



UNIVERSIDAD DE CHILE – FACULTAD DE CIENCIAS – ESCUELA DE CIENCIAS  
AMBIENTALES Y BIOTECNOLOGÍA

**“ANÁLISIS GEOQUÍMICO DE SUELOS URBANOS DE LA  
CIUDAD DE SANTIAGO DE CHILE”**

Seminario de Título entregado a la Universidad de Chile en cumplimiento parcial de los  
requisitos para optar al Título de:

Química Ambiental

**JAVIERA DEL CARMEN SALGADO IBÁÑEZ**

DRA. ANA VALDÉS DURÁN  
DIRECTORA SEMINARIO DE TÍTULO

M.CS. SYLVIA COPAJA CASTILLO  
PROFESORA PATROCINANTE

Noviembre, 2022  
SANTIAGO – CHILE



## INFORME DE APROBACIÓN SEMINARIO DE TÍTULO

Se informa a la Escuela de Ciencias Ambientales y Biotecnología de la Universidad de Chile que el Seminario de Título, presentado por la **Srta. Javiera del Carmen Salgado Ibáñez**:

### “Análisis geoquímico de suelos urbanos de la Ciudad de Santiago de Chile”

Ha sido aprobado por la Comisión de Evaluación, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Química Ambiental.

Dra. Ana V. Valdés Durán  
**Directora Seminario de Título**

---

M. Cs. Sylvia V. Copaja C  
**Profesora patrocinante**

---

**Comisión Revisora y Evaluadora**

Presidente Comisión

---

Evaluador

---

Santiago de Chile, noviembre, 2022

## RESEÑA



Vengo de Colbún, una comuna al sur de Talca. Cursé mi enseñanza básica en la Escuela Básica de Colbún y mi enseñanza media en el Liceo Bicentenario Valentín Letelier Madariaga, en Linares, en donde surgió mi amor por la ciencia, por lo que en tercero medio me fui al plan fisicomatemático, el cual contemplaba electivos de química, física y matemática. Allí nos impulsaron y motivaron a seguir en mundo de la ciencia, a cuestionarnos las cosas que ocurrían a nuestro alrededor y a tratar de encontrarle alguna explicación lógica. Al momento de dar la PSU todavía no estaba bien segura de lo que quería estudiar, pero buscando encontré la Carrera de Química Ambiental, la cual reunía dos aspectos muy importantes para mí, la ciencia, en este caso la química y el medio ambiente, en donde podría enfocarme en suelos, que es lo que siempre me interesó más. Al momento de realizar mi unidad de investigación la hice respecto a suelos, he sido ayudante de química y contaminación de suelos dos años seguidos y actualmente me encuentro participando en un taller de armonización de muestreo de suelos contaminados por metal(oid)es a nivel Latinoamericano.

**A mis padres, abuelos y hermanos...**

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quisiera agradecer a toda mi familia, en especial a mis padres, hermanos y abuelos, quienes han sido el pilar fundamental en mi vida y sobre todo en este proceso y tiempo que he estado lejos de casa, dándome ánimo, apoyándome en todas las decisiones que he tomado y estando siempre presente. Al principio fue duro, sobre todo para alguien que viene de región, pero gracias a Dios, a mi familia y a todas las personas que de alguna u otra forma me ayudaron, fue posible salir adelante, gracias por eso.

A la profesora Ana Valdés, por su guía, apoyo, consideración, dedicación y disposición para ayudarme durante este extenso trabajo, desde la toma de muestras hasta los más mínimos detalles de las correcciones del escrito, además de ponerme en contacto con Mario Valdivia a quien agradezco igualmente, por enseñarme y ayudarme a elaborar los mapas de distribución e interpolación de los elementos analizados. A la profesora Sylvia Copaja, por permitirme utilizar su laboratorio para realizar parte de mi seminario, por sus correcciones, orientaciones y disposición para resolver mis dudas.

A mis amigos de toda la vida en especial a Bastián, mi mejor amigo, quien me ha apoyado en todo momento, quien siempre tiene una palabra de aliento para darme, con el que no se pasan penas y al que amo y considero como familia. También agradecer a Javi González, Javi Gutiérrez, Nati, Jorge y Mores por siempre estar presente y por su amistad incondicional, los quiero infinito.

A los amigos que me ha dejado la universidad. Dani Garrido y Paula, quienes fueron mis primeras amigas de la U, con las que definitivamente es imposible estar triste, las que siempre están ahí para apoyarme y con las que compartimos todos nuestros logros. Agradecer a mis amigos Javi J., Javier, Mati, Vago, Andy y Darío por todos esos bellos momentos que compartimos, reímos, por esas interminables tardes de pandemia en que teníamos que hacer trabajos por discord, por las risas y los momentos bonitos que pasamos, gracias por su amistad y apoyo siempre. A Dani Gutiérrez por su amistad y apañe incondicional. A las amigas que me dejó el ser ayudante, Mitza, Paula y Vale, gracias por hacer las preparaciones de los laboratorios más divertidas y por esos almuerzos en donde contábamos nuestras desgracias y anécdotas. Gracias Mitza por el apoyo fundamental este último tiempo, por escucharme y por todas las palabras de aliento que me diste. Gracias también a todos esos amigos que me dejó el laboratorio de química orgánica y ambiental, Marcelo, Diego, Felipe y Seba O., con quienes reímos más que trabajamos. Y a mis roomies Mariana, Sofi y Darío, con los que he compartido más este último tiempo y los que me han acogido desde el primer día. Gracias infinitas a todos, los quiero y llevaré en mi corazón siempre.

Finalmente agradecer al grupo de geólogos del SERNAGEOMIN y profesionales que participaron en el muestreo 2020 y a la Comisión Chilena de Energía Nuclear por permitirme realizar parte de los análisis en sus instalaciones. A Pati y Caro por guiarme y ayudarme en todo el proceso de digestión ácida y análisis por ICP-MS, muchas gracias.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESEÑA.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xv
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT.....	xiii
<b>I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. ANTECEDENTES GENERALES Y FUNDAMENTACIÓN DE LA PROBLEMÁTICA.....	1
1.1.1. Geoquímica .....	2
1.1.2. Suelos .....	5
1.1.3. Elementos traza metálicos.....	10
1.2. CONCEPTOS RELEVANTES.....	11
1.2.1. Background geoquímico .....	11
1.2.2. Anomalía geoquímica .....	12

1.2.3. Línea base geoquímica .....	13
1.3. ÁREA DE ESTUDIO .....	13
1.4. OBJETIVOS .....	14
1.4.1. General .....	14
1.4.2. Específicos .....	14
<b>II. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>15</b>
2.1. MUESTREO Y TRABAJO EN TERRENO.....	15
2.1.1. Grillado y colecta de muestras .....	15
2.2. ANÁLISIS DE LABORATORIO.....	18
2.2.1. Preparación de muestras para la determinación de parámetros físicoquímicos .....	18
2.2.2. Determinación de pH y CE .....	19
2.2.3. Digestión ácida.....	20
2.2.4. Análisis ICP-MS (Agilent 7500A).....	22
2.3. VALIDACIÓN BASE DE DATOS.....	24
2.4. ELABORACIÓN DE LA LÍNEA BASE GEOQUÍMICA AMBIENTAL DE SUELOS.....	26
2.4.1. Análisis del comportamiento y distribución de las concentraciones elementales analizadas .....	26
2.5. INDICADORES DE CONTAMINACIÓN .....	32



2.5.1. Índice de geoacumulación, $I_{geo}$ .....	32
2.5.2. Grado de contaminación, $mC_d$ .....	33
2.6. COMPARACIÓN CON NORMATIVA INTERNACIONAL.....	34
2.6.1. Norma Canadiense .....	34
2.6.2. Norma Holandesa.....	35
<b>III. RESULTADOS.....</b>	<b>37</b>
3.1. PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS.....	37
3.1.1. pH.....	37
3.1.2. Conductividad Eléctrica (CE) .....	38
3.2. LÍNEA BASE (LB).....	39
3.2.1. Distribución estadística de las concentraciones elementales .....	39
3.2.2. Distribución de concentraciones en el área de estudio.....	43
3.3. DETERMINACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN .....	79
3.3.1. Niveles de contaminación por elemento .....	79
3.3.2. Zonificación de la contaminación en el área de estudio .....	81
<b>IV. DISCUSIÓN.....</b>	<b>83</b>
4.1. PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS .....	83
4.1.1. pH.....	83
4.1.2. Conductividad eléctrica.....	84

4.2.	DISTRIBUCIÓN Y DINÁMICA DE LOS ELEMENTOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO.....	86
4.3.	INDICADORES DE CONTAMINACIÓN .....	90
4.4.	TOXICIDAD Y POSIBLES FUENTES.....	91
4.4.1.	Arsénico (As) .....	92
4.4.2.	Cadmio (Cd).....	93
4.4.3.	Cobre (Cu).....	94
4.4.4.	Cromo (Cr) .....	95
4.4.5.	Níquel (Ni) .....	95
4.4.6.	Plomo (Pb) .....	96
4.4.7.	Zinc (Zn) .....	97
4.5.	COMPARACIÓN CON NORMATIVA INTERNACIONAL.....	98
4.5.1.	Arsénico (As) .....	99
4.5.2.	Cadmio (Cd).....	100
4.5.3.	Cobre (Cu).....	100
4.5.4.	Cromo (Cr) .....	101
4.5.5.	Níquel (Ni) .....	101
4.5.6.	Plomo (Pb) .....	102
4.5.7.	Zinc (Zn) .....	102
<b>V.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>103</b>
<b>VI.</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>107</b>

**VII. ANEXOS .....122**

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Composición por volumen de un suelo en buen estado para el crecimiento vegetal. Modificado de Tarbuck & Lutgens (2004).....	5
<b>Figura 2.</b> Esquematación simplificada de la estratificación vertical típica asociada con los suelos desarrollados naturalmente. ....	8
<b>Figura 3.</b> Esquematación del Background geoquímico. Modificado de Gałuszka et al. (2014). ....	12
<b>Figura 4.</b> Distribución de muestras en el área de estudio de acuerdo con lo descrito por Reimann et al. (2008) para muestreo de zonas urbanas. ....	16
<b>Figura 5.</b> Box-plot teórico. ....	29
<b>Figura 6.</b> Explicación gráfica de la transformación ilr. Aliaga, 2016; modificado de Filzmoser et al. (2010). ....	30
<b>Figura 7.</b> Distribución gráfica de las mediciones de pH (H <sub>2</sub> O) para los distintos años de muestreo. El blanco registró un valor de 6,8 unidades de pH.....	37
<b>Figura 8.</b> Distribución gráfica de las mediciones de conductividad eléctrica para los distintos años de muestreo. La CE del blanco fue de 0,00 mS/cm. ....	38
<b>Figura 9.</b> Línea base de Aluminio 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de Al normalizado-2021. ....	44
<b>Figura 10.</b> Línea base de Arsénico 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de As normalizado-2021. ....	46
<b>Figura 11.</b> Línea base de Cadmio 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de Cd normalizado-2021. ....	47
<b>Figura 12.</b> Línea base de Cerio 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de Ce normalizado-2021. ....	49
<b>Figura 13.</b> Línea base de Cesio 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de Cs normalizado-2021. ....	50
<b>Figura 14.</b> Línea base de Cobalto 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de Co normalizado-2021. ....	52

<b>Figura 15.</b> Línea base de Cobre 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de Cu normalizado-2021. ....	54
<b>Figura 16.</b> Línea base de Cromo 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de Cr normalizado-2021. ....	55
<b>Figura 17.</b> Línea base de Disprosio 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de Dy normalizado-2021. ....	56
<b>Figura 18.</b> Línea base de Erblio 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de Er normalizado-2021. ....	58
<b>Figura 19.</b> Línea base de Escandio 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de Sc normalizado-2021. ....	59
<b>Figura 20.</b> Línea base de Gadolinio 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de Gd normalizado-2021. ....	61
<b>Figura 21.</b> Línea base de Iterbio 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de Yb normalizado-2021. ....	63
<b>Figura 22.</b> Línea base de Itrio 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de Y normalizado-2021. ....	64
<b>Figura 23.</b> Línea base de Lantano 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de La normalizado-2021. ....	66
<b>Figura 24.</b> Línea base de Magnesio 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de Mg normalizado-2021. ....	67
<b>Figura 25.</b> Línea base de Manganeso 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de Mn normalizado-2021. ....	69
<b>Figura 26.</b> Línea base de Neodimio 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de Nd normalizado-2021. ....	70
<b>Figura 27.</b> Línea base de Níquel Ni 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de Ni normalizado-2021. ....	72
<b>Figura 28.</b> Línea base de Plomo 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de Pb normalizado-2021. ....	74

<b>Figura 29.</b> Línea base de Praseodimio 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de Pr normalizado-2021. ....	76
<b>Figura 30.</b> Línea base de Samario 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de Sm normalizado-2021. ....	77
<b>Figura 31.</b> Línea base de Zinc 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de Zn normalizado-2021. ....	79
<b>Figura 32.</b> Índice de geoacumulación (Igeo) obtenido para los elementos de las muestras 2020.....	80
<b>Figura 33.</b> Índice de geoacumulación (Igeo) obtenido para los elementos de las muestras 2021.....	81
<b>Figura 34.</b> Grado de contaminación (mCd) obtenido para los distintos sitios muestreados, tanto para el año 2020 como 2021. ....	82

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Límite de cuantificación de elementos que presentan valores < LC menores al 70%. .....	25
<b>Tabla 2.</b> Criterios establecidos para la calidad de suelos en Canadá. ....	35
<b>Tabla 3.</b> Criterios establecidos para la calidad de suelos en Holanda.....	36
<b>Tabla 4.</b> Resumen estadístico del box-plot para Mg, Al, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Cs y Pb. ....	40
<b>Tabla 5.</b> Resumen estadístico del box-plot para Sc, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd, Dy, Er e Yb.....	41
<b>Tabla 6.</b> Background obtenido para el área analizada.....	42

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

**BS:** Bigote Superior

**CE:** Conductividad eléctrica

**ICP-MS:** Inductively coupled plasma mass spectrometry (Espectrometría de Masa con Plasma Acoplado Inductivamente)

**I<sub>geo</sub>:** Índice de Geoacumulación

**ilr:** isometric log-ratio

**LB:** Línea Base

**LI:** Límite inferior

**LS:** Límite Superior

**mCd:** Grado de Contaminación

**Me:** Mediana

**MO:** Materia Orgánica

**PHEs:** Elementos potencialmente dañinos

**QGIS:** Quantum GIS (software SIG)

**r:** Radio Iónico

**r<sub>H</sub>:** Radio Hidratado

**RIC:** Rango Intercuartílico

**RSEIA:** Reglamento del Sistema de Evaluación de impacto Ambiental

**SERNAGEOMIN:** Servicio Nacional de Geología y Minería

**VI:** Valor de Intervención

**VO:** Valor Objetivo

**% CVR:** Coeficiente de Variación Robusto



## RESUMEN

El presente estudio de Geoquímica Ambiental de Suelos Urbanos se llevó a cabo en cuatro comunas del centro de la Región Metropolitana; Providencia, Ñuñoa, Recoleta y Santiago Centro. Se colectaron un total de 90 muestras en los meses de enero-febrero de 2020 y noviembre-diciembre de 2021 con el fin de caracterizar químicamente los suelos, establecer una comparación entre ambos años de estudio y así evaluar el impacto de la contaminación desde las diversas fuentes asociadas a los acontecimientos ocurridos entre octubre-diciembre 2019 y otras fuentes pre-existentes. El total de elementos analizados y validados fueron 23 (Al, As, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Dy, Er, Gd, La, Mg, Mn, Nd, Ni, Pb, Pr, Sc, Sm, Y, Yb y Zn), los cuales fueron medidos mediante Espectrometría de Masa con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS) en la Comisión Chilena de Energía Nuclear. La metodología aplicada consistió en la toma de muestras, determinación de los parámetros físico-químicos pH y conductividad eléctrica (CE), cuantificación de los elementos mediante ICP-MS (previa digestión ácida) lo cual permitió la elaboración de una línea base que consideró las siguientes etapas: i) tratamiento estadístico (validación de datos, construcción de box-plots identificando muestras “outliers” y determinación de background) y ii) distribución espacial mediante la metodología de interpolación *Multilevel b-spline interpolation* utilizando el Sistema de Información Geográfico de software libre, QGIS. A partir de estos resultados se realizó un análisis de fuentes de acuerdo con antecedentes bibliográficos y conforme a la distribución de las concentraciones de las variables analizadas, según criterios geográficos y clima. Los resultados principales indican que tanto los parámetros físicoquímicos, como las

concentraciones elementales e indicadores de contaminantes ( $I_{\text{geo}}$  y  $m\text{Cd}$ ) son consistentes con una mayor intervención antrópica referida al año 2020. La CE de las muestras 2020 fue considerablemente mayor que las correspondientes al año 2021, lo que posiblemente pudo estar asociado a la utilización de gas lacrimógeno en el contexto de Estallido Social, dado que éstos se encuentran compuestos por una serie de sales que contribuirían a un incremento de la CE. De acuerdo con las líneas base elaboradas y analizadas, es posible concluir que en prácticamente el 100% de los elementos analizados se observó una disminución, en mayor o menor medida el año 2021. Las variaciones observadas de los elementos potencialmente dañinos (PHEs) desde el año 2020 al 2021 fueron principalmente disminuciones; 65,4%, 5,8%, 41,9%, 12,9%, 25,7%, 49%, 26,6% para As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn, respectivamente. De acuerdo con la comparación de las concentraciones obtenidas para los PHEs correspondientes a los años 2020 y 2021, se concluye que el 100% de los elementos sobrepasa por lo menos alguno de los parámetros descritos por las normas canadiense y holandesa, referidos al uso de suelo o al estado del suelo, asociados a una condición sostenible del suelo y a una en donde las propiedades funcionales del suelo para humanos, plantas y animales se encontrarían seriamente deterioradas.

## ABSTRACT

The present study of Environmental Geochemistry of Urban Soils was carried out in four communes in the center of the Metropolitan Region: Providencia, Ñuñoa, Recoleta and Santiago Centro. A total of 90 samples were collected in the months of January-February 2020 and November-December 2021 in order to chemically characterize the soils, establish a comparison between the two study years and thus assess the impact of contamination from the various sources associated with the events that occurred between October-December 2019 and other pre-existing sources. The total number of elements analyzed and validated were 23 (Al, As, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Dy, Er, Gd, La, Mg, Mn, Nd, Ni, Pb, Pr, Sc, Sm, Y, Yb and Zn), which were measured by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS) at the Chilean Nuclear Energy Commission. The methodology applied consisted of sample collection, determination of the physicochemical parameters pH and electrical conductivity (EC), quantification of the elements by ICP-MS (after acid digestion), which allowed the development of a baseline that considered the following stages: i) statistical treatment (data validation, construction of box-plots identifying "outliers" samples and determination of background) and ii) spatial distribution by means of the Multilevel b-spline interpolation methodology using the free software Geographic Information System, QGIS. Based on these results, a source analysis was carried out according to bibliographic background and according to the distribution of the concentrations of the variables analyzed, according to geographic and climatic criteria. The main results indicate that both the physical-chemical parameters and the elemental concentrations and pollutant indicators ( $I_{geo}$  and mCd) are consistent with a

greater anthropic intervention referred to the year 2020. The EC of the 2020 samples was considerably higher than those corresponding to the year 2021, which could possibly be associated with the use of tear gas in the context of Social Outbreak, since these are composed of a series of salts that would contribute to an increase in the EC. According to the baselines prepared and analyzed, it is possible to conclude that in practically 100% of the elements analyzed a decrease was observed to a greater or lesser extent in the year 2021. The observed variations of potentially harmful elements (PHEs) from 2020 to 2021 were mainly decreases; 65.4%, 5.8%, 41.9%, 12.9%, 25.7%, 49%, 26.6% for As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn, respectively. According to the comparison of the concentrations obtained for the PHEs corresponding to the years 2020 and 2021, it is concluded that 100% of the elements exceed at least one of the parameters described by the Canadian and Dutch standards, referring to land use or soil condition, associated to a sustainable soil condition and one in which the functional properties of the soil for humans, plants and animals would be seriously deteriorated.

## **I. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. ANTECEDENTES GENERALES Y FUNDAMENTACIÓN DE LA PROBLEMÁTICA**

Según un catastro de estudios de geoquímica ambiental de suelos y sedimentos del Colegio de Geólogos Chile (Tapia et al., 2015), es posible detectar un déficit importante en la caracterización de suelos urbanos, dado que los estudios realizados sobre geoquímica ambiental se centran principalmente en zonas rurales/peri-rurales.

En Chile, los primeros avances dirigidos hacia la generación de líneas base de geoquímica ambiental, están relacionados principalmente con los sedimentos activos de las principales cuencas fluviales del país (Aliaga, 2016), las que se han desarrollado de manera sistemática al norte de los 47°S, en el marco del Plan Nacional de Geología (PNG), implementado el año 2011, del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). De este modo, las líneas base generadas harían referencia a sedimentos activos y no necesariamente a suelos.

De acuerdo con lo anterior, y dado el antecedente de que el suelo es un recurso natural no renovable, pues su pérdida no es recuperable a una escala de tiempo humana; la formación de un centímetro de suelo desde el material parental puede tardar cientos de miles de años, sin embargo, este centímetro de suelo puede desaparecer en un año a través de la erosión (FAO, 2022), surge la necesidad de elaborar líneas base de suelos que nos permitan conocer el estado del mismo y tener las directrices que posibiliten la toma de decisiones respecto a ello.

Por otra parte, a nivel normativo, Chile actualmente no posee criterios definidos para la calidad de suelos que establezcan las concentraciones límite para elementos potencialmente contaminantes. En este contexto, surge la necesidad de caracterizar geoquímicamente aquellos suelos presentes en zonas urbanas del territorio nacional para así tener un conocimiento más acabado sobre aquellos elementos químicos que potencialmente pueden impactar negativamente en la funcionalidad de las distintas matrices ambientales, pudiendo incluso generar la degradación del medio circundante. Es importante enfatizar en que el conocimiento que se adquiere con esta información es necesario para prevenir cualquier problema asociado al corto, mediano y/o largo plazo (Aliaga, 2016), pues algunos metales y metaloides suponen riesgos potenciales en la naturaleza y en la sociedad dado que generan serios problemas en la salud humana y animal (Waisberg et al., 2003).

En concreto, estos estudios buscan contribuir al desarrollo y generación de una línea de base de la geoquímica urbana con el fin de lograr un mayor entendimiento de los procesos dinámicos que pueden producirse por fenómenos naturales o antrópicos.

### **1.1.1. Geoquímica**

El mapeo geoquímico comenzó a tomar mayor importancia e interés debido a que fueron considerados una componente valiosa del conocimiento básico que se debe tener de las geociencias en un país o territorio (Aliaga, 2016).

Históricamente, la geoquímica ha sido utilizada como herramienta en geología económica, en donde permite determinar la presencia de un yacimiento mineral (correspondiente a

anomalías geoquímicas), procesos de contaminación por elementos traza metálicos de tipo natural o derivados de su explotación minera.

De allí se desprende el término de geoquímica ambiental, una nueva rama de la geoquímica que tiene sus orígenes alrededor de los años 60 debido al rápido agravamiento de los problemas ambientales (Oyarzun et al., 2010). Su campo de estudio abarca las interacciones químicas, a menudo complejas, entre la litósfera, hidrósfera, atmósfera y biósfera, especialmente las que conducen a la degradación del ambiente causadas por la acción del ser humano. En consecuencia, incluye el estudio de los numerosos factores que condicionan la fuente, distribución, dispersión, concentración y tiempo de residencia de los elementos y compuestos químicos en los sistemas del ciclo biogeoquímico. Está evidentemente vinculada con la salud humana, animal y vegetal, y su tarea es por naturaleza multidisciplinaria (Oyarzun et al., 2010).

Uno de los aspectos más importantes en geoquímica ambiental es el relacionado con la determinación del grado y extensión de la contaminación. Durante décadas los métodos de prospección geoquímica se utilizaron para detectar yacimientos minerales. Hoy, paradójicamente, estos mismos métodos se empiezan a usar para determinar el alcance de la contaminación inducida por la actividad minera relacionada con esos mismos yacimientos minerales (Oyarzun et al., 2010).

Los datos geoquímicos convencionales se pueden agrupar en tres categorías; elementos mayores ( $> 1,0\%$  en peso), en trazas ( $< 0,1\%$  en peso) e isótopos (radiogénicos y estables). Los elementos mayores son aquellos elementos químicos que predominan en cualquier

tipo de roca, aquellos son el Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, K y P y sus concentraciones se expresan como tanto por ciento (%) en masa del óxido correspondiente (Rollinson, 1993). Cabe destacar el hecho particular de que algunos elementos se comportan como elementos mayores en algunos grupos de rocas y como elementos traza en otros grupos. Por esto, el término geoquímica urbana es un tanto más complejo de determinar con respecto a la geoquímica ambiental de sectores rurales, pues los sectores urbanos son centros de población concentrados en un entorno construido, a menudo con infraestructura compleja y/o intensas actividades humanas (T. Long & Berry Lyons, 2021).

El concepto de geoquímica ambiental urbana ha sido introducido para describir las actividades de investigación en la interfaz de la geoquímica ambiental y la contaminación urbana (Thornton, 1993; 2012), estudiando las interacciones complejas y relaciones entre los elementos químicos y sus compuestos en el entorno urbano, la influencia de las actividades humanas e industriales a lo largo del tiempo, y los impactos o efectos de los parámetros geoquímicos en áreas urbanas sobre plantas, animales y salud humana (Thornton, 1993; 2012, Vega et al., 2022), como también las fuentes, el transporte, las transformaciones y el destino de los constituyentes químicos en ambientes superficiales, y además, los cambios en los ciclos biogeoquímicos como resultado de la introducción del entorno construido y las actividades humanas asociadas. En otras palabras, la geoquímica urbana forma parte del dominio de la ciencia ambiental que trabaja ampliamente para comprender la influencia de las actividades humanas en los sistemas de la Tierra y el impacto posterior en el ecosistema, incluyendo la salud humana (T. Long & Berry Lyons,



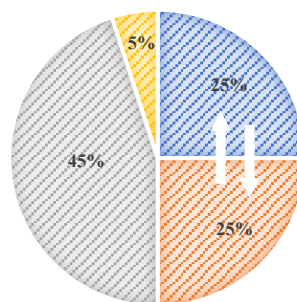
2021), siendo crucial, junto a la calidad de los entornos urbanos, para la sostenibilidad de estas zonas (Vega et al., 2022).

### 1.1.2. Suelos

Suelo se define como un cuerpo natural dinámico compuesto, en diferentes proporciones, de sólidos minerales y orgánicos, gases, agua y organismos vivos (figura 1) que pueden servir como medio para el crecimiento de las plantas (Brady & Weil, 2013). También es considerado como la colección de cuerpos naturales que ocupan partes de la superficie de la Tierra que es capaz de soportar el crecimiento de las plantas y que tiene propiedades resultantes de los efectos integrados del clima y los organismos vivos que actúan sobre el material de origen, condicionados por la topografía, durante períodos de tiempo (Brady & Weil, 2013).

**COMPONENTES DEL SUELO**

■ Agua ■ Aire ■ Material mineral ■ Materia orgánica



**Figura 1.** Composición por volumen de un suelo en buen estado para el crecimiento vegetal. Modificado de Tarbuck & Lutgens, 2004.

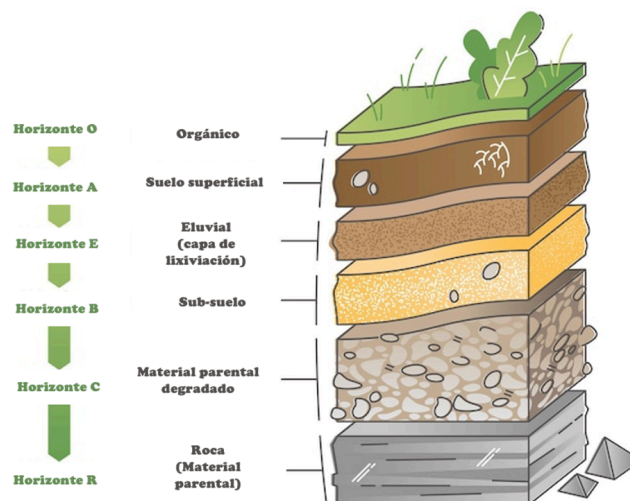
La química de los suelos urbanos modernos se ha vuelto más compleja y complicada como resultado de décadas e incluso siglos de contribuciones de varias fuentes previamente no reconocidas, como la oxidación de pinturas que cubren las paredes exteriores de los edificios, la rotura de tuberías de alcantarillado subterráneas, el uso de herbicidas a lo largo de las carreteras públicas y en jardines privados y el desgaste mecánico de las piezas de automóviles (neumáticos, frenos, correas de motor, silenciadores, etc.) que contienen altos niveles de elementos tóxicos. Estos elementos, introducidos en los suelos urbanos a partir de la deposición atmosférica de polvos (derivados tanto de procesos industriales como de la combustión de combustibles fósiles), representan una gran preocupación para la salud humana (Cicchella et al., 2016; Filippelli et al., 2012; Giaccio et al., 2012) debido a que el suelo es una vía esencial de exposición humana a los contaminantes, ya sea por interacciones directas (ingestión, contacto dérmico e inhalación) o indirectas (transferencia del suelo al aire, al agua o a la cadena alimentaria) (Vega et al., 2022). Es por esta razón que la contaminación de los suelos puede ser un indicador de la exposición humana a los metales (Wong et al., 2006).

Los suelos urbanos se caracterizan principalmente por una fuerte variabilidad espacial lateral en la composición y estructura debido a la mezcla de polvo y escombros durante las actividades de construcción, la compactación y los fenómenos de contaminación relacionados con la presencia de asentamientos industriales, la movilidad humana y el tiempo-eventos limitados (eliminación de residuos, mal funcionamiento del curso de agua, etc.). Esencialmente, los suelos urbanos no tienen la estratificación vertical típica asociada

con los suelos desarrollados naturalmente (figura 2). En el corto período de formación de un área urbana, los procesos pedogenéticos no juegan un papel fundamental en el desarrollo del suelo urbano, y la sección del suelo es mucho más dependiente, por ejemplo, de la acumulación local de materiales de construcción, restos de excavación o la presencia de infraestructuras subterráneas (De Vivo et al., 2018).

Como resultado de estos factores, la planificación de las actividades de muestreo de suelos en las zonas urbanas es más exigente, ya que se necesita un muestreo de alta densidad para definir un marco adecuado del estado medioambiental, la dificultad de identificar los espacios físicos en los que el muestreo es posible o está permitido (Demetriades & Birke, 2015).

Los suelos urbanos pueden contener varios contaminantes: fertilizantes (o plaguicidas procedentes de suelos cultivados traídos del campo para rellenar macizos de flores o utilizados en parques y jardines públicos); elementos traza metálicos depositados en la superficie del suelo por emisiones de vehículos de motor, procesos industriales, residuos orgánicos, etc. (De Vivo et al., 2018).



**Figura 2.** Esquematización simplificada de la estratificación vertical típica asociada con los suelos desarrollados naturalmente. Modificado de Lifeder, 2021.

### 1.1.2.1. Normativa internacional de suelos

Actualmente, Chile no posee una normativa relacionada a la calidad de suelos que permita establecer los criterios aceptados para los distintos elementos y compuestos químicos de forma que pueda establecerse si es adecuado o no para un determinado uso de suelo, sin que represente un riesgo para la salud de las personas y/o la calidad del medio ambiente. Por esta razón es que no se puede hablar -en términos legales- del concepto “contaminación” de suelos, pues según la Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente (LBGMA) N° 19300, para poder hacer referencia al término contaminación, debe existir una norma la cual establezca los niveles máximos para los distintos componentes ambientales, y dada la ausencia de alguna normativa para suelos en nuestro país, cuando se evidencia altos niveles de, en este caso metal(oid)es, en términos legales es más

adecuado hablar de enriquecimiento y no de contaminación, pues según la ley, el término implica mucho más.

No obstante, de acuerdo con lo descrito en el artículo N° 11 del Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (RSEIA), el cual establece que “las normas de calidad ambiental y de emisión que se utilizarán como referencia para los efectos de evaluar si se genera o presenta el riesgo indicado en la letra a) y los efectos adversos señalados en la letra b), ambas del artículo 11 de la Ley 19300, serán aquellas vigentes en los siguientes Estados: República Federal de Alemania, República Argentina, Australia, República Federativa del Brasil, Canadá, Reino de España, Estados Unidos Mexicanos, Estado Unidos de América, Nueva Zelandia, Reino de los Países Bajos, República Italiana, Japón, Reino de Suecia y Confederación Suiza. Para la utilización de las normas de referencia, se priorizará aquel Estado que posea similitud en sus componentes ambientales, con la situación nacional y/o local, lo que será justificado razonablemente por el proponente. Cuando el proponente señale las normas de referencia extranjeras que utiliza deberá acompañar un ejemplar íntegro y vigente de dicha norma” (MINSEGPRES, 1994), es posible utilizar los límites máximos de los distintos países que allí se mencionan (dependiendo del uso y tipo de suelo) para comparar o poder guiarse, para tener una noción del efecto que podrían estar provocando ciertas concentraciones de un elemento tanto al medio ambiente como a las personas que se encuentran expuestas a dichos niveles.

### 1.1.3. Elementos traza metálicos

Los elementos traza metálicos o metal(oid)es se pueden encontrar en el suelo tanto de forma natural, es decir, procedentes del material parental, o bien, ser incorporados al mismo de forma antropogénica. El tipo de roca madre que ha generado el suelo, determinará directamente la cantidad de elementos traza metálicos existentes de forma natural (García et al.,2002).

Químicamente, los elementos traza metálicos se definen como aquellos elementos metálicos cuyo peso específico es mayor a  $5 \text{ g/m}^3$  o con un número atómico superior a 20 (García et al., 2002), excepto los metales alcalinos y alcalinos térreos. Una definición más práctica de este concepto sería la de clasificar como tales aquellos que por sus efectos tóxicos y persistencia, son considerados como contaminantes ambientales (García et al., 2002). Aunque generalmente son adsorbidos por los coloides del suelo, los metal(oid)es pueden entrar en el ciclo biológico a través de procesos de absorción por plantas, cuyo efecto depende de la naturaleza del suelo y las condiciones del entorno (humedad, temperatura y pH) (De Vivo et al., 2018).

