

*“Análisis del contenido de elementos traza y comportamiento acumulador en plantas de la cuenca del río Jáchal, provincia de San Juan”*

Augusto F. Mazzucco

Director: Patricia Piccoli

Co-director: M. Iván Funes Pinter

Tesis presentada para optar al título de Ingeniería en  
Recursos Naturales Renovables- UNCuyo

Laboratorio de Bioquímica Vegetal - Instituto de Biología  
Agrícola de Mendoza - CONICET  
Facultad de Ciencias Agrarias- UNCuyo



# Índice

<b>ABREVIATURAS</b>	<b>4</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>5</b>
<b>1.1 DESCRIPCIÓN DE CLIMA Y SUELOS DE LA PROVINCIA DE SAN JUAN</b>	<b>6</b>
1.1.1 DESCRIPCIÓN DEL CLIMA	6
1.1.2 DESCRIPCIÓN DE SUELOS DE LA PROVINCIA DE SAN JUAN	7
1.2 ACTIVIDAD MINERA EN LOS SUELOS DE SAN JUAN	8
<b>1.3 ELEMENTOS TRAZA</b>	<b>8</b>
1.3.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS MP ANALIZADOS EN LAS PLANTAS Y VALORES MÁXIMOS ADMISIBLES	9
<b>1.4 FLORA DE LA PROVINCIA DE SAN JUAN</b>	<b>12</b>
<b>1.5 RECUPERACIÓN DE SUELOS</b>	<b>14</b>
1.5.1 <i>EX SITU- IN SITU</i>	14
1.5.2 REMEDIACIÓN DE SUELOS: FITORREMEDIACIÓN	14
<b>2.1 OBJETIVO GENERAL</b>	<b>17</b>
<b>2.2 OBJETIVOS PARTICULARES</b>	<b>17</b>
<b>2.3 HIPÓTESIS</b>	<b>17</b>
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>17</b>
<b>3.1 ÁREA DE ESTUDIO</b>	<b>17</b>
<b>3.2 MUESTREO</b>	<b>18</b>
<b>3.3 ANÁLISIS ELEMENTAL</b>	<b>19</b>
3.3.1 ANÁLISIS DE CONCENTRACIÓN TOTAL DE MP: DIGESTIÓN ÁCIDA	19
3.3.3 ANÁLISIS DE CONCENTRACIÓN TOTAL Y DISPONIBLE DE MP POR ESPECTOMETRÍA DE MASAS	20
3.3.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	20
3.3.5 CARACTERÍSTICAS FISCOQUÍMICAS DE LOS SUELOS DE PACHINOCA	20
<b>4. RESULTADOS</b>	<b>21</b>
4.1 RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS FISCOQUÍMICOS DE LAS MUESTRAS DE SUELO	21
<b>4.2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE CONCENTRACIÓN DE ELEMENTOS TRAZA</b>	<b>22</b>
<b>4.3 INTERPRETACIÓN POR ELEMENTOS TRAZA</b>	<b>24</b>
4.3.1 ARSÉNICO	24
4.3.1.1 Correlaciones: As	24
4.3.2 BARIO	25
4.3.2.1 Correlaciones: Ba	25

4.3.3 BORO	26
4.3.3.1 Correlación: B	26
4.3.4 CINC	27
4.3.5.1 Correlación: Zn	27
4.3.6 CROMO	28
4.3.6.1 Correlación: Cr	28
4.3.7 HIERRO	29
4.3.7.1 Correlación: Fe	29
4.3.8 MANGANESO	30
4.3.8.1 Correlación: Mn	30
4.3.9 MERCURIO	31
4.3.9.1 Correlación: Hg	31
4.3.10 NÍQUEL	32
4.3.10.1 Correlación: Ni	32
4.3.11 PLATA	33
4.3.11.1 Correlación: Ag	33
4.3.12 PLOMO	34
4.3.12.1 Correlaciones: Pb	34
4.3.13 SELENIO	35
4.3.12.1 Correlación: Se	35
4.3.1.4.TALIO	36
4.3.13 Correlación: Tl	36
<b>4.4 INTERPRETACIÓN POR ESPECIE VEGETAL</b>	<b>37</b>
4.4.1 A. <i>LAMPA</i>	37
4.4.2 A. <i>MARANTHACEAE</i>	37
4.4.3 B. <i>RETAMA</i>	37
4.4.4 S. <i>APHYLLA</i>	38
4.4.5 L. <i>DIVARICATA</i>	38
4.4.6 P. <i>ALPATACO</i>	38
4.4.6 P. <i>CHILENSIS</i>	39
4.4.7 T. <i>INTEGRIFOLIA</i>	39
4.4.8 T. <i>ÍNDICA</i>	39
4.4.9 Z. <i>PUNCTATA</i>	39
<b>5. DISCUSIÓN</b>	<b>40</b>
<b>6. INVESTIGACIONES FUTURAS</b>	<b>41</b>
<b>7. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>43</b>
<b>8. AGRADECIMIENTOS</b>	<b>47</b>

## Abreviaturas

<b>Ag</b>	Plata
<b>As</b>	Arsénico
<b>Ba</b>	Bario
<b>Bi</b>	Bismuto
<b>Cd</b>	Cadmio
<b>CE</b>	Conductividad eléctrica
<b>Co</b>	Cobalto
<b>Cu</b>	Cobre
<b>Cr</b>	Cromo
<b>F</b>	Flúor
<b>Hg</b>	Mercurio
<b>HR</b>	Humedad relativa
<b>Mn</b>	Manganeso
<b>MO</b>	Materia orgánica
<b>MP</b>	Metales pesados
<b>Na</b>	Sodio
<b>Nd</b>	No detectado
<b>Ni</b>	Níquel
<b>P</b>	Fósforo
<b>Pb</b>	Plomo
<b>Ppb</b>	Partes por billón
<b>Pt</b>	Platino
<b>RAS</b>	Relación de absorción de sodio
<b>Sb</b>	Antimonio
<b>Se</b>	Selenio
<b>Sn</b>	Estaño
<b>Te</b>	Telurio
<b>Tl</b>	Talio
<b>V</b>	Vanadio
<b>VR</b>	Valor residual

# 1. Introducción

El suelo es un componente ambiental, formado por la interacción de los sistemas atmósfera, hidrósfera y biósfera sobre la superficie de la geósfera, en la cual por sus características físico-químicas es donde se desarrolla la vida en la mayoría de los ecosistemas terrestres. Las características del suelo dependen de su origen, formación y evolución. Su equilibrio es frágil y de larga recuperación, por lo que es un recurso no renovable a mediano y corto plazo para el hombre. Un uso inadecuado del suelo puede generar degradación, modificaciones no deseadas, o pérdida del mismo, limitando o reduciendo su productividad potencial (Huertos, 2008).

La contaminación del suelo altera su equilibrio, generando un cambio en las propiedades físicas, químicas y biológicas, debido a la introducción o incremento anormal de determinadas sustancias o compuestos (Puga, 2006). Estos contaminantes suelen estar en concentraciones mayores de las habituales (anomalías) y en general tienen un efecto adverso sobre algunos organismos. Según su origen la contaminación puede ser natural o antropogénica (Huertos, 2008).

La contaminación natural puede proceder de la propia roca madre en la que se formó el suelo, de la actividad volcánica o del lixiviado de las sucesivas mineralizaciones. Mientras que la contaminación de origen antropogénica se produce por los residuos derivados de actividades industriales, agrícolas, mineras y de los residuos sólidos urbanos. Desde un punto de vista legal, los contaminantes antropogénicos son considerados los “verdaderos contaminantes” (Huertos, 2008).

La contaminación de aguas con metales pesados (MP) derivada de las actividades humanas representa alta peligrosidad al ser consumida. Algunos elementos en exceso pueden producir lesiones en los tejidos o piel, alteraciones sistémicas tumorgénicas, pérdida de la memoria, temblores, inestabilidad emocional (angustia e irritabilidad), insomnio e inapetencia, desórdenes mentales y perturbaciones motoras, deformación de los huesos acompañada de intenso dolor y fracturas, además de proteinuria y glaucoma así como afecciones renales (INECC, 2012). La toxicidad que representan los mismos depende del grado, el tiempo y la concentración a la que esté expuesto el individuo (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2008).

Dependiendo de la matriz donde se encuentra el mineral varía la peligrosidad de exposición. Los metales pueden ser incorporados de manera aérea, por respiración, por contacto o también pueden ser incorporados a través de la biotransformación y la biomagnificación. De todos modos, el mayor riesgo de incorporar los MP es a través del agua (Ferguson, 1971). Así como se han encontrado, concentraciones de arsénico (As) de hasta 280 ppb en aguas subterráneas de El Encón y de 9 a 357 ppb en Río Jáchal, provincia de San Juan, (O’Reilly, 2010), hay espejos de agua y suelos en los que se desconoce la concentración de MP y As. Más aún, si la flora presente es capaz de incorporar estos elementos del suelo.

## 1.1 Descripción de clima y suelos de la Provincia de San Juan

### 1.1.1 Descripción del Clima

La provincia de San Juan se encuentra incluida en la Diagonal Árida Sudamericana, la que se prolonga desde el norte del Perú (5° latitud sur) hasta el estrecho de Magallanes (52° latitud sur) abarcando la mayor parte del oeste argentino, a sotavento de la Cordillera de Los Andes (Pereyra, 2010).

El clima afecta la vida física y material de los habitantes, asimismo, algunas actividades humanas pueden modificar el clima. Por ejemplo, en los oasis de regadío como lo son los valles del Tulum, Ullum-Zonda o Jáchal, provincia de San Juan, las condiciones naturales de clima desértico cambian debido al sistema de riego artificial (Pereyra, 2010).

Siguiendo la clasificación climática de Köeppen, la cual se basa en las temperaturas medias y las precipitaciones mensuales, la provincia de San Juan presenta tres regímenes climáticos: Seco de Desierto –BW-; Seco de Estepa –BS-, y Frío de altura –E-.

El primero, –BW-, es el que predomina en el territorio sanjuanino, con una extensión que alcanza el 89,3% del territorio centro-este de la provincia. Incluye los principales centros poblacionales u oasis como el valle del Tulum, Jáchal, Ullum-Zonda, Iglesia-Rodeo y Calingasta-Barreal (Pereyra, 2010). Al ser un clima seco –B- la evaporación excede la precipitación media anual, es decir, se caracterizan por una marcada deficiencia hídrica, en consecuencia no hay cursos permanentes de agua alimentados por precipitaciones pluviales, sino que son típicos los arroyos temporarios en la región. Las precipitaciones pluviales son estivales. Los ríos más importantes y caudalosos de la provincia, el San Juan y el Jáchal, ambos alimentados por los procesos néveo-glaciales de la cordillera. Debido a la aridez de la región, es común la presencia de salinas y barreales, rara vez cubiertas de agua (Pereyra, 2010).

El segundo clima, –BS-, se ubica al oriente y norte de la provincia de San Juan y corresponden al Seco de Estepa. La pluviometría de estas zonas es mayor que la del subgrupo anterior, la que también se concentra en el período veraniego. Se presenta en forma de lóbulos o islas de menor sequedad relativa, en la extensa región semiárida argentina. Al este de la sierra de Valle Fértil y en las proximidades de las sierras de La Batea y Yansó, en Jáchal. Abarca el 2.3% del territorio sanjuanino (Pereyra, 2010).

El tercer clima presente en la provincia de San Juan corresponde a –E-. Cubre una superficie equivalente al 8,4 % de la provincia en coincidencia con la faja cordillerana, donde las precipitaciones néveas se concentran en el invierno. Se desarrolla por encima de los 3.300 m.s.n.m., en esta región la temperatura anual promedio es inferior a 10° C (Pereyra, 2010).

**Tabla N° 1: Clasificación climatogenética de la provincia de San Juan**

Nombres	Clima (según Koeppen)	Proceso dominante	Formas del paisaje -Características
Periglacial	ET de tundra	Acción del hielo. Soliflucción	Suelos estructurados. Llanuras aluviales periglaciales
Árido	BW desértico	Desecación. Acción del viento. Corrientes fluviales	Médanos, barreales (playa lake). Pendientes angulosas, arroyos (uadis), cubetas de deflación.
Semiárido	BS estépico	Corrientes fluviales, movimiento en masa rápidos, meteorización	Pedimentos o glacia, abanicos aluviales, acarcavamiento, - badlands. Pendientes angulosas con derrubios gruesos

(Fuente: Pereyra, 2010)

### 1.1.2 Descripción de suelos de la provincia de San Juan

Los suelos de San Juan son, en casi su totalidad, derivados de materiales originarios provenientes de la erosión de las rocas cordilleranas, que no han sufrido modificaciones en el sitio donde fueron depositados, luego de ser transportados por diferentes agentes tales como eólico (viento), coluvial (gravedad), aluvional (agua) y glacio- lacustre (glaciares y antiguas lagunas) dando origen a la formación de suelos alóctonos (Vallone, 2007).

Debido a las características regionales, extrema escasez de precipitaciones pluviales, los suelos de la provincia se caracterizan por ser incipientes e inmaduros. En este sentido se presenta una gran variabilidad de texturas en distancias cortas y es fácil reconocer, una tierra de perfil totalmente arenoso, y a pocos metros otra con capas limo-arcillosas. Estas variaciones constituyen muchas veces la clave de la heterogeneidad en el estado de un cultivo y explican la presencia de manchones vegetales con distintas características fisiológicas dentro de un mismo cuartel. Además, la temperatura estival alta, las escasas precipitaciones y la abundancia de calcáreo, favorecen la rápida combustión de la materia orgánica (MO) e impiden su acumulación (Vallone, 2007).

En la provincia los afloramientos rocosos ocupan el 56,27%. Mientras que en el resto de la provincia se han reconocido dos órdenes taxonómicos (Reigaraz, 2000) de suelos: Entisoles o suelos de escaso desarrollo y los Aridisoles o suelos de climas áridos.

La predominancia de Entisoles según informes del INTA ha sido atribuida a climas áridos, con escasa intervención del agua en el proceso de evolución de los suelos; reducida edad de los materiales formadores de suelo, producto de la reactivación de los ciclos de erosión y deposición (Bocelli- Gil, 1984).

Los estudios mineralógicos de suelos sanjuaninos son muy escasos (Reigaraz, 2000), de allí la importancia de ahondar en el conocimiento de los suelos de la región; por lo tanto, en el presente trabajo se realizó un estudio fisicoquímico de suelos en el área de muestreo Pachinoca, provincia de San Juan.

## 1.2 Actividad minera en los suelos de San Juan

La extracción minera es una actividad que el hombre viene realizando desde hace más de 400 años para la obtención de minerales ubicados en la corteza de la Tierra. La misma, ha provocado importantes disturbios al medioambiente, generando suelos con limitaciones físicas, químicas y biológicas para el establecimiento de plantas y animales, y por ende, un riesgo a la salud humana, último eslabón de la cadena trófica. Una de las anomalías biogeoquímicas que se generan al momento de la extracción, es el aumento de la cantidad de microelementos en el suelo a niveles de macroelementos, afectando negativamente la biota y calidad de suelo. Como consecuencia se afecta el número, diversidad y actividad de los organismos del suelo, además de enlentecer la descomposición de la MO del mismo (Puga, 2006).

La contaminación por MP no sólo se realiza al momento de extracción, sino también los jales son tóxicos para los organismos, que además de inhibir recursos ecológicos afectan el crecimiento de las plantas. Tras una explotación minera los suelos tienen todo tipo de materiales residuales, lo que representa problemas muy serios para el desarrollo de la cubierta vegetal, siendo las características más notables: clase textural desequilibrada, ausencia o baja presencia de la estructura edáfica, propiedades químicas anómalas, disminución o desequilibrio en el contenido de nutrientes fundamentales, ruptura de los ciclos biogeoquímicos, baja profundidad efectiva, dificultad de enraizamiento, baja capacidad de cambio, baja retención de agua y presencia de compuestos tóxicos (García & Dorronsoro, 2002). Los metales tienden a acumularse en la superficie del suelo quedando accesibles al consumo de las raíces de los cultivos (Puga, 2006).

En San Juan se realiza explotación y exploración minera metalífera que, como ya se hizo mención, es una actividad que puede generar contaminación de los suelos provocando disturbios en el ambiente limitando el establecimiento de la vegetación y de otros organismos y serios riesgos en la salud humana y animal (O'Reilly, 2010). Aproximadamente, desde el año 1800, la provincia cuenta con yacimientos como Hualilán, El Salado y Carmen Alto. Actualmente, algunos ejemplos son: Barrick Exploraciones Argentinas S.A. (origen Canadá); Minera Argentina Gold-MAGSA con un proyecto de exploración llamado "Proyecto Lama", y otro que se encuentra en producción llamado Veladero, que extrae oro y plata; Deprominsa: desarrollo de proyectos mineros SA, con proyecto Vicuña y proyecto Batidero (exploración); IMA Resources; Yamana Gold-minas argentinas, entre otras (Ministerio de Minería, gobierno de San Juan, 2011).

## 1.3 Elementos traza

Los MP están presentes en el suelo como componentes naturales o como consecuencia de la actividad antropogénica (P. Mendez et al, 2009) y, dependiendo de su concentración, pueden afectar adversamente determinadas funciones biológicas (Huertos, 2008). La tabla periódica incluye unos 70 elementos metálicos, y de ellos 59 pueden ser considerados "MP", que son aquellos cuyo peso atómico es superior al del Fe (55,85 g/mol), quedando excluidos metales con pesos atómicos menores, que con frecuencia pueden ser metales contaminantes (como el V, Mn y Cr) y otros que realmente no son metales como As, F y P. Por ello, resulta más conveniente referirse a ellos como elementos traza (ET); si bien hay que reconocer que la mayoría de los contaminantes inorgánicos son MP. A veces, la contaminación del suelo se

puede producir también por altas concentraciones de elementos mayoritarios (Na, Fe, Al; Huertos, 2008).

Los ET suelen estar presentes en baja concentraciones en la corteza de la tierra, en el suelo y plantas. Muchos de ellos son imprescindibles para el crecimiento y desarrollo de la vida, pero pueden ser tóxicos si superan ciertos umbrales (García, 2009). De los que se encuentran en la naturaleza, 17 (Ag, As, Bi, Cd, Co, Cu, Hg, Ni, Pb, Pd, Pt, Sb, Se, Sn, Te, Tl y Zn) son considerados como muy tóxicos y a la vez fácilmente disponibles y, 10 de ellos (Ag, As, Cd, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb, Sn y Tl) son movilizados por actividades mineras en proporciones que exceden, en gran medida, a la de los procesos geológicos (Huertos, 2008). En muchos casos el resultado de la alteración de suelos por ET trae como consecuencia cambios en las características morfológicas y en la degradación del suelo. Uno de los principales efectos es la fuerte acidificación de la capa superficial, como consecuencia de la exposición y disolución de los distintos elementos por el agua, disminuyendo así los valores de pH en el suelo (García, 2009).

