



Universidad de Valparaíso
Facultad de Ciencias
Departamento de Biología y Ciencias Ambientales
Ingeniería Ambiental

Determinación De Metales Pesados En Especies De Importancia, De Colonización Natural Del Tranque De Relaves El Chinche De Minera Los Pelambres

Trabajo de titulación para optar al Título Profesional de Ingeniero Ambiental

NICOLE ALEJANDRA FUNES JIMÉNEZ

Guía: Dra. Gabriela Lobos V.

Profesores Co-Guía: Nelson Riquelme.

Valparaíso, Chile 2011

AGRADECIMIENTOS

Sincero agradecimiento a Minera los Pelambres, por permitir y colaborar en el desarrollo de mi trabajo de titulación, en especial a Nelson Riquelme, Rigoberto Saavedra y a Cristóbal Barrientos por su participación y colaboración que fue trascendental para el desarrollo del mismo.

Además me gustaría agradecer a:

- La Dra. Gabriela Lobos, por su apoyo, tiempo, dedicación y enseñanza, las cuales fueron fundamentales para la elaboración de esta investigación.
- Patricia Díaz, por su tiempo, dedicación y paciencia, que tuvo al enseñarme cada paso en el laboratorio y por la experiencia compartida.
- Jairo Valencia, por su apoyo, disposición y por toda la ayuda que me brindo.
- El Profesor Javier Arancibia, por darme un poco de su tiempo, para ayudarme a con el trabajo de las plantas para la realización de la presente investigación.
- Claudio Sáez por su tiempo, paciencia y enseñanza.
- Boris Lebuy, por facilitarme su laboratorio, materiales y equipos.
- Omar por ayudarme a triturar las plantas.
- Todos los profesores que me acompañaron a lo largo de la carrera y me dejaron los conocimientos suficientes para que hoy me pudiese convertir en una profesional, con competencias.

Finalmente me gustaría agradecer a mi familia, a cada uno de mis amigos y compañeros por brindarme el apoyo y compañía durante los años de carrera, por una experiencia única e inolvidable.

INDICE

Resumen	12
Abstract	14
Introducción	16
Marco teórico	19
1. Pasivos ambientales en Chile.	
2. Depósitos de relaves mineros.	20
2.1. Método aguas arriba.	21
2.2. Legislación aplicable a los depósitos de relaves.	23
2.3. Problemática ambiental de los relaves.	
3. Plan de cierre.	25
4. Metales y metaloides.	26
4.1. Metales pesados en el suelo.	28
4.2. Metales pesados en plantas como parte de la nutrición.	29
4.2.1. Macronutrientes.	30
4.2.2. Micronutrientes.	32
4.3. Consecuencias de un exceso de metales pesados en las plantas.	33
4.4. Absorción de metales en plantas.	34
4.5. Acumulación y detoxificación.	35
5. Plantas hiperacumuladoras.	37
6. Remediación de suelos.	38
6.1. Tecnologías de remediación de suelos.	40
7. Fitorremediación.	48

8. Problema	51
9. Hipótesis de trabajo	52
10. Objetivos	
11. Materiales y métodos	53
1. Caracterización de la zona de estudio.	
1.2. Caracterización climatológica de la zona de Chacay.	
1.3. Caracterización del sustrato.	
1.3.1. Toma de muestra de suelo.	55
1.3.2. Tratamiento de las muestras.	59
1.3.3. Parámetros a determinar para la caracterización del sustrato.	60
2. Reconocimiento de las especies vegetales de colonización natural en el tranque de relaves El Chinche.	61
2.1. Descripción de las plantas de importancia del tranque de relave El Chinche.	65
3. Determinación de metales en especies de colonización natural.	66
3.1. Tratamiento de muestras vegetales	68
3.2. Parámetros a determinar en las muestras vegetales.	69
4. Validación del método	70
5. Análisis estadístico	73
Resultados y Discusiones.	75
1. Caracterización de la zona de estudio	
1.1. Características de calidad química del agua de riego.	76
1.2. Caracterización del sustrato.	82
1.3. Características climatológicas del tranque de relaves El Chinche.	101

1.3.1. Pluviometría.	101
1.3.2. Temperaturas.	104
1.3.3. Climograma.	106
1.3.4. Neviscas.	107
1.3.5. Dirección del viento.	108
1.3.6. Humedad relativa del aire.	109
2. Resultados de los cuadrantes en el tranque de relaves El Chinche.	110
2.1. Resultados de las variables ecológicas estimadas para cada cuadrante.	113
2.2. Resultados de las transectas realizadas en el Tranque de Relaves El Chinche.	121
3. Determinación de metales en tres especies de colonización natural	133
Conclusiones	144
Bibliografía	145
Anexo 1	152
Anexo 2	157
Anexo 3	182

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Funciones y síntomas de deficiencia mineral: macronutrientes	30
Tabla 2. Funciones y síntomas de deficiencia mineral: micronutrientes.	31
Tabla 3. Inundación de suelos.	41
Tabla 4. Lavado de suelos.	42
Tabla 5. Tratamiento químico.	43
Tabla 6. Solidificación/ estabilización (s/e).	44
Tabla 7. Electrorremediación.	45
Tabla 8. Tecnologías biológicas.	47
Tabla 9. Ventajas y desventajas de la fitorremediación.	50
Tabla 10. Parámetro de fertilidad y toxicidad del sustrato.	60
Tabla 11. Parámetros de salinidad y acidez.	61
Tabla 12. Escala de Braun-Blanquet.	63
Tabla 13. Parámetro de toxicidad (fracción total y disponible) en plantas.	69
Tabla 14. Parámetros de calidad del agua de riego.	77
Tabla 15. Promedio de los parámetros de calidad de agua de riego.	79
Tabla 16. Concentración de P disponible en los sustratos.	82
Tabla 17. Rango de valores para el fósforo.	83
Tabla 18. % M.O. Mediante el método de Walkley-Black.	
Tabla 19. % M.O. Mediante el método de Calcinación	84
Tabla 20. Valores de referencia del % de M.O. periodo 2001-2008	85
Tabla 21. Metales disponibles en los sustratos.	87
Tabla 22. Metales disponibles en el sustrato relaves. Periodo 2005-2010.	90
Tabla 23. Metales totales en los sustratos.	91
Tabla 24. Metales totales en el sustrato relaves. Periodo 2005-2008.	93
Tabla 25. Resultados Conductividad eléctrica en los tres sustratos.	94
Tabla 26. Clasificación de suelos según salinidad en función de la ce.	

Tabla 27. Relación Entre Las Precipitaciones, C.E. Y ph Para El Sustrato Relaves. (Periodos 2001-2010)	95
Tabla 28. Ph En Los Sustratos.	96
Tabla 29. Ph En Sustrato De Relaves (Período 2001 – 2008).	
Tabla 30. Clasificación de suelos según acidez asociado a Mediciones de ph.	97
Tabla 31. Sales cambiables en los sustratos.	98
Tabla 32. porcentaje de sodio intercambiable en los sustratos.	99
Tabla 33. Pluviometría mensual para el período 2005- 2010.	101
Tabla 34. Pluviometría (mms) por estaciones del año.	102
Tabla 35. Temperaturas mínimas, medias y máximas para el período 2005-2010.	104
Tabla 36. Neviscas durante el periodo 2005-2010, zona de chacay.	107
Tabla 37. Dirección e intensidad máxima y media (m/s) mensuales del viento durante el periodo 2005- octubre 2010.	108
Tabla 38. Humedad relativa %, período 2005-2010.	109
Tabla 39. Catastro de especies del tranque de relaves el chinche.	112
Tabla 40. Cuadrante 1.	114
Tabla 41. Cuadrante 2.	
Tabla 42. Cuadrante 3.	115
Tabla 43. Cuadrante 4	
Tabla 44. Cuadrante 5.	116
Tabla 45. Cuadrante 6.	
Tabla 46. Cuadrante 7.	
Tabla 47. Cuadrante 8.	117
Tabla 48. Cuadrante 9.	
Tabla 49. Cuadrante 10.	
Tabla 50. Cuadrante 11.	118
Tabla 51. Cuadrante 12.	
Tabla 52. Cuadrante 13.	118
Tabla 53. Cuadrante 14.	119

Tabla 54. Cuadrante 15.	
Tabla 55. Cobertura total por especie en el tranque de relaves.	120
Tabla 56. N° total de especies e individuos en los cuadrantes	121
Tabla 57. Frecuencia relativa transecta 1.	122
Tabla 58. Frecuencia relativa transecta 2.	123
Tabla 59. Frecuencia relativa transecta 3.	124
Tabla 60. Frecuencia relativa transecta 4.	125
Tabla 61. Frecuencia relativa transecta 5.	126
Tabla 62. Frecuencia relativa transecta 6	127
Tabla 63. <i>Baccharis linearis</i> (R. Et P.) Pers.	130
Tabla 64. <i>Baccharis pingraea</i> DC.	131
Tabla 65. <i>Cortaderia rudiusscula</i> Stapf.	132
Tabla 66. Concentración y BAC De Metales En <i>Baccharis linearis</i> .	133
Tabla 67. Factor de acumulación en <i>baccharis linearis</i> .	134
Tabla 68. Resumen Comparativo Tukey: <i>Baccharis linearis</i> .	136
Tabla 69. Distribución de los metales en la planta.	137
Tabla 70. Concentración De Metales En <i>Baccharis pringaea</i> .	
Tabla 71. AF <i>Baccharis pringaea</i> .	138
Tabla 72. Resumen Comparativo Tukey: <i>Baccharis pringaea</i> .	140
Tabla 73. Distribución de los metales en la planta.	141
Tabla 74. Concentración De Metales En <i>Cortaderia rudiussculas</i> Staph.	
Tabla 75. AF <i>Cortaderia rudiusscula</i> Staph.	142
Tabla 76. Resumen Comparativo Tukey: <i>Cortaderia rudiusscula</i> Staph.	
Tabla 77. Distribución de los metales en la planta.	143

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Construcción Del Muro Aguas Arriba.	21
Figura 2. Tranque El Chinche.	22
Figura 3. Clasificación Y Localización De Los Metales Y Metaloides En La Tabla Periódica. (Volke <i>et al.</i> 2005)	27
Figura 4. Detoxificación Y Acumulación De Metales En Plantas.	36
Figura 5. Factores Que Inciden En La Remediación De Suelos.	38
Figura 6. Sitio De Muestreo Tranque De Relave El Chinche.	54
Figura 7. Sitios De Muestreo Cerros Aledaños Al Tranque De Relaves El Chinche.	
Figura 8. Toma De Muestra De Suelo.	56
Figura 9. Muestras De Sustratos.	
Figura 10. Muestreo De Sustrato Control.	57
Figura 11. Muestreo De Sustrato Relaves.	58
Figura 12. Muestreo De Sustrato Relave - Planta.	
Figura 13. Tratamiento De Las Muestras De Suelo.	59
Figura 14. Distribución De Cuadrantes Tranque El Chinche.	61
Figura 15. Distribución De Transectas Tranque De Relaves El Chinche.	64
Figura 16. Asignaciones para la descripción de las especies.	65
Figura 17. Muestreo De Plantas En El Relave El Chinche.	66
Figura 18. Muestreo De Plantas Control.	67
Figura 19. Totalidad De Las Muestras De Plantas.	68
Figura 20. Tratamiento De Las Muestra Vegetales.	69
Figura 21. Mapa Conceptual: Resumen De Metodología De Las Muestras.	74
Figura 22. Suministro De Agua Del Tranque De Relaves El Chinche.	75
Figura 23. Conductividad Específica (Umho/Cm) Periodo 2005-2010.	80
Figura 24. Concentración De Cobre (mg/L) Periodo 2005-2010.	
Figura 25. Concentración de Sulfato (mg/L) Periodo 2005-2010.	81

Figura 26. Concentración de fosforo disponible en los sustratos, en función de los sitios de estudio, donde las letras distintas indican diferencias significativas (Tukey, $p < 0.05$). Las barras de error corresponden a un intervalo de confianza al 95%. (n=3)	82
Figura 27. % de M.O., en función de los sitios de estudio, donde las letras distintas indican diferencias significativas (Tukey, $P < 0.05$). Las barras de error corresponden a un intervalo de confianza Al 95%. (n=3)	84
Figura 28. Concentraciones De Fe, Mn, Zn, Cd, Pb, Mo y Cu disponibles, en función de los sitios de estudio, donde las letras distintas indican diferencias significativas (Tukey, $P < 0.05$). Las barras de error corresponden a un intervalo de confianza Al 95% (n=4)	88
Figura 29. Concentraciones De Mo, Fe, Zn, Pb Y Cu Totales, en función de los sitios de estudio, donde las letras distintas indican diferencias significativas (Tukey, $P < 0.05$). Las barras de error corresponden a un intervalo de confianza Al 95% (n=4)	92
Figura 30. Concentraciones de sales cambiables, en función de los sitios de estudio, donde las letras distintas indican diferencias significativas (Tukey, $p < 0.05$). Las barras de error corresponden a un intervalo de confianza al 95%. (n=2)	99
Figura 31. Capacidad de intercambio catiónico, en función de los sitios de estudio, donde las letras distintas indican diferencias significativas (Tukey, $P < 0.05$). Las barras de error corresponden a un intervalo de confianza Al 95%. (n=2)	100

Figura 32. Pluviometría mensual (mms) zona de Chacay, período 2005- 2010. Gerencia gestión de riesgos operación invierno, meteorología, zona de Chacay.	102
Figura 33. Pluviometría por estaciones periodo 2005-2010. Gerencia gestión de riesgos operación invierno, meteorología, zona de Chacay.	103
Figura 34. Temperaturas Mínimas, Medias Y Máximas, Zona De Chacay 2005-2010. Gerencia Gestión De Riesgos, Operación Invierno, Meteorología, Zona De Chacay.	105
Figura 35. Climograma 2005-2010 Zona De Chacay. Gerencia Gestión De Riesgos Operación Invierno, Meteorología, Zona De Chacay.	106
Figura 36. Promedio Anual De Neviscas Para El Periodo 2005-2010. Gerencia Gestión De Riesgos Operación Invierno, Meteorología, Zona De Chacay.	107
Figura 37. Humedad Relativa Media % , Zona De Chacay. Gerencia Gestión De Riesgos Operación Invierno, Meteorología, Zona De Chacay	110
Figura 38. Cobertura Total Por Especie Del Tranque De Relave El Chinche.	120
Figura 39. Frecuencia relativa transecta 1.	122
Figura 40. Frecuencia relativa transecta 2.	123
Figura 41. Frecuencia relativa transecta 3.	124
Figura 42. Frecuencia relativa transecta 4	125
Figura 43. Frecuencia relativa transecta 5	126
Figura 44. Frecuencia relativa transecta 6.	127
Figura 45. Baccharis linearis	128
Figura 46. Baccharis pringaea	129
Figura 47. Cortaderia ruduscula Stapf.	

- Figura 48. PCA con puntajes (b-d) y cargas (a-c), realizado a las concentraciones de metales en *Baccharis linearis*, encontradas en los sitios del relave y control. 135
- Figura 49. PCA con puntajes (b-d) y cargas (a-c), realizado a las concentraciones de metales en *Baccharis pringaea*, encontradas en los sitios del relave y control. 139

En el Tranque de Relaves El Chinche de Minera Los Pelambres, existe preocupación por lo que son sus relaves en abandono, ya que además de ser un material muy fino, contienen grandes concentraciones de metales pesados que puede afectar al medio ambiente.

Sobre estos relaves, bajo ciertas condiciones climáticas y naturales del medio, se desarrollaron especies vegetales con la característica de absorber y tolerar el estrés causado por los metales pesados. Para sobrevivir a este tipo de estrés las plantas desarrollan ciertos mecanismos fisiológicos especializados.

En el presente estudio se trabajó con tres tipos de sustratos, dos de ellos provenientes del relave y uno de los cerros aledaños al tranque utilizado a modo de control.

Este estudio incluye una caracterización de la zona de estudio para lo cual se midieron diferentes parámetros del sustrato y se llevó a cabo un catastro y reconocimiento de las especies de colonización natural del sitio. Se determinaron diferentes variables ecológicas, con la finalidad de obtener las especies de importancia. Las especies seleccionadas fueron; *Baccharis linearis*, *Baccharis pringaea* y *Cortaderia rudiusscula* Stapf.

En este estudio se evaluó el efecto de las tres especies en la absorción de cobre (Cu), molibdeno (Mo), cinc (Zn), cadmio (Cd), plomo (Pb) y manganeso (Mn). Para ello se extrajeron 5 ejemplares de cada especie en dos sitios, uno del tranque de relaves y otro de los cerros aledaños a modo de control.

A las tres especies seleccionadas se les determinó las concentraciones de metales mediante un ICP-OES en sus diferentes partes (tallo, raíz y hojas).

Las tres especies resultaron ser hipercumuladoras y acumuladoras para los metales seleccionados en las diferentes partes de sus tejidos. Al determinar el BAC y el AF, las tres plantas extraídas del sustrato relave resultaron ser aptas para fitoextraer todos los metales en estudio a diferencia de las extraídas del sustrato control que solo resultaron aptas para fitoextraer algunos de los metales. Existen diferencias significativas entre las concentraciones de metales para las plantas extraídas de ambos sitios de estudio, siendo casi todas mayores en las plantas extraídas del relave, encontrándose tendencias claras en la absorción de cada metal en los diferentes tejidos de la planta, patrón que en la mayoría de los casos es el mismo para ambos sitios de estudio.

Palabras Clave: metales pesados, Plantas de colonización natural, relaves en abandono.

At El Chinche Dam, an operation belonging to the mining company Los Pelambres, there is concern regarding what to do with the tailings left behind. Besides being composed of a very fine material, its great concentration of heavy metals could affect the environment. To survive this kind of stress certain plants have developed specialized physiological mechanisms.

In the present study under certain weather conditions and due to natural environmental conditions, plant species developed on top of these tailings with the characteristic to absorb and tolerate the stress caused by heavy metals.

In the present study worked with three types of substrates, including two from the tailings and one of hills around the dam used as a control.

This study includes a characterization of the study area, for which different parameters were measured from the tailings substrate and a census and survey of the species of natural colonization site. Ecological variables were determined, in order to obtain important species. The species were selected a sample of; *Baccharis linearis*, *Baccharis pringaea* y *Cortaderia rudiusscula* Stapf.

This study evaluated the effect of the three species in the absorption of copper (Cu), molybdenum (Mo), zinc (Zn), cadmium (Cd), lead (Pb) and Manganese (Mn). For this purpose, extracted 5 samples of each species at two sites, one of the tailings dam and another of the hills around the dam used as a control.

At three selected species were determined concentrations of heavy metals by ICP-OES in its different parts (stem, root and leaf).

The tree species were hyperaccumulator and accumulator for all selected metals in different parts of tissues. In determining the BAC and AF, the tree plants taken from the tailings substrate proved to be suitable to remove all metals unlike the control substrate learned that only proved to be suitable to extract some of the metals.

There are significant differences between the concentrations of metals for plant samples taken from both sites; with almost all higher in plants taken from the tailings, found clear trends in the uptake of each metal in different plant tissues, a pattern that in most cases is the same for both sites.

Keywords: heavy metals, natural colonization of plants, tailings abandoned.

Chile es reconocido a nivel mundial como país minero, ya que su territorio es rico en yacimientos y depósitos metalíferos, principalmente de cobre, oro, plata, hierro, plomo, zinc y manganeso (SERNAGEOMIN 2010). Según los catastros realizados por SERNAGEOMIN en Chile, para el año 2008 habría 10.206.501 hectáreas dedicadas a la explotación y 13.724.100 hectáreas dedicadas a la exploración.

Minera los Pelambres (MLP) es una empresa ubicada en la Cordillera de Los Andes, comuna de Salamanca, IV Región. A 240 Km., al noreste de Santiago, capital del país. Se centra principalmente en la explotación del cobre y en menor cantidad de molibdeno, sus mercados significativos en este ámbito están constituidos por Asia y Europa.

MLP es uno de los diez yacimientos cupríferos más grandes del planeta, ocupando la cuarta posición en Chile en producción y tercera en rentabilidad.

Dentro de las estadísticas realizadas por SERNAGEOMIN, Minera Los Pelambres en el 2008 se ubicaría entre los 20 titulares con mayor cantidad de hectáreas en concesiones de explotación en el país con alrededor de un 64.520 hectáreas, en un porcentaje de 0,63% con respecto al total de concesiones en el país.(SERNAGEOMIN 2008)

El proceso de extracción de MLP es en una mina rajo abierto ubicada, entre 3.100 y 3.600 metros sobre el nivel del mar. Dentro del proceso productivo para la obtención del mineral concentrado se encuentra el proceso de flotación, cuya consecuencia es la generación de relaves, los cuales son desechos mineros, que corresponde a una suspensión fina de sólidos en líquidos, constituidos fundamentalmente por el mismo material presente insitu en el yacimiento, al cual se le ha extraído la fracción con mineral valioso correspondiente al 5%, siendo el material de desecho el porcentaje restante, con el cual se conforma una pulpa, que se genera y desecha en las plantas de concentración húmeda de especies

minerales y estériles que han experimentado una o varias etapas en circuito de molienda fina. (Induambiente 2008)

La pequeña y mediana minería ha sido una actividad históricamente importante para la economía de la IV Región y, en especial, para las comunidades cercanas a las minas y a las plantas de procesamiento de minerales.

Sin embargo, la explotación intensiva de minerales en los últimos 150 años también ha generado grandes cantidades de pasivos ambientales, entre los que destacan los depósitos de relaves.

Según datos de SERNAGEOMIN, en 1990 existían unos 22.060.646 m³ de relaves, en 398 depósitos distribuidos por toda la IV Región, lo que representa el 52% del total presente entre la Segunda y Séptima Región. (Induambiente 2006)

El abandono inadecuado de estos depósitos los ha transformado en focos potenciales de contaminación del entorno, imponiendo altos riesgos ambientales. En Chile existen al menos 213 mineras abandonadas y paralizadas, algunas de las cuales podrían representar riesgos para la población en términos de seguridad, salud e impactos sobre el medio ambiente (SERNAGEOMIN. y JICA. 2007).

Uno de los principales factores que han potenciado los efectos ambientales negativos de los tranques de relaves fue la ausencia de una legislación que regulara la etapa post-operativa de las faenas mineras. Sin embargo, las nuevas normativas mineras consideran la estabilización físico-química de los tranques de relaves antes de ser cerrados. (Ginocchio *et al.* 2007)

Estos sustratos poseen características adversas tales como concentraciones altas de metales pesados, problemas de acidez, baja cantidad de materia orgánica por lo que poseen problemas de fertilidad, con esto es poco probable que se desarrolle vegetación de forma natural en estos sustratos, debe pasar un cierto periodo de años en donde el sustrato sufra de forma natural ciertos cambios, de esta manera se permite el desarrollo de vegetación incipiente en el lugar, la cual

posee ciertos mecanismos que le permiten sobrellevar estas situaciones de estrés.

El Tranque de Relaves El Chinche de MLP, el cual dejó de operar en 1998 presenta ciertas características en particular lo que ha permitido que ciertas plantas colonicen de forma natural, lo que ha motivado a MLP a investigar sobre este tema y ver la posibilidad de que estas plantas puedan ser utilizadas en un futuro próximo para fitorremediar el sustrato de relaves y de esta manera contribuir con el medio ambiente de forma natural, siendo el proceso de fitorremediación uno de los métodos más factible y económico para tratar los relaves, además de tener una buena aceptación en la comunidad se destaca por ser visualmente atractivo.

1.- PASIVOS AMBIENTALES EN CHILE.

Los pasivos ambientales son producto de situaciones ambientales o de procesos de origen antrópico que ocurrieron en un pasado y que con deterioro progresivo en el tiempo, representan actualmente un riesgo para el ambiente y la calidad de vida de las personas. Un pasivo ambiental puede afectar la calidad del agua, el suelo, el aire, y los ecosistemas deteriorándolos. (Cantún 2007)

Hans Willumsen, quién fue jefe del departamento de control de la contaminación de la CONAMA para el año 2009, trató el tema de los pasivos ambientales en Chile; *“los pasivos ambientales se insertan en un conjunto de áreas con cierto ámbito territorial donde históricamente ha habido presencia, por manejos inadecuados de procesos productivos o de desechos, de un grupo de sustancias o elementos que hoy en día, de alguna manera, no tienen control. Estos no han tenido un correcto tratamiento y no existe claridad sobre la situación, por lo que se presenta un cuadro de incertidumbre.”* (Induambiente 2009)

El tema de los pasivos ambientales mineros (PAM) es uno de los temas que hasta la fecha no ha sido considerado en absoluto en la legislación del país que encierran, en algunos casos, considerables riesgos para el medio ambiente y la salud humana.

La cifra de faenas mineras y plantas de concentración abandonadas no son conocidas con cierta certeza hasta ahora y tampoco se cuenta con una normativa sobre inventario, clasificación y remediación de pasivos mineros peligrosos. (Renner y Ponce 2003). Cabe mencionar que no todas las faenas abandonadas son consideradas pasivos ambientales sino sólo aquellas que causan daño a la salud de la población y al medio ambiente.

Consciente de esta realidad el Servicio Nacional de Geología y Minería, SERNAGEOMIN, mediante el Departamento de Ingeniería y Gestión Ambiental, y el Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales (BGR), desarrolló desde

el año 1994 y hasta el mes de marzo de 2009, una serie de proyectos de carácter minero ambiental en el ámbito del Convenio de Asistencia Técnica suscrito entre los gobiernos de la República Federal de Alemania y de Chile.

La última fase del proyecto se enfocó en la temática de los Pasivos Ambientales, materia no normada en el país, por lo cual se preparó un Anteproyecto de Ley, que dio inicio al proceso de Evaluación de Riesgos de Faenas Mineras Abandonadas.

Se creó una metodología de evaluación de riesgos de faenas mineras con el apoyo de consultorías especializadas.

Dicha metodología fue analizada y discutida en talleres de trabajo, lográndose en el año 2008 una segunda versión mejorada del Manual de Evaluación de Riesgo (MER). Este manual permite evaluar riesgos relacionados con accidentes o daños a las personas y riesgos al medio ambiente, incluyendo las vías de exposición debido a instalaciones y residuos mineros remanentes, dando como resultado una evaluación simplificada de las diferentes faenas mineras.

El manual MER permite obtener como resultado los riesgos que pueden presentar las faenas mineras abandonadas y/o paralizadas y jerarquizarlas, para una vez promulgada la Ley de Pasivos Mineros, proceder en conformidad a ésta para su remediación. (SERNAGEOMIN 2009)

2.- DEPÓSITOS DE RELAVES MINEROS.

Una forma de descarga de los relaves corresponde a tratar los relaves provenientes de la planta, de manera de separar la fracción gruesa (arenas de relaves) de la fracción fina (lamas), para poder utilizar la primera como material para la construcción del muro perimetral y descarga la segunda a la cubeta de embalse. (Ramírez 2007)

Una de las formas de depositar los relaves es en Tranques de Relaves, en donde existen tres tipos de construcciones de muro: aguas arriba, línea central y aguas

abajo. Para este estudio sólo se explicará la construcción aguas arriba ya que el tranque El Chinche está construido en base a este.

2.1.- Método aguas arriba.

El método aguas arriba consiste en un muro inicial construido con material de empréstito compactado sobre el cual se inicia la depositación de los relaves, utilizando clasificadores denominados “Hidrociclones”; este se encarga principalmente de separar la fracción más gruesa o arena de la fracción más fina o lamas, en donde la primera fracción se descarga por el flujo inferior del hidrociclón mientras que el segundo sale por el flujo superior del hidrociclón.

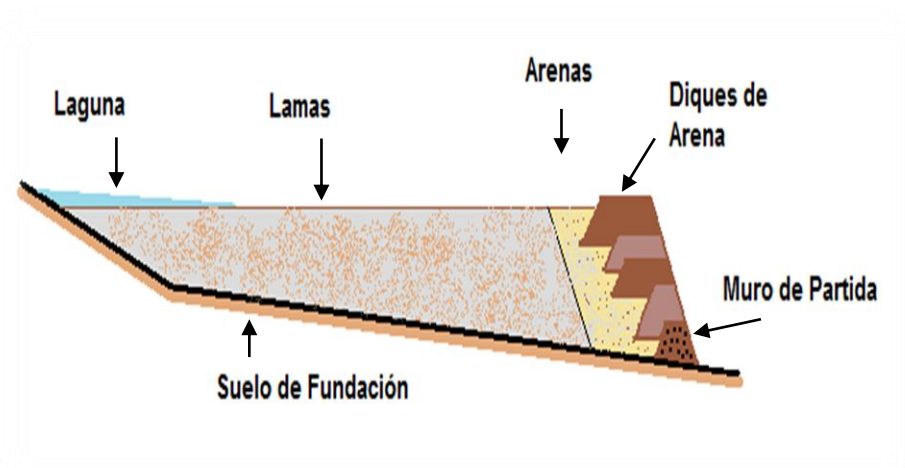


Figura 6. Construcción Del Muro Aguas Arriba.(Ramírez 2007)



Figura 7. Tranque El Chinche.