Los elementos potencialmente dañinos (PHEs), principalmente As, Pb, Zn, Ni, Hg, Cu, Cd y Cr, pueden ser introducidos en el ambiente urbano por un número de agentes diferentes, por ejemplo, actividades domésticas, calefacción residencial, incineradores, plantas de energía eléctrica, calderas industriales, vehículos a gasolina y diésel, fábricas, esparcimiento de fertilizantes y anticriptógamas (plantas que contienen semillas) en suelos de zonas residenciales (Qu et al., 2016). La concentración de estos elementos

generalmente disminuye en suelos urbanos alejados de la red de carreteras principal y con mayor profundidad de muestreo debido a las actividades y fuentes antropogénicas que los emiten (De Vivo et al., 2018).

## **1.2. CONCEPTOS RELEVANTES**

### **1.2.1. Background geoquímico**

Según Hawkes & Webb (1963), background geoquímico se define como “la abundancia normal de un elemento en material terrestre estéril”, donde es más adecuado y realista entender background como un rango de valores en lugar de un valor absoluto. Este concepto fue introducido para diferenciar entre concentraciones elementales normales y anomalías (Hawkes & Webb, 1963).

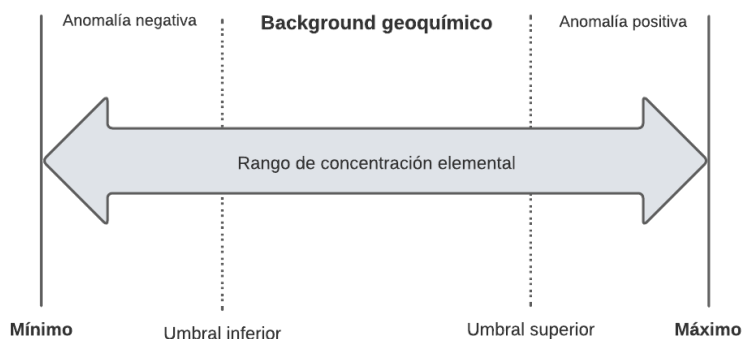
Es muy complejo determinar el valor background de un elemento en un suelo urbano, ya que la naturaleza de la contaminación es difusa, pues depende estrechamente tanto de los procesos de precipitación como de la movilidad de las fuentes a lo largo de la red de carreteras, sumado al hecho de que al interior de las grandes urbes también existen fuentes industriales fijas (como industrias; textil, alimentaria, manufacturera, entre otras, incineradores, etc.), lo que hace prácticamente imposible encontrar lugares que puedan considerarse completamente no contaminados.

Hay dos posibles vías para la determinación de los valores de referencia; la primera es caracterizar las muestras de suelo recogidas en lugares supuestamente no contaminados y alejados de la zona urbana que sean de la misma naturaleza pedogénica y geológica que los suelos urbanos y la segunda es, considerada especialmente si la estratificación original

del suelo no ha sido alterada por las actividades humanas; definir el background caracterizando las muestras de suelo recogidas a cierta profundidad de la superficie, ya que la contaminación de los suelos urbanos se encuentra principalmente en la capa más superficial, siendo el horizonte C el más adecuado para este fin (De Vivo et al., 2018).

### 1.2.2. Anomalía geoquímica

Por definición, una anomalía es una desviación de la norma y por consiguiente, una **anomalía geoquímica**, es una partida de los patrones geoquímicos que son normales para un área o terreno geoquímico (Hawkes & Webb, 1963). Para diferenciar un background de una anomalía se introdujo el término de umbral. El **umbral** es el límite, superior o inferior, de las variaciones normales del background (Gałuszka et al., 2014). La representación de los conceptos anteriormente mencionados puede visualizarse en la siguiente figura.



**Figura 3.** Esquematización del Background geoquímico. Modificado de Gałuszka et al. (2014).



El término background natural se usa mayoritariamente para inferir niveles background que reflejan procesos naturales no influenciados por las actividades humanas.

### **1.2.3. Línea base geoquímica**

El término **línea base geoquímica** es utilizado ampliamente en las regulaciones medioambientales y hace referencia a la variación natural en la concentración de un elemento en el ambiente superficial. Además, indica el contenido actual de un elemento en un punto dado del tiempo (“fotografía del momento”), considerando el background natural y la difusa contribución antropogénica en los suelos (Tarvainen & Kallio, 2002).

## **1.3. ÁREA DE ESTUDIO**

El área de estudio está localizada en la zona centro-norte de la Región Metropolitana con una superficie aproximada de 8,8 Km<sup>2</sup>, abarcando parte de las comunas de Santiago, Providencia, Ñuñoa y Recoleta. Las muestras fueron tomadas en espacios abiertos, correspondientes a parques, plazoletas, tazas de árboles, veredas, entre otros, en donde se trabajó con suelos foráneos, es decir, no fueron formados *in situ*, esto debido al constante transporte de suelos utilizados para la creación de jardines, heroseo de lugares de recreación y distensión, limpieza y mantención, entre otros (comunicación verbal con responsable del Departamento de Medio Ambiente de la Municipalidad de Providencia y Ñuñoa).

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. General**

Elaborar y comparar líneas de base geoquímicas de suelos urbanos correspondientes a los años 2020 y 2021 de un área de estudio que abarca parte de las comunas de Santiago, Providencia, Ñuñoa y Recoleta.

### **1.4.2. Específicos**

- » Determinar y comparar parámetros fisicoquímicos (pH y Conductividad Eléctrica) correspondientes a las muestras 2020 y 2021.
- » Conocer y comparar los contenidos de elementos químicos Mg, Al, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Cs, Pb, Sc, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu en suelos urbanos de Santiago entre los años 2020 y 2021, a través de su medición mediante plasma acoplado inductivamente con detector de masa (ICP-MS).
- » Elaborar y construir mapas de distribución espacial de las concentraciones de los elementos mencionados en el objetivo específico 2 para los períodos 2020 y 2021.
- » Determinar índices de contaminación  $I_{geo}$  y mCd.
- » Comparar los resultados obtenidos con normativa internacional de metal(oid)es para suelos urbanos.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. MUESTREO Y TRABAJO EN TERRENO

Previo a la determinación de los parámetros fisicoquímicos y análisis en el ICP-MS, se realizó un trabajo en terreno basado en el protocolo de muestreo del Atlas Geoquímico Europeo (Salminen et al., 1998) para zonas urbanas (mayor densidad de muestreo).

Los suelos muestreados corresponden a suelos foráneos, es decir, suelos que no fueron formados *in situ*. La mayoría de estos suelos provienen tanto del norte como del sur de Santiago, específicamente de Til Til y Puente Alto, respectivamente (comunicación verbal con responsable del Departamento de Medio Ambiente de la Municipalidad de Providencia y Ñuñoa).

#### 2.1.1. Grillado y colecta de muestras

Reimann et al. (2008) propone una grilla de muestreo de 0,5 x 0,5 km<sup>2</sup> para zonas urbanas. Para efectos del estudio se utilizó una grilla con esas dimensiones, la cual se define en la campaña de terreno realizada en enero-febrero del año 2020. La misma grilla de muestreo fue utilizada en el trabajo de terreno realizado en noviembre-diciembre del 2021 (figura 4).



**Figura 4.** Distribución de muestras en el área de estudio de acuerdo con lo descrito por Reimann et al. (2008) para muestreo de zonas urbanas.

A continuación, se describe el procedimiento de colección de muestras, según el diseño muestral tipo grilla:

- » Para la toma de muestras se utilizó la grilla de muestreo mencionada anteriormente, la cual contaba con un archivo *KMZ* (Keyhole Markup Zipped) en donde se encontraban las coordenadas de cada muestra. Para poder ubicarse en el punto específico de la grilla de muestreo se utilizó la aplicación *GPS Essentials* y *GPS* (*GPSmap 62s*).

- » Luego de llegar al lugar de muestreo, se procedió a determinar si el punto exacto era un lugar apto para la toma de muestras, evitando aquellos suelos expuestos a una excesiva intervención antrópica como podría ser un estacionamiento, bencinera, calle o algún sendero en donde haya un tránsito constante de peatones. Para ello fue de gran importancia la información recopilada del terreno 2020, en donde se especificaba el lugar de muestreo de ese entonces y así poder lograr un re-muestreo más preciso.
- » Luego, determinado el lugar de toma de muestra, se sacó fotografías al entorno y se complementó con anotaciones sobre instalaciones o eventos cercanos al punto de muestreo.
- » Se caracterizó el punto de muestreo según parámetros de color, textura (al tacto), presencia de clastos/lítico, humedad (cualitativo), presencia de materia orgánica y de objetos de procedencia antrópica.
- » Posteriormente, para la toma de muestras propiamente tal, se procedió a ambientar la pala plástica con la que se tomaría la muestra (a unos cm del punto de muestreo) con el fin de intervenir lo menos posible con la toma de muestra.
- » Ambientada la pala, se retiró (si es que había) la materia orgánica de mayor tamaño como hojas o ramas de la superficie para extraer los primeros cm de suelo (0-5 cm).
- » Las muestras fueron almacenadas en bolsas de polipropileno, las cuales fueron rotuladas.

- » Éstas fueron guardadas a temperatura ambiente en un laboratorio de Química Orgánica y Ambiental de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile.

## **2.2. ANÁLISIS DE LABORATORIO**

### **2.2.1. Preparación de muestras para la determinación de parámetros fisicoquímicos**

La determinación de parámetros fisicoquímicos como el potencial de hidrógeno (pH) y la conductividad eléctrica (CE), requieren de una granulometría específica ( $< 2\text{ mm}$ ), debido a que los constituyentes mineralógicos del suelo, los cuales definen las clases texturales de éstos, se clasifican según la siguiente granulometría: arena ( $< 2\text{ mm} - 0,005\text{ mm}$ ), limo ( $0,005 - 0,002\text{ mm}$ ) y arcilla ( $< 2\text{ mm}$ ). De este modo, al tamizar con malla 10 ( $2\text{ mm}$ ), se asegura de que lo obtenido es suelo, eliminando del análisis todo el material tipo grava ( $> 2\text{ mm}$ ).

De manera análoga, se determinó de forma cualitativa la textura de muestras aleatorias de acuerdo a la metodología definida por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, FAO (FAO, n.d.).

#### **2.2.1.1. Tamizado**

A continuación, se describe la metodología realizada para el tamizado de las muestras (Sadzawka et al., 2006):

- » Las 90 muestras de suelo se dejaron secar a temperatura ambiente en bandejas plásticas.

- » Posteriormente se tamizó cada muestra con un tamiz U.S.A. STANDARD SIEVE, SIEVE NO 10, 2,0  $\mu\text{m}$ , HUMBOLDT MFG. CO. NORRIDGE, IL 60706, durante 5 minutos.
- » Las muestras tamizadas se almacenaron en frascos plásticos para su posterior análisis.

Nota: Para llevar a cabo la digestión ácida de las muestras fue necesario tamizar las muestras a 63  $\mu\text{m}$ .

### **2.2.2. Determinación de pH y CE**

El pH del suelo se puede medir en distintas soluciones, ya sea en agua, KCl o  $\text{CaCl}_2$  dependiendo del tipo de análisis y suelo que se desee analizar. En este caso las mediciones se realizaron en agua desionizada y la relación de la solución suelo:agua fue de 1:2,5. A continuación se detalla la metodología utilizada para la determinación de pH y CE (Sadzawka et al., 2006).

- » Se agregó 20 g de suelo tamizado ( $< 2 \text{ mm}$ ) en frascos de plásticos previamente tarados y rotulados.
- » Posteriormente se agregó 50 mL de agua desionizada (grado milliQ) a cada frasco y se preparó un blanco el cual contenía solo los 50 mL de agua desionizada.
- » Se colocaron los frascos que contenían las soluciones suelo (1:2,5) de las distintas muestras en el agitador orbital durante 2 horas (170 rpm) junto con el blanco.
- » Luego de las 2 horas, se retiraron las muestras y el blanco del agitador y se agitaron enérgicamente de forma manual para luego dejar sedimentar durante algunos minutos.

- » Con el pH-metro HANNA HI9813 se midió el pH y conductividad eléctrica del blanco, dejando ambientar el electrodo por al menos 2 minutos.
- » Luego de la ambientación del electrodo en el blanco, se procedió a medir el pH y conductividad eléctrica de cada muestra. Entre la medición de muestra y muestra, se lavó el electrodo con agua destilada y secó con papel adsorbente.
- » Finalmente, luego de medir los 2 parámetros mencionados anteriormente a cada muestra, se volvió a medir éstos en el blanco.

### 2.2.3. Digestión ácida

Para el proceso de digestión se utilizó un microondas para digestión modelo MARS 5X, donde fue posible realizar la digestión de 14 tubos en simultáneo, en los cuales estaban contemplados el material de referencia (*NIST 2710a Montana Soil I*), el blanco y 12 muestras de suelo. El detalle de la metodología realizada se presenta a continuación.

- » En primer lugar, se masó 0,5 g de muestra en papel de pesaje o navecilla.
- » Luego se trasvasijó a tubos de teflón. Se anotó el peso real de la muestra que ingresa al tubo según la siguiente fórmula:

$$\text{masa real muestra} = a - b \quad (1)$$

**Ecuación 1.** Cálculo de la masa real de la muestra, en donde “a” corresponde a la masa de la muestra en el papel de pesaje o navecilla y “b” corresponde a la masa del papel de pesaje/navecilla luego de haber agregado la muestra al tubo de teflón.

- » Posteriormente se agregó 8 mL de ácido nítrico (65%) y 2 mL de ácido fluorhídrico (48%), ambos de calidad suprapur (Merck).



- » En una siguiente etapa se llevó a cabo la pre-digestión para la cual fue necesario dejar los tubos destapados, con muestra y reactivos, por 20 minutos bajo campana.
- » Luego de la predigestión se tapó cada tubo y acomodó cada soporte (con el tubo en su interior) en el plato giratorio del equipo digestor. En el soporte de control se encontraban introducidos los sensores de temperatura y presión.
- » Verificar el método a utilizar en el microondas de digestión: *ICP SEDI-HP500* (ANEXO 1A).
- » Transcurrido el tiempo de digestión (considerando el tiempo de enfriamiento), se abrió la puerta del microondas de digestión, se desconectó ambos sensores, se sacó el plato giratorio con mucho cuidado y se llevó bajo campana.
- » Bajo campana, cuidadosamente se procedió a abrir cada soporte (con una llave de torque) y posteriormente cada tubo, abriendo lentamente una tuerca que sirve como ventilación para eliminar los gases generados durante el proceso de digestión. Luego de esto, se abrió completamente el tubo retirando la tapa.
- » Luego se agregó el contenido del vaso en el papel filtro (Whatman, 41, ashless, diámetro 110 mm) previamente instalado en un embudo con papel filtro, de tal forma que la muestra fuera recibida en el matraz de aforo de 20 mL.
- » Transcurrido el filtrado, se retiró el matraz, aforó hasta los 20 mL con agua desionizada, luego se tapó, homogeneizó y transfirió el contenido del matraz a un vial previamente rotulado.

- » Se guardaron los viales rotulados con las muestras en el refrigerador hasta su posterior análisis en el ICP-MS.

#### **2.2.4. Análisis ICP-MS (Agilent 7500A)**

Las muestras previamente digeridas fueron diluidas para poder ser analizadas en el ICP-MS en factores de 4000 para tierras raras y/o elementos menores y 20000 para elementos mayores. Las soluciones fueron transferidas a viales previamente rotulados de los cuales fue posible extraer la alícuota necesaria para su posterior análisis.

La muestra, antes de ser analizada, debe cumplir con diversas características, entre las principales, la acidificación de la misma (para ello se realiza el proceso de digestión ácida), así como evitar sólidos disueltos en la misma, ya que los sólidos disueltos son un gran problema durante el análisis, por lo mismo se recomienda realizar diluciones para que sean evitados (Ríos-Lugo & Hernández-Mendoza, 2020).

La introducción de la muestra se lleva a cabo por medio de una bomba peristáltica con flujos mínimos estables de 0,3 a 1,2 mL/min, un nebulizador y una cámara de pulverización. También puede ser a través de partículas sólidas (aerosol), generadas por un sistema de ablación láser (Ríos-Lugo & Hernández-Mendoza, 2020).

El ICP-MS utiliza plasma de Argón (Ar) acoplado inductivamente como fuente de excitación para la ionización de los elementos contenidos en la muestra y un espectrómetro de masas (cuadrupolo o sector magnético) como analizadores, para separar y conducir selectivamente los iones (elementos ionizados previamente por el plasma) de una sola masa o varias masas de un mismo elemento o elementos diferentes, aplicándole una

carga (relación masa/carga;  $m/z$ ). En el proceso los iones experimentan temperaturas de 6500 K y en pocos ms a temperatura ambiente, todo esto en presión de 760 a  $10^{-6}$  torr. Posteriormente, los iones se transfieren de forma sistemática del plasma detector, en un campo electrostático altamente controlado dentro de un vacío que aumenta dinámicamente. El proceso es regulado por una computadora que controla todos los componentes del hardware, incluidos los periféricos involucrados en la introducción automatizada de muestras (auto-sampler), así como la adquisición, almacenamiento, visualización y procesamiento de datos (Ríos-Lugo & Hernández-Mendoza, 2020).

Por otro lado, a lo anterior se suma que el análisis por ICP-MS se caracteriza por ser un análisis multielemental, de gran precisión (sobre todo para elementos traza) y de medición rápida, razones por las cuales esta técnica fue utilizada.

El detalle de las condiciones requeridas para el funcionamiento del ICP-MS utilizado, ya sea en modo apagado, en espera y análisis se encuentra en el ANEXO 1B.

#### **2.2.4.1. Elementos analizados**

Los elementos medidos por el ICP-MS fueron los siguientes:  $^{24}\text{Mg}$ ,  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{53}\text{Cr}$ ,  $^{55}\text{Mn}$ ,  $^{59}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Ni}$ ,  $^{63}\text{Cu}$ ,  $^{66}\text{Zn}$ ,  $^{75}\text{As}$ ,  $^{111}\text{Cd}$ ,  $^{133}\text{Cs}$ ,  $^{208}\text{Pb}$ ,  $^{45}\text{Sc}$ ,  $^{89}\text{Y}$ ,  $^{139}\text{La}$ ,  $^{140}\text{Ce}$ ,  $^{141}\text{Pr}$ ,  $^{146}\text{Nd}$ ,  $^{147}\text{Sm}$ ,  $^{153}\text{Eu}$ ,  $^{157}\text{Gd}$ ,  $^{159}\text{Tb}$ ,  $^{163}\text{Dy}$ ,  $^{165}\text{Ho}$ ,  $^{166}\text{Er}$ ,  $^{169}\text{Tm}$ ,  $^{172}\text{Yb}$ ,  $^{175}\text{Lu}$ . La elección de estos elementos se basa en i) la necesidad de levantar la mayor cantidad de información posible (en este caso en forma de elementos) dada la importancia ambiental principalmente de los PHEs, y Mg y Al como elementos referenciales corticales, y ii) la factibilidad de medición de estos elementos por ICP-MS en la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN).

#### **2.2.4.1.1. Curva de calibración**

Se prepararon dos curvas de calibración por separado, que contenían los siguientes analitos:

- a) Mg, Al, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Cs, Pb.
- b) Sc, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu.

Cada una se preparó de la siguiente manera: a partir de soluciones estándar ICP de 1000 mgL<sup>-1</sup> de cada analito, se preparó una solución de 10 mgL<sup>-1</sup> (que contenía todos los analitos dependiendo si era curva a) o b), a partir de esta solución se preparó el primer punto de la curva de calibración correspondiente a 1000 µgL<sup>-1</sup> y de este punto se fueron tomando alícuotas para preparar todos los demás puntos de la curva, los cuales fueron: 0-1 – 10 - 50 - 100 - 250 - 500 - 750 y 1000 µgL<sup>-1</sup>.

El detalle de los límites de detección de los elementos analizados y su curva de calibración correspondiente al lote de muestras analizadas se encuentra en el ANEXO 2.

### **2.3.VALIDACIÓN BASE DE DATOS**

En primera instancia se procedió a realizar una validación de los datos de terreno de acuerdo con los resultados obtenidos de los análisis químicos de las muestras que presentaban duplicados (ANEXO 3A).

Posteriormente, luego de la correspondiente validación de los datos de terreno, se procedió a realizar la validación de los datos obtenidos comenzando con la eliminación de todas las variables que presentasen un porcentaje de muestras con valores bajo el límite de cuantificación (< LC) mayor a un 70%. De acuerdo con este criterio, del total de elementos

que presentaban una o más concentraciones  $< LC$  en algún sitio, se eliminaron un total de 5 elementos; Eu Tb, Ho, Tm y Lu, permaneciendo aquellos que se muestran en la tabla 1. Para aquellos elementos que poseen más del 30% de los datos con concentraciones por sobre el límite de cuantificación, pero con algunos datos bajo éste, el valor de los puntos bajo el límite de cuantificación es modificado por la mitad de este (Reimann et al., 2008). A modo de ejemplo, si el límite de cuantificación es igual a  $0,101 \frac{\mu\text{g}}{\text{mL}}$ , para aquellos puntos con concentraciones  $< LC$ , el valor a utilizar en dichos puntos es igual a  $0,0505 \frac{\mu\text{g}}{\text{mL}}$ . El detalle de las bases de datos validadas, correspondientes a los años 2020 y 2021 se encuentra en el ANEXO 3B y 3C.

**Tabla 1.** Límite de cuantificación de elementos que presentan valores  $< LC$  menores al 70%.

2020 (N = 36)				2021 (N = 48)			
Elemento	LC	N < LC	% < LC	Elemento	LC	N < LC	% < LC
Cd	$0,101 \frac{\mu\text{g}}{\text{mL}}$	8	22 %	Cd	$0,101 \frac{\mu\text{g}}{\text{mL}}$	11	20 %
Dy	$0,100 \frac{\mu\text{g}}{\text{mL}}$	3	8 %	Cs	$0,104 \frac{\mu\text{g}}{\text{mL}}$	8	15 %
Er	$0,100 \frac{\mu\text{g}}{\text{mL}}$	12	33 %	Pb	$0,100 \frac{\mu\text{g}}{\text{mL}}$	7	13 %
Yb	$0,100 \frac{\mu\text{g}}{\text{mL}}$	11	31 %	Pr	$0,100 \frac{\mu\text{g}}{\text{mL}}$	19	35 %
				Sm	$0,100 \frac{\mu\text{g}}{\text{mL}}$	21	39 %
				Gd	$0,100 \frac{\mu\text{g}}{\text{mL}}$	16	30 %
				Dy	$0,100 \frac{\mu\text{g}}{\text{mL}}$	32	59 %

Er	0,100 $\frac{\mu\text{g}}{\text{mL}}$	35	65 %
Yb	0,100 $\frac{\mu\text{g}}{\text{mL}}$	37	69 %

## **2.4. ELABORACIÓN DE LA LÍNEA BASE GEOQUÍMICA AMBIENTAL DE SUELOS**

La elaboración de la línea base de geoquímica ambiental de suelos del área de estudio, se basa en dos etapas, cada una de ellas asociadas a diferentes variables de análisis: i) el análisis estadístico de los datos con el fin de comprender cual es la tendencia esperada en la zona, mediana (Me), mínimos (MIN) y máximos (MÁX), así como los eventos anómalos y ii) la espacialización de la data, ya que el análisis geográfico y el comportamiento químico de ambientes supérgenos determina la dinámica de los contaminantes. La distribución de análisis multielementales también permite identificar patrones de distribución necesarios en identificación del origen de estos elementos.

### **2.4.1. Análisis del comportamiento y distribución de las concentraciones elementales analizadas**

En el caso de contar con datos químicos obtenidos de un espacio geográfico, se debe tener en cuenta dos tipos de distribuciones: la distribución estadística de los valores medidos y la distribución espacial de los datos en el área de estudio (Reimann et al., 2008). La primera se determina mediante el análisis exploratorio de los datos a través de variables que poseen un nivel de confianza razonable, determinado por estadígrafos básicos, dentro de los cuales se encuentran: cuartiles 1 y 3 (correspondientes al 25% y 75% de los datos,

respectivamente), valores mínimo y máximo, mediana ( $Q_2$ , correspondiente al 50% de los datos) y el coeficiente de variación robusto (%CVR). A partir de estos parámetros se realiza una búsqueda de valores outliers o anómalos. Y la segunda, en la cual, utilizando los resultados obtenidos en la distribución anterior y un software SIG, se pueden modelar y espacializar geográficamente las concentraciones de los elementos analizados. La distribución espacial permite establecer correlaciones entre las variables analizadas, las cuales pueden deberse al impacto de fuentes específicas presentes en el área de estudio.

#### **2.4.1.1. Box-plot, muestras “outliers” y background**

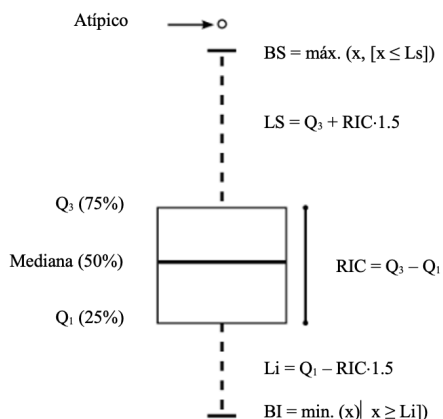
La detección y determinación de los datos anómalos es uno de los principales objetivos del análisis estadístico de datos geoquímicos. Ya que estos, desde el punto de vista ambiental, corresponden a eventos contaminantes extremos, que deben ser considerados. Por esta razón, se han generado diversos métodos (univariable y multivariable) para la determinación de estos valores tomando consideraciones de escala, distribución espacial y parámetros estadísticos (Reimann et al., 2005; 2008). Sin embargo, dada la importancia crítica que puedan poseer estos valores anómalos en la comprensión de un estudio geoquímico, es necesario utilizar un razonamiento caso a caso, además de la utilización de parámetros estadísticos o gráficos.

Según Reimann et al. (2008), la generación de una línea de base consiste en la determinación del rango de variación de las concentraciones elementales en el ambiente superficial. En general, los datos geoquímicos no presentan una distribución normal, por lo que se realizó el cálculo de parámetros estadísticos como el coeficiente de variación

robusto (% CVR) y el rango intercuartílico ( $RIC = Q_3 - Q_1$ ) (Reimann et al., 2008). El cálculo del RIC se realizó a partir de los percentiles 25 y 75 ( $Q_1$  y  $Q_3$ ), que contenían aproximadamente el 50% (Me) de los datos y determinaban el background geoquímico. Así, el 25% superior o inferior de los datos no se utiliza en el cálculo. A partir de  $Q_1$  y  $Q_3$ , se definieron los límites superior [ $LS = (Q_3) + 1,5 (Q_3 - Q_1)$ ] e inferior [ $LI = (Q_1) - 1,5 (Q_3 - Q_1)$ ]. Éstos corresponden al RIC ampliado en 1,5 veces la longitud de la caja (RIC) hacia el MÁX y MIN. De acuerdo con ello se calcula el Bigote Superior ( $\{BS = \text{máx}(x, [x \leq LS])\}$ ), el cual se define como el valor superior más cercano al LS dentro de los datos presentes, siendo aquellos datos individuales superiores a dicho valor (BS) considerados como valores extremos o anómalos (outliers) (figura 5) (De Vivo et al., 2018; Valdés et al., 2021).

Existe la posibilidad de que ciertos elementos no presenten valores para la variable BS debido a que el análisis box-plot realizado en dichas variables considera al valor máximo obtenido como un valor no atípico, es decir, no existen valores anómalos para dichos elementos ya que no existen valores mayores que el BS (Aliaga, 2016).

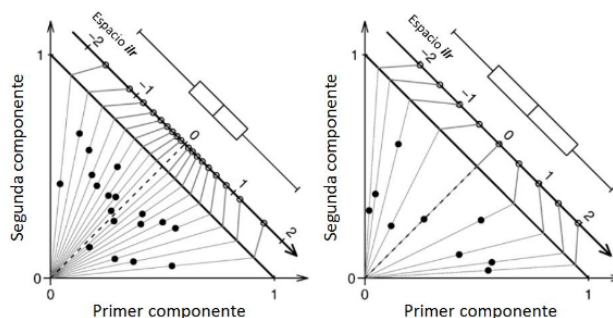




**Figura 5.** Box-plot teórico.

Los histogramas y los trazos de densidad se utilizan con frecuencia para estudiar la estructura de los datos univariantes y para proporcionar una idea sobre su distribución. Debido a las propiedades geométricas especiales de los datos composicionales, los cuales no se representan en el espacio euclidiano estándar, sino que tienen propiedades curvilíneas (desde el punto de vista euclidiano) y se trazan en el simplex (Aitchison, 1982; Egozcue et al., 2003), estos gráficos proporcionarán invariablemente una impresión errónea de la distribución de los datos cuando se utilicen con los datos brutos y no transformados (figura 6).

La mejor transformación disponible para los datos composicionales (casi todos los datos presentados en las ciencias ambientales son composicionales) es la transformación isométrica log-ratio (ilr) la cual se calcula mediante la ecuación 2, tal como sugieren Egozcue et al. (2003), la cual permite la representación correcta de los datos composicionales en el espacio euclidiano (Filzmoser et al., 2009).



**Figura 6.** Explicación gráfica de la transformación ilr. Aliaga, 2016; modificado de Filzmoser et al. (2010).

$$\text{ilr}(x) = \sqrt{\frac{1}{2}} \cdot \ln \left( \frac{x}{1-x} \right)$$

**Ecuación 2.** Transformación  $\text{ilr}(x)$  para dos componentes.

Dado que los datos medioambientales suelen estar muy sesgados hacia la derecha, la inspección gráfica de los datos se ha realizado con mayor frecuencia con datos transformados logarítmicamente. Filzmoser et al. (2009) pudieron demostrar que la transformación logarítmica proporciona resultados casi iguales a la transformación  $\text{ilr}(x)$  hasta concentraciones de elementos del 10% en peso (Filzmoser et al., 2009). Sin embargo, esta afortunada propiedad de la transformación logarítmica se pierde al entrar en el análisis de datos bivariados (Filzmoser et al., 2010).

#### 2.4.1.2. Mapas de distribución e interpolación

Una vez se ha comprendido el comportamiento de cada uno de los elementos químicos analizados, se procede a su espacialización. Los estadígrafos identificados permiten

determinar información fundamental requerida para la distribución espacial de los elementos.

La elaboración de los mapas de distribución e interpolación se llevaron a cabo a través de la utilización de QGIS, un Sistema de Información Geográfica (SIG) de software libre. A continuación, se describen las etapas consideradas en la elaboración de cada mapa.

- » Con el fin de poder ingresar la base de datos química al software y así proceder con el procesamiento de la data, en primera instancia se corroboró el formato de los datos obtenidos de los análisis químicos, los cuales se encontraban en un archivo Excel (.xlsx), para luego verificar la correspondencia de las filas y columnas.
- » Posteriormente, se añadió una capa vectorial en la cual se importó la base de datos al software QGIS para su procesamiento. Luego se procedió a georreferenciar los puntos los cuales estaban en coordenadas UTM. Datum: WGS84, huso 19 S.
- » Seguidamente se agregó la capa *ESRI Satellite* para luego proceder a interpolar los puntos. La metodología de interpolación utilizada fue *Multilevel b-spline interpolation*, con la cual fue posible realizar el corte de ráster por capa de máscara, la cual fue determinada por un radio de 500 m de cada muestra que delimitaba el área de muestreo, no contemplando aquellas áreas en donde se encontraban cerros, debido a que, la interpolación no es aplicable en elevaciones considerables de terreno como lo son, en este caso, los cerros San Cristóbal y Santa Lucía, los cuales se encuentran dentro del área de estudio. La interpolación tampoco es aplicable a

cursos de agua como lo es el Río Mapocho que, al igual que las elevaciones de terreno, no fue considerado en el polígono de interpolación. Además, cabe mencionar que, por la metodología utilizada, la interpolación no es válida fuera de este polígono.

- » Finalmente se realizó la composición de los mapas correspondientes a cada elemento para ambos años de muestreo, añadiendo todos los elementos básicos que correspondían, como el sistema de coordenadas geográficas, norte geográfico, escala, entre otros.

## **2.5. INDICADORES DE CONTAMINACIÓN**

La selección de los indicadores de contaminación que a continuación se detallan se determina con base en la sistematización de información de la manera más clara y precisa posible.

### **2.5.1. Índice de geoacumulación, $I_{geo}$**

Este índice permite determinar la contaminación por los elementos traza metálicos en los suelos comparando la concentración actual con los niveles preindustriales (Banu et al., 2013). Este indicador se calcula mediante la ecuación 3 (Grba et al., 2015):

$$I_{geo} = \log_2 \left( \frac{C_n}{1,5 B_n} \right) \quad (3)$$

**Ecuación 3.** Fórmula para calcular el Índice de geoacumulación ( $I_{geo}$ ).

Donde  $C_n$  es la concentración medida del metal “n” en el suelo,  $B_n$  es el background para el metal “n” en los suelos, mientras que el factor 1,5 tiene en cuenta la posible variación de los datos de fondo causada por los efectos de la litología (Odukoya et al., 2016).

El  $I_{geo}$  se divide en 7 categorías:  $0 \leq I_{geo}$  no contaminado;  $0 < I_{geo} \leq 1$  no contaminado a moderadamente contaminado;  $1 < I_{geo} \leq 2$  moderadamente contaminado;  $2 < I_{geo} \leq 3$  moderadamente a fuertemente contaminado;  $3 \leq I_{geo} \leq 4$  fuertemente contaminado;  $4 < I_{geo} < 5$  fuertemente a extremadamente contaminado; y  $I_{geo} \geq 5$  extremadamente contaminado (Al-Hejje et al., 2018).

### 2.5.2. Grado de contaminación, $mC_d$

El grado de contaminación ( $C_d$ ) se utiliza para medir o estimar el grado general de contaminación en la capa superficial de los lugares de muestreo (Rezaee et al., 2010). Éste se calcula según la ecuación 4 (Yeşim Özkan et al., 2012):

$$mC_d = \sum_{i=1}^n CF_i \quad (4)$$

**Ecuación 4.** Fórmula para calcular el Grado de Contaminación ( $mC_d$ ).

Donde  $mC_d$ , es el grado de contaminación y CF es el factor de contaminación. Asimismo, CF se calcula de acuerdo a la ecuación 5 (Shen et al., 2019):

$$CF = \frac{M_c}{B_c} \quad (5)$$

**Ecuación 5.** Fórmula para calcular el Factor de Contaminación (CF).

Donde  $M_c$  y  $B_c$  son la concentración medida de los metales y los valores de fondo, respectivamente.