En la provincia de San Juan, no se registran estudios que detallen el perfil de ET presentes en el suelo, más aún, hay pocos estudios acerca del contenido de MP en suelo y agua realizados en la Argentina. Algunos autores reportaron contenidos muy altos de As en aguas subsuperficiales en las regiones de Chaco y de Cuyo (Nicolli et al. 2012; Sigrist et al. 2013; Smedley et al. 2002). En muestras de agua del Río Jáchal, San José de Jáchal, San Juan, la concentración de As varían entre 0 a 357  $\mu\text{g L}^{-1}$ , con predominancia de  $\text{As}^{\text{III}}$  (O'Reilly et al., 2010). A pesar de la alta concentración de As que se ha encontrado en el agua, no hay reportes a la fecha, que indiquen presencia de As en suelos y cultivos en la región. Además, Jáchal es una zona árida, que suele tener alta concentración de sales en sus suelos, elevados valores de pH y, bajo contenido de MO y arcilla (Karlin 2013, de Bustos 2013, Suvires 2004), condiciones muy favorables para la deposición de As.

### 1.3.1 Características de los ET analizados en las plantas y valores máximos admisibles

A continuación se desarrollarán las características de trece ET que son los que se analizaron posteriormente en el perfilado de suelo y plantas: Ag, As, Ba, B, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb, Se, Tl y Zn por Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente ICP-MS.

**Tabla N°2: Características de los ET perfilados y valor de referencia (VR, valor máximo admisible)**

MP	Características generales	VR	Fuente
As	Distribuido en toda la corteza terrestre, formando sulfuros y arseniuros metálicos. Usos: agentes de aleación en transistores, láseres y semiconductores. La principal fuente es el agua de consumo, por la disolución de minerales y minas de origen natural, por lo que la vía de exposición más importante es la oral. Cancerígeno (piel, y pulmones)	La OMS establece como VR provisional de 0,01 $\text{mg L}^{-1}$ , de acuerdo a su carácter cancerígeno	OMS, 2006
Ba	Presente en las rocas ígneas y sedimentarias. Con una gran diversidad de aplicaciones	0,7 $\text{mg L}^{-1}$ , Otras fuentes revelan VR en	OMS, 2006 P. Vázquez 2011

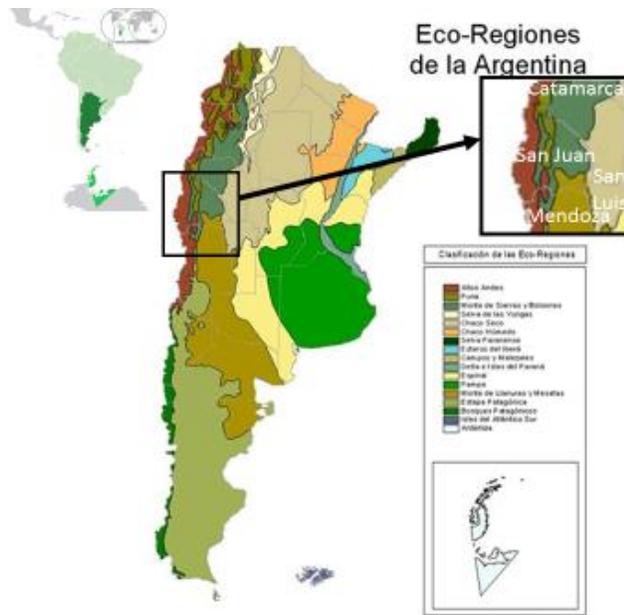
	industriales, el Ba proviene principalmente de fuentes de agua naturales. Los alimentos son la fuente principal de su incorporación. Puede causar nefropatías en animales e hipertensión en humanos	el agua potable de 0.03 mg L <sup>-1</sup>	
<b>B</b>	Los compuestos de B se utilizan en la fabricación de vidrio, jabones y detergentes, y como ignífugos. La mayor exposición al B, es mediante el consumo de alimentos. Se encuentra de forma natural en aguas subterráneas, pero su presencia en aguas es consecuencia del vertido de efluentes residuales tratados. Su consumo puede producir lesiones del sistema reproductor masculino y tumores	La OMS establece como VR 0,5 mg L <sup>-1</sup> .	OMS, 2006
<b>Cr</b>	Ampliamente distribuido en la corteza terrestre. Puede presentar valencias de Cr <sup>+2</sup> a Cr <sup>+6</sup> . Los alimentos son la fuente principal de ingesta de cromo	La OMS establece como VR de 0,05 mg L <sup>-1</sup> (Final Task Force 2003)	OMS, 2006
<b>Ni</b>	Se utiliza en la producción de acero inoxidable y de aleaciones de níquel. Los alimentos son la principal fuente de exposición en personas cuando no son fumadoras o están expuestas por motivos laborales; la ingesta diaria total de Ni es poco importante. No obstante, la movilización de níquel por uso de recipientes en contacto con grifos de níquel o cromo, a la ingesta de Ni podría ser significativa. Es un elemento cancerígeno para el ser humano	La OMS establece un VR de 0,02 mg L <sup>-1</sup> . VR provisional sobre la dosis que produce mortalidad perinatal.	OMS, 2006
<b>Fe</b>	Uno de los más abundantes de la corteza, presente en aguas dulces naturales entre 0,5 a 50 mg L <sup>-1</sup> . También en agua de consumo debido al uso de coagulantes de Fe o corrosión de tuberías en la distribución del agua. Valores inferiores a 0.3 mg L <sup>-1</sup> Fe no confiere sabor al agua, y 1-3 mg L <sup>-1</sup> son aceptables para agua de pozos anaerobios	Se considera como VR 0.3 mg L <sup>-1</sup>	OMS, 2006 Vázquez, 2011
<b>Ag</b>	Presente como óxidos, muy insolubles e inmóviles, y sus sales. Se ha detectado en aguas subterráneas y superficiales y en el agua de consumo en concentraciones mayores que 5 µg L <sup>-1</sup> . El agua de consumo tratada para su desinfección pueden superar los 50 µg L <sup>-1</sup> . La ingesta diaria es ≈7 µg /persona. Contenidos mayores afectan la coloración de la piel y el cabello	El VR en este trabajo revela un VR de 0.05 mg L <sup>-1</sup> en agua potable	OMS, 2006 Vázquez, 2011

<b>Se</b>	Está presente en la corteza asociado con azufre. Es un elemento esencial, presente en los alimentos, cereales, carne y pescado. Las concentraciones en los alimentos varían con la región geográfica de producción. Puede generar inhibición de crecimiento en niños y trastornos hepáticos en adultos	La OMS establece un VR de 0,01 mg L <sup>-1</sup>	OMS, 2006
<b>Pb</b>	Se utiliza en soldaduras, aleaciones y baterías. El tetraetilo y tetrametilo de Pb, son agentes lubricantes y antidetonantes en gasolinas. La eliminación de aditivos con Pb en naftas y soldaduras, incidió positivamente en la industria alimentaria. El Pb en el agua de grifo proviene de piletas que contienen Pb en las tuberías, las soldaduras, los accesorios o las conexiones de servicio a las casas. Su ingesta inhibe actividad enzimática, fijación de vitamina D, causa efectos neurológicos encefálicos y conductuales. También tiene efectos cancerígenos	La OMS un VR de 0,01 mg L <sup>-1</sup>	OMS, 2006
<b>Mn</b>	Es uno de los metales más abundantes de la corteza terrestre, y su presencia está asociada con Fe. Se utiliza en la fabricación de aleaciones de hierro y acero. Además, como oxidante para limpieza, blanqueado y desinfección. Se utilizan arenas de Mn para el tratamiento del agua potable, y potenciador del octanaje de naftas. El Mn es esencial para el ser humano y animales, y está presente en muchos alimentos. Los estados de oxidación más importantes son el Mn <sup>2+</sup> , el Mn <sup>4+</sup> y el Mn <sup>7+</sup> . Presente en muchas fuentes de aguas superficiales y subterráneas, en condiciones anaerobias o de microoxidación, pero la mayor exposición proviene, de los alimentos. En exceso, produce efectos neurológicos	La OMS establece para el agua bebibible VR de 0,5 mg L <sup>-1</sup> .	OMS, 2006
<b>Hg</b>	En la producción electrolítica de cloro, electrodomésticos, amalgamas dentales y materia prima para otros compuestos. El Hg se metila en agua dulce y salada, aunque todo el mercurio del agua de consumo no contaminada está en forma de Hg <sup>2+</sup> ; Los alimentos y actividades laborales son la fuente principal de consumo excesivo. La ingesta promedio de Hg por persona varía entre 2 y 20 µg día <sup>-1</sup> . Genera lesiones renales, colitis, gastritis hemorrágicas	La OMS establece un VR de 0,001mg L <sup>-1</sup> para Hg Total (metilmercurio establecida por el JECFA (2004)	OMS, 2006
<b>Zn</b>	Es esencial, presente en la mayoría de los alimentos y en el agua potable en forma de	La OMS establece que VR mayores a 3 mg L <sup>-1</sup>	OMS, 2006

	sales o complejos orgánicos. La fuente principal de Zn son los alimentos. Las concentraciones en aguas superficiales y subterráneas no sobrepasan los 0,01-0,05 mg L <sup>-1</sup> ; En el agua de grifo puede haber concentraciones mayores como consecuencia de la disolución del cinc de las tuberías	no es aceptable para los consumidores.	
<b>Tl</b>	Se encuentra en la corteza como microelemento. Los minerales de Tl son raros. Importancia en aleaciones de bajo punto de fusión, lentes ópticas y sellos de vidrio para almacenar componentes electrónicos. Los compuestos de Tl son muy tóxicos para los seres vivos.  Es soluble en agua por lo que puede esparcirse en aguas subterráneas. Y por absorción del Iodo. Hay indicadores de su gran movilidad en suelos	Escasa bibliografía sobre el VR de Tl en agua potable, es infrecuente. Su VR es de 1 mg L <sup>-1</sup>	Huertos, 2008 Wright, 2003 CAA, 2017

## 1.4 Flora de la provincia de San Juan

Se puede observar una estrecha relación entre los regímenes climáticos y las provincias fitogeográficas. Siguiendo el sistema de Ángel Cabrera, para la provincia de San Juan, se reconocen tres regiones fitogeográficas: a) el Monte, donde la vegetación dominante en las áreas desérticas (-BW-) corresponde al Monte de Jarilla, b) las regiones con clima de altura (-E-), al oeste de la provincia de San Juan, provincia fitogeográfica Alto Andina Cuyana, donde se desarrolla una vegetación achaparrada, y c) al este, la provincia fitogeográfica Chaqueña con clima estepario (-BS-) asociada a los bosques y pastizales serranos. En los oasis antropogénicos, la vegetación es variada y obedece sobre todo a la actividad agroeconómica (Pereyra, 2010).



**Figura N°1: Mapa de las regiones fitogeográficas de la provincia de San Juan, Argentina. (Fuente: Secretaría de ambiente y Desarrollo Sustentable, elaboración propia)**

El tipo de vegetación predominante en el Monte es el matorral o la estepa arbustiva xerófila, psammófila o halófila. También hay bosques marginales de algarrobos o de sauces. Desde el punto de vista florístico la provincia de San Juan se caracteriza por la presencia de especies arbustivas del género *Larrea* y *Prosopis*. Otros géneros de Zigofiláceas como *Bulnesia retama* (retama) y *Plectrocarpa* abundan en la provincia. La comunidad clímax del Monte es “el jarillal”, que se desarrolla en los bolsones y llanuras de suelo arenoso o pedregoso-arenoso; se trata de una asociación de jarillas (*Larrea divaricata*, *Larrea cuneifolia* y *Larrea nitida*), mata sebo (*Monttea aphylla*) y monte negro (*Bougainvillea spinosa*) (Cabrerá, 1971). Otras especies que encuentran en la región fitogeográfica del Monte son el chañar (*Geoffroea decorticans*), chilca (género *Baccharis*), zampa (*Atriplex lampa*), alpataco (*Prosopis alpataco*), tintitaco (*Senna aphylla*), algarrobos (*Prosopis chilensis* y *P. flexuosa*), atamisque (*Atamisquea emarginata*), matorrales de jume del género *Allenrolfea*, entre otras (Grellet, 2013).

La vegetación en la provincia Alto Andina es muy pobre y está formada por estepas gramíneas o estepas de caméfitos en cojín, también se encuentran vegas y desiertos de líquenes (Cabrerá, 1971).

En una transecta trazada de oeste a este, la provincia está ocupada por la Cordillera Frontal, con un clima montañoso con temperaturas bajas y aporte de nieve que originan vegetación de baja cobertura, con presencia de gramíneas y arbustos de escasa altura. Luego un estrecho valle longitudinal de altura y posteriormente se extiende la precordillera, este complejo orográfico ocupa más del 50% de la superficie de la provincia. Desde allí, hacia el este se extienden llanuras que son atravesadas por las Sierras Pampeanas, representadas por la sierra del Valle Fértil, de la Huerta y la de Pie de Palo (Cándia; Ibañez, 2000).

En la zona llana central las precipitaciones registran un promedio anual de 100 mm, con una humedad relativa (HR) por debajo del 50%. Como ya se ha mencionado el área se inserta en

la provincia fitogeográfica del Monte, por lo que la vegetación es xerófila, dominando en el estrato arbustivo el género *Larrea* y en el estrato arbóreo los géneros *Prosopis* y *Bulnesia*. En esta región plana corren, en dirección noroeste -sureste, los ríos Bermejo y Jáchal que dan lugar a la presencia de pequeños oasis de riego, como es el caso de Mogna. Asociadas a los escurrimientos de estos ríos existen comunidades vegetales con coberturas entre 50 y 70%. Hay una tercera subzona que está determinada por la presencia de las Sierras Pampeanas y que se sitúa al este de esta barrera orográfica. Este cordón montañoso determina características climáticas más húmedas, distintas al resto de la provincia (Morello et al., 1973).

## 1.5 Recuperación de suelos

### 1.5.1 *Ex Situ- In Situ*

Como se mencionó anteriormente, cuando un suelo está contaminado lo que sucede es que se altera su equilibrio, generando un cambio en las propiedades físicas, químicas o biológicas, debido a la introducción o incremento anormal de sustancias o compuestos contaminantes (Puga, 2006). Dichos contaminantes pueden tener efecto adverso sobre algunos organismos (Huertos, 2008).

El alcance de dicha contaminación está relacionada con la dispersión de sus efluentes y por la disolución de los minerales provenientes de la roca madre que quedan expuestos al agua de lluvia, alimentando ríos, lagos y aguas subterráneas (Huertos, 2008). Actualmente, existen varias estrategias para recuperar los suelos degradados con MP. Una de ellas es la recuperación “*Ex Situ*”, la cual consiste en un tratamiento en un lugar distinto de donde se produjo la contaminación, lo que implica mayores costos económicos y mayor impacto ecológico-ambiental. Otra forma, es la recuperación de un suelo “*In Situ*”, donde la recuperación se realiza en el mismo lugar que se encuentra presente la fuente del contaminante (Nonna, 2008). La recuperación de suelos *In Situ* no requiere de la excavación del suelo contaminado, y se lo conduce con un sistema controlado, como el “landfarming” o algún tipo de biorreactor (López de Mesa, 2006). La biorremediación *In situ* es la más aplicada y utiliza organismos autóctonos (López de Mesa, 2006).

### 1.5.2 Remediación de suelos: Fitorremediación

La biorremediación es una práctica que consiste en el uso de microorganismos como hongos, bacterias naturales y plantas, modificadas genéticamente o no, para neutralizar sustancias tóxicas transformándolas en menos tóxicas o en inocuas para el ambiente o la salud humana (López de Mesa, 2006).

Dependiendo del organismo que efectúe la degradación del xenobiótico (del griego *xeno* “extraño” y *bio* “vida”), es la clasificación de la biorremediación (López de Mesa, 2006). En el caso de que la biorremediación se realice con el uso de plantas se denomina Fitorremediación, y se la utiliza para la remoción de contaminantes de suelo y aguas, es una técnica apropiada para la remoción de MP y radionúcleos (López de Mesa, 2006). Ésta tecnología hace uso de los procesos naturales que involucra a las raíces de las plantas y la microflora presente en la rizósfera, para así degradar y extraer contaminantes tanto orgánicos

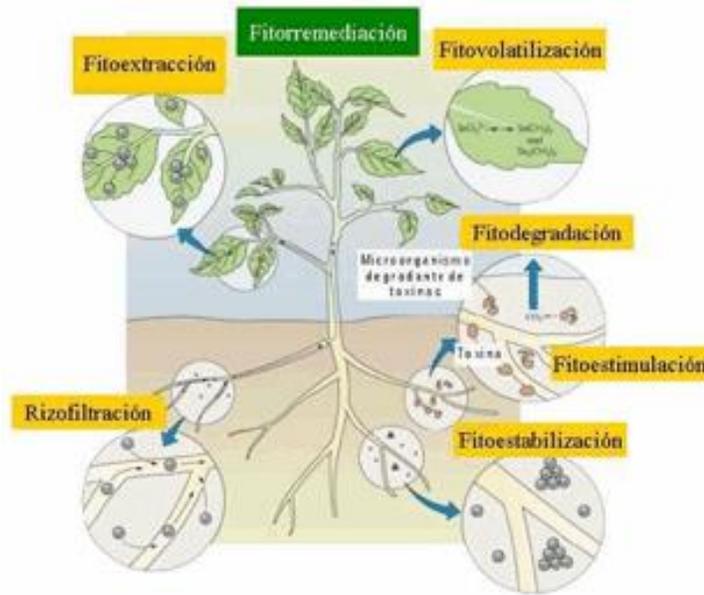
como inorgánicos (Pilon- Smits, 2005). Los contaminantes orgánicos suelen ser producidos por la actividad humana y de los organismos, siendo muchos de ellos tóxicos y algunos cancerosos (xenobióticos). Los contaminantes inorgánicos se producen como elementos naturales en la corteza terrestre y la atmósfera, como también por actividades humanas como la minería, la industria, el tráfico, la agricultura, y actividades militares que promueven su liberación al medio ambiente, culminando en toxicidad (Pilon- Smits, 2005).

