPS Bajo) y 1,6% del *MPS Insoluble* (Estación MPS Alto).

- 2) Los residuos de combustión son el principal componente del MPS en todas las Estaciones, excepto Estación Cancha Carbón. La Estación MPS Alto registra el porcentaje promedio más alto de residuos de combustión (90,7%), seguido de la Estación MPS Bajo (85,8%), Galo Herrera (78,0%) y Cancha Carbón (44,0%).
- 3) El carbón es el segundo componente más abundante del MPS insoluble, especialmente en la Estación Cancha Carbón, donde representa el 47,8% del MPS insoluble, disminuyendo drásticamente en las restantes 3 Estaciones hasta un 1,1% en la Estación MPS Alto.
- 4) Partículas metálicas del tipo sulfuros de Cu-Fe y Sulfuros de Cu están presentes en las 4 Estaciones, representando entre un 12,1% (Estación Galo Herrera) y 5,7% (Estación Cancha Carbón) del MPS insoluble.

8.5 Tasa de Sedimentación diaria del MPS insoluble

- 1) El mayor valor promedio se registra en la Estación Cancha Carbón (1151,818 mg/m²/día). En las restantes 3 Estaciones la tasa disminuye drásticamente, fluctuando entre 154,720 mg/m²/día (E. MPS Alto) y 89,594 mg/m²/día (E. MPS Bajo).
- 2) Con respecto a la Estación Cancha Carbón, la Tasa de Sedimentación diaria promedio del MPS insoluble se reduce 89,8% en la Estación Galo Herrera, 92,2% en la Estación MPS Bajo y 82,1% en la Estación MPS Alto.

8.6 Carbón en el MPS

- 1) La masa de carbón que se acumula mensualmente en las 4 Estaciones de Monitoreo es baja, fluctuando entre unos pocos gramos (E. Cancha Carbón) y centésimas de gramo (E. Galo Herrera, E. MPS Bajo y E. MPS Alto).
- 2) El valor promedio de la masa de carbón acumulada mensualmente en la Estación Cancha Carbón es de 3,3 g y disminuye drásticamente a solo centésimas de gramo en las restantes 3 Estaciones: 0,045 g en E. Galo Herrera, 0,015 g en E. MPS Bajo y 0.014 en E. MPS Alto.
- 3) El porcentaje (en masa) promedio de carbón, respecto al MPS insoluble, es significativamente más alto en la Estación Cancha Carbón (47,8%), disminuyendo drásticamente a 7,2% en la Estación Galo Herrera, a 2,3% en la Estación MPS Bajo y 1,1% en la Estación MPS Alto.
- 4) El tamaño máximo promedio de las partículas de carbón fluctúa entre 131,2 μm (Estación Galo Herrera) y 73,9 μm (Estación MPS Alto).

8.7 Tasa de Sedimentación del Carbón

- 1) En la Estación Cancha Carbón se registran los mayores valores de la Tasa de Sedimentación del carbón en los 3 meses. En particular, registra un fuerte aumento en el tercer mes del

período (mayo-junio) donde se incrementa entre 140 y 146 % respecto a los dos meses precedentes. El valor promedio en los tres meses es de 550,328 mg/m²/día.

- 2) En el resto de la Estaciones, la Tasa de Sedimentación del Carbón es considerablemente más baja que en la Estación Cancha Carbón, con valores promedio de 8,325 mg/m²/día en la E. Galo Herrera), 2,679 mg/m²/día en la E. MPS Bajo y de 2,347 mg/m²/día en la E. MPS Alto..
- 3) Con relación al valor promedio registrado en la Estación Cancha Carbón, la Tasa promedio de Sedimentación del Carbón decrece abruptamente en 98,5% en la Estación Galo Herrera, en 99,5% en la Estación MPS Bajo y en 99,6% en la Estación MPS Alto, lo que verifica la efectividad de las pantallas perimetrales en torno a la cancha de carbón.

Como las Estaciones Galo Herrera, MPS Bajo y MPS Alto están ubicadas a una distancia de 150 m, 275 m y 475 m, respectivamente, de la Estación Cancha Carbón, los resultados respecto a la *variable carbón* del MPS permiten constatar una relación directa entre la distancia a la fuente de origen de las partículas de carbón, el porcentaje de carbón en el MPS y de Tasas de Sedimentación de Carbón. Se concluye, entonces, que las medidas de control de la dispersión de las partículas de carbón, adoptadas por AES-Andes son efectivas.

9 REFERENCIAS

- Cisternas, 2022. 1° Informe de caracterización integral del MPS colectado en 4 Estaciones con colectores pasivos (Cancha Carbón, Galo Herrera, MPS Bajo y MPS Alto) en o cerca de las Instalaciones del Complejo Termoeléctrico Ventanas de AES-Andes. Mes 1, 2 y 3 del Monitoreo Anual. Puchuncaví, 5° Región, Chile. Informe Inédito para AES-Andes, 26 p. Noviembre 2022.
- Cisternas, 2023a. 2° Informe de caracterización integral del MPS colectado en 4 Estaciones con colectores pasivos (Cancha Carbón, Galo Herrera, MPS Bajo y MPS Alto) en o cerca de las Instalaciones del Complejo Termoeléctrico Ventanas de AES-Andes. Mes 4 y 5 del Monitoreo Anual. Puchuncaví, 5° Región, Chile. Informe Inédito para AES-Andes, 31 p. Abril 2023.
- Cisternas 2023b. 3° Informe de caracterización integral del MPS colectado en 4 Estaciones con colectores pasivos (Cancha Carbón, Galo Herrera, MPS Bajo y MPS Alto) en o cerca de las Instalaciones del Complejo Termoeléctrico Ventanas de AES-Andes. Mes 7, 8 y 9 del Monitoreo Anual. Puchuncaví, 5° Región, Chile. Informe Inédito para AES-Andes, 28 p. Mayo 2023.
- D. N°4/1992 Exento del Ministerio de Agricultura. Normas de Calidad del Aire para Material Particulado Sedimentable en la Cuenca del Río Huasco III Región.
- Feng, S. & Li, Y. Study on coal fly ash classified by bulk density. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1732 012127. doi.org/10.1088/1742-6596/1732/1/012127.
- D.E. N°223/2015 del Ministerio del Medio Ambiente, Instrucciones Generales sobre la Elaboración del Plan de Seguimiento de Variables Medioambientales.
- Minerals Densities. The Engineering Toolbox (www.engineeringtoolbox.com)
- Saiah, R., Perrin, B. & Rigal, L. 2010. Improvement of thermal properties of fires clays by introduction of vegetable matter. *J. Building Physics*, 34 (2): 124-142. doi.org/10.1177/1744259109360059.
- Santos, J.M. Reis, N.C., Galvão E.S., Silveira, A., Goulart, E. V. & Lima, A. T. 2017. Source apportionment of settleable particles in an impacted urban and industrialized region in Brazil. *Environ Sci Pollut Res* 4(27): 22026-22039.
- Severin, K. 2004. Energy Dispersive Spectrometry of Common Rock Forming Minerals. Kluwer Acad. Pu. 219 p.
- Suarez-Ruiz, I. et al. (2017) Development of a petrographic classification of fly-ash components from coal combustion and co-combustion. (An ICCP Classification System, Fly-Ash Working Group – Commission III.). *Inter. Jour. Coal Geology*, 183: 188-203.
- Valentim, et al. 2018. Undifferentiated Inorganics in Coal Fly Ash and Bottom Ash: Calciphères, magnesiocalciphères and Magnesiasphères. *Minerals* 2018, 8, 140; doi:10.3390/min8040140.
- Vallack, H. W. & Shillito, D. E. 1998. Suggested guidelines for deposited ambient dust. *Atmospheric Environment* Vol. 32 (16,): 737—2744.
- Wood, G., Kehn T., Carter, D. & Culberston, W. Coal Resource Classification System of the US Geological Survey. Geological Survey Circular 891. <http://pubs.usgs.gov/circ/c891/table2.htm>



Dra. María Eugenia Cisternas S.
Geóloga-Mineralogista
GEO-FORENSIC SpA
27 de agosto de 2023

2° INFORME DE CARACTERIZACION INTEGRAL DEL
MPS COLECTADO EN 4 ESTACIONES CON
COLECTORES PASIVOS (CANCHA CARBÓN, GALO
HERRERA, MPS BAJO Y MPS ALTO) EN O CERCA DE
LAS INSTALACIONES DEL COMPLEJO
TERMoeLECTRICO VENTANAS DE AES-ANDES. Mes 4,
5 y 6 (oct-dic 2022). PUCHUNVAVI, 5° REGION, CHILE
Dra. María Eugenia Cisternas S

Fecha Informe: 18 abril 2023

Tabla de contenido

RESUMEN EJECUTIVO	3
1 INTRODUCCIÓN	5
2 OBJETIVOS	7
3 METODOLOGÍA DE MUESTREO Y ANÁLISIS DEL MPS	8
3.1 INSTALACIÓN DE COLECTORES PASIVOS Y RECOLECCIÓN DE MUESTRAS	8
3.2 REMOCIÓN DEL MPS DESDE LAS BOTELLAS, DETERMINACIÓN DE LA MASA DEL MPS TOTAL, SOLUBLE E INSOLUBLE ..	9
3.3 ESTUDIO COMPOSICIONAL DEL MPS INSOLUBLE Y CUANTIFICACIÓN DE LA FRACCIÓN CORRESPONDIENTE A CARBÓN.	9
4 MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS.....	9
4.1 CARACTERIZACIÓN GRANULOMÉTRICA DEL MPS.....	9
4.2 IDENTIFICACIÓN DE COMPONENTES DEL MPS INSOLUBLE MEDIANTE MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA (SEM/EDS).....	9
4.3 DETERMINACIÓN PORCENTUAL DE TIPOS DE PARTÍCULAS ANTRÓPICAS EN EL MPS	11
5 RESULTADOS MPS SOLUBLE.....	12
5.1 MASA DE MPS SOLUBLE.....	12
5.2 TASA DE CONCENTRACIÓN MPS SOLUBLE	12
5.3 TASA DE SEDIMENTACIÓN MPS SOLUBLE.....	13
6 RESULTADOS MPS INSOLUBLE	15
6.1 GRANULOMETRÍA DE MPS INSOLUBLE.....	15
6.2 COMPOSICIÓN DEL MPS INSOLUBLE	15
6.3 MASA Y PORCENTAJE EN MASA DE LOS COMPONENTES DEL MPS INSOLUBLE	17
6.4 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL MPS INSOLUBLE.....	19
7 RESULTADOS REFERIDOS AL COMPONENTE CARBÓN DEL MPS INSOLUBLE	20
7.1 MASA, PORCENTAJE Y TAMAÑO DE PARTÍCULAS DE CARBÓN	20
7.2 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL CARBÓN	21
8 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	23
8.1 COMPONENTES ANTRÓPICOS Y SU PROPORCIÓN EN EL MPS.....	23
8.2 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL MPS TOTAL.....	24
8.3 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL CARBÓN	26
9 CONCLUSIONES.....	29
9.1 TASA DE SEDIMENTACIÓN MPS TOTAL.....	29
9.2 TASA DE SEDIMENTACIÓN DIARIA DEL MPS SOLUBLE.....	29
9.3 GRANULOMETRÍA MPS INSOLUBLE.....	29
9.4 COMPONENTES DEL MPS INSOLUBLE	29
9.5 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL MPS INSOLUBLE.....	30
9.6 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL MPS TOTAL.....	30
9.7 CARBÓN EN EL MPS	30
9.8 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL CARBÓN	30
10 REFERENCIAS	31

LISTA DE TABLAS

TABLA 1 MASA MPS SOLUBLE (MG) EN LAS 4 ESTACIONES DURANTE LOS 2 MESES DE MONITOREO DEL PERÍODO OCTUBRE-DICIEMBRE 2022.....	12
--	----

TABLA 2 TASA DE SEDIMENTACIÓN MENSUAL MPS SOLUBLE, EFECTIVA Y NORMALIZADA A 30 DÍAS. PERÍODO OCTUBRE-DICIEMBRE 2022	13
TABLA 3 TASA DE SEDIMENTACIÓN DIARIA MPS SOLUBLE CALCULADA POR DÍA EFECTIVO. PERÍODO OCTUBRE-DICIEMBRE 2022) 14	
TABLA 4 TAMAÑO PARTÍCULAS MPS INSOLUBLE EN LAS 4 ESTACIONES DURANTE LOS 2 MESES DE MONITOREO DEL PERÍODO OCTUBRE-DICIEMBRE 2022	15
TABLA 5 MASA POR TIPO DE PARTÍCULA EN LAS 4 ESTACIONES, EN LOS 2 MESES DE MONITOREO DEL PERÍODO OCTUBRE-DICIEMBRE 2022	18
TABLA 6 PORCENTAJE EN MASA POR TIPO DE PARTÍCULA EN LAS 4 ESTACIONES, EN LOS 2 MESES DE MONITOREO DEL PERÍODO OCTUBRE-DICIEMBRE 2022	18
TABLA 7 MASA Y PORCENTAJE PROMEDIO (2 MESES) DE COMPONENTES EN MPS INSOLUBLE. PERÍODO OCTUBRE-DICIEMBRE 2022	18
TABLA 8 TASA DE SEDIMENTACIÓN DE MPS INSOLUBLE MENSUAL Y DIARIA EN EL PERÍODO OCTUBRE-DICIEMBRE 2022.	19
TABLA 9 PORCENTAJE (EN MASA) DEL CARBÓN EN EL MPS INSOLUBLE EN LAS 4 ESTACIONES EN EL PERÍODO OCTUBRE-DICIEMBRE DE 2022.....	21
TABLA 10 TAMAÑO MÍNIMO Y MÁXIMO (EN MICRONES) DE LAS PARTÍCULAS DE CARBÓN EN EL PERÍODO OCTUBRE-DICIEMBRE DE 2022	21
TABLA 11 TASA SEDIMENTACIÓN CARBÓN EN LAS 4 ESTACIONES EN LOS 2 MESES DE MONITOREO DEL PERÍODO OCTUBRE-DICIEMBRE DE 2022.....	22
TABLA 12 EJEMPLOS DE VALORES LÍMITES DE TASA DE SEDIMENTACIÓN DE MPS (MG/M ² /DÍA)	25
TABLA 13 TASA DE SEDIMENTACIÓN DIARIA DE MPS SOLUBLE, INSOLUBLE Y TOTAL EN LOS 2 MESES DE MONITOREO. PERÍODO OCTUBRE-DICIEMBRE 2022	25

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 UBICACIÓN ESPACIAL SOBRE IMAGEN GOOGLE EARTH DE LAS 4 ESTACIONES DE MONITOREO	6
FIGURA 2 MODELO DE COLECTOR PASIVO INSTALADO EN 4 ESTACIONES DEL CTV.....	8
FIGURA 3 CONCENTRACIÓN (G/L) COMPARADA DEL MPS SOLUBLE EN LAS 4 ESTACIONES. PERÍODO OCTUBRE-DICIEMBRE 2022 13	
FIGURA 4 MASA DE CARBÓN REGISTRADA EN LAS 4 ESTACIONES Y VARIABILIDAD EN EL PERÍODO OCTUBRE-DICIEMBRE DE 2022 .	20
FIGURA 5 EVOLUCIÓN PORCENTUAL (% EN MASA) DE LOS COMPONENTES DEL MPS INSOLUBLE EN LAS 4 ESTACIONES. PERÍODO OCTUBRE-DICIEMBRE DE 2022	23
FIGURA 6 TASA DE SEDIMENTACIÓN MENSUAL Y DIARIA DEL MPS EN LAS 4 ESTACIONES. PERÍODO OCTUBRE-DICIEMBRE 2022. 26	
FIGURA 7 TASA SEDIMENTACIÓN CARBÓN DIARIA EN LAS 4 ESTACIONES. PERÍODO OCTUBRE-DICIEMBRE 2022).....	27

LISTA DE LAMINAS

LÁMINA 1. A: SEM/BSE; B: SEM/EDS MAPPING DE C, O, AL, SI, FE, CU Y S; C ; C: MAPPING DE CARBONO (C)	17
---	----

RESUMEN EJECUTIVO

El presente Informe se enmarca en el Plan de Muestreo de Material Particulado Sedimentable (MPS) de 12 meses de duración, autorizado mediante la Resolución N° 00045 (02 de junio 2022) de la Secretaría Regional Ministerial de Salud (SRMS) de la Región de Valparaíso, cuyo objetivo principal es evaluar la eficacia del Sistema de Control de dispersión de material, específicamente de las partículas de carbón, hacia el exterior del Complejo Termoeléctrico Ventanas.

El Plan de Muestreo considera la caracterización del MPS depositado mensualmente en 4 colectores pasivos durante 1 año, con informes trimestrales de resultados. Los colectores se ubican: 01 al interior de la cancha de carbón (Estación Cancha Carbón), 01 fuera de la cancha, aunque dentro de las dependencias de AES ANDES (Estación Galo Herrera), y 02 ubicados en la comunidad en el sector de la greda bajo (MPS Bajo) y la greda alto (MPS Alto)

Las variables ambientales principales consideradas en el Plan de Monitoreo son: 1) el porcentaje de carbón presente en el MPS insoluble; 2) la variación del porcentaje de carbón en las cuatro estaciones; 3) el gradiente de dispersión del carbón desde la cancha de acopio de este material, hacia las 3 otras estaciones.

Este informe presenta los resultados de los meses 5 y 6 de monitoreo (octubre-noviembre y noviembre-diciembre 2022), referidos a la caracterización del MPS soluble, insoluble y total, con especial énfasis en el componente carbón del MPS. El mes 4 (septiembre-octubre 2022) no está considerado en este Informe, dado que las muestras, fueron extraviadas por la empresa Chileexpress. Hecho informado por AES Andes mediante carta VPO-DMA-069-2023 del 17-04-2023.

Las conclusiones de esta fase del monitoreo son:

- 1) La Tasa de Sedimentación diaria del MPS total supera el valor límite de 150 mg/m² /día que precisa la norma secundaria para la Cuenca del Río Huasco (D.E. N°4/92) en:
 - Estación Cancha Carbón en los dos meses monitoreados (octubre-noviembre y noviembre-diciembre 2022)
 - Estación Galo Herrera y Estación MPS Greda Alto en el período octubre-noviembre 2022.
- 2) El MPS insoluble está compuesto mayoritariamente de partículas antrópicas (residuos de combustión de carbón, carbón crudo y partículas metálicas tipo sulfuros de Cu), con componentes naturales (briznas de vegetales) en proporción muy minoritaria (entre 1,7% a 7,1%, valores promedio dos meses).
- 3) El carbón es el segundo componente más abundante del MPS insoluble en todas las estaciones, después de los residuos de combustión. El porcentaje promedio de carbón en los 2 meses de monitoreo es significativamente más alto en la Estación Cancha de Carbón (45,3%), disminuyendo de manera sostenida a medida que aumenta la distancia a las instalaciones del CTV: 4,3 veces en Estación Galo Herrera, 20,2 veces en Estación MPS Bajo y 18,4 veces en la Estación MPS Alto.

- 4) La Tasa de Sedimentación del Carbón sobrepasa el límite diario de $150 \text{ mg/m}^2/\text{día}$ (norma DE N°4/92) solamente en la Estación Cancha Carbón en los dos meses de monitoreo (octubre-noviembre y noviembre-diciembre).
- 5) En las restantes tres Estaciones, Galo Herrera, MPS Bajo y MPS Alto, la Tasa de Sedimentación de carbón es considerablemente más baja que el límite diario máximo de $150 \text{ mg/m}^2/\text{día}$ indicado en la norma secundaria del Río Huasco (D.E. N°4/92).
- 6) El aporte de partículas de carbón desde la Cancha Carbón al MPS insoluble se reduce considerablemente hacia zonas externas, lo que se refleja en que la Tasa promedio de Sedimentación del Carbón decrece 14,8 veces en la Estación Galo Herrera, de 63,3 veces en la Estación MPS Bajo y de 137,5 veces en la Estación MPS Alto.

1 INTRODUCCIÓN

A solicitud de AES-Andes, a través del Departamento Gestión Ambiental Complejo Centro, Geo-Forensic SpA realizará la caracterización integral del Material Particulado Sedimentable (MPS), con particular énfasis en la participación del carbón dispersado desde la cancha de acopio de este material hacia sectores ubicados en las cercanías de las instalaciones de Complejo Termoeléctrico Ventanas (CTV), Comuna de Puchuncaví, Región de Valparaíso. Este estudio se enmarca en un Plan de Muestreo de Material Particulado Sedimentable (MPS) de 12 meses de duración.

El Plan de Muestreo de Material Particulado Sedimentable fue autorizado mediante la Resolución N° 00045 de la Secretaría Regional Ministerial de Salud (SRMS) de la Región de Valparaíso fechada el 02 de junio 2022. Dicha resolución autoriza el *Sistema de control y dispersión de material hacia el exterior de la instalación y su mecanismo de verificación de efectividad de la Cancha de almacenamiento de carbón* del Complejo Termoeléctrico Ventanas, (CTV) propiedad de AES ANDES S.A. El material al que hace referencia corresponde única y exclusivamente al *manejo de carbones Bituminosos y Sub-bituminosos acopiados en la cancha de carbón del CTV*.

En la Figura 1 se señala la ubicación espacial sobre imagen Google Earth de las 4 Estaciones de Monitoreo indicadas en la Resolución N° 00045 del SRMS.



Figura 1 Ubicación espacial sobre imagen Google Earth de las 4 Estaciones de Monitoreo

- Estación Cancha carbón (coordenadas geográficas 267662.17 E; 6373667.19 S), ubicada al interior de la cancha de acopio de carbón.
- Estación Galo Herrera, (coordenadas geográficas 267760,87 E y 6373794.17 S) localizada fuera de la cancha, aunque dentro de las dependencias de AES ANDES.
- Estación MPS Bajo (coordenadas geográficas N), 267669 E, 6373931 N) ubicada dentro del área de protección de la pantalla deflectora.
- Estación MPS Alto (coordenadas geográficas 267774 E; 6374087 N), ubicada cerca del área de protección de la pantalla deflectora.

Las Estaciones MPS Alto y MPS Bajo están ubicadas en el poblado La Greda.

Las variables ambientales principales consideradas en el Plan de Monitoreo son:

- 1) El porcentaje de carbón presente en el MPS insoluble.
- 2) La variación del porcentaje de carbón en las cuatro estaciones.

3) El gradiente de dispersión del carbón desde la cancha de acopio de este material, hacia las 3 otras estaciones del Plan de Muestreo de MPS.

El presente Informe se hace cargo de los resultados obtenidos en los meses 5 y 6 de monitoreo (período mediados de octubre a mediados de diciembre 2022). Las botellas colectoras del MPS, correspondientes al mes 4 (mediados de septiembre a mediados de octubre), fueron extraviadas por la empresa Chilexpress, encargada por SGS del transporte a los laboratorios del Instituto GEA de la Universidad de Concepción.

2 OBJETIVOS

El Objetivo Principal del Plan de monitoreo es evaluar la eficacia del Sistema de Control de dispersión de material, específicamente de las partículas de carbón, hacia el exterior del Complejo Termoeléctrico Ventanas.