Los valores de  $mC_d$  se agrupan en las siguientes categorías:  $mC_d < 6$  implica un grado de contaminación bajo;  $6 < mC_d < 12$  significa un grado de contaminación moderado;  $12 < mC_d < 24$  denota un grado de contaminación considerable y  $mC_d > 24$  indica un grado de contaminación alto (Khaled y Ahdy, 2009).

## **2.6. COMPARACIÓN CON NORMATIVA INTERNACIONAL**

Como se mencionó anteriormente, Chile no posee una norma de calidad de suelos que posibilite el establecimiento de valores de concentración para los distintos elementos o compuestos detectados en el suelo que permita catalogarles como potencialmente contaminados o de calidad deficiente o no aceptable. De acuerdo con el RSEIA y a la Ley 19300, una serie de normas internacionales son aceptadas como referencias válidas para evaluar si se genera o presenta riesgos para los puntos a) y b) del art. 11 de la LBGMA N° 19300 (MINSEGPRES, 1994). Para efectos de este estudio, se consideró las normas canadiense y holandesa para realizar la comparación de los contenidos de los distintos metal(oid)es analizados.

### **2.6.1. Norma Canadiense**

La normativa canadiense (Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health (CCME, 2007)), proporciona valores de concentraciones de distintos elementos de acuerdo con el uso del suelo (agrícola, residencial, comercial o industrial) (tabla 2).

**Tabla 2.** Criterios establecidos para la calidad de suelos en Canadá.

Elemento	Suelo residencial/parque	Suelo comercial	Suelo industrial
	mg kg <sup>-1</sup>		
As	12	12	12
Cd	10	22	22
Cr <sub>total</sub>	64	87	87
Cu	63	91	91
Pb	140	260	600
Ni	50	50	50
Zn	200	360	360

### 2.6.2. Norma Holandesa

Los criterios definidos para la calidad de los suelos en el Reino de los Países Bajos (Dutch Target and Intervention Values for Soil Remediation (VROM, 2013)) por el Instituto Nacional de Salud Pública y Protección Medioambiental, considera dos criterios (tabla 3). El primer criterio, Valor Objetivo (VO), considera los niveles en los cuales existe una calidad de suelo sostenible. En términos legales se considera a este parámetro como el nivel a alcanzar en caso de intervención, para lograr una recuperación satisfactoria de las propiedades funcionales del suelo para humanos, plantas y animales. El segundo criterio,

Valor de Intervención (VI), es indicativo del nivel sobre el cual las propiedades funcionales del suelo para humanos, plantas y animales se encontrarían seriamente deterioradas. Son representativas de un potencial caso serio de contaminación.

**Tabla 3.** Criterios establecidos para la calidad de suelos en Holanda.

Metales	Valor objetivo (VO)	Valor de intervención (VI)
	mg kg <sup>-1</sup> de suelo seco	
As	29	55
Cd	0,8	12
Cr	100	380
Co	9	240
Cu	36	190
Pb	85	530
Ni	35	210
Zn	140	720



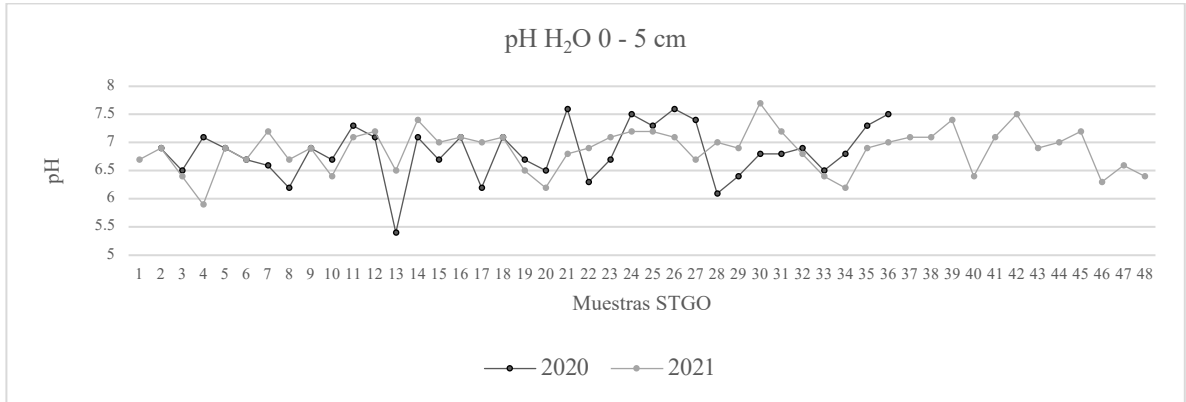
### III.RESULTADOS

#### 3.1. PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS

Como característica física general, determinada de manera cualitativa (al tacto y visualmente) según la metodología definida por la FAO, los suelos muestreados son principalmente de textura arenosa (< 2,00 mm).

##### 3.1.1. pH

A continuación, se exponen los resultados de pH obtenidos para las muestras de las campañas de muestreo 2020 y 2021. De acuerdo con éstos, se evidencia que gran parte (≈ 73%) de las muestras analizadas presentan un valor de pH que oscila en el rango 6,5–7,5 (figura 7), por lo que en general se trataría de suelos que bordean el rango de la neutralidad. El detalle del valor de pH obtenido para cada uno de estos sitios se encuentra en el ANEXO 4.

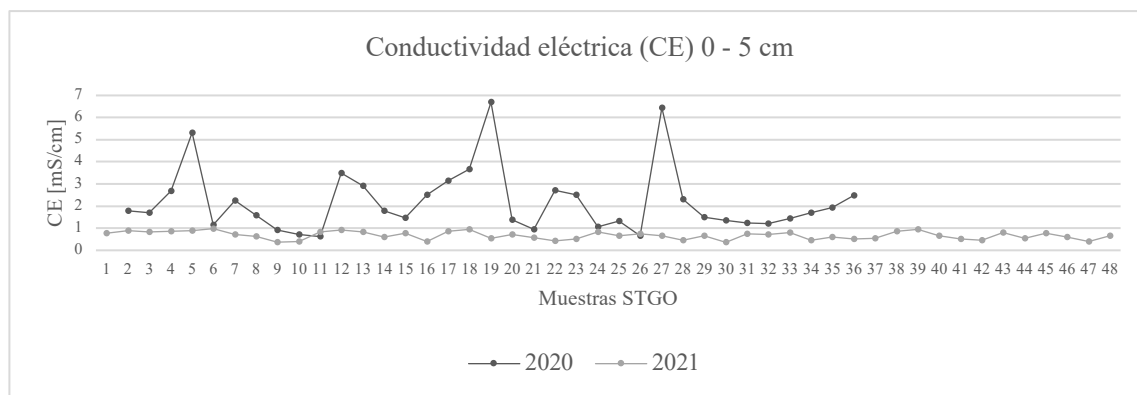


**Figura 7.** Distribución gráfica de los valores de pH (H<sub>2</sub>O) para los años 2020 y 2021. El blanco registró un valor de 6,8 unidades de pH

Respecto a lo anterior, si bien se puede apreciar una tendencia asociada a un rango de pH que varía entre 5,5 y 7,5 para ambos años, no es posible visualizar una diferencia notoria con la cual sea posible distinguir los resultados 2020 y 2021 por separado, a pesar de que los valores máximos ( $\geq 7,5$ ) se observan el año 2021 para las muestras 21, 24, 26 y 36 y los valores mínimos (5,4) son observados en el año 2020 (STGO20-13).

### 3.1.2. Conductividad Eléctrica (CE)

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de CE de las distintas muestras analizadas para los años 2020 y 2021. De acuerdo con la figura 8, es posible visualizar una considerable diferencia entre un año y otro, dado que los valores de CE correspondientes al año 2020 son considerablemente más elevados; especialmente en los sitios STGO20-5 (5,31 mS/cm), STGO20-19 (6,69 mS/cm (máximo)) y STGO20-27 (6,45 mS/cm), que los obtenidos para el año 2021 (máximo: 0,98 mS/cm (STGO21-6)). El detalle del valor de cada muestra se encuentra en el ANEXO 4.



**Figura 8.** distribución grafica de los valores de conductividad eléctrica (mS/cm) de la solución suelo para los años 2020 y 2021. La CE del blanco fue de 0,0 mS/cm.

### **3.2. LÍNEA BASE (LB)**

A continuación, se presentan los resultados de la elaboración de la línea base del área de estudio en función de: i) la distribución de las concentraciones elementales obtenidas mediante el análisis ICP-MS, previa digestión ácida y posterior validación de los datos y ii) la espacialización de dichas distribuciones. Lo anterior permite comprender la dinámica de los contaminantes en los suelos urbanos estudiados.

#### **3.2.1. Distribución de las concentraciones elementales en el área de estudio**

En las tablas 4 y 5 se presenta el resumen estadístico de los componentes del box-plot de los elementos químicos analizados en los años 2020 y 2021. Cabe destacar que, para el análisis estadístico de los datos, éstos previamente fueron normalizados con la transformación  $\text{ilr}(x)$ .

**Tabla 4.** Resumen estadístico del box-plot para Mg, Al, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Cs y Pb.

	Mg	Al	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Cs	Pb
<b>Unidad*</b>	$\frac{\text{mg}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{mg}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{mg}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{mg}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{mg}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{mg}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{mg}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{mg}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{mg}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{mg}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{mg}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{mg}}{\text{kg}}$
<b>N</b>	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48
<b>Mínimo</b>	223	9873	61,1	249	16,5	22,6	314	254	1,3	0,0505	0,801	28
	135	5116	16,6	447	13,2	6,32	89,1	54	5,33	0,0505	0,052	0,05
<b>Q<sub>1</sub></b> <b>(25%)</b>	410	13653	82,1	1069	29,4	54	512	554	31	1,21	1,62	97,3
	321	6578	25,3	586	16,6	15,2	167	165	11,1	2,55	2,74	20,9
<b>Q<sub>2</sub></b> <b>(50%)</b>	726	16558	97,9	1264	37,3	68,4	618	695	46,1	3,73	2,94	191
	526	8723	34,6	660	26,6	20,5	248	264	18,7	4,86	11,6	53
<b>Q<sub>3</sub></b> <b>(75%)</b>	945	20528	151	1387	47,3	75,8	861	1111	64,3	6,24	3,62	328
	643	12134	65,3	874	28,5	31,4	471	794	22,6	7,29	37,7	138
<b>Bigote superior</b>	1417	41883	249	1600	63,8	108	1244	2022	107	12,6	5,35	636
	1035	20286	102	1264	45,5	45,8	874	1534	38	14,3	49,2	294
<b>Máximo</b>	1931	56251	249	2605	102	108	2922	3776	107	14	8,48	997
	6948	23639	630	2285	178	191	2478	2476	81,8	14,3	49,2	1721
<b>%CVR</b>	73,97	41,52	70,38	25,16	48,25	31,87	56,47	80,14	72,23	134,85	68,03	120,79
	61,22	63,69	115,61	43,64	44,74	79,02	122,58	238,26	61,50	97,53	301,38	220,94

2020	2021
------	------

\*Equivalencia de unidades:  $\text{mg/kg} = \text{ppm} \approx \mu\text{g/mL}$  ( $\rho_{\text{solución}} \approx \rho_{\text{agua}}$  de acuerdo a las diluciones realizadas).

**Tabla 5.** Resumen estadístico del box-plot para Sc, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd, Dy, Er e Yb.

	Sc	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	Dy	Er	Yb
Unidad	$\frac{\text{mg}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{mg}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{mg}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{mg}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{mg}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{mg}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{mg}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{mg}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{mg}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{mg}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{mg}}{\text{kg}}$
N	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48
Mínimo	56,1	0,774	0,545	1,36	0,14	0,382	0,108	0,112	0,05	0,05	0,05
	29,7	0,307	0,276	0,645	0,05	0,258	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Q <sub>1</sub> (25%)	69,4	1,06	0,949	2,44	0,259	1,12	0,223	0,307	0,198	0,05	0,05
	49,9	0,516	0,399	1,05	0,05	0,427	0,05	0,105	0,05	0,05	0,05
Q <sub>2</sub> (50%)	81	1,33	1,27	3,46	0,357	1,57	0,311	0,41	0,241	0,126	0,126
	72,7	0,0624	0,683	1,74	0,17	0,739	0,142	0,162	0,05	0,05	0,05
Q <sub>3</sub> (75%)	117	1,59	2,06	5,57	0,531	2,86	0,446	0,584	0,317	0,314	0,178
	85	0,918	0,954	2,33	0,249	1,21	0,203	0,222	0,209	0,132	0,122
Bigote superior	149	2,38	3,09	9,28	0,868	4,72	0,672	0,684	0,45	0,457	0,246
	119	1,5	1,72	4,25	0,535	2,31	0,389	0,35	0,407	0,216	0,208
Máximo	149	3,59	4,23	11,1	2,47	27,5	11,1	7,4	2,98	2,48	2,71
	119	2,37	3,3	7,05	0,812	4,57	0,766	2,26	0,629	2,011	0,336
%CVR	58,77	39,85	87,48	90,46	76,19	110,83	71,70	68,05	49,38	209,52	101,59
	48,28	64,42	81,26	73,56	117,06	105,95	107,75	106,17	318,00	164,00	144,00

2020	2021
------	------

\*Equivalencia de unidades:  $\text{mg/kg} = \text{ppm} \approx \mu\text{g/mL}$  ( $\rho_{\text{solución}} \approx \rho_{\text{agua}}$  de acuerdo a las diluciones realizadas).

### 3.2.1.1. Background obtenido

A continuación, se presenta el background obtenido para el área analizada, el cual fue determinado por el valor correspondiente a la Me del conjunto de datos normalizados de cada elemento para cada año muestreado. Para la obtención del background fue necesario

identificar aquellos valores originales a los cuales hacían referencia los valores normalizados (tabla 6).

Cabe mencionar que se realizó el procedimiento de identificación para el año 2020 y 2021, se obtienen valores mucho menores (menos enriquecidos) para el segundo año en cuestión. Debido a lo anterior, fueron aquellos datos los que se utilizaron como “la tendencia esperada” o constituyentes del background, siendo éstos los utilizados para la determinación de los indicadores de contaminación que se presentan más adelante. En estricto rigor, de acuerdo con la metodología, el background corresponde al rango comprendido entre los cuartiles  $Q_1$  y  $Q_3$  para considerar la heterogeneidad de la geoquímica de la capa superficial del suelo, sin embargo, para términos prácticos y de determinación de indicadores de contaminación, se trabajó con los valores correspondientes a la Me de cada elemento.

**Tabla 6.** Background obtenido para el área analizada.

Elemento	Concentración (mg/kg)	Elemento	Concentración (mg/kg)	Elemento	Concentración (mg/kg)
Mg	526	As	18,7	Pr	0,17
Al	8723	Cd	4,86	Nd	0,74
Cr	34,6	Cs	11,6	Sm	0,14
Mn	660	Pb	53	Gd	0,16
Co	26,6	Sc	72,7	Dy	0,05
Ni	20,5	Y	0,62	Er	0,05
Cu	248	La	0,68	Yb	0,05
Zn	264	Ce	1,74		

### **3.2.2. Distribución de concentraciones en el área de estudio**

A continuación, se presenta la distribución de las concentraciones en los distintos puntos muestreados y la respectiva interpolación en el área de estudio, complementada con la representación del background mediante histogramas y los diagramas de caja y bigote. Para términos comparativos se utilizó una máscara de interpolación que considerara el área común entre los dos años analizados. Los gráficos que detallan las concentraciones de los distintos elementos analizados por sitio y año muestreado se encuentran en el ANEXO 5.

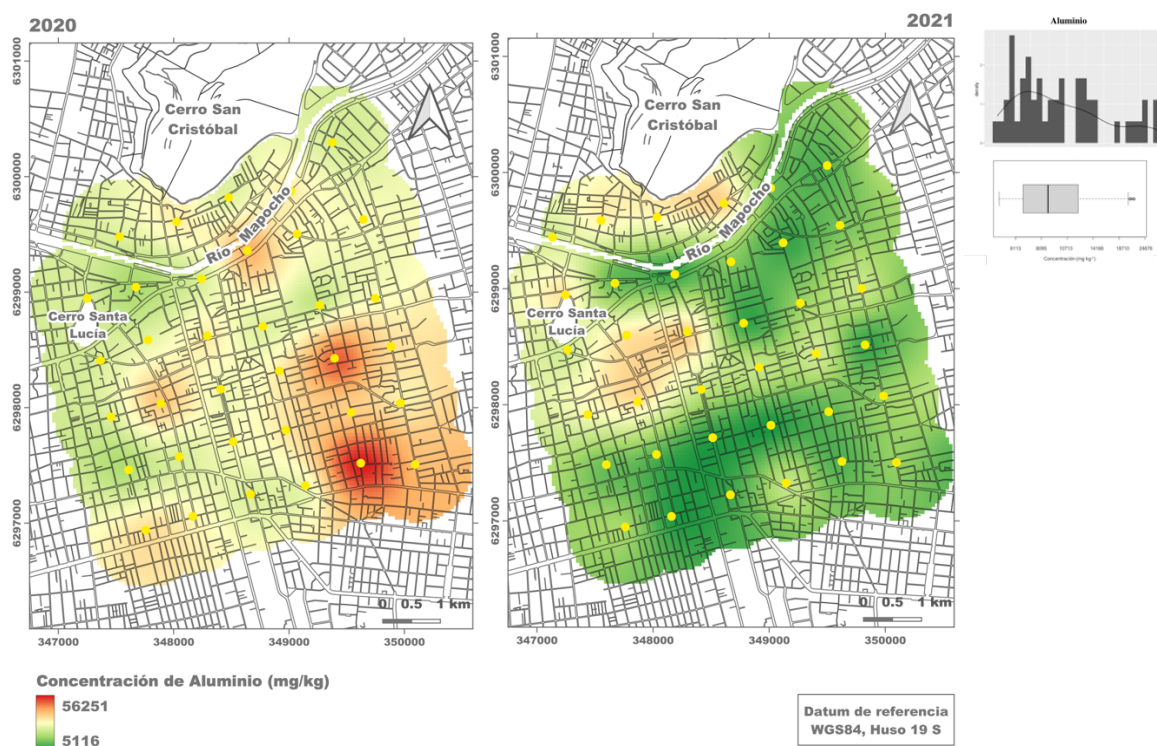
#### **3.2.2.1. Aluminio (Al)**

De acuerdo con el box-plot de Al correspondiente al año 2021, se puede apreciar que el RIC abarca el rango de concentraciones comprendido entre 6578 mg kg<sup>-1</sup> y 12134 mg kg<sup>-1</sup>, siendo 8723 mg kg<sup>-1</sup> el valor determinado como background y 20286 mg kg<sup>-1</sup> el valor correspondiente al BS. Por otra parte, analizando los estadígrafos básicos, es posible visualizar una considerable diferencia en la magnitud de las concentraciones de un año a otro, en donde se evidencia una notable disminución de éstas en el año 2021.

En el año 2021 se observan varios valores que superan el BS, constituyendo valores anómalos positivos, siendo sus concentraciones iguales a: 20655 mg kg<sup>-1</sup>, 21199 mg kg<sup>-1</sup>, 23184 mg kg<sup>-1</sup>, 23639 mg kg<sup>-1</sup> (máximo), los cuales corresponden a los sitios STGO21-9, STGO21-10, STGO21-19 y STGO21-15, respectivamente.

En la figura 9, es posible visualizar que en el sector sureste del área analizada, las concentraciones de Al son considerablemente mayores en el año 2020, alcanzando valores

superiores a  $50000 \text{ mg kg}^{-1}$  en los sitios STGO20-28 y STGO20-30. De la misma forma, es posible visualizar un aumento en las concentraciones de los sitios ubicados en el sector noroeste del área de estudio para el año 2021, lo cual se puede visualizar en la figura 9.



**Figura 8.** Línea base de Aluminio 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de Al normalizado-2021.

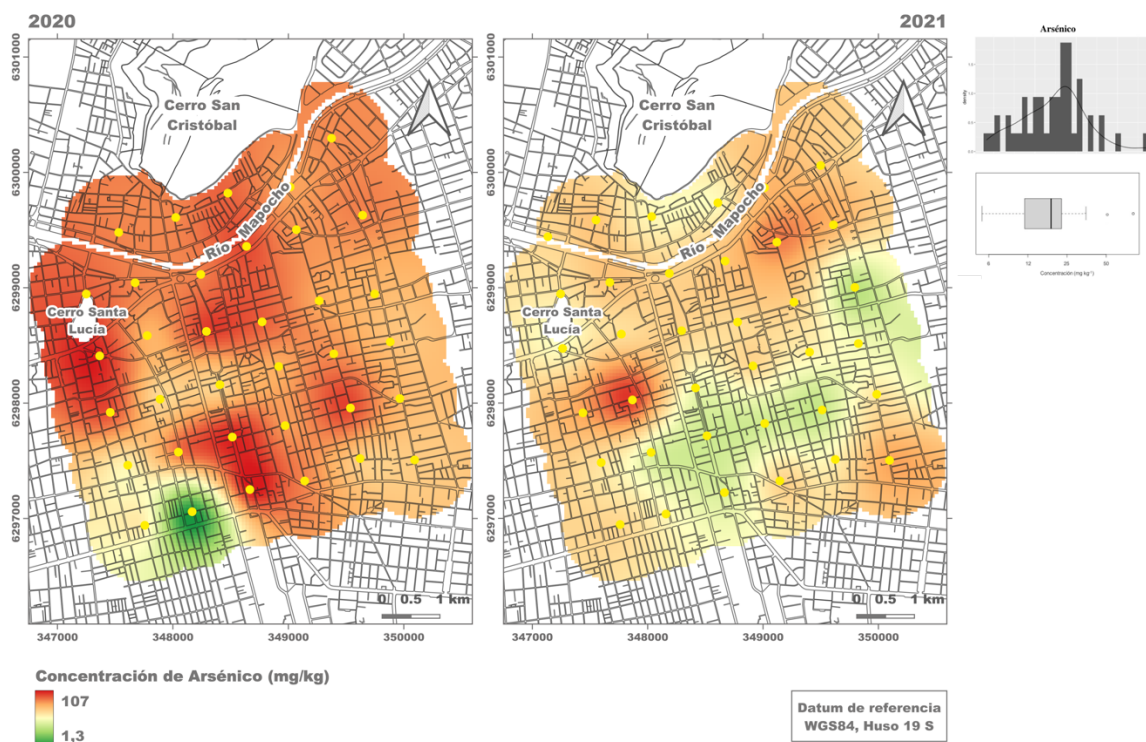
### 3.2.2.2. Arsénico (As)

Respecto a los resultados obtenidos en los estadígrafos básicos (tabla 4) es posible visualizar que no se presenta una tendencia clara por año analizado, pues los valores más bajos (absolutos, es decir considerando el conjunto de datos 2020 y 2021 como un todo) del MIN y  $Q_1$  se registran en el año 2020, sin embargo, los valores  $Q_2$ ,  $Q_3$ , BS y el MÁX



son menores en el año 2021. Por otra parte, el 50% de los datos (RIC) correspondientes al año 2020 abarca el rango comprendido entre  $31 \text{ mg kg}^{-1}$  –  $64,3 \text{ mg kg}^{-1}$ , en cambio en el año 2021, el RIC se encuentra delimitado por los valores  $11,1 \text{ mg kg}^{-1}$  y  $22,6 \text{ mg kg}^{-1}$ , lo que estaría indicando una mayor proporción de sitios con concentraciones más altas en el año 2020, lo que puede visualizarse en la figura 10.

Además, a través del box-plot que se muestra en la figura 10, es posible apreciar que el BS tiene un valor de  $38 \text{ mg kg}^{-1}$ , por lo que es posible establecer 2 sitios anómalos en la campaña del 2021 y 22 sitios correspondientes a la campaña 2020, apreciándose un enriquecimiento considerable de este metal en el año 2020.



**Figura 9.** Línea base de Arsénico 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de As normalizado-2021.

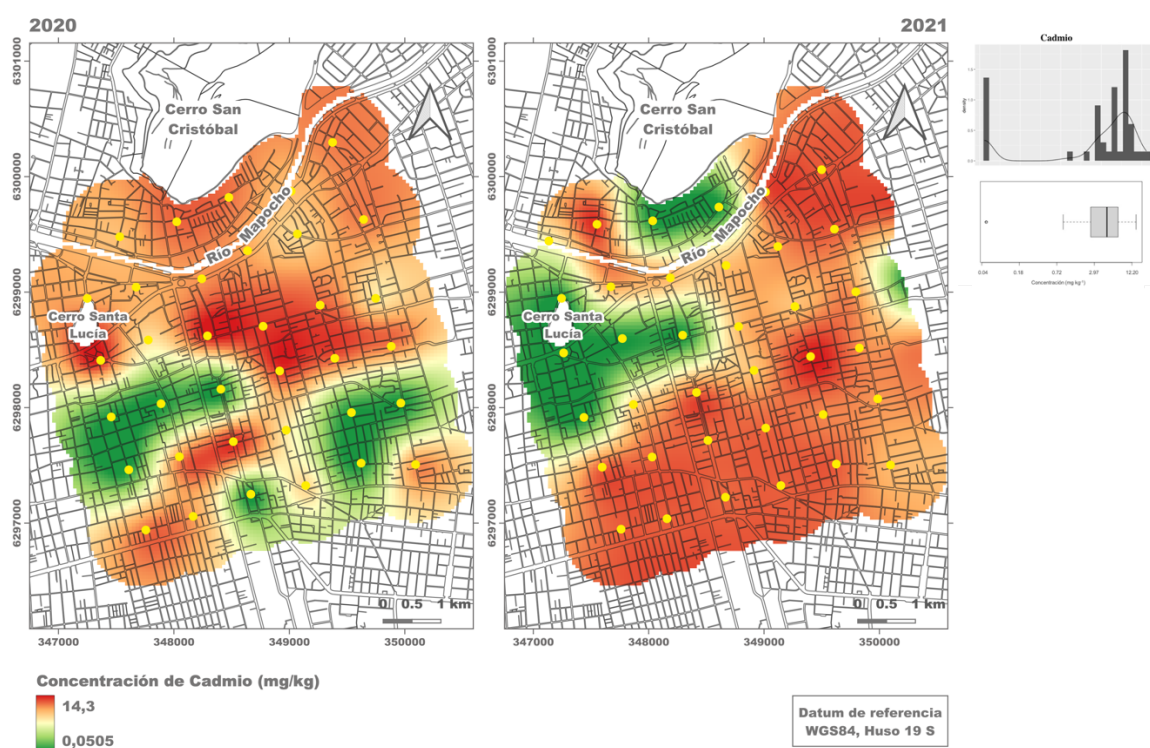
### 3.2.2.3. Cadmio (Cd)

Comparando los valores de los estadígrafos básicos obtenidos para cada año analizado, es posible visualizar que la distribución de las concentraciones se mantiene relativamente constante en ambos años, en donde el 50% de las concentraciones (RIC) registradas en el año 2020 se encuentran delimitadas por los valores  $1,21 \text{ mg kg}^{-1}$  y  $6,24 \text{ mg kg}^{-1}$ , y en el año 2021 por los valores  $2,55$  y  $7,29 \text{ mg kg}^{-1}$ . De acuerdo con lo anterior, es posible observar un leve aumento en las concentraciones registradas en el año 2021, pero en general la distribución de dichos valores es más bien homogénea.

De acuerdo al box-plot elaborado, es posible determinar los valores background-Cd y BS, los cuales son iguales a  $4,86 \text{ mg kg}^{-1}$  y  $14,3 \text{ mg kg}^{-1}$ , respectivamente, en donde este último coincidiría con el valor máximo del año 2021 el cual es mayor al máximo registrado en el año 2020, por lo que para el Cd no se registrarían valores anómalos positivos según el tratamiento estadístico-matemático realizado a pesar de que en los mapas se muestre una gran cantidad de sitios en color rojo, en este caso, aquello no es indicativo de sitios con concentraciones anómalas.

Sin embargo, de acuerdo con el box-plot que se muestra en la figura 11, hay un punto que se encuentra bajo el Bigote Inferior (BI), el cual corresponde a una acumulación de valores -los cuales se muestran de color verde en el mapa- a los que se le aplicó el criterio de  $\frac{LC}{2}$

para la validación de la data, ya que aquellos valores registraron una concentración  $<LC$ , los cuales corresponden a aproximadamente un 26% del total de datos para este elemento. Cabe mencionar que no se tiene certeza de que sitios presenten concentraciones iguales a  $0,0505 \text{ mg kg}^{-1} \left(\frac{LC}{2}\right)$ , pero se trabajó con ese valor para no eliminar dichos datos, pero que independientemente de que no se tiene certeza de que el valor que representan sea exactamente  $0,0505 \text{ mg kg}^{-1}$ , son valores menores al BI ( $0,914 \text{ mg kg}^{-1}$ ), por lo que de todas maneras son consideradas como anomalías geoquímicas negativas.



**Figura 10.** Línea base de Cadmio 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de Cd normalizado-2021.

#### 3.2.2.4. Cerio (Ce)

Según lo descrito en la tabla 5 presentada anteriormente, es posible visualizar una disminución de las concentraciones hacia el segundo año de muestreo. Esta disminución es de aproximadamente el 50% respecto a los valores 2020, lo cual se puede visualizar de mejor manera con la comparación del RIC el cual, para el año 2020, se encuentra comprendido entre los valores 2,44 y 5,57 mg kg<sup>-1</sup>, en cambio para el año 2021 se encuentra comprendido entre los valores 1,05 y 2,33 mg kg<sup>-1</sup>. El BS corresponde a 4,25 mg kg<sup>-1</sup>, por lo que se puede establecer la presencia de 4 sitios con concentraciones anómalas para el año 2021, los cuales presentaban las concentraciones iguales a 4,68 mg kg<sup>-1</sup>, 4,83 mg kg<sup>-1</sup>, 6,81 mg kg<sup>-1</sup> y 7,05 mg kg<sup>-1</sup>, correspondientes a los sitios 3, 2, 15 y 9, respectivamente. Por otra parte, en el año 2020 es posible establecer la presencia de 10 sitios con concentraciones anómalas, referentes a los sitios 25, 30, 13, 20, 28, 27, 17, 5, 31 y 12, los cuales se encuentran ordenados de forma creciente en concentración (figura 12).

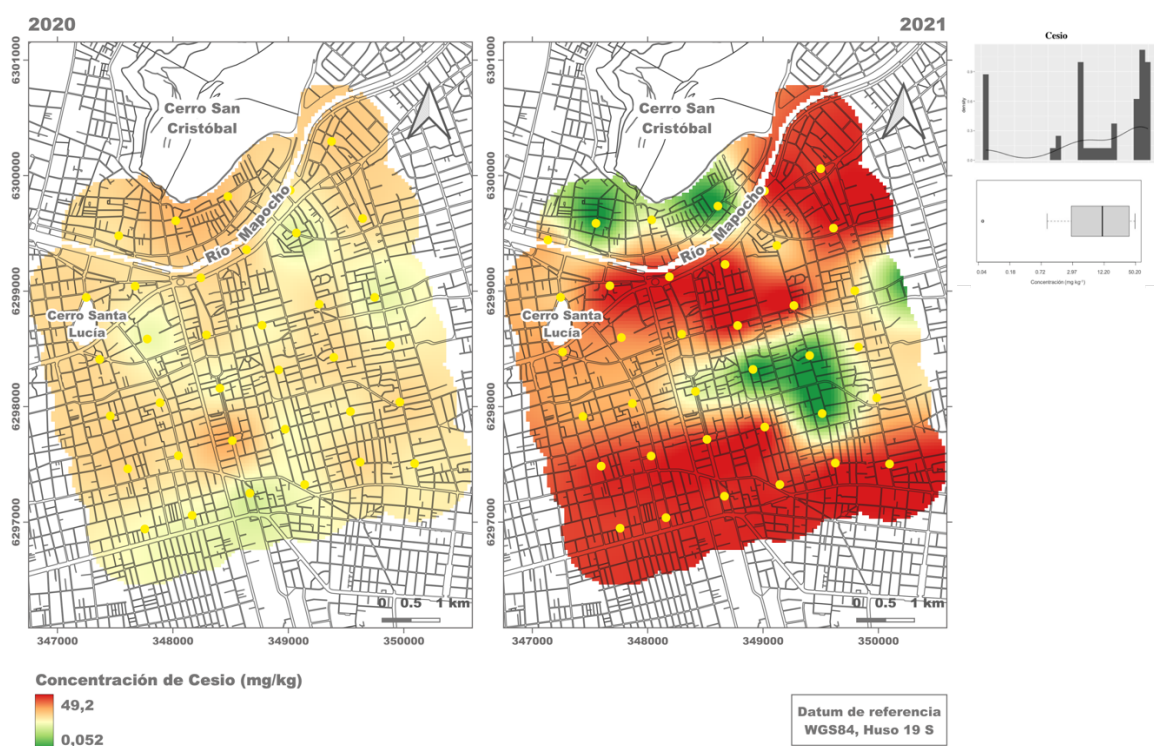


**Figura 11.** Línea base de Cerio 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de Ce normalizado-2021.

### 3.2.2.5. Cesio (Cs)

Según los resultados, es posible visualizar que las concentraciones registradas en el año 2021 aumentaron considerablemente en relación a las concentraciones que se observaron en el año 2020, aquello se puede visualizar claramente en la figura 13 en conjunto con los resultados obtenidos para el RIC (tabla 4) de ambos años. Dado que para el año 2020 se obtuvo un RIC comprendido entre los valores  $1,62 \text{ mg kg}^{-1}$  –  $3,62 \text{ mg kg}^{-1}$ , en cambio en el año 2021 dicho intervalo se encuentra delimitado por los valores  $2,74 \text{ mg kg}^{-1}$  –  $37,7$

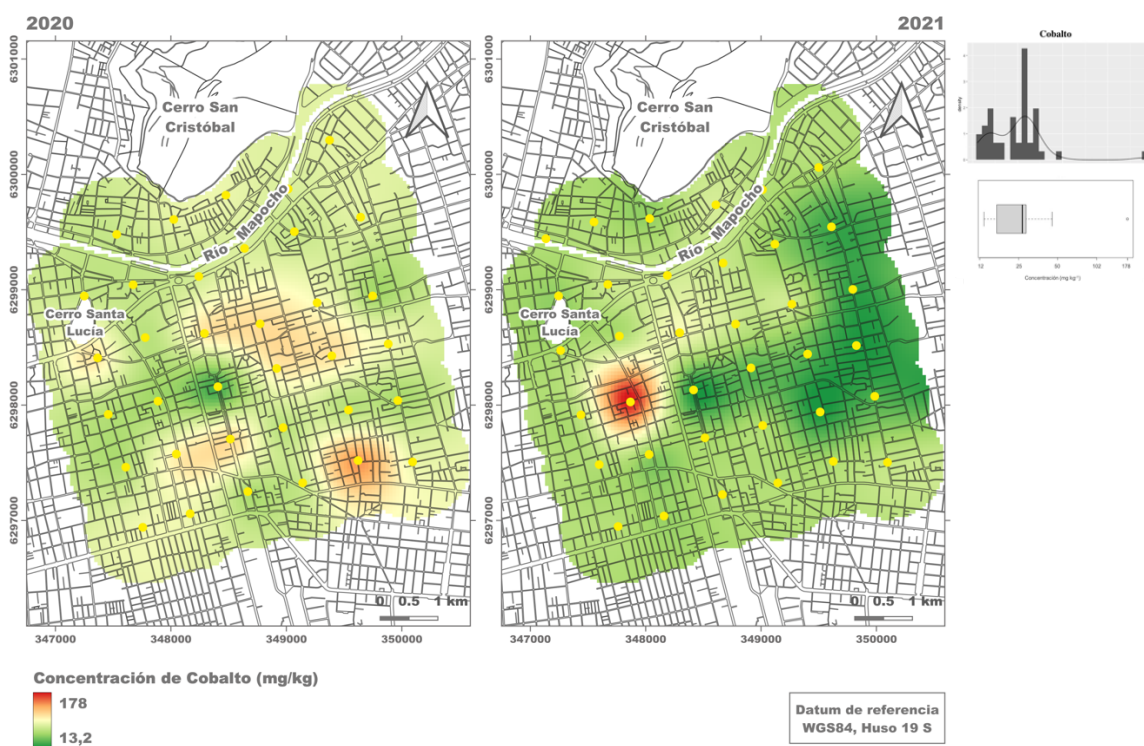
$\text{mg kg}^{-1}$ , se evidencia un considerable incremento en las concentraciones correspondientes al año 2021, siendo éstas incluso 6 veces más altas que las registradas en el año 2020. Asimismo, a través del mapa de concentraciones 2021, es posible visualizar que los niveles más altos de Cs se concentran principalmente en el sur del área de estudio, sin embargo, en el sector noreste de área igualmente es observable una acumulación de sitios con concentraciones considerablemente mayores.