Para una fitorremediación eficiente se debe contar con especies vegetales capaces de incorporar MP, idealmente en hojas, para que de esta manera puedan ser extraídos del suelo (Dary et al, 2010). La absorción de los metales pesados depende de la disponibilidad de los mismos, la cual está estrechamente relacionada con el pH, la temperatura y la MO (sustancias húmicas solubles o insolubles) del suelo (Cabezas, 2004).

La fitorremediación puede ser rizoestabilización, rizofiltración, fitoacumulación, fitovolatilización, fitodegradación y fitoestimulación (Dary et al, 2010). El uso de las plantas para la remediación y recuperación de suelos es amplio dependiendo del contaminante, las especies de plantas, del lugar, entre otras. En base a Pilon- Smits et al (2005) y Dary et al. (2010), el proceso de fitorremediación se puede clasificar en:

- Rizofiltración: Pueden ser utilizadas como filtros en la construcción de humedales o cultivos hidropónicos
- Fitoextracción: se basa en el uso de plantas hiperacumuladoras, que puedan tolerar y acumular altas concentraciones de MP. Las plantas hiperacumuladoras ideales son aquellas que cuentan con raíces profundas, crecimiento rápido y gran cantidad de biomasa. Dichas plantas no pueden ser luego destinadas como alimentos o consumo (ej., leña, comida), pero si pueden reciclarse los MP siendo recuperados de las cenizas de las mismas
- Fitoestabilización: se hace uso de las plantas para estabilizar el contaminante, ya sea previniendo la erosión, lixiviación o pérdida, o cambiando el contaminante a una forma menos biodisponible
- Fitoestimulación o rizodegradación: las plantas facilitan la degradación de contaminantes a través de la actividad biológica microbiana que ocurre en la rizósfera
- Fitodegradación: las plantas pueden degradar contaminantes orgánicos a través de su propia actividad enzimática.

Fitovolatilización: luego de alcanzar los tejidos de las plantas, algunos contaminantes pueden liberarse como compuestos volátiles al aire y facilitando su dispersión.



**Figura N°2: Esquema de los distintos procesos de fitorremediación (fuente: Dary et al, 2010).**

Los procesos de fitorremediación no son excluyentes unos de otro, ya que se pueden dar en simultáneo varios de ellos. Por ejemplo, en un humedal pueden ocurrir los procesos de rizofiltración, fitoacumulación, fitoestabilización y fitovolatilización simultáneamente (Pilon- Smits, 2005).

Los compuestos inorgánicos no pueden ser degradados por las plantas, pero si pueden ser fitorremediados a través de la extracción o estabilización en tejidos de plantas (Pilon- Smits, 2005). Dentro de los compuestos inorgánicos que pueden ser fitorremediados se encuentran macronutrientes (que son aquellos elementos incorporados en mayores cantidades por las plantas) como nitratos, fosfatos; los oligoelementos, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo y Zn y elementos no esenciales Co, Cd, F, Hg, Se, Pb, V, W más los isótopos radiactivos como U, Cs y Sr (Pilon- Smits, 2005). La absorción de dichos compuestos aumenta al incrementarse la concentración total de MP en los suelos, hasta alcanzar un umbral o valor máximo de concentración en el cual la planta no responde a mayores aplicaciones. Éste umbral es diferente para cada especie vegetal en función de sus estrategias para tolerar elevadas concentraciones de MP en el suelo (Cabezas, 2004).

La fitorremediación puede realizarse con plantas nativas o exóticas. Las plantas nativas suelen presentar la ventaja de mayor producción de biomasa mientras que las exóticas, mayor capacidad de acumulación (Cabezas, 2004).

## 2.1 Objetivo general

Identificar y seleccionar especies vegetales de la cuenca del río Jáchal en base a su capacidad de acumular metales pesados y metaloides. Asimismo, proponer las posibles especies para el tratamiento de suelos contaminados.

## 2.2 Objetivos particulares

1. Determinar la concentración de metales pesados y metaloides en hojas y raíces de las plantas seleccionadas y en la porción de suelo correspondiente.
2. Seleccionar especies de plantas, en base a la capacidad de acumular metales pesados y metaloides en relación al contenido en el suelo.

## 2.3 Hipótesis

Las especies seleccionadas de la provincia fitogeográfica del Monte aledañas a la cuenca del río Jáchal, incorporan elementos traza y los acumulan en sus órganos aéreos, siendo potencialmente útiles para la fitorremediación.

## 3. Materiales y Métodos

### 3.1 Área de estudio

El muestreo se realizó en marzo de 2015. Las muestras de suelo (aproximadamente 1kg) y plantas fueron recolectadas en zonas bajo influencia del Río Jáchal, provincia de San Juan, el cual nace en el Embalse Iglesia y atraviesa el pueblo de Jáchal, para luego continuar hacia el Sur y finalmente unirse al Río Bermejo.

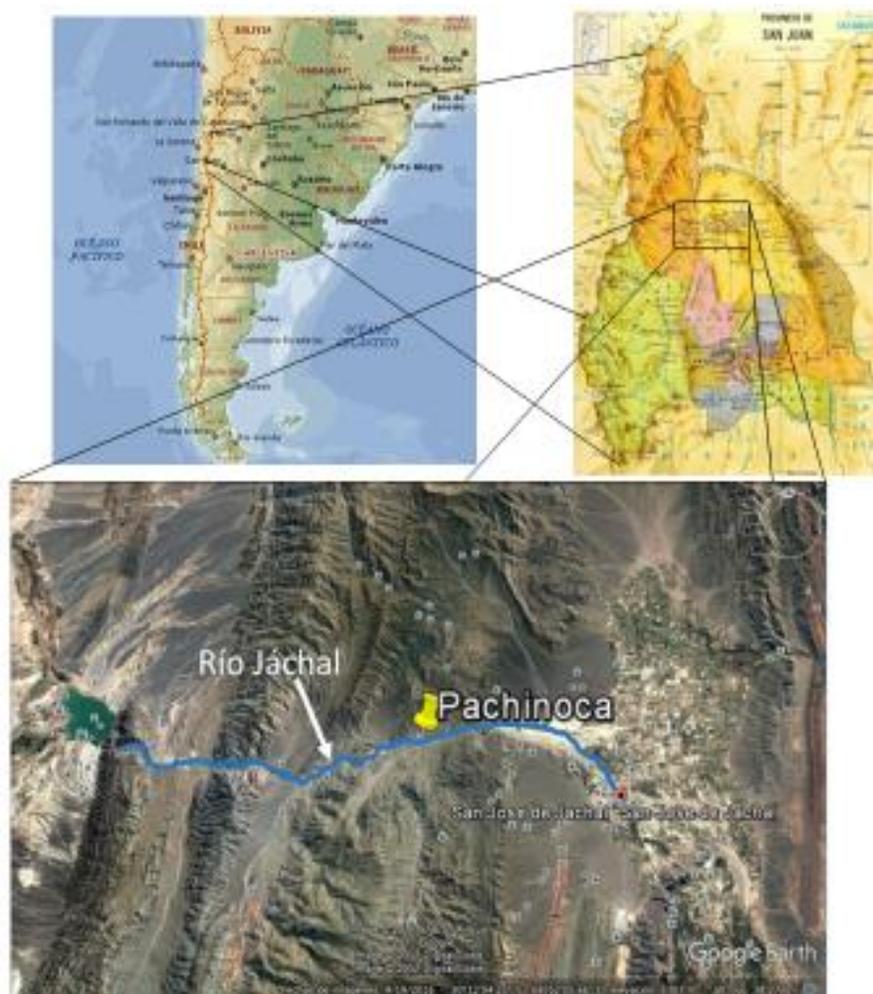


Figura N°3: Área de muestreo de suelo y material vegetal realizado en la localidad de Jáchal, provincia de San Juan, Argentina. (Fuente: google earth; gobierno electrónica Argentina)

### 3.2 Muestreo

Se tomaron muestras de las distintas especies vegetales y de suelo en un punto del río Jáchal donde previamente el grupo de trabajo había detectado elevadas concentraciones de ET. Se seleccionaron 10 especies diferentes de plantas en base a un relevamiento de las especies del lugar en función de su presencia y abundancia. Las especies seleccionadas fueron: *Asteraceae maranthaceae*, *Zuccagnia punctata*, *Larrea divaricata*, *Prosopis alpataco*, *Tessaria integrifolia*, *Prosopis chilensis*, *Senna aphylla*, *Bulnesia retama*, *Tamarindo índica*, *Atriplex lampa*. Las plantas fueron clasificadas según la presencia de tejido leñoso o herbáceo.

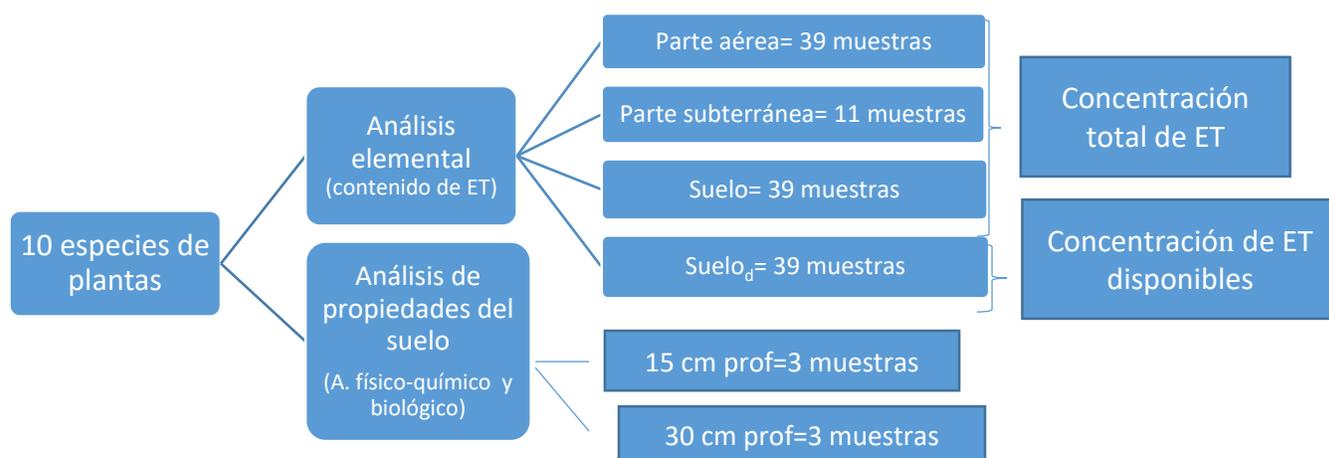
De las plantas herbáceas (*S. aphylla*, *A. maranthaceae* y *T. integrifolia*) se tomaron 4 muestras de la parte aérea (hoja) y 4 de la raíz, con la excepción de *S. aphylla* que por error de pesaje se descartó una muestra de raíz, quedando 3 muestras.

En el caso de las plantas leñosas sólo se tomaron muestras de la parte aérea (hoja) tal como se indicó, debido a la profundidad que pueden alcanzar las raíces, sumado al suelo del lugar rocoso/ pedregoso, que representó una gran dificultad para su muestreo. Al igual que las herbáceas se tomaron 4 muestras por especie, con la excepción de *T. índica* de la cual se

tomaron 3 muestras por error de muestreo. Es decir, de la parte aérea se tomaron 39 muestras y de la parte subterránea 11, siendo en su totalidad 50 muestras de materia vegetal. Cabe especificar que el término “parte aérea” de la planta hace referencia al tallo y hoja para las especies *B. retama* y *T. indica* ya que sus hojas son muy pequeñas.

También se tomaron muestras de suelo en la base de cada planta para analizar la concentración de ET, con un total de 39 muestras. Por ende, la totalidad de muestras problemas a digerir fue de 89, a esta cifra se sumaron 39 muestras de suelo, previamente expuestas a agua ultrapura para conocer la concentración de los ET que están disponibles para las plantas. Por último, las 128 muestras fueron enviadas al Laboratorio de Espectrometría de Masas-INQUISAL-CONICET, San Luis con el fin de analizarlas mediante ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer).

Además se tomaron muestras de tres puntos diferentes dentro del área de muestreo a 15 cm de profundidad y otra a 30 cm para análisis fisicoquímicos de suelos, con un total de 6 muestras.



**Esquema 1: Esquema de muestreo de material vegetal y de suelo, Jáchal, San Juan. Suelo<sub>a</sub>: concentración de ET disponible**

### 3.3 Análisis elemental

#### 3.3.1 Análisis de concentración total de ET: digestión ácida

Las muestras vegetales y de suelo fueron secadas en estufa a 60°C durante 48 h; las muestras vegetales se molieron con mortero para facilitar la posterior digestión. Una vez realizadas las pruebas preliminares, las muestras de plantas molidas y las muestras de suelo fueron sometidas a una digestión ácida de acuerdo al siguiente protocolo (Funes Pinter et al. 2017):

1. A 100 mg de muestra en un tubo de ensayo
2. Agregar:
  - i. 3 mL de HNO<sub>3</sub>
  - ii. 1 mL de HCl
  - iii. 1 mL de HClO<sub>4</sub>

3. Agitar durante 1 min aproximadamente
4. Colocar la muestra en sonicador durante 15 min a 60 °C
5. Agregar 0,1 mL de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Esperar reacción. Repetir tres veces
6. Agitar nuevamente la muestra durante 1 min
7. Repetir la sonicación durante 15 min a 60 °C
8. Agitar mediante vortex durante 1 min y
9. Finalmente, colocar la muestra en microondas, 30 seg haciendo pausas cada 10 a 15 seg

### 3.3.2 Análisis de concentración disponible de ET en plantas

Las muestras de suelo fueron secadas en estufa a 60°. Luego, suspendidas en 5 ml de agua ultrapura (18 MΩ).

### 3.3.3 Análisis de concentración total y disponible de ET por espectrometría de masas

Posteriormente, las muestras (tanto disponible como la concentración total de ET) fueron trasladadas al Laboratorios de Espectrometría de Masas-INQUISAL-CONICET, en donde en total se analizaron 13 elementos: As, Ag, Ba, B, Cr, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Si, Tl, y Zn. Se diluyeron en una relación de 1:20 y posteriormente se analizaron por Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS por sus siglas en ingles); Perkin Elmer SCIEX, ELAN DRC-e, Thornhill, Canada). El Ar, pureza 99,996%, fue provisto por Air Liquide S.A. (Córdoba, Argentina). Un nebulizador (PFA-ST, resistente a HF y de alta performance perfluoroacetato), acoplado a una cámara de cuarzo con spray ciclónico, enfriada con sistema PC3 (Omaha - NE, USA), y una bomba peristáltica Tygon black/black de 40 cm de longitud de y 0,76 mm de diámetro interno. LD: 1 ppt. Los valores de concentración fueron expresados en  $\mu\text{g g}^{-1}$  de suelo o tejido seco (TS).

### 3.3.4 Análisis estadístico

Con los datos de concentración obtenidos se realizó un análisis de correlación (cálculo del índice de Pearson) para determinar la relación entre la concentración de los elementos en el suelo y en los distintos órganos de las plantas. Software InfoStat versión 2015 (Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina).

### 3.3.5 Características fisicoquímicas de los suelos de Pachinoca

Para determinar las características de los suelos de Pachinoca, se realizó un análisis fisicoquímico en el laboratorio de Edafología-FCA-UNCuyo. Todas las muestras de suelo fueron secadas durante 72 h y tamizadas (Tamiz N°10), obteniendo la Tierra Fina Seca al Aire (TFSA) para realizar las posteriores determinaciones. Cada muestra de suelo fue caracterizada granulométricamente mediante el método Bouyoucos (Bouyoucos 1962). Se

determinó la conductividad eléctrica (CE) en extracto de saturación y pH en pasta saturada, de acuerdo a Richards (1954). El Ca y Mg soluble se determinaron por titulación con versenato, mientras que el Na y K por fotómetro de llama (Zeltec ZF 250, rango de sensibilidad: Na: 0-20 ppm; K: 0-40 ppm) en el extracto de saturación (Cheng y Bray 1951). Se calculó la Relación de Absorción de Sodio (RAS) en base a la fórmula:

$$RAS = \frac{Na^+}{\frac{\sqrt{Ca^{+2} + Mg^{+2}}}{2}}$$

El contenido de MO fue analizado de acuerdo al protocolo de Walkley y Black (1934) modificado.

## 4. Resultados

### 4.1 Resultados de los análisis físicoquímicos de las muestras de suelo

Los valores de pH en pasta saturada fueron de 7,4415 y 8,0630, respectivamente. Es decir, las zonas muestreadas presentan pH levemente alcalino a alcalino. La CE fue superior a los 16000  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , con valores de  $17189,30 \pm 1252,39 \mu\text{S cm}^{-1}$ . La Relación de Absorción de Sodio (RAS) fue mayor a 15 en los puntos fijados. En base a estos valores se clasifican en suelos salino-sódicos (elevada salinidad asociada a un alto contenido de Na). Son suelos que pueden perjudicar el normal desarrollo de las plantas debido a la toxicidad causada por este elemento, ver Tabla 3. El análisis por Bouyoucos indica que los sitios muestreados presentan texturas que van desde franco a areno franco, es decir, son suelos con un fuerte componente arenoso. La MO fue menor al 1%, por lo que su contenido es pobre y coincide con la descripción de suelos de climas semiáridos.