Las principales tareas a desarrollar para cumplir el Objetivo Principal son:

- Monitorear y caracterizar la cantidad de MPS acumulada en cada colector, con indicación de la Tasa de sedimentación del MPS soluble e insoluble.
- Monitorear y caracterizar la cantidad de MPS correspondiente a las partículas de carbón, con indicación de la masa acumulada en cada colector y cálculo de la Tasa de Sedimentación del Carbón expresada en $\text{mg}/\text{m}^2/\text{mes}$ y $\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$.
- Determinar la variación espacial y temporal de las Tasas de Sedimentación de carbón, considerando las variaciones en las 4 estaciones y variaciones en el lapso de tiempo considerado entre la instalación y la remoción de los colectores para el período que se informa.

Como Objetivo Secundario se aborda la comparación de las Tasas de Sedimentación del carbón con normas nacionales e internacionales.

Los parámetros que fueron utilizados para caracterizar el estado y evolución de las variables ambientales son:

- Masa soluble total
- Masa insoluble total
- Masa insoluble carbón
- Tasa de Sedimentación del MPS
- Tasa de Sedimentación del Carbón

3 METODOLOGÍA DE MUESTREO y ANÁLISIS DEL MPS

El término MPS (*Settleable Particulate Matter*, en inglés) se refiere a cualquier material compuesto de partículas lo suficientemente pequeñas como para pasar a través de una pantalla de 1 mm y lo suficientemente grandes como para depositarse desde el aire, en virtud de su peso, en el contenedor (Norma ASTM D 1739 – 98)¹.

3.1 Instalación de colectores pasivos y recolección de muestras

Para recolectar el Material Particulado Sedimentable se utilizaron colectores pasivos (Figura 2), con un radio de 0,249 m.

La empresa SGS Chile Ltda., fue la responsable de la instalación y mantención de los 4 colectores pasivos. El período aconsejado de recolección del MPS es del orden de 27 a 32 días, sin embargo en condiciones climáticas desfavorables, por ejemplo fuertes lluvias, las botellas de recolección pueden ser removidas y guardadas mientras dura el mal tiempo y, tras esto, recolocadas nuevamente en los colectores.

La remoción de las botellas desde los 4 colectores pasivos está a cargo de la Empresa SGS, quien envía mensualmente las botellas al Instituto de Geología Económica (GEA) de la Universidad de Concepción.



Figura 2 Modelo de Colector pasivo instalado en 4 Estaciones del CTV.

¹ Standard Test Method for Collection and Measurement of Dustfall (Settleable Particulate Matter)¹

3.2 Remoción del MPS desde las botellas, determinación de la masa del MPS total, soluble e insoluble

En el Instituto GEA, las botellas colectoras son tratadas con ultrasonido para retirar toda la masa adherida a la superficie interna. Posteriormente, se procede a:

- Determinación de sólidos insolubles: una vez removida toda la masa de las botellas colectoras se procede a la filtración de sólidos, utilizando un filtro de membrana de 0,45 micrones. Posteriormente, los sólidos son secados a 40°C y luego pesados, hasta peso constante.
- Determinación de sólidos solubles: Los sólidos solubles fueron determinados en la solución remanente de la filtración, según la norma ASTM D 1739 – 98.
- Determinar la granulometría de las partículas en la fracción insoluble mediante difracción laser.
- Entrega de la fracción insoluble a Geo-Forensic SpA.

3.3 Estudio composicional del MPS Insoluble y cuantificación de la fracción correspondiente a carbón.

Una vez recibidas las muestras de la fracción insoluble del MPS, por parte Geo-Forensic se procede al estudio integral de componentes mediante Microscopía Electrónica (SEM), con énfasis en el estudio del *componente carbón*.

4 MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS

4.1 Caracterización granulométrica del MPS

El análisis granulométrico de la masa total insoluble es realizado por el Instituto de Geología Económica Aplicada (GEA) de la Universidad de Concepción mediante el método de difracción láser en húmedo. El equipo utilizado es un analizador granulométrico láser Fritsch modelo Analysette 22 Microtec Plus. El análisis se realiza en húmedo, con aplicación de ultrasonido para obtener la máxima dispersión de partículas. El equipo posee un rango de medición de 0,08 a 2000 micrones (μm).

4.2 Identificación de componentes del MPS Insoluble mediante microscopía electrónica (SEM/EDS)

Considerando que las partículas del MPS tienen tamaño micrométrico, la caracterización textural y composicional de los diferentes tipos de partículas presentes en el MPS insoluble se realiza mediante microscopio electrónico de barrido (SEM)

El equipo utilizado corresponde a un TSCAN, VEGA III, equipado con detector de electrones retro-dispersados (Modo BSE), detector de electrones secundarios (Modo SE) y detector de rayos x de energía dispersiva (Modo EDS). Este equipo pertenece al Centro de Microscopía Avanzada del Bío-Bío (CMA), ubicado en dependencias de la Universidad de Concepción.

En un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM: Scanning Electron Microscopy por sus siglas en inglés) el bombardeo de electrones sobre la muestra produce varias formas simultáneas de radiación, entre ellas, la emisión de electrones secundarios (SE), electrones retro-dispersados (BSE) y emisión de rayos X. Cada una de esas formas de radiación es capturada por un detector específico.

Detector SE versus detector BSE

La imagen entregada por el SEM se genera por la interacción del haz de electrones que “barre” un área determinada sobre la superficie de la muestra. La detección de los electrones secundarios o retro-dispersados en un gran número de puntos sobre el área barrida, previa transformación electrónica, genera la imagen que se visualiza en una pantalla y es fotografiada mediante una cámara adosada al equipo.

El detector SE es ideal para generar imágenes SEM de alta resolución que permiten obtener detalles de la morfología y textura superficial de las partículas. El detector BSE ofrece una imagen de menor resolución, pero tiene la ventaja de que es sensible a las variaciones en el número atómico de los elementos presentes en la superficie, permitiendo discriminar sobre la imagen partículas de diferente composición.

Cada imagen SEM incorporada en este estudio contiene información impresa de las condiciones de trabajo (voltaje de aceleración de electrones, distancia de trabajo, magnificación) y una escala gráfica que permite identificar el tamaño de las partículas. La intensidad del haz de electrones utilizada fluctuó entre 10 y 12 mV.

Detector EDS para determinación química de componentes

El detector EDS analiza los rayos X generados por el bombardeo de electrones mediante la espectroscopía de rayos X de energía dispersa (EDS por sus siglas en inglés). Permite identificar los elementos presentes en el punto de incidencia del haz de electrones sobre una partícula, o en un área previamente determinada que será barrida por el haz de electrones. Se obtiene así un espectro con los *peaks* de los elementos presentes en el punto de incidencia, con dato del porcentaje elemental o en masa de esos elementos. O bien, si se combina con la detección de electrones retro-dispersados en un área, se obtiene una suerte de “mapa” con la distribución de los elementos presentes en la muestra (*herramienta mapping*).

Los espectros EDS aplicados a los objetivos de este estudio, aportan información invaluable para diferenciar la naturaleza de las partículas sólidas, es decir distinguir carbón crudo, de residuos de combustión, de otras partícula metálicas o bien de partículas vegetales.

Como material de referencia para la identificación de los diferentes tipos de residuos de combustión fueron utilizados los estudios de Suarez -Ruiz et al. 2017² y Valentim et al. 2018³. Para la identificación composicional de fases cristalinas mediante SEM se utilizó el trabajo de Severin, 2004⁴.

Montaje de las muestras para el estudio mediante microscopio electrónico

Las muestras fueron montadas en porta muestras de aluminio de 11 mm de diámetro (pines), recubiertos con cinta adhesiva de doble cara de carbono. El montaje de las partículas se realiza teniendo precaución que éstas no se superpongan entre sí, ya que eso puede afectar el espectro EDS de las partículas de interés. El análisis de las muestras se realizó sin grafitización previa de los porta muestras.

4.3 Determinación porcentual de tipos de partículas antrópicas en el MPS

Para determinar el porcentaje de partículas identificadas en el MPS Insoluble se utiliza un programa digital que emula un contador automático de puntos. Mediante este programa se determinó la relación porcentual relativa, en volumen, de las partículas naturales y antrópicas presentes en las muestras, utilizando para ello 3 imágenes SEM por muestra, obtenidas con el detector BSE a baja magnificación (100x) y alta resolución.

El porcentaje en masa de los componentes fue determinado utilizando valores de densidad promedio para los diferentes tipos de partículas, como se indica a continuación:

Partículas naturales:

- Briznas de vegetales⁵: 1,5 g/cm³

Partículas antrópicas:

- Partículas de carbón⁶: 1,4 g/cm³ (valores fluctúan entre 1,47 y 1,29 g/cm³)
- Residuos de Combustión⁷: 2,5 g/cm³ (valores fluctúan entre 1,9 a 2,9 g/cm³)
- Partículas Metálicas⁸: 5,0 g/cm³ (sulfuros de Cu-Fe: 4,9 g/cm³; Magnetita: 5,2 g/cm³)

² Suarez-Ruiz, I. et al. (2017) Development of a petrographic classification of fly-ash components from coal combustion and co-combustion. (An ICCP Classification System, Fly-Ash Working Group – Commission III.). *Inter. Jour. Coal Geology*, 183: 188-203.

³ Valentim, et al. 2018. Undifferentiated Inorganics in Coal Fly Ash and Bottom Ash: Calciphères, magnesiocalciphères and Magnesiaspheres. *Minerals* 2018, 8, 140; doi:10.3390/min8040140.

⁴ Severin, K. 2004. Energy Dispersive Spectrometry of Common Rock Forming Minerals. Kluwer Acad. Pu. 219 p.

⁵ Saiah, R., Perrin, B. & Rigal, L. 2010. Improvement of thermal properties of fires clays by introduction of vegetable matter. *J. Building Physics*, 34 (2): 124-142. doi.org/10.1177/1744259109360059

⁶ Wood, G., Kehn T., Carter, D. & Culberston, W. Coal Resource Classification System of the US Geological Survey. Geological Survey Circular 891. <http://pubs.usgs.gov/circ/c891/table2.htm>

⁷ Feng, S. & Li, Y. Study on coal fly ash classified by bulk density. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1732 012127. doi.org/10.1088/1742-6596/1732/1/012127

⁸ Minerals Densities. The Engineering Toolbox (www.engineeringtoolbox.com)

5 RESULTADOS MPS soluble

5.1 Masa de MPS soluble

En la Tabla 1 se indica la masa de MPS Soluble determinado en las muestras del período que se informa (mes 5 y mes 6, período octubre-diciembre 2022), considerando los días efectivos de acumulación de MPS.

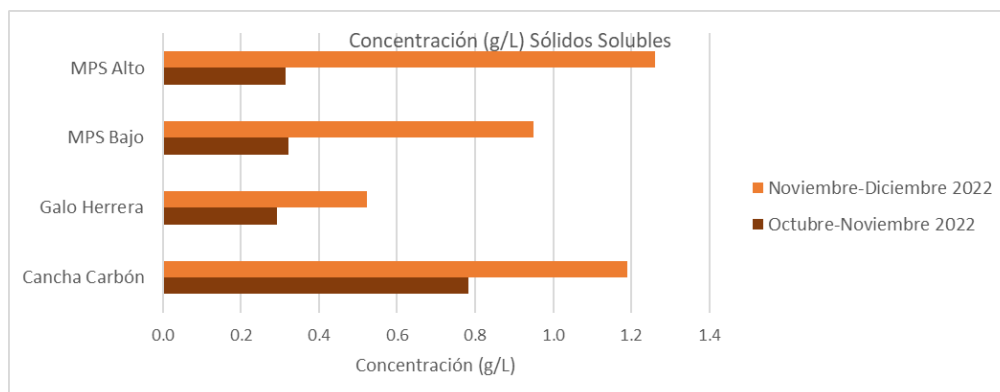
Nótese que en el mes 5 (octubre-noviembre) hay una variación substancial en el período de acumulación del MPS en las Estaciones Cancha de Carbón y Galo Herrera debido a la toma de los accesos a AES-Costa, lo cual impidió a SGS el ingreso oportuno para retirar las botellas. En el caso particular de la estación Galo Herrera (*) se constató intervención en el sitio del colector, razón por la cual fue necesario eliminar el MPS acumulado e instalar una nueva botella con fecha 27 de octubre 2022.

Fecha de Inicio	Fecha Final	Estación	Período de Muestreo en días efectivos	Masa MPS soluble medida (mg)
13-10-22	17-11-22	Cancha Carbon	35	234,5
27-10-22	17-11-22	Galo Herrera	21	87,4
13-10-22	11-11-22	MPS Bajo	29	96,4
13-10-22	11-11-22	MPS Alto	29	94,7
17-11-22	16-12-22	Cancha Carbon	29	331,0
17-11-22	16-12-22	Galo Herrera	29	186,9
11-11-22	09-12-22	MPS Bajo	28	121,5
11-11-22	09-12-22	MPS Alto	28	93,3

Tabla 1 Masa MPS Soluble (mg) en las 4 Estaciones durante los 2 meses de monitoreo del período octubre-diciembre 2022

5.2 Tasa de Concentración MPS soluble

En la Figura 3 se grafica la concentración de solubles en todas las estaciones para el período octubre-diciembre 2022 (mes 5 y 6). En el período octubre-noviembre (mes 5) los valores son más altos en la Estación Cancha Carbón y significativamente más bajas las restantes 3 estaciones. En el período noviembre-diciembre (mes 6) las comparaciones se entorpecen por las diferencias en el tiempo de acumulación del MPS en las diferentes Estaciones.



Resultados Sólidos Solubles	Octubre-Noviembre 2022				Noviembre-Diciembre 2022			
	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto
Volumen (L)	0.384	0.498	0.338	0.414	0.278	0.358	0.128	0.074
Concentración (g/L)	0.782	0.291	0.321	0.316	1.191	0.522	0.949	1.261
Masa (g)	0.235	0.087	0.096	0.095	0.331	0.187	0.122	0.093

Figura 3 Concentración (g/L) comparada del MPS soluble en las 4 Estaciones. Período octubre-diciembre 2022

5.3 Tasa de Sedimentación MPS Soluble

En la Tabla 2 se registra la Tasas de Sedimentación mensual del MPS soluble, calculada tomando en consideración los días efectivos para cada período y valores derivados de normalizar a mes 30 días, como sugiere la norma secundaria de la Cuenca del Río Huasco (D.E. N°4/92). Las diferencias observadas hacen aconsejable que en lo sucesivo el tiempo de recolección en los colectores pasivos respete el período de 30 días, para que los resultados se ajusten a la Tasa de Sedimentación real.

Fecha de Inicio	Fecha Final	Estación	Período de Muestreo en días efectivos	Tasa de Sedimentación MPS soluble (mg/m ² /mes efectivo)	Tasa de Sedimentación MPS soluble (mg/m ² /mes 30 días)
13-10-22	17-11-22	Cancha Carbon	35	1203,912	1031,9
27-10-22	17-11-22	Galo Herrera	21	448,707	641,0
13-10-22	11-11-22	MPS Bajo	29	486,185	503,0
13-10-22	11-11-22	MPS Alto	29	494,913	512,0
17-11-22	16-12-22	Cancha Carbon	29	1699,338	1757,9
17-11-22	16-12-22	Galo Herrera	29	959,536	992,6
11-11-22	09-12-22	MPS Bajo	28	478,998	513,2
11-11-22	09-12-22	MPS Alto	28	623,775	668,3

Tabla 2 Tasa de Sedimentación mensual MPS soluble, efectiva y normalizada a 30 días. Período octubre-diciembre 2022

La Tabla 3 registra la Tasa de Sedimentación diaria del MPS soluble. Los resultados muestran que:

- Estación Cancha Carbón: registra valores comparativamente más altos en el período noviembre-diciembre (58,598 mg/m²/día efectivo) que en el mes anterior (34,397 mg/m²/día efectivo);
- Estación Galo Herrera: registra incremento significativo en el período noviembre-diciembre (33,087 mg/m²/día efectivo), con respecto al mes anterior (21,367 mg/m²/día efectivo).
- Estación MPS Bajo: los valores son similares en los 2 meses (rango entre 16,765 mg/m²/día efectivo a 17,107 mg/m²/día efectivo).
- Estación MPS Alto: registra moderado incremento en período noviembre-diciembre (22,278 mg/m²/día efectivo) respecto al período octubre-noviembre (17,066 mg/m²/día efectivo).

6 RESULTADOS MPS insoluble

6.1 Granulometría de MPS insoluble

Los resultados del análisis granulométrico mediante difracción láser se presentan en la Tabla 4 (tamaño partículas en micrones).

Estación	Granulometría (µm)	Octubre- Noviembre 2022	Noviembre- Diciembre 2022	Promedio por Estación en 2 meses
Cancha Carbón	Mín	0,264	0,291	0,278
	Máx	305,746	337,690	321,718
Galo Herrera	Mín	0,291	0,355	0,323
	Máx	186,026	226,928	206,477
MPS Bajo	Mín	0,322	0,322	0,322
	Máx	250,637	168,429	209,533
MPS Alto	Mín	0,322	0,291	0,307
	Máx	113,184	113,184	113,184

Tabla 4 Tamaño partículas MPS insoluble en las 4 Estaciones durante los 2 meses de monitoreo del período octubre-diciembre 2022

El tamaño mínimo de las partículas de carbón durante los 2 meses de monitoreo es similar en todas las Estaciones (promedio 0,315 micrones).

Con relación al tamaño máximo, los valores promedio por estación permiten constatar una reducción sostenida del tamaño en función de la lejanía a la Estación Cancha Carbón. Así, la reducción del tamaño máximo es de 1,6 veces en la Estación Galo Herrera, 1,5 veces en la Estación MPS Bajo y 2,8 veces en la Estación MPS Alto.

6.2 Composición del MPS insoluble

Los tipos de partículas reconocidas en las muestras son mayoritariamente antrópicas y, de manera muy subordinada, se observan partículas naturales que corresponden a partículas vegetales tipos briznas de pastizal.

La identificación de los tipos de partículas en el *MPS Insoluble*, dado su tamaño, se hizo mediante microscopía Electrónica de Barrido (SEM), utilizando imágenes BSE de alta resolución, en combinación con imágenes en la modalidad *mapping*.

La inspección de las muestras con el Modo BSE permite identificar los diferentes tipos de partículas, gracias a que este detector contrasta, mediante la tonalidad en la imagen, la diferente composición de las partículas. De este modo, de acuerdo a la tonalidad observada en la imagen, se identifican los siguientes tipos de partículas:

1. Partículas gris oscuro-negro: corresponden a partículas de carbón crudo (sin evidencias de combustión) y chars (residuos de combustión con carbono remanente). También se ven de esta

tonalidad las partículas de vegetales, las cuales se identifican por su forma (angosta y alargada), muy diferente a las partículas carbonosas (carbón y residuos de combustión).

2. Partículas gris medio: corresponden a residuos de combustión de composición alumino-silicatada, de forma esférica (cenosferas), prismática (mineroides feldespáticos y silíceos) o en granos compuestos (cenosferas más mineroides).
3. Partículas gris claro: ferrosferas (forma esférica, contenido alto de Fe).
4. Partículas blanco brillante: minerales metálicos en la forma de óxidos de Fe (magnetita, hematita), sulfuros de Fe (pirita) y sulfuros de Cu-Fe (calcopirita).

A modo de ejemplo, en la Lámina 1-A se presenta una imagen SEM/BSE donde se identifican los diferentes componentes mencionados, de acuerdo a su tonalidad de gris.

En la Lámina 1-B se presenta una imagen BSE obtenida mediante la herramienta “mapping” del SEM/EDS, la cual posibilita realizar un mapeo areal por elementos a definir por el usuario. En este estudio se utilizó esta herramienta para conocer la distribución en el muestra de los elementos carbono (C), sílice (Si), aluminio (Al), hierro (Fe), cobre (Cu) y azufre (S) y con eso confirmar la composición de los componentes observados. En la Lámina 1-C se presenta una imagen BSE con la distribución del elemento carbono (C). Mediante el *mapping* por diferentes elementos fue posible identificar los siguientes tipos de partículas:

- Solo Si (color amarillo): partículas de sílice (cuarzo) formadas en la fase final del proceso de combustión del carbón (mineroides silíceos).
- Si + Al (color amarillo + color verde): partículas alumino-silicatadas formadas en la fase final del proceso de combustión del carbón (cenosferas y mineroides de feldespato K y plagioclasa).
- Solo C (color rojo): partículas de carbón.
- C + Si + Al (color rojo + color amarillo + color verde): chars.
- S + Fe (color anaranjado + color azul): partículas de sulfuro de Fe (pirita).
- S+ Cu + Fe (color naranja + color ciclamen + color azul): sulfuro de Cu-Fe (calcopirita).
- O +Fe (color celeste + color azul): Oxido de Fe (magnetita/hematita).

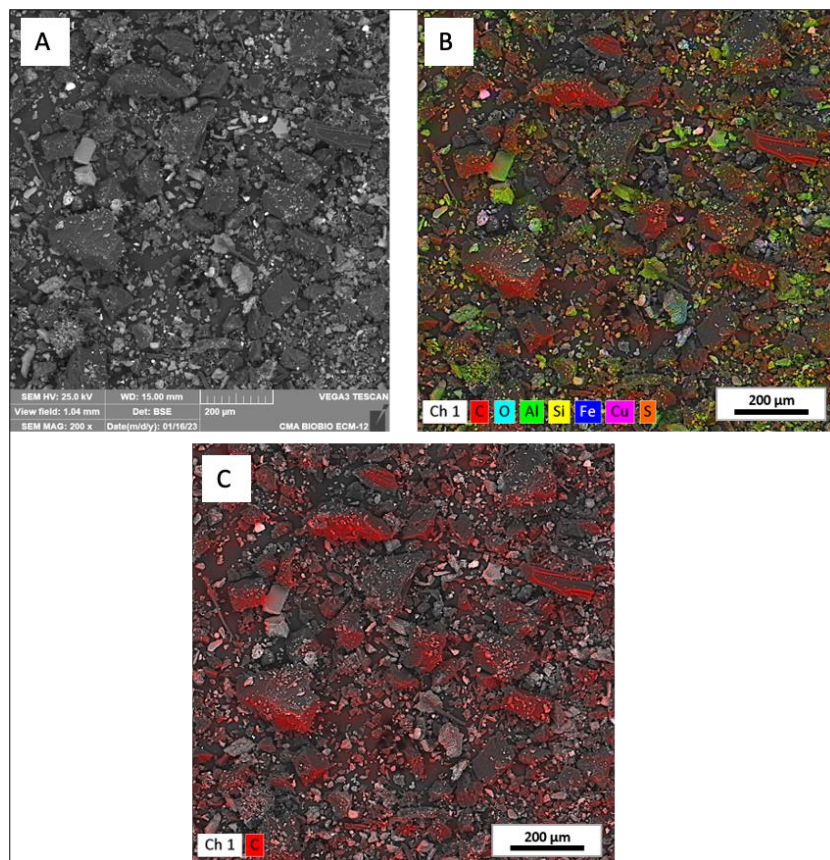


Lámina 1. A: SEM/BSE; B: SEM/EDS mapping de C, O, Al, Si, Fe, Cu y S; C: C: mapping de Carbono (C)

Información de detalle de la composición del MPS insoluble para cada una de las muestras estudiadas en este período (octubre-diciembre 2022) está contenida en Fichas por muestra, las cuales se incorporarán como Anexo al Informe Anual.