Como se observa en las figuras 1 y 2 la fracción más fina se deposita hacia el centro del tranque en un punto más alejado del muro, de modo tal que se va formando una especie de playa al sedimentar las partículas más pesadas de lamas y gran parte del agua escurre, formando el pozo de sedimentación o laguna de sedimentación, la que una vez libre de partículas en suspensión es evacuada mediante un sistema de estructura de descarga, que pueden ser las denominadas torres de evacuación, o bien, se utilizan bombas montadas sobre una balsa flotante. Una vez que el depósito se encuentra próximo a llenarse, se procede al levante del muro, desplazando los hidrociclones a una mayor elevación en la dirección hacia aguas arriba y comenzando una nueva etapa de descarga de arenas, y peralte del muro; se continúa sucesivamente la construcción en la forma indicada.

Con este método, se pueden alcanzar alturas de hasta 25 metros, además con este método es el que requiere un menor volumen de material arenoso, por lo que ha sido utilizado en la pequeña minería para construir numerosos tranques.

Sin embargo este tipo de depósito es el que produce el tipo de muro menos resistente frente a oscilaciones sísmicas, es por ello que en la actualidad en Chile, no está contemplado aprobar este tipo de proyecto de tranques de relaves en la legislación vigente. (Ramírez 2007)

2.2.- Legislación aplicable a los depósitos de relaves.

Actualmente los depósitos de relaves se encuentran regulados por los decretos supremos N° 132/2002 de seguridad minera y N°248/2007 para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves, del Ministerio de Minería.

Lo concerniente a almacenamiento de relaves y operación de depósitos de residuos mineros, es regido por las normas contenidas en el Decreto Supremo que aprueba el “Reglamento de Construcción y Operación de Tranques de Relaves”, y por lo dispuesto en el Título X en el reglamento de seguridad minera, que hace referencia a normas sobre el cierre de faenas mineras.

2.3.- Problemática ambiental de los relaves.

El problema que surge con estos depósitos de relaves, es que en tanto la zona norte y centro del país predomina las condiciones climáticas Mediterráneas áridas y semiáridas, lo que lleva a la evaporación de las aguas claras, dejando atrás un fino material particulado que es dispersado al medio ambiente ya sea por los vientos o lluvias generando de esta manera riesgos para el ambiente y en muchos casos problemas con la ciudadanía circundante. (Induambiente 2009)

Además la mayoría de estos sustratos generan un ambiente adverso para el desarrollo de diferentes especies vegetales debido a que estos presentan altos niveles de metales pesados y por tanto poseen baja fertilidad. (Novoa y Contreras 2010).

Los tranques de relaves pueden causar varios impactos ambientales (Ibañez 2004) tales como:

➤ Contaminación hidrológica, se puede generar a partir de relaves que al estar en contacto con el agua generan ácido sulfúrico, el cual es transportado a través de lluvias o corrientes superficiales y es depositado en diferentes cuerpos de agua. Así como el ácido sulfúrico existen otros compuestos o elementos que poseen los relaves que a través de procesos naturales pueden ser transportados a cuerpos de agua afectándolos en su calidad.

➤ Contaminación de suelo, producto del material fino del relave, que es arrastrado por acción del viento y pueda deparar en zonas agrícolas o en zonas donde existe vegetación nativa, de esta manera con el tiempo la vegetación puede verse afectada ya sea porque va a tender a disminuir e incluso a desaparecer o simplemente se apreciarán a la vista cambios estructurales entre una misma especie, dado a que las concentraciones de nutrientes disponibles como solubles, y sustancias tóxicas, se verán incrementados en el sustrato, al igual que se verán alterados diferentes parámetros como la permeabilidad y el pH.

➤ Cadenas tróficas, como se ha mencionado con anterioridad, los relaves poseen altas concentraciones de metales pesados los cuales pueden llegar a afectar al ambiente circundante por acción del viento, lluvia, etc. Una vez que estos contaminantes llegan a alterar estos ambientes pueden afectar la cadena trófica de tal manera que cualquier especie que esté en contacto con este ambiente tiene la posibilidad de convertirse en portadora de estos contaminantes, se sabe que los metales pesados tienden a bioacumularse y por tanto una especie al ingerir agua o una planta con altas concentraciones de metales pesados puede transmitirla al resto de la cadena trófica (biomagnificación). (Ortiz *et al.* 2009)

La peligrosidad de los metales pesados es mayor al no ser química ni biológicamente degradables. Una vez emitidos, pueden permanecer en el ambiente durante cientos de años. Además, su concentración en los seres

vivos aumenta a medida que son ingeridos por otros, por lo que la ingesta de plantas o animales contaminados puede provocar síntomas de intoxicación.

➤ Paisajístico, social y cultural, la disposición de estos relaves en muchos casos si se realiza cerca de un área poblada, lo habitual es que no tenga buena aceptación por parte de la ciudadanía, ya que de alguna manera al depositar estos relaves en cerros como lo es lo habitual, cambia el paisaje notablemente, y si no se realiza un buen manejo de estos generalmente se presentan reclamos por la emisión de material particulado.

3.- PLAN DE CIERRE.

Plan de cierre es la etapa que sigue después que termina una operación minera, es un conjunto de acciones y medidas que se realizan para proteger a las personas y el medio ambiente después que termina la actividad minera, es un instrumento de gestión orientado a prevenir, eliminar o minimizar los riesgos asociados al cierre de instalaciones.

El plan de cierre se puede hacer con la ayuda de SERNAGEOMIN, si en caso de que este plan no se ha llevado a cabo se considera que se ha hecho un abandono (Rivas y Martínez 2003).

La etapa ideal para la planificación del cierre es en el diseño del proyecto, para formular un plan de cierre se requiere del desarrollo de una estrategia corporativa, asignar recursos de diferentes índoles y de levantamiento de información.

Una estrategia de cierre moderna debe estar orientada a controlar los riesgos identificados para las instalaciones, cumplir las expectativas de la comunidad, la normativa vigente y lograr un cierre con mínimas actividades posteriores.

En Chile actualmente no se cuenta con normas que permitan establecer cuánto deberá remediarse en el caso que existan casos de contaminación, el Reglamento de Seguridad Minera es en donde se establecen los aspectos que deben ser considerados en un Plan de Cierre, cabe mencionar que este reglamento sólo considera que las faenas activas presenta el proyecto de cierre.

SERNAGEOMIN estableció en febrero de 2009, que todas las faenas deberán contar con un Plan de Cierre.

El plan de cierre está regulado por el Título X del reglamento de seguridad minera (Artículos 490 y 491), y tal como lo dice el nombre del reglamento sólo se ve desde el punto de vista de la seguridad y no del ambiental, indirectamente se toma el punto ambiental desde el sistema de evaluación de impacto ambiental (SEIA).

4.- METALES Y METALOIDES.

Metales: son sustancias con características de brillo y que son buenos conductores de calor y electricidad; con excepción del mercurio, todos los metales son sólidos a temperatura ambiente. Son más o menos maleables (formación de láminas) y dúctiles (formación de alambres). La mayoría posee propiedades de dureza, con excepción de los alcalinos, que son muy suaves. Químicamente, estos tienden a perder electrones para formar cationes.

Metales pesados: son aquellos elementos químicos que presentan una densidad igual o superior a 5 g cm^{-3} cuando están en forma elemental, o cuyo número atómico es superior a 20 (excluyendo a los metales alcalinos y alcalinotérreos) y su presencia en la corteza terrestre es inferior al 0,1% y casi siempre menor del 0,01%. (Navarro *et al.* 2007)

Metaloides: Los metaloides o semimetales son elementos que presentan propiedades de ambos grupos. En muchos aspectos, los metaloides se comportan como no metales, química y físicamente. Sin embargo, en su propiedad física más importante, la conductividad eléctrica, se parecen a los metales.

Los metaloides tienden a ser semiconductores, pero conducen la electricidad en menor grado que los metales

A continuación en la figura 3 se muestra la ubicación de los metales y metaloides en la tabla periódica y su clasificación según si son clase A referido a si son duros, clase B si son Suaves o frontera como metales intermedios.

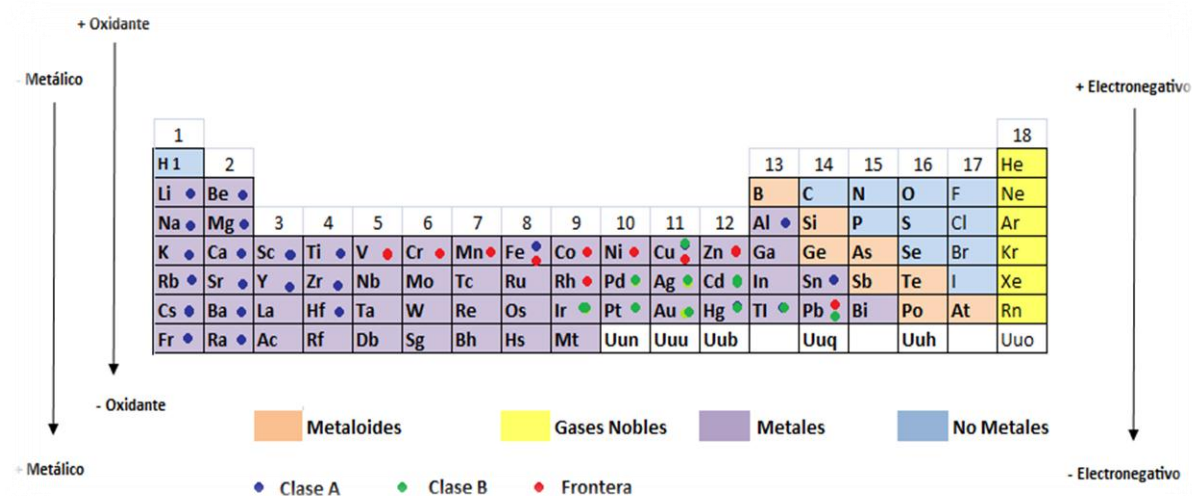


Figura 8. Clasificación Y Localización De Los Metales Y Metaloides En La Tabla Periódica. (Volke *et al.* 2005)

La clasificación mostrada en la figura 3 se basa en la forma en que se unen los metales en sus complejos y determina las posibilidades de formación de los mismos. Los iones de clases A tienden a formar complejos con ligandos similares que no se polarizan y las uniones más comunes son iónicas, en cambio los metales de clase B se unen preferentes con ligandos suaves polarizables para dar uniones más covalentes (Duffus 2002). El Cu, Fe y Pb poseen dos clasificaciones, esto se debe a que dependen de la forma en que se encuentren el Cu (I) pertenece a la clase B y el Cu (II) Frontera, en el caso de Fe en forma de Fe (III) corresponde a la clase A y el Fe (II) Frontera y para caso del Pb en estado Pb (IV) se clasifica como frontera y en el estado Pb (III) corresponde a la clase B.

4.1- Metales pesados en el suelo.

En el suelo, el tiempo de residencia de los contaminantes suele ser alto y generalmente los contaminantes tanto del aire como del agua llegan a él. El daño a los organismos con frecuencia es medio para los animales y alto para las plantas y la uniformidad de dispersión suele ser baja ya que a menudo la contaminación es puntual.

La biodisponibilidad que para el caso se entiende por la fracción de metales pesados que está disponible para la absorción por las plantas, depende de la solubilidad de los metales y de su capacidad de absorción en la fracción coloidal del suelo. La interacción entre los distintos procesos como intercambio catiónico, adsorción/ desorción, precipitación / disolución y formación de complejos, afecta la distribución de los metales entre la solución suelo y la fase sólida, siendo responsables de su movilidad y biodisponibilidad.

Los factores que afectan a la biodisponibilidad del metal son: el pH, potencial redox, textura, contenido y tipo de arcilla, materia orgánica, óxidos hidratados y la presencia de cationes y aniones en solución. (Jansen y Salisbury 1988)

En suelos ácidos, se produce una competencia de los iones H^+ con los cationes metálicos por los sitios de intercambio. A pH bajo se produce desorción de los metales pesados, aumentando su concentración en la solución suelo y su biodisponibilidad. Al aumentar el pH los metales pesados son removido de la solución suelo y adsorbidos por los coloides del suelo, disminuyendo su biodisponibilidad. Con excepción de Mo, Se y As, la biodisponibilidad de los metales pesados disminuye con el aumento del pH del suelo debido a su precipitación como hidróxidos insolubles, carbonatos y complejos orgánicos.

La materia orgánica del suelo se compone de sustancias húmicas y no húmicas siendo las primeras más estables, además tienen una alta afinidad por los iones metálicos, de esta manera pueden formar complejos órgano- metálicos.

Las arcillas se caracterizan por poseer principalmente cargas negativas en su superficie lo que permite que los metales pesados permanezcan más tiempo en el suelo disminuyendo su biodisponibilidad y su solubilidad. Pero no todas las arcillas

tienen el mismo efecto unas pueden tener mayor capacidad de retención que otras y varia también entre los metales.(SAG 2010)

Las condiciones redox en el suelo afecta el tipo de especies de metales de tal manera que se ve alterada la solubilidad. Por ejemplo en suelos compactados e inundados, con poca aireación se ven favorecidas las condiciones de reducción, incrementando la biodisponibilidad de algunos metales. (Kabata y Pendias 2000)

Los óxidos hidratados en el suelo pueden co-precipitar a los iones metálicos, al aumentar el contenido de estos en el suelo aumentan los sitios de adsorción para los metales y se reduce indirectamente su biodisponibilidad.

4.2- Metales pesados en plantas como parte de la nutrición.

Lo metales pesados en ciertas cantidades son necesarias para el crecimiento y desarrollo de las plantas, así como lo son para otros seres vivos.

Algunos metales pesados forman parte de los elementos esenciales que la planta necesita como base de su nutrición mineral.

Para que un elemento se considere esencial debe contar con lo siguiente:

- Una planta no puede crecer y reproducirse normalmente sin él.
- No existe otro elemento que lo pueda reemplazar o corregir su deficiencia.
- No se trata simplemente de un antídoto: es decir, no actúa para sobreponer los efectos tóxicos de otro elemento.

Estos elementos se pueden dividir en dos categorías, en primer lugar se encuentran los llamados elementos nutritivos primarios o macronutrientes y en segundo lugar se encuentran los elementos nutritivos secundarios o micronutrientes. Los macronutrientes son aquellos que son utilizados en mayores cantidades por la planta, al contrario de los micronutrientes que son utilizados en reducidas cantidades. Se han encontrado cuando menos 60 elementos en las plantas, esto se puede deber a que la mayor parte de los elementos que pueden disolverse en agua pueden entrar de alguna forma en la planta (Jansen y Salisbury 1988).

4.2.1- Macronutrientes.

Los macronutrientes son aquellos elementos que existen a niveles importantes en la biomasa y en los fluidos de la planta. Los elementos generalmente reconocidos como macronutrientes, esenciales para las plantas son carbono, hidrogeno, oxigeno, nitrógeno, fosforo, potasio, calcio, Magnesio y azufre. Los tres primeros se obtienen de la atmosfera mientras que el resto la planta los obtiene del suelo. (Stanley 2007). A continuación se muestra una tabla con las funciones que presenta cada mineral de macronutrientes en la planta y los síntomas en caso de que exista usencia o exceso de estos.

Tabla 10. Funciones Y Síntomas De Deficiencia Mineral: Macronutrientes.

Elemento Mineral	Funciones De Los Elementos Minerales; Macronutrientes	Síntomas De Deficiencia Mineral
Nitrógeno	Parte de aminoácidos, proteínas, coenzimas, ácidos nucleicos, clorofila, ATP. Estimula el crecimiento vegetativo, las plantas con abundante nitrógeno disponible son suculentas y de hojas color verde oscuro.	No hay crecimiento o es limitado y presenta clorosis (color verde pálido u amarillento) o perdida de las hojas en casos graves. Coloración purpurea causada por la acumulación de pigmentos antocianinas. Toda la planta se ve afectada en especial las hojas viejas. La falta de nitrógeno aumenta la producción de fibras.
Fósforo	Parte de azucares fosfatados, nucleótidos, ácidos nucleótido, fosfolípidos, coenzimas (NADP, ATP y otras). Se encuentra en grandes cantidades en semillas y en frutos, es abundante en células meristemáticas, es necesario para ciertos procesos enzimáticos.	Las plantas deficientes en fosforo son de crecimiento lento, las hojas son verde oscuro y el desarrollo de las antocianinas puede estar aumentado a menudo son enanas en la madurez y se ven más afectadas las hojas viejas.

Elemento Mineral	Funciones De Los Elementos Minerales; Macronutrientes	Síntomas De Deficiencia Mineral
Potasio	Coenzima. Necesario para la síntesis proteica, es esencial para el funcionamiento de los estomas, transporte de hidratos de carbono, reducción de nitratos, síntesis de azúcares y almidón, división celular. Existe en las plantas en sales inorgánicas y en mínimas cantidades como ácidos orgánicos.	Al comienzo las plantas tienen a ser achaparradas. Al fin se seca y pierden el color pardusco, las hojas tienden a ser de color verde desvaído y con las orillas y la punta como tostada (necrosis). Con frecuencia las semillas no maduran. Los tallos y raíces son más propensos a contraer enfermedades.
Azufre	Parte de las proteínas, coenzima A, tiamina y biotina. Es indispensable para la formación de clorofila, se encuentra en semillas, es esencial para la aceite en las plantas.	Las hojas de las plantas presentan un verde pálido similar a las plantas deficientes en nitrógeno y las venas verdes. Generalmente no ocurre necrosis.
Magnesio	Parte de la clorofila, activa enzimas, mantiene la estructura de los ribosomas	Inhibe la producción de clorofila lo que origina el amarillento de las hojas u hojas moteadas pueden ser rojizas. Puntas de las hojas volteadas hacia arriba.
Calcio	Esencial para la síntesis y estabilidad de la lámina media en forma de pectato de calcio. Mantiene la estructura y permeabilidad de las membranas. Parte de la α -amilasa. Necesario para los movimientos en los cromosomas de la mitosis y meiosis. El Ca tiende a acumularse en las hojas. Neutraliza ácidos orgánicos dentro de la planta	Inhibición del desarrollo de la raíz y muerte de las puntas del tallo y raíces. Principalmente se ven afectados los brotes y hojas jóvenes
Hierro	Parte esencial de los citocromos, activador de ciertas enzimas como también forma parte de ellas, formación de la clorofila, catalizador.	Clorosis (color verde pálido casi blanco) intervenosa en hojas jóvenes, tallos cortos y delgados, las yemas permaneces vivas.

Fuente: (Erston y Miller 1967; Jansen y Salisbury 1988; Lopez y Lopez 1990)

4.2.2.- Micronutrientes

Los micronutrientes fueron difíciles de detectar, su importancia paso inadvertida por diferentes razones ya sea porque en las pruebas que se habían realizado los recipientes que se usaban estaban contaminados por otros elementos o porque las semillas poseían suficientes cantidades de elementos para su ciclo vital.

A continuación se muestra una tabla con las funciones que presenta cada mineral de micronutrientes en la planta y los síntomas en caso de que exista usencia o exceso de estos.

Tabla 11. Funciones Y Síntomas De Deficiencia Mineral: Micronutrientes.

Elemento Mineral	Funciones De Los Elementos Minerales; Micronutrientes	Síntomas De Deficiencia Mineral
Cloro	Activa enzimas fotosintéticas.	Hojas marchitas, clorosis, necrosis. Raíces enanas, engrosadas, o con punta en forma de garrote.
Manganeso	Formación de aminoácidos. Activa muchas enzimas como las carboxilasas y deshidrogenasas. Acarreador de electrones, catalizador accesorio en las reacciones redox.	Clorosis en hojas jóvenes, necrosis intervenosa (las venas más pequeñas permanecen verdes), desorganización de la membrana lamelar.
Boro	Translocación de aminoácidos, proceso de división celular, su función exacta se desconoce.	Desordenes fisiológicos, muerte de los meristemos apicales de raíces y tallos. Hojas retorcidas y pálidas en la base. Ápices de las raíces hinchados y descoloridos, los tejidos más afectados son los jóvenes.
Cinc	Formación de clorofila. Producción de ácido indolacético, parte de ciertas enzimas, forma parte de la anhidrasa carbónica, se acumula en semillas	Desordenes fisiológicos, reducción del tamaño de las hojas y de la distancia de los entrenudos. Márgenes de las hojas deformados. Clorosis. Las hojas viejas son las más afectadas.

Elemento Mineral	Funciones De Los Elementos Minerales; Micronutrientes	Síntomas De Deficiencia Mineral
Cobre	Acarreador de electrones, parte no proteica de ciertas enzimas oxidantes.	Hojas jóvenes frecuentemente color verde oscuro, torcidas, marchitas y deformadas. Los ápices permanecen vivos.
Molibdeno	Acarreador de electrones. Esencial en la fijación de nitrógeno, actúa en la reducción de nitratos	Clorosis o torcedura y muerte de las hojas jóvenes.

Fuente: (Erston y Miller 1967; Jansen y Salisbury 1988; Lopez y Lopez 1990)

4.3.- Consecuencias de un exceso de metales pesados en las plantas.

Los metales pesados tienen una gran tendencia a la bioacumulación y como sabemos toda concentración de un producto químico en exceso es toxico para el organismo, esta toxicidad es producto de que el organismo no posee los niveles de excreción necesarios para mantener los niveles adecuados en su interior y por lo tanto los bioacumula.

Los metales pesados en los organismos ocasionan problemas de toxicidad, Muchos de ellos al reaccionar con los átomos de azufre presentes en las proteínas, lo que produce una desviación enzimática, también puede ocasionar otros daños por reemplazo de otros cationes esenciales en la estructura de las biomoléculas.(Bautista 1999)

Los metales pesados tienen la capacidad de unirse a moléculas orgánicas tales como; grupos sulfidrilos, radicales amino, fosfatos, carboxilo e hidroxilo, lo que resulta muy toxico para los sistemas biológicos.

Algunos efectos de los metales pesados sobre la célula son:

- Acción genérica sobre proteínas por inhibición de la actividad o por daños en la estructura de las mismas.
- Desplazamiento de elementos esenciales de su metabolismo estándar, produciendo efectos de deficiencia

- Estrés oxidativo donde se producen especies de oxígeno reactivo, que incluyen radicales libres y los peróxidos.

El estrés oxidativo puede producir la inactivación de proteínas y enzimas, fundamentalmente por la oxidación de los grupos sulfidril, dando lugar a puentes disulfuro que es un enlace covalente fuerte entre grupos tiol de dos cisteínas, estos puentes causan la interrupción del funcionamiento normal de la proteína o enzima.

Produce además la peroxidación lipídica de membranas, causando rupturas y subproductos de las cadenas hidrocarbonadas y efectos de daño sobre el ADN. Estos pueden ser desperfectos genotóxicos: mutaciones, aberraciones cromosómicas, alteraciones en la síntesis y reparación de ácidos nucleicos y transformaciones celulares.

4.4.- Absorción de metales en plantas.

La absorción de metales se realiza en forma de minerales disueltos en agua este proceso se lleva a cabo de forma pasiva y se realiza principalmente a través de las raíces, éstas los adsorben en los sitios extracelulares de su membrana que poseen cargas negativas, principalmente por los grupos carboxilo (COO^-) que interaccionan con las cargas positivas de los metales pesados presentes en los suelos; esto crea un equilibrio dinámico, que facilita el ingreso y transporte de los metales a la raíz, una vez que entran las moléculas de agua se unen con moléculas de glucosa para dar lugar a la celulosa en la epidermis y en las células corticales de la raíz. El recorrido continua, de tal manera que ciertas moléculas penetran en las células que se encuentran en su camino, mientras otras entran en las vacuolas o atraviesan las membranas de las células corticales y entran en el citoplasma o se difunden a lo largo y en el interior de las paredes entre los protoplastos de la capa endodérmica. Después de pasar por la endodermis las

moléculas llegan a los tubos xilema y suben por el tallo de la planta hasta las hojas.(Wilson y Loomis 1968; Jansen y Salisbury 1988)

4.5.- Acumulación y detoxificación.

Mediante procesos de acumulación y detoxificación las plantas han sido capaces de tolerar altas concentraciones de metales pesados y mantener su homeostasis iónica, los que tienden a evitar la generación de concentraciones fisiológicamente intolerables de metales en lugares susceptibles de la célula; regulando la adquisición, quelación, transporte y distribución de los metales en plantas, se pueden destacar dos de mecanismos en primer lugar se encuentra eflujo de iones, que sólo resuelve el problema de homeostasis y en segundo lugar se encuentra el transporte al interior de la vacuola, que garantiza la disminución de la toxicidad, debido a que almacena iones y forma complejos .

Uno de los aspectos más importantes de la acumulación y detoxificación de metales pesados en plantas, es el proceso de quelación (Besoain 1970) que se puede llevar a cabo fuera de la raíz o dentro de la célula, y se entiende por la reacción en equilibrio entre un ión metálico y un agente acomplejante que en este caso la mayoría son moléculas orgánicas denominadas ligandos, que a su vez están presentes en gran abundancia en la célula, ya sea formando parte de moléculas de mayor dimensión, o como moléculas aisladas; los más comunes son dos clases de péptidos: fitoquelatinas y metalotioneinas (Navarro *et al.* 2007)

Otra forma de detoxificación es a través de las partes aéreas de la planta a través de la evapotranspiración, además de los procesos propios de descomposición, pero se sabe que pocos minerales se pierden en las hojas u otras partes de la planta que se eliminan o cuando las raíces mueren y se descomponen en el suelo. En la figura 4 mostrada a continuación resume los procesos de detoxificación y acumulación de metales en las plantas.

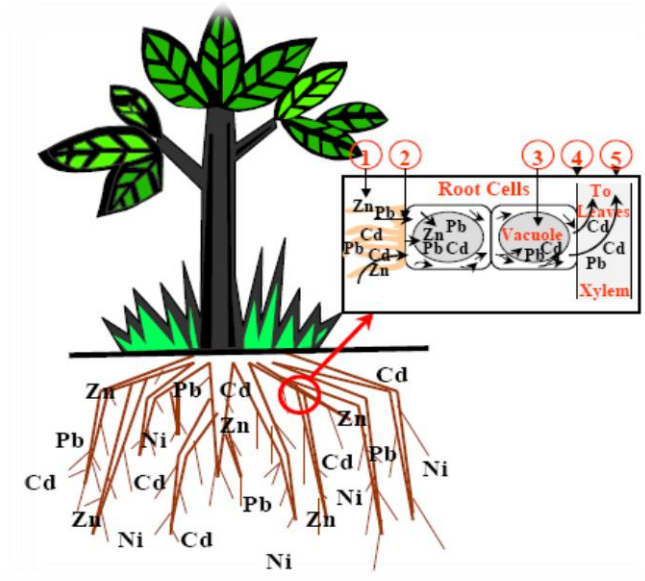


Figura 9. Detoxificación Y Acumulación De Metales En Plantas (Lasat 2000; Novoa y Palma 2008)

En la figura 4 se identifican los siguientes procesos de acumulación o detoxificación de metales:

1. Secreción de agentes quelantes, que complejan los metales en el suelo.
2. Fracción del metal no complejada, es adsorbida en la pared de la raíz de la planta.
3. Membrana plasmática como barrera selectiva, donde el metal biodisponible, se mueve vía simplástica o apoplástica por las células de la raíz.
4. Transportadores específicos y no específicos de metales, por los poros de la membrana.
5. Ligandos en el citoplasma (ej.: metalotioneinas, fitoquelatinas).
6. Eflujo de metales para homeostasis iónica.
7. Fracción del metal absorbida dentro de las raíces, inmovilizada en la vacuola.
8. Movimiento intracelular del metal que cruza el tejido vascular de la raíz, hacia el xilema.
9. El metal es translocado desde las raíces hacia el tejido aéreo (vástagos y hojas).

Existen especies nativas que sobreviven en suelos contaminados con metales conocidas como metalófitas y pseudometalófitas han desarrollado unos mecanismos fisiológicos especiales para tolerar la presencia de metales:

- La exclusión que impide la entrada de metales en la raíz y/o su transporte a la parte aérea de la planta.
- La acumulación en la parte aérea mediante su inmovilización o compartimentación en las vacuolas.

Debido a que viven en zonas muy limitadas y pueden ser afectadas directamente por las actividades mineras su conservación debería ser prioritaria, no sólo por la pérdida de una biodiversidad tan especial sino por su posible utilización en fitotecnologías ambientales de revegetación, Fitoestabilización y fitoextracción de entornos contaminados con metales. (Bercerril *et al.* 2007)

5.- PLANTAS HIPERACUMULADORAS.