**Figura 12.** Línea base de Cesio 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de Cs normalizado-2021.

### 3.2.2.6.Cobalto (Co)

Según los datos resultados obtenidos (figura 14), se puede apreciar una similitud en los rangos de concentraciones años estudiados, lo que se puede verificar con la comparación de los estadígrafos básicos (tabla 4) en los cuales la variación año a año es mínima, sin embargo, el máximo absoluto se presenta en el año 2021. En dicha campaña de muestreo, el 50% de las concentraciones obtenidas se encuentran comprendidas en el rango de concentraciones entre  $16,6 \text{ mg kg}^{-1}$  y  $28,5 \text{ mg kg}^{-1}$ , siendo  $26,6 \text{ mg kg}^{-1}$  el valor correspondiente al background-Co y  $45,5 \text{ mg kg}^{-1}$  el equivalente al BS. Según esto, al año 2021 se le atribuye un dato anómalo (STGO21-10), el cual presenta una concentración igual a  $178 \text{ mg kg}^{-1}$  superando con creces el valor background establecido y que, a su vez, equivale a aproximadamente unas 4 veces el valor del BS. Por otra parte, hay sitios muestreados en el año 2020 que de igual forma presentan concentraciones elevadas, siendo el mayor de éstos el sitio STGO20-30 ( $102 \text{ mg kg}^{-1}$ ).



**Figura 13.** Línea base de Cobalto 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de Co normalizado-2021.

### 3.2.2.7. Cobre (Cu)

De acuerdo con los resultados (figura 15), es posible establecer que el 50% de las concentraciones medias de Cu para el año 2021 (datos que constituyen el background) se encuentran en el rango entre 167 y 471 mg kg<sup>-1</sup>, siendo 248 mg kg<sup>-1</sup> el valor background-Cu. Comparando los estadígrafos básicos obtenidos para ambos años analizados (tabla 4), es posible visualizar que las concentraciones registradas en el año 2021 si bien son menores que las que se observan en el año 2020, la diferencia en cada uno de los estadígrafos calculados entre el año 2020 y 2021 se mantiene relativamente constante,



registrándose una disminución aproximada de 200-300 mg kg<sup>-1</sup> en el año 2021, con respecto al 2020.

De acuerdo con el box-plot elaborado para este elemento, se registran tres sitios con datos anómalos en el año 2021, dado que sobrepasan el BS el cual tiene un valor de 874 mg kg<sup>-1</sup>, los cuales corresponden a los sitios SGTO21-1, STGO21-10 y STGO21-22. Si bien, de acuerdo con los estadígrafos básicos calculados (tabla 4), en general el año 2021 registró concentraciones más bajas de Cu, el máximo en ambas campañas de muestreo se asimila bastante y en ambos casos se registra en el sitio 22, como se puede apreciar en la figura 15. Dicho sitio se ubica en un jardín urbano al costado del Colegio Carmela Carvajal.



**Figura 14.** Línea base de Cobre 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de Cu normalizado-2021.

### 3.2.2.8. Cromo (Cr)

Según los resultados obtenidos, los valores que comprenden el RIC de Cr-2021 varían entre 25,3 mg kg<sup>-1</sup> y 65,3 mg kg<sup>-1</sup>, lo que corresponde al 50% de los datos centrales del conjunto de datos. Dentro de este intervalo se encuentra el valor que representa el background (Me), el cual tiene un valor de 34,6 mg kg<sup>-1</sup>.

Comparando los estadígrafos básicos de ambos años, es posible visualizar que las concentraciones registradas en el año 2020 en general son mucho mayores a las del año 2021, aproximadamente el triple, sin embargo, el máximo absoluto se atribuye al año 2021, el cual corresponde a 630 mg kg<sup>-1</sup> (STGO21-1), a diferencia de los máximos valores registrados en 2020, los cuales son iguales a 242 y 249 mg kg<sup>-1</sup>, correspondientes a los sitios STGO20-29 y 28, respectivamente. De acuerdo con lo anterior, es posible establecer que el punto STGO21-1 es aproximadamente 2,5 veces mayor que el máximo registrado en 2020 (STGO20-28), es decir, hubo un incremento en el valor máximo de un 153%, no siendo menos importante el hecho de que hubo 2 puntos muestreados en el año 2020 que presentaron concentraciones de Cr mayores a 200 mg kg<sup>-1</sup> (figura 16). Estos valores si bien no representan al compilado total de datos, ya que por lo general las concentraciones en ambos años  $\leq 100$  mg kg<sup>-1</sup>, corresponden a anomalías geoquímicas positivas ya que superan el BS (102 mg kg<sup>-1</sup>), por lo que generan una preocupación, sobre todo el sitio

STGO21-1, muestreado cerca en el sector noroeste del área de estudio, al norte del Río Mapocho, en la comuna de Recoleta.

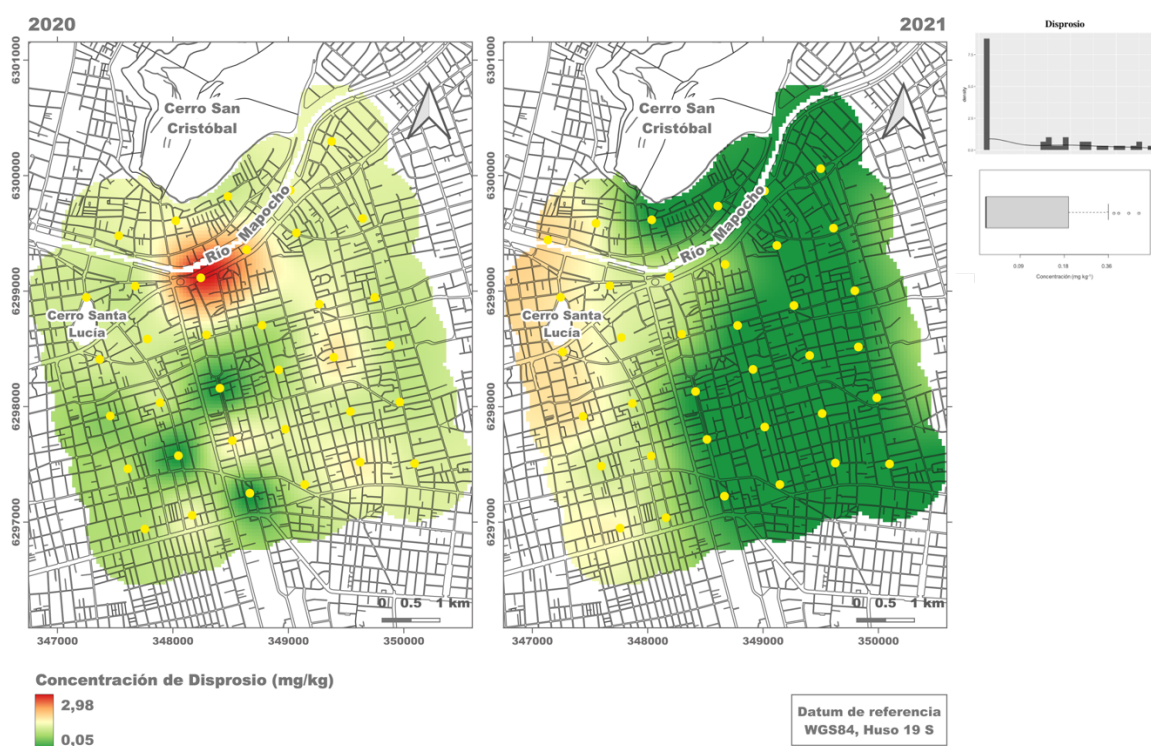


**Figura 15.** Línea base de Cromo 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de Cr normalizado-2021.

### 3.2.2.9. Disprosidio (Dy)

Según los resultados que se muestran en la figura 17 y los descritos en la tabla 5, si bien las concentraciones entre un año y otro son similares, es posible visualizar una disminución de éstas hacia el segundo año de muestreo. Lo anterior puede ser visualizado de mejor manera con la comparación del RIC el cual, para el año 2020, se encuentra

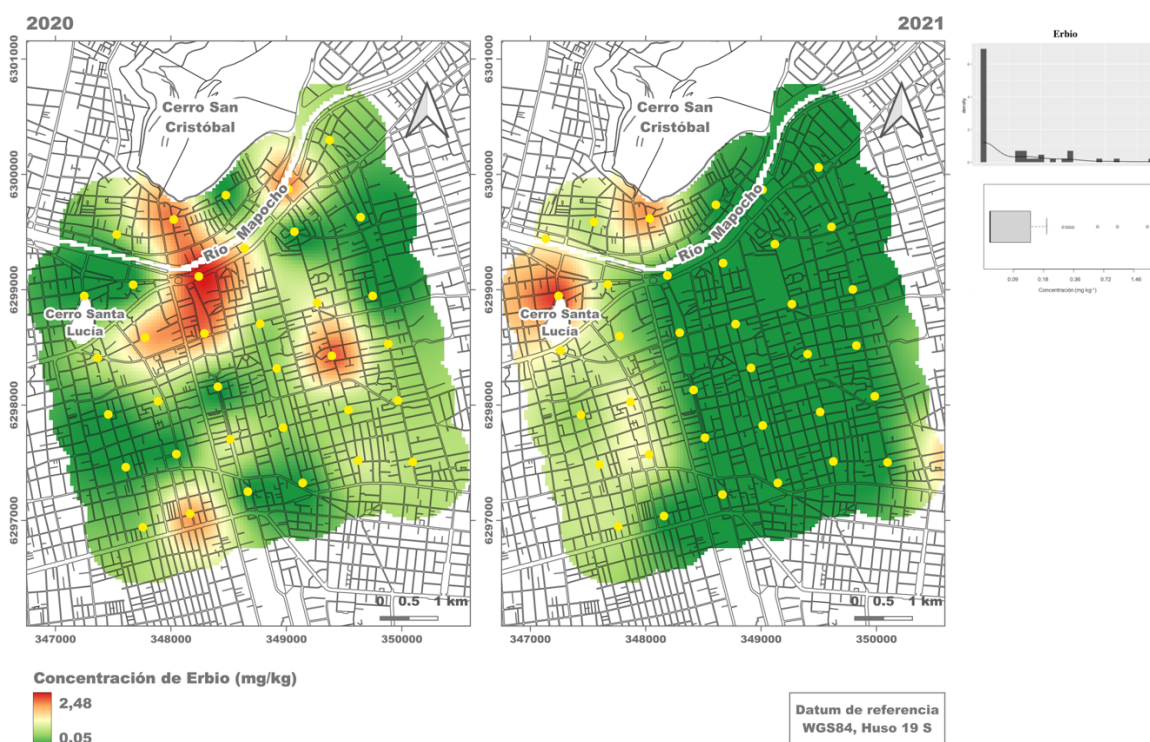
comprendido entre los valores 0,198 y 0,317 mg kg<sup>-1</sup>, en cambio para el año 2021 se encuentra comprendido por los valores 0,05 y 0,209 mg kg<sup>-1</sup>. Como el BS corresponde a 0,407 mg kg<sup>-1</sup>, serían 5 los sitios considerados como anómalos en el año 2020 y 4 en el año 2021, sin embargo, en la figura 17 es posible visualizar solo un sitio enriquecido correspondiente al año 2020 ya que el resto de las concentraciones son mucho menores que dicho sitio, por lo que se ven “apantalladas” por éste.



**Figura 16.** Línea base de Disprosio 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de Dy normalizado-2021.

### 3.2.2.10. Erblio (Er)

De acuerdo con los resultados obtenidos de los estadígrafos básicos (tabla 5) es posible observar que las concentraciones de Er desde el año 2020 al 2021 disminuyeron prácticamente a la mitad, evidenciándose con la comparación de los RICs que presenta cada año, delimitados por los valores 0,05 y 0,314 mg kg<sup>-1</sup> para el año 2020 y 0,05 y 0,132 mg kg<sup>-1</sup> para el año 2021. Otro estadígrafo básico importante es el BS, el cual para el año 2021 presenta un valor igual a 0,216 mg kg<sup>-1</sup>, por lo que es posible establecer la presencia de 6 sitios con concentraciones anómalas positivas en dicho año (STGO21-1, 2, 3, 10, 11 y 13), en cambio en el año 2020 el número de sitios con concentraciones que se consideran anómalas asciende a 11 (STGO20-9, 12, 13, 14, 15, 17, 20, 25, 27, 28, y 30) (figura 18). Cabe destacar que al igual que en el caso del Dy, se repite la tendencia que hace referencia a un valor anómalo en el sitio STGO20-14 y un aumento relativo en 2021 hacia el sector oeste del área, al oeste del eje Vicuña Mackenna.

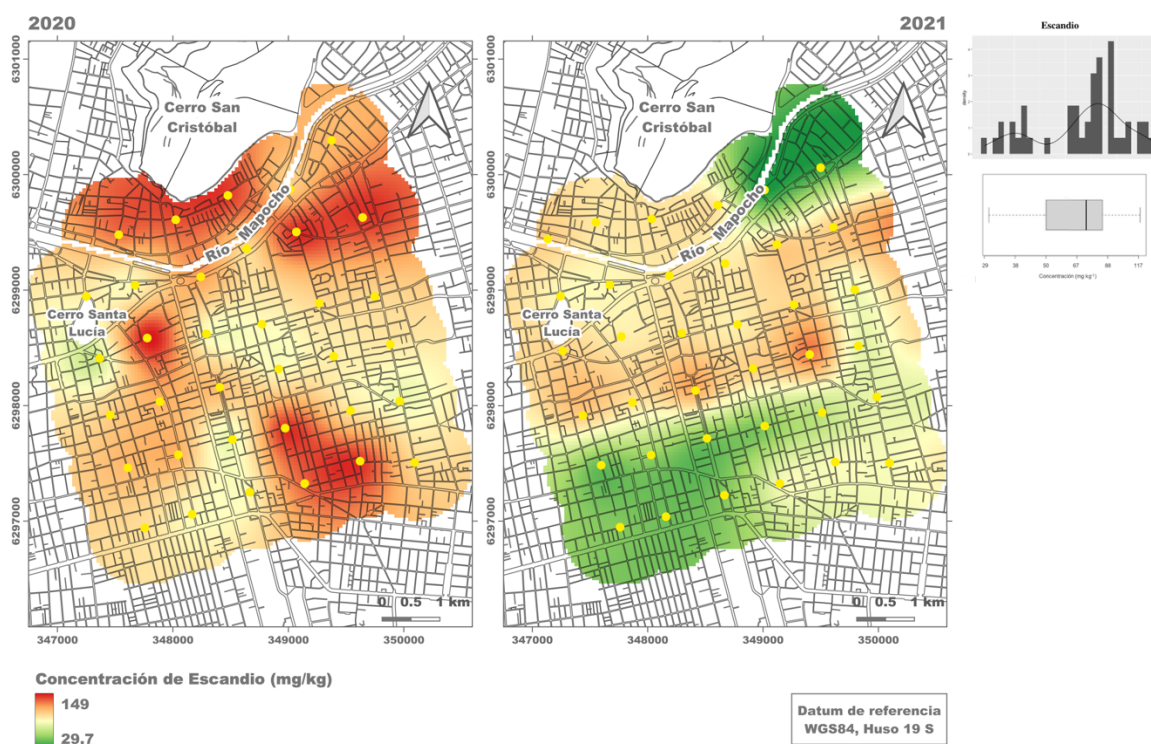


**Figura 17.** Línea base de Erbío 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de Er normalizado-2021.

### 3.2.2.11. Escandio (Sc)

De acuerdo con los resultados obtenidos en los estadígrafos básicos (tabla 5), es posible visualizar una disminución aproximada del 30% en las concentraciones registradas en el año 2021 respecto a las observadas en el año 2020, encontrándose el 50% de los valores obtenidos en el primer año de muestreo en el rango de  $69,4 - 117 \text{ mg kg}^{-1}$ , en cambio en el año 2021, el RIC se encuentra comprendido por los valores  $49,9 - 85 \text{ mg kg}^{-1}$ , evidenciándose esta disminución.

Como se puede visualizar en el box-plot de la figura 19, el BS corresponde a 119 mg kg<sup>-1</sup>, el cual coincide con el máximo valor registrado en el año 2021, por lo que para dicho año no se evidencian datos anómalos. Sin embargo, considerando el valor BS y las concentraciones registradas en el año 2020, es posible constatar la presencia de 8 sitios en se constituyen anomalías geoquímicas positivas, los cuales corresponden a los sitios 24 (122 mg kg<sup>-1</sup>), 13 (129 mg kg<sup>-1</sup>), 19 (136 mg kg<sup>-1</sup>), 23 (139 mg kg<sup>-1</sup>), 30 (139 mg kg<sup>-1</sup>), 32 (139 mg kg<sup>-1</sup>), 26 (142 mg kg<sup>-1</sup>) y 9 (149 mg kg<sup>-1</sup>), los cuales pueden visualizarse en el mapa 2020 de la figura 19.



**Figura 18.** Línea base de Escandio 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de Sc normalizado-2021.

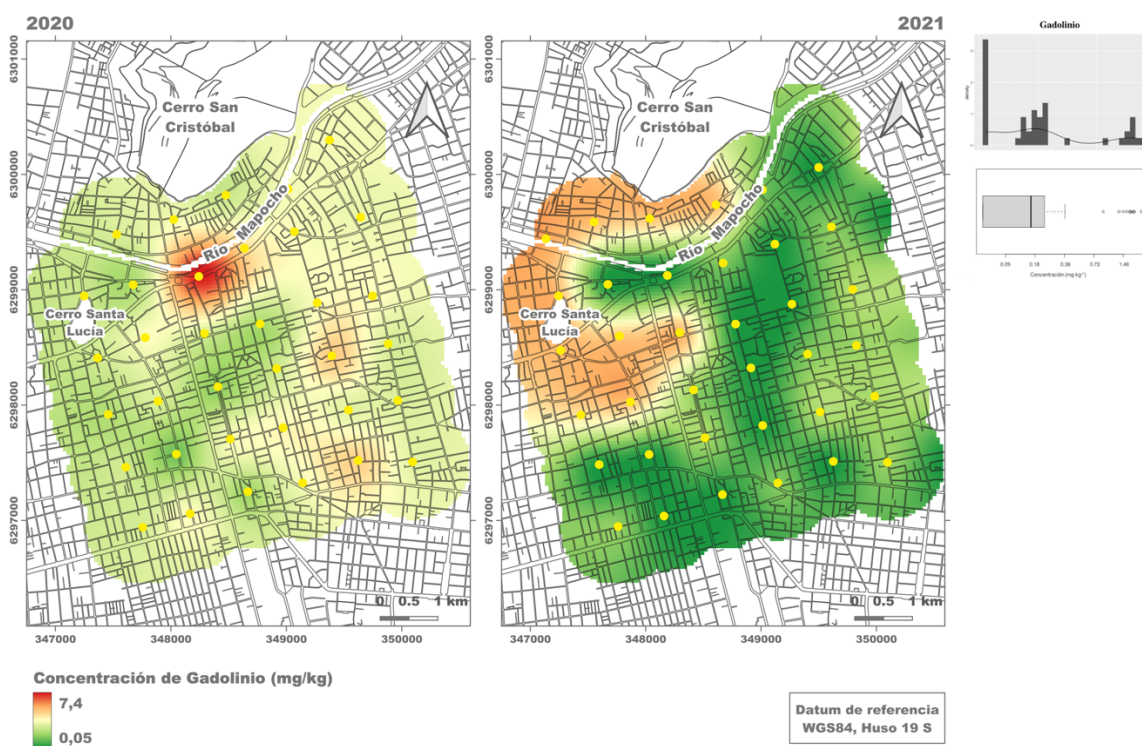
### 3.2.2.12. Gadolinio

De acuerdo con los resultados obtenidos (figura 20), el 50% de los valores registrados en el año 2021 se encuentran en el rango comprendido entre 0,307 y 0,222 mg kg<sup>-1</sup>, siendo 0,16 mg kg<sup>-1</sup> el valor background-Zn y 0,35 mg kg<sup>-1</sup> el valor correspondiente al BS. De acuerdo con lo anterior, en el año 2020 es posible identificar 22 sitios con concentraciones anómalas (color amarillo, anaranjado y rojo en el mapa 2020). Por otra parte, es posible detectar un total de 10 sitios con concentraciones anómalas para el año 2021 (color anaranjado en el mapa 2021).

En los mapas presentados en la figura 20 es posible visualizar la distribución de las concentraciones en el área analizada, sin embargo, debido al elevado valor de concentración de Gd presente en el sitio STGO20-14, los demás sitios se ven “apantallados” por éste. Si bien hay varios valores anómalos positivos los cuales fueron mencionados anteriormente (de acuerdo al tratamiento estadístico-matemático realizado), dichos valores son menores al que presenta el sitio en cuestión, por lo que no son tan fácilmente visualizables.

Al igual que el resto de las tierras raras vistas anteriormente, el máximo de concentración en el año 2020 se establece en el punto 14, el cual desciende a concentraciones mínimas en el año 2021, lo que podría indicar algún evento específico que pudo haber provocado un máximo en el año 2020.





**Figura 19.** Línea base de Gadolinio 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de Gd normalizado-2021.

### 3.2.2.13. Iterbio (Yb)

De acuerdo con los resultados, es posible establecer que el 50% de los datos medidos de Yb para el año 2021 (datos que constituyen el background) se encuentran en el rango entre 0,05 y 0,122 mg kg<sup>-1</sup>, siendo 0,05 mg kg<sup>-1</sup> el valor que representa al background-Yb. Comparando los estadígrafos básicos obtenidos para ambos años analizados (tabla 5), es posible visualizar que las concentraciones registradas en el año 2021 si bien son menores que las que se observan en el año 2020, la diferencia en cada uno de los estadígrafos

calculados entre el año 2020 y 2021 se mantiene relativamente constante, evidenciándose una disminución poco significativa hacia el segundo año.

Según box-plot elaborado para este elemento, es posible observar que el BS (2021) responde a  $0,208 \text{ mg kg}^{-1}$ , por consiguiente, se registran 5 sitios que presentan concentraciones anómalas, tanto para el año 2020 como para el 2021.

De acuerdo con lo que puede visualizarse en el mapa 2021 de la figura 21, es posible apreciar que las mayores concentraciones de Yb se registran en el sector nor y suroeste del área de estudio. Por otra parte, en el mapa 2020 se puede visualizar sólo 1 punto que visualmente presenta mayores concentraciones, sin embargo, como en el año 2020 el máximo valor registrado es considerablemente más alto que el resto, sólo se muestra dicho punto en color rojo, no obstante, como se mencionó anteriormente, hay más sitios con concentraciones anómalas. Por otra parte, siguiendo con la tendencia de las tierras raras, sigue evidenciándose el peak ( $2,71 \text{ mg kg}^{-1}$ ) 2020 en el punto 14, presentando concentraciones mínimas ( $0,05 \text{ mg kg}^{-1}$ ) en el año 2021, aunque con sus mayores concentraciones hacia el borde occidental.



**Figura 20.** Línea base de Itrio 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de Yb normalizado-2021.

### 3.2.2.14. Itrio (Y)

De acuerdo con los resultados obtenidos de los estadígrafos básicos (tabla 5) es posible determinar que las concentraciones de Y desde el año 2020 al 2021 disminuyeron en aproximadamente un 50%, lo que puede visualizarse con la comparación de los rangos intercuartílicos que presenta cada año (en donde se concentra en 50% de los datos, no considerando aquellos datos anómalos), delimitados por los valores 1,06 y 1,59  $\text{mg kg}^{-1}$  y 0,516 y 0,918  $\text{mg kg}^{-1}$  para el año 2021. Otro estadígrafo básico importante es el BS, el

cual es igual a  $1,5 \text{ mg kg}^{-1}$  que, de acuerdo con su superación, es posible establecer la presencia de 5 sitios con concentraciones anómalas positivas para el año 2021, los cuales corresponden a los sitios 10, 3, 2, 15, 9. En cambio en el año 2020, el número de sitios con concentraciones que se consideran anómalas de acuerdo con el BS 2021 asciende a 10, los cuales hacen referencia a los sitios 2, 17, 35, 10, 9, 36, 21, 29, 12 y 20 (figura 22).



**Figura 21.** Línea base de Itrio 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de Y normalizado-2021.

### 3.2.2.15. Lantano (La)

Analizando los estadígrafos básicos (tabla 5), es posible apreciar que las concentraciones observadas en el año 2021 son aproximadamente dos o tres veces menores registradas en el año 2020. Lo anterior puede ser evidenciado con la comparación de los rangos intercuartílicos correspondientes a cada año, el cual se encuentra comprendido por los valores 0,949 y 2,06 mg kg<sup>-1</sup> para el año 2020 y 0,399 – 0,954 mg kg<sup>-1</sup> para el año 2021. De la misma forma, cabe mencionar que el BS es igual a 1,72 mg kg<sup>-1</sup>, lo que sería indicativo de la presencia de 3 sitios (2021) en donde las concentraciones serían consideradas como anomalías positivas; STGO21-2 (1,99 mg kg<sup>-1</sup>), STGO21-15 (2,91 mg kg<sup>-1</sup>) y STGO21-9 (3,3 mg kg<sup>-1</sup>) (figura 23). Asimismo, respecto a las concentraciones registradas en el año 2020, el recuento de sitios con concentraciones anómalas positivas asciende a 10, lo que se corresponde con el hecho de que las concentraciones en dicho año fueron el doble o el triple más altas que en el segundo año de muestreo (figura 23).



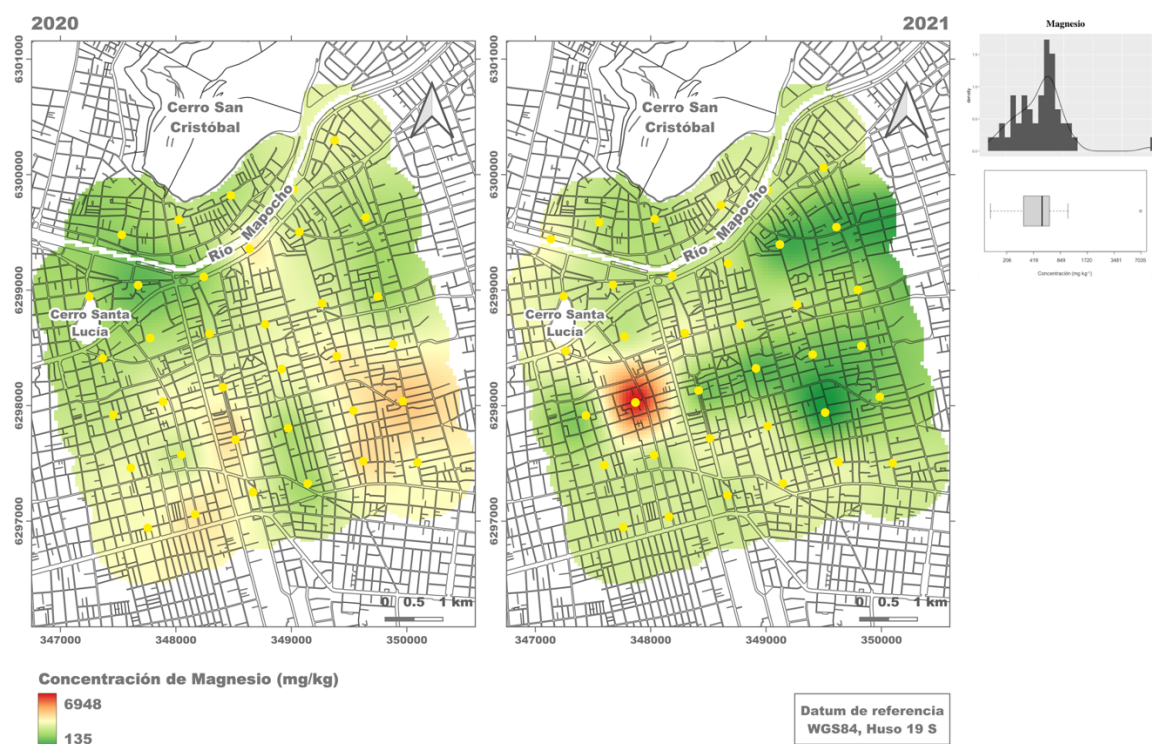
**Figura 22.** Línea base de Lantano 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de La normalizado-2021.

### 3.2.2.16. Magnesio (Mg)

De acuerdo con el box-plot elaborado para el Mg-2021, el valor background obtenido para este elemento corresponde a  $526 \text{ mg kg}^{-1}$ , en donde el 50% de las concentraciones (RIC) se centra en el rango  $321\text{--}643 \text{ mg kg}^{-1}$ , siendo su bigote superior (BS) igual a  $1035 \text{ mg kg}^{-1}$ . Por otra parte, según la comparación de los estadígrafos básicos correspondientes a los años 2020 y 2021, se puede establecer una similitud entre las concentraciones obtenidas en ambos años, ya que, si bien éstos no son iguales, la variación entre un año y

otro -en promedio- no supera los 300 mg kg<sup>-1</sup>, apreciándose una leve disminución en las concentraciones registradas en el año 2021 en prácticamente la totalidad del área analizada, respecto al año 2020.

Ahora bien, en la figura 24 se aprecia claramente un máximo de concentración (6948 mg kg<sup>-1</sup>) en el año 2021, correspondiente al sitio STGO21-10, el cual se trataría de un dato anómalo positivo dado que es un valor que supera considerablemente el BS obtenido en el análisis estadístico de los datos. Este valor es aproximadamente 3,4 veces mayor que el máximo valor registrado en el año 2020 (1931 mg kg<sup>-1</sup>, correspondiente al sitio 35).



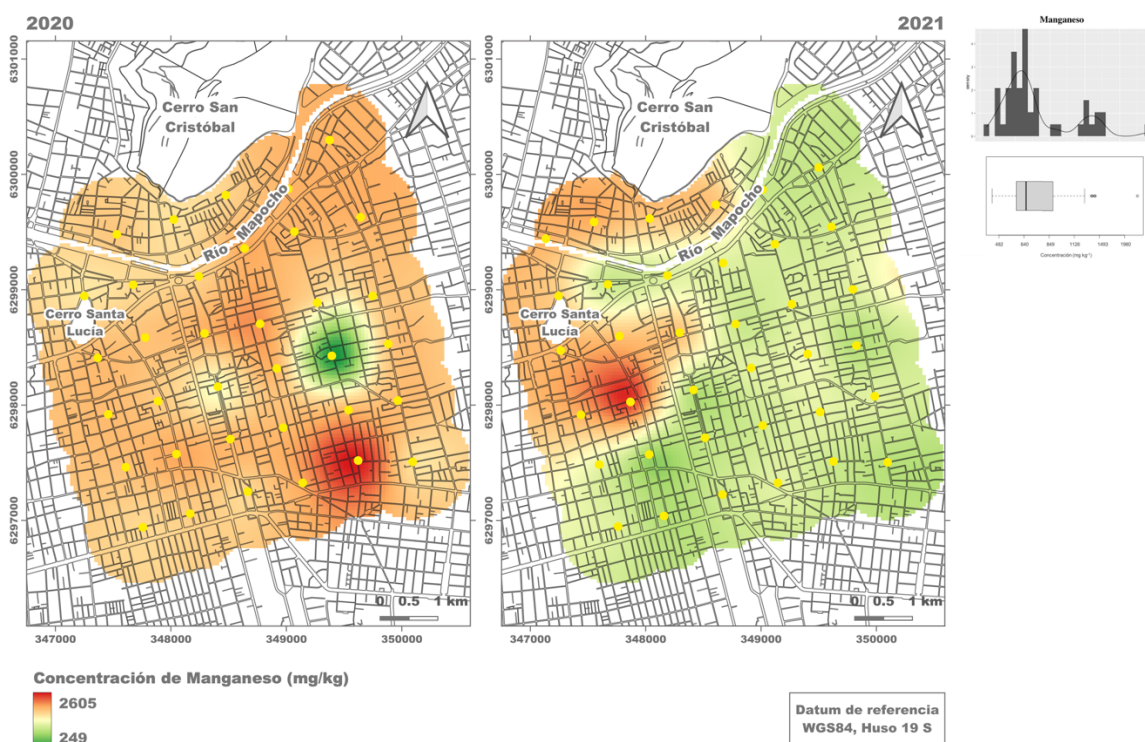
**Figura 23.** Línea base de Magnesio 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de Mg normalizado-2021.

### 3.2.2.17. Manganese (Mn)

De acuerdo con los resultados obtenidos (figura 25), el 50% de las concentraciones medias de Mn del año 2021 se encuentran en el rango comprendido entre 586-874 mg kg<sup>-1</sup>, en donde 660 mg kg<sup>-1</sup> corresponde al valor background-Mn considerando el tratamiento estadístico de los datos normalizados.