6.3 Masa y porcentaje en masa de los componentes del MPS insoluble

La determinación porcentual en volumen de cada uno de los componentes del *MPS insoluble* se realizó mediante software especializado, contabilizando los diferentes tipos de componentes sobre 3 imágenes SEM/BSE por muestra. Una vez determinado el porcentaje (en volumen) de cada componente en cada muestra, se calculó la masa, multiplicando el porcentaje en volumen por el valor de densidad asignado a cada tipo de partícula⁹ (referencias en sección 2.4), normalizando el valor obtenido a la masa total colectada en la estación correspondiente (Tabla 5).

9

Briznas de vegetales: 1,5 g/cm³
 Partículas de carbón: 1,4 g/cm³
 Residuos de Combustión: 2,5 g/cm³ (los valores de densidad fluctúan entre 1,9 a 2,9 g/cm³)
 Partículas Metálicas: 5,0 g/cm³ (sulfuros de Cu-Fe: 4,9 /cm³; Magnetita: 5,2 g/cm³)

Masa por tipo de partícula (g)	Octubre-Noviembre 2022				Noviembre-Diciembre 2022			
	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto
Partículas de carbón	0,892	0,052	0,019	0,008	1,228	0,061	0,012	0,006
Residuos de combustión	0,978	0,451	0,451	0,760	0,926	0,362	0,286	0,456
Partículas metálicas	0,109	0,078	0,039	0,064	0,184	0,046	0,023	0,022
Vegetales	0,124	0,026	0,016	0,016	0,212	0,022	0,005	0,010

Tabla 5 Masa por tipo de partícula en las 4 Estaciones, en los 2 meses de monitoreo del período octubre-diciembre 2022

Una vez determinada la masa de los diferentes componentes, se procedió a determinar el porcentaje (en masa), con el propósito de determinar cuáles componentes tienen mayor influencia sobre la masa total del MPS Insoluble (Tabla 6).

Porcentaje por tipo de partícula (%)	Octubre-Noviembre 2022				Noviembre-Diciembre 2022			
	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto
Partículas de carbón	42,413	8,605	0,906	3,627	48,129	12,373	3,574	1,293
Residuos de combustión	46,508	74,249	89,592	85,948	36,318	73,780	87,690	92,188
Partículas metálicas	5,196	12,784	7,590	7,463	7,225	9,360	7,196	4,508
Vegetales	5,884	4,361	1,912	2,962	8,328	4,486	1,540	2,011

Tabla 6 Porcentaje en masa por tipo de partícula en las 4 Estaciones, en los 2 meses de monitoreo del período octubre-diciembre 2022

El componente que, porcentualmente, más aporta a la masa del MPS insoluble, corresponde a residuos de combustión de carbón (ceniza volante) en todas las Estaciones de monitoreo, especialmente en la Estación MPS Alto.

El segundo componente más abundante corresponde a partículas de carbón, con valores significativamente más altos en la Estación Cancha Carbón.

Para una mejor comparación de los resultados, en la Tabla 7 se presentan los valores promedio de la masa, y porcentaje en que cada componente aporta el MPS insoluble.

Masa por tipo de partícula (g) promedio (2 meses) por tipo de componente en MPS insoluble	Masa promedio 2 meses por estación				Porcentaje por tipo de partícula (%) promedio (2 meses) por tipo de componente en MPS insoluble	Porcentaje promedio 2 meses por estación			
	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto		Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto
Partículas de carbón	1,060	0,057	0,015	0,007	Partículas de carbón	45,271	10,489	2,240	2,460
Residuos de combustión	0,952	0,407	0,368	0,608	Residuos de combustión	41,413	74,015	88,641	89,068
Partículas metálicas	0,147	0,062	0,031	0,043	Partículas metálicas	6,210	11,072	7,393	5,985
Vegetales	0,168	0,024	0,010	0,013	Vegetales	7,106	4,424	1,726	2,487

Tabla 7 Masa y Porcentaje promedio (2 meses) de componentes en MPS insoluble. Período octubre-diciembre 2022

De la comparación de los resultados contenidos en la Tabla 7, se destaca que:

- Los residuos de combustión contribuyen en alto porcentaje al *MPS insoluble* en la Estación MPS Alto y Estación MPS Bajo (promedio dos meses: 89,1% y 88,6%, respectivamente); los porcentajes más bajos se registran en la Estación Cancha Carbón (promedio dos meses 41,4%).
- Las partículas de carbón contribuyen significativamente al *MPS insoluble* en la Estación Cancha Carbón (promedio dos meses 45,3%) y con porcentajes muy bajos en la Estación MPS Alto y MPS Bajo (promedio dos meses: 2,5% y 2,2%, respectivamente).

- Las partículas metálicas aportan al *MPS insoluble* en porcentaje más alto en las estaciones Galo Herrera y MPS Bajo (promedio dos meses: 11,1% y 7,4%, respectivamente) y más bajos en Cancha Carbón y MPS Alto (promedio dos meses: 6,2% y 6,0%, respectivamente).
- Los restos vegetales presentan un porcentaje comparativamente más alto en la estación Cancha Carbón y Galo Herrera (promedio dos meses: 7,1% y 4,4%) y porcentajes más bajos en MPS Alto y MPS Bajo (promedio dos meses: 2,5% y 1,7%, respectivamente).

6.4 Tasa de Sedimentación del MPS insoluble

En la Tabla 8 se presentan las variables utilizadas para el cálculo de la Tasa de Sedimentación del MPS Insoluble en cada una de las 4 Estaciones durante el período octubre a diciembre 2022. Nótese la diferencia que se establece entre la Tasa de Sedimentación calculada utilizando el número de días de acumulación efectiva (columna A) y la Tasa de Sedimentación normalizada a mes de 30 días (columna B). La Tasa de Sedimentación diaria (Columna C) se ha calculado sobre la base del número días efectivos de acumulación del MPS.

Fecha de Inicio	Fecha Final	Estación	Período de Muestreo en días efectivos	A Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m ² /mes efectivo)	B Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m ² /mes 30 días)	C Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m ² /día efectivo)
13-10-22	17-11-22	Cancha Carbon	35	10801,321	9258,3	308,609
27-10-22	17-11-22	Galo Herrera	21	3116,822	4452,6	148,420
13-10-22	11-11-22	MPS Bajo	29	2694,811	2787,7	92,925
13-10-22	11-11-22	MPS Alto	29	4352,564	4502,7	150,088
17-11-22	16-12-22	Cancha Carbon	29	13117,761	13570,1	452,337
17-11-22	16-12-22	Galo Herrera	29	2521,284	2608,2	86,941
11-11-22	09-12-22	MPS Bajo	28	1673,155	1792,7	59,756
11-11-22	09-12-22	MPS Alto	28	2540,793	2722,3	90,743
PROMEDIO 2 MESES				Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m²/mes efectivo)	Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m²/mes 30 días)	Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m²/día efectivo)
Cancha Carbon				11959,541	11414,186	380,473
Galo Herrera				2819,053	3530,414	117,680
MPS Bajo				2183,983	2290,201	76,340
MPS Alto				3446,679	3612,465	120,416

Tabla 8 Tasa de Sedimentación de MPS Insoluble mensual y diaria en el período octubre-diciembre 2022.

Considerando los valores diarios de la Tasa de Sedimentación del MPS insoluble, se destaca que:

- En el período octubre-noviembre (mes 5) se registra un incremento (46%) de la Tasa de Sedimentación del MPS insoluble solamente en la Estación Cancha Carbón.
- Los valores promedio (2 meses) de la Tasa de Sedimentación diaria del MPS insoluble, indican que el mayor valor promedio se registra en la Estación Cancha Carbón (380,473 mg/m²/día efectivo), el cual decrece 5 veces en la Estación MPS Bajo, donde se registra en menor valor.

7 RESULTADOS REFERIDOS AL COMPONENTE CARBÓN DEL MPS INSOLUBLE

Esta sección hace referencia en particular al componente “carbón” del MPS Insoluble, dado que constituye la variable principal del monitoreo estipulado en la Resolución 0045/22 del SRMS que rige el estudio.

Como se indicó en la sección anterior (ver Tabla 5, 6 y 7), el carbón es el segundo componente más abundante en el MPS insoluble.

7.1 Masa, porcentaje y tamaño de partículas de carbón

La masa de carbón es significativamente más alta en la Estación Cancha Carbón, con un valor promedio (2 meses) de 0,707 g, el cual disminuye en 18,6 veces en la Estación Galo Herrera (ubicada 150 m al NNE-SSW), en 70,7 veces en la Estación MPS Bajo (ubicada a 275 m al NNW-SSE de la Estación Cancha Carbón) y en 141,4 veces en la Estación MPS Alto (ubicada a 475 m al NNE-SSW de la E. Cancha Carbón (Figura 4).

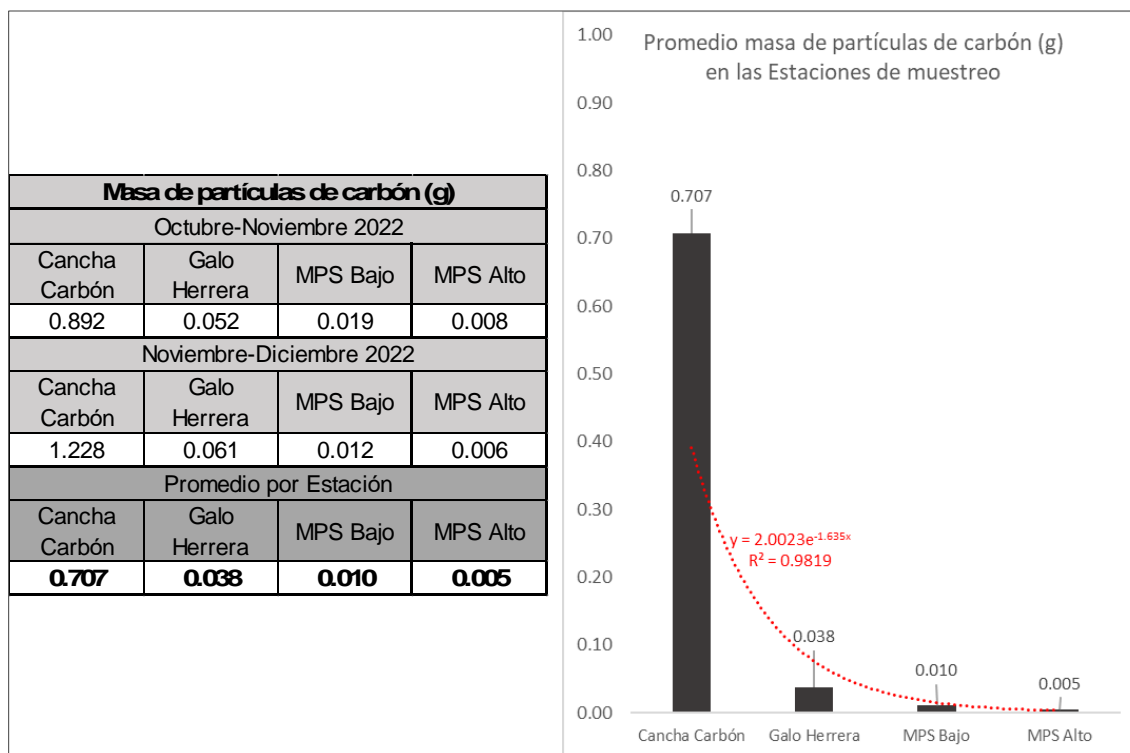


Figura 4 Masa de carbón registrada en las 4 estaciones y variabilidad en el período octubre-diciembre de 2022

En la Tabla 9 se presenta el porcentaje en masa de carbón, respecto del MPS insoluble, para cada Estación por mes de monitoreo, además del porcentaje en masa promedio (2 meses) para cada Estación.

8 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

8.1 Componentes antrópicos y su proporción en el MPS

Los 4 colectores pasivos de MPS están emplazados en, o cerca de las instalaciones del Complejo Termoeléctrico Ventanas de propiedad de AES Andes. En las cercanías existen además numerosas instalaciones industriales.

En la Figura 5 se representan gráficamente los componentes del MPS Insoluble en cada Estación, por mes de monitoreo. Como se observa, el componente prioritario del MPS corresponde a residuos de combustión industrial de carbón. En segundo componente es el carbón, el cual tiene mayor presencia en la Estación Cancha Carbón y Estación Galo Herrera, disminuyendo drásticamente su presencia en las Estaciones MPS Bajo y MPS Alto, las más alejadas de los sectores donde se acopia o transporta carbón.



Figura 5 Evolución porcentual (% en masa) de los componentes del MPS Insoluble en las 4 Estaciones. Período octubre-diciembre de 2022

En orden de participación en el MPS, los 3 componentes antrópicos corresponden a:

- Residuos de Combustión: provienen de la actividad industrial del CTC con sus actuales 3 centrales termoeléctricas a carbón. El aporte al MPS insoluble es significativamente más alto en las Estaciones MPS Bajo y Alto y considerablemente menor en la Estación Cancha Carbón.
- Partículas de carbón: corresponden a polvo movilizado por el viento desde los lugares de transporte y acopio del carbón utilizado en la alimentación de las 3 centrales. El aporte al MPS insoluble es mayor en la Estación Cancha Carbón y disminuye significativamente en las otras 3 estaciones, particularmente en las estaciones MPS Bajo y MPS Alto.
- Partículas metálicas: dada su composición mineralógica provienen probablemente de los lugares de acopio de concentrado de cobre. La mayor participación porcentual se registra en la E. Galo Herrera.

8.2 Tasa de Sedimentación del MPS total

Tradicionalmente, el MPS ha sido monitoreado gravimétricamente utilizando colectores pasivos. Hay una amplia variedad de colectores en uso en todo el mundo (cuencos, cilindros o embudos horizontales de boca abierta) que, por lo general operan con recolección del MPS mensual. La Tasa de Sedimentación de sólidos no disueltos (MPS Insoluble), aunque a veces también se incluyen los sólidos disueltos (MPS Soluble), se puede expresar por día ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$), por mes de 30 días ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{mes}$) o por año ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{año}$). Considerando que a menudo las condiciones operativas de las fuentes de origen son episódicas, o bien ocurren condiciones meteorológicas anormales o ambas, la expresión de la Tasa de Sedimentación anual se considera más representativa.

Con el fin de gestionar y minimizar los efectos adversos de las partículas sedimentables (MPS), varios países, entre ellos Chile, han establecido los estándares máximos permitidos. Estos estándares varían según el país y, a veces, el estado, como ocurre en Estados Unidos, Canadá y Brasil. La Tabla 14 (tomada de Vallack & Shillito, 1998) resume los umbrales estándar establecidos por Agencias Ambientales en países europeos, América del Norte y Argentina.

2738 H. W. VALLACK and D. E. SHILLITO

Table 1. Examples of dust deposition standards outside the U.K. (as $\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

Argentina	Annual average	333
Australia (W. Australia)	Loss of amenity first perceived	133
	Unacceptable reduction in air quality	333
Canada		
Alberta	Annual average	180
Manitoba	Annual average	153
	(maximum acceptable)	266
	(maximum desirable)	200
Newfoundland	Annual average	153
	Monthly average	233
Ontario	Annual average	170
	Monthly average	200
Finland	Annual average	333
Germany	Long-term average	350*
	Short-term average	650*
Spain	Annual average	200
U.S.A.		
Kentucky	Annual average	196
Louisiana	Annual average	262
Maryland	Annual average	183
Mississippi	Monthly average (above background)	175
Montana	Annual average (residential areas)	196
New York	During any 12 months no more than	
	5% of 30 d values to exceed	100
	and 84% to be below	130
North Dakota	3 Monthly average	196
Pennsylvania	Annual average	267
	Monthly average	500
Washington	Annual average	183
Wyoming	Monthly average	170

* Combined weight of dissolved and undissolved deposits.

Tabla 12 Ejemplos de valores límites de Tasa de Sedimentación de MPS ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$)

En el caso de Brasil, existe una norma del Estado de Minas Gerais (COPAM N°1/81) para áreas industrializadas que fija el valor límite en $10 \text{ g}/\text{m}^2/\text{mes}$, que corresponde a $333 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{día}$. En un trabajo relativamente reciente, Santos et al. (2017), estudian diferentes áreas industriales de estados brasileños (Minas Gerais, Río de Janeiro, Amapá y Vitoria) validando ese valor límite.

Chile no dispone de norma primaria para material particulado sedimentable MPS, por lo que se acostumbra utilizar como referencia el nivel límite definido en la norma secundaria por la cual se rige la Tercera Región (Cuenca del Río Huasco). Es una norma de calidad de aire en lo que respecta a polvo sedimentable, publicada en el D. E. N°4/1992 del Ministerio de Agricultura, que fija como Tasa de Sedimentación límite diaria el valor $150 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{día}$ como concentración media aritmética mensual, o bien $100 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{día}$ como concentración media aritmética anual.

En la Tabla 13 se resume la información de la Tasa de Sedimentación diaria ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$ efectivo) del MPS soluble, insoluble y total para las 4 Estaciones en los 2 meses de monitoreo (mes 5 y 6) del período octubre-diciembre 2022.

Fecha de Inicio	Fecha Final	Estación	Período de Muestreo en días efectivos	Tasa de Sedimentación MPS soluble ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$ efectivo)	Tasa de Sedimentación MPS insoluble ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$ efectivo)	Tasa de Sedimentación MPS total ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$ efectivo)
13-10-22	17-11-22	Cancha Carbon	35	34,397	308,609	343,007
27-10-22	17-11-22	Galo Herrera	21	21,367	148,420	169,787
13-10-22	11-11-22	MPS Bajo	29	16,765	92,925	109,690
13-10-22	11-11-22	MPS Alto	29	17,066	150,088	167,154
17-11-22	16-12-22	Cancha Carbon	29	58,598	452,337	510,934
17-11-22	16-12-22	Galo Herrera	29	33,087	86,941	120,028
11-11-22	09-12-22	MPS Bajo	28	17,107	59,756	76,863
11-11-22	09-12-22	MPS Alto	28	22,278	90,743	113,020

Tabla 13 Tasa de Sedimentación diaria de MPS soluble, insoluble y total en los 2 meses de monitoreo. Período octubre-diciembre 2022

En la Figura 6 se indican los valores de la Tasa de Sedimentación mensual ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{mes}$) y diaria ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$ efectivo) para el MPS Soluble, Insoluble y Total en las 4 Estaciones, durante los 2 meses de monitoreo del período octubre-diciembre 2022. Las líneas rojas expresan:

- valor máximo mensual (mes 30 días) y diario de $150 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{día}$ indicado en el D.E. N°4/1992 (cuenca Río Huasco).
- Valor máximo mensual (mes 30 días) y diario de $333 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{día}$ estipulado en la norma brasileña para áreas industriales COPAM N° 1/81.

Considerando la Tasa de sedimentación diaria del MPS Total (Figura 6, derecha):

- 1) Las estaciones que sobrepasan el límite de $150 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{día}$ indicado en la norma Cuenca del Río Huasco (D.E. N°4/92) son:
 - Estación Cancha Carbón en los 2 meses de monitoreo del período octubre-diciembre 2022.
 - Estación Galo Herrera en el período octubre-noviembre 2022.
 - Estación MPS Alto en el período octubre-noviembre 2022.
 -
- 2) Las estaciones que sobrepasan el límite de $333 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{día}$ indicado en la norma brasileña COPAM N° 1/81 para áreas industrializadas son:
 - Estación Cancha Carbón en los 2 meses de monitoreo del período octubre-diciembre 2022.
 Al respecto, se hace notar que la Estación Cancha Carbón se ubica “dentro” de un área industrial por tanto no debería sorprender que sobrepase la norma brasileña.

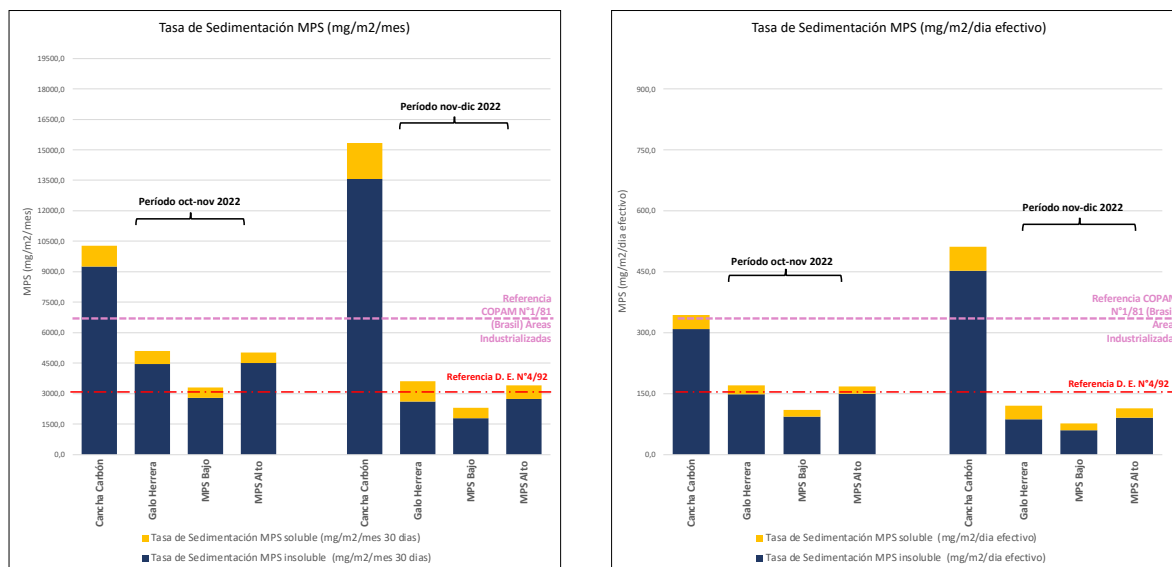


Figura 6 Tasa de Sedimentación mensual y diaria del MPS en las 4 Estaciones. Período octubre-diciembre 2022

8.3 Tasa de Sedimentación del Carbón

En el área monitoreada, como es evidente y esperable, el mayor contenido de carbón se registra en la Estación Cancha Carbón, lugar de acopio y movimiento de los carbones que serán utilizados en la el proceso de termo-generación del CTC y muy probablemente, lugar de origen de las partículas

de carbón (menores de 1mm de diámetro) que forman parte del MPS insoluble. La Estación Cancha Carbón está ubicada dentro de la dependencia del mismo nombre, adyacente a la malla deflectora que protege los sectores externos de la dispersión de partículas de carbón desde la cancha de acopio.

Como se aprecia en el gráfico de la Figura 7, la Tasa de Sedimentación del Carbón en la Estación Cancha Carbón supera el valor máximo diario permitido para la cuenca del Río Huasco (D.E N° 4/91) solo en el mes noviembre-diciembre. La Tasa de Sedimentación del Carbón en la Estación Cancha Carbón está por debajo del límite aceptado para áreas industriales de la norma brasileña COPAM N°1/81 en los 2 meses de monitoreo del período octubre-diciembre 2022.

En las restantes 3 Estaciones, Galo Herrera, MPS Bajo y MPS Alto, ubicadas a una distancia de 150 m, 275 m y 475 m, respectivamente, de la Estación Cancha de Carbón, las Tasas de Sedimentación de carbón son considerablemente menores (Figura 7) en los 2 meses de monitoreo que el límite diario de 150 mg/m²/día que precisa el D.E. 4/91 del Ministerio de Agricultura (norma Cuenca del Río Huasco).