Todas las plantas absorben metales del suelo donde se encuentran pero en distinto grado, esto va a depender de la especie vegetal y de las características y contenido de metales en el suelo (biodisponibilidad)(Prieto *et al.* 2009).

Existen plantas que son capaces de acumular cantidades excesivas de metales pesados y se les conoce como hiperacumuladoras, estas pueden superar en 100 ó más veces los valores normales de metales acumulados.

La hiperacumuladoras generalmente poseen poca biomasa, esto se debe a que utilizan más energía en los mecanismos necesarios para adaptarse a altas concentraciones de metales en sus tejidos (Kabata y Pendias 2000).

Las ventajas adaptativas de una planta hiperacumuladora están dadas por varias hipótesis, pero la más destacada y actual es con respecto al mecanismo que posee la planta para protegerse del estrés biótico causado por patógenos y

herbívoros, para que se pueda dar este tipo de protección la planta requiere de ciertas condiciones (Llugany *et al.* 2007):

- El metal debe ser más tóxico para el patógeno o herbívoro que para la planta.
- El metal debe impedir la virulencia del patógeno o herbívoro.
- El metal incrementa la resistencia de la planta frente al factor causante del estrés biótico.

6.- REMEDIACIÓN DE SUELOS.

La remediación del suelo consiste en un conjunto de acciones necesarias para recuperar y restablecer sus condiciones, de tal manera que éste pueda ser destinado a alguna actividad prevista. (Volke *et al.* 2005)

Los procesos de remediación dependen principalmente de tres factores que se darán a conocer en el siguiente esquema:

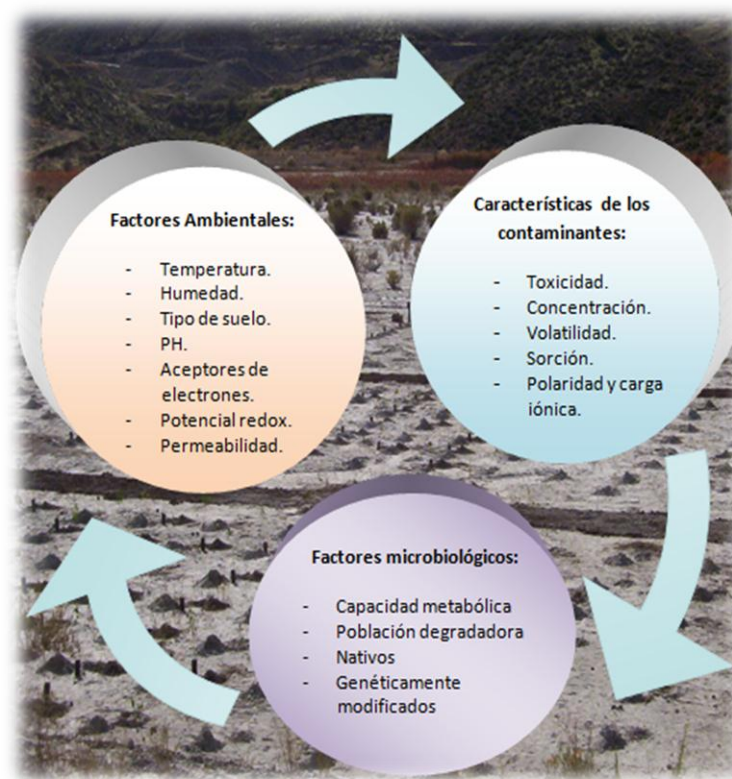


Figura 10. Factores Que Inciden En La Remediación De Suelos. (Volke *et al.* 2005).

De acuerdo a los factores señalados en la figura 5 se puede determinar la tecnología adecuada para la remediación del suelo, por lo que es necesario conocerlos previamente.

El término tecnología de remediación (según Volke y Velasco), implica cambiar la composición de un contaminante peligroso de manera de reducir su toxicidad, a través del uso de una o varias operaciones unitarias y de acciones físicas, químicas o biológicas.

Las tecnologías de remediación se pueden clasificar según su:

- Estado de desarrollo el cual se divide en:

Tradicionales: aquellas en las que se posee suficiente información con respecto a su desempeño y costos. Entre ellas se encuentra: vitrificación *in situ*, excavación y disposición, lavado e inundación de suelos, solidificación/ estabilización (S/E), uso de cubiertas sobre pilas de residuos (jales) y tecnologías de bombeo y tratamiento para el caso de aguas y lodos.

Innovadoras: son aquellas de tratamiento alternativo, son de información limitada como por ejemplo la fitorremediación.

- Lugar de tratamiento:

In situ: permite tratar el suelo sin necesidad de excavar ni transportar, por que se genera disminución de costos, pero requiere mayores tiempos de tratamiento y pueden ser inseguros en cuanto a uniformidad. Dificulta para verificar eficacia del proceso.

Ex situ: se requiere de una manipulación o exposición del material, lo cual incrementa los costos, pero posee menores tiempos de tratamiento y es más

seguro en cuanto a uniformidad ya que es posible homogeneizar y muestrear periódicamente.

Se subdivide en:

- On site: el tratamiento se realiza en el mismo sitio donde se realizó la excavación.
- Off site: el tratamiento se realiza fuera del sitio en donde se excavó.

6.1.- Tecnologías de remediación de suelos.

Las tecnologías para la remediación de suelos se dividen en fisicoquímicas y biológicas.

Tecnologías Fisicoquímicas: utilizan propiedades físico y/o químicas de los contaminantes o del medio contaminado para transformar, separar o inmovilizar el contaminante, estas tecnologías involucran procesos como filtración, neutralización, precipitación oxido- reducción, Sorción, evaporación y floculación. Su desventaja radica en que requiere de la excavación del suelo y de al menos un proceso secundario de tratamiento o disposición final del contaminante transformado, separado o inmovilizado, incrementándose los costos del tratamiento. (según Volke *et al.*). Algunas de las tecnologías fisicoquímicas son:

- Inundación de suelos.
- Lavado de suelos.
- Tratamiento químico.
- Solidificación / estabilización (S/E).
- Electrorremediación.

A continuación se describen brevemente cada una de las tecnologías mencionadas anteriormente.

Tabla 12. Inundación De Suelos.

Descripción	Es una técnica de tratamiento innovadora, que comúnmente se aplica <i>in situ</i> . Consiste en inundar el suelo contaminado con agua o con una solución de extracción para disolver y/o suspender el contaminante y, posteriormente, extraer la fase líquida que contiene el contaminante mediante un sistema de extracción. La tecnología requiere la perforación de pozos de inyección y de extracción.
Aplicación	En tratamiento de suelos arenosos, altamente permeables y para remediar suelos contaminados con una variedad de compuestos orgánicos (volátiles y semivolátiles) e inorgánicos (metales y metaloides).
Ventajas	Bajos costos; no es necesario excavar el suelo; y no se requiere de infraestructura sofisticada.
Limitaciones	Afecta los mantos acuíferos cuando no se prevé su ubicación, cuando el suelo es muy permeable y si el tiempo de residencia de la fase acuosa es muy prolongado. En general, no se aplica en suelos con mezclas complejas de contaminantes. Una alta cantidad de materia orgánica en el suelo dificulta el proceso de separación. Requiere de grandes cantidades de agua y que los contaminantes sean solubles.
Tiempo	Entre 2 y 12 meses.
Costos	46 a 125 USD/m ³ para una densidad de suelo de 1.6 ton/m ³ .
Usos después del tratamiento	No se utiliza con fines Agrícolas, puede destinarse a usos como residencial e industrial.

Fuente: (Volke *et al.* 2005)

Tabla 13. Lavado De Suelos.

Descripción	Es una tecnología <i>ex situ</i> , en la cual el suelo contaminado se excava y se lava con agua o soluciones de extracción en una unidad de lavado con el fin de disolver, suspender o precipitar el contaminante, lográndose así su transferencia a la fase acuosa. El lavado de suelos, a diferencia de la inundación, puede concentrar los contaminantes en un volumen menor de suelo, debido a la separación entre partículas finas y gruesas, reduciendo así el volumen del material contaminado (partículas finas).
Aplicación	Para suelos arenosos o muy permeables
Ventajas	Bajos costos, disminuye la cantidad de material contaminado, no requiere de infraestructura sofisticada, son sistemas cerrados, en donde se pueden controlar las condiciones del sistema y las emisiones al ambiente.
Limitaciones	Se requiere excavar y manipular el suelo, altas cantidades de materia orgánica dificultan el proceso de separación, no es eficiente para tratar mezclas complejas, los contaminantes deben ser solubles, requiere de grandes cantidades de agua, se necesitan procesos secundarios para tratar aguas residuales y partículas finas de suelo.
Tiempo	2 a 6 meses.
Costos	Ente 84 y 343 USD/m ³ , el costo promedio es de 238 USD/m ³ .
Usos después del tratamiento	Utilidad como soporte de infraestructuras, no para fines agrícolas.

Fuente: (Volke *et al.* 2005)

Tabla 14. Tratamiento Químico.

Descripción	Conocido como óxido-reducción química, es una tecnología innovadora que puede ser <i>in situ</i> o <i>ex situ</i> que implica reacciones redox, las cuales transforman los elementos potencialmente tóxicos en compuestos o elementos no peligrosos o menos riesgosos, reduciendo su toxicidad o su solubilidad y/o aumentando su estabilidad química. Cuando se requiere tratar contaminación por metales y/o metaloides, se busca cambiar el estado de valencia, ya que de éste depende la capacidad del metal para reaccionar con otros contaminantes o compuestos presentes en el suelo y, por consiguiente, su precipitación de esta manera, es posible disminuir la concentración biodisponible del elemento potencialmente tóxico en el suelo.
Aplicación	No es aplicable de forma genérica, previamente es necesario realizar un análisis de las propiedades del suelo para determinar las características de los agentes reductores y oxidantes.
Ventajas	Bajo consumo de energía; las soluciones diluidas son más fáciles de separar; posee tiempos de tratamiento relativamente cortos.
Limitaciones	En caso de combinarla con otra técnica, los costos se incrementan. Los químicos necesarios para el tratamiento son corrosivos (ácidos e hidróxidos) y pueden resultar relativamente costosos. A pesar del cambio en el estado de oxidación del metal, éste permanece en el sitio dejando un riesgo latente de que regrese a su estado de oxidación original. Necesidad de evaluar y ensayar la reacción en laboratorio, ya que el contaminante interactúa de forma diferente con cada tipo de suelo. Esto conlleva a diseñar una reacción específica para cada sitio contaminado.
Tiempo	Depende del tipo de suelo, profundidad y extensión
Costos	Oscilan entre 45 y 125 USD/m ³ dependiendo de los químicos, tipo de suelo profundidad y superficie.
Usos después del tratamiento	Para la construcción de unidades industriales, no es recomendable para el uso agrícola.

Fuente: (Volke *et al.* 2005)

Tabla 15. Solidificación/ Estabilización (S/E).

Descripción	Tecnología que se puede llevar a cabo <i>in situ</i> o <i>ex situ</i> , Limita la solubilidad o movilidad de un contaminante, disminuyendo su toxicidad o eliminando su lixiviación. La solidificación es un proceso que asegura mecánicamente a los contaminantes dentro de una matriz sólida, formando un bloque monolítico de alta integridad estructural, constituido por una mezcla del contaminante, el suelo y un agente puzolánico; esta técnica encapsula al contaminante en el suelo. La estabilización implica la adición de materiales o sustancias que limiten la reactividad, volatilidad y/o solubilidad de un contaminante. En este caso existe una reacción del contaminante con el aditivo para formar compuestos menos solubles y móviles.
Aplicación	Para suelos contaminados con metales o muy contaminados, para elementos radioactivos.
Ventajas	Es posible utilizar suelos contaminados como material básico para la fabricación de vidrio, además del potencial para tratar suelos, puede servir para formar un producto útil (material de relleno para caminos), el contaminante queda estabilizado y aislado, disminuyendo la probabilidad de causar daño al ambiente o la salud, es una tecnología totalmente desarrollada y disponible comercialmente.
Limitaciones	su aplicación, en general, representa un aumento significativo en el volumen del material original; el material solidificado no puede ser utilizado como suelo nuevamente y puede impedir el futuro uso del sitio; para realizar las mezclas de suelo con aditivos, es necesario deshidratar el suelo y realizar la operación a temperaturas elevadas, limitando su aplicación a suelos contaminados con sustancias o elementos no volátiles; sus costos son muy elevados debido a que es necesario disponer el suelo estabilizado/solidificado (excepto en la vitrificación <i>in situ</i>).
Tiempo	Corto depende del volumen de suelo a tratar, puede llevar desde unas cuantas horas hasta algunas semanas.
Costos	Entre 45 y 110 USD/ ton (63 a 154 USD/m ³ , considerando una ρ de 1.4 g/cm ³)
Usos después del tratamiento	No puede utilizarse como área de cultivo o construcción En situaciones como la vitrificación o la estabilización con cemento, el producto puede utilizarse como material de relleno para caminos o en la construcción de instalaciones de rellenos sanitarios o sitios de confinamiento.

Fuente: (Volke *et al.* 2005)

Tabla 16. Electrorremediación.

Descripción	Basado en la aplicación de una corriente directa de baja intensidad a través del suelo contaminado, con el uso de electrodos divididos en extremos anódicos y catódicos. El campo eléctrico moviliza las especies cargadas hacia los electrodos, de manera que los elementos o compuestos cargados positivamente se moverán hacia el cátodo, mientras que los aniones se moverán hacia el ánodo. La corriente eléctrica genera la formación de un frente ácido en el ánodo y uno básico en el cátodo a partir de la disociación de algunas moléculas de agua; esta generación de condiciones ácidas puede ayudar a la desorción, disolución y transporte de algunos contaminantes metálicos hacia sistemas de recolección ubicados en el cátodo.
Aplicación	Para tratar suelos poco permeables, como lodos y sedimentos contaminados con metales pesados, aniones y compuestos orgánicos polares en concentraciones de unas cuantas partes por millón (ppm) hasta miles.
Ventajas	Es una tecnología disponible comercialmente, el contaminante puede separarse con facilidad del suelo, incluso en forma pura, es una alternativa eficiente para la remediación <i>in situ</i> de sitios contaminados con metales y se puede aplicar eficientemente en suelos arcillosos (poco permeables).
Limitaciones	No es aplicable en todo tipo de suelos, el suelo tratado pierde ligeramente su fertilidad, es necesario hidratar el suelo al menos 24 horas antes de iniciar el tratamiento, valores extremos de pH y reacciones redox pueden disminuir su eficiencia y formar productos indeseables.
Tiempo	Depende del sitio contaminado puede llevar de una cuantas semanas hasta 6 u 8 meses
Costos	Depende de la extensión del terreno, del material de los electrodos, de la conductividad del suelo, de las metas propuestas para el tratamiento, y del costo de la energía (se estiman gastos energéticos cercanos a 500 KW h/m ³ , dependiendo del espacio entre electrodos [1-1.5 m])
Usos después del tratamiento	Previamente es necesario evaluar la integridad del suelo, puede utilizarse como área de cultivo pero debe recuperar fertilidad.

Fuente: (Volke *et al.* 2005)

Tecnologías Biológicas: Según el Convenio sobre Diversidad Biológica de 1992, la biotecnología podría definirse como "toda aplicación tecnológica que utilice sistemas biológicos y organismos vivos o sus derivados para la creación o modificación de productos o procesos para usos específicos".(ONU 1992)

Dentro de las ramas de empleadas por la biotecnología o tecnología basada en la biología se encuentra la biorremediación que se utiliza para describir una variedad de sistemas que utilizan el potencial metabólico de organismos vivos como plantas , hongos y bacterias para limpiar ambientes contaminados.(Volke *et al.* 2005)

Dentro de las tecnologías biológicas basadas en el principio de biorremediación, podemos encontrar:

- Biosorción.
- Precipitación de metales.
- Biolixiviación.
- Volatilización de metales.
- Fitorremediación.

A continuación en la tabal 8 se explican brevemente cada una de las tecnologías mencionadas anteriormente y luego se habla específicamente de lo que es la fitorremediación.

Tabla 17. Tecnologías Biológicas.

Tecnología Biológica	Descripción
Biosorción	Separación pasiva de metales y metaloides por interacción con material biológico vivo o muerto, se basa en un intercambio catiónico en donde los iones metálicos son intercambiados hacia componentes de carga opuesta unidos a la biomasa o resina.
Precipitación de metales	
- Precipitación reductora	Microorganismos capaces de reducir el estado redox de metales o metaloides, esto se debe a que son capaces de utilizarlos como aceptores de electrones durante la respiración anaerobia dando como resultado final la detoxificación y/o la precipitación del contaminante.
- Biomineralización	Es la formación de precipitados metálicos insolubles a través de interacciones con productos del metabolismo microbiano
Biolixiviación	Proceso en el cual se emplean microorganismos para disolver los minerales, liberando un metal de valor presente en un mineral o en un concentrado, que con métodos convencionales sería muy difícil de extraer.
Volatilización de metales	Proceso de evaporación de fases líquida o sólida que ocurre cuando los contaminantes líquidos ya sean en fases no acuosas o disueltas en agua contactan con una fase gaseosa.

Fuente: (Volke y Velasco 2002; Volke *et al.* 2005)

7.- Fitorremediación.

Es una tecnología innovadora basada en el uso conjunto de plantas, enmiendas del suelo y técnicas agronómicas para eliminar, retener, o disminuir la toxicidad de los contaminantes orgánicos e inorgánicos del medio, esta puede ser *in situ* o *ex situ* (Carpena y Bernal 2007; Manahan 2007).

La fitorremediación posee varios mecanismos los cuales se describen a continuación, estos se pueden aplicar tanto a contaminantes orgánicos como inorgánicos, presentes en sustratos sólidos, líquidos o en el aire. Se distinguen:

Fitoextracción o Fitoacumulación: uso de plantas acumuladoras de elementos tóxicos o compuestos orgánicos para retirarlos del suelo mediante su absorción y concentración en las partes cosechables. Los contaminantes o compuestos orgánicos se deben encontrar biodisponibles para que puedan ser translocados. Actualmente esta es una de las tecnologías más reconocidas debido a que los trabajadores tienen menos contacto con los contaminantes y además posee dos estrategias con la cual se puede mejorar una se logra adicionando quelantes ya que incrementan la solubilidad de los metales en el suelo y el otra se basa en procesos fisiológicos especializados que permiten la acumulación de metales durante todo el ciclo de crecimiento. Las plantas potenciales que se pueden emplear para este tipo de fitotecnología se encuentran en la familias de Asteraceae , Brassicaceae, Caryophyllaceae, Cyperaceae, Cunouniaceae, Fabaceae, Flacourtiaceae, Lamiaceae, Poaceae, Violaceae y Europhobiaceae (Volke *et al.* 2005; de la Barrera 2007).

Fitoinmovilización: uso de las raíces de las plantas para la fijación o inmovilización de los contaminantes en el suelo. Junto con la anterior son técnicas de contención.

Fitoestabilización: uso de plantas para reducir la movilidad y biodisponibilidad de los contaminantes en el entorno, mejorando las propiedades físicas y químicas del medio esto se logra a que existe una producción en las raíces de compuestos

químicos que pueden adsorber y/o formar complejos con los contaminantes, inmovilizándolos así en la interfase raíces-suelo. (Volke y Velasco 2002), con este método se han tratado lagunas de desecho de yacimientos mineros y se ha propuesto para fenólicos y compuestos clorados.

Fitovolatilización: uso de plantas para eliminar los contaminantes del medio mediante su volatilización, y para eliminar contaminantes del aire. Se ha empleado para el tratamiento de mercurio, selenio y solventes clorados (tetraclorometano y triclorometano).

Fitodegradación: uso de plantas y microorganismos asociados para degradar contaminantes orgánicos. Se ha utilizado para el tratamiento de municiones (TNT, DNT, RNX, nitrobenceno, nitrotolueno), atrazina, solventes clorados, DDT , pesticidas, fosfatos, fenoles y nitrilos, etc.

Rizofiltración: uso de raíces para absorber y adsorber contaminantes del agua y de otros efluentes acuosos. Se ha usado para tratar Cd, Co, Cr, Ni, Hg, Pb, Zn, Se, isótopos radiactivos, compuestos fenólicos.

Fitoestimulación: se usan los exudados radiculares para promover el desarrollo de microorganismos degradativos (bacterias y hongos). Se ha empleado para el tratamiento de hidrocarburos derivados del petróleo y policromáticos, benceno, tolueno, antrazina, etc.

A continuación se muestran las ventajas y desventajas que presenta la fitorremediación.

Tabla 18. Ventajas Y Desventajas De La Fitorremediación.

Ventajas	Desventajas
Concentración del contaminante: se generan menores volúmenes para disponer	Los contaminantes deben estar biodisponibles
Usualmente, el suelo queda fértil y puede crecer nueva vegetación	Puede depender de la estación del año
Es posible atrapar metales que se encuentren en formas químicas móviles	Tiempos largos de remediación (1-20 años)
Versátil para el tratamiento de una gama de compuestos peligrosos	Pueden requerirse varios ciclos de cultivo para obtener niveles adecuados de contaminantes
Baja generación de residuos secundarios, bajas emisiones al aire y agua.	Los contaminantes acumulados en hojas pueden liberarse al ambiente
Aplicable <i>in situ</i> : evita la excavación	La hiperacumulación de metales tóxicos puede resultar tóxica para las plantas
Menos destructiva para el ambiente	Se desconoce la biodisponibilidad y toxicidad de productos
Bajos costos	Riesgo de entrada de los contaminantes en la cadena trófica
Se requiere de un mínimo mantenimiento y el manejo de materiales es mínimo	Aplicable para sitios con concentraciones bajas a moderadas
	El tipo de planta determina la profundidad de la zona a tratar (unos cm hasta varios metros)

Fuente: (Volke *et al.* 2005)

Una de las principales actividades vinculadas al comercio exportador en Chile es la minería, correspondiendo alrededor del 40% de las exportaciones del país. La mayor parte de esta actividad se concentra en el norte del país, en los ambientes áridos y semiáridos de las regiones de Tarapacá, Antofagasta, Atacama y Coquimbo, aunque existe una actividad importante en las regiones de Valparaíso, O'Higgins y Magallanes.

La actividad minera genera como subproducto de sus procesos los relaves, que son desechos tóxicos que se depositan en tranques por lo que se suele mezclar con el suelo alterando al medio ambiente en sus diferentes manifestaciones.

Bajo ciertas circunstancias naturales o artificiales, estos tranques de relaves son colonizados de forma natural por diferentes especies vegetales, por lo que es necesario determinar las concentraciones de metales absorbidas por estas plantas ya que es el primer paso para la entrada de estos a la cadena alimenticia.

HIPOTESIS DE TRABAJO

La concentración de metales medidos en el sustrato control deberán ser mayores que en los sustratos relave. La concentración de metales en las plantas será proporcional a la encontrada en sus respectivos sustratos. En cuanto a las especies vegetales se espera que puedan fitoextraer los metales (Mo, Mn, Zn, Cu, Pb, Cd) y que tiendan a acumularlos en tallos y raíces.

52

OBJETIVOS

Objetivo General

Determinar la concentración de metales en especies de importancia, de colonización natural del tranque de relaves EL Chinche, de Minera Los Pelambre, localizado aledaño y aguas arriba del tranque en operaciones Los Quillayes, en la Cordillera de Los Andes, a 1.460 msnm; comuna de Salamanca, IV Región de Chile.

Objetivos Específicos

- Caracterizar la zona de estudio.
- Reconocer las especies vegetales de crecimiento natural en el Tranque de relaves El Chinche
- Determinación de metales (Cd, Pb, Mn, Zn, Cu, Mo) en de tres plantas de colonización natural en el tranque de relaves El Chinche.

1.- CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.

Se caracterizó la zona de estudio de modo general, en donde se indicó su ubicación, área, los principales cursos de agua y su vegetación asociada. Además se realizó una caracterización climatológica de la zona de Chacay y del sustrato relaves en donde se determinaron diferentes parámetros.

1.2.- Caracterización climatológica de la zona de Chacay.

Se realizó una caracterización climatológica de la zona de Chacay la cual consistió en una recopilación y análisis gráfico de las siguientes variables, considerando los datos de los 5 últimos años (período 2005- 2010):

- Pluviometría.
- Temperatura.
- Humedad relativa.
- Neviscas.

Estos antecedentes fueron obtenidos de la Gerencia gestión de riesgos, operación invierno de Minera Los Pelambres (MLP).

1.3.- Caracterización del sustrato.

La caracterización del sustrato se realiza en tres tipos de suelos diferentes, dos de ellos extraídos del relave; Sustrato de relave donde crecieron las plantas, Sustrato de relave sin vegetación (ver figura 6) y uno de ellos de los cerros aledaños al tranque de manera que no estuviese intervenido por los relaves; Sustrato a modo de Control (ver figura 7).



Figura 6. Sitio De Muestreo Tranque De Relave El Chinche.



Figura 7. Sitios De Muestreo Cerros Aledaños Al Tranque De Relaves El Chinche.

1.3.1.- Toma de muestra de suelo.

Las muestras de los distintos sustratos consisten en una mezcla de porciones de suelo (submuestras) tomadas al azar logrando finalmente una muestra compuesta. Para la investigación se tomó para cada muestra compuesta seis submuestras.

Para cada toma de muestra se tomaron las coordenadas geográficas con ayuda de un GPS etrex Legend HCX Garmin, las cuales se presentan en el Anexo 1.

Para la toma de muestra se recorrió y delimito el terreno haciendo un plano o croquis sencillo de las superficies más o menos homogéneas y transitables.

Una vez que se definió los límites de cada lote se procedió a tomar las submuestras. Para ello se recorrió el terreno, tomando submuestras en cada punto seleccionado. Antes de la toma de muestra, se limpió el área del punto de muestreo, luego excavo en cada uno de los puntos de muestreo un hoyo de aproximadamente 30 cm de profundidad (ver figura 8).

La toma de muestra se realizó de acuerdo con los siguientes parámetros (Lopez y Lopez 1990):

- Se recomienda siempre desechar los primeros 5 cm de suelo superficial.
- Para la mayoría de los cultivos basta con tomar muestras de los primero 20 a 40 cm.
- En el caso de que el cultivo se trate de césped y pradera la profundidad recomendada es de 5 a 10 cm
- Aquellos cultivos con raíces profundas y frutales se recomienda realizar un muestreo a una profundidad de 30 a 60 cm.

Luego que se introdujo la pala a la profundidad deseada y se transfiere aproximadamente 100-200 g suelo a un bolsa de plástico limpia.



Figura 8. Toma De Muestra De Suelo.

Por último se colocó una etiqueta con los siguientes datos para identificar la muestra: lugar de toma de muestra y puntos georeferenciados de cada submuestra tomada. Finalmente se llevan las muestras compuestas al laboratorio para su análisis.

A continuación en la figura 9 (a) se muestran las 6 submuestras de relave- planta, la figura 9 (b) las del control y la figura 9 (c) las de relave



Figura 9. Muestras De Sustratos.

Los muestreos se llevaron a cabo como se muestra en las figuras a continuación:

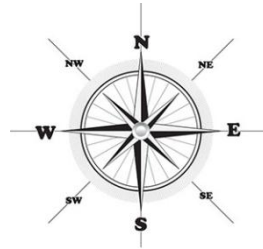
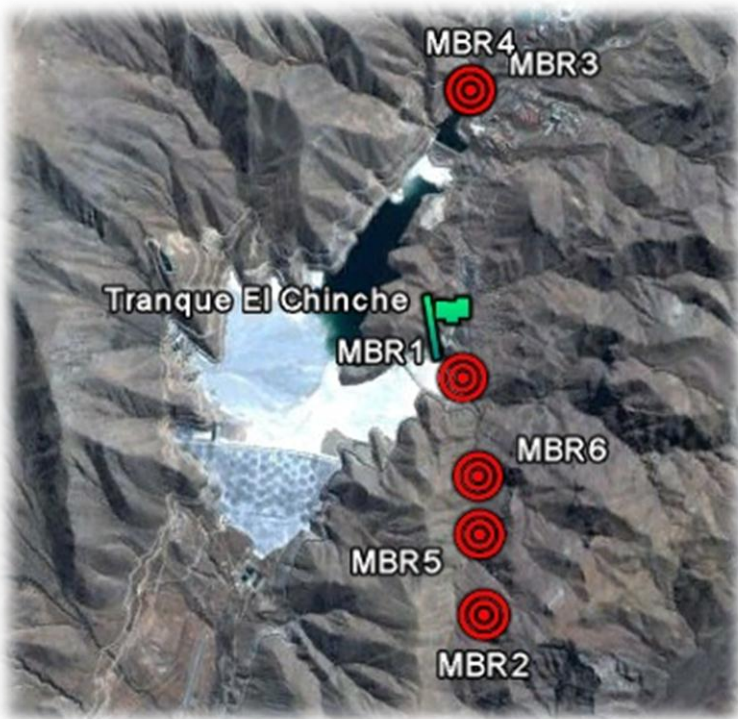


Figura 10. Muestreo De Sustrato Control.