Como se puede apreciar en el box-plot 2021 (figura 25), el BS tiene un valor de 1264 mg kg<sup>-1</sup>; en consecuencia, los sitios STGO21-1, STGO21-3, STGO21-4, STGO21-7 y STGO21-10 (máximo) -los cuales presentan concentraciones mayores al BS- constituyen datos anómalos positivos. Por otro lado, se puede apreciar que las concentraciones registradas en el año 2020 son mucho mayores, exceptuando el valor mínimo (MIN 2020: 249 mg kg<sup>-1</sup>; MIN 2021: 447 mg kg<sup>-1</sup>). Comparando dichos valores con el BS del 2021, prácticamente el 50% de los datos registrados en el año 2020 constituyen anomalías geoquímicas positivas (17 de 35 sitios sobre el BS). Cabe destacar que los valores máximos que se registran en cada año son muy similares, sin embargo, el lugar geográfico en el que se presentan varía entre un año y otro.





**Figura 24.** Línea base de Manganeso 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de Mn normalizado-2021.

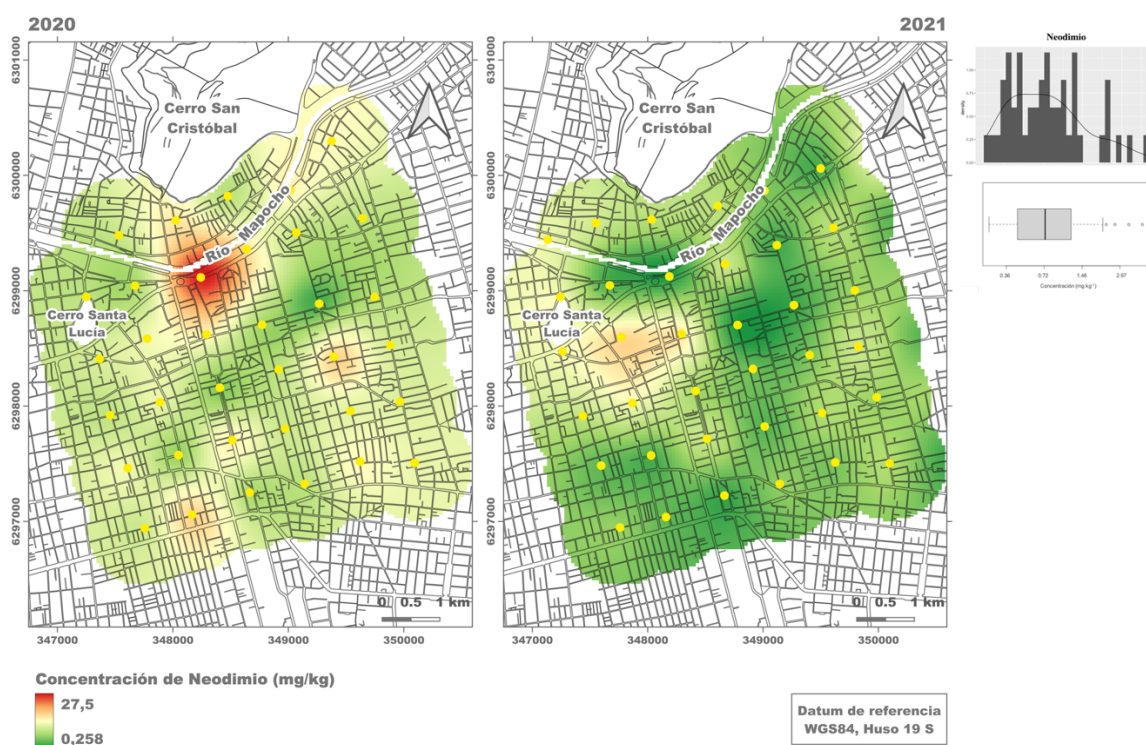
### 3.2.2.18. Neodimio (Nd)

Según los resultados obtenidos de los estadígrafos básicos (tabla 5) es posible determinar que hubo una disminución considerable en las concentraciones de Nd desde el año 2020 al 2021, lo que puede visualizarse con la comparación de los rangos intercuartílicos que presenta cada año, delimitados por los valores 1,12 y 2,86 mg kg<sup>-1</sup> para el año 2020 y 0,27 y 1,21 mg kg<sup>-1</sup>. Si bien en general la disminución de las concentraciones ronda el 50% aproximadamente, la disminución de las concentraciones del máximo del año 2020 al 2021 es superior al 80%, dado que en el primer año de muestreo se registra un peak de

concentración igual a  $27,5 \text{ mg kg}^{-1}$ , en cambio en el año 2021 sólo alcanzó concentraciones iguales a  $4,57 \text{ mg kg}^{-1}$ , evidenciándose una disminución sustancial respecto a las concentraciones máximas.

Otro estadígrafo básico importante es el BS, el cual corresponde a  $2,31 \text{ mg kg}^{-1}$ , y hace posible la identificación de 4 con concentraciones anómalas positivas. En cambio en el año 2020, el número de sitios con concentraciones anómalas asciende a 10 (figura 26).

El Nd sigue el mismo patrón que el resto de las tierras raras, en donde es posible identificar claramente el máximo de concentración en el sitio STGO20-14, presentando concentraciones considerablemente mayores al resto de los sitios.



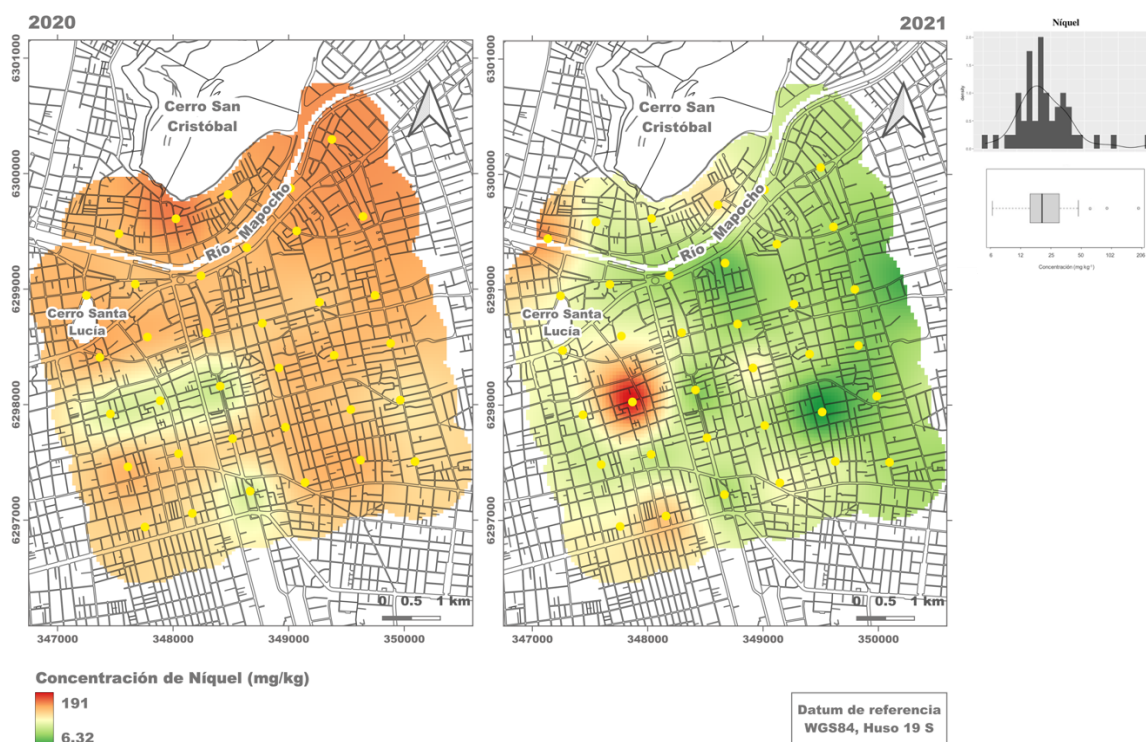
**Figura 25.** Línea base de Neodimio 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de Nd normalizado-2021.

### **3.2.2.19. Níquel (Ni)**

De acuerdo con los resultados obtenidos (figura 27) es posible visualizar que las concentraciones de Ni no superan los 200 mg kg<sup>-1</sup> en ambos años analizados. Si bien se puede apreciar que el máximo absoluto de concentración de Ni se manifiesta en el año 2021, lo que representa un incremento aproximado del 77% respecto máximo registrado en el año 2020, los resultados obtenidos para los estadígrafos básicos (tabla 4) indican que año 2021 presenta concentraciones mucho más bajas que las registradas en el año 2020.

Ahora bien, el 50% de los valores registrados para Ni en el año 2021 se encuentran en el rango comprendido entre 15,2 mg kg<sup>-1</sup> y 31,4 mg kg<sup>-1</sup>, en donde el bigote superior tiene un valor de 45,8 mg kg<sup>-1</sup> y el valor que representa el background-Ni sería igual a 20,5 mg kg<sup>-1</sup>. Dado el valor del BS, es posible identificar tres sitios con valores anómalos positivos para este elemento en el año 2021; el sitio STGO21-12 (62,6 mg kg<sup>-1</sup>), STGO21-1 (91,4 mg kg<sup>-1</sup>) y el sitio STGO21-10 (191 mg kg<sup>-1</sup>). Si bien en el año 2021 la abundancia de Ni disminuyó en prácticamente toda el área de estudio, el máximo absoluto se registra en dicho año, correspondiendo al sitio STGO21-10 mencionado anteriormente. En el caso de las concentraciones registradas en el año 2020, si se comparan con el valor del BS, considerando que todo aquel valor mayor al BS constituye un valor anómalo positivo, alrededor del 86% de los datos se considerarían como datos anómalos, pues sólo 5 sitios

de los 35 muestreados en ese año presentan concentraciones menores a  $45,8 \text{ mg kg}^{-1}$ , por lo que el Ni se encontraría masificado en toda el área de estudio para dicho año.



**Figura 26.** Línea base de Níquel Ni 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de Ni normalizado-2021.

### 3.2.2.20. Plomo (Pb)

Comparando los estadígrafos básicos obtenidos en ambos años de acuerdo con lo expuesto en la tabla 4, es posible visualizar una disminución sustancial en las concentraciones del año 2021 con respecto a las registradas en el 2020. Esto puede corroborarse con el RIC que presenta cada set de datos, el cual para el año 2020 se encuentra comprendido entre

los valores 97,3 – 328 mg kg<sup>-1</sup> y para el año 2021 por los valores 20,9 y 138 mg kg<sup>-1</sup>, siendo las concentraciones del año 2021 aproximadamente  $\frac{1}{3}$  de las registradas en el año 2020.

Prosiguiendo con los estadígrafos básicos, es relevante mencionar la gran diferencia que existe entre los valores mínimos registrados en cada año, siendo 28 mg kg<sup>-1</sup> en el año 2020 y 0,05 mg kg<sup>-1</sup> (en estricto rigor < LC) en el año 2021, lo que significa que la concentración más baja registrada en el año 2020 es aproximadamente 560 veces mayor que la del 2021. Por otra parte, si bien los datos registrados en el año 2021 en general son menores a los del 2020, el máximo absoluto se observa en el año 2021, el cual se registra en el sitio STGO21-1 y tiene un valor igual a 1721 mg kg<sup>-1</sup> constituyendo, junto a los sitios STGO21-28, STGO21-44, STGO21-19 y STGO21-22, sitios con concentraciones anómalas positivas, dado que exceden el valor del BS, el cual corresponde a 294 mg kg<sup>-1</sup> (figura 28).



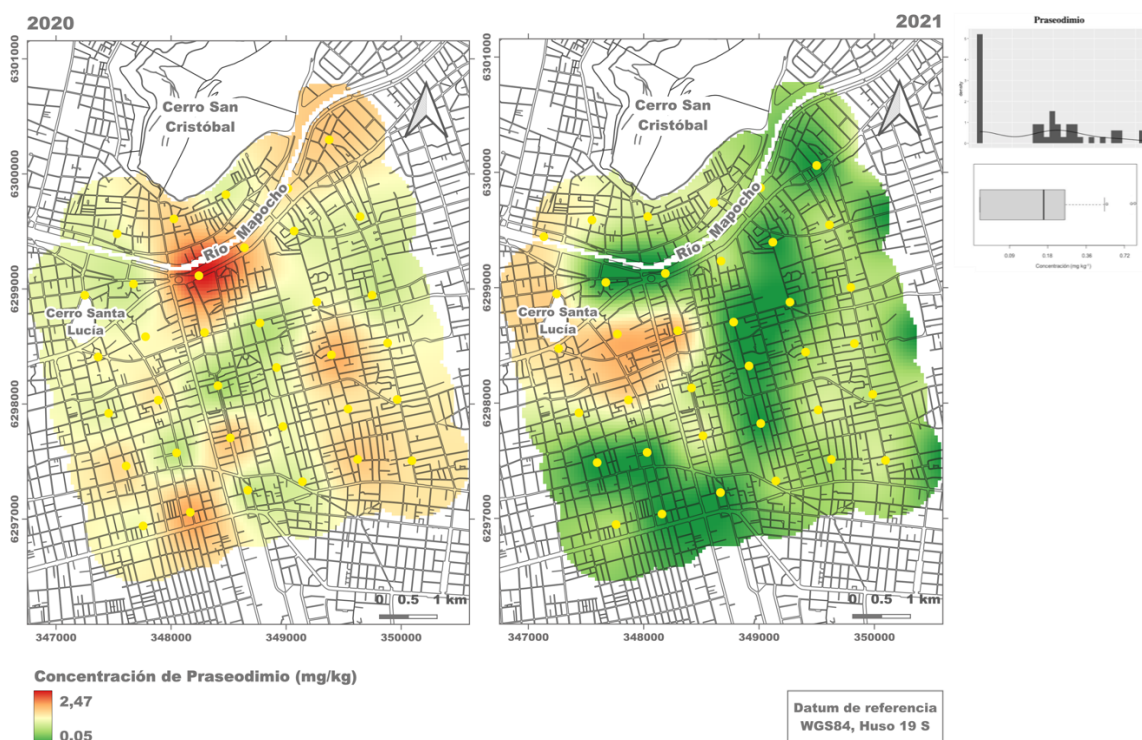
**Figura 27.** Línea base de Plomo 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de Pb normalizado-2021.

### 3.2.2.21. Praseodimio (Pr)

Según los resultados obtenidos (figura 29) para este elemento, se observa que las concentraciones registradas en ambos años son bastante bajas, sobre todo en el año 2021, observándose concentraciones no mayores a  $0,9 \text{ mg kg}^{-1}$  en dicho año. Lo anterior puede verificarse con los intervalos en donde se concentra el 50% de los datos de cada año, siendo  $0,259 \text{ mg kg}^{-1} - 0,531 \text{ mg kg}^{-1}$  para el año 2020, en cambio en el año 2021, los valores que delimitan el RIC son  $0,05 \text{ mg kg}^{-1}$  y  $0,249 \text{ mg kg}^{-1}$ .

De la misma forma, al momento de realizar el tratamiento estadístico de los datos y construir el box-plot (2021), se detectaron tres valores anómalos positivos ( $BS=0,535 \text{ mg kg}^{-1}$ ) en el año 2021 los cuales presentan concentraciones iguales a  $0,552 \text{ mg kg}^{-1}$ ,  $0,808 \text{ mg kg}^{-1}$  y  $0,812 \text{ mg kg}^{-1}$  (máximo), correspondientes a los sitios 2, 9 y 15, respectivamente. Asimismo, para el año 2020, en donde las concentraciones fueron mayores, es posible establecer un total de 8 sitios anómalos, correspondientes a los sitios 13 ( $0,608 \text{ mg kg}^{-1}$ ), 31 ( $0,66 \text{ mg kg}^{-1}$ ), 30 ( $0,665 \text{ mg kg}^{-1}$ ), 17 ( $0,68 \text{ mg kg}^{-1}$ ), 20 ( $0,868 \text{ mg kg}^{-1}$ ), 28 ( $0,868 \text{ mg kg}^{-1}$ ), 12 ( $0,986 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y 14 ( $2,47 \text{ mg kg}^{-1}$ ), siendo más visible en el mapa 2020 (figura 30) sólo el punto 14 por la diferencia de magnitud de concentración con el resto de los sitios.

Respecto al sitio 14, es interesante ver el cambio de concentración que se produce de un año a otro, lo que puede visualizarse con los mapas de la figura 30, pues en el año 2020 este sitio presentaba concentraciones iguales a  $2,47 \text{ mg kg}^{-1}$ , que de hecho fue la concentración máxima registrada en dicho año, sin embargo, hacia el año 2021 dicho sitio registró concentraciones mínimas, iguales a  $0,05 \text{ mg kg}^{-1}$ , que en estricto rigor fueron menores al límite de cuantificación, patrón evidenciado en la mayor parte de las tierras raras.



**Figura 28.** Línea base de Praseodimio 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de Pr normalizado-2021.

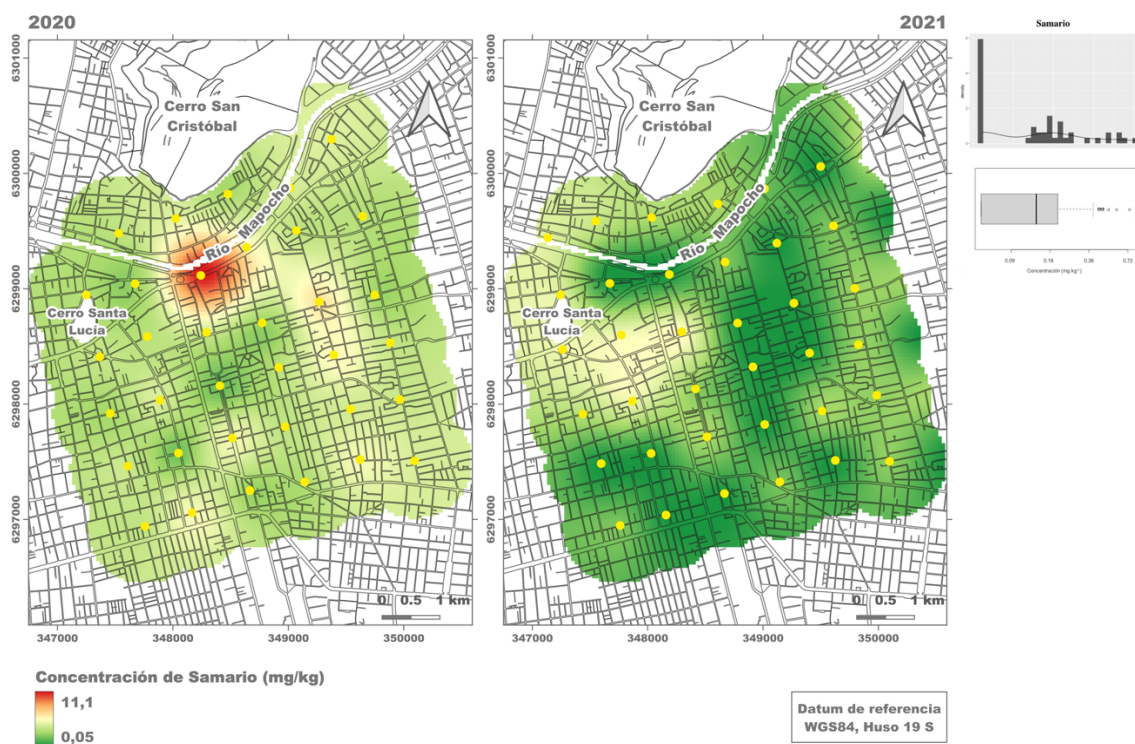
### 3.2.2.22. Samario (Sm)

Comparando los estadígrafos básicos obtenidos en ambos años (tabla 5), es posible visualizar que las concentraciones correspondientes al año 2021 son  $\frac{1}{2}$  o  $\frac{1}{3}$  las del 2020. Esto puede corroborarse con el RIC, el cual se encuentra delimitado por  $0,223 \text{ mg kg}^{-1}$  –  $0,446 \text{ mg kg}^{-1}$  para el año 2020 y por  $0,05 \text{ mg kg}^{-1}$  y  $0,203 \text{ mg kg}^{-1}$  para el 2021. Cabe mencionar que las escalas de concentraciones son independientes para cada año, por esta razón en el mapa del 2021, a simple vista, se ven sectores más enriquecidos por Sm, sin



embargo, las mayores concentraciones, como se mencionó anteriormente, se presentan en el año 2020.

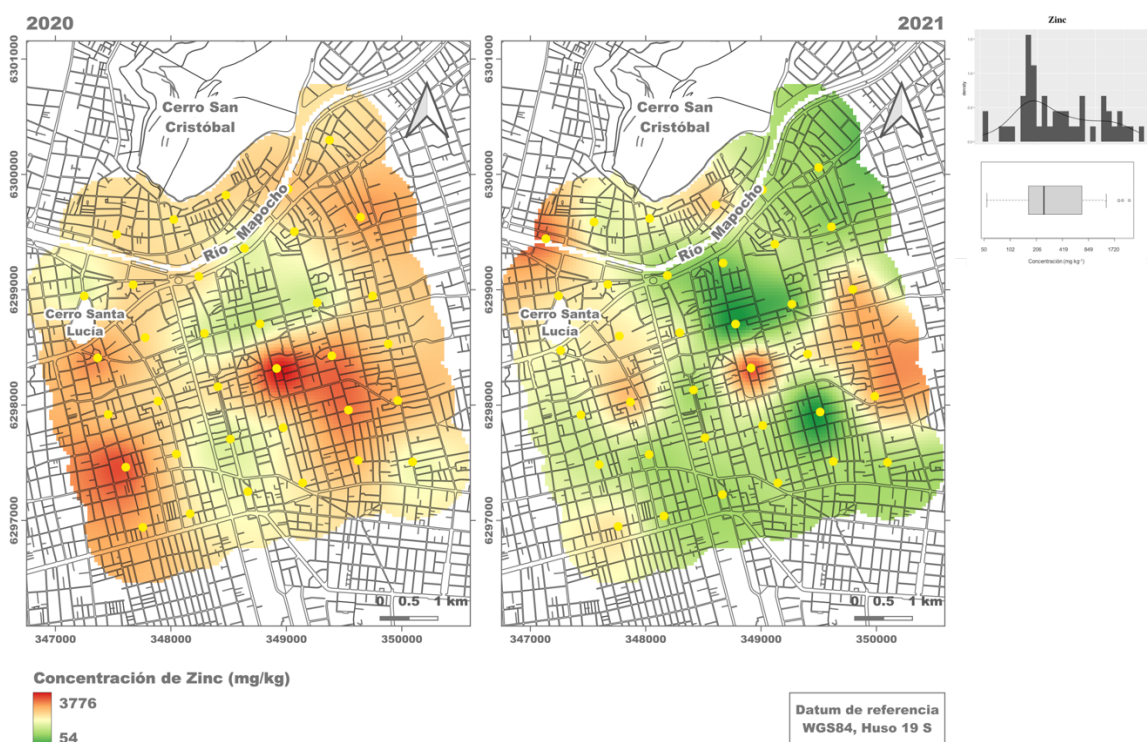
Ahora bien, de acuerdo con el BS calculado para el año 2021, el cual tiene un valor igual a  $0,389 \text{ mg kg}^{-1}$ , es posible establecer la presencia de 6 sitios anómalos para el año 2021 (figura 30) y un total de 12 sitios con concentraciones que superan el BS para el año 2020, sin embargo, en este caso se visualiza a simple vista solo el punto 14 ya que presenta una concentración considerablemente mayor que el resto de los datos.



**Figura 29.** Línea base de Samario 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de Sm normalizado-2021.

### 3.2.2.23. Zinc (Zn)

De acuerdo con los resultados obtenidos (figura 31), el 50% de las concentraciones registrados en el año 2021 se encuentran en el rango comprendido entre 165 y 794 mg kg<sup>-1</sup>, siendo 264 mg kg<sup>-1</sup> el valor background-Zn y 1534 mg kg<sup>-1</sup> el valor correspondiente al BS. De acuerdo con lo anterior, en el año 2021 es posible identificar 2 sitios en donde las concentraciones se consideran como valores anómalos -dado que superan el valor BS-, los cuales tienen concentraciones iguales a 2086 mg kg<sup>-1</sup> y 2476 mg kg<sup>-1</sup>, los cuales corresponden a los sitios STGO21-1 y STGO21-22, respectivamente. Por otra parte, considerando el valor BS, es posible establecer que en el año 2020 la cantidad de sitios con concentraciones anómalas positivas ascendería a 5, las cuales son iguales a 1610 mg kg<sup>-1</sup>, 1826 mg kg<sup>-1</sup>, 2022 mg kg<sup>-1</sup>, 2544 mg kg<sup>-1</sup> y 3776 mg kg<sup>-1</sup>, correspondientes a los sitios STGO20-3, STGO20-28, STGO20-29, STGO20-5 y STGO20-22. Conforme a lo anterior y según lo expuesto en la figura 31, es posible visualizar que la concentración máxima para cada uno de los años analizados se encuentra en el sitio 22, comportamiento que de igual forma se ve reflejado en el Cu, lo que podría estar indicando una asociación o enriquecimiento común de estos elementos.



**Figura 30.** Línea base de Zinc 2020 y 2021 junto al box-plot e histograma de Zn normalizado-2021.

### 3.3. DETERMINACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN

De acuerdo con el análisis estadístico de los datos para la obtención del background de cada elemento (tabla 6), fue posible determinar algunos indicadores de contaminación, los cuales se muestran a continuación.

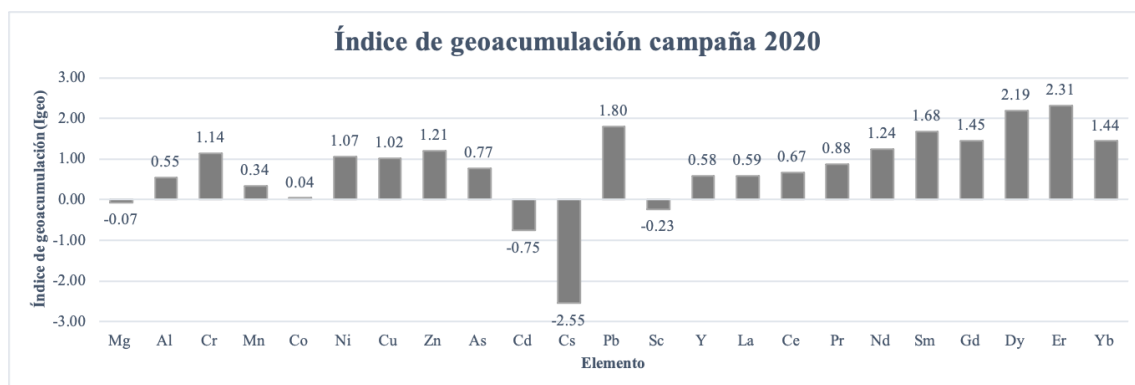
#### 3.3.1. Niveles de contaminación por elemento

A continuación, se presentan los distintos índices de contaminación referentes a los elementos analizados, los cuales fueron descritos en el capítulo de metodología. Cabe

mencionar que como las muestras fueron tomadas a una profundidad de 0 – 5 cm, todos los indicadores que se presentan a continuación corresponden a esa profundidad.

### 3.3.1.1. Índice de geoacumulación ( $I_{geo}$ )

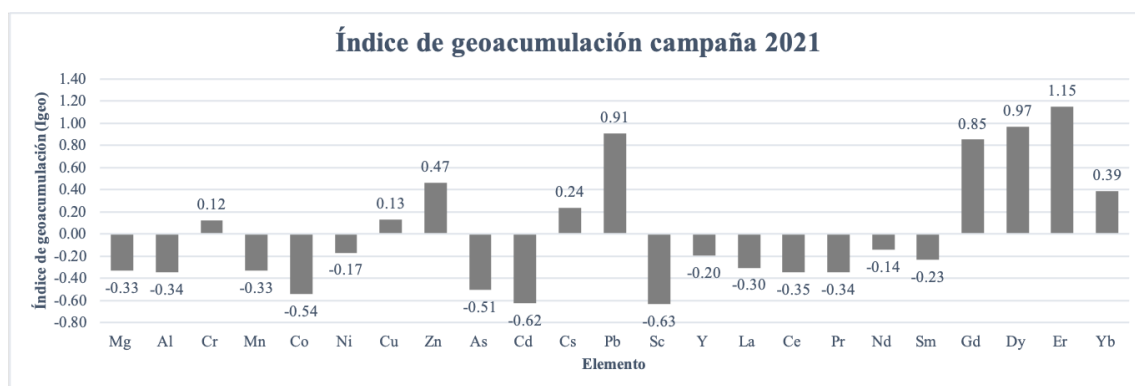
Según los resultados obtenidos para la campaña 2020 (figura 32), se puede apreciar que aproximadamente el 83% de los elementos muestreados presentan un índice de geoacumulación superior a 0. Como se puede visualizar en la figura 32, los elementos que integran el grupo de las tierras raras son aquellos que presentan un mayor  $I_{geo}$ , especialmente Dy y Er (2,19 y 2,31, respectivamente), junto al Pb (1,80).



**Figura 31.** Índice de geoacumulación ( $I_{geo}$ ) obtenido para los elementos de las muestras 2020.

Asimismo, se obtuvo el  $I_{geo}$  para los elementos de las muestras 2021, los cuales pueden visualizarse en la figura 33. De acuerdo con los resultados obtenidos, es posible visualizar un cambio considerable con respecto al año anterior, pues en el 2021 más de un 60% de los elementos analizados presentan un  $I_{geo}$  inferior a 0, en cambio en el 2020 el porcentaje de elementos con un  $I_{geo} < 0$  solo alcanza el 17%. Respecto a las tierras raras, el Dy (0,97)

y Er (1,15) si bien, también disminuyen sus concentraciones, respecto al año 2020, siguen siendo los elementos que presentan el  $I_{geo}$  más alto, indicando desde una moderada a una fuerte contaminación.



**Figura 32.** Índice de geoacumulación ( $I_{geo}$ ) obtenido para los elementos de las muestras 2021.

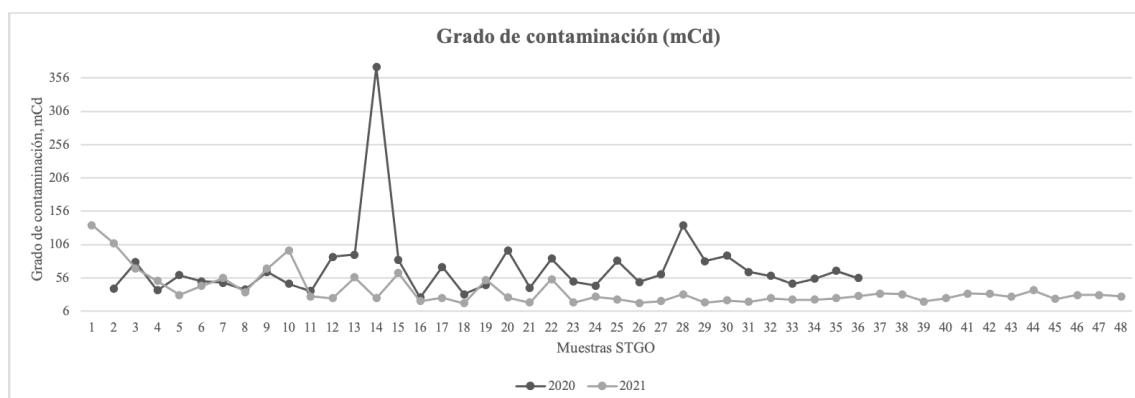
### 3.3.2. Zonificación de la contaminación en el área de estudio

Los indicadores de contaminación vistos anteriormente son determinados para cada elemento estudiado, a continuación, se presentan los resultados obtenidos de los indicadores de contaminación que hacen referencia al grado de contaminación de cada sitio muestreado.

#### 3.3.2.1. Análisis Grado de Contaminación (mCd)

En la figura 34 se muestran los resultados obtenidos para los distintos sitios de muestreo de ambas campañas de muestreo. Si bien el comportamiento entre un año y otro es relativamente similar, el año 2021 presenta valores levemente menores. Es importante hacer notar el elevado valor anómalo ( $> 356$ ) en el punto STGO20-14, localizado en sector

suroeste del parque Balmaceda, en las inmediaciones de la Plaza Italia, frente a Avenida Providencia y Distrito Movistar Chile (Torre Telefónica) y la correlación entre el valor anómalo presentado en el sitio STGO20-14 con las elevadas concentraciones que presentan las tierras raras precisamente en dicho sitio, ya que probablemente el grado de contaminación (mCd) responda a gran parte de estos elementos y por esta razón presente un índice tan alto en aquel sitio. De acuerdo a estos resultados, el 100% de los sitios muestreados en 2020 presentan un grado de contaminación alto y en el caso del 2021, estas se encuentran en un grado de contaminación considerable y alto.



**Figura 33.** Grado de contaminación (mCd) obtenido para los distintos sitios muestreados, tanto para el año 2020 como 2021.

## IV. DISCUSIÓN

### 4.1. PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS

#### 4.1.1. pH

El pH del suelo determina el grado de adsorción de iones  $H^+$  por las partículas del suelo e indica si éste es ácido o alcalino. Además, tiene un efecto sobre la disponibilidad de la mayoría de los elementos traza metálicos al afectar el equilibrio entre la especiación metálica, solubilidad, adsorción e intercambio de iones en el suelo (Kabata-Pendias, 2000; McBride et al., 1997; Reichman, 2002).

El pH es de gran relevancia para la adsorción específica, fenómeno de alta afinidad que involucra mecanismos de intercambio entre el metal y el ligando de la superficie de los coloides a través de enlaces covalentes o iónicos. Lo anterior define la capacidad de adsorción del suelo frente a determinados cationes en concentraciones superiores a su Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) (Alloway, 2013; Phillips, 1999).

Ahora bien, según los resultados obtenidos (figura 7), la mayor cantidad de sitios muestreados, tanto para el año 2020 como para el 2021, presenta un pH neutro (6,6 – 7,3) o ligeramente ácido (6,1 – 6,5) de acuerdo con las categorías explicitadas en el ANEXO 4A, los cuales tienen efectos tóxicos mínimos en el caso del pH neutro y adecuados para la asimilación de nutrientes en el caso del pH ligeramente ácido.

Asimismo, es posible apreciar un sitio anómalo, el cual se encuentra fuera del rango tendencial, este punto se trata de la muestra STGO20-13, el cual presentaba un valor de pH igual a 5,4 y, de acuerdo con las categorías que se explicitan en el ANEXO 4A, se trataría de un suelo fuertemente ácido. Entre las descripciones de este sitio al momento de

muestrear se encuentran que corresponde a un suelo compacto sin vegetación, el cual podría presentar este bajo valor de pH (comparado al resto de los sitios muestreados) debido a la presencia de orina que se evidenció al momento del muestreo (olor). Si bien la orina puede presentar un amplio rango de pH, podría ser la causante del pH cercano a 5,5 que presenta la muestra en cuestión.