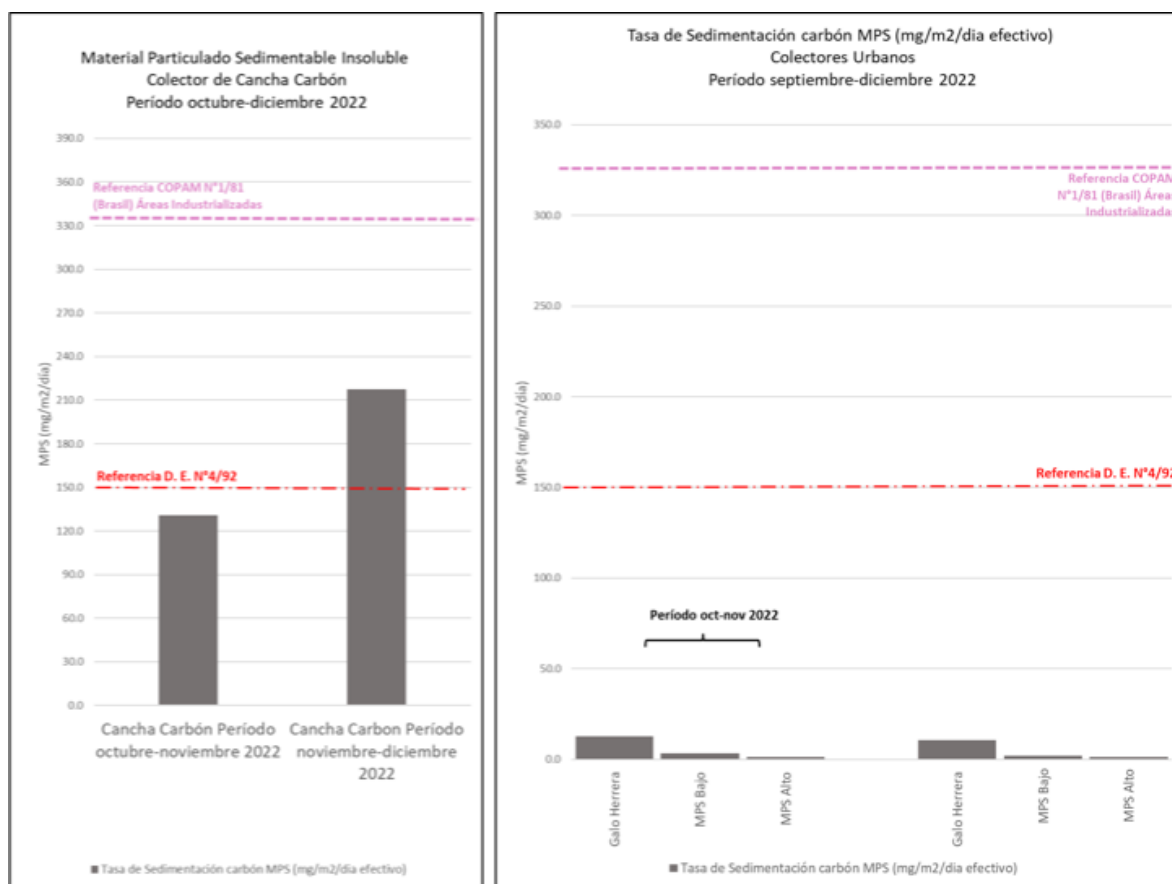


Figura 7 Tasa Sedimentación Carbón diaria en las 4 Estaciones. Periodo octubre-diciembre 2022)

Considerando el promedio de la Tasa de Sedimentación del Carbón diaria registrada en la Estación Cancha Carbón (promedio: 116,082 mg/m²/día efectivo), se constata una significativa reducción de ésta, del orden de 14,8 veces en la Estación Galo Herrera, 63,2 veces en la Estación MPS Bajo y 137,5 veces en la Estación MPS Alto. Como las Estaciones Galo Herrera, MPS Bajo y MPS Alto están

ubicadas a una distancia de 150 m, 275 m y 475 m, respectivamente, de la Estación Cancha de Carbón, se concluye que la disminución está determinada por la efectividad de las medidas de control de la dispersión de las partículas de carbón, adoptadas por AES-Andes.

9 CONCLUSIONES

9.1 Tasa de Sedimentación MPS Total

- 1) Los valores más altos de Tasa de Sedimentación mensual en los 2 meses de monitoreo (mes 5 y 6) del período noviembre-diciembre 2022 se registran en la Estación Cancha Carbón.
- 2) La Tasa de Sedimentación diaria del MPS total supera el valor límite de 150 mg/m² /día que precisa la norma secundaria para la Cuenca del Río Huasco (D.E. N°4/92) en:
 - Estación Cancha Carbón en los 2 meses monitoreados (noviembre-diciembre 2022)
 - Estación Galo Herrera noviembre (mes 5).
 - Estación MPS Alto en el período noviembre (mes 5).

9.2 Tasa de Sedimentación diaria del MPS soluble

El mayor valor promedio se registra en la Estación Cancha Carbón (46,498 mg/m²/día efectivo), el cual se reduce en 1,7 veces en la Estación Galo Herrera, en 2,4 veces en la Estación MPS Alto y en 2,7 veces en la Estación MPS Bajo.

9.3 Granulometría MPS Insoluble

El tamaño mínimo promedio de las partículas es relativamente uniforme en todas las Estaciones (promedio 0,315 µm). Con relación al tamaño máximo, los valores promedio por estación permiten constatar una reducción sostenida del tamaño en función de la lejanía a la Estación Cancha Carbón. Así, la reducción del tamaño máximo es de 1,6 veces en la Estación Galo Herrera, 1,5 veces en la Estación MPS Bajo y 2,8 veces en la Estación MPS Alto.

9.4 Componentes del MPS insoluble

- 1) Mayoritariamente está compuesto de partículas antrópicas. Componentes naturales, como restos de vegetales, representan solo entre 1,7% a 7,1% del MPS Insoluble (valores promedio 2 meses).
- 2) Los residuos de combustión son el principal componente del MPS en todas las Estaciones. La Estación MPS Alto presenta el porcentaje promedio más alto de residuos de combustión (89,1%), seguido de la Estación MPS Bajo (88,6%), Galo Herrera (74,0%) y Cancha Carbón (41,4%).
- 3) El carbón es el segundo componente más abundante del MPS insoluble. El porcentaje promedio fluctúa entre 45,3% en la Estación Cancha Carbón y 2,2% en la Estación MPS Bajo.
 - Partículas metálicas del tipo sulfuros de Cu-Fe y Sulfuros de Cu aportan al *MPS insoluble* en porcentaje más alto en las estaciones Galo Herrera y MPS Bajo (promedio dos meses: 11,1% y 7,4%, respectivamente) y más bajos en Cancha Carbón y MPS Alto (promedio dos meses: 6,2% y 6,0%, respectivamente).

9.5 Tasa de Sedimentación del MPS insoluble

- 1) Considerando el valor promedio para los dos meses de monitoreo (período octubre-noviembre y noviembre-diciembre), la mayor tasa diaria se registra en la Estación Cancha Carbón (380,473 mg/m²/día efectivo), el cual decrece 5 veces en la Estación MPS Bajo, donde se registra en menor valor.

9.6 Tasa de Sedimentación del MPS total

- 1) El límite diario de 150 mg/m²/día indicado en la norma Cuenca del Río Huasco (D.E. N°4/92) es sobrepasado en las estaciones Estación Cancha Carbón en los 2 meses de monitoreo y en las Estaciones Galo Herrera y Estación MPS Alto en el período octubre-noviembre 2022.

9.7 Carbón en el MPS

- 1) Respecto al MPS insoluble, el porcentaje promedio de carbón en los 2 meses de monitoreo es significativamente más alto en la Estación Cancha Carbón (47%), disminuyendo de manera sostenida a medida que aumenta la distancia a las instalaciones del CTV: 4,3 veces en Estación Galo Herrera, 20,2 veces en Estación MPS Bajo y 18,4 veces en la Estación MPS Alto.
- 2) El tamaño máximo promedio (dos meses) de las partículas de carbón es mayor en la Estación Cancha Carbón (295,1 µm), disminuyendo sostenidamente en función de la lejanía a la Estación Cancha Carbón: 1,9 veces en Estación Galo Herrera, 1,8 veces en Estación MPS Bajo y 5 veces en Estación MPS Alto.

9.8 Tasa de Sedimentación del Carbón

- 1) La Tasa de Sedimentación del Carbón sobrepasa el límite diario de 150 mg/m²/día (norma secundaria del Río Huasco, D.E. N°4/92) solamente en la Estación Cancha Carbón en el período noviembre-diciembre (mes 6). En el resto de las Estaciones, la Tasa de Sedimentación del Carbón es considerablemente más baja que el límite diario máximo, disminuyendo progresivamente a medida que aumenta la distancia a las canchas de carbón.
- 2) Considerando el promedio de la Tasa de Sedimentación del Carbón diaria registrada en la Estación Cancha Carbón, (116,082 mg/m²/día) se constata una significativa reducción de ésta, del orden de 14,8 veces en la Estación Galo Herrera, de 63,3 veces en la Estación MPS Bajo y de 137,5 veces en la Estación MPS Alto.

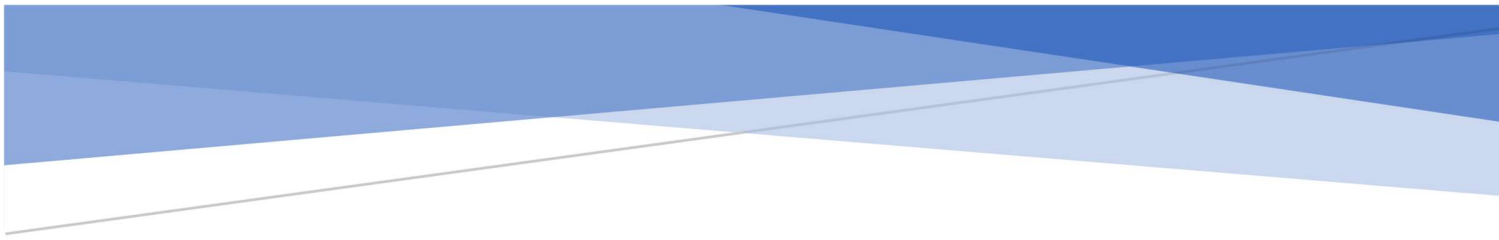
En conclusión, como las Estaciones Galo Herrera, MPS Bajo y MPS Alto están ubicadas a una distancia de 150 m, 275 m y 475 m, respectivamente, de la Estación Cancha de Carbón, los resultados respecto a la *variable carbón* del MPS permiten constatar una relación directa entre la distancia a la fuente de origen de las partículas de carbón y la disminución del tamaño de partículas, del porcentaje de carbón en el MPS y de las Tasas de Sedimentación de Carbón. Se concluye, entonces, que las medidas de control de la dispersión de las partículas de carbón, adoptadas por AES-Andes son efectivas.

10 Referencias

- D. N°4/1992 Exento del Ministerio de Agricultura. Normas de Calidad del Aire para Material Particulado Sedimentable en la Cuenca del Río Huasco III Región.
- Feng, S. & Li, Y. Study on coal fly ash classified by bulk density. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1732 012127. doi.org/10.1088/1742-6596/1732/1/012127.
- D.E. N°223/2015 del Ministerio del Medio Ambiente, Instrucciones Generales sobre la Elaboración del Plan de Seguimiento de Variables Medioambientales.
- Minerals Densities. The Engineering Toolbox (www.engineeringtoolbox.com)
- Saiah, R., Perrin, B. & Rigal, L. 2010. Improvement of thermal properties of fires clays by introduction of vegetable matter. *J. Building Physics*, 34 (2): 124-142. doi.org/10.1177/1744259109360059.
- Santos, J.M. Reis, N.C., Galvão E.S., Silveira, A., Goulart, E. V. & Lima, A. T. 2017. Source apportionment of settleable particles in an impacted urban and industrialized region in Brazil. *Environ Sci Pollut Res* 4(27): 22026-22039.
- Severin, K. 2004. Energy Dispersive Spectrometry of Common Rock Forming Minerals. Kluwer Acad. Pu. 219 p.
- Suarez-Ruiz, I. et al. (2017) Development of a petrographic classification of fly-ash components from coal combustion and co-combustion. (An ICCP Classification System, Fly-Ash Working Group – Commission III.). *Inter. Jour. Coal Geology*, 183: 188-203.
- Valentim, et al. 2018. Undifferentiated Inorganics in Coal Fly Ash and Bottom Ash: Calciphères, magnesiocalciphères and Magnesiaspheres. *Minerals* 2018, 8, 140; doi:10.3390/min8040140.
- Vallack, H. W. & Shillito, D. E. 1998. Suggested guidelines for deposited ambient dust. *Atmospheric Environment* Vol. 32 (16,): 737—2744.
- Wood, G., Kehn T., Carter, D. & Culberston, W. Coal Resource Classification System of the US Geological Survey. Geological Survey Circular 891. <http://pubs.usgs.gov/circ/c891/table2.htm>



Dra. María Eugenia Cisternas S.
Geóloga-Mineralogista
GEO-FORENSIC SpA
18 abril 2023



INFORME DE CARACTERIZACION INTEGRAL DEL MPS
COLECTADO EN 4 ESTACIONES CON COLECTORES
PASIVOS (CANCHA CARBÓN, GALO HERRERA, MPS
BAJO Y MPS ALTO) EN O CERCA DE LAS
INSTALACIONES DEL COMPLEJO TERMoeLECTRICO
VENTANAS DE AES-ANDES. PUCHUNVAVI, 5° REGION,
CHILE

Dra. María Eugenia Cisternas S

Fecha Informe: 22 noviembre

María Eugenia Cisternas
mecisternas@geo-forensic.com; mecistern@gmail.com

Tabla de contenido

RESUMEN EJECUTIVO	3
1 INTRODUCCIÓN	5
2 OBJETIVOS	7
3 METODOLOGÍA DE MUESTREO Y ANÁLISIS DEL MPS	8
3.1 INSTALACIÓN DE COLECTORES PASIVOS Y RECOLECCIÓN DE MUESTRAS.....	8
3.2 REMOCIÓN DEL MPS DESDE LAS BOTELLAS, DETERMINACIÓN DE LA MASA DEL MPS TOTAL, SOLUBLE E INSOLUBLE.....	9
3.3 ESTUDIO COMPOSICIONAL DEL MPS INSOLUBLE Y CUANTIFICACIÓN DE LA FRACCIÓN CORRESPONDIENTE A CARBÓN.....	9
4 MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS.....	9
4.1 CARACTERIZACIÓN GRANULOMÉTRICA DEL MPS	9
4.2 IDENTIFICACIÓN DE COMPONENTES DEL MPS INSOLUBLE MEDIANTE MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA (SEM/EDS)	9
4.3 DETERMINACIÓN PORCENTUAL DE TIPOS DE PARTÍCULAS ANTRÓPICAS EN EL MPS.....	11
5 RESULTADOS MPS SOLUBLE, INSOLUBLE Y TOTAL	12
5.1 MASA DE MPS SOLUBLE, INSOLUBLE Y TOTAL	12
5.2 MASA MPS SOLUBLE Y TASA DE CONCENTRACIÓN	12
5.3 TASA DE SEDIMENTACIÓN MPS SOLUBLE, INSOLUBLE Y TOTAL.....	13
6 RESULTADOS MPS INSOLUBLE	15
6.1 GRANULOMETRÍA DE MPS INSOLUBLE RECOLECTADO EN CADA ESTACIÓN DE MONITOREO.....	15
6.2 COMPOSICIÓN DEL <i>MPS INSOLUBLE</i>	15
6.3 MASA Y PORCENTAJE EN MASA DE LOS COMPONENTES DEL <i>MPS INSOLUBLE</i>	17
6.4 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL PMS INSOLUBLE.....	19
7 RESULTADOS REFERIDOS AL COMPONENTE CARBÓN DEL MPS INSOLUBLE	20
7.1 CARBÓN: MASA, PORCENTAJE Y TAMAÑO DE PARTÍCULAS.....	20
7.2 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL CARBÓN	21
8 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	23
8.1 COMPONENTES ANTRÓPICOS Y SU PROPORCIÓN EN EL MPS.....	23
8.2 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL MPS INSOLUBLE	24
8.3 TASA DE SEDIMENTACIÓN DE CARBÓN	26
9 CONCLUSIONES.....	28
9.1 TASA DE SEDIMENTACIÓN MPS TOTAL.....	28
9.2 GRANULOMETRÍA MPS INSOLUBLE	28
9.3 COMPONENTES DEL MPS INSOLUBLE	28
9.4 CARBÓN EN EL MPS	29
9.5 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL CARBÓN.....	29
10 REFERENCIAS	30

LISTA DE TABLAS

TABLA 1 MPS SOLUBLE, INSOLUBLE Y TOTAL (MG) EN LAS 4 ESTACIONES DURANTE LOS 3 MESES DE MONITOREO	12
TABLA 2 VARIACIÓN TASA DE SEDIMENTACIÓN MENSUAL (MPS INSOLUBLE, SOLUBLE Y TOTAL) EFECTIVA Y NORMALIZADA A 30 DÍAS	14
TABLA 3 TASA DE SEDIMENTACIÓN DIARIA (MPS INSOLUBLE, SOLUBLE Y TOTAL) CALCULADA POR DÍA EFECTIVO	14
TABLA 4 TAMAÑO MÍN. Y MÁX. DE PARTÍCULAS EN LAS 4 ESTACIONES POR MES DE MONITOREO	15
TABLA 5 MASA POR TIPO DE PARTÍCULA EN LAS 4 ESTACIONES, EN LOS 3 MESES DE MONITOREO	18
TABLA 6 PORCENTAJE EN MASA POR TIPO DE PARTÍCULA EN LAS 4 ESTACIONES, EN LOS 3 MESES DE MONITOREO	18
TABLA 7 MASA Y PORCENTAJE PROMEDIO (3 MESES) DE COMPONENTES EN MPS INSOLUBLE	18
TABLA 8 TASA DE SEDIMENTACIÓN DE MPS INSOLUBLE EXPRESADA EN MG/M ² /MES Y MG/M ² /DÍA	19
TABLA 9 PORCENTAJES (EN MASA) DEL CARBÓN EN EL MPS INSOLUBLE	20
TABLA 10 TAMAÑO MÍNIMO Y MÁXIMO (EN MICRONES) DE LAS PARTÍCULAS DE CARBÓN.....	21
TABLA 11 TASA SEDIMENTACIÓN CARBÓN EN LAS 4 ESTACIONES Y SU VARIACIÓN EN LOS 3 MESES DE MONITOREO	22
TABLA 12 VALORES LÍMITES DE TASA DE SEDIMENTACIÓN DE MPS (MG/M ² /DÍA)	25

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 UBICACIÓN ESPACIAL SOBRE IMAGEN GOOGLE EARTH DE LAS 4 ESTACIONES DE MONITOREO	5
FIGURA 2 MODELO DE COLECTOR PASIVO INSTALADO EN 4 ESTACIONES DEL CTV.....	8
FIGURA 3 CONCENTRACIÓN (G/L) COMPARADA DEL MPS SOLUBLE EN LAS 4 ESTACIONES DURANTE LOS 3 MESES DE MONITOREO	13
FIGURA 4 MASA DE CARBÓN REGISTRADA EN LAS 4 ESTACIONES Y VARIABILIDAD EN EL PERÍODO DE 3 MESES.....	20
FIGURA 5 EVOLUCIÓN PORCENTUAL (% EN MASA) DE LOS COMPONENTES DEL MPS INSOLUBLE EN LAS 4 ESTACIONES EN LOS 3 MESES DE MONITOREO.....	23
FIGURA 6 TASA DE SEDIMENTACIÓN DEL MPS (SOLUBLE, INSOLUBLE) EN LAS 4 ESTACIONES EN LOS 3 MESES DE MONITOREO ...	26
FIGURA 7 TASA SEDIMENTACIÓN CARBÓN EN LAS 4 ESTACIONES Y SU VARIACIÓN EN LOS 3 MESES DE MONITOREO COMPARADA CON LÍMITE FIJADO POR D.E. N°4/92	27

LISTA DE LAMINAS

LÁMINA 1. A: IMAGEN SEM/BSE; B: IMAGEN SEM/EDS OBTENIDA MEDIANTE MAPPING DE C, O, AL, SI, FE, CU Y S.....	17
---	----

RESUMEN EJECUTIVO

El presente Informe se enmarca en el Plan de Muestreo de Material Particulado Sedimentable (MPS) de 12 meses de duración, autorizado mediante la Resolución N° 00045 (02 de junio 2022) de la Secretaría Regional Ministerial de Salud (SRMS) de la Región de Valparaíso, cuyo objetivo principal es evaluar la eficacia del Sistema de Control de dispersión de material, específicamente de las partículas de carbón, hacia el exterior del Complejo Termoeléctrico Ventanas.

El Plan de Muestreo considera la caracterización del MPS depositado mensualmente en 4 colectores pasivos durante 1 año, con informes trimestrales de resultados. Los colectores se ubican: 01 al interior de la cancha de carbón (Estación Cancha Carbón), 01 fuera de la cancha, aunque dentro de las dependencias de AES ANDES (Estación Galo Herrera), y 02 ubicados en la comunidad en el sector de la greda bajo (MPS Bajo) y greda alto (MPS Alto)

Las variables ambientales principales consideradas en el Plan de Monitoreo son: 1) el porcentaje de carbón presente en el MPS insoluble; 2) la variación del porcentaje de carbón en las cuatro estaciones; 3) el gradiente de dispersión del carbón desde la cancha de acopio de este material, hacia las 3 otras estaciones.

Este informe presenta los resultados de los 3 primeros meses de monitoreo (mayo-septiembre 2022), referidos a la caracterización del MPS soluble, insoluble y total, con especial énfasis en el componente carbón del MPS.

Las conclusiones de esta primera fase del monitoreo son:

- 1) En el mes 1 se registran los valores más altos de Tasas de Sedimentación de MPS soluble e insoluble en todas las Estaciones, con decrecimiento sostenido en los dos meses siguientes. En particular, en la Estación Cancha Carbón, se registra una Tasa de Sedimentación muy alta que no se condice con los valores obtenidos en los otros 2 meses.
- 2) En la Estación Cancha Carbón (en los 3 meses) y en la Estación MPS Alto en el mes, 1 la Tasa de Sedimentación del MPS total supera el valor límite de 150 mg/m² /día que precisa la norma para la Cuenca del Río Huasco.
- 3) El MPS insoluble está compuesto mayoritariamente de partículas antrópicas (residuos de combustión de carbón, carbón crudo y partículas metálicas tipo sulfuros de Cu), con componentes naturales (briznas de vegetales) en proporción muy minoritaria (entre 1% a 3,4%).
- 4) El carbón es el segundo componente más abundante del MPS insoluble. El porcentaje promedio de carbón en los 3 meses de monitoreo es significativamente más alto en la Estación Cancha de Carbón (31,28%), disminuyendo de manera sostenida a medida que aumenta la distancia a las instalaciones del CTV: 12,69% en Estación Galo Herrera, 4,56% en Estación MPS Bajo y solo 2,71% en la Estación MPS Alto (disminución de 2,5 veces, 6,7 veces y 11, 5 veces, respectivamente).
- 5) La Tasa de Sedimentación del carbón es extremadamente alta en la Estación Cancha Carbón (418,048 mg/m²/día) en el mes 1 y disminuye drásticamente en 8,6 veces en el mes 2 y 9,5 veces en el mes 3. En las restantes 3 Estaciones, ubicadas a una distancia de 150 m, 275 m y 475 m, respectivamente, de la Estación Cancha de Carbón, las Tasas de Sedimentación de carbón son considerablemente menores, con valor promedio de 9,475 mg/m²/día en la Estación MPS Bajo, 1,421 mg/m²/día en la Estación Galo Herrera y solo 0,292 mg/m²/día en la Estación MPS Alto.