Para el muestreo del Sustrato control se consideraron dos sectores de tal manera que la muestra compuesta no fuese afectada por los vientos que arrastran el material del relave. La dirección promedio de los vientos (año 2010) es Noreste por lo que se tendió a recolectar las muestras en otras direcciones.

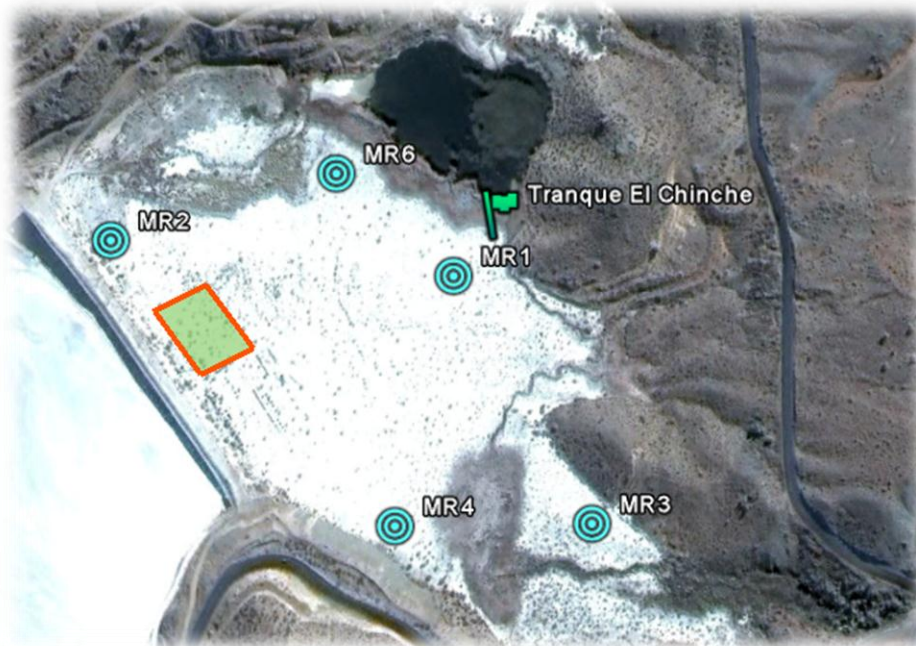


Figura 11. Muestreo De Sustrato Relaves.



Figura 12. Muestreo De Sustrato Relave - Planta.

El área verde en ambas figuras anteriores muestra el sector utilizado por la empresa ATM Ltda., para un estudio de reforestación, llevado a cabo durante el periodo 2001 al 2008, este sector no fue considerado en el actual estudio, dado a que no contempla plantas de colonización natural.

1.3.2.- Tratamiento de las muestras.

Las muestras de suelos, fueron secadas a 50°C durante una semana en una estufa desecadora Mermmert 854 Schawabach.

59

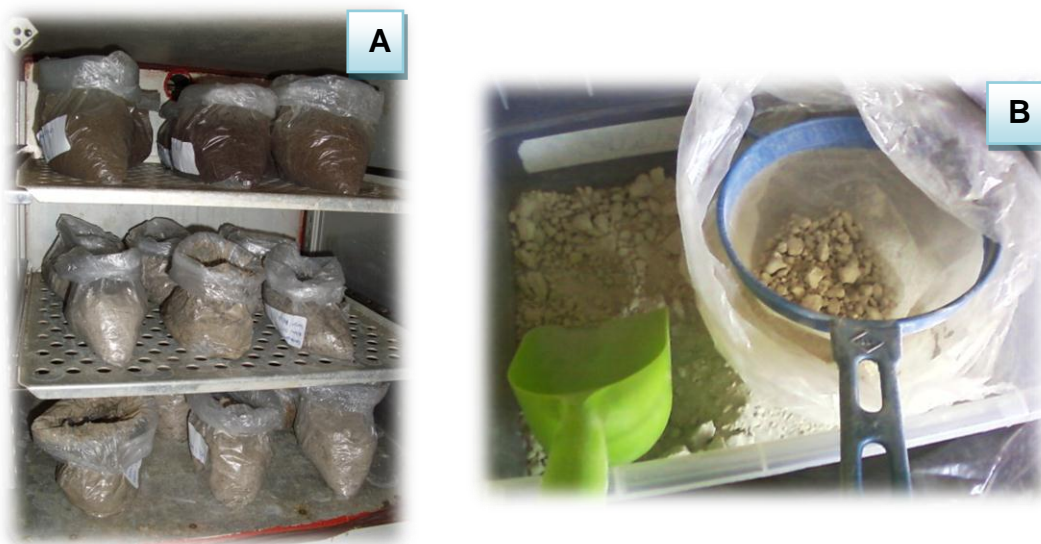


Figura 13. Tratamiento De Las Muestras De Suelo.

En la figura 13 (a) se muestra la estufa empleada para desecar los suelos que estaban húmedos, en primer lugar se encuentra la muestra control en segundo la muestra de relave y por último la muestra de relave sacada de donde crecieron las plantas. Luego son homogenizados y tamizados por una malla de 200mm (ver figura 13(b)), luego se guardan en recipientes o bolsas plásticas limpias.

1.3.3.- Parámetros a determinar para la caracterización del sustrato.

Para la caracterización de los 3 tipos de sustratos se determinaran los siguientes parámetros:

Tabla 10. Parámetro De Fertilidad Y Toxicidad Del Sustrato.

Parámetro	Método
P disponible	Extracción con solución de bicarbonato de sodio 0,5mol/L a pH 8,5 y determinación colorimétrica del azul de molibdeno.
Materia orgánica (M.O.)	Walkley-black y calcinación
Metales disponibles(Cd, Cu, Fe, Mn, Pb, Zn y Mo)	Extracción con DTPA
Metales totales (Cd, Cu, Fe, Mn, Pb, Zn y Mo)	Digestión y determinación por espectrofotometría de emisión atómica

Tabla 11. Parámetros De Salinidad Y Acidez.

Parámetro	Método
Conductividad eléctrica (CE)	Extracto de saturación y determinación por conductivimetría
Sales cambiables (Ca, K, Mg y Na,)	Extracción con solución de acetato de amonio 1 mol/L a pH 7,0 y determinación por espectrofotometría de emisión atómica
Cloruros	Extracto de saturación y determinación por titulación potenciométrica con nitrato de plata
Relación de adsorción de sodio, capacidad de intercambio catiónico y otras relaciones.	Extracto de saturación y determinación por espectrofotometría de emisión atómica
Ph	Suspensión y determinación potenciométrica

Los protocolos empleados para la determinación de los diferentes parámetros nombrados anteriormente tanto se exponen en el Anexo 2. Algunos de los parámetros previamente descritos se comparan con resultados obtenidos por el seguimiento realizado por la empresa ATM Ltda. (2001-2008).

2.- RECONOCIMIENTO DE LAS ESPECIES VEGETALES DE COLONIZACIÓN NATURAL EN EL TRANQUE DE RELAVES EL CHINCHE.

Con la finalidad de encontrar las especies de importancias del lugar se procedió a realizar transectas y cuadrantes.

Al igual como se realizó para la toma de muestras, se recorrió y delimito el terreno haciendo un plano o croquis sencillo de las superficies más o menos homogéneas y transitables, que fueran vegetacionalmente representativas.

61

Como la zona de estudio consiste en un relave en donde existen áreas en donde las especies se encuentran muy separadas unas de otras, se realizaron 15 cuadrantes de 10 x10 m de manera que fuera representativo, tomando en cuenta el tamaño y la densidad de las plantas que están siendo muestreadas.

A continuación en la figura 14 se muestra la distribución de los 15 cuadrantes en el tranque El Chinche, siendo el área verde el trabajo de reforestación realizado por ATM Ltda., área que no fue tomada en cuenta en el estudio dado a que no cuenta con vegetación de colonización natural.

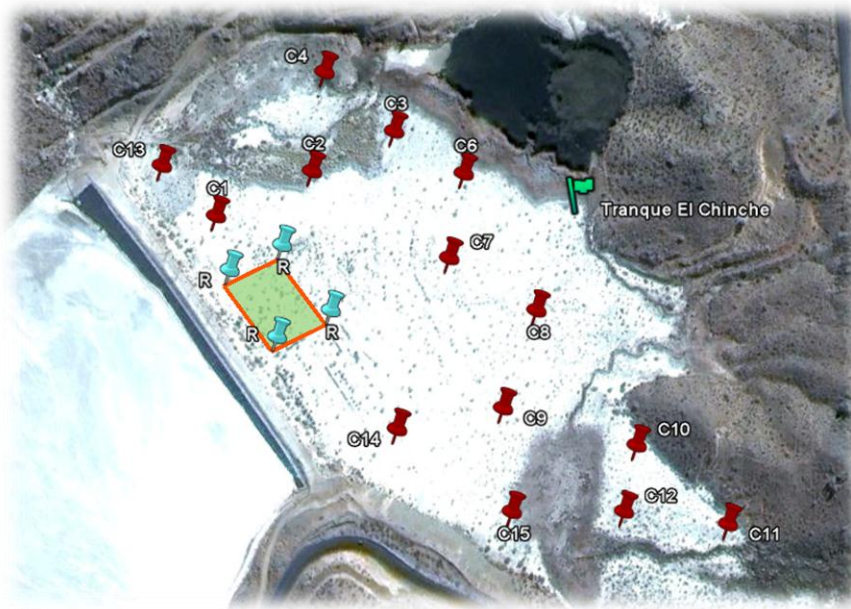


Figura 14. Distribución De Cuadrantes Tranque El Chinche.

La localización de los cuadrantes fue elegida aleatoriamente en puntos debidamente georeferenciados con un GPS etrex Legend HCX Garmin, cada cuadrante fue medido con la ayuda de una huincha métrica marcando los vértice una estaca.

En cada uno de los cuadrantes se procedió a determinar abundancia (número de individuos) y riqueza “s” (número de especies), además se midió el ancho y altura promedio de cada especie.

Con los resultados obtenidos de cada cuadrante se determinó la cobertura vegetal para lo que se utiliza la siguiente fórmula (Zunino *et al.* 2006):

$$C_i = \frac{a_i}{A}$$

Dónde:

- C_i : Cobertura de la especie i
- a_i : Superficie total de proyección de la parte aérea de la especie i.
- A: Es la superficie total muestreada.

Para medir la cobertura de cada individuo se proyectó la figura de la especie como un círculo, calculando el radio del ancho promedio previamente determinado en terreno y se procedió al cálculo con fórmulas normales de área, es decir:

$$\text{Área de un círculo} = 2\pi \cdot r^2$$

Una vez obtenidos los resultados se procedió a utilizar la escala de Braun-Blanquet con la cual se obtuvo la abundancia y la dominancia de las especies.

Tabla 12. Escala de Braun-Blanquet.

Clasificación	%
Muy rara	Menos del 1%
Rara	1 – 5%
Ocasional	6 – 25%
Frecuente	26 – 50%
Común	51 – 75%
Abundante	76 – 100%

Fuente:(Zunino *et al.* 2006)

Las transectas fueron realizadas al igual que los cuadrantes, tomando en consideración las áreas transitables y representativas.

Se realizaron 6 transectas utilizando un cordel de 100 m marcado cada 10 m con una cinta de color, cada transecta fue georeferenciada con un GPS etrex Legend HCX Garmin. En la figura 15 cada transecta está representada por una línea de color rojo.

Cada 10 m con la ayuda de una huincha métrica se procede a medir 2 m a cada lado del cordel y se ve la presencia y ausencia de una especie determinada.

Los resultados de cada una de las transectas se utilizaron para el cálculo de la frecuencia relativa (f_i).

La frecuencia relativa se calculó de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$Fi = \frac{Ji}{K} \cdot 100$$

Dónde:

- Fi: Es la frecuencia relativa de la especie i.
- Ji: Es el número de parcelas donde aparece la especie.
- K: Es el número total de parcelas.

64



Figura15. Distribución De Transectas Tranque De Relaves El Chinche.

Finalmente se recorrió el terreno para fotografiar, reconocer y realizar un catastro de todas las especies que colonizaron naturalmente el lugar. El datum para todas las mediciones realizadas con el GPS es de WGS 84.

2.1.-Descripción de las plantas de importancia del tranque de relave El Chinche.

Se escogieron tres especies del tranque de relaves El Chinche de acuerdo a los resultados previamente recopilados, con la finalidad de contar con especies que crezcan en diferentes sectores del relave y además sean dominantes (de esta manera se obtiene una buena cantidad de biomasa para el análisis).

De las especies escogidas para la determinación de metales, se realizó una breve descripción, señalando: nombre científico, nombre común, orden, familia, origen, forma de vida, estado de conservación uso, dimensiones, descripción, requerimientos para su crecimiento, velocidad de crecimiento, y regiones de Chile en las que habita.

Para la descripción de especies es necesario saber las siguientes asignaciones:

Estado de conservación (EC)	Forma de vida (FV)	Origen (O)
EP: En Peligro	T: Árbol	N: Nativo
V: Vulnerable	F/T: Arbusto/ sufrútice	E: Endémico
IC: Insuficientemente Conocida	K: Cactácea	I: Introducida
R: Rara	H: Hierba Perenne	
FP: Fuera de Peligro	A/B: Hierba Anual/ Bi anual	
NE: No Evaluada		

Figura 16. Asignaciones para la descripción de las especies.

3.- DETERMINACIÓN DE METALES EN ESPECIES DE COLONIZACIÓN NATURAL.

En primer lugar se realizó el muestreo de las tres especies vegetales en una zona control provenientes de cerros aledaños al tranque, donde no estuviese intervenido por la acción del viento sobre el relave y en segundo lugar, se extrajeron las mismas especie del tranque de relaves. El muestreo se llevó a cabo aleatoriamente como se muestra en las siguientes figuras:

66



Figura 17. Muestreo De Plantas En El Relave El Chinche.

MC: Muestra de *Cortaderia rudiusscula* Stapf. Destacados en blanco.

MB: Muestra de *Baccharis Pringaea*. Destacados en amarillo.

MR: Muestra de *Baccharis Lineraris* .Destacados en azul.



Figura 18. Muestreo De Plantas Control.

BC: Muestra de *Cortaderia rudijscula* Stapf. Destacados en azul.

BB: Muestra de *Baccharis Pringaea*. Destacados en morado.

BR: Muestra de *Baccharis Lineraris*. Destacados en verde.

Para la toma de muestra de las tres especies, se arrancaron de raíz cinco individuos de cada una, estas son escogías en diferentes sectores dentro de la cubeta (figuras 17y 18), con el fin de obtener una muestra compuesta. Esto fue llevado a cabo con ayuda de una pala, fueron depositadas en bolsas plásticas macadas o etiquetadas (ver figura 19) con el nombre de la especie, lugar, fecha ancho, largo y el punto georeferenciado, el cual esta adjunto en el Anexo 1.



Figura 19. Totalidad De Las Muestras De Plantas.

3.1.-Tratamiento de muestras vegetales.

Se juntaron todos los individuos de la misma especie de planta para separarlos en hojas, tallos y raíces con ayuda de las tijeras de jardinería. Las hojas, tallos y raíces de cada una de las tres especies se analizaron por separado, cada parte de la planta se homogenizó para lograr finalmente una muestra compuesta. Las diferentes partes de las plantas de cada una de las especies fueron desecadas en una estufa Mermert 854 Schawabach a 60°C por un periodo de 36 a 24 horas. Pasadas las horas, las hojas se trituraron en una Moulinex y el resto se trituro en un molino Condux Werk LHM 20/ 16.

Luego se tamizo para separar lo fino de lo grueso y se dispuso en frascos etiquetados. La secuencia del procedimiento del tratamiento de las muestras se observa en la figura 20.



Figura 20. Tratamiento De Las Muestra Vegetales.

3.2.- Parámetros a determinar en las muestras vegetales.

En las raíces, tallos y hojas de las tres especies será medido el parámetro de toxicidad

Tabla 13. Parámetro De Toxicidad (Fracción Total Y Disponible) En Plantas.

Parámetro	Método
Metales (Cu, Zn, Pb, Cd, Mn y Mo)	Digestión y determinación por espectrofotometría de emisión atómica

El protocolo empleado para la determinación de los metales se expone en el Anexo 2.

Se validó la metodología de digestión según lo recomendado por IUPAC, AOAC y Standard Methods For Waste Water.

Todo el material de vidrio y plástico utilizado durante la parte experimental fue lavado con detergente, enjuagado con abundante agua desionizada, posteriormente sumergido al 10% v/v de ácido nítrico durante 24 horas, luego

fueron enjuagados nuevamente con abundante agua desionizada y secados en estufa Mermert 854 Schawabach a 60 °C. Por último fueron almacenados en bolsas de polietileno para evitar posible contaminación.

Para la cuantificación de los metales (Zn, Mn, Cu, Cd, Pb y Mo) en las muestras de plantas y suelo, se evaluaron los parámetros de calidad más importantes tales límites de detección, cuantificación, precisión, sensibilidad y linealidad mediante el uso de curvas de calibrado y medidas de la desviación de la señal del blanco de calibrado y de digestión de acuerdo los criterios establecidos por IUPAC.

Se aseguró la calidad de la exactitud en la cuantificación total de los metales antes mencionados, mediante ICP- OES y el análisis de material y referencia certificado de matriz similar a las muestras analizadas, de manera que tuviesen certificada la concentración total de estos elementos, digeridas de acuerdo al protocolo seleccionado. De presentarse problemas de sesgo en los resultados, se modificó las metodologías, empleando estándares internos y/o curvas de adición estándar para minimizar y compensar las interferencias espectrales y químicas.

4.- VALIDACIÓN DEL MÉTODO

La precisión fue evaluada mediante estudios de reproductibilidad, tanto en muestras sintéticas como en la propia matriz, a diferentes niveles de concentración, aplicando las metodologías desarrolladas por distintos analistas y se cuantificó este parámetro mediante el cálculo de la desviación estándar relativa (RSD). En el caso que las precisiones alcanzadas no sean suficientes para los objetivos de este proyecto, se empleó estándares internos, idealmente isotopos de los elementos de interés de manera que compensen cualquier variación o pérdida al aplicar las metodologías desarrolladas.

$$RDS = \frac{S_r}{\bar{x}} \cdot 100$$

Dónde:

RDS: desviación estándar relativa.

Sr: desviación estándar.

\bar{x} : promedio de la señal analítica.

71

Se determinó la linealidad de las curvas de calibración mediante determinación experimental del límite de cuantificación y detección instrumental de acuerdo a los criterios establecidos por IUPAC, expresado como 3 veces o 10 veces la desviación estándar del blanco, respectivamente, debido por la pendiente de la curva de calibración. El rango linealidad se estableció desde el límite de cuantificación hasta la curva presente una correlación superior a 0,999 y con un error residual inferior al 3%.

$$t_{cal} = \frac{|r| \cdot \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}$$

Dónde:

t_{cal} : coeficiente de correlación lineal

n: número de puntos de la curva de calibrado.

r: el coeficiente de correlación.

r^2 : coeficiente de determinación.

Si el valor de t_{cal} es mayor que $t_{tab(n-2)}$ (al 95% de probabilidad) se puede concluir que existe una correlación lineal significativa entre ambas variables.

Se evaluara la influencia de la composición de la muestra en la respuesta instrumental, mediante comparación de la sensibilidad entre curvas de calibración

normal y curvas de adición estándar, utilizando para ello el test F de varianzas t el test t de comparación de conjuntos de datos al 95% de probabilidad.

En el caso que las muestras posean una matriz demasiado compleja para la cuantificación de los elementos de interés, se aplicaran métodos de separaciones de los analitos tales como la generación de hidruros, técnicas de filtración, extracción liquido-liquido, etc.

Se evaluara también la exactitud a través de sesgo de determinación de las concentraciones de metales como criterio de aceptación de error t_{cal} , está definido como:

$$t_{cal} = \frac{|\bar{x} - \mu| \sqrt{n}}{S}$$

Dónde:

\bar{x} : promedio de la concentración por ICP-OES

μ : valor certificado.

n: número de replicas

S: desviación estándar de las réplicas.

Si el valor de t_{cal} es menor que $t_{tab(n-1)}$ (al 95% de probabilidad) se puede concluir que el método es exacto.

Los límites de detección (L.D) y cuantificación (L.C), serán determinados utilizando las siguientes ecuaciones:

$$L.D. = \frac{3 S_{y/x}}{m}$$

$$L.C. = \frac{10 S_{y/x}}{m}$$

Dónde:

$S_{y/x}$: es la desviación estándar residual que será determinada por el programa Origin 8

m: pendiente.

5.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se realizaron estudios estadísticos donde se calculó diferencias entre parámetros univariados y multivariados, mediante análisis de varianza de una y dos vías (ANOVA) por medio del programa Origin8. Análisis de Componentes principales (PCA) con el programa StatGraphic Plus.

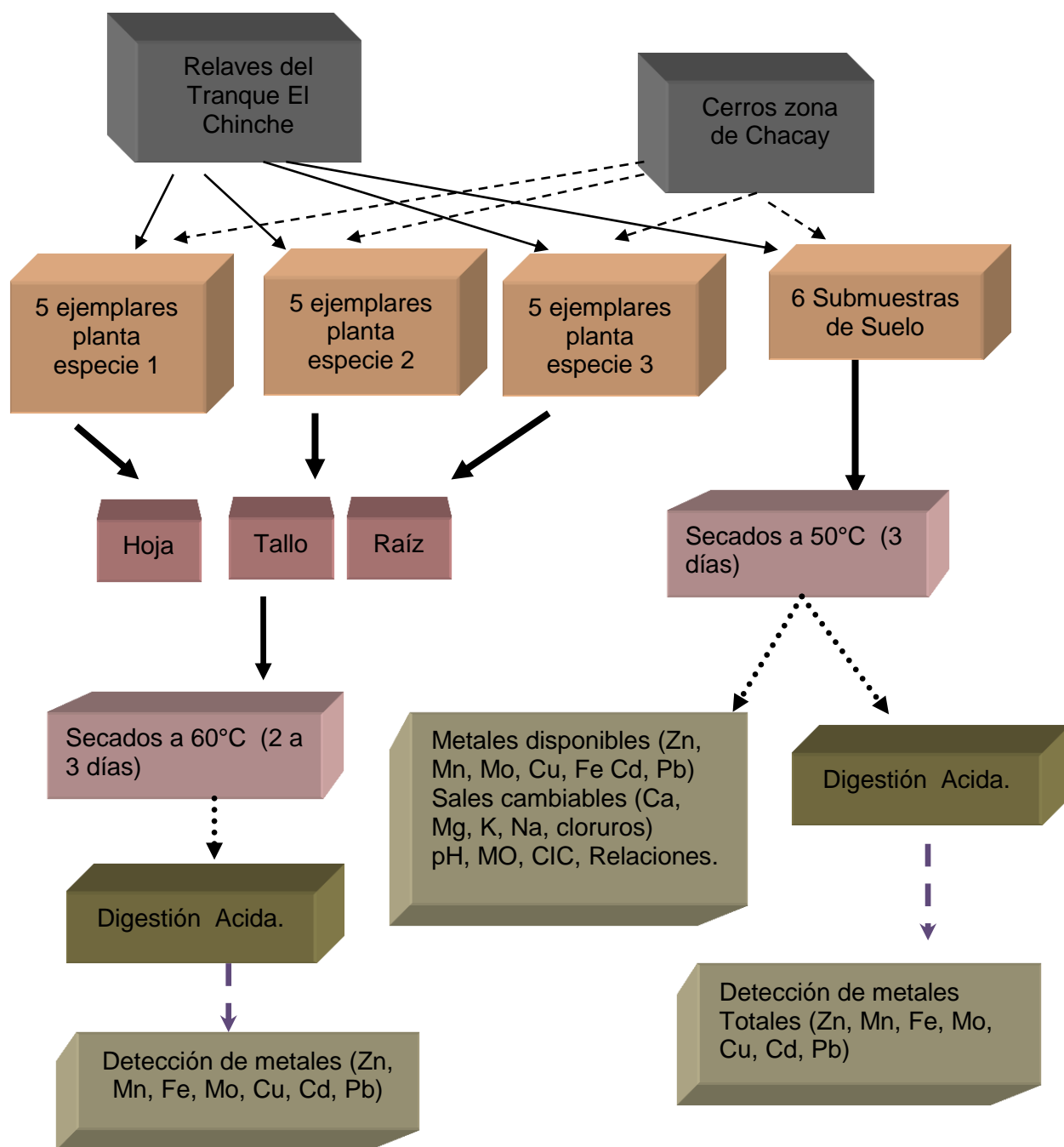


Figura 21. Mapa Conceptual: Resumen De Metodología De Las Muestras.

1.- CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El tranque de relaves El Chinche se encuentra localizado aledaño y aguas arriba del tranque Los Quillayes, en la Cordillera de Los Andes, a 1.460 msnm, en la comuna de Salamanca, IV Región de Chile, posee una superficie cercana a las 30 hectáreas, corresponde a la primera etapa productiva de Minera Los Pelambres. Este tranque dejó de operar el mes de abril de 1998, el lugar en que se ubica también se conoce como Zona de Chacay.

El tranque El Chinche presenta varias características específicas, difíciles de encontrar en otras zonas. Una de estas características es un aporte importante de agua asociado a tres quebradas entre ellas la leona y a sus respectivas cuencas asociadas. (Ver figura 24 Anexo 3)

Además cuenta con un suministro de agua diario en donde diferentes sectores del relave son regados con el fin de minimizar el polvo suspendido.



Figura 22. Suministro De Agua Del Tranque De Relaves El Chinche.

Con respecto a la vegetación asociada a la zona del tranque de relaves el Chinche, se encuentran cinco pisos vegetacionales; Herbazal mediterráneo de *Nastanthus spathulatus* y *Menonvillea spathulata*; Matorral arborescente esclerófilo mediterráneo interior Quillaja saponaria y porlieria chilensis; Matorral arborescente esclerófilo mediterráneo interior Quillaja saponaria y porlieria chilensis; Matorral bajo mediterráneo andino de *Chuquiraga oppositifolia* y *Nardophyllum lanatum*; Matorral bajo mediterráneo andino de *laretia acaulis* y *Berberis empetrifolia*; Matorral desértico mediterráneo costero de *Bahía ambrosoides* y *Puya chilensis* (Ver figura 6, tabla 5, Anexo 3)

Las comunidades vegetacionales que dominan el lugar son 2 principalmente; matorral espinoso de las serranías y el matorral esclerófilo andino, ambos pertenecientes a la región del matorral y del bosque esclerófilo. (Ver figura 6 y tabla 6, Anexo 3.)

1.1.- Características de calidad química del agua de riego.

El relaves se debe regar para disminuir la cantidad de polvo suspendido diaria, esta zona de regadío no cubre todo el relaves, sólo algunas partes, pero la vegetación existente se da en toda el área del relaves. A continuación se muestran los diferentes parámetros de calidad química para el agua de riego medidas en el año 2010.

Tabla 14. Parámetros De Calidad Del Agua De Riego.

Parámetros	Unidad Medida	Promedio anual 2010	Máximo Permitido NCH 1333
Aforo	m ³ /s		
Aluminio Total	mg/L	<0.5	5
Amoniaco	mg/L		
Arsénico Total	mg/L	0,005	
Bario Total	mg/L	<0.1	
Berilio Total	mg/L	<0.01	
Bicarbonato	mg/L		
Boro Total	mg/L	<0.5	0,75
Cadmio Total	mg/L	<0.01	0,01
Calcio total	mg/L		
Carbonato	mg/L		
Cianuro Total	mg/L	<0.05	0,2
Cinc Total	mg/L	0,07	3
Cloruros	mg/l	13	
Cobalto Total	mg/L	<0.05	
Cobre Total	mg/L	0,48	0,2
Coliformes Fecales	NMP/100ML	<1.8	1000
Conductividad Específica	umho/cm	459,25	
Cromo Total	mg/L	<0.05	
Estroncio Total			
Fluoruros	mg/L	<0.5	1,5
Hierro Total	mg/L	0,24	5
Litio Total	mg/L	0,05	
Magnesio Total	mg/L	2,68	
Manganeso Total	mg/L	0,11	0,2

Parámetros	Unidad Medida	Promedio anual 2010	Máximo Permitido NCH 1333
Mercurio Total	mg/L	<0.001	0,001
Molibdeno Total	mg/L	0,006	0,01
Níquel Total	mg/L	<0.05	0,2
pH	u pH	7,43	5.5 – 9
Plata Total	mg/L	<0.01	
Plomo Total	mg/L	<0.05	0,05
Potasio Total	mg/L	2,34	
Salinidad	%	0,05	
Selenio Total	mg/L	<0.001	0,02
Sílice	mg/L		
Sodio Porcentual	%	12,5	35
Sodio Total	mg/L	11,5	
Sólidos Disueltos	mg/L	313,25	500
Sólidos Suspendidos	mg/L	<5	80
Sulfatos Totales	mg/L	190,25	250
Temperatura	(°C)		35
Vanadio Total	mg/L	<0.1	

Fuente: Superintendencia de recursos hídricos.