**Tabla N°3: Resultados de los análisis físico-químicos de muestras de suelo de Pachinoca, San Juan, Argentina.** Tit: Titulación; C.E: conductividad eléctrica; Limo-Arcilla int: limo- arcilla internacional

MUESTRA SUELO	Bouyoucos								
	40"	5'	6h	Arcilla	Limo int	Limo am	Arena int	Arena am	
10b 30	10b 51	10b 52	10b 53	10b 54	10b 55	10b 56	10b 57	10b 58	
10b 15	48	38	2	2	36	46	62	52	
10c 30	36	7	3	3	4	33	93	64	
10c 15	41	8	2	2	6	39	92	59	
10a 30	25	6	3	3	3	22	94	75	
10a 15	26	5	2	2	3	24	95	74	
MUESTRA SUELO	Na + K					RAS	MO		
	Na	K	dil Na + K	Na (meq L <sup>-1</sup> )	K (meq/L)		M.O. (mL tit)	Muestra (g)	M. O. (%)
10b 30	10b 40	10b 41	10b 42	10b 43	10b 44	10b 45	10b 46	10b 47	10b 48

10b 15	9	0,4	500	<b>48,91</b>	<b>5,00</b>	<b>4,77</b>	7,5	3	<b>0,71</b>
10c 30	54	0,7	500	<b>293,48</b>	<b>8,75</b>	<b>45,02</b>	7	3	<b>0,81</b>
10c 15	62	0,7	500	<b>336,96</b>	<b>8,75</b>	<b>48,89</b>	8,3	1	<b>1,65</b>
10a 30	31	0,7	500	<b>168,48</b>	<b>8,75</b>	<b>21,75</b>	8,7	3	<b>0,47</b>
10a 15	60	1,1	500	<b>326,09</b>	<b>13,75</b>	<b>30,74</b>	8	3	<b>0,61</b>
MUESTRA SUELO	pH	C. E.		Ca + Mg					
						Ca + Mg (meq/L)	Ca (meq/L)	Mg (meq/L)	
10b 30	10b 31	10b 32	10b 33				10b 37	10b 38	10b 39
10b 15	<b>7,44</b>	<sup>38</sup> R	<b>26316</b>				210	<b>113</b>	<b>97</b>
10c 30	<b>8,06</b>	<sup>35</sup> R	<b>28571</b>				85	<b>37</b>	<b>48</b>
10c 15	<b>8</b>	<sup>33</sup> R	<b>30303</b>				95	<b>55</b>	<b>40</b>
10a 30	<b>7,68</b>	<sup>198</sup> 60	<b>19860</b>				120	<b>74</b>	<b>46</b>
10a 15	<b>7,54</b>	<sup>25</sup> R	<b>40000</b>				225	<b>160</b>	<b>65</b>

## 4.2 Resultados del análisis de concentración de elementos traza

En la tabla N° 4 se observan valores promedio de concentración expresados en mg L-1, de los ET para cada especie, y cada órgano. Los valores coloreados representan aquellos metales que se encuentran en hoja, raíz y suelo, disponibles en el suelo, por encima del Código Alimentario Argentino (CAA) según la naturaleza del ET (en agua, OMS, 2006).

Indistintamente de la especie y órgano analizado el As, Fe, Mn y Ni se presentan en cantidades mayores en relación a la Concentración Máxima Aceptable (CMA). En cuanto al Cr, se presentó principalmente en suelo y raíz con valores superiores a la CMA pero en menor proporción que los anteriores. El resto de los elementos no evidenciaron valores promedios superiores a la CMA.

Por lo tanto, los metales y metaloides que se encuentran a mayor concentración en el suelo y disponibles para las plantas son los que se incorporan a CMA en el agua.

**Tabla N°4: Concentración de ET por especie vegetal y por órgano. Determinación según la concentración máxima aceptable (CMA).**

Especie	Órgano	Concentración promedio (ppm)													
		As	Zn	Fe	Ba	Hg	Pb	Cr	Ag	Mn	Tl	Se	B	Ni	
<i>A. maranthacea</i>	Hoja	0,02	0,77	4,01	0,04	0,00	0,00	0,03	0,00	0,22	0,00	Nd	Nd	0,04	
	Suelo	0,06	0,11	109,30	0,72	0,00	0,02	0,08	0,00	3,17	0,01	0,01	0,07	0,08	
	Disponible	0,07	0,01	217,53	0,24	Nd	0,02	0,04	0,00	1,39	0,01	0,00	0,04	0,31	
	Raíz	0,08	1,04	49,78	0,24	0,00	0,03	0,07	0,00	1,09	0,01	Nd	Nd	0,07	
<i>Z. punctata</i>	Hoja	0,01	1,68	3,67	0,03	0,00	0,00	0,06	0,00	0,38	0,00	Nd	Nd	0,01	
	Suelo	0,03	0,03	159,46	0,71	0,00	0,03	0,13	0,00	2,59	0,02	0,01	0,04	0,14	
	Disponible	0,09	0,22	210,03	0,46	Nd	0,01	0,04	0,00	1,46	0,00	0,00	0,15	0,03	
<i>L. divaricata</i>	Hoja	0,01	0,05	0,70	0,02	Nd	0,00	0,03	0,00	0,16	0,00	Nd	Nd	0,04	
	Suelo	0,06	Nd	121,41	0,62	Nd	0,03	0,08	0,00	1,96	0,01	0,01	0,24	0,07	
	Disponible	0,09	0,12	348,97	0,77	0,00	0,04	0,09	0,00	2,35	0,02	0,00	0,16	0,09	
<i>P. alpataco</i>	Hoja	0,01	0,83	1,44	0,03	0,00	0,00	0,08	0,01	0,37	0,00	Nd	Nd	0,01	
	Suelo	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	0,01	0,05	Nd	
	Disponible	0,05	0,03	262,27	0,30	Nd	0,02	0,06	0,00	1,50	0,01	0,01	0,18	0,04	
<i>T. integrifolia</i>	Hoja	0,02	0,74	2,52	0,06	0,00	0,00	0,02	0,00	0,92	0,00	Nd	Nd	0,03	
	Suelo	0,05	Nd	65,12	0,22	0,00	0,03	0,04	0,00	1,09	0,01	0,01	0,17	0,04	
	Disponible	0,09	0,02	346,21	0,35	Nd	0,03	0,08	0,00	2,26	0,01	0,00	0,20	0,06	
	Raíz	0,04	0,96	7,06	0,07	0,00	0,00	0,04	0,00	0,32	0,00	Nd	Nd	0,01	
<i>P. chilensis</i>	Hoja	0,01	0,57	0,51	0,03	0,00	0,01	0,02	0,00	0,24	0,00	Nd	Nd	0,01	
	Suelo	0,05	0,06	99,14	0,37	0,00	0,02	0,05	0,00	1,53	0,01	0,01	0,02	0,05	
	Disponible	0,02	0,02	129,52	0,09	Nd	0,03	0,04	0,00	0,74	0,01	0,00	0,26	0,04	
<i>C. áfila</i>	Hoja	0,02	0,95	0,63	0,01	Nd	0,01	0,03	0,00	0,40	0,01	Nd	Nd	0,02	
	Suelo	0,01	0,05	159,25	0,43	0,00	0,02	0,14	0,00	1,90	0,01	0,01	0,12	0,14	
	Disponible	0,05	0,00	230,06	0,32	Nd	0,01	0,04	0,00	1,76	0,00	0,01	Nd	0,04	
<i>B. retama</i>	Hoja	0,01	0,16	1,24	0,01	0,00	0,00	0,05	0,00	0,07	0,00	Nd	Nd	0,03	
	Suelo	0,08	0,32	416,74	1,28	0,00	0,06	0,37	0,00	6,26	0,03	0,00	0,10	0,36	
	Disponible	0,10	0,27	331,74	0,42	Nd	0,03	0,07	0,00	2,06	0,01	0,00	0,12	0,06	
<i>T. índica</i>	Hoja	0,01	0,09	1,46	0,02	0,00	0,00	0,02	0,00	0,25	0,00	Nd	Nd	0,01	
	Suelo	0,12	Nd	275,49	0,96	0,00	0,10	0,20	0,00	4,97	0,05	0,00	0,08	0,18	
	Disponible	0,07	Nd	290,77	0,80	Nd	0,02	0,04	0,00	1,59	0,01	0,00	Nd	0,04	
<i>A. lampa</i>	Hoja	0,01	0,44	3,00	0,03	Nd	0,00	0,02	0,00	1,39	0,00	Nd	Nd	0,02	
	Suelo	0,06	0,36	267,22	0,92	0,00	0,03	0,23	0,00	3,86	0,02	0,01	0,03	0,19	
	Disponible	0,07	0,12	220,59	0,35	Nd	0,04	0,04	0,00	1,07	0,02	0,00	0,07	0,05	
		As	Zn	Fe	Ba	Hg	Pb	Cr	Ag	Mn	Tl	Se	B	Ni	
	CMA (ppm)	0,01	3	0,3	0,03	0,001	0,01	0,05	0,05	0,1	1	0,01	0,5	0,02	

## 4.3 Interpretación por elementos traza

### 4.3.1 Arsénico

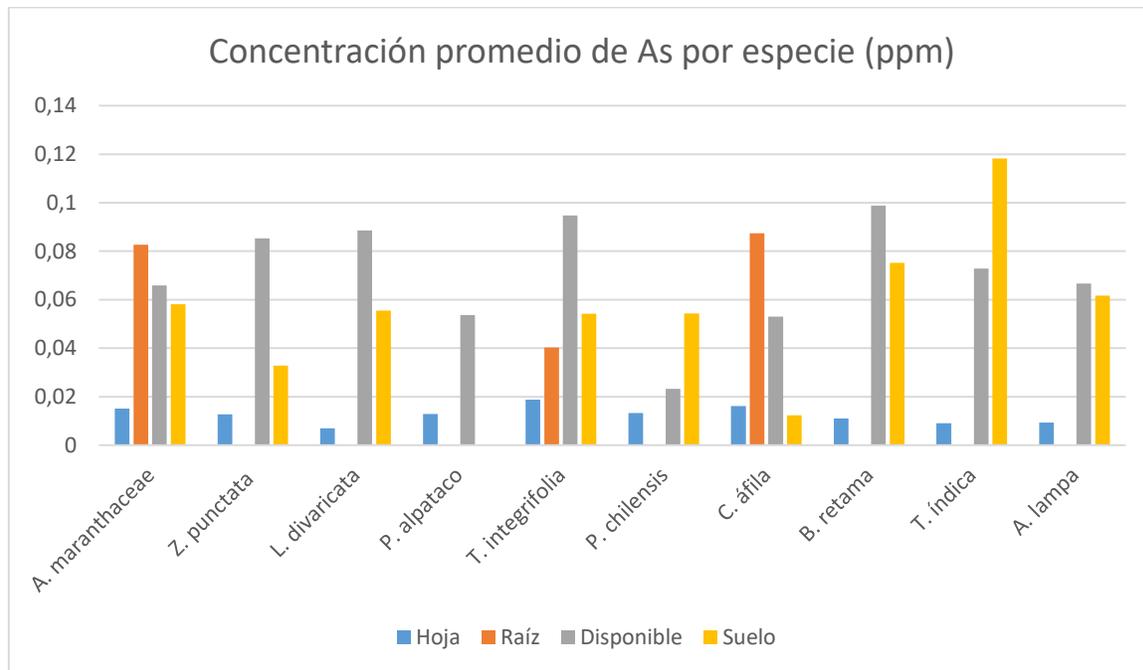


Figura N° 4: Concentración promedio de As por especie (ppm).

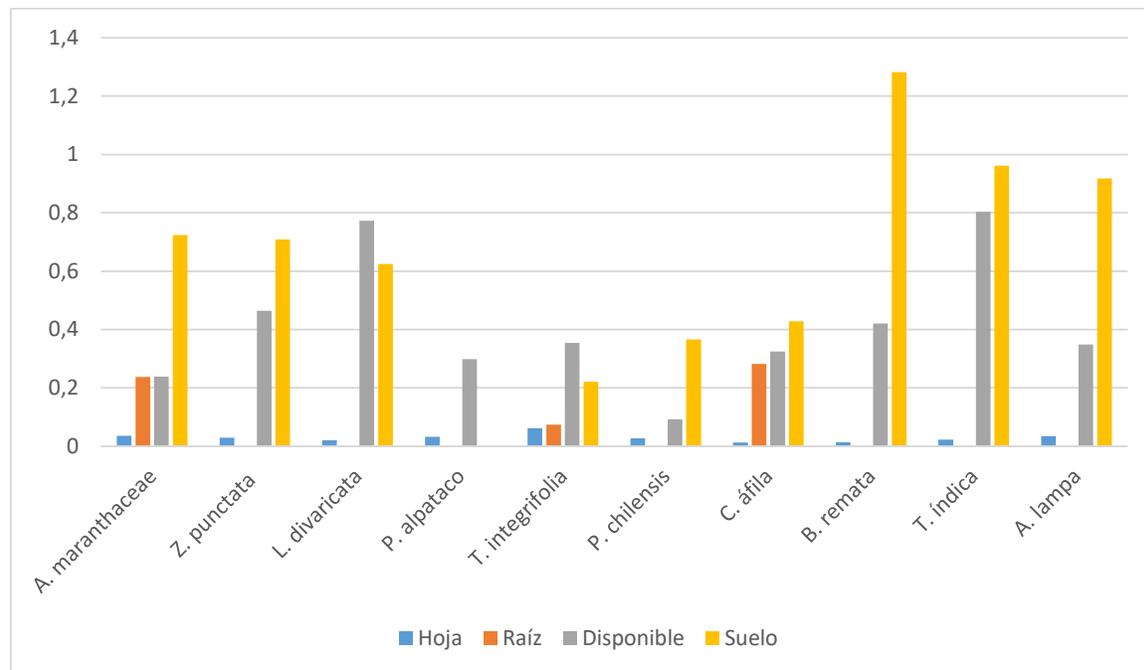
En la **figura N° 4** se puede observar que en suelo las concentraciones de As son en promedio de  $0,06 \text{ mg kg}^{-1}$  y el disponible para las plantas se aproxima a  $0,08 \text{ mg L}^{-1}$ , lo cual nos indica que hay más As disponible que en suelo. La totalidad de las especies de plantas analizadas incorporaron el metaloide en hojas a concentraciones menores a  $0,02 \text{ mg L}^{-1}$ , siendo *T. integrifolia*, *A. aphylla* y *A. maranthaceae* las que mayores valores presentaron. En las raíces de dichas plantas, las concentraciones fueron superiores a  $0,04 \text{ mg L}^{-1}$ , de las cuales la mayoría presentó concentraciones más elevadas a lo que hay en suelo y al disponible, superando los  $0,08 \text{ mg L}^{-1}$ , lo cual indica la capacidad de bioacumulación por parte de estas especies.

#### 4.3.1.1 Correlaciones: As

Según los resultados del análisis de correlación, se observan relaciones muy significativas ( $p < 0,05$ ) para *T. integrifolia* entre el contenido de As en suelo ( $As_s$ ), en hoja ( $As_h$ ), y raíz  $As_r$ ; lo cual indica que dicha especie incorpora el MP presente en el suelo, siendo sus concentraciones y/o acumulación en raíz mayores y en menor medida el transporte a hoja. En cuanto a la especie *A. maranthaceae* la correlación fue fuerte ( $r > 0,8$ ), negativa y poco significativa ( $p < 0,10$ ), presentando mayor concentración de  $As_r$ , indicando una posible acumulación principalmente en raíz, por lo que podría deberse a una translocación del  $As_h$  hacia la raíz ya que su relación es inversa. En cuanto *A. lampa* también presentó una correlación fuerte ( $r > 0,8$ ) y poco significativa ( $p < 0,10$ ) pero positiva entre el suelo y hoja, por lo que al estar presente dicho metaloide en suelo las plantas lo incorporan en sus hojas.

Por último, se observó que *T. indica* presentó una fuerte relación, altamente significativa ( $p < 0,01$ ) en el As disponible ( $As_d$ ) con respecto al presente en hoja, siendo incorporado a medida que aumentan las concentraciones de  $As_s$ .

### 4.3.2 Bario



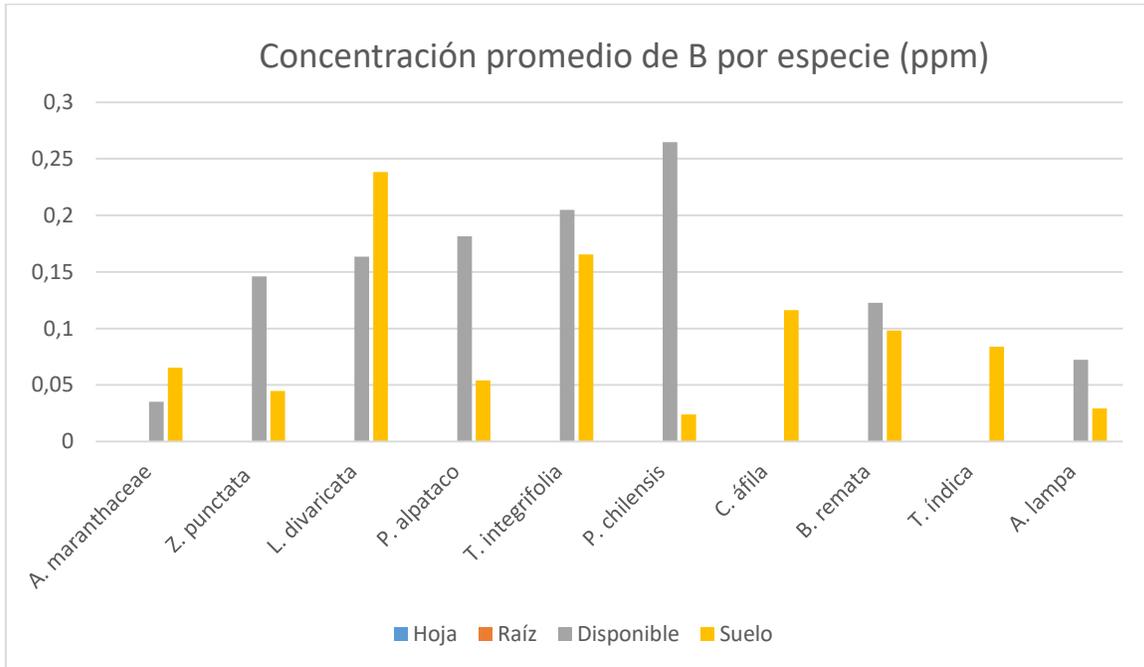
**Figura N° 5: Concentración promedio de Ba por especie (ppm)**

En la **figura N° 5** se puede observar que en suelo las concentraciones de Ba ( $Ba_s$ ) rondan los 0,6 ppm y el disponible para las plantas se aproxima a 0,4 ppm, lo cual indica que hay más  $Ba_s$  que disponible para las plantas. La totalidad de las especies de plantas analizadas incorporaron el metal en hojas ( $Ba_h$ ) a concentraciones menores a 0,06 ppm, siendo *T. integrifolia* la que mayor contenido presentó. En  $Ba_r$ , las concentraciones fueron mayores a 0,07 ppm, alcanzando los 0,28 ppm para *S. aphylla* y 0,23 ppm para *A. Maranthaceae*, lo cual podría probar la capacidad de bioacumulación de dichas especies.