- 6) La Tasa de Sedimentación del carbón sobrepasa el límite diario de $150 \text{ mg/m}^2/\text{día}$ solamente en la Estación Cancha Carbón, en el mes 1. De acuerdo a lo informado por AES-Andes, la explicación posible de esta anomalía estaría relacionada con trabajos de mantenimiento de las mallas protectoras en las cercanías del colector Cancha Carbón.

1 INTRODUCCIÓN

A solicitud de AES-Andes, a través del Departamento Gestión Ambiental Complejo Centro, Geo-Forensic SpA realizará la caracterización integral del Material Particulado Sedimentable (MPS), con particular énfasis en la participación del carbón dispersado desde la cancha de acopio de este material hacia sectores ubicados en las cercanías de las instalaciones de Complejo Termoeléctrico Ventanas (CTV), Comuna de Puchuncaví, Región de Valparaíso. Este estudio se enmarca en un Plan de Muestreo de Material Particulado Sedimentable (MPS) de 12 meses de duración.

El Plan de Muestreo de Material Particulado Sedimentable fue autorizado mediante la Resolución N° 00045 de la Secretaría Regional Ministerial de Salud (SRMS) de la Región de Valparaíso fechada el 02 de junio 2022. Dicha resolución autoriza el *Sistema de control y dispersión de material hacia el exterior de la instalación y su mecanismo de verificación de efectividad de la Cancha de almacenamiento de carbón* del Complejo Termoeléctrico Ventanas, (CTV) propiedad de AES ANDES S.A. El material al que hace referencia corresponde única y exclusivamente al *manejo de carbones Bituminosos y Sub-bituminosos acopiados en la cancha de carbón del CTV*.

En la Figura 1 se señala la ubicación espacial sobre imagen Google Earth de las 4 Estaciones de Monitoreo indicadas en la Resolución N° 00045 del SRMS.



Figura 1 Ubicación espacial sobre imagen Google Earth de las 4 Estaciones de Monitoreo

- Estación Cancha carbón (coordenadas geográficas 267662.17 E; 6373667.19 S), ubicada al interior de la cancha de acopio de carbón, dentro de la pantalla deflectora.
- Estación Galo Herrera, (coordenadas geográficas 267760,87 E y 6373794.17 S) localizada fuera de la cancha, aunque dentro de las dependencias de AES ANDES.
- Estación MPS Bajo (coordenadas geográficas N), 267669 E, 6373931 N) ubicada en la localidad de la greda sector bajo.
- Estación MPS Alto (coordenadas geográficas 267774 E; 6374087 N), ubicada en la localidad de la greda sector alto.

Las Estaciones MPS Alto y MPS bajo están ubicadas en el poblado La Greda.

Las variables ambientales principales consideradas en el Plan de Monitoreo son:

- 1) El porcentaje de carbón presente en el MPS insoluble.
- 2) La variación del porcentaje de carbón en las cuatro estaciones.
- 3) El gradiente de dispersión del carbón desde la cancha de acopio de este material, hacia las 3 otras estaciones del Plan de Muestreo de MPS.

El presente Informe se hace cargo de los resultados obtenidos en las 3 primeras campañas de monitoreo (período del 19 mayo al 09 septiembre del 2022).

2 OBJETIVOS

El Objetivo Principal del Plan de monitoreo es evaluar la eficacia del Sistema de Control de dispersión de material, específicamente de las partículas de carbón, hacia el exterior del Complejo Termoeléctrico Ventanas.

Las principales tareas a desarrollar para cumplir el Objetivo Principal son:

- Monitorear y caracterizar la cantidad de MPS acumulada en cada colector, con indicación de la Tasa de sedimentación del MPS soluble e insoluble.
- Monitorear y caracterizar la cantidad de MPS correspondiente a las partículas de carbón, con indicación de la masa acumulada en cada colector y cálculo de la Tasa de Sedimentación de carbón expresada en $\text{mg}/\text{m}^2/\text{mes}$ y $\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$.
- Determinar la variación espacial y temporal de las Tasas de Sedimentación de carbón, considerando las variaciones en las 4 estaciones y variaciones en el lapso de tiempo considerado entre la instalación y la remoción de los colectores para el período que se informa.

Como Objetivo Secundario se aborda la comparación de las Tasas de Sedimentación del carbón con normas nacionales e internacionales.

Los parámetros que fueron utilizados para caracterizar el estado y evolución de las variables ambientales son:

- Masa soluble total
- Masa insoluble total
- Masa insoluble carbón
- Tasa de Sedimentación del MPS
- Tasa de Sedimentación de carbón

3 METODOLOGÍA DE MUESTREO y ANÁLISIS DEL MPS

El término MPS (*Settleable Particulate Matter*, en inglés) se refiere a cualquier material compuesto de partículas lo suficientemente pequeñas como para pasar a través de una pantalla de 1 mm y lo suficientemente grandes como para depositarse desde el aire, en virtud de su peso, en el contenedor (Norma ASTM D 1739 – 98)¹.

3.1 Instalación de colectores pasivos y recolección de muestras

Para recolectar el Material Particulado Sedimentable se utilizaron colectores pasivos (Figura 2), con un radio de 0,249 m.

La empresa SGS Chile Ltda., fue la responsable de la operación y mantención de los 4 colectores pasivos. El período aconsejado de recolección del MPS es del orden de un 27 a 32 días, sin embargo en condiciones climáticas desfavorables, por ejemplo fuertes lluvias, las botellas de recolección pueden ser removidas y guardadas mientras dura el mal tiempo y, tras esto, recolocadas nuevamente en los colectores.

La instalación de los colectores y la remoción de las botellas está a cargo de la Empresa SGS, quien envía mensualmente las botellas de cada colector al Instituto de Geología Económica (GEA) de la Universidad de Concepción.



Figura 2 Modelo de Colector pasivo instalado en 4 Estaciones del CTV.

¹ Standard Test Method for Collection and Measurement of Dustfall (Settleable Particulate Matter)¹

3.2 Remoción del MPS desde las botellas, determinación de la masa del MPS total, soluble e insoluble

En el Instituto GEA, las botellas colectoras son tratadas con ultrasonido para retirar toda la masa adherida a la superficie interna. Posteriormente, se procede a:

- Determinación de sólidos insolubles: una vez removida toda la masa de las botellas colectoras se procede a la filtración de sólidos, utilizando un filtro de membrana de 0,45 micrones. Posteriormente, los sólidos son secados a 40°C y luego pesados, hasta peso constante.
- Determinación de sólidos solubles: Los sólidos solubles fueron determinados en la solución remanente de la filtración, según la norma ASTM D 1739 – 98.
- Determinar la granulometría de las partículas en la fracción insoluble mediante difracción láser
- Entrega de la fracción insoluble a Geo-Forensic SpA.

3.3 Estudio composicional del MPS Insoluble y cuantificación de la fracción correspondiente a carbón.

Una vez recibidas las muestras de la fracción insoluble del MPS, por parte Geo-Forensic se procede al estudio integral de componentes mediante Microscopía Electrónica (SEM), con énfasis en el estudio del *componente carbón*.

4 MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS

4.1 Caracterización granulométrica del MPS

El análisis granulométrico de la masa total insoluble es realizado por el Instituto de Geología Económica Aplicada (GEA) de la Universidad de Concepción mediante el método de difracción láser en húmedo. El equipo utilizado es un analizador granulométrico láser Fritsch modelo Analysette 22 Microtec Plus. El análisis se realiza en húmedo, con aplicación de ultrasonido para obtener la máxima dispersión de partículas. El equipo posee un rango de medición de 0,08 a 2000 micrones (μm).

4.2 Identificación de componentes del MPS Insoluble mediante microscopía electrónica (SEM/EDS)

Considerando que las partículas del MPS tienen tamaño micrométrico, la caracterización textural y composicional de los diferentes tipos de partículas presentes en el MPS insoluble se realiza mediante microscopio electrónico de barrido (SEM)

El equipo utilizado corresponde a un TSCAN, VEGA III, equipado con detector de electrones retro-dispersados (Modo BSE), detector de electrones secundarios (Modo SE) y detector de rayos x de energía dispersiva (Modo EDS). Este equipo pertenece al Centro de Microscopía Avanzada del Bío-Bío (CMA), ubicado en dependencias de la Universidad de Concepción.

En un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM: Scanning Electron Microscopy por sus siglas en inglés) el bombardeo de electrones sobre la muestra produce varias formas simultáneas de radiación, entre ellas, la emisión de electrones secundarios (SE), electrones retro-dispersados (BSE) y emisión de rayos X. Cada una de esas formas de radiación es capturada por un detector específico.

Detector SE versus detector BSE

La imagen entregada por el SEM se genera por la interacción del haz de electrones que “barre” un área determinada sobre la superficie de la muestra. La detección de los electrones secundarios o retro-dispersados en un gran número de puntos sobre el área barrida, previa transformación electrónica, genera la imagen que se visualiza en una pantalla y es fotografiada mediante una cámara adosada al equipo.

El detector SE es ideal para generar imágenes SEM de alta resolución que permiten obtener detalles de la morfología y textura superficial de las partículas. El detector BSE ofrece una imagen de menor resolución, pero tiene la ventaja de que es sensible a las variaciones en el número atómico de los elementos presentes en la superficie, permitiendo discriminar sobre la imagen partículas de diferente composición.

Cada imagen SEM incorporada en este estudio contiene información impresa de las condiciones de trabajo (voltaje de aceleración de electrones, distancia de trabajo, magnificación) y una escala gráfica que permite identificar el tamaño de las partículas. La intensidad del haz de electrones utilizada fluctuó entre 10 y 12 mV.

Detector EDS para determinación química de componentes

El detector EDS analiza los rayos X generados por el bombardeo de electrones mediante la espectroscopía de rayos X de energía dispersa (EDS por sus siglas en inglés). Permite identificar los elementos presentes en el punto de incidencia del haz de electrones sobre una partícula, o en un área previamente determinada que será barrida por el haz de electrones. Se obtiene así un espectro con los *peaks* de los elementos presentes en el punto de incidencia, con dato del porcentaje elemental o en masa de esos elementos. O bien, si se combina con la detección de electrones retro-dispersados en un área, se obtiene una suerte de “mapa” con la distribución de los elementos presentes en la muestra (herramienta *mapping*).

Los espectros EDS aplicados a los objetivos de este estudio, aportan información invaluable para diferenciar la naturaleza de las partículas sólidas, es decir distinguir carbón crudo, de residuos de combustión, de otras partícula metálicas o bien de partículas vegetales.

Como material de referencia para la identificación de los diferentes tipos de residuos de combustión fueron utilizados los estudios de Suarez -Ruiz et al. 2017² y Valentim et al. 2018³. Para la identificación composicional de fases cristalinas mediante SEM se utilizó el trabajo de Severin, 2004⁴.

Montaje de las muestras para el estudio mediante microscopio electrónico

Las muestras fueron montadas en porta muestras de aluminio de 11 mm de diámetro (pines), recubiertos con cinta adhesiva de doble cara de carbono. El montaje de las partículas se realiza teniendo precaución que éstas no se superpongan entre sí, ya que eso puede afectar el espectro EDS de las partículas de interés. El análisis de las muestras se realizó sin grafitización previa de los porta muestras.

4.3 Determinación porcentual de tipos de partículas antrópicas en el MPS

Para determinar el porcentaje de partículas identificadas en el MPS Insoluble se utiliza un programa digital que emula un contador automático de puntos. Mediante este programa se determinó la relación porcentual relativa, en volumen, de las partículas naturales y antrópicas presentes en las muestras, utilizando para ello 3 imágenes SEM por muestra, obtenidas con el detector BSE a baja magnificación (100x) y alta resolución.

El porcentaje en masa de los componentes fue determinado utilizando valores de densidad promedio para los diferentes tipos de partículas, como se indica a continuación:

Partículas naturales:

- Briznas de vegetales⁵: 1,5 g/cm³

Partículas antrópicas:

- Partículas de carbón⁶: 1,4 g/cm³ (valores fluctúan entre 1,47 y 1,29 g/cm³)
- Residuos de Combustión⁷: 2,5 g/cm³ (valores fluctúan entre 1,9 a 2,9 g/cm³)
- Partículas Metálicas⁸: 5,0 g/cm³ (sulfuros de Cu-Fe: 4,9 g/cm³; Magnetita: 5,2 g/cm³)

² Suarez-Ruiz, I. et al. (2017) Development of a petrographic classification of fly-ash components from coal combustion and co-combustion. (An ICCP Classification System, Fly-Ash Working Group – Commission III.). *Inter. Jour. Coal Geology*, 183: 188-203.

³ Valentim, et al. 2018. Undifferentiated Inorganics in Coal Fly Ash and Bottom Ash: Calciphères, magnesiocalciphères and Magnesiasphères. *Minerals* 2018, 8, 140; doi:10.3390/min8040140.

⁴ Severin, K. 2004. Energy Dispersive Spectrometry of Common Rock Forming Minerals. Kluwer Acad. Pu. 219 p.

⁵ Saiah, R., Perrin, B. & Rigal, L. 2010. Improvement of thermal properties of fires clays by introduction of vegetable matter. *J. Building Physics*, 34 (2): 124-142. doi.org/10.1177/1744259109360059

⁶ Wood, G., Kehn T., Carter, D. & Culberston, W. Coal Resource Classification System of the US Geological Survey. Geological Survey Circular 891. <http://pubs.usgs.gov/circ/c891/table2.htm>

⁷ Feng, S. & Li, Y. Study on coal fly ash classified by bulk density. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1732 012127. doi.org/10.1088/1742-6596/1732/1/012127

⁸ Minerals Densities. The Engineering Toolbox (www.engineeringtoolbox.com)

5 RESULTADOS MPS SOLUBLE, INSOLUBLE Y TOTAL

5.1 Masa de MPS Soluble, Insoluble y Total

En la Tabla 1 se indica la masa de MPS Soluble, Insoluble y Total determinado en las muestras del período que se informa, considerando los días efectivos de acumulación de MPS. Nótese que en el mes 1 (mayo-junio) y en mes 2 (julio-agosto), los días de permanencia de las botellas en los colectores no fueron continuos, dado que fue necesario retirar las botellas en los días de lluvia intensa y reinstalarlas una vez pasado el mal tiempo.

Los datos (Tabla 1) indican que la Estación Cancha Carbón acumula más MPS que las otras 3 Estaciones. Por otra parte, en la Estación Cancha Carbón se aprecia una considerable reducción del MPS, del orden de 10 veces en el mes 2 (julio-agosto), que se expresa tanto en el MPS soluble como insoluble.

Fecha de Inicio	Fecha Final	Estación	Período de Muestreo en días efectivos	Masa MPS soluble medida (mg)	Masa MPS insoluble medida (mg)	Masa MPS Total (mg)
19-05-22	03-06-22	Cancha Carbón	29	963,8	7079,3	8043,1
08-06-22	22-06-22					
19-05-22	03-06-22	Galo Herrera	29	181,3	591,2	772,5
08-06-22	22-06-22					
19-05-22	03-06-22	MPS Bajo	29	87	553,1	640,1
08-06-22	22-06-22					
19-05-22	03-06-22	MPS Alto	29	150,2	1100,6	1250,8
08-06-22	22-06-22					
28-06-22	08-07-22	Cancha Carbón	26	95,8	698,5	794,3
20-07-22	05-08-22					
29-06-22	08-07-22	Galo Herrera	25	50,5	344,7	395,2
20-07-22	05-08-22					
01-07-22	08-07-22	MPS Bajo	23	9,8	235,8	245,6
20-07-22	05-08-22					
01-07-22	08-07-22	MPS Alto	23	9,5	254	263,5
20-07-22	05-08-22					
09-08-22	12-09-22	Cancha Carbon	34	65,2	1163,8	1229
09-08-22	12-09-22	Galo Herrera	34	65,7	333,3	399
08-08-22	12-09-22	MPS Bajo	35	41,8	454	495,8
08-08-22	12-09-22	MPS Alto	35	36,6	384,8	421,4

Tabla 1 MPS Soluble, Insoluble y Total (mg) en las 4 Estaciones durante los 3 meses de monitoreo

5.2 Masa MPS Soluble y Tasa de Concentración

En la Figura 3 se aprecia el contraste en la concentración de solubles, con valores significativamente más altos en la Estación Cancha Carbón en el mes 1 (mayo-junio 2022), concentración que disminuye drásticamente en los dos meses siguientes (junio-julio 2022). Por otra parte, las Estaciones MPS Bajo y MPS Alto parecen tener un patrón común en los 3 meses de monitoreo.

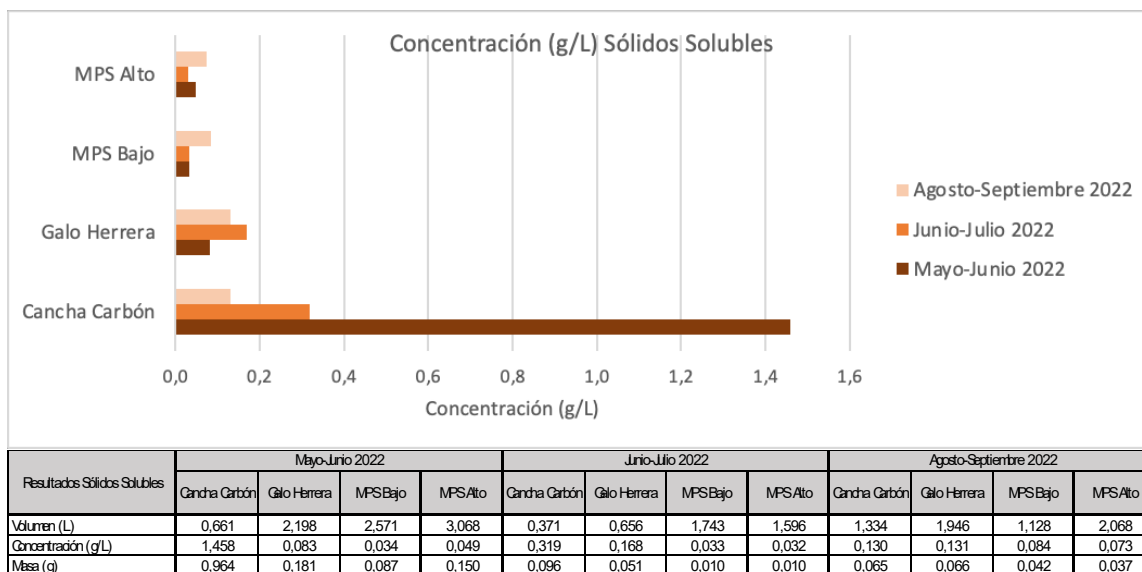


Figura 3 Concentración (g/L) comparada del MPS soluble en las 4 Estaciones durante los 3 meses de monitoreo

5.3 Tasa de sedimentación MPS Soluble, Insoluble y Total

La Tasa de Sedimentación del MPS se expresa en $\text{mg/m}^2/\text{mes}$, considerando mes de 30 días. Los colectores instalados en las 4 Estaciones tienen un radio de 0,249 m, por tanto una superficie de $0,19478172 \text{ m}^2$.

Para facilitar la comparación entre diferentes meses de monitoreo se requiere el recalcu a 30 días de la masa total (en mg) colectada, en caso que el período de recolección difiera de 30 días, situación que efectivamente ocurrió, donde el “período de recolección” fluctúa entre 23 días y 35 días.

En la Tabla 2 se muestran los resultados para las Tasas de Sedimentación del MPS soluble, insoluble y Total calculadas tomando en consideración los días efectivos para cada período y valores derivados de normalizar a mes 30 días, como sugiere la norma secundaria de la Cuenca del Río Huasco (D.E. N°4/92). Las diferencias observadas hacen aconsejable que en lo sucesivo el tiempo de recolección en los colectores pasivos respete el período de 30 días, para que los resultados se ajusten a la Tasa de Sedimentación real.

En la Tabla 3 se muestran los resultados para las Tasas de Sedimentación del MPS soluble, insoluble y Total (en $\text{mg/m}^2/\text{día}$), calculadas con los días efectivos para cada período y los valores derivados del cálculo por día, referidos al mes normalizado a mes 30 días.

Fecha de Inicio	Fecha Final	Estación	Período de Muestreo en días efectivos	Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m2/mes efectivo)	Tasa de Sedimentación MPS soluble (mg/m2/mes efectivo)	Tasa de Sedimentación MPS total (mg/m2/mes efectivo)	Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m2/mes 30 días)	Tasa de Sedimentación MPS soluble (mg/m2/mes 30 días)	Tasa de Sedimentación MPS total (mg/m2/mes 30 días)
19-05-22	03-06-22	Cancha Carbón	29	36344,786	4948,103	41292,889	37598,1	5118,7	42716,782
08-06-22	22-06-22								
19-05-22	03-06-22	Galo Herrera	29	3035,192	930,785	3965,978	3139,9	962,9	4102,736
08-06-22	22-06-22								
19-05-22	03-06-22	MPS Bajo	29	2839,589	771,120	3610,708	2937,5	797,7	3735,216
08-06-22	22-06-22								
19-05-22	03-06-22	MPS Alto	29	5650,428	446,654	6097,081	5845,3	462,1	6307,326
08-06-22	22-06-22								
28-06-22	08-07-22	Cancha Carbón	26	3586,065	491,833	4077,898	4137,8	567,5	4705,267
20-07-22	05-08-22								
29-06-22	08-07-22	Galo Herrera	25	1769,673	259,265	2028,938	2123,6	311,1	2434,725
20-07-22	05-08-22								
01-07-22	08-07-22	MPS Bajo	23	1210,586	48,773	1259,358	1579,0	63,6	1642,641
20-07-22	05-08-22								
01-07-22	08-07-22	MPS Alto	23	1304,024	50,313	1354,337	1700,9	65,6	1766,526
20-07-22	05-08-22								
09-08-22	12-09-22	Cancha Carbón	34	5974,893	334,734	6309,627	5272,0	295,4	5567,318
09-08-22	12-09-22	Galo Herrera	34	1711,146	337,301	2048,447	1509,8	297,6	1807,453
08-08-22	12-09-22	MPS Bajo	35	2330,814	187,903	2518,717	1997,8	161,1	2158,900
08-08-22	12-09-22	MPS Alto	35	1975,545	214,599	2190,144	1693,3	183,9	1877,266

Tabla 2 Variación Tasa de Sedimentación mensual (MPS insoluble, soluble y Total) efectiva y normalizada a 30 días

Fecha de Inicio	Fecha Final	Estación	Período de Muestreo en días efectivos	Tasa de Sedimentación MPS soluble (mg/m2/día efectivo)	Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m2/día efectivo)	Tasa de Sedimentación MPS total (mg/m2/día efectivo)
19-05-22	03-06-22	Cancha Carbón	29	170,624	1253,268	1423,893
08-06-22	22-06-22					
19-05-22	03-06-22	Galo Herrera	29	32,096	104,662	136,758
08-06-22	22-06-22					
19-05-22	03-06-22	MPS Bajo	29	26,590	97,917	124,507
08-06-22	22-06-22					
19-05-22	03-06-22	MPS Alto	29	15,402	194,842	210,244
08-06-22	22-06-22					
28-06-22	08-07-22	Cancha Carbón	26	18,917	137,926	156,842
20-07-22	05-08-22					
29-06-22	08-07-22	Galo Herrera	25	10,371	70,787	81,158
20-07-22	05-08-22					
01-07-22	08-07-22	MPS Bajo	23	2,121	52,634	54,755
20-07-22	05-08-22					
01-07-22	08-07-22	MPS Alto	23	2,188	56,697	58,884
20-07-22	05-08-22					
09-08-22	12-09-22	Cancha Carbon	34	9,845	175,732	185,577
09-08-22	12-09-22	Galo Herrera	34	9,921	50,328	60,248
08-08-22	12-09-22	MPS Bajo	35	5,369	66,595	71,963
08-08-22	12-09-22	MPS Alto	35	6,131	56,444	62,576

Tabla 3 Tasa de Sedimentación diaria (MPS insoluble, soluble y Total) calculada por día efectivo

En términos generales, en el período de 3 meses todas las Estaciones acusan reducción de las Tasas de Sedimentación, tanto del MPS soluble como insoluble, desde los máximos observados en el mes 1.