Tabla 15. Promedio De Los Parámetros De Calidad De Agua De Riego.

Año	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Promedio Conductividad Específica (umho/cm)	634,6111	525,7917	645,7037	479,2692	464	459,25
Mín	367	324	395	324	400	405
Máx	821	716	883	581	502	499
Promedio Concentración Cobre (mg/L)	3,44	0,80	0,715357	0,551538	1,003333	0,481667
Mín	0,49	0,32	0,38	0,2	0,52	0,22
Máx	9,11	2,2	1,89	1,04	6,33	2,18
Promedio Concentración Sulfato (mg/L)	308,8889	223,5679	288,75	204	190,5	190,25
Mín	140	88,9	155	136	166	167
Máx	460	322	542	250	216	215

Fuente: Superintendencia de recursos hídricos.

En la tabla 14 se entregan los resultados analíticos para el agua de riego del relaves El Chinche, comparándose estos antecedentes con valores referenciales utilizados en nuestro país para aguas destinadas a riego agroproductivo (NCh 1333.Of78 Requisitos de calidad de agua para riego). Se puede decir que todos los parámetros están dentro de la normativa vigente.

El pH de esta fuente es ligeramente alcalino, lo que ayuda de alguna manera a que exista una menor biodisponibilidad de los metales potencialmente tóxicos que se pueden hallar en el relave, disminuyendo también a su movilidad en forma de especies iónicas libres o como órgano- metales solubles, permitiendo a pH alcalinos que se encuentren formando carbonatos o fosfatos minerales insolubles.

Conductividad Específica (umho/cm) 2005-2010

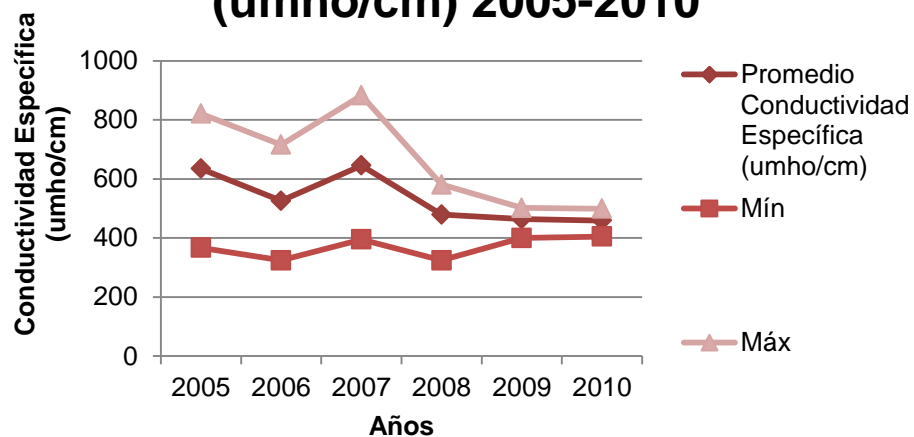


Figura 23. Conductividad Específica (Umho/Cm) Periodo 2005-2010.

Concentración de Cobre (mg/L) 2005-2010

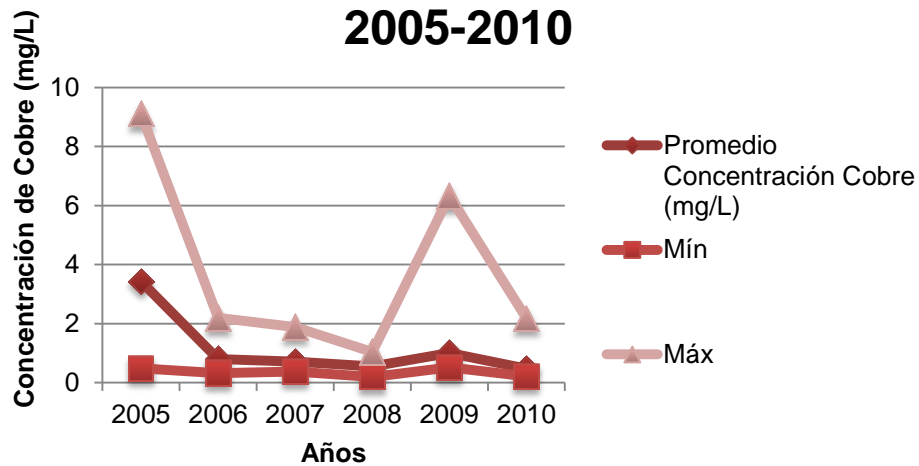


Figura 24. Concentración De Cobre (mg/L) Periodo 2005-2010.

Concentración de sulfato (mg/L) 2005-2010

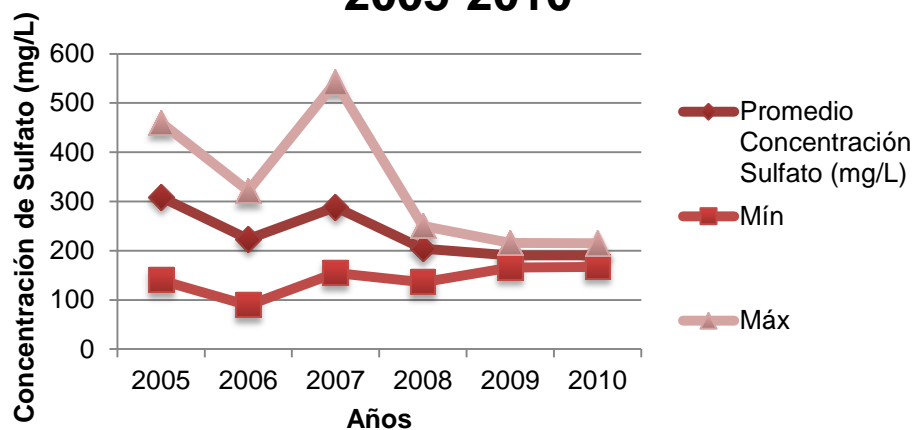


Figura 25. Concentración de Sulfato (mg/L) Periodo 2005-2010.

En los gráficos se muestra que tanto la conductividad como las concentraciones de cobre y sulfatos en promedio han disminuido al año 2010 manteniéndose más o menos estables durante los tres últimos años, las máximas de cobre se obtuvieron durante al año 2005 y 2009 sobrepasando los 6 mg/L mientras que las concentraciones de sulfato el 2007 las máximas estuvieron por sobre los 500 mg/L y los valores para la conductividad específica durante el 2007 también estuvieron altas con una máxima por sobre los 800 $\mu\text{mho}/\text{cm}$.

1.2.- Caracterización del sustrato.

Fertilidad y toxicidad en los sustratos

FOSFORO DISPONIBLE

Tabla16. Concentración De P Disponible En Los Sustratos.

Sustratos	Concentración de P disponible (µg/g)
Sustrato control	121±8
Sustrato relave planta	101±15
Sustrato relave	106±2

82

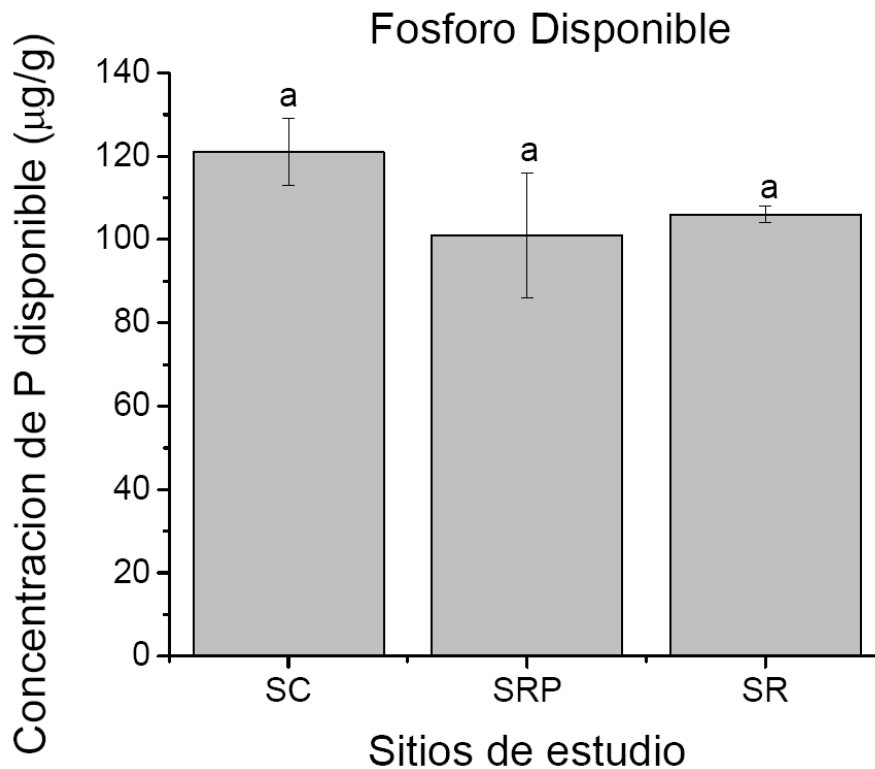


Figura 26. Concentración De Fosforo Disponible En Los Sustratos, En Función De Los Sitios De Estudio, Donde Las Letras Distintas Indican Diferencias Significativas (Tukey, $p < 0.05$). Las Barras De Error Corresponden A Un Intervalo De Confianza Al 95%. (n=3)

Como se puede apreciar en la figura 26 no existen diferencias significativas en los tres sustrato con respecto a la concentración de fosforo disponible, (ANOVA una vía, $p_{\text{p disponible}} = 0.468$), lo que querría decir que el fosforo no es una limitante dentro del contenido de materia orgánica para el crecimiento de las plantas.

De acuerdo con la tabla 17 existen valores muy altos de fosforo disponible en los tres sustratos.

Tabla 17. Rango De Valores Para El Fosforo.

Rangos	Disponibilidad de P ($\mu\text{g/g}$)
Bajo	<20
Medio	20 a 35
Alto	>35

Fuente:(Novoa y Contreras 2010)

MATERIA ORGÁNICA (M.O.)

Se determinó el porcentaje de la materia orgánica por medio de dos métodos: el de calcinación y por medio del método de Walkley-black. El primer método está basado en la combustión seca del carbono en el cual se determina la cantidad de CO_2 desprendido (Fassbender 1969), en cambio el segundo método es más utilizado debido a que se valora la materia orgánica más activa la cual tiene un mayor significado agrícola (Lopez y Lopez 1990). A continuación se presentan los resultados.

Tabla 18. % M.O. Mediante el Método De Walkley-Black.

Sustrato	% M.O.
Control	$4,75 \pm 0,02$
Relave- Planta	$2,4 \pm 0,6$
Relave	$1,6 \pm 0,1$

Tabla 19. % M.O. Mediante el Método De Calcinación.

Sustrato	% M.O.
Control	5,66 ± 0,03
Relave- Planta	0,69 ± 0,07
Relave	0,56 ± 0,03

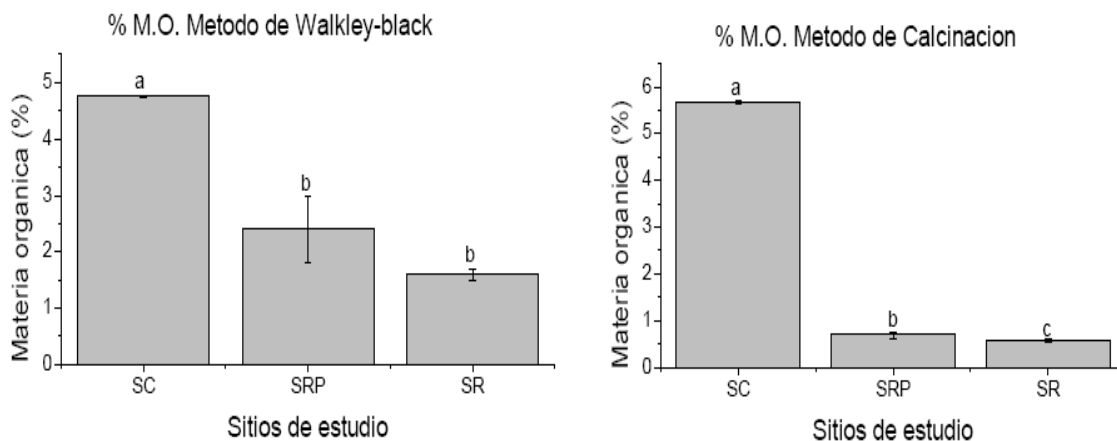


Figura 27. % de M.O., en Función De Los Sitios De Estudio, Donde Las Letras Distintas Indican Diferencias Significativas (Tukey, $P < 0.05$). Las Barras De Error Corresponden A Un Intervalo De Confianza Al 95%.(n=3)

El contenido de M.O., para la zona central de Chile fluctúa en promedio entre un 2- 6% (Brandy y Buckman 1977), si se observan los resultados por el método de Walkley-Black, el relave se encuentra por debajo el promedio de la zona, en cambio por el otro método, tanto el relave- planta como el relave están bajo el 2%. Si se observan los gráficos de la figura 24, existen diferencias significativas por el método de Walkley-black, entre el sustrato control y el sustrato relave (Tukey, $p < 0.006$), en cambio por el método de calcinación existen diferencias significativas entre los tres sustratos (Tukey, $p < 0,05$).

Estudios anteriores realizados con el sustrato relave (ver tabla 20) revelan que naturalmente existe una tendencia al aumento del % de M.O., sin embargo, los cambios entre años son poco significativos si se comparan con suelos agrícolas, debido a que el desarrollo microbiano y radical en el sustrato relave es más lento. (Novoa y Contreras 2010)

Tabla 20. Valores De Referencia Del % De M.O. Periodo 2001-2008

Año	% M.O.
2001	0,06
2002	0,04
2005	1,00
2006	0,75
2008	0,19

Fuente: (Novoa y Contreras 2010)

El hecho de que los valores de la M.O., sean tan bajos para los sustratos relaves, afecta en gran medida a la calidad del suelo. Existen varias propiedades importantes en las que incide la cantidad de materia orgánica en un suelo, tales como ser insoluble en agua, pero posee una alta capacidad de absorción y retención de la misma, evita el lavado de los suelos y la pérdida de nutrientes, además mejora la aireación y con ello la infiltración de agua, todas estas propiedades y otras que posee la M.O., puede hacer la diferencia entre un suelo en que se desarrolla con mayor facilidad la vegetación del que no.

Sea cualquiera de los métodos empleados para la determinación de la materia orgánica el sustrato control, es decir, el exento de residuos mineros, posee un mayor contenido en M.O. que los dos sustratos restantes, este resultado se puede explicar visualmente al comparar los colores de los suelos, dado a que un suelo con mayor M.O., suele ser más oscuro que un suelo que carece de ella y en este caso el sustrato relaves es mucho más claro que el sustrato control, lo que se puede ver claramente en la figura 9 del Anexo 2 (Fassbender 1975).

El sustrato relave-planta, posee un mayor contenido de M.O. por el método de calcinación que el sustrato relave, debido a que se extrajo directamente del lugar en donde se desarrolló la planta, esto se podría relacionar con que las raíces liberan CO₂ al suelo a través de las raíces.(Pérez *et al.* 1998)

Por último cabe mencionar que la M.O., reacciona con los metales y otros compuestos formando complejos y quelatos, una vez formados, pueden migrar con mayor facilidad a lo largo del perfil. La complejación de la M.O. del suelo es uno de los procesos que gobiernan la solubilidad y disponibilidad de los metales pesados, la toxicidad de los metales pesados, se potencia en gran medida por su fuerte tendencia a formar complejos organometálicos, lo que facilita su disponibilidad, solubilidad y dispersión (Fassbender 1969; Kabata y Pendias 2000), por lo que se puede decir que el suelo relave- planta posee una mayor cantidad de complejos organometálicos que el relave, siendo más tóxico dado a que existe una mayor disponibilidad de los metales, agua y nutrientes, lo que de alguna manera acrecienta la biomagnificación a lo largo de las redes tróficas, sin embargo este hecho se atenúa dado a que en general las plantas no absorben complejos organometálicos grandes por lo que su biodisponibilidad disminuye.(Alloway 1995)

Metales Disponibles

Por el método de extracción con DTPA se procedió a medir, Cd, Cu, Zn, Fe, Mn y Pb de los cuales solo el Fe es un macronutriente y el Mn, Cu y Zn son micronutrientes, siendo los restantes no esenciales para las plantas.

A continuación se muestran los resultados de los metales disponibles encontrados en los tres sustratos:

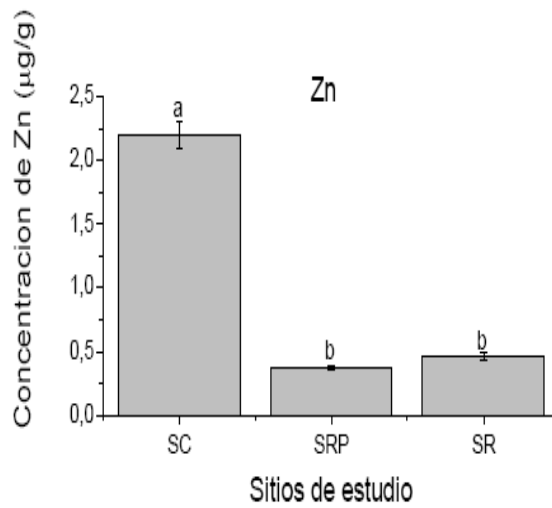
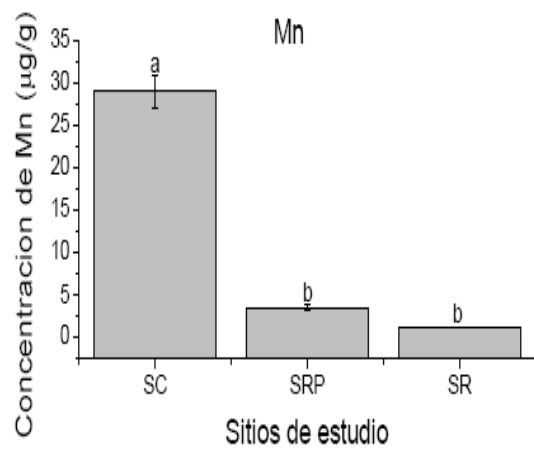
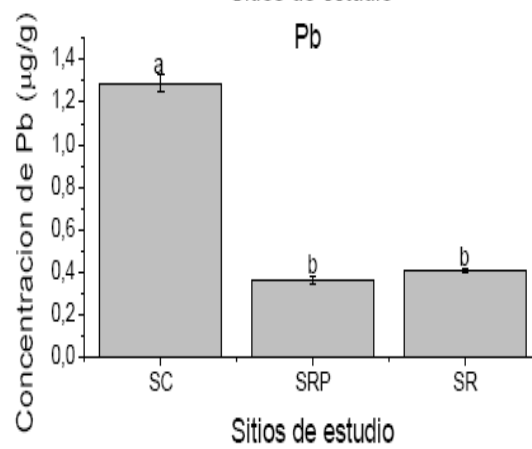
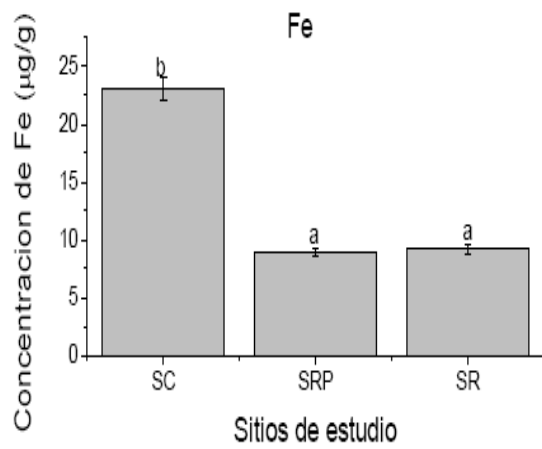
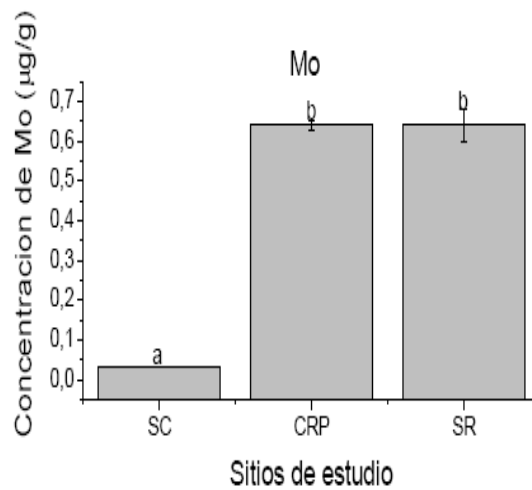
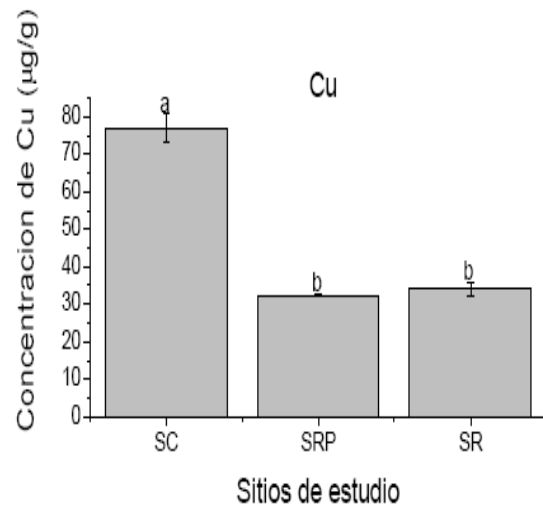
Tabla 21. Metales Disponibles En Los Sustratos.

Metal disponible	Concentración (µg/g)		
	Control	Relave-Planta	Relave
Cd	0,067±0,002	0,0067±0,0003	0,0078±0,0002
Cu	77±4	32,3±0,3	34±2
Fe	23±1	8,9±0,3	9,2±0,4
Mn	29±2	3,6±0,3	1,26±0,08
Pb	1,29±0,04	0,36±00,2	0,41±0,01
Zn	2,2±0,1	0,37±00,2	0,47±0,03
Mo	0,033±0,001	0,64±0,01	0,64±0,04

De acuerdo a estudios realizados por el SAG, una concentración de Cd < 1 (µg/g) está dentro de los rangos más frecuentes para diferentes partes del mundo, encontrándose todos los valores de Cd entregados en la tabla 21 dentro del rango, por lo que no se esperarían efectos tóxicos por parte del Cd, inclusive para la IV Región el contenido de Cd en suelos cultivados es < 2,5 µg/g, encontrándose por encima de los valores para cada sustrato. (Acevedo *et al.* 2005)

Para el Pb, Mn y el Cu disponible según las directivas de Kelley para la clasificación de suelos contaminados (ver tabla 3, Anexo 3) se encuentran dentro del intervalo de suelos no contaminados.

Es razonable que el Cu se encuentre en mayor cantidad en el sustrato control ya que el Cu tiene su máxima disponibilidad a pH entre 4,5 a 7.



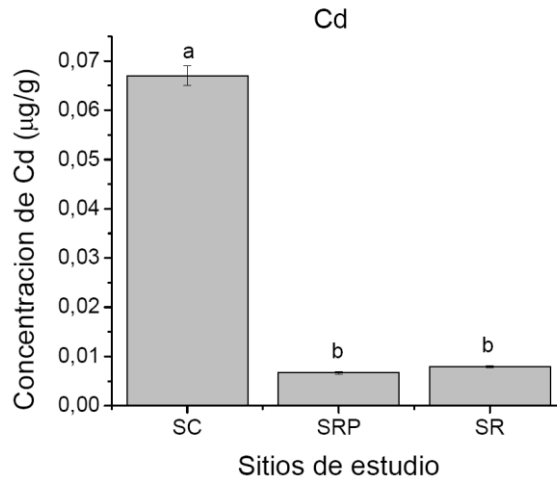


Figura 28. Concentraciones De Fe, Mn, Zn, Cd, Pb, Mo y Cu Disponibles, En Función De Los Sitios De Estudio, Donde Las Letras Distintas Indican Diferencias Significativas (Tukey, $p < 0.05$). Las Barras De Error Corresponden A Un Intervalo De Confianza Al 95%. (n=4)

De acuerdo a la figura 28 existe una mayor concentración de todos los metales disponibles en el sustrato control a excepción del Mo que se encuentra en mayores concentraciones en los sustratos relaves. Al realizar ANOVA una vía se encontró que existen diferencias significativas entre las concentraciones de todos los metales disponibles en el sustrato control y los sustratos relaves, (ANOVA una vía, $p < 0.001$).

Entre los sustratos relaves no existen diferencias significativas (Tukey $p_{Cd, Mo, Zn, Fe, Pb, Cu} > 0.1$, $p_{Mn} > 0.05$), sin embargo en el sustrato relave posee mayores concentraciones de Cd, Cu, Fe, Pb y Zn que el sustrato relave planta, siendo el Mo igual para ambos sitios y el Mn menor en el sustrato relave que el relave planta, lo que se atribuye a la presencia de materia orgánica que en este caso es proporcional a la disponibilidad de Mn (mayor cantidad de M.O., mayor es la concentración de Mn)

Tabla 22. Metales Disponibles En El Sustrato Relaves. Periodo 2005-2010.

Año	Fe	Zn	Mn	Cu
2005	20,4	0,75	0,90	43,9
2006	14,7	1,20	1,05	37,7
2008	17,1	1,00	1,40	39,0

Fuente:(Novoa y Contreras 2010)

Al comparar algunos de los valores obtenidos para los distintos metales disponibles en el sustrato relaves en estos 5 últimos años se puede ver que el Fe y el Zn tienden a disminuir al paso del tiempo. El Mn tiende a aumentar, pero con respecto al valor del 2008 disminuyó y el Cu disminuyó su concentración con respecto al año 2008, pero en general tiende al aumento.

Metales Totales

A continuación se muestran los resultados de los metales totales encontrados en los tres sustratos:

Tabla 23. Metales Totales En Los Sustratos.

Metal total	Concentración (µg/g)		
	Control	Relave- Planta	Relave
Cd	< L.D.	< L.D.	< L.D.
Cu	561±23	255±15	356±30
Fe	25837±1052	4884±135	6313±336
Mn	673±19	77±2	84±4
Pb	7,9±0,5	8±2	24±1
Zn	74±3	14,4±0,7	14,2±0,7
Mo	< L.D.	16,48±0,03	25±1

La IV Región y Chile en general, se caracterizan por poseer naturalmente altas concentraciones de Cu, los suelos que poseen naturalmente contenidos altos de metales se asocian con zonas de mineralización metálica y yacimientos. En estos sitios se encuentra que el componente biótico está adaptado a dichas condiciones geoquímicas, con una alta tolerancia al estrés metálico. (Alloway 1995; Kabata y Pendias 2000; Acevedo *et al.* 2005)

Como se puede apreciar en la tabla los metales totales en los sustratos no reflejan necesariamente los niveles de metales biodisponibles (Acevedo *et al.* 2005), por ejemplo el Cd disponible en los tres sustrato presenta niveles sobre el límite de detección, en cambio Cd total en los tres sustratos se encontró bajo los límites de detección.