#### 4.3.2.1 Correlaciones: Ba

Según los resultados del análisis de correlación, se observaron relaciones fuertes ( $r > 0,8$ ) y significativas ( $p < 0,05$ ) para *T. integrifolia* entre el contenido de  $Ba_s$ ,  $Ba_h$ , y  $Ba_r$ , además una relación altamente significativa ( $p < 0,01$ ) en  $Ba_s$  y  $Ba_r$ , lo cual indica que dicha especie incorpora el metal presente en el suelo, siendo mayores sus concentraciones y/o acumulación en raíz y transportando en menor medida a hoja. Mientras que para *B. retama* la correlación fue fuerte ( $r > 0,8$ ), negativa y significativa ( $p < 0,05$ ) en  $Ba_d$  y  $Ba_h$ , presentando mayor concentración  $Ba_d$  que  $Ba_h$ , indicando una posible acumulación en la planta pero no en la hoja correspondiendo a la relación es inversa entre ambas variables. En cuanto *L. divaricata* presentó una correlación fuerte ( $r > 0,8$ ) y altamente significativa ( $p < 0,01$ ) en la relación  $Ba_d$ , siendo mayor su concentración en disponible, por lo que podría deberse a un aporte del metal al suelo, correspondiente a suelos que se caracterizan por ser alóctonos.

### 4.3.3 Boro



**Figura N° 6: Concentración promedio de B por especie (ppm)**

En la **figura N° 6** se puede observar que la concentración de B en suelo  $B_s$  y  $B_d$  pero no en hoja ( $B_h$ ) y ( $B_r$ ) raíz, lo cual estaría mostrando que los valores obtenidos no fueron representativos o porque las especies analizadas no incorporan el ET. El  $B_s$  fue de 0,023 a 0,23 ppm, presentando relativamente gran variabilidad de datos, mientras que el  $B_d$  en el suelo alcanzó las 0,26 ppm (*P. chilensis*), con un mínimo de 0,035 (*A. maranthaceae*), exhibiendo menos variación que el anterior. Además, las concentraciones del  $B_d$  en suelo fue en general mayor que el  $B_s$  atrapado, lo que puede indicar un aporte del mismo proveniente de otros suelos, es decir, un aporte alóctono.

#### 4.3.3.1 Correlación: B

Según los resultados del análisis de correlación no se observaron relaciones significativas de ningún tipo para el B.

### 4.3.4 Cinc

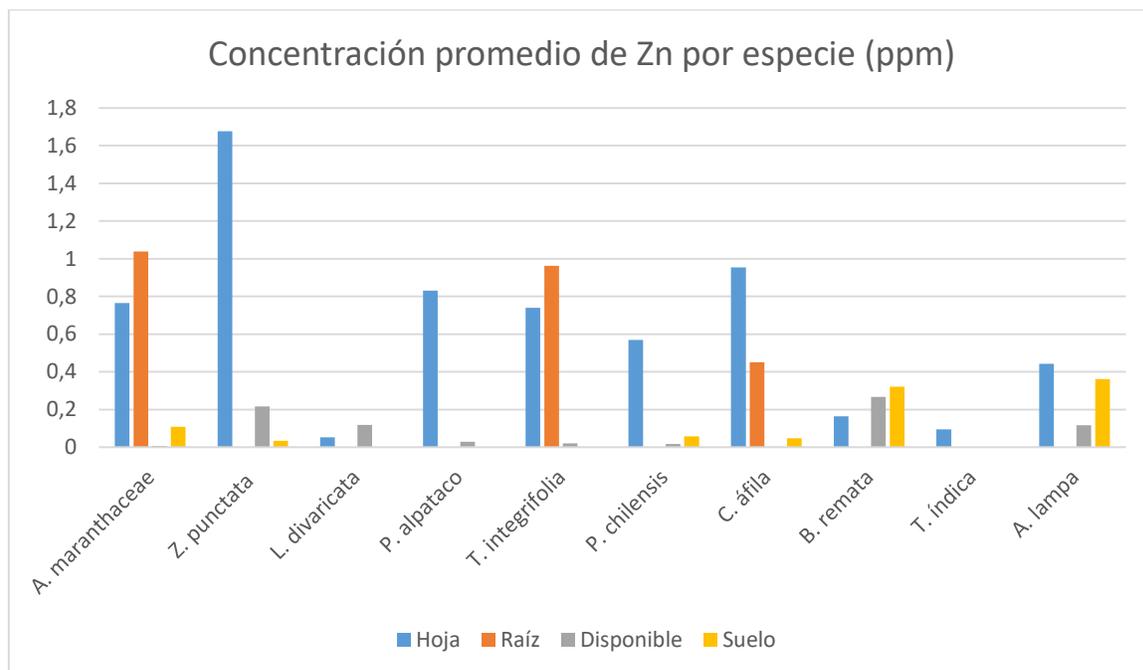


Figura N° 7: Concentración promedio de Zn por especie (ppm).

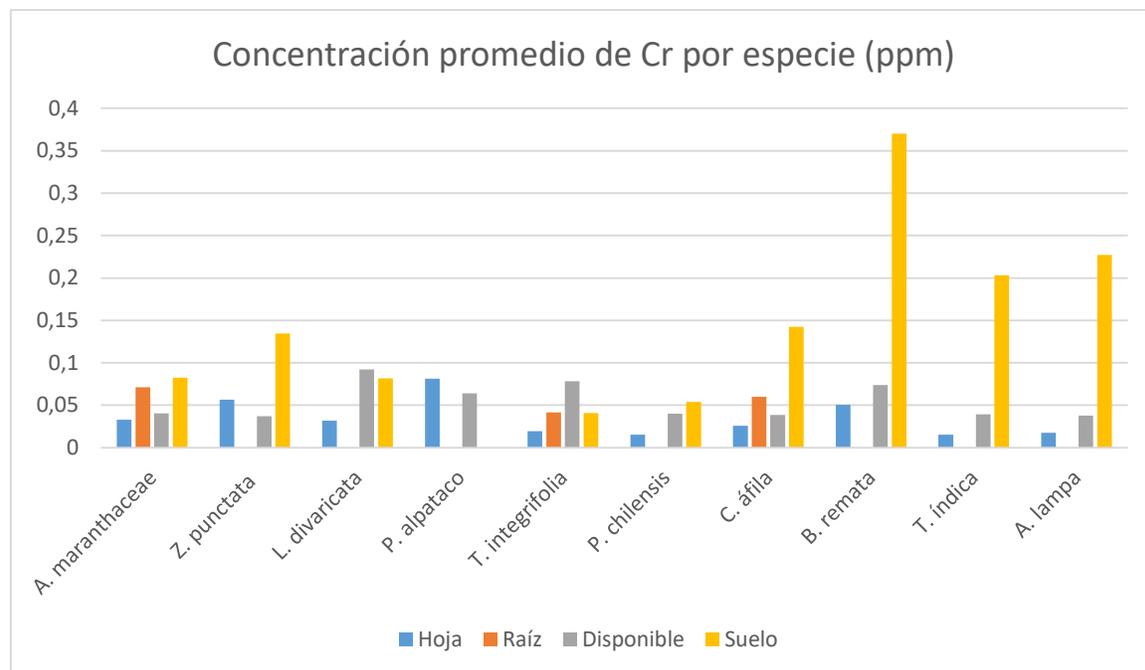
En la **figura N° 7** se puede observar que el Zn en suelo ( $Zn_s$ ) y disponible ( $Zn_d$ ) es relativamente escaso o nulo, rondando valores que no alcanzan los 0,40 ppm para  $Zn_s$  y valores menores a 0,30 ppm de  $Zn_d$ . Es decir, el metal se encuentra en pequeñas concentraciones en suelo ya sea de manera disponible o retenida en el suelo. En cuanto al Zn en planta se puede observar que en general, sus concentraciones son mayores. En raíz se evidenció incorporación del metal en la totalidad de especies analizadas, mostrando contenidos de  $Zn_s$  entre 0,45 y 1,03 ppm, observándose los mayores valores en *A. maranthaceae*, *T. integrifolia*. Mientras que el  $Zn_h$  presentó una variabilidad dependiendo de la especie. Sus valores rondan desde la casi nulidad a los 1,67 ppm, siendo las especies *Z. punctata*, *S. aphylla*, *P. alpataco*, *A. maranthaceae* y *T. integrifolia* las de mayores contenidos de Zn, respectivamente.

#### 4.3.4.1 Correlación: Zn

Según los resultados del análisis, se observaron correlaciones fuertes ( $r > 0.8$ ) y significativas ( $p < 0,05$ ) para *T. integrifolia* entre  $Zn_s$ ,  $Zn_h$ ,  $Zn_r$ , lo cual indica que dicha especie incorpora el metal presente en el suelo, siendo mayores sus concentraciones y/o acumulación en raíz y transportando en menor medida a hoja. En el caso de *A. maranthaceae* la correlación fue fuerte ( $r > 0.8$ ) y poco significativa ( $p < 0,10$ ), presentando mayor concentración de  $Zn_r$ , indicando una posible acumulación principalmente en raíz y transportando en menor medida  $Zn_h$ . Mientras que para *A. lampa* se observó una correlación poco significativa ( $p < 0,10$ ) en la relación  $Zn_s - Zn_r$ , siendo fuerte ( $r > 0.8$ ) y negativa, con mayores concentraciones  $Zn_h$ , implicando una posible acumulación del metal en las mismas. Por último, a pesar de sus bajas concentración observadas en el gráfico, la especie *T. indica* presentó una relación altamente

significativa ( $p < 0,01$ ) en el  $Zn_{sd}$  con respecto al presente  $Zn_h$ , siendo incorporado a medida que aumentan las concentraciones de  $Zn_{sd}$ .

### 4.3.5 Cromo



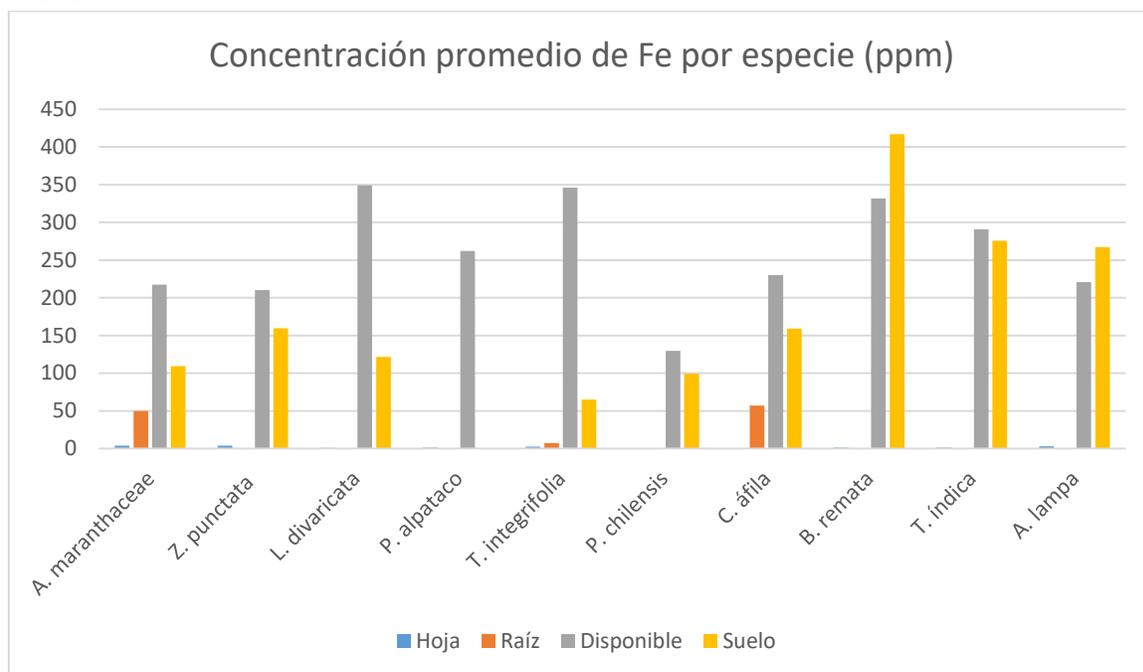
**Figura N° 8: Concentración promedio de Cr por especie (ppm)**

En la **figura N° 8** se puede observar que el Cr en suelo ( $Cr_s$ ) presentó una variación en la concentración, con valores de 0,04 ppm (*T. integrifolia*) a 0,37 ppm (*B. retama*), siendo para la mayoría de las especies mayor el contenido de  $Cr_s$  que el disponible para las plantas y el incorporado en sus órganos. En cuanto al Cr disponible  $Cr_d$  dio valores relativamente bajos, tanto en  $Cr_h$  hojas como en  $Cr_r$ , por lo que podríamos decir que el metal no está en estado disponible durante mucho tiempo, siendo posiblemente perdido por un proceso físico del mismo suelo y/o puede ser incorporado por las plantas. Respecto al Cr en planta se puede observar que la totalidad de las especies adsorbieron el metal, incorporándolo como  $Cr_h$  o  $Cr_r$ . En raíz, se evidenció incorporación de  $Cr_h$  de 0,041 ppm en *T. integrifolia*; 0,038 ppm en *S. aphylla* y 0,071 ppm en *A. maranthaceae*. Los valores de  $Cr_h$  rondan los 0,03 ppm, siendo incorporado o acumulados en menor cantidad que el  $Cr_r$ , lo cual se puede deber a mayor acumulación del metal en el órgano subterráneo, a consecuencia de una menor translocación a la parte aérea.

#### 4.3.5.1 Correlación: Cr

Según los resultados del análisis de correlación del Cr, se observaron relaciones únicamente para la especie *T. integrifolia*, siendo fuertes ( $r > 0,8$ ) y significativas ( $p < 0,05$ ) entre el contenido del  $Cr_s$ - $Cr_r$ - $Cr_h$ . Además, se observó una relación altamente significativa ( $p < 0,01$ ) entre el  $Cr_s$ - $Cr_r$ , aumentando su incorporación a medida que aumentan las concentraciones del  $Cr_s$ . Dichas relaciones indicaron que la especie incorpora el  $Cr_s$ , siendo mayores sus concentraciones y/o acumulación en  $Cr_r$  y transportando en menor medida a la parte aérea  $Cr_h$ .

### 4.3.6 Hierro



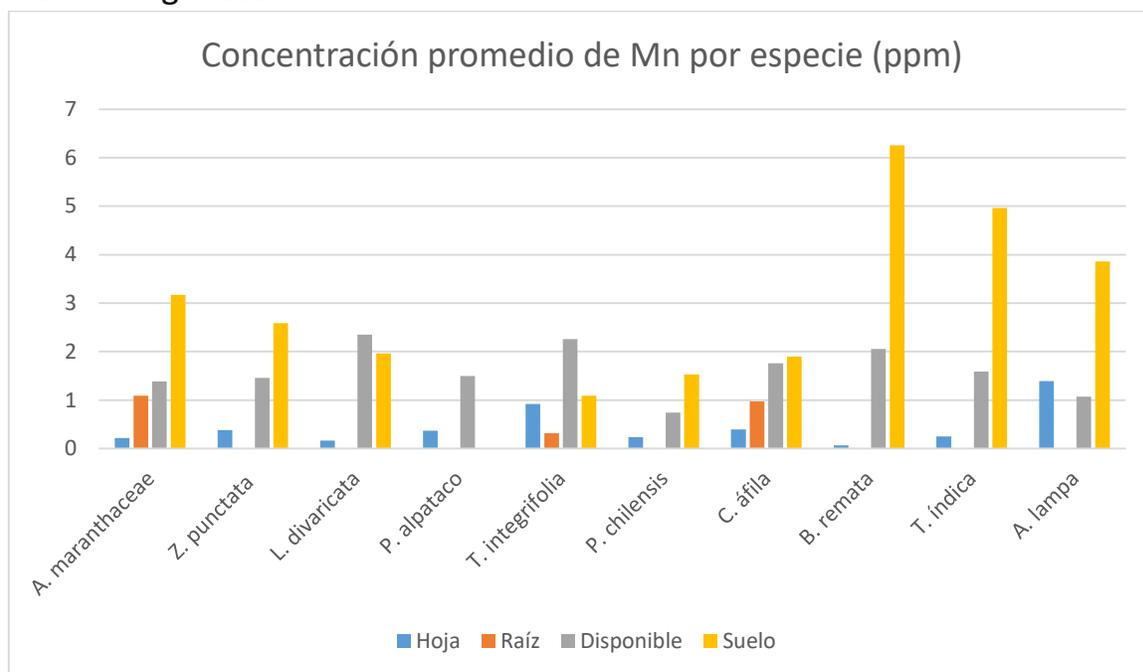
**Figura N° 9: Concentración promedio de Fe por especie (ppm)**

En la **figura N° 9** se puede observar que para la totalidad de las especies hay altos valores de concentración de Fe en suelo ( $Fe_s$ ) y disponible ( $Fe_d$ ) comparado con hoja ( $Fe_h$ ) y raíz ( $Fe_r$ ). Los valores de  $Fe_d$  varían entre 129 y 346 ppm siendo, en la mayoría de los casos superior al presente en  $Fe_s$ . En éste, la concentración del metal se encuentra en valores que rondan las 175 ppm, variando con mayor amplitud, comprobando su máximo de 416 ppm y mínimo de 60 ppm. En cuanto a los órganos vegetales, no se observaron altas concentraciones de  $Fe_h$ , en comparación con  $Fe_d$  y  $Fe_s$ , pero entre las especies se encontraron valores muy similares y próximos a 2 ppm. También hubo mayor concentración de  $Fe_r$ , que en el  $Fe_h$ , siendo *S. aphylla* la especie con mayor acumulación promedio (57 ppm), seguida por *A. maranthaceae* (50 ppm). *T. integrifolia* presentó concentraciones menores a las anteriores pero, de igual manera, superó el valor en  $Fe_h$ , por lo que podríamos señalar que el  $Fe_r$  se acumula más en raíz, siendo transportado en menor cantidad a hoja.

#### 4.3.6.1 Correlación: Fe

Según los análisis de estudio de correlación, se observaron relaciones poco significativas ( $p < 0,10$ ) tanto para la especie *B. retama* como para *L. divaricata* en el contenido de  $Fe_{ds}$  y  $Fe_h$ , siendo las mismas fuertes y negativas, evidenciando altas concentraciones del metal disponible y muy bajas en hojas, por lo que ambas especies si incorporan Fe pero presenta bajas concentraciones en hoja. También se encontraron relaciones en  $Fe_{ds}$  y  $Fe_h$  para la especie *T. integrifolia*, pero éstas fueron altamente significativas ( $p < 0,01$ ), por lo que también dicha especie incorpora el metal.