En particular, la Estación Cancha Carbón muestra un destacado decrecimiento de la Tasa de Sedimentación, del orden de 9 y 8,6 veces en el mes 2 y 3, respectivamente. Por otra parte, la Estación MPS Alto, muestra una reducción del orden de 3,5 y 3,4 veces en los meses 2 y 3, respectivamente.

Las Estaciones Galo Herrera y MPS Bajo muestran decrecimiento del MPS en el mes 2, con disminución entre 1,7 a 2,3 veces.

En el mes 3, respecto al mes 2, se observa un leve incremento en la Tasa de Sedimentación en las Estaciones Cancha Carbón (18,3%), MPS Bajo (30%) y MPS Alto. (6%). La Estación Galo Herrera es la única que muestra un decrecimiento (25,8%) en el mes 3, respecto al mes 2.

6 RESULTADOS MPS insoluble

En el presente estudio el MPS insoluble fue estudiado desde el punto de vista de su granulometría y composición.

6.1 Granulometría de MPS insoluble recolectado en cada Estación de Monitoreo

Los resultados del análisis granulométrico mediante difracción láser se presentan en la Tabla 4 (tamaño partículas en micrones).

Estación	Granulometría (μm)	Mayo-Junio 2022	Junio-Julio 2022	Agosto-Septiembre 2022	PROMEDIO POR ESTACIÓN EN 3 MESES
Cancha Carbón	Mín	0,098	0,088	0,098	0,095
	Máx	168,429	226,928	168,429	187,929
Galo Herrera	Mín	0,098	0,098	0,098	0,098
	Máx	250,637	168,429	250,637	223,234
MPS Bajo	Mín	0,098	0,088	0,098	0,095
	Máx	337,690	168,429	337,690	281,270
MPS Alto	Mín	0,098	0,088	0,098	0,095
	Máx	152,496	113,184	152,496	139,392

Tabla 4 Tamaño mín. y máx. de partículas en las 4 Estaciones por mes de monitoreo

Los resultados presentados en la Tabla 4 muestran un tamaño mínimo similar de las partículas de carbón en las 4 Estaciones, durante los 3 meses de monitoreo (Promedio 0,095 μm), mientras que el tamaño máximo promedio fluctúa entre 139,392 μm (Estación MPS Alto) y 281,270 μm (Estación MPS Bajo).

6.2 Composición del MPS insoluble

Los tipos de partículas reconocidas en las muestras son mayoritariamente antrópicas y, de manera muy subordinada, se observan partículas naturales que corresponden a partículas vegetales tipos briznas de pastizal.

La identificación de los tipos de partículas en el *MPS Insoluble*, dado su tamaño, se hizo mediante microscopía Electrónica de Barrido (SEM), utilizando imágenes BSE de alta resolución, en combinación con imágenes en la modalidad *mapping*.

La inspección de las muestras con el Modo BSE permite identificar los diferentes tipos de partículas, gracias a que este detector contrasta, mediante la tonalidad en la imagen, la diferente composición de las partículas. De este modo, de acuerdo a la tonalidad observada en la imagen, se identifican los siguientes tipos de partículas:

1. Partículas gris oscuro-negro: corresponden a partículas de carbón crudo (sin evidencias de combustión) y chars (residuos de combustión con carbono remanente). También se ven de esta

tonalidad las partículas de vegetales, las cuales se identifican por su forma (angosta y alargada), muy diferente a las partículas carbonosas (carbón y residuos de combustión).

2. Partículas gris medio: corresponden a residuos de combustión de composición aluminosilicatada, de forma esférica (cenosferas), prismática (mineroides feldespáticos y silíceos) o en granos compuestos (cenosferas más mineroides).
3. Partículas gris claro: ferrosferas (forma esférica, contenido alto de Fe).
4. Partículas blanco brillante: minerales metálicos en la forma de óxidos de Fe (magnetita, hematita), sulfuros de Fe (pirita) y sulfuros de Cu-Fe (calcopirita).

A modo de ejemplo, en la Lámina 1-A se presenta una imagen SEM/BSE donde se identifican los diferentes componentes mencionados, de acuerdo a su tonalidad de gris.

En la Lámina 1-B se presenta una imagen BSE obtenida mediante la herramienta "mapping" del SEM/EDS, la cual posibilita realizar un mapeo areal por elementos a definir por el usuario. En este estudio se utilizó esta herramienta para conocer la distribución en el muestra de los elementos carbono (C), sílice (Si), aluminio (Al), hierro (Fe), cobre (Cu) y azufre (S) y con eso confirmar la composición de los componentes observados. En la Lámina 1-C se presenta una imagen BSE con la distribución del elemento carbono (C). Mediante el *mapping* por diferentes elementos fue posible identificar los siguientes tipos de partículas:

- Solo Si (color amarillo): partículas de sílice (cuarzo) formadas en la fase final del proceso de combustión del carbón (mineroides silíceos).
- Si + Al (color amarillo + color verde): partículas aluminosilicatadas formadas en la fase final del proceso de combustión del carbón (cenosferas y mineroides de feldespato K y plagioclasa).
- Solo C (color rojo): partículas de carbón.
- C + Si + Al (color rojo + color amarillo + color verde): chars.
- S + Fe (color anaranjado + color azul): partículas de sulfuro de Fe (pirita).
- S + Cu + Fe (color naranja + color ciclamen + color azul): sulfuro de Cu-Fe (calcopirita).
- O + Fe (color celeste + color azul): Oxido de Fe (magnetita/hematita).

Información de detalle de la composición del MPS insoluble para cada una de las muestras estudiadas en este período (mayo-septiembre 2022) está contenida en Fichas por muestra, las cuales se incorporarán como Anexo al Informe Anual.

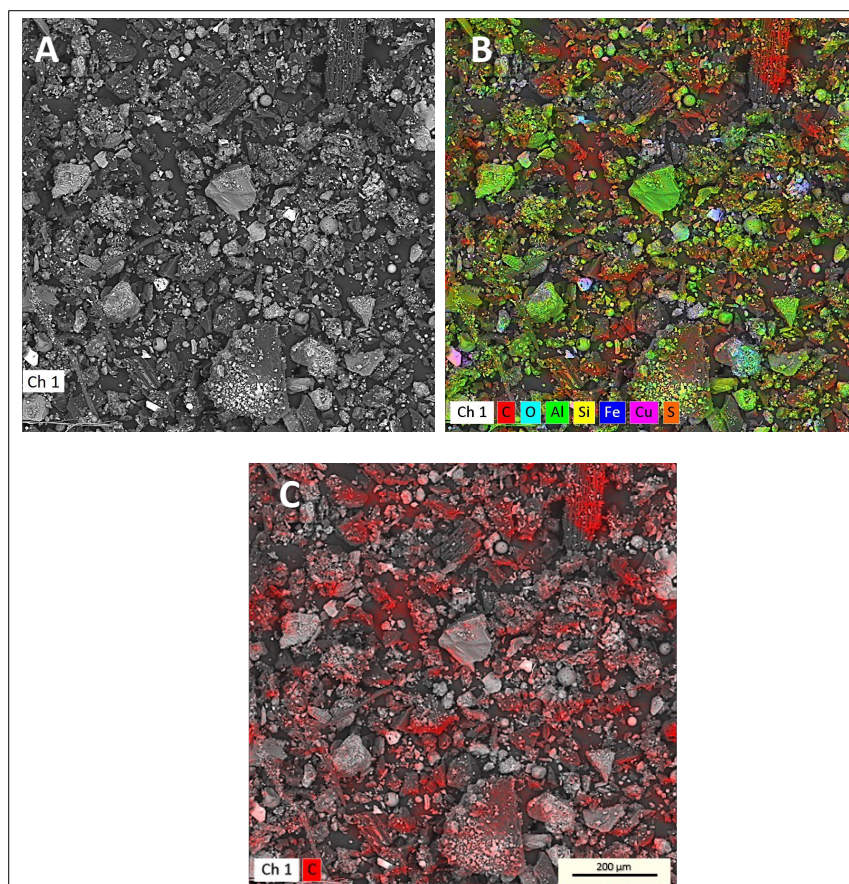


Lámina 1. A: SEM/BSE; B: SEM/EDS mapping de C, O, Al, Si, Fe, Cu y S; C: mapping de C

6.3 Masa y porcentaje en masa de los componentes del *MPS insoluble*

La determinación porcentual en volumen de cada uno de los componentes del *MPS insoluble* se realizó mediante software especializado, contabilizando los diferentes tipos de componentes sobre 3 imágenes SEM/BSE por muestra. Una vez determinado el porcentaje (en volumen) de cada componente en cada muestra, se calculó la masa, multiplicando el porcentaje en volumen por el valor de densidad asignado a cada tipo de partícula⁹ (referencias en sección 2.4), normalizando el valor obtenido a la masa total colectada en la estación correspondiente (Tabla 5).

⁹

Brizas de vegetales: 1,5 g/cm³

Partículas de carbón: 1,4 g/cm³

Residuos de Combustión: 2,5 g/cm³ (los valores de densidad fluctúan entre 1,9 a 2,9 g/cm³)

Partículas Metálicas: 5,0 g/cm³ (sulfuros de Cu-Fe: 4,9 /cm³; Magnetita: 5,2 g/cm³)

Masa por tipo de partícula (g)	Mayo-Junio 2022				Junio-Julio 2022				Agosto-Septiembre 2022			
	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto
Partículas de carbón	2,361	0,101	0,046	0,033	0,247	0,043	0,007	0,009	0,292	0,028	0,012	0,006
Residuos de combustión	4,061	0,410	0,446	0,964	0,410	0,270	0,210	0,226	0,731	0,261	0,394	0,339
Partículas metálicas	0,579	0,068	0,053	0,089	0,027	0,017	0,007	0,013	0,105	0,031	0,035	0,026
Vegetales	0,077	0,013	0,009	0,014	0,015	0,014	0,013	0,006	0,036	0,013	0,013	0,013
Total colectado (g)	7,079	0,591	0,553	1,101	0,699	0,345	0,236	0,254	1,164	0,333	0,454	0,385

Tabla 5 Masa por tipo de partícula en las 4 Estaciones, en los 3 meses de monitoreo

Una vez determinada la masa de los diferentes componentes, se procedió a determinar el porcentaje (en masa), con el propósito de determinar cuáles componentes tienen mayor influencia sobre la masa total del MPS Insoluble (Tabla 6).

El componente que, porcentualmente, más aporta a la masa del MPS insoluble, corresponde a residuos de combustión de carbón (ceniza volante) en todas las Estaciones de monitoreo, especialmente en la Estación MPS Alto.

El segundo componente más abundante corresponde a partículas de carbón, con valores significativamente más altos en la Estación Cancha Carbón y Estación Galo Herrera, ambas dentro de las dependencias del CTV.

Porcentaje por tipo de partícula (%)	Mayo-Junio 2022				Porcentaje por tipo de partícula (%)	Junio-Julio 2022				Porcentaje por tipo de partícula (%)	Agosto-Septiembre 2022			
	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto		Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto		Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto
Partículas de carbón	33,357	17,021	8,280	3,037	Partículas de carbón	35,361	12,577	2,837	3,526	Partículas de carbón	25,116	8,467	2,567	1,554
Residuos de combustión	57,370	69,340	80,637	87,579	Residuos de combustión	58,637	78,350	88,858	89,117	Residuos de combustión	62,776	78,374	86,767	88,220
Partículas metálicas	8,184	11,505	9,546	8,117	Partículas metálicas	3,832	5,037	2,856	5,093	Partículas metálicas	9,004	9,155	7,720	6,865
Vegetales	1,090	2,135	1,537	1,267	Vegetales	2,171	4,036	5,449	2,265	Vegetales	3,103	4,003	2,946	3,361

Tabla 6 Porcentaje en masa por tipo de partícula en las 4 Estaciones, en los 3 meses de monitoreo

Para una mejor comparación de los resultados, en la Tabla 7 se presentan los valores promedio del porcentaje y masa, en que cada componente aporta el MPS insoluble.

Masa (g) promedio (3 meses) por tipo de componente en MPS insoluble	MASA PROMEDIO 3 MESES POR ESTACIÓN				Porcentaje (en masa) promedio (3 meses) por tipo de componente en MPS insoluble	% PROMEDIO 3 MESES POR ESTACIÓN			
	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto		Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto
Residuos de combustión	1,734	0,314	0,350	0,510	Residuos de combustión	59,594	75,355	85,421	88,305
Partículas de carbón	0,967	0,057	0,021	0,016	Partículas de carbón	31,278	12,688	4,562	2,706
Partículas metálicas	0,237	0,039	0,032	0,043	Partículas metálicas	7,007	8,566	6,707	6,691
Vegetales	0,237	0,039	0,032	0,043	Vegetales	2,121	3,391	3,311	2,297

Tabla 7 Masa y Porcentaje promedio (3 meses) de componentes en MPS insoluble

De la comparación (Tabla 7) se destaca que:

- Los residuos de combustión de carbón contribuyen en promedio a la masa total del MPS insoluble con 1,7 g en la Estación Cancha Carbón y solo 0,3 g en la Estación Galo Herrera. Representan el 88,305% del MPS Insoluble en la Estación MPS Alto y solo el 59,594% en la Estación Cancha Carbón.
- El carbón aporta en promedio entre 0,967 gramos en la Estación Cancha Carbón y solo 0,016 g en la Estación MPS Alto. El porcentaje de carbón, el segundo componente en mayor proporción relativa, muestra un porcentaje promedio más alto en la Estación Cancha Carbón (31,278%) y más bajo en la Estación MPS Alto (2,706 %).
- Las partículas metálicas aportan al *MPS insoluble* con 0,237 g en la Estación Cancha Carbón y con valores similares entre 0,032 g y 0,043 g en las restantes 3 estaciones. Están presentes en

porcentaje significativamente similar en las 4 estaciones, variando entre 6,691% (estación MPS Alto) y 8,566% (Estación Galo Herrera).

- Los restos vegetales representan un porcentaje relativamente similar en las 4 estaciones, variando entre 3,391% en la Estación Galo Herrera y 2,121% en la estación Cancha Carbón. Su aporte a la masa del *MPS insoluble* varía entre 0,043 g en la Estación Cancha Carbón y entre 0,013 y 0,011 g en las estaciones restantes.

6.4 Tasa de sedimentación del PMS insoluble

En la Tabla 8 se presentan las variables utilizadas para el cálculo de la Tasa de Sedimentación del *MPS Insoluble* en cada una de las 4 Estaciones durante el período de 3 meses de monitoreo. Nótese la diferencia que se establece entre la Tasa de Sedimentación calculada utilizando el número de días de acumulación efectiva (columna A) y la Tasa de Sedimentación normalizada a mes de 30 días (columna B). La Tasa de Sedimentación diaria (Columna C) se ha calculado sobre la base del número días efectivos de acumulación del MPS.

Fecha de Inicio	Fecha Final	Estación	Período de Muestreo en días efectivos	A Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m ² /mes efectivo)	B Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m ² /mes 30 días)	C Tasa de Sedimentación MPS insoluble (mg/m ² /día efectivo)
19-05-22	03-06-22	Cancha Carbón	29	36344,786	37598,1	1253,268
08-06-22	22-06-22					
19-05-22	03-06-22	Galo Herrera	29	3035,192	3139,9	104,662
08-06-22	22-06-22					
19-05-22	03-06-22	MPS Bajo	29	2839,589	2937,5	97,917
08-06-22	22-06-22					
19-05-22	03-06-22	MPS Alto	29	5650,428	5845,3	194,842
08-06-22	22-06-22					
28-06-22	08-07-22	Cancha Carbón	26	3586,065	4137,8	137,926
20-07-22	05-08-22					
29-06-22	08-07-22	Galo Herrera	25	1769,673	2123,6	70,787
20-07-22	05-08-22					
01-07-22	08-07-22	MPS Bajo	23	1210,586	1579,0	52,634
20-07-22	05-08-22					
01-07-22	08-07-22	MPS Alto	23	1304,024	1700,9	56,697
20-07-22	05-08-22					
09-08-22	12-09-22	Cancha Carbón	34	5974,893	5272,0	175,732
09-08-22	12-09-22	Galo Herrera	34	1711,146	1509,8	50,328
08-08-22	12-09-22	MPS Bajo	35	2330,814	1997,8	66,595
08-08-22	12-09-22	MPS Alto	35	1975,545	1693,3	56,444

Tabla 8 Tasa de sedimentación de MPS Insoluble expresada en mg/m²/mes y mg/m²/día

Como indican los datos de la Tabla 8, la Tasa de Sedimentación del *MPS Insoluble* es significativamente más alta en la Estación Cancha Carbón en los 3 meses de monitoreo, con un valor muy alto en el mes 1. Sin embargo, se aprecia una importante reducción en los meses siguientes, 9 veces en el mes 2 y 7 veces en el mes 3 respecto al mes 1.

En las restantes 3 Estaciones se observa así mismo reducción de la Tasa de Sedimentación del MPS Insoluble en los 3 meses monitoreados.

7 RESULTADOS REFERIDOS AL COMPONENTE CARBÓN DEL MPS INSOLUBLE

Esta sección hace referencia en particular al componente “carbón” del MPS Insoluble, dado que constituye la variable principal del monitoreo estipulado en la Resolución 0045/22 del SRMS que rige el estudio.

Como se indicó en la sección anterior (ver Tabla 5, 6 y 7), el carbón es el segundo componente más abundante en el MPS insoluble.

7.1 Carbón: Masa, porcentaje y tamaño de partículas

La masa de carbón es significativamente más alta en la Estación Cancha Carbón, con un valor promedio (3 meses) de 0,967 g, el cual disminuye drásticamente en la Estación Galo Herrera (ubicada 150 m al NNE-SSW) a un valor promedio de 0,057 g, es decir se constata una reducción de 17 veces entre ambas estaciones. La reducción en la masa promedio de carbón prosigue hacia la Estación MPS Bajo (ubicada a 275 m al NNW-SSE de la Estación Cancha Carbón), donde se registra una masa promedio de 0,021 g. El valor masa de carbón promedio más bajo -0,016 g- se registra en la Estación MPS Alto (ubicada a 475 m al NNE-SSW de la E. Cancha Carbón), indicando una reducción de 60 veces respecto a la masa promedio registrada en la Estación Cancha Carbón (Figura 4).

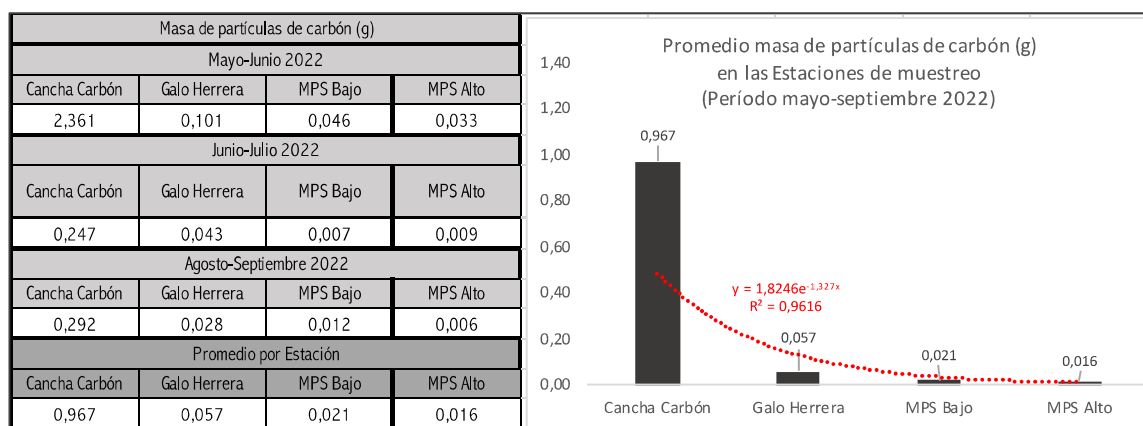


Figura 4 Masa de carbón registrada en las 4 estaciones y variabilidad en el período de 3 meses

En la Tabla 9 se presenta el porcentaje en masa de carbón respecto del MPS insoluble, para cada Estación por mes de monitoreo, además del porcentaje promedio (3 meses) para cada Estación.

Porcentaje (% en masa) del carbón	Mayo-Junio 2022				Junio-Julio 2022				Agosto-Septiembre 2022			
	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto	Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto
	33,357	17,021	8,280	3,037	35,361	12,577	2,837	3,526	25,116	8,467	2,567	1,554
	Promedio por Estación				Cancha Carbón	Galo Herrera	MPS Bajo	MPS Alto				
					31,28	12,69	4,56	2,71				

Tabla 9 Porcentajes (en masa) del carbón en el MPS Insoluble

La Tabla 10 contiene los valores del tamaño máximo y mínimo (micrones) de las partículas de carbón para las 4 Estaciones durante los 3 meses de monitoreo. El mayor tamaño máximo promedio se registra en la Estación MPS Bajo (224,4 μm) seguido de la Estación Cancha Carbón (220,1 μm). El menor tamaño máximo promedio (90,2 μm) se registra en la Estación MPS Alto, la más alejada de la cancha de acopio de carbones utilizados en el Complejo Termoeléctrico Ventanas.