#### **4.1.2. Conductividad eléctrica**

De acuerdo con los indicadores fisicoquímicos, como la CE, se observó una notoria diferencia entre los años 2020 y 2021, con valores más altos durante el 2020 (máximo 6,69; correspondiente al sitio STGO20-19). Entre octubre de 2019 y enero de 2020, la zona de estudio fue altamente impactada por diversas fuentes, tales como, el aumento de flujo de personas, la quema de neumáticos y uso de gas lacrimógeno, entre otras debido al estallido social efectuado en dicho período, las cuales habrían contribuido con el ingreso de diversas sustancias al suelo, pudiendo alterar la capacidad conductora del mismo. En este contexto, el uso de gas lacrimógeno fue ampliamente utilizado como agente antidisturbios. La composición típica de este gas en su formato pirotécnico consiste en un 45% de agente clorobenzilideno malonitrilo (CS), 30% de clorato de potasio, 14% de resina epóxica, 7% de anhídrido maleico, 3% de anhídrido metilnádico y 0,03% de balance residual mixto (Rothenberg et al., 2016), lo que estaría contribuyendo a la cantidad de



sales que ingresarían al sistema suelo. De acuerdo con lo descrito en el artículo “TOXICITY AND HEALTH EFFECTS OF ORTHOCHLORO-BENZYLIDENE-MALONONITRILE (CS GAS)” (Zucchetti y Testoni, 2017), el CS suele estar micronizado y mezclado con un antiaglomerante o tratado con una silicona hidrófuga (formulaciones conocidas como CS1 y CS2, respectivamente), que en algunos casos puede permanecer activo durante días o semanas cuando se espolvorea o cae al suelo (Zucchetti y Testoni, 2017). Esto último es lo que podría haber determinado aquellos niveles de CE presentados en ese período, sumado a la permanencia de estos compuestos en el suelo.

Es importante destacar el estudio realizado por Forensic Architecture “Gases lacrimógenos en Plaza de la Dignidad” (Tear Gas in Plaza de la Dignidad) (Forensic Architecture, 2020), el cual realiza una modelación 3D de la arquitectura de la nube de gas lacrimógeno según las ubicaciones de los cartuchos utilizados en el contexto de estallido social (2019-2020). El estudio indica que en dicho período la dirección del viento era de suroeste a noreste a través de la rotonda de plaza Italia, facilitando el transporte de las partículas de CS hacia dicha zona, siendo depositadas en el suelo y en el Río Mapocho, en donde se incluye una extensa zona al norte del Río Mapocho, (Avenida Santa María al este de Pio Nono), donde se encuentra el sitio de la muestra STGO20-19, el cual

presenta los mayores valores de CE para el año 2020. De acuerdo a lo anterior, es posible establecer preliminarmente una correlación con lo descrito en el estudio y la presencia de los elevados valores de CE asociados principalmente al máximo de CE referido al sitio STGO20-19 (6,69 mS/cm), así como al segundo valor más alto identificado en el año 2020, el sitio STGO20-27 (6,45 mS/cm).

Posteriormente, de acuerdo a los resultados obtenidos en la campaña 2021 es posible establecer que los valores fueron mucho menores y “constantes” en la totalidad de los puntos de muestreo, categorizándose como no salinos de acuerdo con la tabla presente en el ANEXO 4B, pues presentaban valores menores a 2 dS/m, lo que podría estar relacionado al poder auto depurativo del suelo y el efecto pandemia (julio, 2020; comienzo de restricciones), debido a las restricciones de movilidad impuestas por el gobierno.

#### **4.2. DISTRIBUCIÓN Y DINÁMICA DE LOS ELEMENTOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO**

La elaboración de la línea base permitió identificar diferencias en la distribución y concentración de los elementos químicos analizados. Dentro de los PHE, es posible encontrar al As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn los cuales presentaron concentraciones considerablemente altas en el año 2020 en relación a las del año 2021, presentándose una

disminución para este último año del 65,4%, 5,8%, 41,9%, 12,9%, 25,7%, 49% y 26,6%, respectivamente.

La dinámica de los metal(oid)es en los suelos que puede justificar el aumento o disminución de los mismos puede seguir principalmente 3 vías: i) el transporte, ii) la adsorción y iii) la asimilación (por organismos vivos). En este caso es posible hacer referencia a las dos primeras, dado que no hubo ningún análisis asociado asimilación por organismos vivos.

El transporte de estos metales y metaloides, el cual puede llevarse a cabo de manera vertical (lixiviación) u horizontal (escorrentía), en el caso de este estudio podría estar relacionado principalmente a la pluviometría, pues considerando que la primera campaña de muestreo fue realizada en enero-febrero de 2020, una posible causa de esta acumulación de los elementos en la campaña realizada el mismo año, podría estar relacionada al déficit de precipitaciones anuales registrado en el año 2019, el cual superó el 80% en buena parte de la zona central de Chile ((CR)2, 2020), pues aquello hace más complejo el transporte de este elemento a través del perfil suelo, produciéndose una acumulación en los primeros cm de éste. Según los registros anuales de precipitación, éstas aumentaron considerablemente el año 2020, después del periodo de muestreo (enero-febrero), principalmente a partir de junio-julio de ese año (Dirección

Meteorológica de Chile, 2021) y del 2021 (enero, junio y agosto principalmente) (Dirección Meteorológica de Chile, 2022), favoreciendo principalmente el transporte vertical de estos elementos lo que es consistente con la textura (cualitativa) principalmente arenosa de las muestras analizadas. Debido a lo anterior, el espacio interporal facilitaría en gran medida el transporte de los elementos, sobre todo si se generan caminos preferenciales en el perfil del suelo, dificultando así la retención o adsorción de los metales en las partículas del suelo. Es por esto que la presencia de precipitaciones sumado a la granulometría asociada a estos suelos propiciaba el transporte de los mismos, resultando en una disminución visible de las concentraciones de las distintas campañas de muestreo. Ahora bien, la adsorción de estos metales y metaloides está asociada a procesos químicos mediante la formación de un complejo de esfera externa o mediante la pérdida de la esfera de hidratación, formando un complejo de esfera interna. La formación de éstos está determinada por i) la naturaleza del metal (en general, a mayor valencia del metal ( $n$ ) y mayor radio ( $r$ ), por ende a un radio hidratado menor ( $r_H$ ), considerando  $n$  constante), ii) relación suelo/óxido: mayor sitios con carga negativa [ $S^-$ ] aunque depende del tipo de sitio (composición, repulsión con  $S^+$ ), iii) solución: pH básico, ya que  $H^+$  compite con otros cationes por  $S^-$  y iv) el contenido de MO del suelo, ya que la adsorción se favorece a un %MO mayor dado que hay más  $S^-$  (Sparks, 2003).

En los procesos de adsorción de solutos desde la solución suelo se ven involucradas fuerzas tanto físicas como químicas. Las primeras, incluyen las fuerzas de Van der Waals (p.ej. la partición) y los complejos electrostáticos de la esfera exterior (p.ej. el intercambio de iones). Por otra parte, las fuerzas químicas resultantes de las interacciones de corto alcance incluyen la complejación de la esfera interna, que implica un mecanismo de intercambio de ligandos, enlaces covalentes y enlaces de hidrógeno (Sparks, 2003). Cabe destacar que los mecanismos de adsorción de metales y oxianiones es dependiente de la naturaleza de éstos, del pH y sorbente, por ejemplo, a pH 6,5 el Cu (II) es adsorbido en Boehmita mediante mecanismos de esfera interna (Sparks, 2003), los cuales corresponden a un complejo que no implica ninguna molécula de agua intermedia, por ende se forman uno o más enlaces directos entre el ion adsorbido y los átomos de la superficie del coloide reteniéndose con mayor fuerza dada la naturaleza del enlace que se forma. No obstante, la dinámica de estos metales es mucho más compleja y depende de diversos factores y parámetros, por lo que se recomienda determinar el contenido de materia orgánica (MO), textura (de forma cuantitativa) y potencial redox (Eh), para poder describir de una forma más íntegra y detallada la dinámica de estos elementos al ingresar al sistema suelo.

#### 4.3. INDICADORES DE CONTAMINACIÓN

Con respecto a los índices de contaminación determinados en los suelos urbanos analizados, se debe tener presente que existe una alta probabilidad de que los suelos sean alóctonos y no presenten una relación genética con el material parental del área de estudio de la cuenca de Santiago. Este material parental correspondería a depósitos de gravas y arcillas que gradan de una granulometría gruesa a más fina de este a oeste (SERNAGEOMIN, 2003). En este sentido, la discusión relacionada a anomalías geoquímicas, que dice relación con concentraciones naturales anómalas, no aplica, al desconocerse el lugar donde el suelo se ha formado de modo *in situ*. La determinación de los índices de niveles de contaminación ha sido posible definirla en función del valor background obtenido para cada elemento en el capítulo 3.2.1.1. De acuerdo con los resultados calculados, La mayoría ( $\approx 83\%$ ) de los elementos correspondientes al año 2020 presentan un  $I_{\text{geo}} > 0$ , lo que sería indicativo de contaminación, en donde la mayor cantidad de elementos presentó un  $I_{\text{geo}}$  entre 1 y 2, indicativo de un grado de contaminación moderado. En el año 2020, específicamente las tierras raras, alcanzaron niveles de contaminación de moderados a fuertes, situación que no se presenta en el año 2021. Este último año, muestra un mCd anómalo, determinado en el sitio STGO20-14, el cual se encuentra muy cercano a Plaza Italia, lugar muy intervenido, sobre todo a fines del 2019

e inicios del 2020, dado el conflicto social que se llevó a cabo en dicho periodo. El detalle de la categorización de los sitios según valor de  $I_{geo}$  y  $mCd$  se encuentra en el ANEXO 6A y 6B, respectivamente.

#### **4.4. TOXICIDAD Y POSIBLES FUENTES**

A continuación, se presentan antecedentes bibliográficos relativos a la toxicidad de los elementos PHEs y se discute en base a los mismos antecedentes y otros, sobre el origen de estos. Específicamente, se abordan las posibles fuentes que podrían explicar los  $I_{geo}$  de aquellos elementos que presentaron valores  $> 1$ , correspondientes a: Cr, Cu, Ni, Pb y Zn, considerados como elementos nocivos y preocupantes en materia de salud humana y ambiental. Aunque, el arsénico y el cadmio no presentan un  $I_{geo} > 1$ , ambos han sido considerados, debido a la importancia de su presencia y daño potencial en el medio ambiente.

Si bien del total de los elementos analizados, las tierras raras corresponden al grupo que presenta el  $I_{geo}$  más alto en ambos años de análisis, con las mayores concentraciones observadas el año 2020, no existen antecedentes sobre límites aceptables y niveles de toxicidad de estas, a pesar de que existen diversos estudios (Valdés et al., 2013), que relacionan algunas de ellas (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd, Dy y Er) a fuentes contaminantes.

Por lo anterior, seguidamente se describen solo los elementos correspondientes a As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn.

#### **4.4.1. Arsénico (As)**

El As es uno de los metaloides más tóxicos presentes en el medio ambiente siendo parte de un grupo de 17 elementos traza encontrados en suelos que se consideran como muy tóxicos (Delgado et al., 2014). De estos elementos se desprende otro grupo más exclusivo que considera diez de ellos, incluido el As, que son fácilmente movilizados por la actividad humana en proporciones que exceden en gran medida la de los procesos geológicos (Novotny, 1995). No obstante, es considerado dentro de las toxinas esenciales porque se requiere en pequeñas cantidades para el crecimiento y el metabolismo (Krumova et al., 2008).

Las principales fuentes de contaminación de arsénico por causa humana son la quema de carbón y la fundición de metales industriales y, más recientemente, la industria de semiconductores y la liberación de minerales ricos en arsénico durante la extracción minera de otros compuestos (Mukhopadhyay et al., 2002). Diversos estudios (Artaxo et al., 1999; Kavouras et al., 2001; Romo-Kroger et al., 1994) indican que estas fuentes se encuentran presentes en la ciudad de Santiago, las cuales se relacionan con la presencia de As. Asimismo, es importante mencionar que existen fuentes naturales de arsénico,



como por ejemplo las zonas mineralizadas de alteración hidrotermal, las cuales han sido reconocidas en la alta cordillera del Elqui (Distrito el Indio), en la Región de Coquimbo (Guevara et al., 2006) y aquellas zonas mineralizadas del Estero yerba Loca en el curso superior de la Cuenca del Río Mapocho (AngloAmerican, 2019).

#### **4.4.2. Cadmio (Cd)**

El Cd es un elemento relativamente escaso en la litósfera, que por afinidad química se encuentra junto al Zn en proporciones muy variables. También, es uno de los mayores agentes tóxicos asociado a la contaminación ambiental e industrial, ya que la variedad de usos y su larga vida media no permiten su reciclaje, lo que posibilita que se acumule progresivamente en el ambiente (Ramírez, 2002). Algunos de los usos y aplicaciones del Cd presentes en el área de estudio (Valdés et al., 2013) sus compuestos son: como pigmento de pinturas, esmaltes, plásticos, textiles, vidrios, tintas de impresión, caucho; en la producción de pilas de Cd-Ni; como estabilizador de termoplásticos (como el PVC); como endurecedor de ruedas y llantas de automóvil; en la fabricación de fotoconductores y células solares fotoeléctricas, entre otros. Otras fuentes están relacionadas a la incineración de residuos de madera, carbón o plásticos; la combustión de aceites y gasolina, entre otros (Ramírez, 2002). Existen antecedentes sobre la existencia de estas fuentes en el área de estudio (Valdés et al., 2013).

#### 4.4.3. Cobre (Cu)

La absorción del cobre es necesaria, ya que el Cu es un elemento traza que es esencial para la salud de los humanos. Aunque los humanos pueden tolerar concentraciones de cobre proporcionalmente altas, mucho cobre puede también causar problemas de salud (Greenwood & Earnshaw, 1997; Wright, 2003).

La mayoría de los compuestos del cobre se depositarán y se enlazarán tanto a los sedimentos del agua como a las partículas del suelo. Compuestos solubles del cobre forman la mayor amenaza para la salud humana. Usualmente compuestos del cobre solubles en agua ocurren en el ambiente después de liberarse a través de aplicaciones en la agricultura (Greenwood y Earnshaw, 1997; Wright, 2003).

Algunas fuentes antropogénicas de este elemento que son significativas e importantes de mencionar, son la actividad minera, la deposición atmosférica, incluso lo es el cobre procedente de los frenos de los automóviles (Tortosa, 2019).

Asimismo, las fuentes antropogénicas de Cu pueden agruparse de acuerdo con las principales actividades industriales: centrales de energía, industrias químicas, refinerías de petróleo, metalurgia y actividades mineras. El yacimiento, El Teniente, y su fundición de cobre (Caletones), se ubican a 90 km al sur de Santiago. Por otro lado, en la región de Valparaíso se encuentran dos fundiciones más, Ventanas (119 km al noroeste de Santiago)

y Chagres (98 km al noroeste de Santiago), las que en su conjunto generan emisiones de metales volátiles (Cu, Zn, As, Mo y Pb) que afectan a la zona central de Chile (Gallardo et al., 2002; Garcia-Huidobro et al., 2001; Kavouras et al., 2001) y por lo tanto, podrían estar impactando los suelos urbanos estudiados por deposición seca y húmeda.

#### **4.4.4. Cromo (Cr)**

De acuerdo con una clasificación de la Environmental Protection Agency (EPA), el cromo está incluido en una lista de contaminantes prioritarios en donde se encuentran otros doce elementos traza: Sb, As, Be, Cd, Cu, Hg, Ni, Ag, Pb, Se, Tl, Zn (Galán H. & Romero B., 2008). Las fuentes antropogénicas de Cr presentes en el área de estudio están asociadas a los procesos de combustión de combustibles fósiles, principalmente de petróleo (Morata et al., 2008; Valdés et al., 2013) pero también mediante la quema de gas natural (ATSDR, n.d.).

#### **4.4.5. Níquel (Ni)**

El contenido total de Ni en el suelo depende en gran medida del contenido en la roca madre de este, sin embargo, la concentración de Ni en la corteza superficial puede reflejar el impacto tanto del proceso de formación del suelo como de la contaminación (Adriano, 2001; Kabata-Pendias, 2011; Kabata-Pendias & Mukherjee, 2007; Sherameti & Varma, 2010).

Algunas de las fuentes antropogénicas de este metal son: fábricas de ácido sulfúrico, cerámica, trabajos con acero (acerías), fabricación de baterías, catalizadores (principalmente en la producción de aceite combustible) y en procesos de eliminación de residuos, como incineración, entre otros (Alloway, 2013).

Prácticamente la totalidad de los compuestos de Ni que sean liberados al ambiente se absorberán en los sedimentos y partículas de suelo, llegando a inmovilizarse, aumentando su movilidad en suelos ácidos (Greenwood & Earnshaw, 1997; Lide et al., 2008). Al respecto, existen antecedentes sobre la existencia de estas fuentes antropogénicas señaladas arriba, en el área de estudio (Artaxo et al., 1999; Kavouras et al., 2001; Valdés et al., 2013).

#### **4.4.6. Plomo (Pb)**

El plomo es un metal altamente tóxico que se encuentra de forma natural en la corteza terrestre. Una de las fuentes antropogénicas más comunes de Pb son los motores de los vehículos, donde el plomo es quemado generándose sales de Pb (cloruros, bromuros y óxidos) (Greenwood & Earnshaw, 1997; Lide et al., 2008).. Estas sales ingresan al ambiente a través de los tubos de escape de los automóviles, las cuales posteriormente serán depositadas en el suelo (Greenwood & Earnshaw, 1997; Lide et al., 2008).

Según la Organización Mundial de la Salud (WHO, por sus siglas en inglés), el Pb está presente en baterías de plomo-ácido, materiales de plomería, cables de revestimiento, pinturas, municiones, gasolina y sus aditivos, tabaco, entre muchos otros (WHO, 2019). Existen estudios publicados que indican la presencia de Pb proveniente de estas fuentes presentes en el área de estudio (Artaxo et al., 1999; Kavouras et al., 2001; Moreno et al., 2007; Valdés et al., 2013).

#### **4.4.7. Zinc (Zn)**

Este elemento se encuentra presente en diversos minerales, ya sea en forma de sulfuro (blenda o esfalerita de zinc, ZnS y marmatita, (FeZn)S), silicato (calamina), óxido (cincita) y carbonato (smithsonita). Asimismo, la producción de Zn proviene principalmente de las regiones de Aysén y Metropolitana de Santiago, correspondiendo a finos contenidos en concentrados de Zn y Pb (SERNAGEOMIN, 2021).

De acuerdo con la literatura, los usos más importantes asociados a este metal son las aleaciones y el recubrimiento protector de otros metales como hierro o acero - denominados galvanizados-, para evitar la oxidación.

Cakmak et al. (2009) encontraron que la principal fuente antropogénica de Zn es la combustión de petróleo, mientras que Hedberg et al. (2005) junto a Kavouras et al. (2001) relacionaron el Zn así como el Cu, con las fundiciones de cobre (Cakmak et al., 2009;

Hedberg et al., 2005; Kavouras et al., 2001), las cuales al igual que el Cu, se encontrarían posiblemente impactando los suelos del área de estudio.

#### **4.5. COMPARACIÓN CON NORMATIVA INTERNACIONAL**

Dado que Chile, en la actualidad no cuenta con una normativa de suelos, los resultados obtenidos en el presente estudio, correspondientes los estadígrafos de cada variable, fueron contrastados con la normativa de Canadá y Holanda, ya que la ley General de Bases de Medio Ambiente, establece que, en el supuesto de la ausencia de normativa nacional, se debe consultar con aquellos países que cuenten con características similares a las estudiadas. Uno de los criterios de selección fue la exigencia de la normativa que, en el caso de Canadá y Holanda, presentan una de las normativas más exigentes, en comparación con otras normas internacionales. A lo anterior se suma el hecho de que Canadá, al igual que Chile, sustenta su economía en la actividad minera, asociada a altos índices de protección ambiental. Esta norma considera tres tipos de suelos (residencial/parque, comercial e industrial) con los cuales fueron comparados los suelos urbanos de este estudio. Así mismo, la norma holandesa fue seleccionada debido a que presenta criterios íntegros que contemplan i) el valor objetivo el cual considera los niveles en los cuales existe una calidad de suelo sostenible y ii) el valor de intervención, indicativo del nivel sobre el cual las propiedades funcionales del suelo para humanos, plantas y

animales se encontrarían seriamente deterioradas, siendo representativo de un potencial caso serio de contaminación.

#### **4.5.1. Arsénico (As)**

A través de la comparación con normas internacionales se puede establecer que alrededor del 97% de los sitios muestreados en el año 2020 sobrepasa los límites máximos permisibles para As para cualquiera de los parámetros correspondientes a la norma canadiense (CCME, 2007), asimismo, este porcentaje desciende a un 73% del total de los sitios muestreados en 2021. Por otra parte, el 70% de los sitios de muestreo registrados en 2020 presentan concentraciones que sobrepasan el valor objetivo establecido en la norma holandesa, en cambio en el año 2021 sólo el 12,5% de los sitios sobrepasan dicho límite. Alrededor del 30% de los sitios 2020 sobrepasan el valor de intervención ( $55 \text{ mg kg}^{-1}$ ) de dicha norma, lo que es bastante preocupante por la toxicidad asociada a este elemento (VROM, 2013).

#### **4.5.2. Cadmio (Cd)**

De acuerdo con la norma canadiense, sólo se sobrepasaría el límite máximo permisible para suelos de uso residencial, específicamente un 14% y un 5,8% del total de los sitios muestreados en 2020 y 2021, respectivamente (CCME, 2007). Por otra parte, más del 79% de los sitios muestreados superan el límite máximo para VO que establece la norma

Holandesa, y solo alrededor del 4% de los sitios sobrepasa el valor de intervención establecido por la misma (VROM, 2013).

#### **4.5.3. Cobre (Cu)**

Las concentraciones de Cu registradas en este estudio sobrepasan con creces las normas internacionales y esto no es de extrañar ya que la mediana registrada en el año que presenta concentraciones más bajas (2021) tiene un valor de  $248 \text{ mg kg}^{-1}$ . La norma canadiense se ve sobrepasada por un 100% de los sitios muestreados en 2020 y un 99% para 2021 para los límites establecidos para suelos de uso residencial, suelos de uso comercial y suelos industriales los cuales corresponden a 63 y  $91 \text{ mg kg}^{-1}$ , respectivamente (CCME, 2007). Asimismo, en gran parte de los sitios (>80%) se ve sobrepasada la norma holandesa, la cual establece límites de 36 y  $190 \text{ mg kg}^{-1} \text{ DM}$  (Dry Matter) para VO y VI, respectivamente (VROM, 2013).

#### **4.5.4. Cromo (Cr)**

En general, las concentraciones de Cr en ambos años rondan los  $100 \text{ mg kg}^{-1}$ , por lo que se estarían sobrepasando ambas normas internacionales; la norma canadiense para suelo residencial ( $64 \text{ mg kg}^{-1}$ ), para suelo comercial ( $87 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e industrial ( $87 \text{ mg kg}^{-1}$ ) (CCME, 2007), sobre todo en los puntos STGO20-28 ( $249 \text{ mg kg}^{-1}$ ), STGO20-29 ( $242 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y STGO21-1 ( $630 \text{ mg kg}^{-1}$ ), los cuales presentan las máximas concentraciones



del Cr. También se sobrepasaría el límite establecido para valores objetivo ( $100 \text{ mg kg}^{-1}$ ) que establece la norma holandesa. Por otra parte, el máximo valor de Cr registrado en 2021 ( $630 \text{ mg kg}^{-1}$ ) además de sobrepasar el límite para VO, el sitio STGO21-1 sobrepasa el límite máximo establecido para valores de intervención ( $380 \text{ mg kg}^{-1}$ ) establecido en la misma norma (VROM, 2013).

#### **4.5.5. Níquel (Ni)**

Si bien en el año 2021 la abundancia de Ni disminuyó en prácticamente toda el área de estudio (la superación de la norma Canadiense solo equivale a un 6,3% y un 14,6% para el VO de la norma Holandesa), el máximo absoluto se registra en dicho año, correspondiendo al sitio STGO21-10 ( $191 \text{ mg kg}^{-1}$ ) el cual sobrepasa ambas normas para todos sus criterios excepto para VI correspondiente a la norma Holandesa ( $210 \text{ mg kg}^{-1}$ ), sin embargo, no se encuentra muy alejado de dicho límite, lo cual sería indicativo de que las condiciones en las cuales las propiedades funcionales del suelo para seres vivos se encontrarían seriamente deterioradas (VROM, 2013). La mayoría de los muestreados en 2020 ( $\approx 80\%$ ) sobrepasan la norma canadiense en sus tres parámetros los cuales corresponden a  $50 \text{ mg kg}^{-1}$  en los 3 casos, también se sobrepasa la norma holandesa en el parámetro de valor objetivo en un 88,6%.

#### **4.5.6. Plomo (Pb)**

Gran parte del total de sitios muestreados supera los estándares establecidos por Canadá, y Holanda, pues en el primer caso, los límites máximos que se establecen son iguales a 140 y 260 mg kg<sup>-1</sup> para suelos residenciales y suelos comerciales (CCME, 2007), siendo sobrepasado el primer valor por sobre un 70% de los sitios muestreados en el año 2020 y alrededor de un 23% en el año 2021. La norma holandesa establece como máximos permisibles para VO y VI, 85 y 530 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente (VROM, 2013), por lo que el 58% del total de sitios sobrepasaría el VO y aproximadamente el 10% lo haría para el VI.

#### **4.5.7. Zinc (Zn)**

Los límites máximos de elementos para suelos de uso residencial, comercial e industrial, establecidos por la norma canadiense (CCME, 2007), se ven sobrepasados en un 75%, 60% y 60% por el total de los sitios muestreados, respectivamente. También se sobrepasan los límites máximos permitidos para valores objetivo y de intervención, establecidos en la norma holandesa (VROM, 2013), siendo este último valor, sobrepasado por al menos el 30% de los sitios muestreados.

## V. CONCLUSIONES

- » Los suelos estudiados, se caracterizan por ser alóctonos, de textura arenosa, principalmente neutros y de categoría no salino - poco salino para el año 2020. En cambio, el total de las muestras correspondientes al año 2021 presentan características no salinas y de pH igualmente neutro en su mayoría.
- » La Conductividad eléctrica de las muestras 2020 fue considerablemente mayor que las registradas en el año 2021, concluyendo preliminarmente que pudo estar asociado a la cantidad de gas lacrimógeno utilizado como agentes antidisturbios para el estallido social, el cual se encuentra compuesto principalmente de clorobenzilideno malononitrilo (CS), como también de clorato de potasio, resina epóxica, anhídrido maleico, anhídrido metilnádico, contribuyendo considerablemente en la presencia de sales en el suelo, dada la correlación entre la distribución espacial de los sitios con mayores valores de CE en el área de estudio con la dispersión de la nube lacrimógena y su posterior deposición en el sector NE de Plaza Italia, de acuerdo al estudio elaborado por Forensic Architecture (2020).
- » La metodología aplicada en el presente estudio referente a la transformación matemática  $\text{ilr}(x)$ , permitió en gran medida acercarse al valor background de la zona estudiada (considerando que actualmente no hay lugares prístinos para la determinación del background natural), el cual corresponde a la Mediana del set de datos ( $n > 30$ ) normalizados.

- » De acuerdo con las líneas base elaboradas y analizadas, es posible concluir que en prácticamente el 100% de los elementos analizados se observó una disminución, en mayor o menor medida el año 2021. Las disminuciones fueron de 65,4%, 5,8%, 41,9%, 12,9%, 25,7%, 49%, 26,6% para el As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn, respectivamente.
- » Las tierras raras corresponden al grupo de elementos que presenta el  $I_{geo}$  más alto, sobre todo en el año 2020, sin embargo, no existen antecedentes sobre límites máximos permisibles de estos elementos en suelos, a pesar de que diversos estudios relacionan algunas de ellas a fuentes contaminantes como emisiones de tubos de escape, lo que podría estar afectando el área de estudio.
- » Con respecto a los índices de geoacumulación, estos son consistentes con las concentraciones elementales observadas en los dos años de estudio. Los índices determinados fueron más altos el año 2020, lo que podría estar asociado a una acumulación de éstos en los primeros cm del suelo de este año por la falta de precipitaciones, junto a un posterior aumento de éstas el año 2021, sumado a la textura arenosa que presentaban los mismos, lo que facilita el proceso de lixiviación.
- » Nuestro país no cuenta con una legislación en materia de suelos la cual permita establecer los criterios y parámetros que determinen si un suelo es adecuado o no para cierto uso. Respecto a lo anterior, se comparó los valores obtenidos con las normas canadiense y holandesa, concluyendo que el total de elementos PHEs (As,

Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn) superan por lo menos uno de los criterios establecidos para ambas normas, siendo en su mayoría sobrepasados por todos los elementos, los distintos criterios de uso de suelo (residencial, comercial e industrial) establecidos por la norma canadiense.

- » De manera preliminar, se estima que los suelos de la zona de estudio fueron altamente impactados debido a múltiples fuentes asociadas al estallido social de octubre del 2019 (mayor flujo de personas, utilización de agentes antidisturbios, quema de neumáticos, etc.), debido, principalmente, a los altos niveles de CE presentes en el año 2020 asociados principalmente al sector de plaza Italia y alrededores, los cuales fueron contrastados con la información obtenida del estudio realizado en la misma área por Forensic Architecture. Sin embargo, es importante mencionar que la identificación de fuentes es una señal mucho más compleja, en el cual se requiere un análisis mucho más elaborado y extenso y su tratamiento escapa al alcance del estudio.
- » El conjunto de variables analizadas: fisicoquímicas; línea base (estadística-comportamiento y distribución variables, y espacialización); e indicadores de contaminación ( $I_{geo}$  y  $mCd$ ) son consistentes entre sí, revelando un mayor grado de intervención antrópica (contaminación) el año 2020, asociada a señales complejas en la identificación de fuentes.

## VI. REFERENCIAS

- Adriano, D. C. (2001). *Trace Elements in Terrestrial Environments* (Second edition). Springer Science+Business Media, LLC. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-21510-5>
- Aitchison, J. (1982). The Statistical Analysis of Compositional Data. In *J. R. Statist. Soc. B* (Vol. 44, Issue 2).
- Aliaga, G. (2016). *Caracterización Geoquímica de los suelos de la cuenca de Rancagua (34°S-34°15'S y 70°30'O-71°O). Región del Libertador General Bernardo O'Higgins* [Memoria de título]. Universidad de Chile.
- Al-Hejuje, M. M., Al-Saad, H. T., & Hussain, N. A. (2018). Application of geo-accumulation index (I-geo) for assessment the sediments contamination with heavy metals at Shatt Al-Arab River-Iraq. *Journal of Scientific and Engineering Research*, 342–351.
- Alloway, B. J. (2013). *Heavy Metals in Soils - Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability* (B. J. Alloway, Ed.; Third Edition, Vol. 22). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7>
- AngloAmerican. (2019). *Monitoreo Calidad de Aguas Área Los Bronces*.

- Artaxo, P., Oyola, P., & Martinez, R. (1999). Aerosol composition and source apportionment in Santiago de Chile. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 150(1–4), 409–416. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(98\)01078-7](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(98)01078-7)
- ATSDR, Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (n.d.). *Resumen de Salud Pública: Cromo (Chromium)*. Retrieved October 29, 2022, from [https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_ph7.html](https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_ph7.html)
- Banu, Z., Shariful Alam Chowdhury, M., Delwar Hossain, M., & Nakagami, ichi. (2013). Contamination and Ecological Risk Assessment of Heavy Metal in the Sediment of Turag River, Bangladesh: An Index Analysis Approach. *Journal of Water Resource and Protection*, 5, 239–248. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2013.52024>
- Brady, N. C., & Weil, R. (2013). *Elements of the Nature and Properties of Soils* (Third Edition). Pearson Education Limited.
- Cakmak, S., Dales, R. E., & Vida, C. B. (2009). Components of particulate air pollution and mortality in Chile. *International Journal of Occupational and Environmental Health*, 15(2), 152–158. <https://doi.org/10.1179/oeh.2009.15.2.152>
- CCME, Canadian Council of Ministers of the Environment, C. (2007b). *Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health: Summary tables. Updated September, 2007. In: Canadian environmental quality*

*guidelines, 1999, Canadian Council of Ministers of the Environment.*  
[http://www.ccme.ca/publications/ceqg\\_rcqe.html?category\\_id=125\]](http://www.ccme.ca/publications/ceqg_rcqe.html?category_id=125)

CR<sup>2</sup>, Center for Climate and Resilience Research. (2020). *Evaluación económica de la megasequía.* Evaluación Económica de La Megasequía.  
<https://www.cr2.cl/evaluacion-economica-de-la-megasequia/>

Cicchella, D., Hoogewerff, J., Albanese, S., Adamo, P., Lima, A., Taiani, M. V. E., & de Vivo, B. (2016). Distribution of toxic elements and transfer from the environment to humans traced by using lead isotopes. A case of study in the Sarno River basin, south Italy. *Environmental Geochemistry and Health*, 38(2), 619–637.  
<https://doi.org/10.1007/S10653-015-9748-2>

de Vivo, B., Belkin, H. E., & Lima, A. (2018). *Environmental Geochemistry; site characterization, data analysis and case histories* (Second Edition). Elsevier Science.

Delgado, M., Rivera, Y., Torres, J., Corral, A., Flores, J., & Santana, L. (2014, December). Determinación de cadmio, cromo, plomo y arsénico en suelos superficiales urbanos de Ciudad Juárez, Chihuahua, México. *Culcyt - Medio Ambiente*.

Demetriades, A., & Birke, M. (2015). *Urban geochemical mapping manual: Sampling, sample preparation, laboratory analysis, quality control check, statistical processing and map plotting*.



Dirección Meteorológica de Chile. (2021). *Informe Anual de Agua Caída - 2020*. Informe Anual de Agua Caída - Diaria, Mensual y Anual En Mm - Estación Quinta Normal, Santiago (330020) .

<https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/anual/aguaCaidaAnual/330020/2020>

Dirección Meteorológica de Chile. (2022). *Informe Anual de Agua Caída - 2021*. Informe Anual de Agua Caída - Diaria, Mensual y Anual En Mm - Estación Quinta Normal, Santiago (330020) .