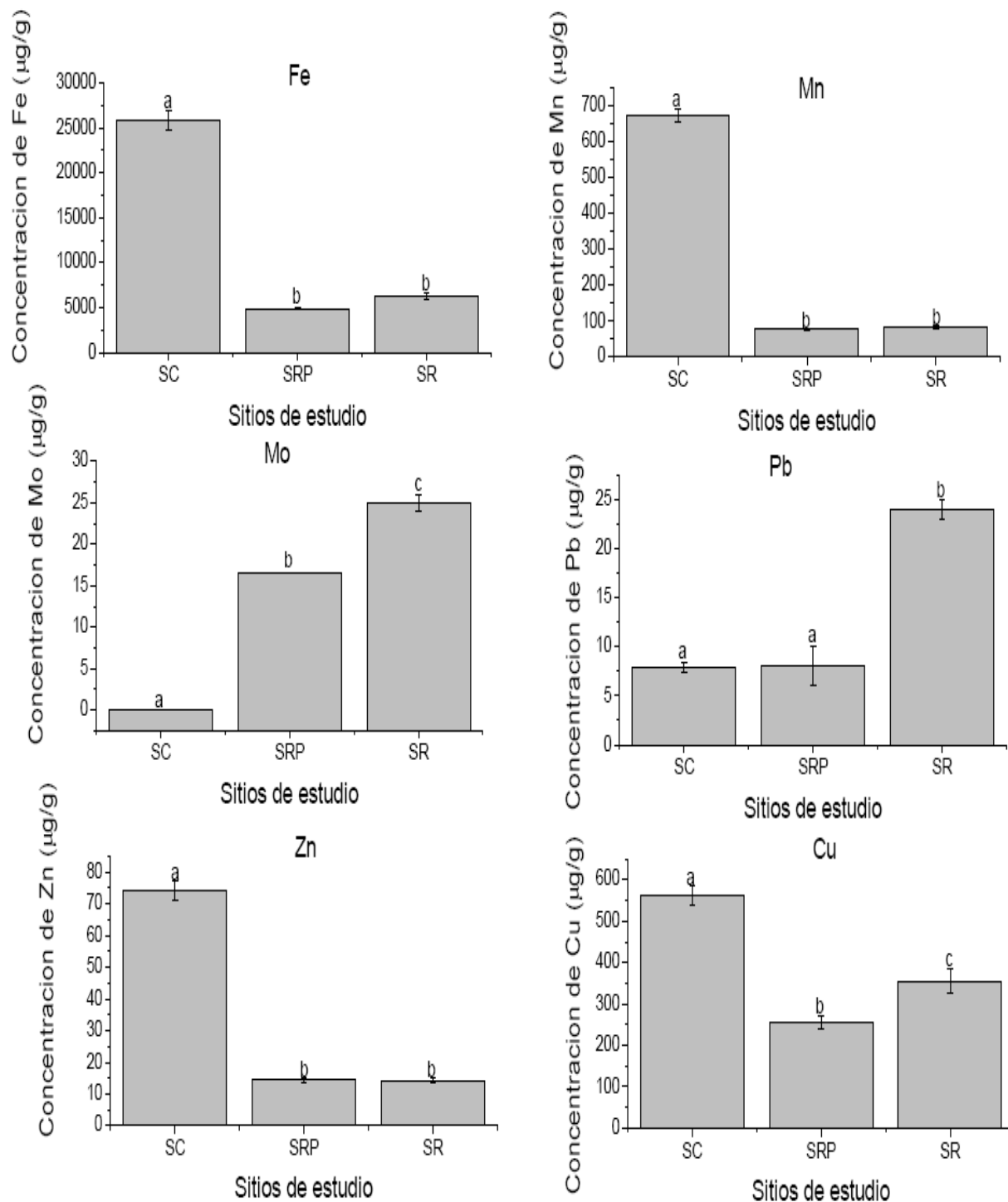


Figura 29. Concentraciones De Mo, Fe, Zn, Pb Y Cu Totales, En Función De Los Sitios De Estudio, Donde Letras Distintas Indican Diferencias Significativas (Tukey, $p < 0.05$). Las Barras De Error Corresponden Un Intervalo De Confianza Al 95%. (n=4)

De acuerdo a la figura 29, las concentraciones de Cu y Mo presentan diferencias significativas en los tres sitios de estudio (ANOVA una vía, $p_{\text{Cu total}} < 0.001$, $p_{\text{Mo total}} < 0.001$), En cambio el Fe, Mn y Zn solo existen diferencias significativas entre el sustrato control y los sustratos relaves, siendo mayores las concentraciones en el sustrato control (Tukey $p < 0.001$). El Pb muestra diferencias significativa entre las concentraciones halladas en los sustratos relaves, siendo mayor en el sustrato relave (Tuckey $p < 0.001$), a pesar de esto el Pb se encuentra menos biodisponible que en ambos sustrato, en comparación con el sustrato control. El Pb no es un elemento esencial para los seres vivos, y en el caso de las planta solo

Tabla 24. Metales Totales En El Sustrato Relaves. Periodo 2005-2008.

Año	Cu	Mn	Zn	Fe	Mo
2005	235	48	9	898	32,7
2006	477	42	8	3474	24,5
2008	180	63	14	1420	37

Fuente:(Novoa y Contreras 2010)

Con respecto a algunos de los valores obtenidos para el sustrato relaves en los últimos 5 años se puede decir que el Cu, Mn, Zn y Fe han aumentado sus concentraciones, no se puede decir lo mismo del Mo dado a que para el 2010 disminuyó sus concentraciones quedando muy similar a las concentraciones del año 2006.

Salinidad y acidez

Conductividad eléctrica (CE)

A continuación se presentan los resultados de la CE para los 3 tipos de sustratos de los cuales se tomaron muestras:

Tabla 25. Resultados Conductividad eléctrica en los tres sustratos.

Sustrato	Conductividad eléctrica (mS/cm)
Control	1,356
Relave- Planta	0,806
Relave	0,528

94

Como se puede apreciar en la tabla 25, los resultados de la CE muestran que es menor en el sustrato relave, luego lo sigue el relave-planta y por último el sustrato control. La CE se relaciona con la salinidad, el pH y también con las condiciones climáticas (Steubing *et al.* 2001).

De acuerdo con la tabla 26 los suelos se clasificarían como no salinos, siendo el sustrato control un poco más salino que el resto.

Tabla 26. Clasificación De Suelos Según Salinidad En Función De La CE.

Rango	Unidad	Clasificación
0 – 2,0	mS/cm a 25° C	No salino
2,0 – 4,0	mS/cm a 25° C	Ligeramente salino
4,0 – 8,0	mS/cm a 25° C	Moderadamente salino
8,0 – 16,0	mS/cm a 25° C	Fuertemente salino
> 16	mS/cm a 25° C	Extremadamente Salino

Fuente: (Novoa y Contreras 2010)

Tabla 27. Relación Entre Las Precipitaciones, C.E. Y pH Para El Sustrato Relaves.
(Periodos 2001-2010)

Año	Conductividad eléctrica (mS/cm)	Precipitaciones totales (mm)	PH
2001	2,1	293,5	8,3
2002	1,7	322,0	8,00
2005	0,1	278,5	7,90
2006	0,2	175,0	8,13
2008	0,07	243,5	8,86
2010	0,528	125,1	8,28

Fuente: (Novoa y Contreras 2010)

En la tabla 27 se muestra una relación directa entre las precipitaciones y la CE a medida que transcurren los años, en donde la lluvia puede reducir la CE por medio de la lixiviación (Steubing *et al.* 2001), por ejemplo en la tabla se muestra que el año 2001 fue más seco que el año 2002, aumentaron las precipitaciones en un 8,8% y con ello disminuyó la conductividad la conductividad eléctrica de un 2,2 a un 1,7 mS/cm. Al contrario para los años 2008-2010 en donde se ve que el 2010 es más seco lo que aumenta la evaporación del agua y con ello aumenta la CE.

El pH también se relaciona con la CE en donde normalmente un bajo pH disminuye las sales minerales y como consecuencia produce una disminución de la CE, esto se evidencia en casi todos los años de la tabla, por ejemplo para el periodo 2001-2002 el pH disminuye y con ello la CE, en todos los caso ocurre lo similar a excepción del año 2006 que al incrementar el pH disminuyo la CE.

pH

El pH se define como el logaritmo de la inversa de la concentración de iones de hidrogeno, Cuando el concepto de pH se aplica a un sistema coloidal tal como el suelo, la fracción de hidrógeno disociado es menor que la unidad y varía según el tipo de arcilla y M.O., por lo que generalmente no es posible determinar la acidez total de un suelo a partir de su pH (Lopez y Lopez 1990). A continuación se presentan los resultados del pH para los distintos sustratos.

96

Tabla 28. pH En Los Sustratos.

Sustrato	pH
Control	6,89
Relave -Planta	7,83
Relave	8,28

Tabla 29. pH En Sustrato De Relaves (Período 2001 – 2008).

Año	pH (unidades)
2001	8,30
2002	8,00
2005	7,90
2006	8,13
2008	8,86

Fuente:(Novoa y Contreras 2010)

Los resultados muestran que los valores del pH para el relave están dentro del promedio de un 8,3 (años 2001-2010) lo que indica que se trata de un suelo moderadamente alcalino, en cambio el sustrato control con el valor obtenido para el 2010 se clasifica como un suelo neutro y el sustrato relave-planta se encuentra entre ligeramente y moderadamente alcalino igual que el sustrato relave, sin embargo el sustrato relaves está más seco a ser un suelo fuertemente alcalino.

El pH es uno de los parámetros más importantes dentro de lo que es la caracterización de un suelo, dado a que afecta tanto en la disponibilidad y solubilidad de los nutrientes necesarios para las plantas. Generalmente la mayoría de las plantas se desarrollan bien en suelos ligeramente ácidos a neutro (entre 6,0 y 7,0) ya que a este intervalo de pH prácticamente todos los nutrientes necesarios para las plantas se encuentran disponibles y en su solubilidad máxima. (Lopez y Lopez 1990; Kabata y Pendias 2000)

Tabla 30. Clasificación De Suelos Según Acidez Asociado A Mediciones De pH.

Acidez	pH
Muy fuertemente ácido	< 5
Fuertemente ácido	5 a 5,5
Moderadamente ácido	5,5 a 6
Ligeramente ácido	6 a 6,5
Neutro	6,5 a 7,3
Ligeramente alcalino	7,3 – 7,8
Moderadamente alcalino	7,8 – 8,4
Fuertemente alcalino	8,4 – 9
Muy fuertemente alcalino	> 9

Fuente: (Novoa y Contreras 2010)

Sales cambiables (Ca, Mg, Na, Cloruros y K)

A continuación se presentan los resultados correspondientes a las sales cambiables:

Tabla 31. Sales Cambiables En Los Sustratos.

Sal cambiabile	Concentración (µg/g)		
	Sustrato control	Sustrato relave planta	Sustrato relave
Na	13,1 ± 0,2	10 ± 1	7 ± 3
Ca	241±13	39,7±0,2	63±5
K	12,7±0,2	10± 2	10,67±0,02
Mg	15,2 ±0,4	2,0 ±0,6	1,74 ±0,05
Cloruros	0,0013 ±0,0001	0,00089 ±0,00008	0,0016±0,0002

Con respecto a la figura 30, se muestra que existen diferencias significativas entre los sustratos relaves y el control especialmente en lo que respecta al Ca y el Mg (Tukey $p < 0.001$) considerados macronutrientes para las plantas, en cambio no existen diferencias significativas en lo que respecta a los sustratos relave y relave-planta a excepción de los cloruros que sí presentan diferencias significativas entre el sustrato relave planta y el sustrato relave (ANOVA una vía, $p_{Ca} = 0.0003$, $p_K = 0.12$, $p_{Na} = 0.07$, $p_{Cloruros} = 0.006$, $p_{Mg} = 0.0001$), en donde el sustrato relave presenta mayores concentraciones de cloruros que en el sustrato relave-planta (Tukey, $p < 0.05$). Esto se podría explicar a que el cloro es utilizado por las plantas como micronutriente, razón para que se encuentre en menos cantidad en el sustrato relave -planta.

Los sustratos fueron clasificados anteriormente como no salinos y con respecto a la tabla 32 se clasificarían como no sódicos dado a que la conductividad del extracto es menor a 4 mS/cm y el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) es menor al 15%, con esto se concluye que no existe un exceso de sales solubles (Lopez y Lopez 1990).

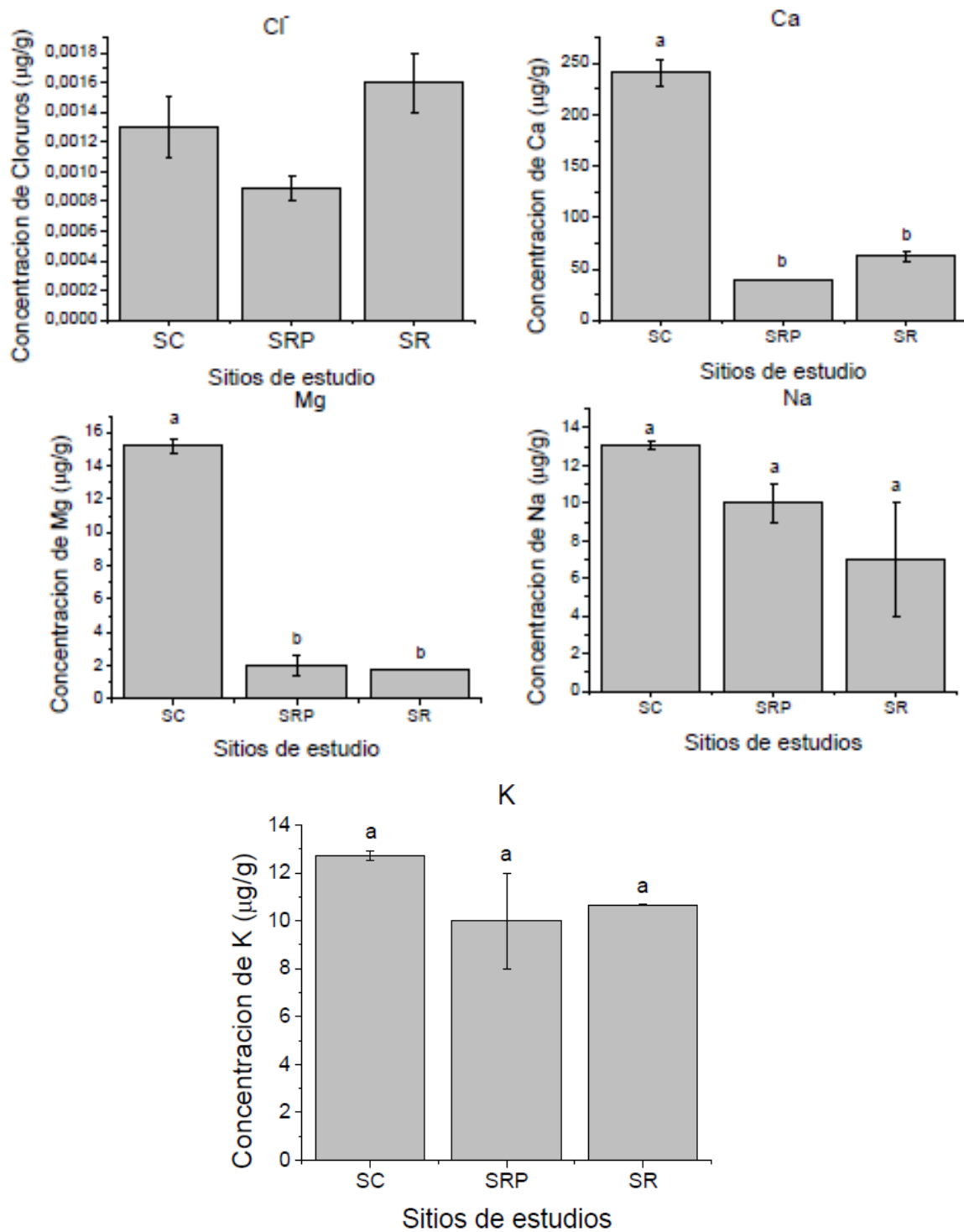


Figura 30. Concentraciones De Sales Cambiables, En Función De Los Sitios De Estudio, Donde Letras Distintas Indican Diferencias Significativas (Tukey, $p < 0.05$). Las Barras De Error Corresponden Un Intervalo De Confianza Al 95%. (n=2).

Tabla 32. Porcentaje De Sodio Intercambiable En Los Sustratos.

Sustratos	RAS	PSI
Sustrato control	1,157	0,45
Sustrato relave-planta	2,006	1,67
Sustrato relave	1,230	0,55

Capacidad de Intercambio catiónico (C.I.C)

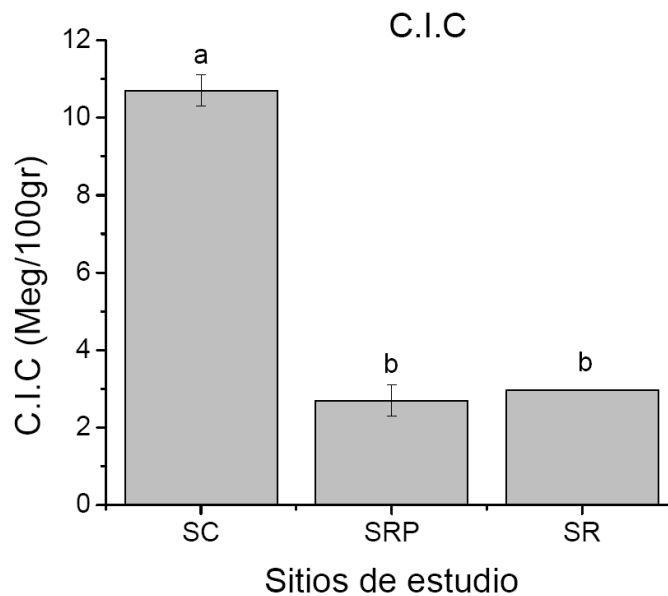


Figura 31. Capacidad De Intercambio Catiónico, En Función De Los Sitios De Estudio, Donde Letras Distintas Indican Diferencias Significativas (Tukey, $p < 0.05$). Las Barras De Error Corresponden Un Intervalo De Confianza Al 95%. (n=2)

En la figura 31 se muestran diferencias significativas entre el sustrato control y los sustratos relaves (ANOVA una vía, $p_{CIC} = 0.0002$), una mayor CIC, aumenta considerablemente la reserva de elementos nutritivos para las plantas, razón para que la mayoría de las concentraciones de metales sean mayor en el sustrato control que en el resto de los sustratos. (Kabata y Pendias 2000)

1.3.- Características climatológicas del tranque de relaves El Chinche.

Para caracterizar el clima, se consideran variables pluviométricas y de temperatura para la zona de Chacay donde se ubica el tranque de relaves el Chinche los antecedentes se obtienen de la Gerencia CASS de Minera Los Pelambres (Estación Meteorológica, Operación Invierno desde el año 2000).

1.3.1.- Pluviometría.

La tabla 33 y la figura 32, entregan los antecedentes de pluviometría para el área de estudio (Chacay) a una altitud de 1.575 m.s.n.m., entre los años 2005 hasta Octubre del 2010 indicando las precipitaciones mensuales y más abajo se muestra en la tabla las precipitaciones por estaciones del año.

Tabla 33. Pluviometría Mensual Para El Período 2005- 2010.

Pluviometría (mms) mensual para el período 2005-2010													
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
2005	4,6	-	30,0	7,0	37,0	78,5	3,5	68,0	16,4	17,5	16,5	-	278,5
2006	3,0	6,5	-	1,5	3,0	22,0	105,0	9,5	-	24,5	-	-	175,0
2007	-	2,0	3,5	-	4,0	67,0	24,0	2,5	-	-	2,0	-	105,0
2008	1,0	5,0	2,0	3,0	33,5	56,0	16,5	120,0	6,5	-	-	-	243,5
2009	-	-	-	-	2,6	56,5	13,7	48,3	13,0	2,0	-	-	136,1
2010	2,1	-	-	-	42,5	30,6	0,3	3,1	11,3	5,2	30,0	-	125,1
Media Mensual	2,7	4,5	11,8	3,8	20,4	51,8	27,2	41,9	11,8	12,3	9,3		Media Histórica
													212,6

Fuente: Gerencia gestión de riesgos operación invierno, meteorología, zona de Chacay.

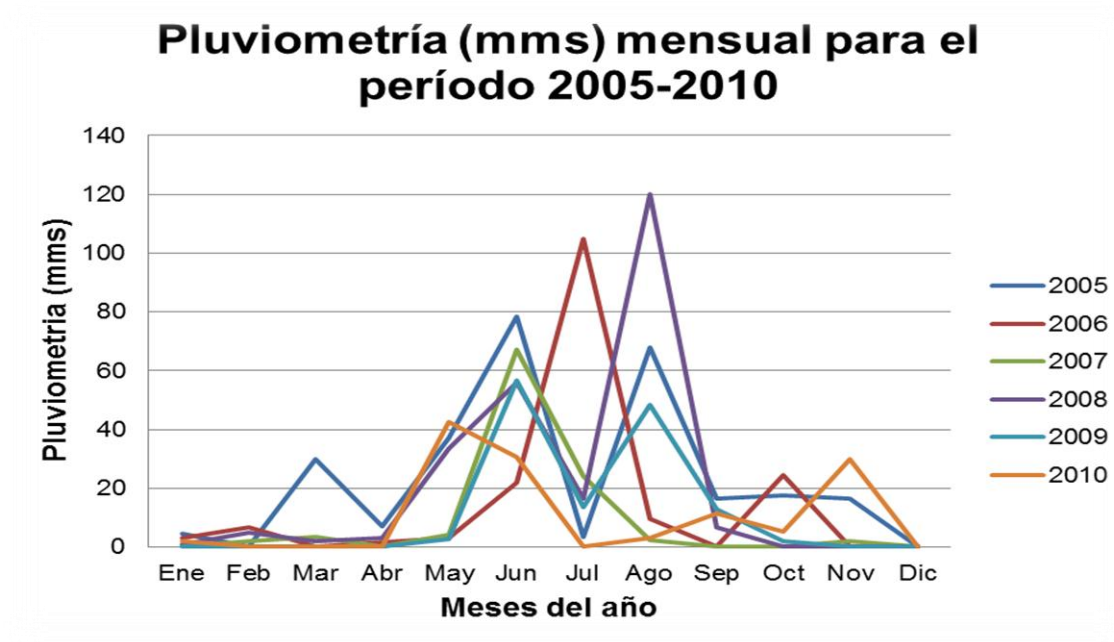


Figura 32. Pluviometría Mensual (Mms) Zona De Chacay, Período 2005- 2010.
Gerencia Gestión De Riesgos Operación Invierno, Meteorología, Zona De Chacay.

Tabla 34. Pluviometría (Mms) Por Estaciones Del Año.

Pluviometría mms estaciones del año					
Año	Verano	Otoño	Invierno	Primavera	Total
2005	23,6	113	105,5	36,4	278,5
2006	9,5	26,5	114,5	24,5	175
2007	2	74,5	26,5	2	105
2008	8	92,5	143	-	243,5
2009	-	18,3	114	3,8	136,1
2010	2,1	65,1	17	40,9	125,1
Promedio Estación	9,04	64,98333	86,75	21,52	177,2

Fuente: Gerencia gestión de riesgos operación invierno, meteorología, zona de Chacay.

Pluviometría (mms) por estaciones del año

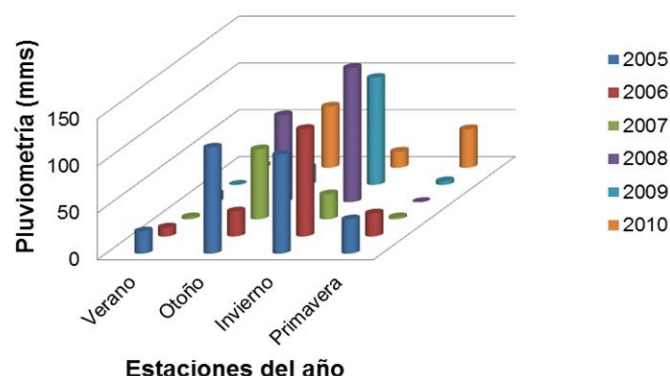


Figura 33. Pluviometría Por Estaciones Periodo 2005-2010. Gerencia Gestión De Riesgos Operación Invierno, Meteorología, Zona De Chacay.

Los datos presentados en las tablas 33 y 34, y en las figuras 32 y 33 indican que el año 2005 presentó precipitaciones mayores al promedio 2005-2010, con una buena distribución a lo largo del año. Al contrario los años 2007 y 2010 presentaron precipitaciones menores al promedio (172,2 mms). Como se puede ver en las gráficas las precipitaciones han disminuido a lo largo del periodo considerado, lo que trae como consecuencia un menor lavado de los contaminantes hacia las capas más profundas. Para el año 2010 en la estación de invierno ha decrecido alrededor de un 88,1% si se compara con el mayor valor que se obtuvo de las precipitaciones para el año 2008 que fue de 143 mms y si el valor de las precipitaciones anuales del 2005 las comparamos con lo que precipitó para el año 2010 ha disminuido alrededor de un 66%, es decir, llovió menos de la mitad, por lo que se puede considerar que la zona de Chacay está pasando por un periodo de sequía. Incluso cabe destacar que para el año 2005 el promedio anual estuvo por sobre el promedio histórico tomando en cuenta los datos desde el año 1991-2010 que fue de 204,5 mms.

1.3.2.- Temperaturas.

Se detallan a continuación en la tabla 35 y figura 34 las temperaturas máximas, mínimas y medias, registradas entre enero de 2005 y octubre de 2010.

Tabla 35. Temperaturas Mínimas, Medias Y Máximas Para El Período 2005-2010.

	Temperaturas °C												Prom Anual
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Temp mín 2005	3,7	9,6	8,6	5,5	-0,8	3,9	-1,4	-3,0	-3,3	2,2	6,6	6,2	3,2
Temp med 2005	19,8	20,5	18,1	15,8	11,5	11,9	10,9	11,7	10,1	13,7	17,5	19,3	15,1
Temp máx 2005	34,8	33,5	33,7	32,0	28,4	24,6	27,1	28,7	26,3	31,4	31,0	32,3	30,3
Temp mín 2006	11,0	11,0	8,4	3,7	6,6	-0,8	-4,5	-2,0	1,2	-0,7	3,4	8,4	3,8
Temp med 2006	21,3	20,1	19,1	17,3	14,9	11,9	11,1	11,5	13,6	14,9	17,4	19,3	16,0
Temp máx 2006	35,7	33,2	32,0	35,1	29,1	28,5	30,7	29,8	30,4	31,7	31,1	35,4	31,9
Temp mín 2007	10,3	7,1	5,0	3,1	1,5	-3,0	-3,6	-4,9	1,9	1,9	1,9	8,4	2,5
Temp med 2007	20,2	18,6	17,6	15,5	11,5	8,9	9,0	7,0	11,9	14,6	17,3	18,7	14,2
Temp máx 2007	35,7	35,7	34,5	32,3	24,4	27,9	25,7	26,3	29,1	30,4	34,8	32,6	30,8
Temp mín 2008	9,4	9,4	8,4	5,6	F/S	Nueva estación		-0,1	0,1	3,1	7,1	10,1	5,9
Temp med 2008	20,7	19,6	18,6	16,8	F/S	Nueva estación		9,6	11,2	14,1	17,6	18,8	16,3
Temp máx 2008	35,5	33,5	32,5	30,4	F/S	Nueva estación		23,8	25,8	24,7	27,5	28,0	29,1
Temp mín 2009	12,0	11,1	9,6	11,3	2,3	-0,8	-2,4	-3,2	-2,3	1,2	4,6	8,2	4,3
Temp med 2009	20,2	19,6	19,8	18,8	14,9	11,6	8,6	11,1	9,7	15,0	15,7	18,6	15,3
Temp máx 2009	30,2	30,1	30,0	27,9	26,8	25,0	20,8	27,8	23,0	31,4	28,2	30,0	27,6
Temp mín 2010	9,8	8,1	9,1	5,8	1,8	-2,2	-2,8	-0,7	-1,3	-1,2	-0,1	4,8	-2,8
Temp med 2010	20,7	19,4	19,2	15,7	12,4	9,2	6,4	10,6	10,8	13,7	15,9	17,2	14,3
Temp máx 2010	31,2	30,3	32,2	27,7	27,8	22,9	22,8	25,1	25,6	25,3	28,6	28,1	32,2

Fuente: Gerencia gestión de riesgos, operación invierno, meteorología, zona de Chacay.