		Rango de tamaño (Min-Max) de Partículas de Carbón (μm)		Promedio Tamaño Máximo de Partículas de Carbón (μm)
Periodo mayo-junio 2022	Cancha Carbón	14,4	119,8	220,1
Periodo junio-julio 2022		13,3	215,7	
Periodo agosto-septiembre 2022		17,3	324,8	
Periodo mayo-junio 2022	Galo Herrera	17,1	263,5	157,6
Periodo junio-julio 2022		11,2	100,7	
Periodo agosto-septiembre 2022		14,7	108,5	
Periodo mayo-junio 2022	MPS Bajo	10,7	186,2	224,4
Periodo junio-julio 2022		16,3	325,4	
Periodo agosto-septiembre 2022		11,7	161,5	
Periodo mayo-junio 2022	MPS Alto	29,8	131,6	90,2
Periodo junio-julio 2022		30,8	62,1	
Periodo agosto-septiembre 2022		24,0	76,9	

Tabla 10 Tamaño mínimo y máximo (en micrones) de las partículas de carbón

7.2 Tasa de sedimentación del carbón

En la Tabla 11 se indica la Tasa de Sedimentación del Carbón, calculada sobre la base de los días efectivos de acumulación en los colectores pasivos de las 4 Estaciones en los 3 meses de monitoreo.

En el mes 1, la Tasa de Sedimentación de Carbón en la Estación Cancha Carbón es extremadamente alta y no se condice con la registrada en los meses siguientes -se reduce 8,6 veces en el mes 2 y 9,5 veces en el mes 3-.

En las restantes 3 Estaciones, Galo Herrera, MPS Bajo y MPS Alto, ubicadas a una distancia de 150 m, 275 m y 475 m, respectivamente, de la Estación Cancha de Carbón, las Tasas de Sedimentación de Carbón son considerablemente menores, congruentes con su mayor distancia a la fuente de aporte.

Fecha de Inicio	Fecha Final	Estación	Periodo de Muestreo en días efectivos	Tasa de Sedimentación carbón (mg/m2/día efectivo)
19-05-22	03-06-22	Cancha Carbón	29	418,048
08-06-22	22-06-22			
19-05-22	03-06-22	Galo Herrera	29	17,814
08-06-22	22-06-22			
19-05-22	03-06-22	MPS Bajo	29	8,108
08-06-22	22-06-22			
19-05-22	03-06-22	MPS Alto	29	5,917
08-06-22	22-06-22			
28-06-22	08-07-22	Cancha Carbón	26	48,772
20-07-22	05-08-22			
29-06-22	08-07-22	Galo Herrera	25	8,903
20-07-22	05-08-22			
01-07-22	08-07-22	MPS Bajo	23	1,493
20-07-22	05-08-22			
01-07-22	08-07-22	MPS Alto	23	1,999
20-07-22	05-08-22			
09-08-22	12-09-22	Cancha Carbon	34	44,137
09-08-22	12-09-22	Galo Herrera	34	4,262
08-08-22	12-09-22	MPS Bajo	35	1,710
08-08-22	12-09-22	MPS Alto	35	0,877
TASA SEDIMENTACIÓN DE CARBÓN PROMEDIO (mg/m2/día efectivo)				
		Cancha Carbon	170,319	
		Galo Herrera	1,421	
		MPS Bajo	9,475	
		MPS Alto	0,292	

Tabla 11 Tasa Sedimentación Carbón en las 4 Estaciones y su variación en los 3 meses de monitoreo

8 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

8.1 Componentes antrópicos y su proporción en el MPS

Los 4 colectores pasivos de MPS están emplazados en o cerca de las instalaciones del Complejo Termoeléctrico Ventanas de propiedad de AES Andes. En las cercanías existen además numerosas instalaciones industriales.

En la Figura 5 se representan gráficamente los componentes del MPS Insoluble en cada Estación, por mes de monitoreo. Como se observa en la figura 5, el componente prioritario del MPS corresponde a residuos de combustión industrial de carbón. En segundo componente es el carbón, el cual tiene mayor presencia en la Estación Cancha Carbón y Estación Galo Herrera, disminuyendo drásticamente su presencia en las Estaciones MPS Bajo y MPS Alto, las más alejadas de los sectores donde se acopia o transporta carbón.

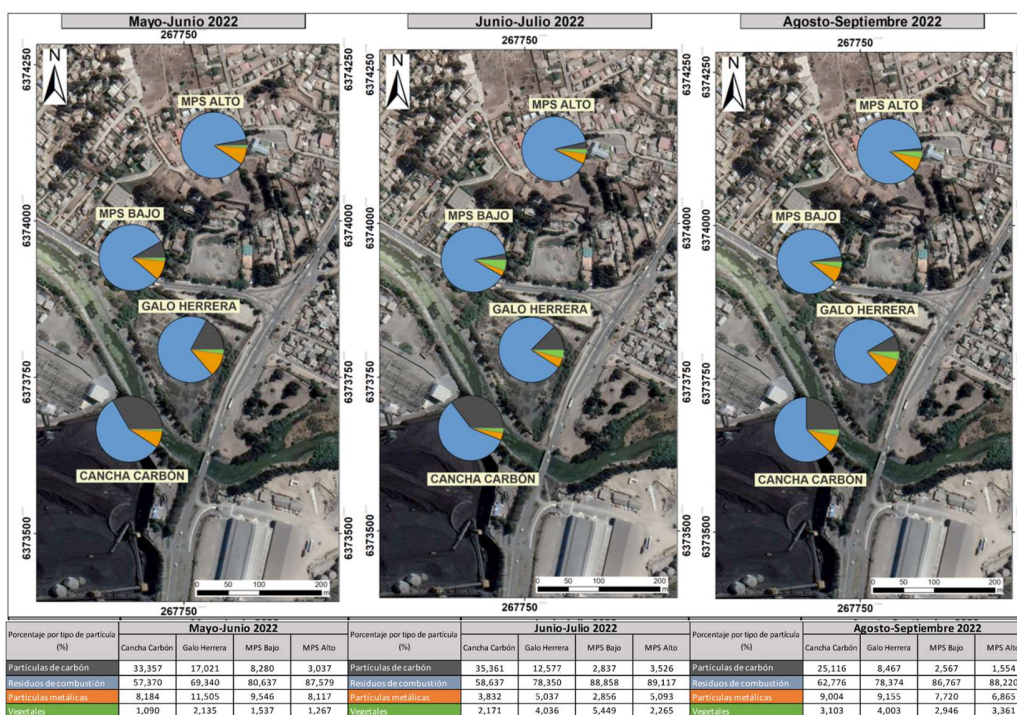


Figura 5 Evolución porcentual (% en masa) de los componentes del MPS Insoluble en las 4 Estaciones en los 3 meses de monitoreo

En orden de participación en el MPS, los 3 componentes antrópicos son:

- Residuos de Combustión: provienen de la actividad industrial del CTC con sus actuales 3 centrales termoeléctricas a carbón: % promedio entre 88,305 (E. MPS Alto) y 59,594 (E. Cancha Carbón)
- Partículas de carbón: corresponden a polvo movilizado por el viento desde los lugares de transporte y acopio del carbón utilizado en la alimentación de las 3 centrales: %MPS promedio entre 31,278% (E. Cancha Carbón) y 2,706% (E. MPS Alto).

- Partículas metálicas: dada su composición mineralógica provienen probablemente de los lugares de acopio de concentrado de cobre: % promedio entre 8,566% (E. Galo Herrera) y 6,691% (E. MPS Alto).

8.2 Tasa de Sedimentación del MPS Insoluble

Numerosos estudios han identificado al MPS como responsable de la transferencia de contaminantes. Las repercusiones del MPS en el medio ambiente pueden tener efecto sobre la fotosíntesis de las plantas, la acidificación de suelos y masas de agua, la degradación del entorno habitable y generar daño en la salud de la fauna (incluyendo las personas). A la hora de determinar la política ambiental local y soluciones de gestión, es crucial determinar las tasas de sedimentación del MPS, la(s) fuente(s) de la contaminación y la distribución desde ella(s).

Tradicionalmente, el MPS ha sido monitoreado gravimétricamente utilizando colectores pasivos. Hay una amplia variedad de colectores en uso en todo el mundo (cuencos, cilindros o embudos horizontales de boca abierta) que, por lo general operan con recolección del MPS mensual. La Tasa de Sedimentación de sólidos no disueltos (MPS Insoluble), aunque a veces también se incluyen los sólidos disueltos (MPS Soluble), se puede expresar por día ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$), por mes de 30 días ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{mes}$) o por año ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{año}$). Considerando que a menudo las condiciones operativas de las fuentes de origen son episódicas, o bien ocurren condiciones meteorológicas anormales o ambas, la expresión de la Tasa de Sedimentación anual se considera más representativa.

Con el fin de gestionar y minimizar los efectos adversos de las partículas sedimentables (MPS), varios países, entre ellos Chile, han establecido los estándares máximos permitidos. Estos estándares varían según el país y, a veces, el estado, como ocurre en Estados Unidos, Canadá y Brasil. La Tabla 14 (tomada de Vallack & Shillito, 1998) resume los umbrales estándar establecidos por Agencias Ambientales en países europeos, América del Norte y Argentina.

2738		H. W. VALLACK and D. E. SHILLITO	
Table 1. Examples of dust deposition standards outside the U.K. (as $\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$)			
Argentina	Annual average		333
Australia (W. Australia)	Loss of amenity first perceived		133
	Unacceptable reduction in air quality		333
Canada			
Alberta	Annual average		180
Manitoba	Annual average		153
	(maximum acceptable)		266
	(maximum desirable)		200
Newfoundland	Annual average		153
	Monthly average		233
Ontario	Annual average		170
	Monthly average		200
Finland	Annual average		333
Germany	Long-term average		350*
	Short-term average		650*
Spain	Annual average		200
U.S.A.			
Kentucky	Annual average		196
Louisiana	Annual average		262
Maryland	Annual average		183
Mississippi	Monthly average (above background)		175
Montana	Annual average (residential areas)		196
New York	During any 12 months no more than		
	5% of 30 d values to exceed		100
	and 84% to be below		130
North Dakota	3 Monthly average		196
Pennsylvania	Annual average		267
	Monthly average		500
Washington	Annual average		183
Wyoming	Monthly average		170

* Combined weight of dissolved and undissolved deposits.

Tabla 12 Valores límites de Tasa de Sedimentación de MPS ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$)

En el caso de Brasil, existe una norma del Estado de Minas Gerais (COPAM N°1/81) para áreas industrializadas que fija el valor límite en $10 \text{ g}/\text{m}^2/\text{mes}$, que corresponde a $333 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{día}$. En un trabajo relativamente reciente, Santos et al. (2017), estudia diferentes áreas industriales de estados brasileños (Minas Gerais, Río de Janeiro, Amapá y Vitoria) validando ese valor límite.

Chile no dispone de norma primaria para material particulado sedimentable MPS, por lo que se acostumbra utilizar como referencia el nivel límite definido en la norma secundaria por la cual se rige la Tercera Región (Cuenca del Río Huasco). Es una norma de calidad de aire en lo que respecta a polvo sedimentable, publicada en el D. E. N°4/1992 del Ministerio de Agricultura, que fija como Tasa de Sedimentación límite diaria el valor $150 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{día}$ como concentración media aritmética mensual, o bien $100 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{día}$ como concentración media aritmética anual.

En la Figura 6 se indican los valores de la Tasa de Sedimentación ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{mes}$) para el MPS Soluble, Insoluble y Total en las 4 Estaciones durante los 3 meses de monitoreo. Las líneas rojas expresan:

- valor máximo mensual aceptado en Chile, calculado para mes de 30 días, utilizando el valor máximo diario de $150 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{día}$ indicado en el D.E. N°4/1992.
- Valor máximo mensual aceptado en Brasil para áreas industriales, calculado utilizando el valor máximo diario de $333 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{día}$ estipulado en la norma COPAM N° 1/81)

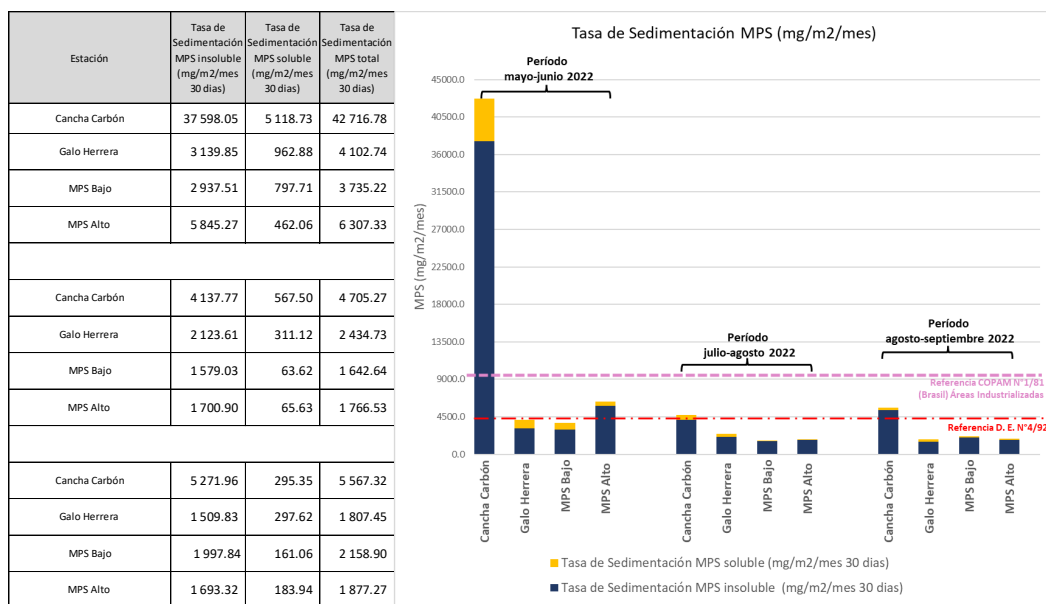


Figura 6 Tasa de Sedimentación del MPS (soluble, insoluble) en las 4 Estaciones en los 3 meses de monitoreo

Considerando la Tasa de sedimentación del MPS Total, como se observa en el gráfico de la Figura 6, las estaciones que sobrepasan el límite indicado en la norma Cuenca del Río Huasco (D.E. N°4/92) son:

- Estación Cancha Carbón en el mes 1, 2 y 3
- Estación MPS Alto solo en el mes 1

8.3 Tasa de Sedimentación de carbón

Por sus características físicas y el tamaño de los granos, el carbón particulado es susceptible de ser erosionado por la acción del viento dentro y fuera de las instalaciones industriales que lo utilizan o manejan. En ese sentido, la erosión eólica que lo afecte provocará efectos similares a los que ocurren en los botaderos de minas o en los relaves de minerales.

En el área monitoreada, como es evidente y esperable, el mayor contenido de carbón se registra en la Estación Cancha Carbón, lugar de acopio y movimiento de los carbones que serán utilizados en el proceso de termo-generación del CTC y muy probablemente, lugar de origen de las partículas de carbón (menores de 1mm de diámetro) que forman parte del MPS insoluble. La Estación Cancha Carbón está ubicada dentro de la dependencia del mismo nombre, adyacente a la membrana deflectora que protege los sectores externos de la dispersión de partículas de carbón desde la cancha de acopio.

Como se aprecia en el gráfico de la Figura 7, *solamente* en el mes 1, la Tasa de Sedimentación de carbón en la Estación Cancha Carbón supera el máximo de MPS diario permitido para la cuenca del Río Huasco (D.E N° 4/91), así como también, la norma brasileña para áreas industriales (COPAM N°1/81).

En las restantes 3 Estaciones, Galo Herrera, MPS Bajo y MPS Alto, ubicadas a una distancia de 150 m, 275 m y 475 m, respectivamente, de la Estación Cancha de Carbón, las Tasas de Sedimentación de carbón son considerablemente menores (Figura 7) y en ninguno de los 3 meses de monitoreo sobrepasan el límite diario de 150 mg/m²/día que precisa el D.E. 4/91 del Ministerio de Agricultura (norma Cuenca del Río Huasco).

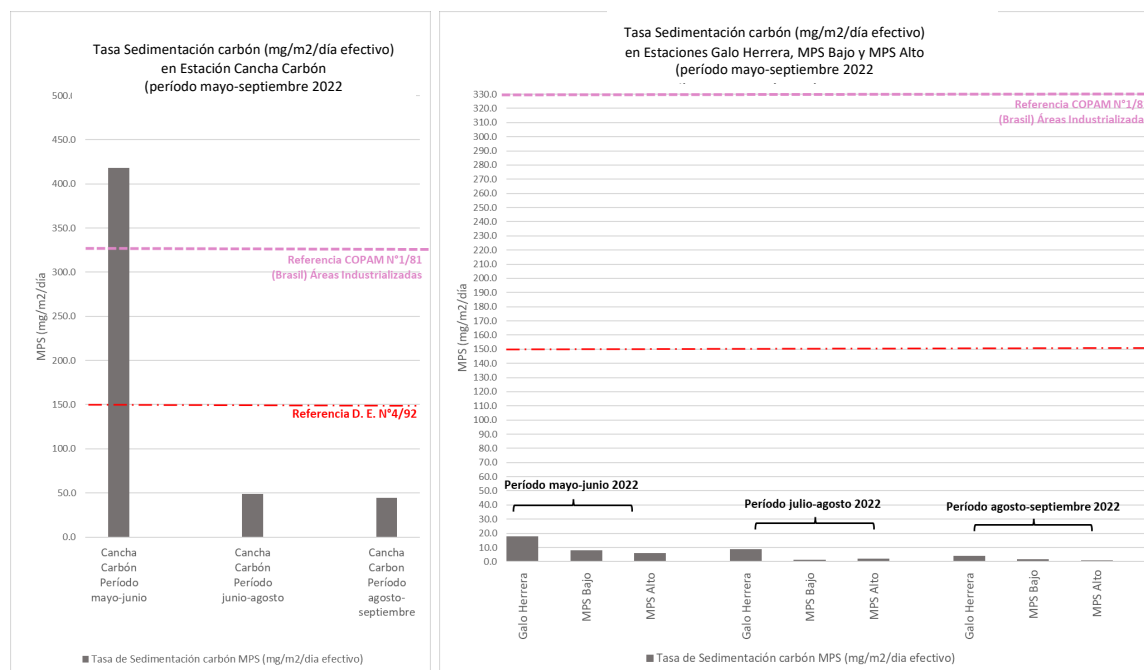


Figura 7 Tasa Sedimentación Carbón en las 4 Estaciones y su variación en los 3 meses de monitoreo comparada con límite fijado por D.E. N°4/92

La amplia diferencia entre la Tasa de Sedimentación de carbón en la Estación Cancha Carbón entre el mes 1 y meses 2 y 3 puede ser explicada por uno o más de los siguientes eventos:

- Menor humedad de los carbones almacenado en el mes de mayo 2022.
- Posibles trabajos de retiro de carbón desde la cara Nor-oriente de la cancha del CTV.
- Aumento de ráfagas de viento, tras las cuales sedimenta más carbón
- Mayor sedimentación de carbón asociada a trabajos de reparación/recambio de las mallas perimetrales.

De acuerdo a información proporcionada por AES-Andes, justamente en el mes de mayo se efectuaron trabajos de retiro y cambio de malla en el sector donde está instalado el colector Cancha Carbón, por lo cual, esta parece ser la causa más probable de la alta Tasa de Sedimentación de carbón en el mes 1.

9 CONCLUSIONES

9.1 Tasa de sedimentación MPS Total

- 7) Los valores más altos de Tasa de Sedimentación en los 3 meses de monitoreo se observan en el mes 1 en todas las Estaciones, sin embargo, son considerablemente más altos en la Estación Cancha Carbón.
- 8) En el mes 2 y 3, todas las Estaciones acusan reducción de las Tasas de Sedimentación, desde los máximos observados en el mes 1. La máxima disminución se registra en la Estación Cancha Carbón, donde la Tasa de Sedimentación se reduce del orden de 9 veces en el mes 2 y 8,6 veces en el mes 3. En las otras estaciones la disminución de las Tasas de Sedimentación en considerablemente menor (entre 5 a 2 veces).
- 9) La Estación Cancha Carbón, en los 3 meses y la Estación MPS Alto, en el mes 1, superan el valor límite de $150 \text{ mg/m}^2 / \text{día}$ que precisa la norma para la Cuenca del Río Huasco.

Los puntos señalados sugieren un comportamiento anómalo del MPS en la Estación Cancha Carbón, discordante con las otras 3 estaciones. Esta discordancia puede ser explicada por trabajos de mantenimiento durante mayo 2022 en las mallas perimetrales cercanas al colector pasivo.

9.2 Granulometría MPS Insoluble

Los resultados de la granulometría laser señalan valores mínimos uniformes en todas las Estaciones durante los 3 meses de monitoreo (promedio $0,095 \mu\text{m}$), mientras que el tamaño máximo de partículas promedio fluctúa entre $139,392 \mu\text{m}$ (Estación MPS Alto) y $281,270 \mu\text{m}$ (Estación MPS Bajo).

9.3 Componentes del MPS insoluble

- 1) Mayoritariamente está compuesto de partículas antrópicas. Componentes naturales, como restos de vegetales, representan solo entre 1,0% a 3,4% del MPS Insoluble.
- 2) Los residuos de combustión son el principal componente del MPS en todas las Estaciones, excepto en la Estación Cancha Carbón, en los 3 meses de Monitoreo. La Estación MPS Alto presenta el porcentaje más alto de residuos de combustión (promedio de 88,305%).
- 3) El carbón es el segundo componente más abundante del MPS insoluble, con valores significativamente más altos en la Estación Cancha Carbón y Estación Galo Herrera, ambas dentro de las dependencias del CTV y, valores más bajos en Estación MPS Alto.

- 4) Partículas metálicas del tipo sulfuros de Cu están presentes en porcentaje relativamente similar en las 4 Estaciones, con porcentaje promedio levemente superior (8,566%) en la Estación Galo Herrera.

9.4 Carbón en el MPS

- 1) El porcentaje promedio de carbón en los 3 meses de monitoreo es significativamente más alto en la Estación Cancha de Carbón (31,28%), disminuyendo de manera sostenida a medida que aumenta la distancia a las instalaciones del CTV: 12,69% en Estación Galo Herrera, 4,56% en Estación MPS Bajo y solo 2,71% en la Estación MPS Alto (disminución de 2,5 veces, 6,7 veces, 11,5 veces, respectivamente).
- 2) El tamaño promedio de las partículas de carbón es mayor en las Estaciones MPS Bajo (224,4 μm), Cancha Carbón (220,1 μm) y Galo Herrera (157,6 μm), mientras que en la Estación MPS Alto, la más alejada de las Instalaciones del CTC, el tamaño promedio se reduce considerablemente (90,2 μm).

9.5 Tasa de Sedimentación del carbón

- 1) La Tasa de Sedimentación del carbón es extremadamente alta en la Estación Cancha Carbón (418,048 $\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$) en el mes 1 (coincidente con trabajos de mantención de las mallas protectoras en las cercanías del colector pasivo) y disminuye drásticamente en 8,6 veces en el mes 2 y 9,5 veces en el mes 3.
- 2) En las restantes 3 Estaciones, Galo Herrera, Ventana Bajo y Ventana Alto, ubicadas a una distancia de 150 m, 275 m y 475 m, respectivamente, de la Estación Cancha de Carbón, las Tasas de Sedimentación de carbón son considerablemente menores, con valor promedio de 9,475 $\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$ en la Estación MPS Bajo, 1,421 $\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$ en la Estación Galo Herrera y solo 0,292 $\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$ en la Estación MPS Alto.
- 3) La Tasa de Sedimentación del carbón sobrepasa el límite diario de 150 $\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$ solamente en la Estación Cancha Carbón, mes 1. De acuerdo a lo informado por AES-Andes, la explicación posible de esta anomalía estaría relacionada con trabajos de mantención de las mallas en las cercanías del colector Cancha Carbón.