<https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/anual/aguaCaidaAnual/330020/2021>

Egozcue, J. J., Pawlowsky-Glahn, V., Mateu-Figueras, G., & Barceló-Vidal, C. (2003). Isometric Logratio Transformations for Compositional Data Analysis 1. *Mathematical Geology*, 35(3).

FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2022). *5 razones por las que el suelo es clave para el futuro sostenible del planeta*. Objetivos de Desarrollo Sostenible. <https://www.fao.org/sustainable-development-goals/news/detail-news/es/c/277124/>

FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (n.d.). *Textura del Suelo*.

- Filippelli, G. M., Morrison, D., & Cicchella, D. (2012). Urban Geochemistry and Human Health. *Elements*, 8(6), 439–444. <https://doi.org/10.2113/GSELEMENTS.8.6.439>
- Filzmoser, P., Hron, K., & Reimann, C. (2009). Univariate statistical analysis of environmental (compositional) data: Problems and possibilities. *Science of the Total Environment*, 407(23), 6100–6108. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2009.08.008>
- Filzmoser, P., Hron, K., & Reimann, C. (2010). The bivariate statistical analysis of environmental (compositional) data. *Science of The Total Environment*, 408(19), 4230–4238. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2010.05.011>
- Forensic Architecture. (2020). *Gas Lacrimógeno en Plaza Dignidad*.
- Galán H., E., & Romero B., A. (2008, September). Contaminación de Suelos por Metales Pesados. *Revista de La Sociedad Española de Mineralogía*, 1–13.
- Gallardo, L., Olivares, G., Langner, J., & Aarhus, B. (2002). *Coastal lows and sulfur air pollution in Central Chile*.
- Gałaszka, A., Migaszewski, D. M., & Zalasiewicz, J. (2014). Assessing the anthropocene with geochemical methods. *Geological Society Special Publication*, 395(1), 221–238. <https://doi.org/10.1144/SP395.5>
- García, C., Moreno, J. L., Hernández, M. T., & Polo, A. (2002). Metales pesados y sus implicaciones en la calidad del suelo. *Ciencia y Medio Ambiente - CCMA - CSIC*.

- Garcia-Huidobro, T., Marshall, F. M., & Bell, J. N. B. (2001). A risk assessment of potential agricultural losses due to ambient SO<sub>2</sub> in the central regions of Chile. In *Atmospheric Environment* (Vol. 35).
- Giaccio, L., Cicchella, D., de Vivo, B., Lombardi, G., & de Rosa, M. (2012). Does heavy metals pollution affects semen quality in men? A case of study in the metropolitan area of Naples (Italy). *Journal of Geochemical Exploration*, 112, 218–225. <https://doi.org/10.1016/J.GEXPLO.2011.08.009>
- Grba, N., Neubauer, F., Šajnović, A., Stojanović, K., & Jovančičević, B. (2015). Heavy metals in Neogene sedimentary rocks as a potential geogenic hazard for sediment, soil, and surface and groundwater contamination (eastern Posavina and the Lopare Basin, Bosnia and Herzegovina). # *Serbian Chemical Society Member*, 80(6), 827–838. <https://doi.org/10.2298/JSC140317047G>
- Greenwood, N. N., & Earnshaw, A. (1997). *Chemistry Of The Elements* (Second Edition). Butterworth-Heinemann.
- Guevara, S., Oyarzún, J., & Maturana, H. (2006). Water geochemistry of the Elqui River and its tributaries in the period 1975-1995: natural factors and effect of mining activities on its Fe, Cu and As contents. In *AGRICULTURA TÉCNICA (CHILE)* (Vol. 66, Issue 1). ENERO-MARZO.
- HAWKES, H. E., & WEBB, J. S. (1963). Geochemistry in Mineral Exploration. *Soil Science*, 95(4), 283. <https://doi.org/10.1097/00010694-196304000-00016>

- Hedberg, E., Gidhagen, L., & Johansson, C. (2005). Source contributions to PM<sub>10</sub> and arsenic concentrations in Central Chile using positive matrix factorization. *Atmospheric Environment*, 39(3), 549–561.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.11.001>
- Kabata-Pendias, A. (2011). *Trace Elements in Soils and Plants* (Fourth Edition). Taylor and Francis Group, LLC.
- Kabata-Pendias, A., & Mukherjee, A. B. (2007). *Trace Elements from Soil to Human* (Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Ed.). Springer.
- Kabata-Pendias, Alina. (2000). *Trace elements in soils and plants* (Third Edition). CRC Press.
- Kavouras, I. G., Koutrakis, P., Cereceda-Balic, F., & Oyola, P. (2001). Source Apportionment of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in Five Chilean Cities Using Factor Analysis. In *Journal of the Air & Waste Management Association* (Vol. 51).
- Khaled, A., & Ahdy, H. H. H. (2009). Heavy Metals Contamination in Sediments of the Western Part of Egyptian Mediterranean Sea. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 3(4), 3330–3336.
- Krumova, K., Nikolovska, M., & Groudeva, V. (2008). Isolation and identification of arsenic-transforming bacteria from arsenic contaminated sites in Bulgaria.

*Biotechnology and Biotechnological Equipment*, 22(2), 721–728.

<https://doi.org/10.1080/13102818.2008.10817541>

Lide, D. R., Baysinger, G., Berger, L., Goldberg, R., Kehiaian, H., Kuchitsu, K., Rosenblatt, G., Roth, D., & Zwillinger, D. (2008). *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. Taylor & Francis Group .

Lifeder. (2021). *Horizontes del suelo y sus características*.

<https://www.lifeder.com/horizontes-suelo/>

Mcbride, M., Sauvé, S., & Hendershot, W. (1997). Solubility control of Cu, Zn, Cd and Pb in contaminated soils. *European Journal of Soil Science*, 48, 337–346.

MINSEGPRES, Ministerio Secretaría General de la Presidencia (1994). *Ley 19300 - APRUEBA LEY SOBRE BASES GENERALES DEL MEDIO AMBIENTE MINISTERIO SECRETARÍA GENERAL DE LA PRESIDENCIA*. <https://bcn.cl/32lk3>

Morata, D., Polvé, M., Valdés, A., Belmar, M., Dinator, M. I., Silva, M., Leiva, M. A., Aigouy, T., & Morales, J. R. (2008). Characterisation of aerosol from Santiago, Chile: An integrated PIXE-SEM-EDX study. *Environmental Geology*, 56(1), 81–95. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-1141-8>

Moreno, T., Alastuey, A., Querol, X., Font, O., & Gibbons, W. (2007). The identification of metallic elements in airborne particulate matter derived from fossil fuels at

- Puertollano, Spain. *International Journal of Coal Geology*, 71(2–3), 122–128.  
<https://doi.org/10.1016/j.coal.2006.08.001>
- Mukhopadhyay, R., Rosen, B. P., Phung, L. T., & Silver, S. (2002). *Microbial arsenic: from geocycles to genes and enzymes*. <http://www.who.int/inf-fs/en/fact210.html>
- Novotny, V. (1995). Diffuse Sources of Pollution by Toxic Metals and Impact on Receiving Waters. In U. Förstner, W. Salomons, & P. Mader (Eds.), *Heavy Metals - Problems and Solutions*.
- Odukoya, A. M., Olobaniyi, S. B., & Abdussalam, M. (2016). Metal Pollution and health risk assessment of soil within an urban industrial estate, Southwest Nigeria. *Ife Journal of Science*, 18. <https://www.ajol.info/index.php/ij/s/article/view/145047>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (n.d.). *TEXTURA DEL SUELO*. Retrieved February 27, 2023, from [https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO\\_Training/FAO\\_Training/General/x6706s/x6706s06.htm](https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm)
- Oyarzun, R., Higuera, P., & Cubas, P. (2010). *Geoquímica Ambiental e Indicadores Geobotánicos - Geoquímica y Mineralogía Ambiental*.
- Phillips, I. R. (1999). Copper, Lead, Cadmium, and Zinc Sorption By Waterlogged and Air-Dry Soil. *Journal of Soil Contamination*, 8(3), 343–364.  
<https://doi.org/10.1080/10588339991339379>

- Qu, C., Albanese, S., Chen, W., Lima, A., Doherty, A. L., Piccolo, A., Arienzo, M., Qi, S., & de Vivo, B. (2016). The status of organochlorine pesticide contamination in the soils of the Campanian Plain, southern Italy, and correlations with soil properties and cancer risk. *Environmental Pollution*, *216*, 500–511. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2016.05.089>
- Ramírez, A. v. (2002). Toxicología del cadmio. Conceptos actuales para evaluar exposición ambiental u ocupacional con indicadores biológicos. *Sistema de Información Científica - Red de Revistas Científicas de América Latina, El Caribe, España y Portugal*, *63*(1), 51–64.
- Reichman, S. M. (2002). *The Responses of Plants to Metal Toxicity: A review focusing on Copper, Manganese and Zinc*. Australian Minerals & Energy Environment Foundation.
- Reimann, C., Filzmoser, P., Garret, R., & Dutter, R. (2008). *Statistical Data Analysis Explained: Applied Environmental Statistics with R*. John Wiley & Sons.
- Reimann, C., Filzmoser, P., & Garrett, R. G. (2005). Background and threshold: Critical comparison of methods of determination. *Science of the Total Environment*, *346*(1–3), 1–16. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2004.11.023>
- Rezaee, K., Saion, E. B., Abdi, M. R., & Bakhtiari, R. (2010). Vertical Distribution of Heavy Metals and Enrichment in the South China Sea Sediment Cores. *Int. J. Environ. Res*, *4*(4), 877–886.

- Ríos-Lugo, M. J., & Hernández-Mendoza, H. (2020). *Fundamentos teóricos de ICP-MS y su importancia en el análisis de elementos tóxicos en agua subterránea*.  
www.revistaglosa.com
- Rollinson, H. R. (1993). *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. Longman Publishing Group.
- Romo-Kroger, C. M., Morales, J. R., Dinator, M. I., Llona, F., & Eaton, L. C. (1994). HEAVY METALS IN THE ATMOSPHERE COMING FROM A COPPER SMELTER IN CHILE. In *Atmospheric Environment* (Vol. 28, Issue 4).
- Rothenberg, C., Achanta, S., Svendsen, E. R., & Jordt, S.-E. (2016). Tear gas: an epidemiological and mechanistic reassessment. *ANNALS OF THE NEW YORK ACADEMY OF SCIENCES, Countermeasures Against Chemical Threats*, 1–12.  
<https://doi.org/10.1111/nyas.13141>
- Sadzawka, A., Carrasco, M. A., Grez, R., Mora, M. D. L. L., Flores, H., & Neaman, A. (2006). *Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile*.
- Salminen, R., Tarvainen, T., Demetriades, A., Duris, M., Fordyce, F. M., Gregorauskiene, V., Kahelin, H., Kivisilla, J., Klaver, G., Klein, H., Larson, J. O., Lis, J., Locutura, J., Marsina, K., Mjartanova, H., Mouvet, C., O'connor, P., Odor, L., Ottonello, G., ... van der Sluys, J. (n.d.). *Geologian tutkimuskeskus Geological Survey of Finland FOREGS GEOCHEMICAL MAPPING FIELD MANUAL Opas 47 Guide 47*.



- SERNAGEOMIN, Servicio Nacional de Geología y Minería (2003). MAPA GEOLOGICO DE CHILE: VERSION DIGITAL. *Publicación Geológica Digital*, No. 4.
- SERNAGEOMIN, Servicio Nacional de Geología y Minería (2021). *Anuario de la Minería de Chile 2020*.
- Shen, F., Mao, L., Sun, R., Du, J., Tan, Z., & Ding, M. (2019). Contamination evaluation and source identification of heavy metals in the sediments from the lishui river watershed, southern China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(3). <https://doi.org/10.3390/ijerph16030336>
- Sherameti, I., & Varma, A. (2010). *Soil Heavy Metals (Soil Biology)* (Vol. 19). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-02436-8>
- Sparks, D. L. (2003). *Environmental Soil Chemistry* (Second). Elsevier Science.
- T. Long, D., & Berry Lyons, W. (2021). Urban Geochemistry. In D. T. Long & W. Berry Lyons (Eds.), *Encyclopedia of Geology* (Second, pp. 235–250). Elsevier Ltd.
- Tapia, J., Mulet, J., Poblete, N., & Rodríguez, C. (2015). *Catastro de estudios de geoquímica ambiental de suelos y sedimentos de Chile*.
- Tarbuck, E. J., & Lutgens, F. K. (2004). *Ciencias de la Tierra: una introducción a la Geología Física* (8th ed.). Prentice Hall / Pearson.

- Tarvainen, T., & Kallio, E. (2002). Baselines of certain bioavailable and total heavy metal concentrations in Finland. *Applied Geochemistry*, 17(8), 975–980. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00003-3](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00003-3)
- Thornton, I. (1993). Environmental geochemistry and health in the 1990s: a global perspective. *Applied Geochemistry*, 8, 203–210. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(09\)80038-3](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(09)80038-3)
- Thornton, I. (2012). Environmental geochemistry: 40years research at Imperial College, London, UK. *Applied Geochemistry*, 27(5), 939–953. <https://doi.org/10.1016/J.APGEOCHEM.2011.07.015>
- Tortosa, G. (2019, October 27). *¿De dónde procede el cobre de nuestros suelos agrícolas?* Artículos Científicos.
- Valdés, A., Polvé, M., Muñoz, M., Toutain, J. P., & Morata, D. (2013). Geochemical features of aerosols in Santiago de Chile from time series analysis. *Environmental Earth Sciences*, 69(6), 2073–2090. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2415-y>
- Valdés Durán, A., Aliaga, G., Deckart, K., Karas, C., Cáceres, D., & Nario, A. (2021). The environmental geochemical baseline, background and sources of metal and metalloids present in urban, peri-urban and rural soils in the O'Higgins region, Chile. In *Environmental Geochemistry and Health*. Springer Science and Business Media B.V. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-01098-4>

- VROM, Ministry of Housing Spatial Planning and the Environmental (2013). *Streefwaarden en interventiewaarden bodemsanering (Target values and intervention values for soil remediation)*.
- Waisberg, M., Joseph, P., Hale, B., & Beyersmann, D. (2003). Molecular and cellular mechanisms of cadmium carcinogenesis. In *Toxicology* (Vol. 192, Issues 2–3, pp. 95–117). Elsevier Ireland Ltd. [https://doi.org/10.1016/S0300-483X\(03\)00305-6](https://doi.org/10.1016/S0300-483X(03)00305-6)
- WHO, World Health Organization (2019). *PREVENTING DISEASE THROUGH HEALTHY ENVIRONMENTS - EXPOSURE TO LEAD: A MAJOR PUBLIC HEALTH CONCERN*.
- Wong, C. S. C., Li, X., & Thornton, I. (2006). Urban environmental geochemistry of trace metals. In *Environmental Pollution* (Vol. 142, Issue 1, pp. 1–16). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.09.004>
- Wright, J. (2003). *Environmental Chemistry*. Taylor & Francis e-Library.
- Yeşim Özkan, E., Bir Körfezde İzmir İç Körfez, E., & Ağır Metal Kontaminasyonlarına Yeni Bir Yaklaşım Özet, T. (2012). A New Assessment of Heavy Metal Contaminations in an Eutrophicated Bay (Inner Izmir Bay, Turkey). *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 12, 135–147. [https://doi.org/10.4194/1303-2712-v12\\_1\\_16](https://doi.org/10.4194/1303-2712-v12_1_16)

Zucchetti, M., & Testoni, R. (2017). TOXICITY AND HEALTH EFFECTS OF ORTHO-CHLORO-BENZYLIDENE-MALONONITRILE (CS GAS). *Fresenius Environmental Bulletin*, 26(1), 151–155.

## VII. ANEXOS

**ANEXO 1:** Condiciones de operación microondas de digestión e ICP-MS.

**ANEXO 1A:** Programa de digestión – método ICP SEDI-HP500.

Potencia		Tiempo de rampa (mm:ss)	Presión (psi)	Temperatura (°C)	Tiempo de mantención (mm:ss)
Máx	%			Control	
600 W	100	10:00	350	180	10:00

**ANEXO 1B:** Condiciones ICP-MS.

Medición	Rangos típicos			Unidades
	Modo apagado	Modo de espera	Modo análisis	
Presión IF/BK	–	0,3 ~ 5	250 ~ 490 (1 RP) <sup>*1</sup>	Pa
			180 ~ 300 (2 RPs)	
Analizador de presión	–	$3 \cdot 10^{-5} \sim 6 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4} \sim 2 \cdot 10^{-3}$ *2	Pa
Revolución TMP	–	65 ~ 100	95 ~ 100	%
Agua RF/WC/IF	0,0	0,0	1,3 ~ 5,0	L/min
T° agua	15 ~ 25	15 ~ 25	15 ~ 45	°C
T° entrada	T° ambiente	T° ambiente	25 ~ 35	°C

T° salida	T° ambiente	T° ambiente	45 ~ 55	°C
T° S/C (L)	T° ambiente	T° ambiente	2	°C
Gas portador (BP) <sup>*3</sup>	0	0	450 ~ 600 (BN) <sup>*4</sup>	kPa
			200 ~ 300 (CN)	
			200 ~ 500 (MFN)	
			200 ~ 300 (MMF)	
Presión de gas OP	0	0	<sup>*5</sup>	kPa
Presión de depósito de gas OP	0	0	<sup>*5</sup>	kPa
Presión de depósito de gas Ar	700	700	700	kPa
Gas portador	0	0	0,8 ~ 1,3	L/min
Gas de reposición	0	0	0 ~ 1,0	L/min
Gas opcional	0	0	<sup>*5</sup>	%
Gas plasma	0	0	15	L/min
Gas auxiliar	0	0	0 ~ 1,0	L/min
Potencia de avance	0	0	700 ~ 1600 <sup>*6</sup>	W
Potencia reflejada	0	0	< 20	W

<sup>\*1</sup> RP: bomba rotatoria

<sup>\*2</sup> La presión puede elevarse fuera del rango típico cuando se introduce H<sup>2</sup> o He como gas de reacción.

<sup>\*3</sup> BP: presión de respaldo

<sup>\*4</sup> BN: nebulizador babington, CN: nebulizador concéntrico, MFN: nebulizador de microflujo, MMN: nebulizador de micronebla

<sup>\*5</sup> Depende de la aplicación

<sup>\*6</sup> RF

**ANEXO 2: Límites de detección elementos analizados por ICP-MS.**

<b>Fecha elaboración CC</b>	05 ENE 2022	11 ENE 2022	12 ENE 2022	12 ENE 2022	20 ENE 2022	20 ENE 2022	24 ENE 2022
<b>Muestras afectas a dicha CC</b>	JSI1– JSI16	JSI17–JSI29	JSI30– JSI36	JSI– JSI10dup	JS11–JS23	JS24– JS30dup	JS31– JS48dup
<b>Elemento</b>	<b>LD (ng/mL)</b>						
<sup>24</sup> Mg	2,155·10 <sup>-1</sup>	7,536·10 <sup>-1</sup>	2,548·10 <sup>-1</sup>	2,548·10 <sup>-1</sup>	2,459·10 <sup>-1</sup>	1,908	7,719·10 <sup>-1</sup>
<sup>27</sup> Al	5,965·10 <sup>-1</sup>	6,079	2,559	2,559	4,642	2,691	1,552
<sup>53</sup> Cr	9,845·10 <sup>-2</sup>	1,860·10 <sup>-1</sup>	1,861·10 <sup>-1</sup>	1,861·10 <sup>-1</sup>	1,301·10 <sup>-1</sup>	1,479·10 <sup>-1</sup>	1,801·10 <sup>-1</sup>
<sup>55</sup> Mn	3,203·10 <sup>-2</sup>	3,466·10 <sup>-1</sup>	1,922·10 <sup>-1</sup>	1,922·10 <sup>-1</sup>	6,180·10 <sup>-1</sup>	2,032·10 <sup>-1</sup>	2,676·10 <sup>-1</sup>
<sup>59</sup> Co	3,784·10 <sup>-2</sup>	4,294·10 <sup>-2</sup>	1,265·10 <sup>-1</sup>	1,265·10 <sup>-1</sup>	3,386·10 <sup>-2</sup>	1,680·10 <sup>-1</sup>	1,361·10 <sup>-1</sup>
<sup>60</sup> Ni	4,195·10 <sup>-1</sup>	3,824·10 <sup>-1</sup>	1,957·10 <sup>-1</sup>	1,957·10 <sup>-1</sup>	6,501·10 <sup>-2</sup>	3,440·10 <sup>-1</sup>	1,655·10 <sup>-1</sup>
<sup>63</sup> Cu	7,940·10 <sup>-2</sup>	3,768	9,252·10 <sup>-1</sup>	9,252·10 <sup>-1</sup>	1,776·10 <sup>-1</sup>	4,568	5,210·10 <sup>-1</sup>
<sup>66</sup> Zn	5,460·10 <sup>-1</sup>	7,149·10 <sup>-1</sup>	5,606·10 <sup>-1</sup>	5,606·10 <sup>-1</sup>	1,221	2,135	1,537
<sup>75</sup> As	2,623·10 <sup>-1</sup>	6,414·10 <sup>-1</sup>	1,457	1,457	5,156·10 <sup>-1</sup>	4,752·10 <sup>-1</sup>	5,995·10 <sup>-1</sup>
<sup>111</sup> Cd	9,442·10 <sup>-2</sup>	8,890·10 <sup>-2</sup>	2,501·10 <sup>-1</sup>	2,501·10 <sup>-1</sup>	3,281·10 <sup>-2</sup>	1,486·10 <sup>-1</sup>	1,552·10 <sup>-1</sup>
<sup>133</sup> Cs	9,439·10 <sup>-3</sup>	4,534·10 <sup>-2</sup>	3,437·10 <sup>-1</sup>	3,437·10 <sup>-1</sup>	1,075·10 <sup>-2</sup>	6,305·10 <sup>-2</sup>	1,405·10 <sup>-1</sup>
<sup>208</sup> Pb	3,631·10 <sup>-2</sup>	1,906	5,925·10 <sup>-1</sup>	5,925·10 <sup>-1</sup>	7,157·10 <sup>-1</sup>	5,523·10 <sup>-1</sup>	4,889·10 <sup>-1</sup>

Fecha elaboración CC	06 ENE 2022	07 ENE 2022	10 ENE 2022	13 ENE 2022	19 ENE 2022	19 ENE 2022
Muestras afectas a dicha CC	JSI1–JSI16	JSI17–JSI29	JSI30–JSI36	JSI11–JS23	JS24–JS30dup	JS31–JS48dup
Elemento	LD (ng/mL)					
<sup>45</sup> Sc	3,896·10 <sup>-1</sup>	1,641·10 <sup>-1</sup>	9,572	8,174·10 <sup>-1</sup>	6,259·10 <sup>-1</sup>	4,921
<sup>89</sup> Y	8,562·10 <sup>-3</sup>	1,890·10 <sup>-1</sup>	5,080·10 <sup>-2</sup>	1,415·10 <sup>-2</sup>	3,306·10 <sup>-1</sup>	1,008·10 <sup>-1</sup>
<sup>139</sup> La	1,337·10 <sup>-2</sup>	2,383·10 <sup>-1</sup>	1,698·10 <sup>-1</sup>	3,725·10 <sup>-2</sup>	3,990·10 <sup>-1</sup>	9,135·10 <sup>-1</sup>
<sup>140</sup> Ce	7,768·10 <sup>-2</sup>	2,254·10 <sup>-1</sup>	3,396·10 <sup>-1</sup>	7,333·10 <sup>-2</sup>	3,907·10 <sup>-1</sup>	1,601
<sup>141</sup> Pr	1,293	2,146·10 <sup>-1</sup>	5,282·10 <sup>-2</sup>	1,070·10 <sup>-2</sup>	3,603·10 <sup>-1</sup>	1,863·10 <sup>-1</sup>
<sup>146</sup> Nd	1,409	2,952·10 <sup>-1</sup>	1,258·10 <sup>-1</sup>	1,111·10 <sup>-1</sup>	4,296·10 <sup>-1</sup>	4,310·10 <sup>-1</sup>
<sup>147</sup> Sm	1,403	2,267·10 <sup>-1</sup>	7,663·10 <sup>-2</sup>	3,821·10 <sup>-2</sup>	3,722·10 <sup>-1</sup>	1,137·10 <sup>-1</sup>
<sup>153</sup> Eu	1,450	2,063·10 <sup>-1</sup>	4,944·10 <sup>-2</sup>	9,431·10 <sup>-3</sup>	3,429·10 <sup>-1</sup>	2,604·10 <sup>-2</sup>
<sup>157</sup> Gd	1,416	1,892·10 <sup>-1</sup>	5,999·10 <sup>-2</sup>	4,961·10 <sup>-2</sup>	3,581·10 <sup>-1</sup>	6,826·10 <sup>-2</sup>
<sup>159</sup> Tb	1,348	1,641·10 <sup>-1</sup>	3,502·10 <sup>-2</sup>	9,272·10 <sup>-3</sup>	3,348·10 <sup>-1</sup>	2,039·10 <sup>-2</sup>
<sup>163</sup> Dy	1,373	1,728·10 <sup>-1</sup>	4,388·10 <sup>-2</sup>	2,823·10 <sup>-3</sup>	4,094·10 <sup>-1</sup>	4,203·10 <sup>-2</sup>
<sup>165</sup> Ho	1,568·10 <sup>-3</sup>	1,769·10 <sup>-1</sup>	3,553·10 <sup>-2</sup>	8,519·10 <sup>-3</sup>	3,087·10 <sup>-1</sup>	4,770·10 <sup>-2</sup>
<sup>166</sup> Er	1,291	1,569·10 <sup>-1</sup>	4,577·10 <sup>-2</sup>	4,292·10 <sup>-2</sup>	3,104·10 <sup>-1</sup>	6,807·10 <sup>-2</sup>
<sup>169</sup> Tm	1,196	1,693·10 <sup>-1</sup>	3,534·10 <sup>-2</sup>	7,980·10 <sup>-3</sup>	3,270·10 <sup>-1</sup>	2,047·10 <sup>-2</sup>
<sup>172</sup> Yb	1,310	1,490·10 <sup>-1</sup>	4,949·10 <sup>-2</sup>	4,652·10 <sup>-2</sup>	4,273·10 <sup>-1</sup>	5,261·10 <sup>-2</sup>



<sup>175</sup> Lu	1,137	1,618·10 <sup>-1</sup>	3,641·10 <sup>-2</sup>	1,786·10 <sup>-2</sup>	3,271·10 <sup>-1</sup>	3,149·10 <sup>-2</sup>
-------------------	-------	------------------------	------------------------	------------------------	------------------------	------------------------

### ANEXO 3: Validación de datos

#### Anexo 3A: Validación datos de terreno (duplicados)

Durante la realización del proceso de muestreo se tomó duplicados cada 10 muestras recolectadas, equivalentes al 10% aproximadamente. El propósito de estos duplicados es la generación de un mecanismo de control de los resultados entregados por el laboratorio. Cada duplicado muestra la diferencia entre los dos análisis realizados en el mismo punto, los cuales serán analizados con la siguiente fórmula:

$$\frac{|X - Y|}{Y} \times 100\% \quad (3A)$$

**Ecuación 3A.** Fórmula alternativa de validación de datos de terreno, donde “X” representa la concentración de un elemento en el duplicado e “Y” corresponde a la concentración del mismo elemento en el primer análisis.

	STGO20-20 y STGO20-20d	STGO21-17 y STGO21-17d	STGO21-19 y STGO21-19d	STGO21-27 y STGO21-27d	STGO21-41 y STGO21-41d	STGO21-48 y STGO21-48d
<b>Mg</b>	36%	4%	7%	19%	1%	5%
<b>Al</b>	40%	10%	12%	7%	4%	8%
<b>Cr</b>	4%	15%	7%	2%	5%	3%
<b>Mn</b>	10%	13%	17%	4%	3%	6%
<b>Co</b>	23%	7%	3%	8%	3%	2%
<b>Ni</b>	10%	26%	2%	14%	2%	96%

<b>Cu</b>	7%	25%	3%	9%	9%	5%
<b>Zn</b>	24%	22%	13%	64%	1%	0%
<b>As</b>	64%	8%	15%	17%	17%	14%
<b>Cd</b>	74%	3%	0%	9%	16%	8%
<b>Cs</b>	61%	0%	0%	0%	0%	11%
<b>Pb</b>	31%	0%	8%	1%	0%	7%
<b>Sc</b>	55%	8%	7%	6%	14%	12%
<b>Y</b>	33%	10%	12%	21%	7%	18%
<b>La</b>	40%	38%	12%	2%	3%	18%
<b>Ce</b>	41%	1%	4%	1%	7%	27%
<b>Pr</b>	44%	11%	1%	0%	12%	0%
<b>Nd</b>	45%	15%	12%	6%	10%	13%
<b>Sm</b>	49%	12%	16%	0%	16%	0%
<b>Gd</b>	35%	1%	11%	0%	6%	12%
<b>Dy</b>	46%	0%	0%	0%	8%	0%
<b>Er</b>	51%	0%	0%	0%	12%	0%
<b>Yb</b>	47%	0%	0%	0%	207%	0%

**ANEXO 3B: Base de datos 2020 validada (criterio valores bajo el LC < 70%)**

Muestra	Coordenada E	Coordenada N	Mg (µg/mL)	Al (µg/mL)	Cr (µg/mL)	Mn (µg/mL)	Co (µg/mL)	Ni (µg/mL)	Cu (µg/mL)	Zn (µg/mL)	As (µg/mL)	Cd (µg/mL)	Cs (µg/mL)	Pb (µg/mL)	Sc (µg/mL)	Y (µg/mL)	La (µg/mL)	Ce (µg/mL)	Pr (µg/mL)	Nd (µg/mL)	Sm (µg/mL)	Gd (µg/mL)	Dy (µg/mL)	Er (µg/mL)	Yb (µg/mL)	
STG O20-1																										
STG O20-2	34724 9.000	62989 45.000	399	1341 6	79.9	964	32.3	74.6	359	366	64.80	3.700 0	3.600	166.0	72.2	0.86 9	0.966	2.79	0.26 0	1.120	0.232	0.293	0.231	0.050	0.050	
STG O20-3	34736 5.000	62984 09.000	426	1353 0	157.0	1321	56.2	77.4	1244	1610	99.60	12.60 00	3.290	859.0	56.1	1.57 0	1.450	3.49	0.37 5	1.630	0.317	0.316	0.262	0.185	0.204	
STG O20-4	34745 6.741	62979 19.039	546	1365 3	76.9	1320	28.0	26.1	763	930	69.50	0.050 5	3.660	61.4	84.8	1.08 0	1.130	2.94	0.28 3	1.190	0.198	0.207	0.114	0.050	0.050	

STG O20- 5	34760 8.540	62974 61.320	840	1032 6	98.5	1264	28.4	74.6	861	2544	14.20	0.050 5	3.930	333.0	93.9	0.94 0	2.140	7.91	0.53 1	2.170	0.336	0.308	0.156	0.050	0.116
STG O20- 6	34775 6.000	62969 40.000	945	2177 4	82.1	1069	43.7	54.0	980	1239	14.10	6.240 0	1.590	267.0	78.2	1.25 0	1.080	2.89	0.32 2	1.420	0.296	0.340	0.168	0.110	0.119
STG O20- 7	34753 0.037	62994 79.370	316	1380 2	102.0	1209	32.4	68.4	454	701	48.90	2.620 0	2.760	191.0	117. 0	1.34 0	1.160	3.48	0.29 7	1.310	0.277	0.354	0.288	0.112	0.115
STG O20- 8	34767 2.000	62990 43.000	223	9873	96.8	1048	31.5	63.8	457	742	49.20	3.230 0	2.610	193.0	69.4	1.12 0	0.935	2.12	0.21 7	0.912	0.170	0.195	0.216	0.050	0.050
STG O20- 9	34777 7.000	62985 85.000	410	1458 6	82.2	1260	29.2	74.9	618	767	33.50	1.400 0	1.160	146.0	149. 0	1.71 0	1.710	3.45	0.35 7	2.220	0.262	0.586	0.249	0.863	0.050
STG O20- 10	34788 7.976	62980 33.415	937	2573 4	76.1	1183	25.1	26.5	569	695	20.30	0.050 5	2.940	79.1	96.9	1.64 0	1.530	3.84	0.45 6	2.000	0.421	0.361	0.226	0.125	0.127
STG O20- 11	34804 6.850	62975 74.780	567	1331 1	78.0	1480	54.2	56.2	645	640	53.50	4.230 0	3.000	130.0	97.4	0.87 6	0.671	1.89	0.17 4	0.750	0.119	0.112	0.050	0.050	0.121
STG O20- 12	34816 6.000	62970 58.000	1273	1806 1	82.8	1158	43.5	46.2	607	594	1.30	3.990 0	1.400	87.6	68.3	2.38 0	4.230	11.10	0.98 6	4.720	0.672	0.596	0.335	0.961	0.178
STG O20- 13	34802 4.087	62996 08.989	503	1914 7	97.9	992	40.4	108. 0	467	621	48.00	7.030 0	6.920	156.0	129. 0	1.97 0	2.600	5.67	0.60 8	3.600	0.491	0.524	0.377	1.350	0.152
STG O20- 14	34824 0.980	62991 15.210	321	1337 5	115.0	1123	35.4	68.4	512	651	51.30	4.520 0	3.620	328.0	103. 0	1.45 0	1.130	2.43	2.47 0	27.50 0	11.10 0	7.400	2.980	2.480	2.710
STG O20- 15	34829 0.000	62986 21.000	538	1950 9	109.0	1393	58.4	64.6	1009	312	79.50	14.00 00	3.050	241.0	67.4	1.22 0	1.830	4.09	0.46 3	2.930	0.366	0.344	0.237	1.220	0.168
STG O20- 16	34840 6.421	62981 59.350	873	1570 9	70.1	807	16.5	22.6	515	682	21.50	0.050 5	1.560	97.3	92.2	0.82 9	0.545	1.36	0.14 0	0.640	0.108	0.144	0.050	0.050	0.050
STG O20- 17	34851 3.980	62977 05.260	1326	1655 8	74.3	1348	62.9	52.8	638	312	100.0 0	11.40 00	8.480	61.6	62.2	1.59 0	2.320	7.83	0.68 0	3.070	0.631	0.565	0.421	0.250	0.246
STG O20- 18	34866 6.000	62972 50.000	871	1377 8	61.1	1068	27.5	24.7	415	416	107.0 0	0.050 5	0.801	40.3	68.5	1.00 0	0.757	2.14	0.20 4	0.917	0.170	0.173	0.050	0.050	0.050
STG O20- 19	34847 5.529	62998 19.907	437	1399 5	96.5	1097	42.0	75.8	462	746	61.70	6.240 0	5.350	196.0	136. 0	1.13 0	1.030	2.94	0.25 9	1.130	0.216	0.291	0.226	0.050	0.050
STG O20- 20	34863 7.410	62993 58.277	1148	2962 0	78.7	1448	37.3	69.8	314	339	74.40	3.730 0	4.000	81.5	80.2	3.59 0	2.890	7.04	0.86 8	3.950	0.949	1.020	0.877	0.457	0.411
STG O20- 20d	34864 2.520	62992 33.530	1565	1779 2	75.6	1308	28.6	63.0	335	259	27.00	0.984 0	1.560	107.0	124. 0	2.42 0	1.740	4.17	0.49 0	2.160	0.487	0.666	0.476	0.223	0.217
STG O20- 21	34877 2.000	62987 04.000	757	1403 4	92.8	1600	63.8	57.6	585	254	64.30	10.80 00	1.800	28.0	67.7	0.97 1	0.615	1.56	0.17 5	0.856	0.178	0.190	0.167	0.132	0.153
STG O20- 22	34891 5.618	62983 17.229	856	1964 4	151.0	1358	56.5	68.6	2922	3776	35.40	10.60 00	2.650	997.0	67.4	1.06 0	0.828	2.17	0.25 3	1.150	0.256	0.307	0.146	0.124	0.144
STG O20- 23	34897 1.740	62978 04.360	390	2052 8	88.7	1343	29.7	68.4	580	564	41.60	1.210 0	1.620	181.0	139. 0	1.36 0	1.170	2.81	0.30 9	1.360	0.284	0.684	0.291	0.113	0.125
STG O20- 24	34914 1.000	62973 25.000	360	1544 3	108.0	1494	32.9	67.4	687	614	48.90	1.590 0	1.550	155.0	122. 0	1.06 0	0.949	2.44	0.23 8	1.090	0.223	0.525	0.241	0.050	0.050
STG O20- 25	34901 5.000	62998 73.000	655	1949 2	95.5	1387	37.1	86.9	544	945	38.30	2.720 0	2.340	330.0	87.0	1.47 0	2.090	4.70	0.50 2	3.040	0.402	0.544	0.317	1.090	0.100
STG O20- 26	34906 8.899	62995 03.215	637	1755 8	108.0	1367	33.0	86.2	759	554	43.30	1.720 0	0.965	317.0	142. 0	0.74 4	0.929	2.71	0.28 7	1.280	0.289	0.578	0.250	0.050	0.050
STG O20- 27	34926 6.000	62988 87.000	726	1189 7	86.9	999	47.3	59.9	564	287	37.10	7.370 0	3.030	69.4	80.8	1.32 0	1.460	7.56	0.32 7	0.382	1.140	0.584	0.364	0.314	0.187
STG O20- 28	34939 3.102	62984 26.616	1152	4188 3	249.0	249	60.1	72.4	1394	1826	45.70	7.540 0	3.500	716.0	72.8	1.39 0	3.090	7.39	0.86 8	4.620	0.806	1.340	0.521	1.570	0.223