### 4.3.7 Manganeso



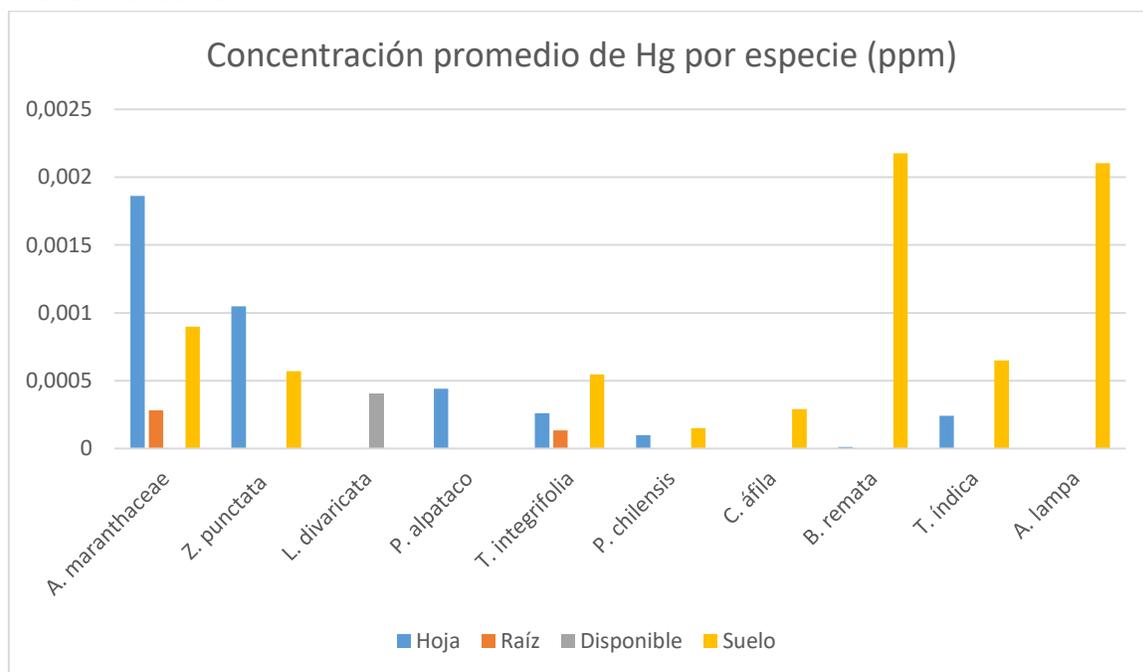
**Figura N° 10: Concentración promedio de Mn por especie (ppm).**

En la **figura N° 10** se puede observar que el Mn en suelo ( $Mn_s$ ) presentó una variación de resultados, con valores de concentración relativamente altos para *B. retama* (6,25 ppm), *T. indica* (4,96 ppm) y, relativamente bajos para otras especies alcanzando un valor mínimo en *T. integrifolia* (1 ppm). Mientras que el Mn disponible ( $Mn_d$ ) obtuvo valores menos variables en un rango de 1 a 2,36 ppm, siendo en general menor al  $Mn_s$  retenido, por lo que el aporte de dicho metal podría provenir del mismo suelo (fuente autóctona). En planta, se observó la presencia de Mn tanto en hoja ( $Mn_h$ ) como en raíz ( $Mn_r$ ), a menores concentraciones que  $Mn_s$  y  $Mn_d$ , siendo incorporado y acumulado más en raíz que en hoja con la salvedad de *T. integrifolia* donde fue mayor su concentración en hoja que raíz.

#### 4.3.7.1 Correlación: Mn

Según los resultados del análisis de correlación, se observaron relaciones fuertes ( $r > 0.8$ ) y significativas ( $p < 0,05$ ) para *T. integrifolia* entre el contenido de  $Mn_s$  - $Mn_r$  -  $Mn_h$ , lo cual indica que dicha especie incorpora el  $Mn_s$ , siendo mayores sus concentraciones y/o acumulación en hoja. Mientras que para *A. maranthaceae* la correlación fue fuerte y altamente significativa ( $p < 0,01$ ) entre  $Mn_r$  - $Mn_s$ , presentando mayor concentración en suelo, indicando una posible acumulación principalmente de  $Mn_r$  y transportando en menor medida a la hoja.

### 4.3.8 Mercurio



**Figura N° 11: Concentración promedio de Hg por especie (ppm)**

En la **figura N° 11** se puede observar que hay mucha variabilidad en los contenidos para el Hg, o bien no se detectaban o presentaban valores muy altos, los cuales fueron eliminados por no ser representativos. De éstos se encontró en suelo ( $Hg_s$ ) una gran versatilidad, alcanzando valores relativamente altos (superiores a 0,002 ppm para *B. retama* y *A. lampa*) y valores que rondan los 0,0005 ppm para el resto de las especies. En cuanto al  $Hg_d$ , únicamente *L. divaricata* presenta contenido de Hg representativo, siendo menor que  $Hg_s$ . Es decir, el metal se encuentra en pequeñas concentraciones en suelo ya sea de manera disponible o retenida en el suelo. Respecto al Hg en planta ( $Hg_h$ ) se puede observar que sus concentraciones en general son mayores al contenido  $Hg_s$ , siendo los valores máximos de  $Hg_h$  alcanzados por las especies *Z. punctata* de 0,001 ppm y 0,0018 en *A. maranthaceae*. Nuevamente, se encuentra escasos de datos respecto a las otras especies. En cuanto a los valores en raíz ( $Hg_r$ ) se evidenció incorporación del metal en dos de las tres especies analizadas, mostrando contenidos de Hg entre 0,0002 y 0,0001 ppm, correspondientes a *A. maranthaceae* y *T. integrifolia*, respectivamente.

#### 4.3.8.1 Correlación: Hg

Según los resultados del análisis de correlación, se observaron relaciones fuertes ( $r > 0.8$ ) y significativas ( $p < 0,05$ ) para *T. integrifolia* entre el contenido de  $Hg_s$  y  $Hg_h$ , lo cual indica que dicha especie incorpora el metal presente en el suelo, siendo mayores sus concentraciones y/o acumulación en hoja. Mientras que para *A. maranthaceae* la misma correlación fue fuerte ( $r > 0.8$ ) y altamente significativa ( $p < 0,01$ ), presentando mayor concentración de  $Hg_h$  que en  $Hg_r$  y, que  $Hg_s$ , indicando una acumulación principalmente en hoja. En cuanto *B. retama* presentó una correlación poco significativa ( $p < 0,1$ ) en la relación  $Hg_s - Hg_h$ , siendo la misma fuerte ( $r > 0.8$ ), mostrando que la especie incorpora el metal, pero las concentraciones de  $Hg_s$  son muy elevadas en comparación con la de  $Hg_h$ , por lo que no

se evidenció acumulación de  $Hg_h$ . Por último, la especie *Z. punctata* presentó una relación poco significativa ( $p < 0,1$ ) en la correlación  $Hg_s - Hg_h$ , en donde la concentración de  $Hg_h$  es casi el doble que el  $Hg_s$  retenido, incorporando y acumulando el metal en la hoja.

### 4.3.9 Níquel

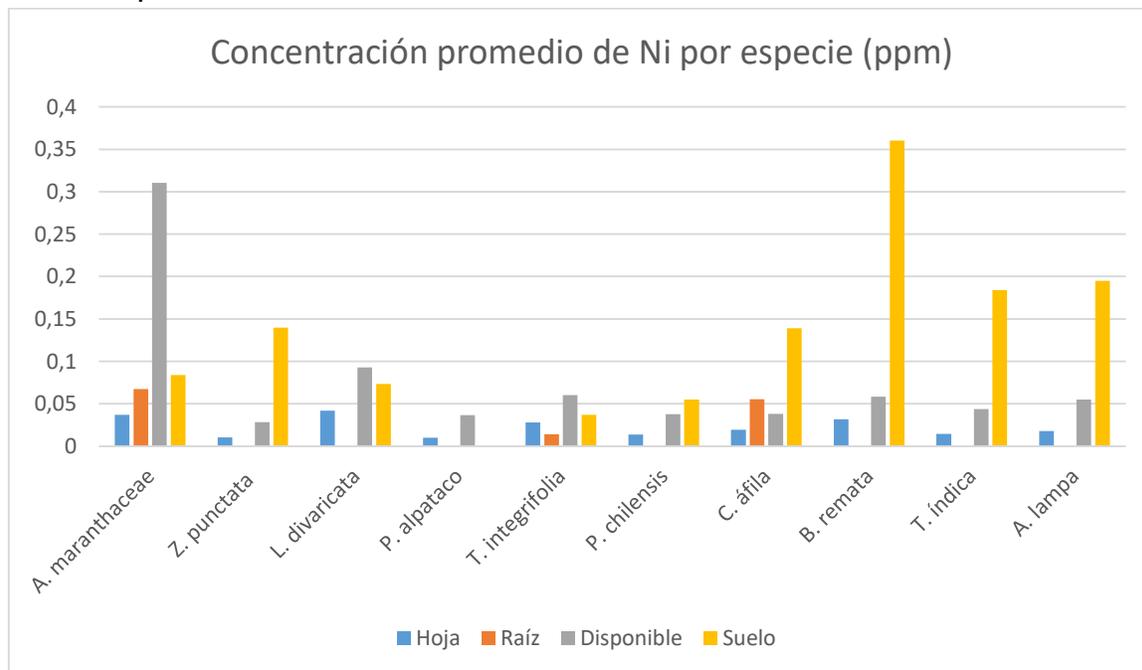


Figura N° 12: Concentración promedio de Ni por especie (ppm)

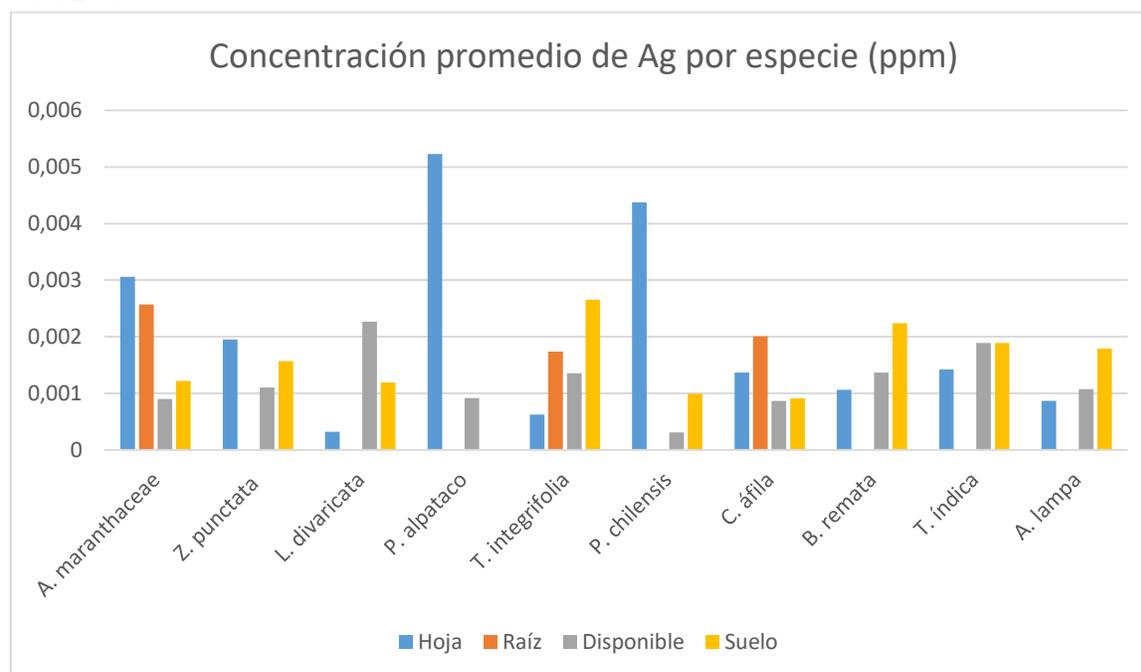
En la **figura N° 12** se puede observar que el Ni en suelo ( $Ni_s$ ) presentó variaciones con valores de 0,03 ppm (*T. integrifolia*) a 0,36 ppm (*B. retama*), siendo para la mayoría de las especies mayor el contenido del  $Ni_s$  que el disponible ( $Ni_d$ ) para las plantas y el incorporado en sus órganos. En cuanto al  $Ni_d$  dio valores relativamente bajos, siendo incorporado tanto en hojas ( $Ni_h$ ) como en raíces ( $Ni_r$ ). Respecto al Ni en planta se puede observar que la totalidad de las especies absorbieron el metal, incorporándolo tanto en  $Ni_h$  como en  $Ni_r$ . En raíz, se evidenció incorporación de  $Ni_r$  de 0,014 ppm (*T. integrifolia*); 0,055 ppm (*S. aphylla*) y 0,067 ppm (*A. maranthaceae*). Los valores de  $Ni_h$  son próximos a 0,03 ppm, siendo menor su incorporación que en raíz, lo cual se puede deber a mayor acumulación del metal en el órgano subterráneo, debido a una menor translocación a la parte aérea.

#### 4.3.9.1 Correlación: Ni

Según los resultados del análisis de correlación, se observaron relaciones fuertes ( $r > 0,8$ ) y significativas ( $p < 0,05$ ) para *T. integrifolia* entre el contenido de Ni en suelo- hoja- raíz ( $Ni_s - Ni_h - Ni_r$ ) y una relación altamente significativa ( $p < 0,01$ ) entre  $Ni_r - Ni_h$ , lo cual indica que dicha especie incorpora el  $Ni_s$ , siendo mayores sus concentraciones y/o acumulación en hoja. Mientras que para *A. maranthaceae* la correlación fue fuerte ( $r > 0,8$ ) y significativa ( $p < 0,05$ ) entre el  $Ni_r$  y el  $Ni_d$  disponible en suelo, presentando mayor contenido de  $Ni_r$  raíz que  $Ni_h$ , indicando una posible acumulación principalmente en raíz, siendo relativamente muy alta la concentración de metal disponible en suelo. En cuanto a *T. indica* presentó una fuerte ( $r > 0,8$ ) y significativa ( $p < 0,05$ ) relación en el  $Ni_d$  con respecto al  $Ni_s$ . Se observó una correlación

significativa ( $p < 0,05$ ) para *P. chilensis* en el  $Ni_d$  y  $Ni_h$ , por lo que dicho metal es incorporado por la especie y acumulado en las hojas en pequeñas concentraciones. Por último, *L. divaricata* mostró una correlación fuerte ( $r > 0,8$ ) y altamente significativa ( $p < 0,01$ ) entre el  $Ni_s - Ni_h$ , siendo el Ni incorporado por la planta y acumulado en hoja.

#### 4.3.10 Plata



**Figura N° 13: Concentración promedio de Ag por especie (ppm).**

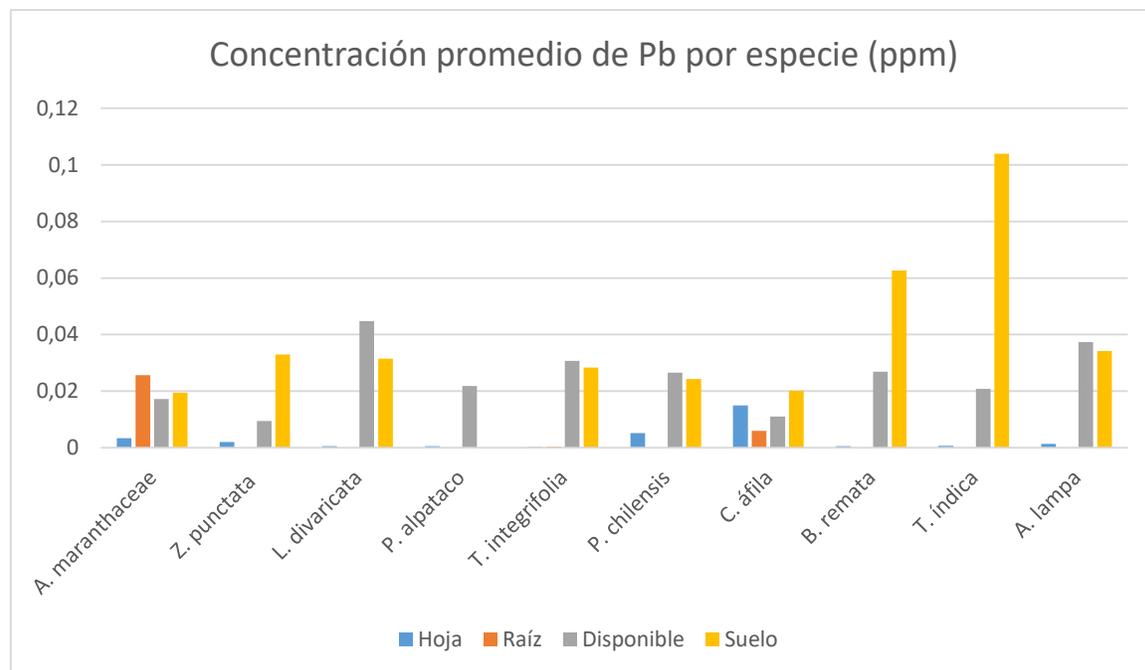
En la **figura N° 13** podemos observar que la Ag en suelo ( $Ag_s$ ) presentó valores homogéneos dentro de un rango de 0,001 a 0,0026 ppm, mientras que el disponible ( $Ag_d$ ) para la planta fue de 0,0003 a 0,0022 ppm, siendo mayoritariamente más alto el nivel del  $Ag_s$  que el  $Ag_d$ . En planta se evidenció la incorporación de Ag en la totalidad de las especies analizadas, mostrando altos contenidos relativos en hoja ( $Ag_h$ ) de *P. alpataco* (0,005 ppm), *P. chilensis* (0,004 ppm) y *A. maranthaceae* (0,003 ppm). Mientras que en raíz ( $Ag_r$ ), también presentó contenidos del metal en todos los casos analizados: *A. maranthaceae* 0,0025 ppm; *T. integrifolia* 0,0017 ppm; y por último *S. aphylla* 0,002 ppm. Salvo para *A. maranthaceae*, las concentraciones  $Ag_r$  fueron superiores que en  $Ag_h$ , y para *P. chilensis* y *P. alpataco* sus niveles  $Ag_h$  duplicaron el valor máximo evidenciado en  $Ag_r$ , dichas especies son bioacumuladoras de Ag. También se puede agregar, que este metal es incorporado en todas las especies (que se analizó órgano raíz) y es acumulado en raíz y trasladado a sus órganos aéreos.