10 Referencias

- D. N°4/1992 Exento del Ministerio de Agricultura. Normas de Calidad del Aire para Material Particulado Sedimentable en la Cuenca del Río Huasco III Región.
- Feng, S. & Li, Y. Study on coal fly ash classified by bulk density. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1732 012127. doi.org/10.1088/1742-6596/1732/1/012127
- D.E. N°223/2015 del Ministerio del Medio Ambiente, Instrucciones Generales sobre la Elaboración del Plan de Seguimiento de Variables Medioambientales.
- Minerals Densities. The Engineering Toolbox (www.engineeringtoolbox.com)
- Saiah, R., Perrin, B. & Rigal, L. 2010. Improvement of thermal properties of fires clays by introduction of vegetable matter. *J. Building Physics*, 34 (2): 124-142. doi.org/10.1177/1744259109360059
- Santos, J.M. Reis, N.C., Galvão E.S., Silveira, A., Goulart, E. V. & Lima, A. T. 2017. Source apportionment of settleable particles in an impacted urban and industrialized region in Brazil. *Environ Sci Pollut Res* 4(27): 22026-22039.
- Severin, K. 2004. Energy Dispersive Spectrometry of Common Rock Forming Minerals. Kluwer Acad. Pu. 219 p.
- Suarez-Ruiz, I. et al. (2017) Development of a petrographic classification of fly-ash components from coal combustion and co-combustion. (An ICCP Classification System, Fly-Ash Working Group – Commission III.). *Inter. Jour. Coal Geology*, 183: 188-203.
- Valentim, et al. 2018. Undifferentiated Inorganics in Coal Fly Ash and Bottom Ash: Calcipheres, magnesiocalcipheres and Magnesiaspheres. *Minerals* 2018, 8, 140; doi:10.3390/min8040140.
- Vallack, H. W. & Shillito, D. E. 1998. Suggested guidelines for deposited ambient dust. *Atmospheric Environment* Vol. 32 (16,): 737—2744.
- Wood, G., Kehn T., Carter, D. & Culberston, W. Coal Resource Classification System of the US Geological Survey. Geological Survey Circular 891. <http://pubs.usgs.gov/circ/c891/table2.htm>



Dra. María Eugenia Cisternas S.
Geóloga-Mineralogista
GEO-FORENSIC SpA

Santiago, 02 de julio de 2021
VPO-DMA-069-2022

Señora
María Heloisa Rojas Corradi
Ministra del Medio Ambiente

Presente

Ref.: Resolución Ex. N°313/2024, que establece plazo para aportar antecedentes técnicos, científicos, sociales y económicos sobre la actualización del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví.

Mat.: Aporta Antecedentes al proceso de Revisión y actualización del PPDA CQP.

De nuestra consideración:

JUAN CARLOS MONCKEBERG FERNANDEZ, chileno, cédula nacional de identidad N°13.038.782-9, en representación, de AES Andes S.A. (en adelante, “AES”), RUT 94.272.000-9, y de Empresa Eléctrica Ventanas SpA, RUT 96.814.370-0, ambos domiciliados para estos efectos en Los Conquistadores N°1730, piso 10, Comuna de Providencia, Región Metropolitana de Santiago, a Ud. respetuosamente viene a señalar:

Ambas empresas, adhieren a la necesidad de avanzar en la revisión y actualización del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví (“PPDA CQP”) y manifiesta su total disponibilidad para participar y aportar antecedentes relevantes que permitan elaborar un instrumento que se ajuste a la ley, a los antecedentes de hecho, y que contenga un conjunto de medidas proporcionales y razonables que permitan el efectivo logro de sus objetivos.

Que, dentro del plazo de sesenta días hábiles, establecido por la Resolución Ex. N°313/2024, publicada con fecha 04 de abril de 2024 para aportar antecedentes técnicos, científicos, sociales y económicos sobre la actualización del PPDA CQP, venimos en aportar mediante la presente algunos antecedentes y comentarios a considerar en el proceso, a saber:

I. Antecedentes Preliminares.

Como es de su conocimiento, el Complejo Termoeléctrico Ventanas (en adelante, e indistintamente el “Complejo” o “CTV”), se ubica en un área industrializada, coexistiendo con una refinería de cobre, diversos terminales marítimos como el de GNL y una serie de instalaciones de la industria petroquímica, como la de ENAP.

La operación de sus unidades ha estado amparada por la normativa vigente y se ha adecuado constantemente a las modificaciones de la misma, en efecto, la última modificación sustantiva se produjo con la reciente entrada en vigencia del nuevo Plan de Descontaminación de la zona, el cual mi representada ha cumplido a cabalidad.

El CTV estaba conformado por cuatro unidades de generación de energía eléctrica a partir de la combustión de carbón, de las cuales, conforme al proceso de descarbonización de la matriz energética nacional, sólo 2 unidades se encuentran en operación, a saber:

- (i) Ventanas 1 (“V1”), se encuentra desconectada, con motivo de su retiro y cese de operaciones definitivo a partir del 30 de junio de 2022, conforme lo aprobado por la Comisión Nacional de Energía, mediante su Resolución Exenta N°555, de fecha 22 de julio de 2022,
- (ii) Ventanas 2 (“V2”), se encuentra desconectada, con motivo de su retiro y cese de operaciones definitivo a partir del 31 de diciembre de 2023, conforme lo aprobado por la Comisión Nacional de Energía, mediante Resolución Exenta N° 482, de 12 de octubre de 2023,
- (iii) Ventanas 3 (“V3”); operativa y,
- (iv) Ventanas 4 (“V4”), operativa.

Estas dos últimas unidades pertenecen a la Empresa Eléctrica Ventanas SpA. y han sido puestas a disposición para que cesen su operación a carbón a contar del día 1 de enero de 2025, en la fecha más temprana que la seguridad, suficiencia y economía del sistema lo permita.

Es importante considerar que las emisiones atmosféricas producto del proceso de termogeneración se liberan a la atmósfera en su totalidad en altura, a unos 95 metros de altura aproximadamente. Esto es fundamental, puesto que ello asegura una dispersión de las emisiones en una cota de aire muy superior al suelo –donde se emplazan las viviendas, escuelas y demás infraestructura de uso humano–.

La altura asegura así una dispersión que reduce radicalmente los impactos de las emisiones sobre las personas. Esto marca una diferencia relevante respecto de otras fuentes de emisiones existentes en la zona.

II. Marco Normativo Aplicable.

El CTV se encuentra sujeto a una profusa regulación destinada a proteger la salud de la población y el medio ambiente, así como a múltiples instrumentos de gestión ambiental adoptados a lo largo del tiempo. Esto ha significado que hoy el CTV cuente con robustas medidas de mitigación y planes operacionales destinados a la protección del medio ambiente y de la salud de la población. A continuación, se detallan las normas y estándares más importantes que hoy existen en cuanto a la mitigación de las emisiones de SO₂ y en lo relativo a los planes operacionales destinados a enfrentar episodios críticos.

La actividad del CTV se encuentra sujeta, en primer lugar, a las distintas resoluciones de calificación ambiental (en adelante, “RCA”). Estas RCA fijaron límites de emisión aplicables a todo el Complejo, especialmente en lo que respecta al SO₂. Sin embargo, estos límites se volvieron aún más estrictos con la dictación y publicación del Decreto Supremo N° 13 de 2011, del Ministerio del Medio Ambiente, que Establece la Norma de Emisión para las Centrales Termoeléctricas (en adelante, “DS N° 13/11”). Dicha norma, que regula la emisión de MP, SO₂, NO_x y Hg, fijó los siguientes límites de emisión:

Tabla N° 1. Límites de emisión para fuentes emisoras existentes, Combustible sólido

Parámetro	Límite aplicable (mg/Nm ³)
MP	50
SO ₂	400
NO _x	500
Hg	0,1

Fuente: art. 4 DS N° 13/11

A su vez, en el año 2019, entró en vigencia el actual Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para las Comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví (PPDA CQP), publicado en el Diario Oficial con fecha 30 de marzo de 2019. Este instrumento impuso límites de emisión al CTV aún más estrictos a los autorizados ambientalmente e incluso redujo aún más el límite de material particulado ya establecido por el D.S. N°13/11, reduciéndolo a 20 mg/Nm³.

Tabla N° 3. Emisiones máximas permitidas para el CTV

EMISIONES MÁXIMAS PERMITIDAS	EMISIONES DE MP (t/año)	EMISIONES DE SO ₂ (t/año)	EMISIONES DE NO _x (t/año)
Antes de la publicación del presente decreto.	844	8.877	11.096
Desde la publicación del presente decreto.	212	5.579	7.523
En el plazo de 3 años contado desde la publicación del presente decreto.	212	5.326	7.523

Fuente: art. 12 DS N°105/18

Como se aprecia en la tabla anterior, el PPDA estableció un máximo de emisión en toneladas por año. Así, la operación del CTV quedó sujeta a una limitación adicional en sus emisiones.

III. Normas en proceso de revisión relacionadas.

Cabe señalar, que a través de la Resolución Exenta N°130 de fecha 12 de febrero 2020, se dio inicio al proceso de revisión del DS N°13/11. Este proyecto de modificación considera la reducción de los límites de emisiones vigentes para MP, NO_x, SO₂ y Hg e, incorpora límites de emisión para los metales Níquel y Vanadio además de establecer plazos de cumplimiento específicos¹, que permitan la adecuación de las unidades de generación para dar cumplimiento a los nuevos límites propuestos. Se hace presente que la implementación de medidas de mitigación como, por ejemplo, la instalación de nuevo equipamiento para el abatimiento de contaminantes tarda en promedio de 3 a 4 años desde su conceptualización a su materialización final.

El proyecto definitivo de actualización de la norma de emisión fijaría los siguientes límites de emisión:

Tabla N° 2. Límites de emisión para fuentes existentes propuestos en proyecto definitivo

Parámetro	Límite aplicable (mg/Nm ³)
MP	20
SO ₂	200
NO _x	200
Hg	0,005
Ni	1,0
V	5,0

Fuente: Presentación Comité Operativo Ampliado, Sesión N°6/2024, MMA

Paralelamente, está en revisión por parte del Ministerio de Medio Ambiente la Norma de Calidad Primaria de MP2.5, D.S. N°12 de 2011. Actualmente se cuenta aprobado el anteproyecto de la norma, estando en etapa de evaluación por parte del Consejo Nacional para la Sustentabilidad y Cambio Climático.

Por lo anterior, consideramos que es de suma relevancia para el éxito del nuevo PPDA tener en consideración en este proceso, las normas en revisión antes señaladas y sus plazos de implementación.

¹ Plazos de cumplimiento: 5 años desde el 1° de enero siguiente a la entrada en vigencia para MP, SO₂ y NO_x; 1 año desde el 1° de enero siguiente a la entrada en vigencia para Hg y, 5 años desde el 1° de enero siguiente a la entrada en vigencia para Ni y V.

IV. Emisiones del CTV.

El CTV opera por debajo de las emisiones máximas permitidas por el PPDA CQP. Esto se debe a que las unidades han adoptado una moderna y eficiente tecnología de mitigación de emisiones atmosféricas.

En efecto, las unidades V3 y V4 del CTV cuentan con filtros de mangas, un dispositivo capaz de capturar partículas sólidas en suspensión (polvo), que permite la retención de casi la totalidad del material particulado que se produce en el proceso de combustión. Esto les permite operar en concentraciones muy por debajo de los 20 mg/Nm³. Asimismo, estas unidades cuentan desulfurizadores, con tecnología de inyección de cal. Se trata de equipos que emplean la cal como reactante para capturar el SO₂, produciendo yeso, el que se captura junto a la ceniza del carbón, este proceso permite reducir las emisiones hasta en un 74,5%, tal como consta en la siguiente tabla. A todo lo anterior se suma una baja emisión de NOx.

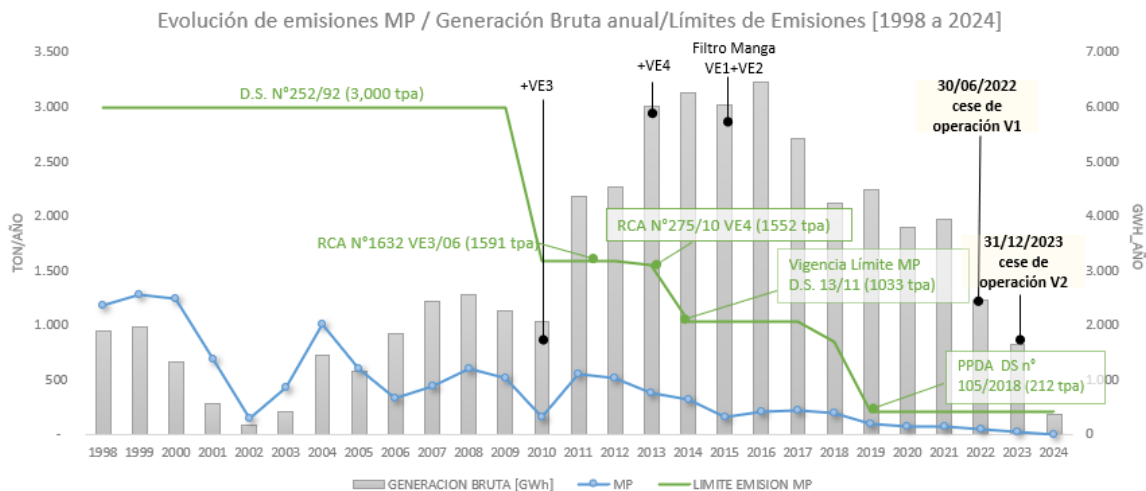
Tabla N° 4. Porcentaje de abatimiento Dióxido de Azufre Unidades V3 y V4

Unidad	% Abatimiento SO ₂
Ventanas 3	74,5%
Ventanas 4	74,5%

Fuente: VPO-DMA-082/2020 Actualización de Plan Operacional de AES Andes de fecha 9 de julio 2020.

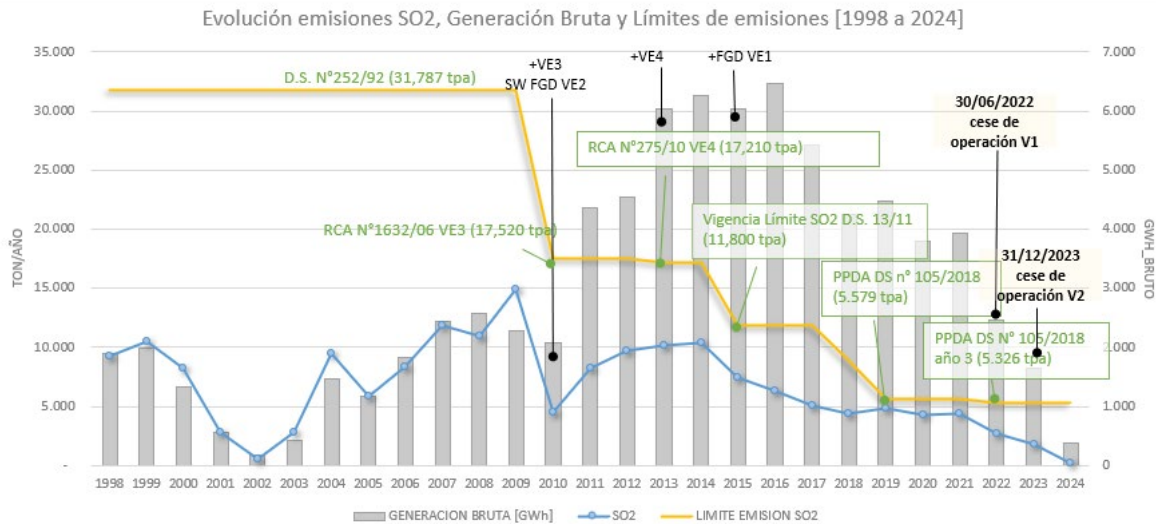
Estas medidas han permitido que el CTV haya logrado una fuerte reducción de sus emisiones de MP, SO₂ y NOx. Lo anterior consta en los siguientes gráficos:

Gráfico N°1. Reducción de emisiones de MP en CTV, período 1998 a 2024



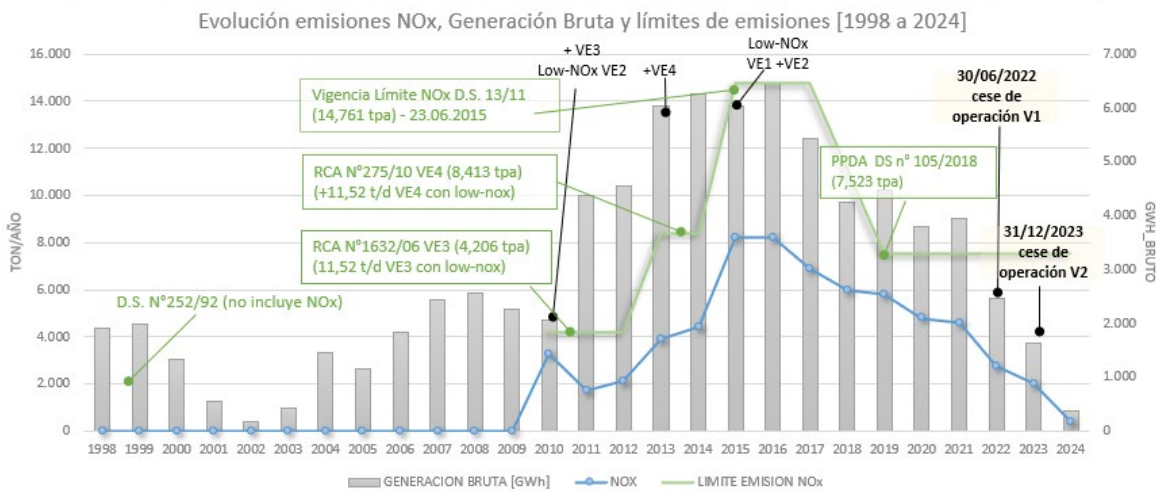
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico N°2. Reducción de emisiones de SO₂ en CTV, período 1998 a 2024



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico N°3. Reducción de emisiones de NO_x en CTV, período 1998 a 2024



Fuente: Elaboración propia.

De los gráficos, presentados previamente, se puede apreciar claramente como las emisiones tanto de MP, SO₂ y NO_x, han ido disminuyendo a lo largo de los años, explicado por una disminución en las concentraciones de estos contaminantes a la salida de la chimenea.

Por último, se debe señalar que todo lo anterior ha significado para esta parte un fuerte plan de inversiones en el CTV con el objeto de implementar mejoras en sus sistemas de abatimiento y control de emisiones aéreas.

El CTV ha avanzado a pasos acelerados en el proceso de descarbonización, tal como se señaló anteriormente, adelantando la salida de funcionamiento de V1 y V2 y comprometiendo en las fechas ya indicadas la salida de las demás unidades, adelantando los plazos originalmente establecidos, con la consecuente reducción de sus emisiones totales. Ahora bien, de acuerdo a lo señalado antes, el CTV con sus unidades V3 y V4, cumple con los límites de emisiones máxicas establecidos en el PPDA CQP:

Tabla N°5. Emisiones máxicas autorizadas V3 y V4, toneladas año

Unidad	MP	SO ₂	NO _x
CTV (V3 y V4)	212	5.579	7.523

Fuente: art. 12 DS N°105/18

V. Emisiones Fugitivas del CTV.

A lo expuesto en los puntos anteriores, se suma el trabajo implementado en el proceso de cumplimiento del artículo 29 de PPDA respecto de la obligación de **“contar con un sistema que impida la dispersión del material hacia el exterior de la instalación”** (énfasis agregado).

Considerando que el CTV cuenta con una cancha de acopio y manejo de carbón, la empresa adoptó e implementó las medidas ordenadas, desarrollando en forma previa una consultoría que permitiera caracterizar la situación basal anterior a la aplicación de las medidas exigidas.

Todo lo anterior fue aprobado mediante la Resolución N°00045 de la Secretaría Regional Ministerial de Salud (SRMS) de la Región de Valparaíso de fecha 02 de junio 2022. Dicha resolución autoriza el Sistema de control y dispersión de material hacia el exterior de la instalación y estableció como mecanismo de verificación de efectividad de la Cancha de almacenamiento de carbón del CTV un Plan de Muestreo de Material Particulado Sedimentable, que consistió en la instalación de 4 estaciones de colectores pasivos (Cancha de Carbón, Galo Herrera, MPS Bajo y MPS Alto) en o cerca de las estaciones del Complejo, el que luego de haber cumplido con las mediciones establecidas por la autoridad, ha permitido concluir que las medidas de control de la dispersión de las partículas de carbón, adoptadas por el CTV son efectivas.

En suma, como podemos ver, la adopción de distintos mecanismos de regulación ambiental, sumado al compromiso con la mejor gestión de sus impactos ambientales, ha significado que el CTV hoy cuente con tecnología de punta y estrictos protocolos de funcionamiento. La operación cumple la normativa ambiental aplicable.

VI. Antecedentes Técnicos que se acompañan.

Complementando lo expuesto en los puntos anteriores, tenemos a bien aportar los siguientes antecedentes técnicos que esperamos puedan tenerse presente dentro del proceso de análisis, revisión y actualización del PPDA CQP, a saber:

- 1.- Cuarto Informe de Caracterización Integral del MPS colectado en 4 estaciones de colectores pasivos (Cancha de Carbón, Galo Herrera, MPS Bajo y MPS Alto) en o cerca de las estaciones del Complejo Termoeléctrico costa de AES Andes correspondiente al período de marzo – junio 2023, elaborado por la Dra. María Eugenia Cisternas S.
- 2.- Tercer Informe de Caracterización Integral del MPS colectado en 4 estaciones de colectores pasivos (Cancha de Carbón, Galo Herrera, MPS Bajo y MPS Alto) en o cerca de las estaciones del Complejo Termoeléctrico costa de AES Andes correspondiente al período de diciembre 2022 – marzo 2023, elaborado por la Dra. María Eugenia Cisternas S.
- 3.- Segundo Informe de Caracterización Integral del MPS colectado en 4 estaciones de colectores pasivos (Cancha de Carbón, Galo Herrera, MPS Bajo y MPS Alto) en o cerca de las estaciones del Complejo Termoeléctrico costa de AES Andes correspondiente al período de octubre – diciembre 2022, elaborado por la Dra. María Eugenia Cisternas S.
- 4.- Primer Informe de Caracterización Integral del MPS colectado en 4 estaciones de colectores pasivos (Cancha de Carbón, Galo Herrera, MPS Bajo y MPS Alto) en o cerca de las estaciones del Complejo Termoeléctrico costa de AES Andes correspondiente al período de mayo – septiembre 2022, elaborado por la Dra. María Eugenia Cisternas S.

•
Todo lo señalado anteriormente, así como los antecedentes aportados, constituyen elementos técnicos elaborados en forma objetiva y científica que esperamos puedan tenerse presente dentro del proceso de análisis, revisión y actualización del PPDA CQP.

Como empresa, seguiremos atentos al avance del proceso y siempre disponibles para ir analizando los cambios y haciéndonos partícipes del proceso de revisión y actualización.

Sin otro particular saluda atentamente a Usted,

Juan Carlos Monckeberg Fernández
AES Andes S.A.
Empresa Eléctrica Ventanas SpA.