STG O20-29	34953 7.360	62979 57.160	1169	2501 4	242.0	1350	29.4	59.0	1107	2022	75.70	0.050 5	2.200	887.0	76.3	1.99 0	1.600	3.86	0.45 1	1.900	0.380	0.410	0.237	0.145	0.146
STG O20-30	34962 1.000	62975 19.000	1417	5625 1	153.0	2605	102.0	76.8	1088	1111	23.60	0.050 5	3.620	297.0	139. 0	1.32 0	2.060	5.57	0.66 5	2.860	0.644	1.210	0.450	0.233	0.229
STG O20-31	34937 3.849	63002 96.087	797	1316 1	154.0	1403	39.8	95.6	354	636	46.10	5.590 0	4.680	153.0	95.2	1.48 0	2.820	9.28	0.66 0	2.690	0.446	0.536	0.313	0.126	0.126
STG O20-32	34964 2.630	62996 28.625	406	1638 4	163.0	1402	38.9	90.6	831	1415	49.00	5.480 0	3.420	460.0	139. 0	1.28 0	1.070	2.65	0.26 7	1.140	0.245	0.470	0.262	0.050	0.050
STG O20-33	34974 7.000	62989 46.000	379	1679 8	167.0	1161	25.9	78.0	603	743	31.00	1.340 0	1.120	294.0	80.6	1.33 0	0.948	2.35	0.21 6	1.000	0.195	0.617	0.222	0.050	0.050
STG O20-34	34988 2.000	62985 30.000	889	2219 3	125.0	1192	44.7	66.0	798	786	27.80	5.600 0	2.130	313.0	74.5	1.42 0	1.270	3.46	0.36 3	1.570	0.311	0.368	0.203	0.132	0.138
STG O20-35	34996 5.000	62980 39.000	1931	1988 0	193.0	1314	26.7	43.3	1024	1235	32.10	0.050 5	3.770	636.0	62.7	1.61 0	1.380	3.75	0.40 3	1.720	0.334	0.376	0.198	0.139	0.157
STG O20-36	35009 3.000	62975 07.000	947	2863 2	105.0	999	42.7	49.9	679	397	24.10	4.420 0	2.120	167.0	81.0	1.77 0	1.650	4.15	0.47 1	2.030	0.412	0.417	0.267	0.168	0.181

### ANEXO 3C: Base de datos 2021 validada (criterio valores bajo el LC < 70%)

Muestra	Coord enada E	Coord enada N	Mg (µg/mL)	Al (µg/mL)	Cr (µg/mL)	Mn (µg/mL)	Co (µg/mL)	Ni (µg/mL)	Cu (µg/mL)	Zn (µg/mL)	As (µg/mL)	Cd (µg/mL)	Cs (µg/mL)	Pb (µg/mL)	Sc (µg/mL)	Y (µg/mL)	La (µg/mL)	Ce (µg/mL)	Pr (µg/mL)	Nd (µg/mL)	Sm (µg/mL)	Gd (µg/mL)	Dy (µg/mL)	Er (µg/mL)	Yb (µg/mL)
STG O21-1	34713 4	62994 42	1011	1321 4	630.0	1375	28.0	91.4	1598. 0	2086	20.20	0.914 0	6.200	1721. 00	85.0	1.50 0	1.600	4.250	0.48 7	2.040	0.463	2.260	0.629	0.336	0.336
STG O21-2	34724 4	62989 46	658	2028 6	95.2	1129	23.3	34.3	580.0	632	16.40	0.050 5	5.040	263.0 0	68.6	1.90 0	1.990	4.830	0.55 2	2.280	0.481	1.700	0.497	2.011	0.324
STG O21-3	34726 2	62984 73	1035	1284 2	66.4	1365	26.4	32.5	589.0	440	12.40	0.050 5	11.00 0	70.00	82.7	1.83 0	1.720	4.680	0.53 5	2.400	0.569	1.770	0.517	0.313	0.295
STG O21-4	34743 8	62979 15	339	1587 9	55.5	1413	31.0	31.4	874.0	317	38.00	0.050 5	8.900	49.40	85.7	1.05 0	0.954	2.940	0.26 6	1.210	0.248	0.948	0.483	0.127	0.252
STG O21-5	34759 6	62974 84	602	7296	26.3	697	27.7	23.2	420.0	244	17.30	7.070 0	37.70 0	15.80	37.3	0.42 8	0.423	1.120	0.05 0	0.467	0.050	0.050	0.230	0.216	0.141
STG O21-6	34776 0	62969 47	622	9286	30.1	647	28.2	38.6	353.0	609	20.30	7.550 0	32.50 0	237.0 0	40.2	0.57 4	0.579	1.570	0.14 6	0.708	0.128	0.141	0.407	0.189	0.208
STG O21-7	34755 1	62995 87	457	1857 3	57.6	1421	27.8	27.5	656.0	362	25.90	11.50 00	0.052	83.00	75.2	1.39 0	1.120	3.140	0.32 5	1.440	0.326	1.660	0.365	0.170	0.179
STG O21-8	34767 1	62990 46	528	7168	47.2	587	33.2	21.2	289.0	474	26.20	3.270 0	43.70 0	108.0 0	69.1	0.51 8	0.399	0.971	0.05 0	0.394	0.050	0.050	0.304	0.154	0.181
STG O21-9	34777 1	62985 98	526	2065 5	90.6	1264	26.9	34.0	629.0	596	18.70	0.050 5	13.10 0	174.0 0	72.5	2.37 0	3.300	7.050	0.80 8	4.570	0.631	1.390	0.279	0.132	0.165
STG O21-10	34786 7	62980 27	6948	2119 9	78.7	2285	178.0	191. 0	1495. 0	1005	81.80	1.680 0	7.680	159.0 0	76.5	1.70 0	1.620	4.220	0.51 9	2.310	0.553	1.540	0.221	0.340	0.124
STG O21-11	34802 9	62975 72	553	6695	32.3	447	23.5	20.9	157.0	175	8.51	7.080 0	38.00 0	38.90	42.7	0.51 0	0.410	1.040	0.05 0	0.402	0.050	0.050	0.209	0.328	0.050
STG O21-12	34815 8	62970 38	643	5330	48.9	492	23.9	62.6	236.0	190	13.10	7.500 0	37.30 0	47.10	37.9	0.55 0	0.440	1.180	0.05 0	0.466	0.050	0.050	0.169	0.050	0.050
STG O21-13V	34811 2	62996 42	528	2144 2	129.0	1148	22.0	97.5	592.0	897	3.68	0.050 5	0.444	203.0 0	71.2	1.50 0	1.660	4.530	0.42 1	1.860	0.339	2.350	0.050	0.050	0.050
STG O21-13P	34803 4	62996 17	417	1798 1	64.6	1213	23.3	28.8	515.0	423	13.10	0.050 5	1.220	126.0 0	76.3	1.28 0	0.882	2.130	0.22 3	1.030	0.214	1.480	0.050	0.993	0.050
STG O21-14	34818 7	62991 24	507	5976	34.9	650	34.3	14.5	224.0	146	21.40	2.880 0	48.70 0	89.70	75.6	0.53 4	0.317	0.783	0.05 0	0.277	0.050	0.050	0.238	0.050	0.050
STG O21-15	34829 4	62986 27	911	2363 9	65.3	1232	45.5	28.1	474.0	375	21.30	0.050 5	11.60 0	122.0 0	77.2	2.16 0	2.910	6.810	0.81 2	3.430	0.766	1.840	0.163	0.050	0.050

STG 021-16	348414	6298131	286	11786	21.2	517	13.6	13.0	158.0	162	10.00	7.1400	0.941	45.30	98.6	1.050	0.811	1.850	0.190	0.859	0.154	0.162	0.050	0.050	0.050
STG 021-17	348513	6297716	787	5439	19.6	547	25.6	24.1	346.0	237	6.52	6.8000	37.700	0.05	38.9	0.584	1.100	1.510	0.275	1.250	0.203	0.177	0.050	0.050	0.050
STG 021-17d	348514	6297717	755	4899	22.5	620	23.9	30.4	433.0	288	5.97	6.6000	37.600	0.05	41.9	0.528	0.678	1.490	0.304	1.440	0.179	0.179	0.050	0.050	0.050
STG 021-18	348665	6297224	552	5974	21.3	594	28.1	16.8	148.0	155	7.78	6.8800	37.200	0.05	40.4	0.417	0.334	0.848	0.050	0.332	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050
STG 021-19	348608	6299736	727	23184	102.0	1223	36.0	45.8	728.0	794	12.80	0.0505	0.052	600.00	73.6	0.918	0.838	2.360	0.249	1.090	0.199	1.650	0.050	0.050	0.050
STG 021-19d	348608	6299736	678	20418	109.0	1017	37.2	45.1	750.0	690	10.90	0.0505	0.052	646.00	78.4	0.812	0.936	2.460	0.247	1.220	0.167	1.830	0.050	0.050	0.050
STG 021-20	348670	6299231	532	8150	22.6	665	32.5	10.2	123.0	111	26.90	2.6400	48.500	23.50	72.7	0.678	0.890	1.890	0.191	1.310	0.131	0.124	0.120	0.050	0.050
STG 021-21	348779	6298702	554	5948	28.4	588	32.8	13.9	160.0	55	19.60	2.6800	48.500	8.28	72.0	0.366	0.276	0.645	0.050	0.258	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050
STG 021-22	348912	6298322	209	11678	66.5	675	17.9	38.1	2478.0	2476	20.50	2.5500	0.052	945.00	83.6	0.613	0.474	1.100	0.050	0.503	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050
STG 021-23	349014	6297823	674	5116	26.9	596	26.7	19.8	190.0	231	6.65	7.1700	37.400	20.90	40.3	0.307	0.335	0.870	0.050	0.427	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050
STG 021-24	349145	6297325	797	11366	47.7	672	28.0	33.5	471.0	205	20.70	7.4600	37.600	53.00	62.7	0.582	0.592	1.560	0.144	0.688	0.124	0.126	0.050	0.050	0.050
STG 021-25	349012	6299867	600	7739	30.7	586	28.5	22.9	233.0	196	30.80	8.0200	33.600	50.20	29.7	0.516	0.517	1.330	0.127	0.611	0.111	0.116	0.050	0.050	0.050
STG 021-26	349119	6299395	189	5825	31.0	631	23.1	19.2	167.0	264	50.70	4.5100	3.350	38.10	83.1	0.415	0.341	0.938	0.050	0.363	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050
STG 021-27	349267	6298875	515	8850	24.6	644	33.1	17.3	206.0	100	22.20	2.6100	48.900	29.00	82.3	0.516	0.358	0.838	0.050	0.333	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050
STG 021-27d	349267	6298875	611	8253	25.0	620	35.8	14.8	225.0	164	18.50	2.8400	49.000	29.30	77.4	0.406	0.352	0.844	0.050	0.354	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050
STG 021-28	349403	6298442	245	12568	93.7	729	17.5	20.5	396.0	533	14.10	14.3000	0.052	352.00	113.0	0.873	0.587	1.370	0.124	0.570	0.050	0.121	0.050	0.050	0.050
STG 021-29	349512	6297940	135	6899	29.2	681	13.2	6.3	140.0	54	6.08	5.2200	0.052	32.80	49.9	0.624	0.952	2.190	0.232	0.921	0.190	0.205	0.050	0.050	0.050
STG 021-30	349626	6297511	722	6533	28.0	577	26.6	25.8	155.0	174	14.50	7.6000	37.900	0.05	65.1	0.529	0.572	2.330	0.125	0.580	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050
STG 021-31	349012	6299867	523	6578	23.7	556	27.4	19.1	343.0	155	24.50	7.8900	33.400	0.05	32.3	0.402	0.396	1.050	0.050	0.395	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050
STG 021-32	349610	6299545	180	7585	31.5	606	15.4	15.0	214.0	139	32.60	7.7100	43.500	63.10	85.2	0.563	0.784	1.850	0.178	1.040	0.127	0.130	0.050	0.050	0.050
STG 021-33	349795	6299003	381	11965	34.6	660	14.6	12.8	166.0	1013	5.33	4.0000	3.030	21.50	63.5	0.827	0.688	1.740	0.172	0.757	0.172	0.206	0.050	0.050	0.050
STG 021-34	349826	6298516	249	5937	22.8	502	13.4	12.5	176.0	1096	10.60	5.0900	2.680	35.40	60.6	0.659	0.941	2.060	0.205	1.280	0.159	0.156	0.050	0.050	0.050
STG 021-35	349985	6298076	283	8951	40.5	662	16.5	12.4	204.0	1133	16.60	4.4200	2.740	116.00	60.3	0.614	0.683	1.810	0.170	0.747	0.160	0.182	0.050	0.050	0.050
STG 021-36	350096	6297503	591	8662	38.0	507	31.4	16.1	195.0	182	37.30	2.9300	49.200	95.10	64.6	0.767	1.000	2.160	0.222	0.944	0.156	0.154	0.050	0.050	0.050
STG 021-37	350004	6300189	711	11208	21.3	545	26.6	17.8	153.0	86	18.40	7.2000	32.600	0.05	33.6	0.956	1.580	3.600	0.421	2.670	0.389	0.350	0.050	0.050	0.050

STG O21-38	35016 1	62996 65	162	9401	27.6	670	16.6	15.2	446.0	165	21.20	7.290 0	45.00 0	108.0 0	107. 0	0.74 1	0.464	1.110	0.05 0	0.453	0.050	0.050	0.128	0.050	0.335
STG O21-39	35025 3	62991 05	236	7861	16.6	910	19.4	8.0	220.0	176	11.90	0.050 5	0.052	12.90	89.1	0.70 4	0.541	1.490	0.15 5	0.732	0.184	0.214	0.112	0.050	0.108
STG O21-40	35036 9	62985 75	321	8723	29.9	611	16.4	16.1	167.0	1308	7.63	4.860 0	3.020	50.00	76.6	0.48 3	0.381	1.000	0.05 0	0.451	0.050	0.139	0.144	0.111	0.111
STG O21-41	35047 5	62981 12	357	1098 1	71.5	616	14.8	22.9	210.0	1221	10.00	5.100 0	2.850	138.0 0	59.2	0.64 4	0.707	1.800	0.19 3	0.834	0.200	0.219	0.124	0.109	0.109
STG O21-41d	35047 5	62981 12	355	1141 4	68.2	596	14.3	23.3	229.0	1230	11.70	5.930 0	2.860	138.0 0	67.2	0.68 8	0.683	1.680	0.16 9	0.751	0.168	0.206	0.134	0.122	0.335
STG O21-42	35059 7	62976 02	532	6731	21.0	505	31.7	15.3	146.0	189	27.40	2.650 0	48.70 0	19.60	71.6	0.50 6	0.385	0.993	0.05 0	0.355	0.050	0.050	0.050	0.625	0.050
STG O21-43	35047 3	63002 96	630	9542	23.2	565	26.9	19.1	468.0	137	20.50	7.680 0	32.50 0	0.05	34.6	0.89 9	0.975	2.370	0.25 5	1.180	0.232	0.222	0.050	0.050	0.050
STG O21-44	35059 3	62997 82	226	1213 4	69.9	641	15.9	35.3	351.0	169	22.60	10.70 00	1.210	373.0 0	108. 0	0.88 7	0.718	1.910	0.17 0	0.776	0.142	0.170	0.165	0.127	0.122
STG O21-45	35076 1	62992 61	323	7036	25.3	874	19.2	11.0	89.1	338	21.30	0.050 5	0.052	15.60	97.6	0.75 0	0.768	1.800	0.18 0	0.739	0.167	0.190	0.132	0.118	0.116
STG O21-46	35084 1	62987 81	421	6927	51.8	732	15.3	15.8	248.0	1511	9.44	4.440 0	3.020	134.0 0	94.3	0.56 2	0.503	1.490	0.14 0	0.650	0.164	0.208	0.127	0.105	0.050
STG O21-47	35089 2	62982 13	389	6164	54.3	725	15.6	19.5	258.0	1889	11.10	4.660 0	3.180	294.0 0	111. 0	0.53 3	0.379	1.090	0.05 0	0.416	0.050	0.192	0.050	0.050	0.050
STG O21-48	35106 0	62978 06	345	5718	93.6	720	16.7	22.6	288.0	1534	15.90	5.020 0	3.170	202.0 0	119. 0	0.45 1	0.342	0.903	0.05 0	0.374	0.050	0.170	0.050	0.050	0.050
STG O21-48d	35106 0	62978 06	363	5243	90.9	766	16.4	44.4	273.0	1532	13.70	5.440 0	3.530	188.0 0	133. 0	0.53 2	0.404	1.150	0.05 0	0.422	0.050	0.190	0.050	0.050	0.050

**ANEXO 4:** Detalle de los valores de pH y conductividad eléctrica obtenidos para las muestras del año 2020 y 2021.

Muestra 2020	pH <sub>H2O</sub>	CE (mS/cm)	Muestra 2021	pH <sub>H2O</sub>	CE (mS/cm)
Blanco	6,8	0,00	Blanco	6,8	0,00
STGO20-1	-	-	STGO21-1	6,7	0,78
STGO20-2	6,9	1,79	STGO21-2	6,9	0,88
STGO20-3	6,5	1,69	STGO21-3	6,4	0,83
STGO20-4	7,1	2,69	STGO21-4	5,9	0,85
STGO20-5	6,9	5,31	STGO21-5	6,9	0,88
STGO20-6	6,7	1,16	STGO21-6	6,7	0,98
STGO20-7	6,6	2,25	STGO21-7	7,2	0,72
STGO20-8	6,2	1,59	STGO21-8	6,7	0,63
STGO20-9	6,9	0,92	STGO21-9	6,9	0,37

STGO20-10	6,7	0,73	STGO21-10	6,4	0,4
STGO20-11	7,3	0,62	STGO21-11	7,1	0,82
STGO20-12	7,1	3,48	STGO21-12	7,2	0,92
STGO20-13	5,4	2,90	STGO21-13	6,5	0,82
STGO20-14	7,1	1,79	STGO21-14	7,4	0,59
STGO20-15	6,7	1,48	STGO21-15	7,0	0,78
STGO20-16	7,1	2,51	STGO21-16	7,1	0,4
STGO20-17	6,2	3,14	STGO21-17	7,0	0,86
STGO20-18	7,1	3,66	STGO21-18	7,1	0,96
STGO20-19	6,7	6,69	STGO21-19	6,5	0,53
STGO20-20	6,5	1,39	STGO21-20	6,2	0,71
STGO20-21	7,6	0,96	STGO21-21	6,8	0,56
STGO20-22	6,3	2,72	STGO21-22	6,9	0,42
STGO20-23	6,7	2,52	STGO21-23	7,1	0,5
STGO20-24	7,5	1,07	STGO21-24	7,2	0,82
STGO20-25	7,3	1,31	STGO21-25	7,2	0,66
STGO20-26	7,6	0,65	STGO21-26	7,1	0,75
STGO20-27	7,4	6,45	STGO21-27	6,7	0,65
STGO20-28	6,1	2,32	STGO21-28	7,0	0,46
STGO20-29	6,4	1,50	STGO21-29	6,9	0,67
STGO20-30	6,8	1,34	STGO21-30	7,7	0,36
STGO20-31	6,8	1,23	STGO21-31	7,2	0,75
STGO20-32	6,9	1,20	STGO21-32	6,8	0,71
STGO20-33	6,5	1,45	STGO21-33	6,4	0,8
STGO20-34	6,8	1,70	STGO21-34	6,2	0,45
STGO20-35	7,3	1,94	STGO21-35	6,9	0,59
STGO20-36	7,5	2,47	STGO21-36	7,0	0,52
			STGO21-37	7,1	0,53
			STGO21-38	7,1	0,87
			STGO21-39	7,4	0,95
			STGO21-40	6,4	0,67
			STGO21-41	7,1	0,52

			STGO21-42	7,5	0,46
			STGO21-43	6,9	0,8
			STGO21-44	7,0	0,53
			STGO21-45	7,2	0,77
			STGO21-46	6,3	0,59
			STGO21-47	6,6	0,39
			STGO21-48	6,4	0,66

**ANEXO 4A:** Categorización de los resultados de pH de acuerdo con su respectivo año y sitio de muestreo.

pH	Categoría	Sitio/Muestra	
		STGO20-	STGO21-
< 4,5	Extremadamente ácido	-	-
4,5 – 5,0	Muy fuertemente ácido	-	-
5,1 – 5,5	Fuertemente ácido	13	-
5,6 – 6,0	Medianamente ácido	-	4
6,1 – 6,5	Ligeramente ácido	3, 8, 17, 20, 22, 28, 29, 33	3, 10, 13, 19, 20, 33, 34, 40, 46, 48
6,6 – 7,3	Neutro	2, 4 – 7, 9 – 12, 14 – 16, 18, 19, 23, 25, 30 – 32, 34, 35	1, 2, 5 – 9, 11, 12, 15, 18, 21 – 29, 31, 32, 35 – 38, 41, 43 – 45, 47
7,4 – 7,8	Medianamente básico	21, 24, 26, 27, 36	24, 30, 39, 42
7,9 – 8,4	Básico	-	
8,5 – 9,0	Ligeramente alcalino	-	

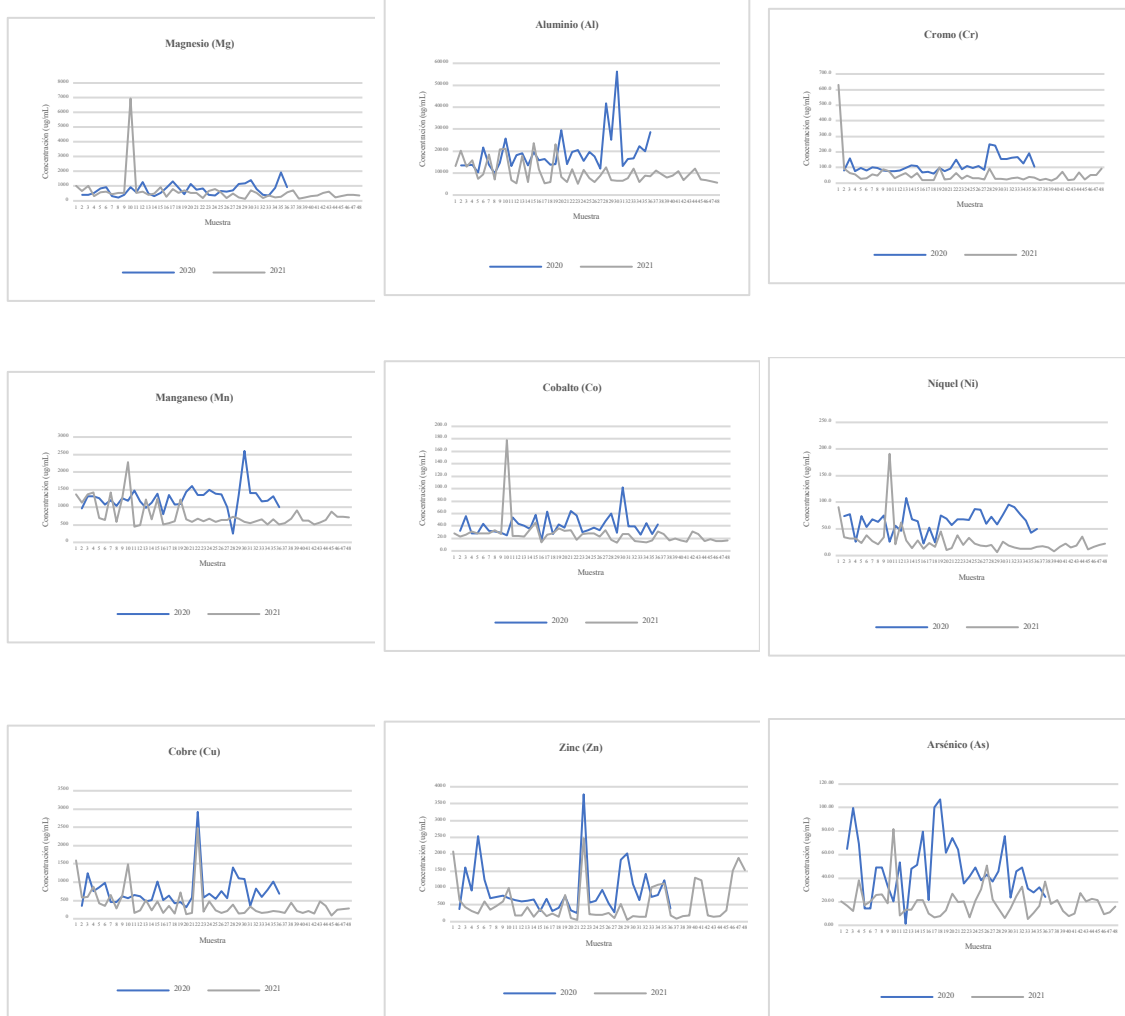


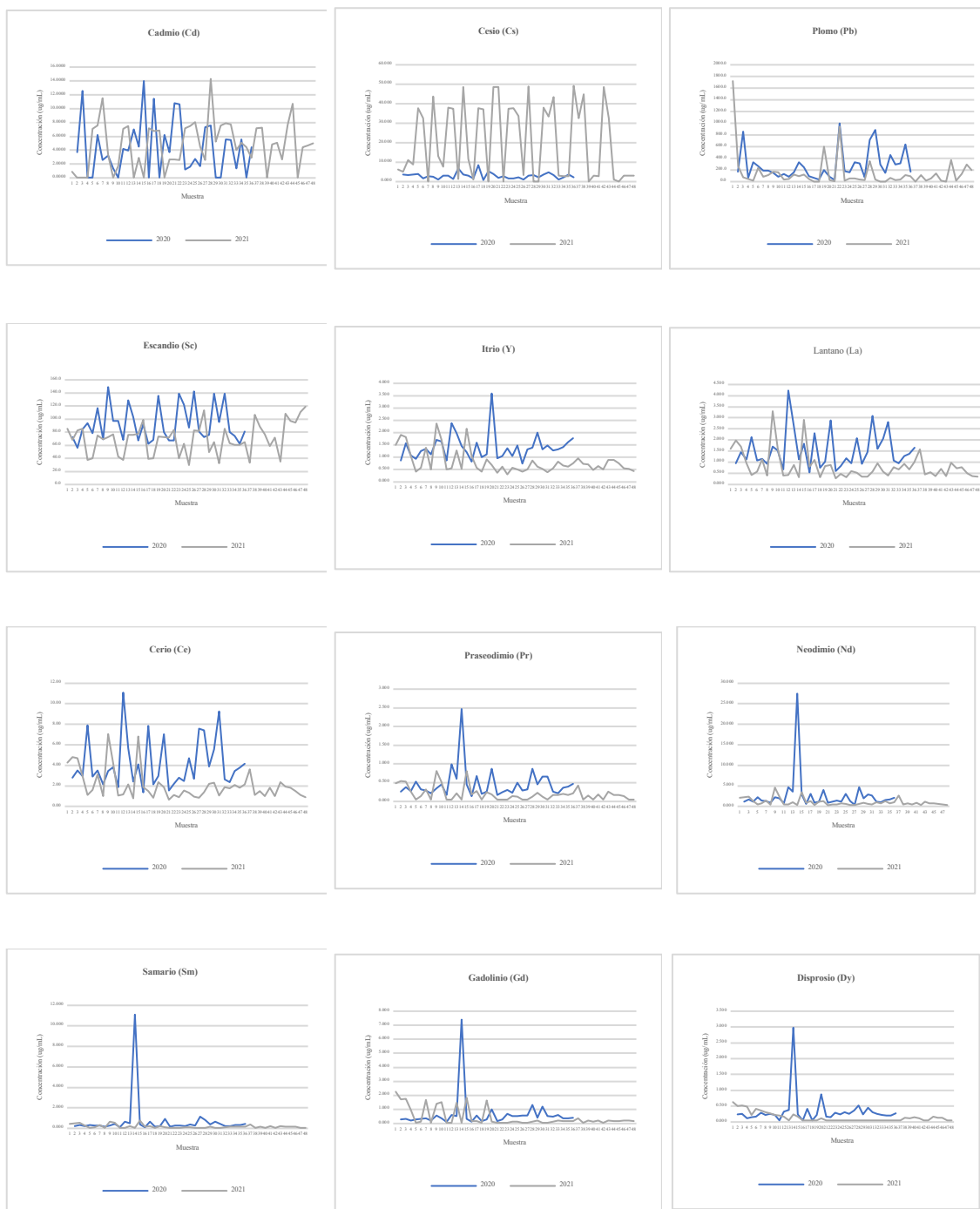
9.1 – 10,0	Alcalino	-	
> 10	Fuertemente alcalino	-	

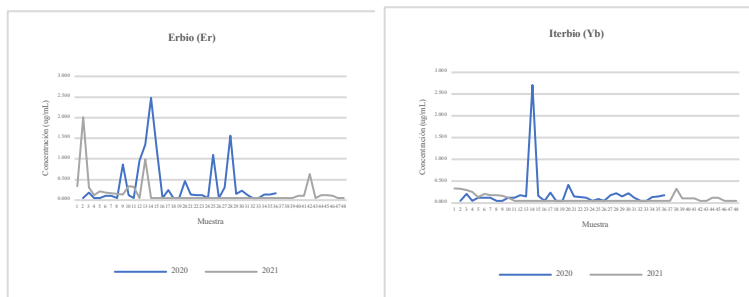
**ANEXO 4B:** Categorización de los valores de Conductividad Eléctrica (CE) obtenidos para los distintos sitios y años de muestreo.

Valor (dS/m)	Categorías de suelo	Muestra/Sitio	
		STGO20-	STGO21-
0 – 2,0	No salino	2, 3, 6, 8 – 11, 14, 15, 20, 21, 24 – 26, 29 – 35	1 – 48
2,1 – 4,0	Poco salino	4, 7, 12, 13, 16 – 18, 22, 23, 28, 36	-
4,1 – 8,0	Moderadamente salino	5, 19, 27	-
8,1 – 16,0	Muy salino	-	-
> 16,0	Extremadamente salino	-	-

## ANEXO 5: Distribución de concentraciones por elemento para cada año muestreado







## ANEXO 6: Indicadores de contaminación

**ANEXO 6A:** Resumen de resultados de los valores del indicador  $I_{geo}$  para los elementos analizados correspondientes al año 2020 y 2021.

Rango	Categoría	Elemento	
		2020	2021
$0 \leq I_{geo}$	No contaminado	Mg, Cd, Cs, Sc	Mg, Al, Mn, Co, Ni, As, Cd, Sc, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm
$0 < I_{geo} \leq 1$	No contaminado a moderadamente contaminado	Al, Mn, Co, As, Y, La, Ce, Pr	Cr, Cu, Zn, Cs, Pb, Gd, Dy, Yb
$1 < I_{geo} \leq 2$	Moderadamente contaminado	Cr, Ni, Cu, Zn, Pb, Nd, Sm, Gd, Yb	Er
$2 < I_{geo} \leq 3$	Moderadamente a fuertemente contaminado	Dy, Er	

**ANEXO 6B:** Resumen de resultados para el indicador mCd, campañas 2020 y 2021.

<b>Rango</b>	<b>Grado de contaminación</b>	<b>Sitio/Muestra STGO20-</b>	<b>Sitio/Muestra STGO21-</b>
$mC_d < 6$	grado de contaminación bajo	-	-
$6 < mC_d < 12$	grado de contaminación moderado	-	-
$12 < mC_d < 24$	grado de contaminación considerable	-	16, 18, 21, 23, 25, 26, 27, 29, 30, 31, 33, 34, 39
$mC_d > 24$	grado de contaminación alto	2 - 36	1 - 15, 17, 19, 20, 22, 24, 28, 32, 35 - 38, 40 - 48