##### 4.3.10.1 Correlación: Ag

Según los resultados del análisis de correlación, se observaron relaciones fuertes ( $r > 0,8$ ) y significativas ( $p < 0,05$ ) para *L. divaricata* entre el contenido de Ag disponible ( $Ag_d$ ) y el de  $Ag_s$ , siendo mayor su concentración en este último, por lo que el aporte del metal puede provenir del atrapado en el mismo suelo y liberado por procesos de meteorización *In situ*. También se observó relación poco significativa ( $p < 0,1$ ) para *T. indica*, siendo fuerte ( $r > 0,8$ )

y negativa entre  $Ag_s$ - $Ag_h$ , presentando mayor concentración en suelo e incorporando el metal en planta.

### 4.3.11 Plomo



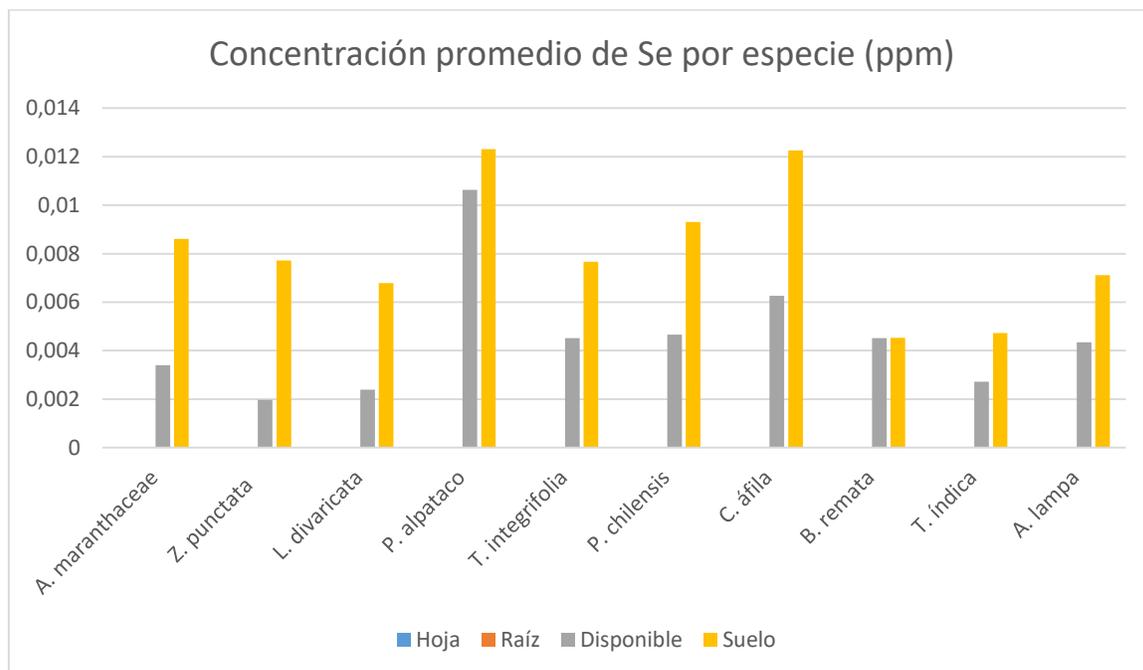
**Figura N° 14: Concentración promedio de Pb por especie (ppm).**

En la **figura N° 14** se puede observar que en suelo las concentraciones de Pb ( $Pb_s$ ) rondan en 0,02 y 0,03  $mg\ kg^{-1}$ , presentando en *T. Índica* y *B. retama* valores superiores a los 0,06. En cuanto al disponible ( $Pb_d$ ) para las plantas, se encuentran en general valores semejantes al del suelo ( $Pb_s$ ) en concentraciones no mayores a 0,045 ppm, siendo menor la cantidad de metal disponible para las plantas que el atrapado en suelo. La totalidad de las especies de plantas analizadas incorporaron Pb en hojas ( $Pb_h$ ) a concentraciones relativamente bajas con la excepción de *S. aphylla*, la cual fue la que mayormente incorporó el metal a razón de 0,015 ppm. De todos modos la mayor acumulación del metal en planta se observó en *A. maranthaceae* que mostró en raíz un rango de 0,025 ppm, casi duplicando al máximo evidenciado en hoja.

#### 4.3.11.1 Correlaciones: Pb

Según los resultados del análisis de correlación, se observó una relación fuerte ( $r > 0.8$ ), negativa y poco significativas ( $p < 0,1$ ) para *T. indica* entre el contenido de  $Pb_d - Pb_h$ , lo cual indica que dicha especie incorpora el metal disponible en hoja pero en poca medida, por lo que posiblemente lo acumule en mayor cantidad en otros órganos, para lo cual habría que hacer un estudio incorporando otros órganos. En cuanto *A. lampa* también presentó una correlación fuerte ( $r > 0.8$ ) y significativa ( $p < 0,05$ ) pero positiva entre el Pb disponible y hoja, evidenciando una leve acumulación del mismo en dicho órgano. Por último, se observó que *A. maranthaceae* presentó una fuerte ( $r > 0.8$ ) relación significativa ( $p < 0,05$ ) en el Pb disponible con respecto al del suelo, siendo mayor la cantidad atrapada en el suelo, por lo que el aporte de dicho metal podría provenir del mismo suelo.

### 4.3.12 Selenio



**Figura N° 15: Concentración promedio de Se por especie (ppm)**

En la **figura N° 15** se puede observar que se detectó Se en suelo ( $Se_s$ ) y disponible ( $Se_d$ ) pero no en hoja ( $Se_h$ ) y raíz ( $Se_r$ ), lo cual se explicaría por los valores no representativos que se obtuvieron o porque las especies analizadas no incorporan Se. En el suelo, hubo una distribución bastante homogénea de Se al igual que el disponible ( $Se_d$ ) en suelo, siendo mayor en todos los casos  $Se_s$  que  $Se_d$ , por lo que se puede señalar que el aporte de  $Se_s$  es natural, y proveniente de los minerales atrapados en dicho suelo.

#### 4.3.12.1 Correlación: Se

Según los resultados del análisis de correlación, se observó una relación fuerte ( $r > 0.8$ ) y significativa ( $p < 0,05$ ) para *A. lampa* entre el contenido de  $Se_s$  -  $Se_d$ , lo cual indica que la concentración del  $Se_d$  en el suelo es dependiente del atrapado en  $Se_s$ .

### 4.3.13. Talio

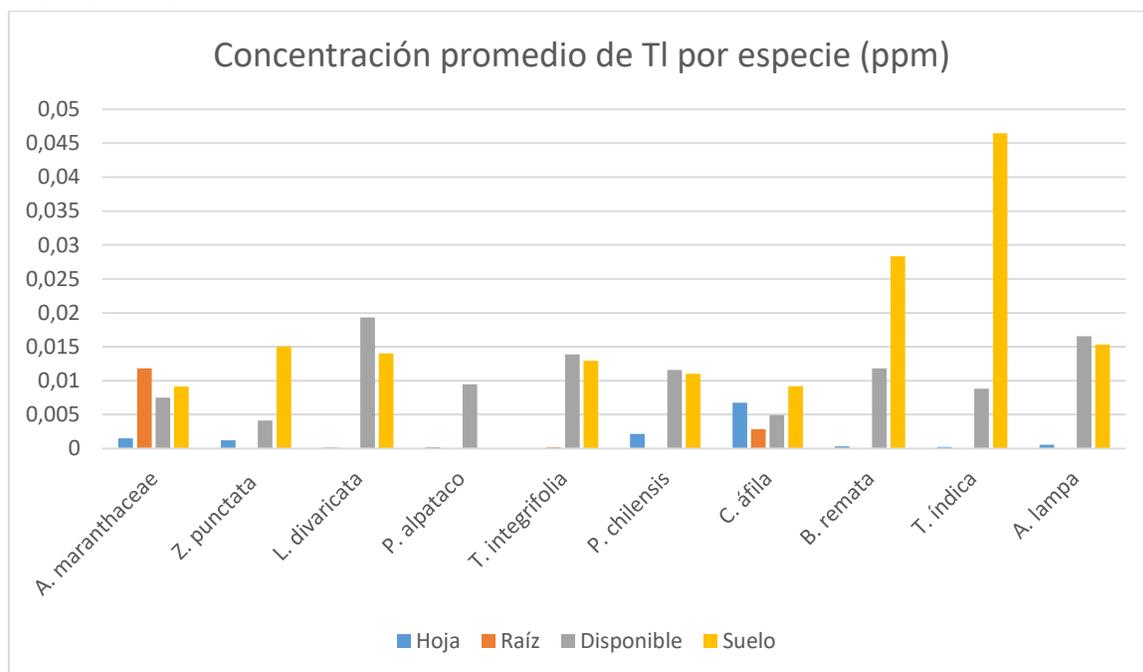


Figura N° 16: Concentración promedio de Tl por especie (ppm).

En la **figura N° 16** se puede observar que el Tl en suelo ( $Tl_s$ ) es donde mayor concentración se registra, valores cercanos a 0,015 ppm y alcanzando el triple para la especie *T. indica*. En cuanto al Tl disponible ( $Tl_d$ ), se encuentra a valores menores pero próximos a los contenidos  $Tl_s$ , rondando en 0,011 ppm. Es decir, el  $Tl_s$  se encuentra en mayores concentraciones que de manera  $Tl_d$ . Respecto al Tl en planta se puede observar que sus concentraciones en general son menores que las anteriores. En cuanto a hoja, los niveles de Tl ( $Tl_h$ ) son relativamente bajos, siendo la especie con mayor acumulación *S. aphylla* (0,006 ppm), registrando valores muy por encima que el resto de las especies. En raíz ( $Tl_r$ ) puede observar incorporación del metal en la totalidad de especies analizadas, mostrando contenidos de Tl muy bajos a casi nulos para *T. integrifolia* y *S. aphylla* (0,0001 y 0,003 ppm, respectivamente) mientras que las mayores concentraciones se encontraron en *A. maranthaceae*, superando los valores de  $Tl_s$  y disponible para dicha especie, por lo que podría considerarse como una planta acumuladora del  $Tl_r$ , transportando en menor medida a hoja.

#### 4.3.13.1 Correlación: Tl

Según los resultados del análisis de correlación, se observó una relación fuerte ( $r > 0.8$ ) y significativa ( $p < 0,05$ ) para *A. lampa* entre el contenido de  $Tl_d$  y  $Tl_h$ , lo cual indica que dicha especie incorpora el metal presente en el suelo. En cambio, *A. maranthaceae* presentó una correlación fuerte ( $r > 0.8$ ) y significativa ( $p < 0,1$ ) entre la raíz y el suelo, indicando mayor concentración  $Tl_r$ , debido a una posible acumulación por un menor transporte a la hoja. En cuanto *T. indica* presentó una correlación poco significativa ( $p < 0,1$ ) en la relación  $Tl_d - Tl_h$ , siendo la misma fuerte ( $r > 0.8$ ) y negativa, mostrando la mayor concentración de  $Tl_s$  y muy baja en  $Tl_h$ , confirmando una incorporación del metal en las hojas en bajas concentraciones.

## 4.4 Interpretación por especie vegetal

La absorción de ET en suelo y disponible para las especies vegetales analizadas fue similar en lo que a incorporación respecta, siendo asimilados por las plantas la mayoría de los metales y metaloides con la salvedad de B y Se. A continuación se especifica el comportamiento para cada especie:

### 4.4.1 *A. lampa*

Se observó que *A. lampa* incorporó la mayoría de los ET con la excepción de B, Hg y Se. En cuanto a su absorción en órganos en general la especie presentó bajas concentraciones. Evidenció la mayor concentración de Mn en hoja en comparación con el resto de las especies analizadas y obtuvo valores superiores en hoja que disponible y en suelo de Zn, pudiendo bioacumular dicho metal en hoja.

Es por ello que podemos concluir que la especie *A. lampa* no tuvo un comportamiento fitoextractor para los ET seleccionados salvo para el Mn que obtuvo un valor promedio superior al resto de las especies analizadas y para el Zn, ya que sus concentraciones en hoja fueron superiores a las retenidas en suelo o disponible en el mismo pudiendo *A. lampa* presentar cierta potencialidad para remediar suelos contaminados con Zn y Mn.

### 4.4.2 *A. maranthaceae*

Se observó que *A. maranthaceae* incorporó la mayoría de los metales y metaloides con la excepción de B y Se. En cuanto a su absorción en órganos la especie presentó en general, valores superiores al resto de las especies seleccionadas y mayor cantidad de relaciones de significancia entre Suelo- Disponible- Raíz- Hoja. También se observó la incorporación de As, Zn, Pb, Fe, Ba, Cr, Mn, Ni y Tl en mayores concentraciones en raíz que en hoja, indicando una posible acumulación de los mismos en el órgano subterráneo, siendo los ET estabilizados o extraídos del suelo e incorporados a la planta.

En cuanto a Hg y Ag fueron encontrados mayormente en hoja que en raíz, siendo incorporados subterráneamente y traslocados a órganos aéreos, cumpliendo el rol como especie fitoextractora de dichos metales.

*A. maranthaceae* mostró altas concentraciones de Ag, As, Hg y Zn en comparación a los ET disponibles y en suelo, por lo que en suelos contaminados o con abundancia de dichos ET la especie podría utilizarse para fitorremediación.

### 4.4.3 *B. retama*

Se observó que *B. retama* incorporó la mayoría de los metales y metaloides con la excepción de B y Se. En cuanto a su absorción en hoja la especie presentó valores relativamente bajos de metales, sin evidenciar comportamiento de acumulación de los mismos. Presentó en general, concentraciones muy altas de ET en suelo y muy bajas en hoja a pesar de tener relaciones con niveles de significancia para Fe, Ba y Hg.

#### 4.4.4 *S. aphylla*

Se observó que *S. aphylla* incorporó la mayoría de los metales y metaloides con la excepción de B, Hg y Se. En cuanto a su absorción en órganos la especie presentó gran variabilidad de datos. Se detectó mayor concentración de Zn, Pb y Tl en hoja que en raíz, acumulando aproximadamente el doble de Zn en hoja que en raíz, y éstos muy por encima de los contenidos del metal en suelo y disponibles. El resto de los ET que fueron incorporados por la planta arrojaron concentraciones más elevadas en raíz que en hoja (As, Fe, Ba, Cr, Ag, Mn y Ni). En el caso del Ba y Fe sus valores en raíz fueron los más altos en comparación con el resto de las especies mostrando gran diferencia respecto a la hoja. En cuanto a la Ag evidenció mayor concentración en sus órganos vegetales que en suelo y disponible, mostrando acumulación en los mismos. Es por ello que la especie *S. aphylla* tuvo un comportamiento fitoextractor para Zn, Pb y Tl; un comportamiento bioacumulador con mayor cantidad de metales en hojas y, un comportamiento estabilizador al incorporar As, Fe, Ba, Cr, Mn, Ni y Ag en concentraciones mayores en raíz que en hoja, indicando una posible acumulación de los mismos en el órgano subterráneo, siendo los MP estabilizados o extraídos del suelo e incorporados a la planta.

#### 4.4.5 *L. divaricata*

Se observó que incorporó la mayoría de los metales y metaloides con la excepción de B, Hg y Se. En cuanto a su absorción en hoja la especie presentó en general, niveles bajos en relación al resto de las especies seleccionadas. A pesar de mostrar bajos contenidos en hoja, *L. divaricata* alcanzó valores de concentración de Ni en planta superior a la mayoría del resto de las especies analizada. En todos los casos analizados (excepto Se) las concentraciones de los ET disponible para plantas de *L. divaricata* fueron mayores que los encontrados en suelo. No se evidenció comportamiento fitoacumulativo o fitoextractivo de ningún ET.

#### 4.4.6 *P. alpataco*

Se evidenció que *P. alpataco* incorporó la mayoría de los metales y metaloides con la excepción de B y Se. En cuanto a su absorción en hoja la especie presentó valores muy variables respecto al resto de las especies. Se registraron mayores valores en hoja que en el resto de los tejidos y suelos analizados, alcanzando las concentraciones más altas para Cr y Ag. Asimismo, *P. Alpataco*, obtuvo el tercer puesto en el contenido de Zn y Hg. Los cuales son incorporados por raíces y traslocados a órganos aéreos, cumpliendo el rol de planta fitoextractora. El resto de los ET analizados evidenciaron mayores concentraciones como disponible que en hoja y, la totalidad de los elementos (salvo Se y B) no registraron valores en suelo.

*P. alpataco* mostró altas concentraciones de Ag, Cr, Hg y Zn en planta en comparación a los metales disponibles y en suelo, por lo que en suelos contaminados o con abundancia de dichos ET, esta especie podría utilizarse para fitorremediación.

#### 4.4.7 *P. chilensis*

Se observó que *P. chilensis* incorporó la mayoría de los metales y metaloides con la excepción de B y Se. En cuanto a su absorción en hoja la especie presentó valores muy variables respecto al resto de las especies. No se registraron valores mayores en hoja que en el resto de los componentes analizados salvo en la incorporación de Zn y Ag. En el primero alcanzó un valor promedio de hasta diez veces superior que en suelo y, para la Ag más de tres veces la concentración en suelo. *P. chilensis* también demostró gran absorción de As en hoja, siendo una de las especies con mayor incorporación del mismo pero sin mostrar ningún comportamiento destacable. Para el resto de los ET se observaron valores inferiores en hoja que en suelo o disponible en el mismo. Es decir, *P. chilensis* mostró tener un comportamiento fitoextractivo respecto al Zn, Ag y As, siendo mayor para Zn y Ag, pudiendo ser recomendada la especie para fitorremediar suelos contaminados.