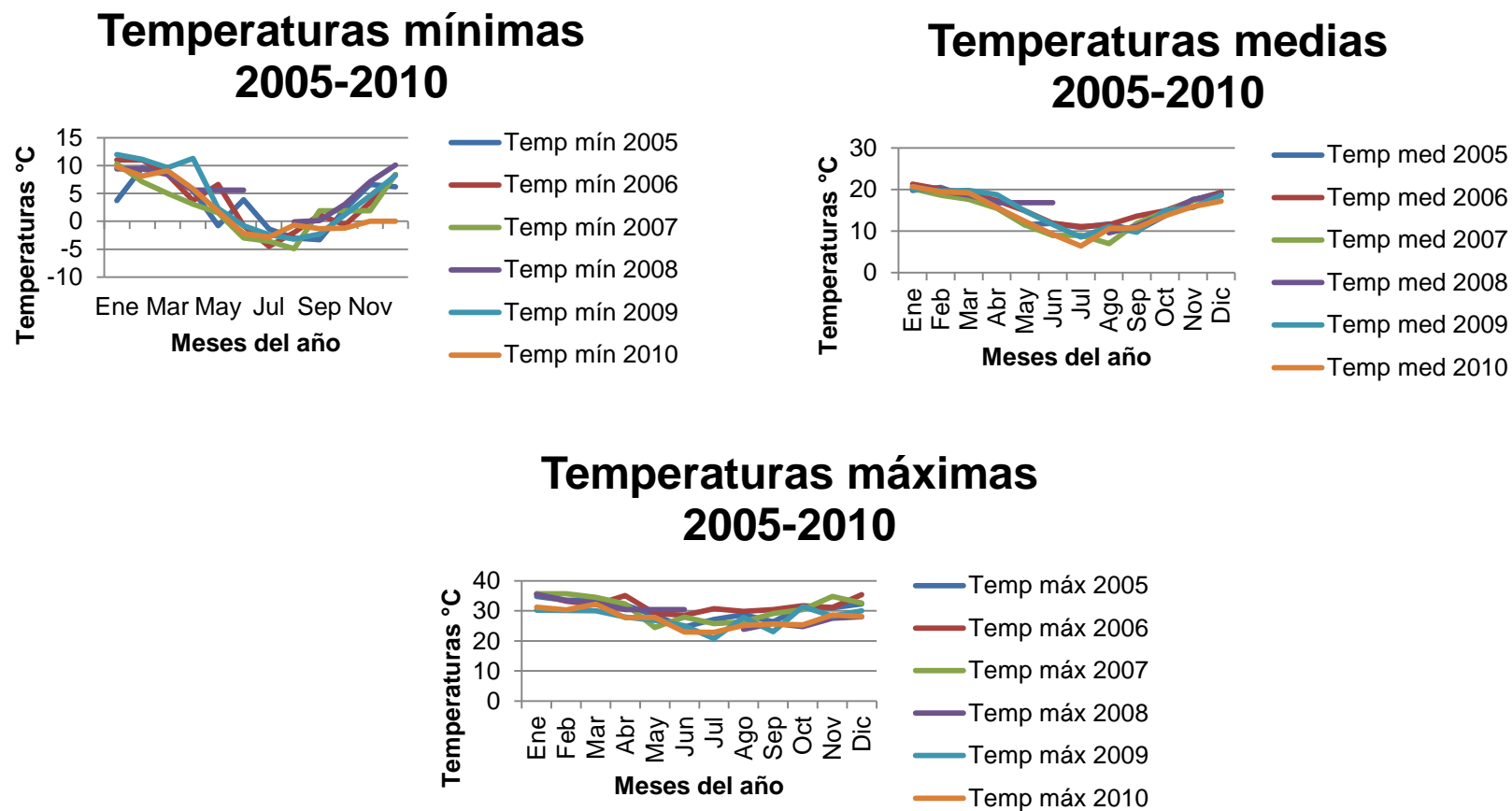


Figura 34. Temperaturas Mínimas, Medias Y Máximas, Zona De Chacay 2005-2010. Gerencia Gestión De Riesgos, Operación Invierno, Meteorología, Zona De Chacay.

Las temperaturas mínimas para el periodo 2005-2010 en la estación otoño-invierno casi todas son bajo cero, al contrario de las precipitaciones existe un mayor equilibrio en lo que son las temperaturas. Se destaca que las temperaturas medias para el año 2008 esta dentro de las más altas al contrario del año 2010 las temperaturas media fuero las más bajas.

1.3.3.- Climograma.

Para relacionar las temperaturas y precipitaciones y, de este modo evidenciar periodos de sequías, la figura 35 ilustra las precipitaciones mensuales y las temperaturas medias promedio mensuales del periodo 2005-2010 en una misma área gráfica.

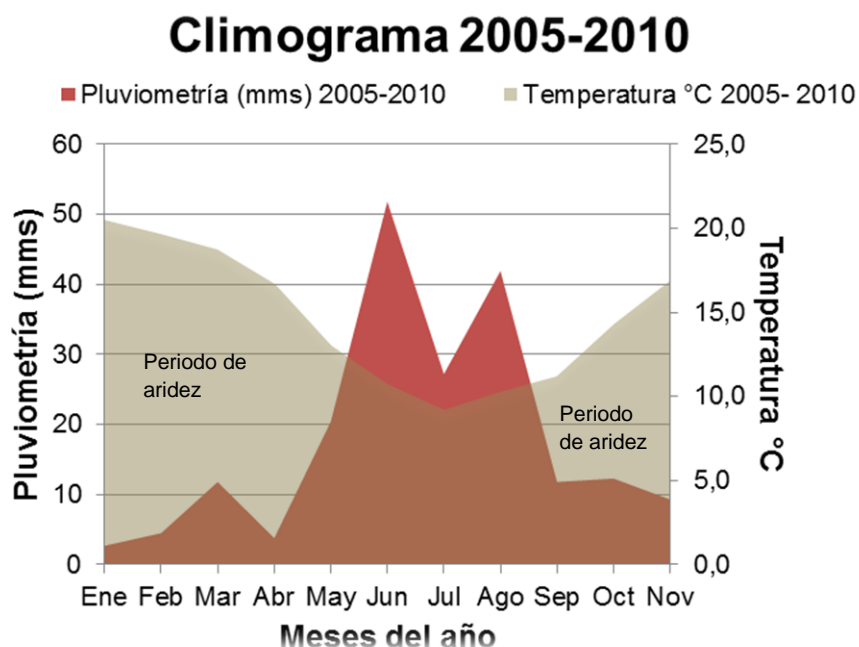


Figura 35. Climograma 2005-2010 Zona De Chacay. Gerencia Gestión De Riesgos Operación Invierno, Meteorología, Zona De Chacay.

Lo anterior indica que las plantas de colonización natural del tranque el Chiche, se someten, durante un largo período del año, a estrés hídrico, casi la mitad del año, por lo que la mayoría de las que crecen en el relave deben necesitar poca agua para sobrevivir.

1.3.4.- Neviscas.

Tabla 36. Neviscas Durante El Periodo 2005-2010, Zona De Chacay.

NIEVE CAÍDA (cms.) MENSUALMENTE PERÍODO 2005 – 2010													
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio Anual
2005	-	-	-	-	3,0	-	2,0	21,5	14,0	-	-	-	4,1
2006	-	-	-	-	-	6,5	67,5	-	-	-	-	-	7,4
2007	-	-	-	-	-	33,0	5,0	29,0	-	-	-	-	6,7
2008	-	-	-	-	10,0	4,0	11,0	2,0	-	-	-	-	2,7
2009	-	-	-	-	-	35,0	43,0	23,0	-	-	-	-	10,1
2010	-	-	-	-	-	17,0	42,0	5,0	11,0	13,0	-	-	8,8

Fuente: Gerencia gestión de riesgos operación invierno, meteorología, zona de Chacay.

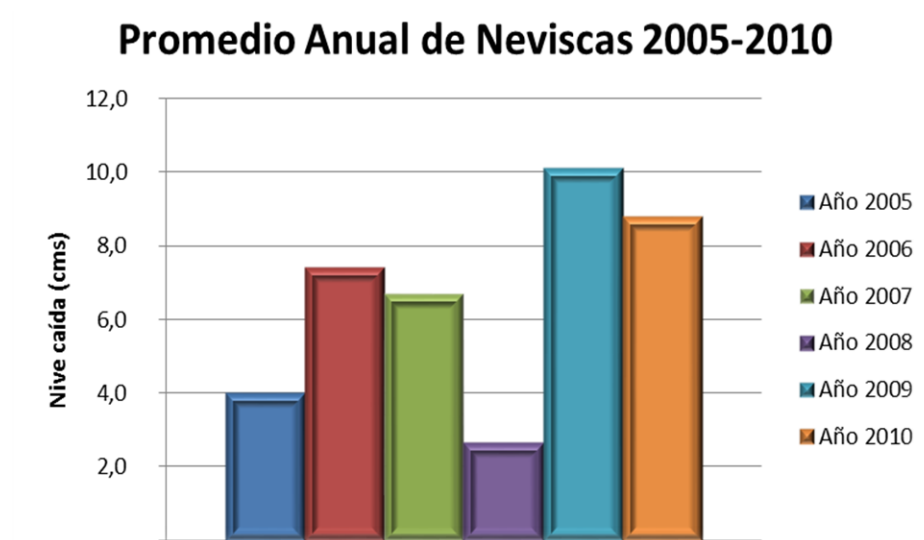


Figura 36. Promedio Anual De Neviscas Para El Periodo 2005-2010. Gerencia Gestión De Riesgos Operación Invierno, Meteorología, Zona De Chacay.

En el figura 36 y en la tabla 36 se pueden apreciar que el año que presento más neviskas fue el 2009 mientras que el menor lo presento el 2008. El grafico en general de neviskas para la zona de Chacay muestra de alguna manera que las plantas de colonización natural soportan temperaturas muy bajas y son capaces de sobrevivir a las heladas de los diferentes años.

1.3.5.- Dirección del viento.

Tabla 37. Dirección E Intensidad Máxima Y Media (M/S) Mensuales Del Viento Durante El Periodo 2005- Octubre 2010.

		DIRECCIÓN E INTENSIDAD MÁXIMA Y MEDIA (m/s) MENSUAL DEL VIENTO 2005 - 2010												
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
2005	Direc.	E	NE	SW	SE	NE	NE	NE	N	SW	S	SE	S	NE
	Vel. Máx.	12	13	10	10	11	17	15	13	9	10	10	13	17
	Vel. Med.	3	3	2	3	2	2	2	2	3	3	3	3	3
2006	Direc.	SW	NE	S	SW	NE	NE	N	S	S	S	S	SE	S
	Vel. Máx.	9	12	11	10	10	10	10	12	11	12	13	12	13
	Vel. Med.	3	2	3	3	2	2	2	2	3	3	3	3	3
2007	Direc.	SW	SW	S	S	NE	NE	S	S	S	SE	SE	NE	NE
	Vel. Máx.	10	12	10	11	13	15	11	11	13	11	11	12	15
	Vel. Med.	3	3	2	2	2	2	2	2	2	3	3	2	2
2008	Direc.	SW	SW	SW	SW	F/S	Nueva estación		N	SW	SW	S	SW	N
	Vel. Máx.	11	10	10	11				14	10	11	12	12	14
	Vel. Med.	2	2	2	2				2	2	3	3	3	2
2009	Direc.	NE	NE	SW	SW	E	NE	E	E	NE	S	NE	S	NE
	Vel. Máx.	15	18	12	11	17	21	19	15	13	12	12	12	21
	Vel. Med.	3	3	3	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3
2010	Direc.	S	SW	W	SW	E	SW	N	S	SW	SW	SW	S	SW
	Vel. Máx.	12	12	11	10	9	9	8	11	12	11	12	14	11
	Vel. Med.	4	3	4	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3

Fuente: Gerencia gestión de riesgos operación invierno, meteorología, zona de Chacay.

Para los cinco últimos años los vientos han tenido una tendencia en dirección noreste con velocidades promedio sobre los 11 m/s y con una velocidad media de 3 m/s, dado a que el sustrato de relaves se trata de un polvo muy fino se ve seriamente afectado por los vientos, especialmente en las horas de la tarde.

1.3.6.- Humedad relativa del aire.

En promedio la humedad relativa para estos últimos 5 años es de un 38,6 % anual, siendo mayor para el año 2005 con un 44 %, este valor es razonable dado a que fue un año de mucha lluvia.

Tabla 38. Humedad Relativa %, Período 2005-2010.

Año	% HR
2005	44
2006	39
2007	-
2008	39
2009	35
2010	36

Fuente: Gerencia gestión de riesgos operación invierno, meteorología, zona de Chacay.

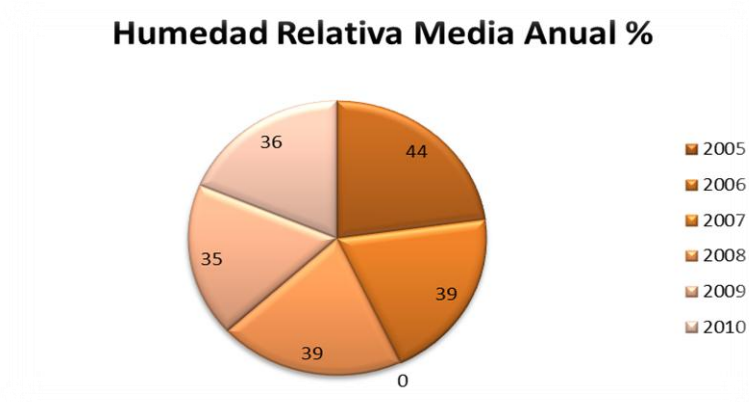


Figura 37. Humedad Relativa Media % , Zona De Chacay. Gerencia Gestión De Riesgos Operación Invierno, Meteorología, Zona De Chacay

2.- RECONOCIMIENTO LAS ESPECIES VEGETALES DE CRECIMIENTO NATURAL EN EL TRANQUE DE RELAVES EL CHINCHE.

La situación general del tranque presenta varias características específicas, difícil de encontrar en otras zonas. Una de estas características es un aporte importante de agua asociadas a tres quebradas y sus respectivas cuencas asociadas, las cuales presentan un estrato vegetacional, principalmente esclerófila, con un buen grado de cobertura y desarrollo, lo que ha permitido una colonización paulatina de especies nativas en gran parte de la cubeta del depósito de relave.

A continuación se muestran el catastro de especies encontradas en el relave.

Tabla 39. Catastro De Especies Del Tranque De Relaves El Chinche.

Familia	Nombre común	Nombre científico	O	FV	EC
Compositae	Romerillo	Baccharis linearis.	N	F	FP
Cactaceae	Quisco	Echinopsis chilensis (colla=Friedr Et Rowl).	N	K	FP
Escaloniáceas	Branco, ñipa,siete camisas	Escallonia illinita K. Presl	N	F	FP
Euphorbiaceae	Colliguay	Colliguaja odorífera	N	F	FP
Compositae	Senecio	Senecio adenotrichius DC	N	H	FP
Salicaceae	Alamo negro, Chopo negro.	Populus nigra L.	I	T	
Compisitae	Chilquilla, Chilca	Baccharis pringaea.		H	FP
Escrofulariáceas	Mitrún	Verbascum virgatum Stockes.	I		
Asteraceae		Lactuca serriola.		A	
Gramineae		Festuca acanthophylla.	N	H	FP
Asteraceae	Brea, chilquilla, Soroma, Peril	Plunchea absinthiodes.	N	F	
Brassicaceae	Rabaniza amarillas	Hirschfeldia incana.	N		
Geraniáceas	Relojito,alfirerillo, loiquilahuén,Tachuela	Erodium cicutarium.		A	
Umbelliferae	Bio bio	Gymnophytum robustum Clos.	N	F	FP
Papilionáceae	Varilla brava, espino, palhuén	Adesmia confusa Ulibarri.	N	F	IC
Asteraceae	Bailahuen	Haplopappus rigidus phil.	N	F	IC
Salicáceas	Sauce, sauce chileno, sauce amargo	Salix humboldtiana Willd.		T	FP
Salicáceas	Senecio de cordillera	Senecio eruciformis Remy.		F	FP
Solanáceae	Natri, tomatillo	Solanum ligustrum Lodd	N	F	FP
Compositae	Bio bio	Haplopappus chysanthemifolius.	N	F	V
		Festuca sp.			
		Rodophiala sp.			
Cyperaceae		Carex setifolia.		H	IC
		Acacia sp. (espino).			
Compositae		Baccharis marginalis	E	F	FP
Poaceae	Rama negra, vira vira, yerba carnícera, cola de caballo	Conyza bonariensis.		A	

Familia	Nombre común	Nombre científico	O	FV	EC
Poaceae	Ajedrez Chileno, pasto largo	Bromus trinii		A	
		Salix.sp.			
		Baccharis sp.			
Poaceae	Waya, paja waya, waylla, chillawa, iroo , pajita	Fetusca hypsophila.	N	H	V
		Cassuarina sp (árbol urbano).			
Gramineae	Cola de zorro	Cortaria rudiuscula Stapf	N	H	IC
Onagraceae	Don diego de la noche amarillo, flor de san José.	Oenothera affinis.	N	A	V
		Hypochaeris sp.			
Compositae	Chamiza blanca, manzanilla cimarrona, chamicilla	Bahía ambrosoides.	N	F	FP
Compositae	Yerba blanca	Chuquiraga ulicina.	N	F	FP

Fuente: (Hoffmann *et al.* 1988; Benoit 1989; Matthei J 1995; Hoffmann 1998; Riedemann y Aldunate 2004; Villagrán y Castro 2004; Chileflora 2005)

2.1. Resultados de los cuadrantes en el tranque de relaves El Chinche.

Para un mayor orden las especies se numeran del 1 al ocho, a continuación se presentan las especies identificadas tanto en los cuadrantes como en la transectas.

Sp1: Baccharis linearis

Sp2: Cortaderia rudiuscula stapf

Sp3: Baccharis pringaea

Sp4: Hypochaeris radicata L.

Sp5: Plunchea absinthioides

Sp6: Cassuarina sp (árbol urbano)

Sp7: Fetusca acanthophylla

Sp8: Haplopappus chysanthemifolius.

Las especies identificadas en los cuadrantes son todas a acepción de la seis y ocho, en las transectas se encontraron las ocho.

2.1.1.- Resultados de las variables ecológicas estimadas para cada cuadrante.

Cuadrante 1:

Coordenadas: 19J 0350502
UTM 6478051

Longitud: 70°35'39.70"O
Latitud: 31°50'36.88"S

Altura: 1456 m

Abundancia: 155 individuos.

Tabla 40. Cuadrante 1.

ESPECIE	N° DE INDIVIDUOS	RADIO m	COBERTURA m ²
Sp1	45	1,2	203,47
Sp2	2	1,6	16,08
Sp3	76	0,52	64,53
Sp4	32	0,07	0,49

Cuadrante 2:

Coordenadas: 19J 0349226
UTM: 647536

Longitud: 70°35'36.42"O
Latitud: 31°50'35.58"S

Altura: 1449m

Abundancia: 131 individuos.

Tabla 41. Cuadrante 2.

ESPECIE	N° DE INDIVIDUOS	RADIO m	COBERTURA m ²
Sp1	42	0,6	47,48
Sp2	61	0,5	47,89
Sp4	28	0,07	0,43

Cuadrante 3:

Coordenadas: 19J 0349299

Longitud: 70°35'33.62"O

UTM: 6475873

Latitud: 31°50'34.41"S

Altura: 1458m

Abundancia: 101 individuos.

Tabla 42. Cuadrante 3.

ESPECIE	N° DE INDIVIDUOS	RADIO m	COBERTURA m ²
Sp1	68	0,1	2,14
Sp2	1	0,4	0,50
Sp3	32	0,5	25,12

Cuadrante 4:

Coordenadas: 19J 0349236

Longitud: 70°35'35.99"O

UTM: 6475924

Latitud: 31°50'32.73"S

Altura: 1470m

Abundancia: 167 individuos

Tabla 43. Cuadrante 4.

ESPECIE	N° DE INDIVIDUOS	RADIO m	COBERTURA m ²
Sp1	56	0,5	43,96
Sp2	2	0,3	0,57
Sp3	34	0,5	26,69
Sp4	15	0,07	0,23
Sp5	60	0,26	12,74

Cuadrante 5:

Coordenadas: 19J0349236

Longitud: 70°35'37.04"O

UTM: 6475923

Latitud: 31°50'33.26"S

Altura: 1455m

Abundancia: 27 individuos.

Tabla 44. Cuadrante 5.

ESPECIE	N° DE INDIVIDUOS	RADIO m	COBERTURA m ²
Sp1	20	0,47	13,87
Sp4	6	0,06	0,07
Sp7	1	0,2	0,13

Cuadrante 6:

Coordenadas: 19J 0349362

Longitud: 70°35'31.24"O

UTM: 6475836

Latitud: 31°50'35.65"S

Altura: 1450m

Abundancia: 99 individuos.

Tabla 45. Cuadrante 6.

ESPECIE	N° DE INDIVIDUOS	RADIO m	COBERTURA m ²
Sp1	35	0,13	1,86
Sp2	23	0,35	8,85
Sp3	40	0,21	5,54
Sp7	1	0,1	0,03

Cuadrante 7:

Coordenadas: 19J 0349350

Longitud: 70°35'31.74"O

UTM: 6475760

Latitud: 31°50'38.11"S

Altura: 1449m

Abundancia: 11 individuos.

Tabla 46. Cuadrante 7.

ESPECIE	N° DE INDIVIDUOS	RADIO m	COBERTURA m ²
Sp1	11	0,65	14,59

Cuadrante 8:

Coordenadas: 19J 0349376 Longitud: 70°35'28.75"O

UTM: 6475681 Latitud: 31°50'39.61"S

Altura: 1449m

Abundancia: 49 individuos.

Tabla 47. Cuadrante 8.

ESPECIE	N° DE INDIVIDUOS	RADIO m	COBERTURA m ²
Sp1	49	0,1	1,54

Cuadrante 9:

Coordenadas: 19J 0349401 Longitud: 70°35'29.88"O

UTM: 6475627 Latitud: 31°50'42.45"S

Altura: 1451m

Abundancia: 182 individuos.

Tabla 48. Cuadrante 9.

ESPECIE	N° DE INDIVIDUOS	RADIO m	COBERTURA m ²
Sp1	112	0,2	14,07
Sp3	60	0,15	4,24

Cuadrante 10:

Coordenadas: 19J 0349521 Longitud: 70°35'25.33"O

UTM: 6475596 Latitud: 31°50'43.51"S

Altura: 1456m

Abundancia: 29 individuos.

Tabla 49. Cuadrante 10.

ESPECIE	N° DE INDIVIDUOS	RADIO m	COBERTURA m ²
Sp1	29	0,3	8,20

Cuadrante 11:

Coordenadas: 19J 0349604

Longitud: 70°35'22.21"O

UTM: 6475527

Latitud: 31°50'45.79"S

Altura: 1456m

Abundancia: 117 individuos.

Tabla 50. Cuadrante 11.

ESPECIE	N° DE INDIVIDUOS	RADIO m	COBERTURA m ²
Sp1	20	0,08	0,40
Sp2	64	0,24	11,58
Sp3	33	1,2	149,21

Cuadrante 12:

Coordenadas: 19J 0349512

Longitud: 70°35'25.71"O

UTM: 6475536

Latitud: 31°50'45.46"S

Altura: 1451m

Abundancia: 189 individuos.

Tabla 51. Cuadrante 12.

ESPECIE	N° DE INDIVIDUOS	RADIO m	COBERTURA m ²
Sp1	68	0,32	21,86
Sp2	121	0,1	3,80

Cuadrante 13:

Coordenadas: 19J 0349092

Longitud: 70°35'41.51"O

UTM: 6475838

Latitud: 31°50'35.45"S

Altura: 1457m

Abundancia: 46 individuos.

Tabla 52. Cuadrante 13.

ESPECIE	N° DE INDIVIDUOS	RADIO m	COBERTURA m ²
Sp1	34	0,5	26,69
Sp4	12	0,09	0,31

Cuadrante 14:

Coordenadas: 19J0349306 Longitud: 70°35'33.50"O

UTM: 6475607 Latitud: 31°50'43.05"S

Altura: 1454m

Abundancia: 65 individuos.

Tabla 53. Cuadrante 14.

ESPECIE	N° DE INDIVIDUOS	RADIO m	COBERTURA m ²
Sp1	59	0,27	13,51
Sp3	6	0,3	1,70

Cuadrante 15:

Coordenadas: 19J 0349410 Longitud: 70°35'29.59"O

UTM: 6475607 Latitud: 31°50'45.44"S

Altura: 1454m

Abundancia: 113 individuos.

Tabla 54. Cuadrante 15.

ESPECIE	N° DE INDIVIDUOS	RADIO m	COBERTURA m ²
Sp1	56	0,55	53,19
Sp2	29	0,28	7,14
Sp3	5	0,09	0,13
Sp4	23	0,16	1,85

Tabla 55. Cobertura Total Por Especie En El Tranque De Relaves.

Especies	Total cobertura m ²	Cobertura %	Escala de Braun-Blanquet
Sp1	466,82	31,12	Frecuente
Sp2	96,39	6,43	Ocasional
Sp3	277,15	18,48	Ocasional
Sp4	3,38	0,23	Rara
Sp5	12,74	0,85	Rara
Sp6	0,00	0,00	-
Sp7	0,16	0,01	Rara
Sp8	0,00	0,00	-

A continuación se muestra la figura 38 que representa la cobertura total de especies encontradas en los 15 cuadrantes realizados en la cubeta del tranque El Chinche.

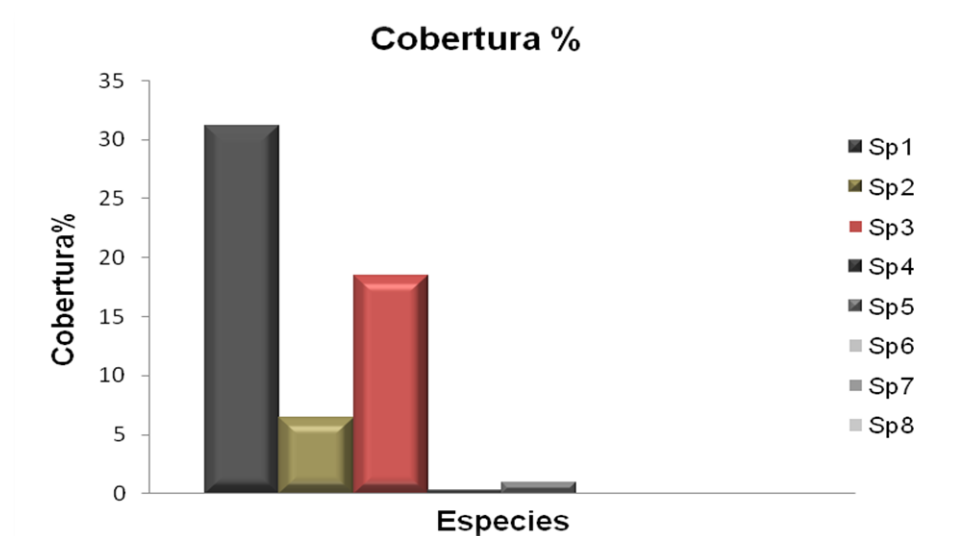


Figura 38. Cobertura Total Por Especie Del Tranque De Relave El Chinche.

Como se muestra en la figura 38 las tres especies predominantes son la *Baccharis linearis* (Romerillo), *Cortaderia rudiusscula* Stapf (Cola de zorro), y la

Baccharis pringaea. La cola de zorro se presenta menos cobertura debido a que necesita un suelo húmedo para su crecimiento por lo que solo se presenta en algunos lugares del tranque de relaves, en cambio las otras dos no necesitan tanta agua como la cola de zorro, por lo que abarcan una mayor cobertura en el tranque de relaves. El resto de la especies presentan un porcentaje bajo de cobertura dado a que son de menor tamaño y a que los ejemplares hallados se encontraban muy distanciados unos de otros.

A continuación se muestra en la tabla 56 el número de especies e individuos hallados en el total de cuadrantes.

Tabla 56. N° Total De Especies E Individuos En Los Cuadrantes

Especies	Ni	Pi
Sp1	704	0,479
Sp2	301	0,205
Sp3	286	0,195
Sp4	116	0,079
Sp5	60	0,041
Sp6	-	-
Sp7	2	0,001
Sp8	-	-
Número total de individuos (N)	1469	
Número total de especies (S)	6	

ni: Número de individuos de cada especie.

Pi: abundancia proporcional de la especie (n_i/N).

Fuente:(Moreno 2001).

2.2.- Resultados de las transectas realizadas en el tranque de relaves El Chinche.

Transecta 1

Tabla 57. Frecuencia Relativa Transecta 1.

Especies	DISTANCIA m										Fr	Fr %
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100		
Sp1	P	P	A	P	P	P	P	A	P	A	6	60
Sp2	P	A	A	A	A	A	A	A	A	A	1	10
Sp3	A	P	P	P	A	A	A	P	P	P	6	60
Sp4	A	P	P	P	P	P	A	A	A	A	6	60
Sp5	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	0	0
Sp6	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	0	0
Sp7	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	0	0
Sp8	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	0	0

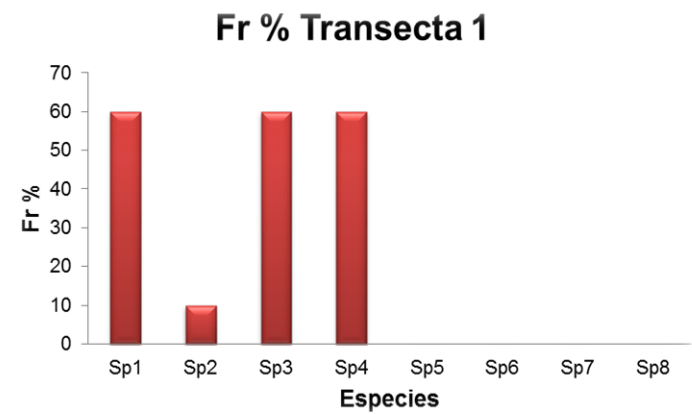


Figura 39. Frecuencia Relativa Transecta 1.

Como se muestra en la figura 39 las especies que con mayor frecuencia se pueden hallar en la transecta 1 son *Hypochaeris radicata* L, *Baccharis linearis* y *Baccharis pringaea*. En menor frecuencia se puede hallar la *Cortaderia rudiusscula* Staph. Las transectas 1, 2 y 3 se encuentran a los pies de una de las tres quebradas alrededor del tranque por lo que es una aérea que posee abundancia y diversidad de especies.