#### 4.4.8 *T. integrifolia*

*T. integrifolia* incorporó la mayoría de los metales y metaloides con la excepción de B y Se. En cuanto a su absorción en órganos la especie presentó en general, valores medios al resto de las especies seleccionadas y mayor cantidad de interacciones de significancia entre Suelo-Raíz- Hoja. También se observó la incorporación de As, Zn, Fe, Ba, Cr y Ag en concentraciones mayores en raíz que en hoja, indicando una acumulación de los mismos en raíces, siendo los ET estabilizados o extraídos del suelo e incorporados a la planta. El resto de los metales fueron incorporados en concentraciones similares o mayores en hoja que en raíz, pero no fueron valores significativos

En cuanto al As y Zn *T. integrifolia* mostró elevadas concentraciones en sus órganos, especialmente en raíz, indicando una posible acumulación de los mismos en el órgano subterráneo, siendo los ET estabilizados o extraídos del suelo e incorporados a la planta.

*T. integrifolia* presentó altas concentraciones de As y Zn en planta en comparación a los metales disponibles y en suelo, por lo que en suelos contaminados o con abundancia de dichos ET, la especie podría utilizarse para fitorremediación de dichos suelos.

#### 4.4.9 *T. indica*

Se observó que *T. indica* incorporó la mayoría de los metales y metaloides con la excepción de B y Se. A pesar de haber obtenido grandes cantidades de relaciones de significancia en su análisis estadístico en presencia de ET entre hoja- suelo y disponible, la especie presentó valores relativamente bajos de metales y metaloides en hoja, sin evidenciar comportamiento de acumulación de los mismos.

#### 4.4.10 *Z. punctata*

Se observó que *Z. punctata* incorporó menores concentraciones de ET en hoja que en suelo y disponible para las plantas, con la excepción de Zn, Hg y Ag, los cuales se encontraron en altas concentraciones. En cuanto al B y Se, la planta no los incorporó (valores nulos). Zn y Hg los mayores contenidos se detectaron en esta especie vegetal y respecto Fe y Ag la

segunda y la cuarta especie con mayores niveles respectivamente, incorporados subterráneamente por las raíces y traslocados a órganos aéreos, cumpliendo los requisitos y características de “especie fitoextractora” de tales ET.

Además *Z. punctata* mostró mayores concentraciones de Ag, Hg y Zn en hoja respecto a lo encontrado en suelo o disponible, comprobando un comportamiento fitoextractivo para dichos ET.

Por lo que podemos concluir que para suelos contaminados con Ag, Hg, Zn y Fe, *Z. punctata* presenta cierta potencialidad fitoextractiva para ser utilizada en la fitorremediación de esos suelos.

## 5. Discusión

Hay muy pocos estudios realizados de ET en suelos de la provincia de San Juan, lo cual limita la posibilidad de compararlos de manera eficiente con este trabajo, realizado en la zona de Pachinoca, provincia de San Juan. Sin embargo, es un punto de referencia importante para investigaciones futuras. Se demostraron contenidos de As, Fe, Cr, Mn y Ni por encima del máximo admisible en agua y, habiendo sido las muestras recolectadas a orillas del río Jáchal, representa un gran problema para esos suelos aledaños y sus agroecosistemas. Más aún, cuando hay poblaciones y ganados radicados en estas zonas, de larga data, que ingieren el agua obtenida de los ríos que la surcan. De aquí es que surge el interés, de este estudio; ya que permitió analizar, caracterizar y cuantificar trece ET presentes en sus suelos y especies vegetales. Los resultados demuestran que los habitantes, animales y plantas del lugar están expuestos a contaminaciones, intoxicaciones y enfermedades, que en muchos casos, ignoran su peligrosidad.

Respecto a los suelos de la zona suelen ser alóctonos (Vallone, 2007), por lo que la presencia de algunos ET en los mismos es producto de procesos de acarreo y escorrentía de sedimentos y aguas, dando así menor concentración de los metales y metaloides en suelo que disponible. Tal fue el caso del contenido de As, B y del Fe disponible, alcanzando éste último, valores muy cercanos al encontrado en suelo. Una vez en el suelo, los ET pueden quedar retenidos en el mismo pero también pueden ser movilizados en la solución del suelo mediante diferentes mecanismos biológicos y químicos (Pagnanelli et al., 2004). La movilidad de los ET y su relación de adsorción en planta es compleja, dependiendo de la naturaleza de cada compuesto y las características físico-químicas del suelo, siendo sus resultados diferentes en función a cada especie y la movilidad de los ET dentro de la planta. Los resultados del análisis físico-químico de suelo en laboratorio, presentan textura con alta proporción de arena y bajos contenidos de arcilla y CE alta, indicando ésta última salinidad; dichas características benefician la movilidad y biodisponibilidad de los ET (Funes Pinter M. I. et al, 2017). En cuanto al pH, el mismo puede retener o no a los ET según su valor, por ejemplo, para pH alcalinos como son los suelos analizados, el Se, Mn, Co y As tienen mayor adsorción a la planta ya que aumenta la movilidad de los mismos, pero en pH ácidos la mayor adsorción se da para el Cr, Pb, Cu y Zn (Mendez P. et al., 2009).

De las especies vegetales seleccionadas se conoce muy poco en cuanto a su capacidad de adsorber ET, hay registro, por ejemplo, del género *Atriplex*, *Brassica* y *Thlaspi* como especies tolerantes para la fitoextracción de MP (Perez E. J, 2011) pero de todos modos es una tecnología que no se ha terminado de explorar. En el caso de las especies analizadas, salvo *T. indica* que está naturalizada en la zona, el resto son plantas nativas, por lo que las condiciones climáticas no representan para ninguna de las 10 especies un factor limitante extremo para su desarrollo y producción de biomasa.

Se observó que la mayoría de las especies absorbieron ET en sus tejidos con la excepción del Se y B que sus valores fueron nulos o no significativos, por lo que se descartaron al igual que algunos valores de Hg. La incorporación de los metales y metaloides en las plantas fue mayor a nivel de raíz que en hoja para los siguientes compuestos: Pb, Cr, Mn, Tl, Ni, As, Fe y Ba, siendo muy bajas sus concentraciones (en ambos tejidos) en comparación con las de ET en suelo y disponible para el Fe, Pb, Tl y, muy altas respecto al Zn. Sin embargo, Hg y Ag fueron principalmente incorporados en hoja que en raíz.

A pesar de que la mayoría de los ET mostraron ser incorporados por la mayoría de las especies vegetales, no todas tuvieron el mismo comportamiento en cuanto a su capacidad de acumulación, siendo *S. aphylla*, *T. integrifolia*, *A. maranthaceae*, *P. alpataco* y *Z. punctata* las que demostraron mayor acumulación de estos metales y metaloides. Asimismo, de éstas, presentaron comportamiento fitoextractivo, *S. aphylla* en relación a: Zn, Pb y Tl; *P. chilensis* en: Zn y Ag; *P. alpataco* en: Cr, Ag, Zn y Hg; *Z. punctata* en: Zn, Hg, Ag y Fe y *A. maranthaceae* en: Ag y Hg. Mientras que *S. aphylla* en el contenido de: As, Fe, Ba, Cr, Mn, Ni y Ag; *T. integrifolia* en: As, Zn, Fe, Ba, Cr y Ag, y *A. maranthaceae* en el contenido de: As, Zn; Pb, Fe, Ba, Cr, Mn, Ni y Tl, confirmaron un comportamiento fitoestabilizador. Cabe mencionar que *L. divaricata* tuvo comportamiento fitoextractivo sólo para el Ni y *A. lamp* para Mn y Zn. Se comprobó que el resto de las especies demostraron comportamiento como fitorremediadoras para los ET analizados.

Por lo tanto, podemos concluir, teniendo en cuenta los ET analizados por ICP-MS, que *S. aphylla*, *T. integrifolia*, *A. maranthaceae*, *P. alpataco* y *Z. punctata* resultan ser las de mayor potencialidad para la remediación de suelos *in situ* en la región fitogeográfica del monte, provincia de San Juan, a través del uso de su flora nativa autóctona.

## 6. Investigaciones futuras

El trabajo realizado permite aseverar que la presencia en suelo e incorporación en planta de ET en Pachinoca, Provincia de San Juan, a orillas del río Jáchal es inminente, pero se desconocen ciertas características tal como la variación de dichas variables a lo largo del año a través de los cambios estacionales. También falta información a fin de comparar y analizar, del comportamiento de la flora seleccionada en el trabajo presente respecto a la absorción y procesos bioquímicos de sus tejidos en relación a los ET. Es importante continuar con análisis en la zona a modo de tener un mejor punto de comparación, ya que muchos valores fueron descartados por el sólo hecho de no ser representativos o no detectados, sin conocer la

procedencia o el motivo de estos valores. También sería de gran importancia analizar el rendimiento de cada especie vegetal seleccionada en cuanto a la tolerancia máxima del perfil de los ET para realizar una posible remediación de suelos más eficiente y de bajo impacto con el ambiente.

## 7. Bibliografía

Bocelli, J. y Gil, P. 1984. La salinidad de los suelos de Jachal, INTA, Estación experimental San Juan.

Bouyoucus, G. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agron. J.* 54: 464-465.

Cabezas, J. 2004. Absorción y acumulación de metales pesados en tres especies vegetales enmendados con lodos de depuradora. *Environmental Biotechnology and Engineering*. IMEBE-012.

Cabrera, A. 1971. Fitogeografía de la República Argentina. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*. Volumen XIV. N° 1-2.

Candia, R. e Ibañez, G. 2000. COVERTURA VEGETAL DE SAN JUAN. IADIZA. CRICYT. Mendoza, Argentina.  
<http://www.cricyt.edu.ar/ladyot/catalogo/cdandes/cap14.htm#inhalt>

Castro, T., Salcedo, E., Bocelli, J. y Gil, P. 1982. Reconocimiento de los suelos en el valle del río de los Patos (Barreal, departamento Calingasta), INTA, Estación experimental San Juan.

CCA (Código Alimentario Argentino). 2017. Decreto N° 2126/71, Ley 18.284. Cap III, Art. 156, Res. 1546, 17.9.85.ANMAT. Ministerio de salud. Presidencia de la Nación.

Cheng, K. y Bray R. 1951. Determination of calcium and magnesium in soil and plant material. *Soil Sci.* 72: 449-458.

Dary, M., Chamber-Pérez, M., Palomaresa, A. y Pajuelo, E. 2010. In situ phytostabilization of heavy metal polluted soils using *Lupinus luteus* inoculated with metal resistant plant-growth promoting rhizobacteria.

Díez, M., Simón, M., García, L., Dorronsoro, C. y Aguilar, J. CAPACIDAD DE DEPURACIÓN DEL SUELO FRENTE AL Cu Y Pb, Dpto. Edafología y Química Agrícola, Fac. de Ciencias, Campus Fuente Nueva, Univ. de Granada.  
<http://www.edafologia.net/comun/trabajos/calidad/textodep.htm>

Ferguson, J. y Gavis, J. 1971. A review of the arsenic cycle in natural water. Department of Geography and Environmental Engineering, The Johns Hopkins University.

Funes Pinter, M. 2016. Estudio de bacterias aisladas de raíces y suelo aledaño de plantas de vid (*Vitis vinifera* L.) capaces de proteger a la planta ante contaminación con As. PROBIOL. FCA – CONICET, UNCuyo.

Funes Pinter, I., Salomon M., Gil R., Bottini R. y Píccoli P. 2018. Arsenic and trace elements in soil, wáter, grapevine and onion in Jáchal, Argentina. *Science of the total environment* 615: 1485-1498.

García I. y Dorronsoro C. 2002. Contaminación por metales pesados. Departamento de edafología y química agrícola de Contaminación y Fitotoxicidad en Plantas por Metales Pesados provenientes de Suelos y Aguas. Universidad Autónoma de Yucatán, México.

García, I., Diez, M., Martín F., Simon M. y Dorronsoro, C. 2009. Mobility of Arsenic and Heavy Metals in a Sandy-Loam Textured and Carbonated Soil\*1 <http://www.edafologia.net/comun/trabajos/pedosphere.pdf>

Huertos, E. 2008. Contaminación de suelos por metales pesados. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola. Facultad de Química. Apartado 553. Universidad de Sevilla. Sevilla 41071.

INECC. 2009. Metales Pesados. México. <http://www.inecc.gob.mx/sqre-temas/763-aqre-metales>.

Lopez de Mesa, J. 2006. Bioremediación de suelos contaminados con hidrocarburos derivados del petróleo. VOL.4 No. 5.

Mainardi Grellet, V. 2013. REGIONES FITOGEOGRÁFICAS DE ARGENTINA Y DE TUCUMÁN. <https://dasonomia.files.wordpress.com/2016/05/regiones-fitogeograficas-del-mundo-y-argentina.pdf>

Méndez, P., Ramírez, C., Gutiérrez, ADR. y García, F. 2009. Contaminación y fitotoxicidad en las plantas por metales pesados provenientes del agua y suelo. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 10 (1), 29-44.

Ministerio de minería. 2011. Gobierno de San Juan. Listado provisorio de empresas mineras que exploran/ explotan minerales metalíferos. [http://mineria.sanjuan.gov.ar/empresas/EMPRESAS\\_MIN\\_EXT/EmpresasMetalif\\_FEB\\_2011.pdf](http://mineria.sanjuan.gov.ar/empresas/EMPRESAS_MIN_EXT/EmpresasMetalif_FEB_2011.pdf)

Morello J. M., Protomastro J., Sancholuz L. A., Blanco C. A. 1973. Estudio macroecológico de los llanos de LA Rioja. *IDIA*: 34: 242- 248.

Nicolli, H., Bundschuh, J., Blanco, M., Tujchneider, O., Panarello, H., Dapeña, C. y Rusansky, J. 2012. Arsenic and associated trace- elements in groundwater from the Chaco-Pampean plain, Argentina: Results from 100 years of research. *Science of the Total Environment* 429 36-56.

Nonna, S. 2008. Epidemiología del hidroarsénico crónico, regional endémico de la República Argentina. Secretaría de Ambiente y desarrollo sustentable.

O'Reilly. 2010. Arsenic contamination of natural waters in San Juan and La Pampa, Argentina. *Environ Geochem Health* 32:491–515.

OMS (Organización Mundial de la Salud). 2006. Guías para la calidad del agua potable [recurso electrónico]: incluye el primer apéndice. Vol. 1: Recomendaciones. Tercera edición. [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/gdwq3\\_es\\_full\\_lowres.pdf](http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lowres.pdf)

Pagnanelli, F., Moscardini, E., Giuliano, V. y Toro L. 2004. Sequential Extraction of Heavy Metals in River Sediments of an Abandoned Pyrite Mining Area: Pollution Detention and Affinity Series. *Environmental Pollution* 132: 189-201.

Pereyra B. 2010. CLIMA DE LA PROVINCIA DE SAN JUAN. Caracterización general y estudios temáticos por provincia. Clima de San Juan, cap. 10. <http://www.cricyt.edu.ar/ladyot/catalogo/cdandes/cap10.htm>

Perez E. 2011. Biodisponibilidad de metales pesados en suelos mineros contaminados enmendados con materiales orgánicos. Universidad politécnica de Madrid.

Pilon- Smits. 2005. Phytoremediation. *Reviews in Advance*. AR242- PP56-02

Puga, S. y Sosa, M. 2006. Heavy metals pollution in soils damaged by mining industry. Departamento Académico de Biología, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

Reigaraz, C. 2000. Suelos de San Juan. Caracterización general y estudios temáticos por provincia. CRICYT, Mendoza. <http://www.cricyt.edu.ar/ladyot/catalogo/cdandes/cap13.htm#inhalt>

Richards, L. (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *Agriculture Handbook N° 60*. USDA.

Sigrist, M., Albertengo, A., Brusa, L., Beldoménico, H. y Tudino, M. 2013. Distribution of inorganic arsenic species in groundwater from Central- West Part of Santa Fé, Argentina. *Applied Geochemistry*.

Smedley, P. y Kinniburgh D. 2002. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Review*. Pergamon. *Applied Geochemistry* 517- 568.

Vázquez, P. y Ramón G. 2011. Efecto de los metales pesados en el medio ambiente y la salud humana. Departamento de Geología. Universidad de Pinar del Río "Hermandades Saíz Montes de Oca". Pinar del Río. <http://www.estrucplan.com.ar/articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=2173>

Walkley A y Black I A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37 (1): 29-38.

Wright J.. 2003. Environmental Chemistry. [http://www.lenntech.es/referencias\\_tabla-\\_periodica.htm#ixzz4giL9uVy0](http://www.lenntech.es/referencias_tabla-_periodica.htm#ixzz4giL9uVy0)

## 8. Agradecimientos

A mi familia que ha sido el soporte fundamental en este proceso. Especialmente a mi madre, a quién dedico mi título y a mi padre, quien siempre me apoyo y me supo asesorar y guiar para terminar mis estudios incluso en las épocas más difíciles. Mis hermanas Lau y Mari, compañeras de vida, quienes también me apoyaron y motivaron siempre a ser una mejor persona. Y last but not least: Cam, con quien compartimos esa pasión por la naturaleza y la ciencia!

También quiero agradecer profundamente:

Al equipo de tesis, Dra. Patricia Píccoli y Dr. M. Iván Funes Pinter, quienes confiaron en mí. Quienes también permitieron financieramente la realización de éste trabajo.

A mis evaluadores Victoria Salomón, Raúl Gil y Adrián Spisso quienes tuvieron la amabilidad de corregir y evaluar este trabajo.

A Iván Funes Pinter por haber sido mi guía durante la carrera, tanto profesional como personalmente!

Al equipo de laboratorio de Química Orgánica y Biológica de la FCA, UNCuyo, quienes me aguantaron día tras día en el laboratorio. Especialmente a Viqui y Leo que siempre estuvieron ahí para darme una mano.

A la cátedra de Edafología, especialmente a Leandro Mastrantonio y Antonio Maffei por permitirme usar las instalaciones y equipos.

A la secretaria de ambiente de San Juan que permitió el muestreo y a Viqui quien nos acompañó y ayudó, siempre con su buena onda y cagadas a pedos!

Al CONICET por la financiación y al equipo de laboratorio INQUISAL, San Luis, a quienes realizaron el análisis elemental y asesoraron al respecto.

A la familia Fernández, quienes son mi familia mendocina, especialmente a Mariza y Jorge, que todos los domingos me esperaban con un asado y los brazos abiertos!

A Mauri, Rodri, Martín, Hormy, Nurfia, Anita, Yor, Pitu, Lean, Leti, Flor, Maite, Roxy, Ger, Cubanito, Pela, Martha, Luisa, Juan, Juanma, Faca, Rocha y todos mis amigos quienes fueron parte de esta etapa de mi vida y lo seguirán siendo siempre!