Transecta 2

Tabla 58.Frecuencia Relativa Transecta 2.

Especies	DISTANCIA m										Fr	Fr %
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100		
Sp1	P	P	P	P	P	P	A	P	P	P	9	90
Sp2	A	A	A	A	A	P	P	P	P	A	4	40
Sp3	A	A	A	A	A	P	A	P	A	P	3	30
Sp4	P	P	P	A	A	A	A	A	A	A	2	20
Sp5	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	0	0
Sp6	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	0	0
Sp7	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	0	0
Sp8	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	0	0

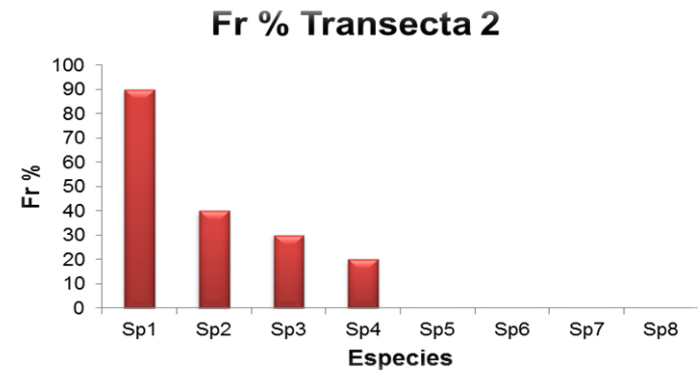


Figura 40. Frecuencia Relativa Transecta 2.

En la transecta 2 se puede ver una mayor frecuencia de la *Baccharis linearis*, esto se puede asociar a que la ubicación de la transecta 2 se aleja de la descarga de agua ubicada cerca de la Transecta 3 y a que ésta especie necesita poca agua para su crecimiento. La *Cortaderia rudijscula* se encuentra más presente en esta transecta dado a que fue considerada una parte del sector en donde predomina esta especie que se desarrolla entre las transectas 3 y 2 (sector más oscuro entre las transectas mostrado en la figura 15). El resto de las especies encontradas disminuyen su frecuencia lo que se atribuye también a la cantidad de agua existente a lo largo de la transecta.

Transecta 3

Tabla 59. Frecuencia Relativa Transecta 3.

Especies	DISTANCIA m										Fr	Fr %
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100		
Sp1	P	P	P	P	P	A	P	P	P	P	9	90
Sp2	P	P	A	P	P	P	A	A	A	P	6	60
Sp3	P	A	A	A	A	A	P	A	P	A	3	30
Sp4	P	P	P	A	A	P	P	A	A	A	5	50
Sp5	P	A	A	A	A	A	A	A	A	A	1	10
Sp6	A	A	A	A	A	A	A	A	A	P	1	10
Sp7	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	0	0
Sp8	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	0	0

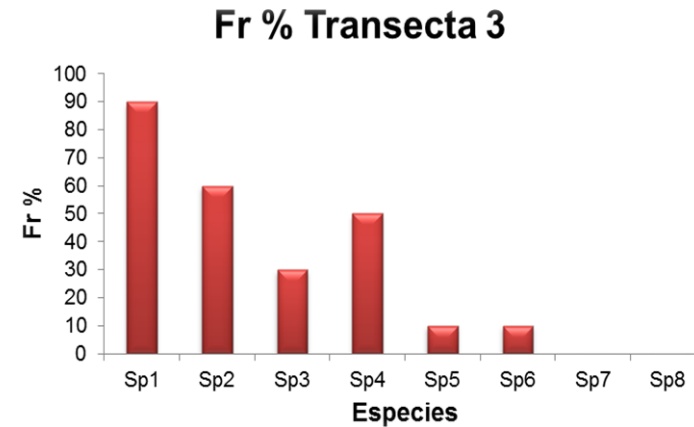


Figura 41. Frecuencia Relativa Transecta 3.

Esta transecta se encuentra cerca a la descarga de agua, por lo que existe una mayor diversidad de especies, incorporándose dos especies nuevas; *Punchea absinthiodes* y *Cassuarina* sp. Se puede ver que existe una mayor frecuencia de *Cortaderia rudiusscula* Staph. A medida que se avanza en el terreno (partiendo de la Transecta 3 hacia la 2), existe una disminución de la frecuencia de la *Plunchea absinthiodes*.

Transecta 4

Tabla 60. Frecuencia Relativa Transecta 4.

Especies	DISTANCIA m										Fr	Fr %
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100		
Sp1	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	10	100
Sp2	A	P	P	A	P	P	A	A	P	P	6	60
Sp3	A	A	A	A	A	P	A	P	P	P	4	40
Sp4	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	0	0
Sp5	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	0	0
Sp6	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	0	0
Sp7	A	A	A	A	A	P	A	A	A	A	1	10
Sp8	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	0	0

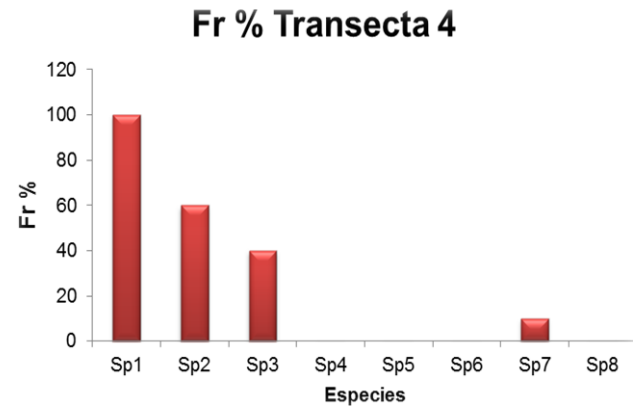


Figura 42. Frecuencia Relativa Transecta 4

Esta transecta se realizó casi en el centro del tranque en donde existe por un lado la presencia de agua atribuible al riego para mitigar el polvo suspendido y por otro existe zonas de sequía, por lo que se puede ver la presencia de una nueva especie; *Fetusca acanthophylla*. Es de destacar que a modo general las tres primeras especies mostradas en el gráfico, siguen siendo las de más alta frecuencia en el relave.

Transecta 5

Tabla 61. Frecuencia relativa transecta 5.

Especies	DISTANCIA m										Fr	Fr %
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100		
Sp1	P	A	P	P	P	P	P	P	A	A	7	70
Sp2	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	0	0
Sp3	A	P	P	P	A	A	A	A	A	A	3	30
Sp4	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	0	0
Sp5	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	0	0
Sp6	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	0	0
Sp7	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	0	0
Sp8	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	0	0

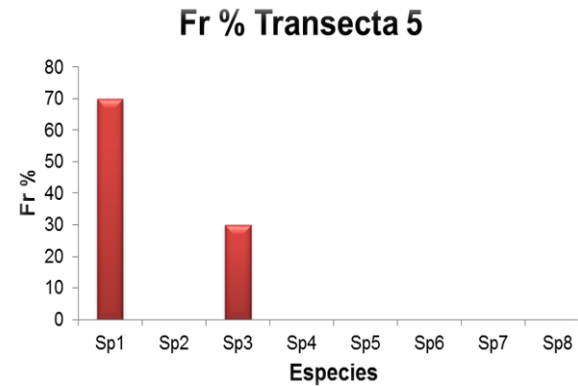


Figura 43. Frecuencia Relativa Transecta 5.

Esta transecta está ubicada dentro de una de las zonas más secas del tranque de relaves, por lo que es razonable que se encuentre menos diversidad de especies. Como se puede apreciar en el gráfico, la *Baccharis linearis* sigue siendo una de las especies de más frecuencia en la cubeta. En general las especies *Baccharis* necesitan poca agua para su crecimiento, por lo que es de esperar que se encuentren ambas *Baccharis* en el sector considerado para esta transecta.

Transecta 6

Tabla 62. Frecuencia Relativa Transecta 6.

Especies	DISTANCIA m										Fr	Fr %
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100		
Sp1	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	10	100
Sp2	A	P	A	P	P	A	A	A	A	P	4	40
Sp3	A	A	P	A	A	P	A	A	A	A	2	20
Sp4	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	0	0
Sp5	A	A	A	A	A	P	P	A	A	A	2	20
Sp6	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	0	0
Sp7	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	0	0
Sp8	A	P	A	A	A	A	A	A	A	P	2	20

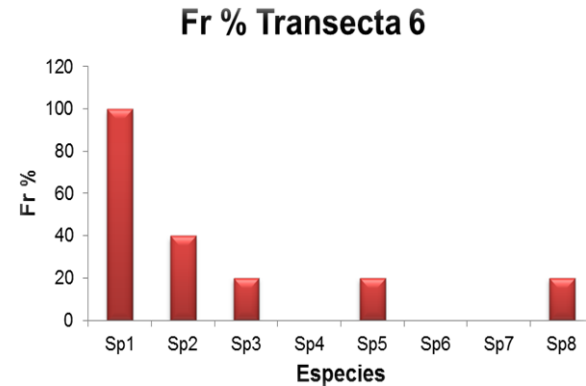


Figura 44. Frecuencia Relativa Transecta 6.

En la transecta 6 se frecuentó nuevamente las tres primeras especies, entrándose presente en todos los puntos la *Baccharis linearis*. Al igual que en la transecta 3 se apreció la *Plunchea absinthiodes* y se observó una nueva especie *Haplopappus chysanthemifolius*. El crecimiento de nuevas especies y las mismas especies que se encontraron en la transecta 3, se puede relacionar a que esta transecta se ubicó a los pies de la quebrada La Leona.

Con respecto a los resultados obtenidos anteriormente se optó por considerar las especies: *Baccharis linearis*, *Baccharis pringaea* y *Cortaderia rudiusscula* Staph, para determinarles metales en sus tejidos, dado a que son las más abundantes y frecuentes en todo el tranque de relaves.

A continuación se presenta una breve descripción de cada una de ellas.



Figura 45. *Baccharis linearis*.



Figura 46. *Baccharis pringaea*.



Figura 47. *Cortaderia ruduscula* Stapf.

Tabla 63. *Baccharis linearis* (R. et P.) Pers.

Nombre científico	<i>Baccharis linearis</i> (R. et P.) Pers.
Nombre común	Romerillo
Familia	Compositae
Orden	Asterales
Origen	Nativa
Forma de vida	Arbusto
Estado de conservación	Fuera de peligro
Dimensiones	2 m de altura por 2 m de diámetro
Descripción	Posee abundantes ramas verticales y hojas lineares, enteras con uno o cuatro dientes marginales. Es una planta dioica, es decir, hay ejemplares con flores femeninas y otros, con florea masculinas. Florece durante el verano, en color blanco- marfil. Su fruto es aquenio provisto de un vilano de color blanco.
Velocidad de crecimiento y propagación	Arbusto de crecimiento rápido al segundo año tiene 1m, por semillas en almácigo estratificado.
Usos	Planta de valor ornamental, sirve para reparar terrenos degradados o semierosionados.
Requerimientos	Se planta pleno sol, se riega poco, resiste heladas ocasionales no prolongadas hasta -5°C
Regiones de Chile en las que habita	Desde la III a la X

Fuente: (Hoffmann *et al.* 1988; Benoit 1989; Matthei J 1995; Hoffmann 1998; Riedemann y Aldunate 2004; Villagrán y Castro 2004; Chileflora 2005)

Tabla 64. *Baccharis pingraea* DC.

Nombre científico	Baccharis pingraea DC
Nombre común	Chilquilla, Chilca
Familia	Compisitae
Orden	
Origen	
Forma de vida	Hierva perenne
Estado de conservación	Fuera de peligro
Dimensiones	De 20 cm a 1 m de altura
Descripción	Perenne, dioica. tallos erectos, glabros, a veces glandulosos, ramosos. Hojas 3,5- 9 cm de largo por 2- 9 mm de ancho alternas, cortamente pecioladas, lanceoladas o lanceoladas- lineares, agudas en el ápice y atenuadas en la base, aserradas en el margen, trinervadas, glabras. Capitulos numerosos dispuestos en cimas corimbiformes densas. Capitulos masculinos de 3mm de largo y 4 mm de ancho, con involucro hemisferico. Brácteas involucrales linear- lanceoladas, agudas, glabras. Flores muy numerosas, filiformes. Aquenios de 0,5- 0,7 mm de largo, glabros o levemente pubérulos, lineares, estriados. Pappus de 3 mm de largo, blanco, pelos simples.
Velocidad de crecimiento	
Usos	
Requerimientos	
Regiones de Chile en las que habita	

Fuente: (Hoffmann *et al.* 1988; Benoit 1989; Matthei J 1995; Hoffmann 1998; Riedemann y Aldunate 2004; Villagrán y Castro 2004; Chileflora 2005)

Tabla 65. Cortaderia rudiusscula Stapf.

Nombre científico	Cortaderia rudiusscula Stapf
Nombre común	Cola de zorro
Familia	Gramineae
Orden	Cyperales
Origen	Nativa
Forma de vida	Hierba perenne; He
Estado de conservación	Insuficientemente conocida
Dimensiones	2,5 m de altura por 1,5 m de diámetro
Descripción	Posee hojas formando roseta basal de hasta 1, 8 m de largo. Las cañas florales tiene 7 a 8 entrenudos y la panoja femenina es oblonga, densa blanco-verdosa; la panoja masculina es más grande que la femenina, florece en primavera y verano. El fruto, una cariopse, madura en otoño.
Velocidad de crecimiento y propagación	Mediana pero se acelera si se multiplica por división de matas, se propaga por semillas en almacigo.
Usos	Planta de valor ornamental, sirve como protección de riberas, se puede plantar en pendientes o rocallas húmedas.
Requerimientos	Alta luminosidad y humedad, resiste temperaturas bajas de -8°C, puede tolerar una nevazón ocasional.
Regiones de Chile en las que habita	Desde la III a la VII

Fuente: (Hoffmann *et al.* 1988; Benoit 1989; Matthei J 1995; Hoffmann 1998; Riedemann y Aldunate 2004; Villagrán y Castro 2004; Chileflora 2005)

3.- DETERMINACIÓN DE METALES EN TRES ESPECIES DE COLONIZACIÓN NATURAL

Baccharis linearis.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en raíz, tallo y hoja en la especie de Baccharis linearis.

Tabla 66. Concentración y BAC De Metales En Baccharis linearis.

Parte de la planta	Metal	Concentración (µg/g) planta control	BAC	Concentración (µg/g) planta relave	BAC
Raíz	Cd	< L.C.	-	0,08±0,02	11,94
	Cu	35,6±0,4	0,46	55±2	1,70
	Mn	101±28	3,48	41±2	11,39
	Mo	< L.C.	-	20±1	31,25
	Pb	< L.C.	-	2,15±0,07	5,97
	Zn	30±2	13,64	14±4	37,84
Tallo	Cd	0,09908±0,00008	1,48	0,53±0,03	79,10
	Cu	41±3	0,53	67±6	2,07
	Mn	76±9	2,62	63±2	17,50
	Mo	0,5±0,1	15,15	28±2	43,75
	Pb	0,34±0,03	0,26	0,81±0,08	2,25
	Zn	26±2	11,82	23±2	62,16
Hoja	Cd	0,53±0,02	7,91	0,48±0,03	71,64
	Cu	26±1	0,34	40±1	1,24
	Mn	82±3	2,83	159,8±0,9	44,39
	Mo	2,09±0,01	63,33	45±2	70,31
	Pb	1,1±0,7	0,85	0,43±0,04	1,19
	Zn	53±3	24,09	30±2	81,08

BAC: coeficiente de bioacumulación, que se define como el coeficiente entre el total de la concentración de elemento en el tejido y la concentración del elemento en el suelo. (Kabata y Pendias 2000; Malayeri *et al.* 2008; Domingez 2010)

La tabla 66 muestra que en general existe una mayor absorción de los metales por parte de la *Baccharis linearis* extraída del relave. El Mn es el metal que se encuentra en mayor concentración en todas las partes de la *Baccharis linearis* extraída del sustrato control y en menor concentración lo seguirían el Zn y Cu, en cambio el Zn y Cd son metales más absorbidos por la *Baccharis linearis* extraída del relave.

Los resultados del BAC para la *Baccharis linearis* extraída del relave demuestra que es una planta hiperacumuladora en todas sus partes (BAC entre 1-10), a diferencia de la planta control que resulto ser acumuladora con respecto al Cu en todas sus partes y el Pb en tallos y hojas. (BAC entre 0,1-1).

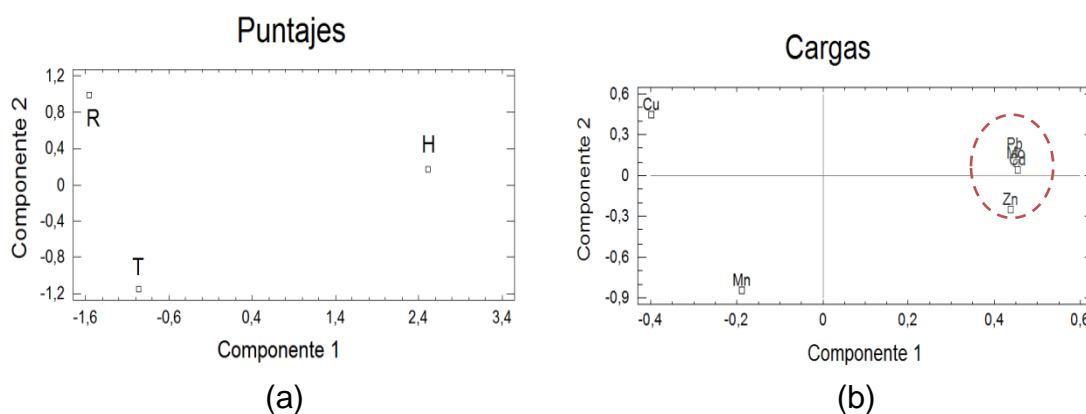
Tabla 67. Factor De Acumulación En *Baccharis Linearis*.

Parte de la planta	Metal	AF Control	AF Relave
Tallos	Cd		6,63
	Cu	1,15	1,22
	Mn	0,75	1,54
	Mo		1,40
	Pb		0,38
	Zn	0,87	1,64
Hojas	Cd		6,00
	Cu	0,73	0,73
	Mn	0,81	3,90
	Mo		2,25
	Pb		0,20
	Zn	1,77	2,14

AF: factor de acumulación o de Translocación, se define como el coeficiente entre la fitomasa aérea con respecto al total de la concentración del elemento en las raíces. (Kabata y Pendias 2000; Das y Kumar 2007)

Según las tablas 65 y 66, la especie de *Baccharis linearis* extraída del relave, sería apta para fitoextraer todos los metales en estudio, esto se debe a que posee un AF y $BCA > 1$ (Kabata y Pendias 2000), en cambio las plantas extraídas del sustrato control pueden extraer todos los metales a excepción del Mo y el Pb.

Control



Relave

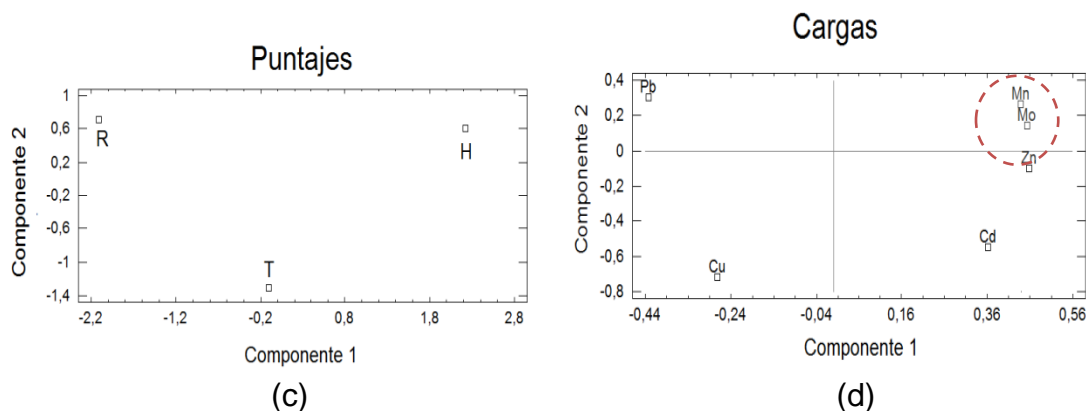


Figura 48. PCA Con Puntajes (b-d) Y Cargas (a-c), Realizado A Las Concentraciones De Metales En *Baccharis linearis*, Encontradas En Los Sitios Del Relave Y Control.

El análisis de PCA mostrado en la figura 48 (a-c), muestra claras disimilitudes entre la concentración de los metales que constituyen las diferentes partes de la planta (raíz (R), tallo (T) y hojas (H)) tanto en el sustrato relave como en el control. Al agrupar los metales en la figura 48 (b-d) se puede apreciar que el Zn, Mn y el Mo se comportan de manera similar en las plantas extraídas del sustrato relave, comportándose de manera diferente el Pb, Cu y Cd. Para el sustrato control existe un comportamiento similar en el todos los metales a excepción del Cu y el Mn. mostrándose un comportamiento diferente en lo que respecta al Cd, Pb y el Mn.

Al realizar ANOVA dos vías no se encontraron diferencias significativas de las concentraciones de Mn y Pb en *Baccharis linearis* extraída de ambos sitios, por lo que no existe un comportamiento diferente con respecto a estos metales.

En cambio sí existen diferencias significativas entre ambos sitios de estudio en lo que concierne al resto de los metales (ANOVA dos vías, $p_{\text{partes de la planta}} < 0.05$, $p_{\text{sitios de estudio}} < 0.05$, $p_{\text{modelo}} < 0.001$).

Tabla 68. Resumen Comparativo Tukey: *Baccharis linearis*.

Relación	Cd	Cu	Mn	Mo	Pb	Zn
Tallo- Raíz	☑	x	x	x	x	x
Hoja- Raíz	☑	☑	x	☑	x	☑
Hoja- Tallo	x	☑	x	x	x	☑
Relave- Control	☑	☑	x	☑	x	☑

☑ : Existen diferencias significativas (Tukey < 0,05).

x : No existen diferencias significativas (Tukey $\geq 0,05$).

Como se muestra en la tabla 68 existen diferencias significativas en la concentración de Cd hallado en las raíces, encontrándose en menor cantidad con respecto al resto de la planta, (ver figura 28, Anexo 3) para ambos sitios de estudio.

De acuerdo con la tabla 68, tanto en el sitio control como en el relave existe un mismo patrón de absorción para los metales, siendo la distribución de los metales de la misma forma, pero en distintas concentraciones, lo que es razonable según Kabata y Pendias en dado a que si existe una mayor cantidad de metales disponibles para la planta, mayor será la absorción por parte de esta.

Tabla 69. Distribución De Los Metales En La Planta.

Metal	Sustrato control	Sustrato relave
Cd	R< T≈ H	R< T≈ H
Mn	R≈ T≈ H	R≈ T≈ H
Pb	R≈ T≈ H	R≈ T≈ H
Cu	R ≈T >H	R ≈T >H
Mo	R≈T≈H (R<H)	R≈T≈H (R<H)
Zn	R≈ T< H	R≈ T< H

*R: Raíz; T: Tallo; H: Hoja.

Baccharis pringaea.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en raíz, tallo y hoja en la especie de Baccharis pringaea.

Tabla 70. Concentración De Metales En Baccharis pringaea.

Parte de la planta	Metal	Concentración (µg/g) planta control	BAC	Concentración (µg/g) planta relave	BAC
Raíz	Cd	< L.C.		0,07±0,02	10,45
	Cu	47±2	0,61	78±12	2,41
	Mn	175,8±0,4	6,06	64±8	17,78
	Mo	0,5±0,7	15,15	36±2	56,25
	Pb	2,6±0,5	2,02	1,4±0,4	3,89
	Zn	32±1	14,55	12,2±0,7	32,97
Tallo	Cd	0,53±0,02	7,91	0,32±0,02	47,76
	Cu	30±3	0,39	79,2±0,4	2,45
	Mn	34±3	1,17	99±4	27,50
	Mo	1,60±0,03	48,48	50±1	78,13
	Pb	0,58±0,09	0,45	0,97±0,02	2,69
	Zn	31±2	14,09	13±1	35,14
Hoja	Cd	0,078±0,004	1,16	0,26±0,01	38,81
	Cu	36±3	0,47	67±2	2,07
	Mn	69±2	2,38	442±4	122,78
	Mo	1,101±0,003	33,36	68±1	106,25
	Pb	0,307±0,009	0,24	1,3±0,2	3,61
	Zn	16,5±0,9	7,50	29±1	78,38

La Baccharis pringaea extraída de sustrato control al igual que la Baccharis linearis, al comparar las concentraciones de los metales posee una mayor concentración de Mn en todas sus partes, luego lo seguirían el Cu y Zn.

La *Baccharis pringaea* extraída del relave concentra una mayor cantidad de Mo en todas sus partes, seguido del Zn y luego del Mn y Cd.

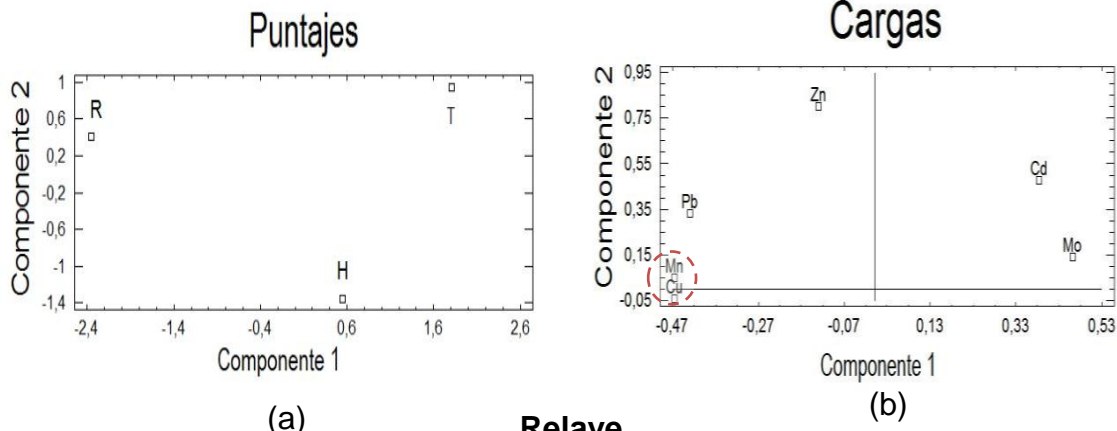
El BAC, calculado para la planta extraída del sustrato control indica que la planta es hiperacumuladora en Mo, Zn, Mn, en todas sus partes, el Pb solo se hiperacumula en la raíz y se acumula en tallos y hojas, el Cd es hiperacumuladora en tallos y hojas y el Cu resultó ser acumuladora en todas sus partes. Las plantas extraídas del relave hiperacumulan todos los metales en todas sus partes (BAC entre 1- 10).

Tabla 71. AF *Baccharis pringaea*.

Parte de la planta	Metal	AF Control	AF Relave
Tallo	Cd		4,57
	Cu	0,64	1,02
	Mn	0,19	1,55
	Mo	3,20	1,39
	Pb	0,22	0,69
	Zn	0,97	1,07
Hoja	Cd		3,71
	Cu	0,77	0,86
	Mn	0,39	6,91
	Mo	2,20	1,89
	Pb	0,12	0,93
	Zn	0,52	2,38

Con respecto a los resultados del AF la *Baccharis pringaea* extraída del sustrato control no es apta para fitoextraer Cu y Pb, en cambio la planta extraída del relave es capaz de fitoextraer todos los metales.

Control



Relave

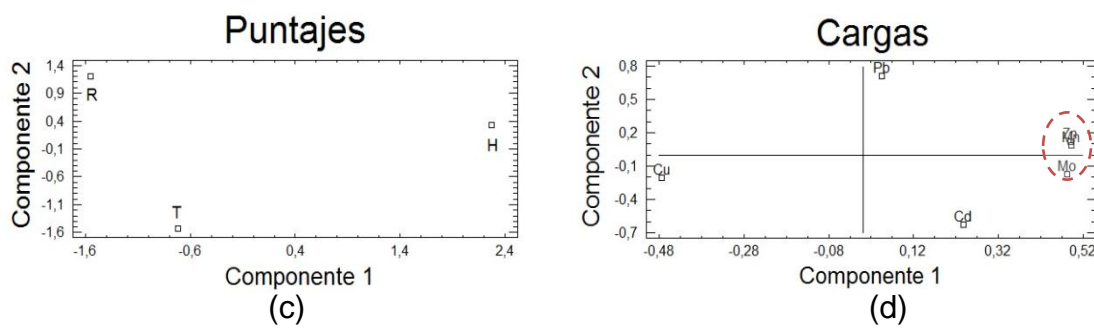


Figura 49. PCA Con Puntajes (b-d) Y Cargas (a-c), Realizado A Las Concentraciones De Metales En *Baccharis pringaea*, Encontradas En Los Sitios Del Relave Y Control.

El análisis de PCA mostrado en la figura 49 (a-c), muestra claras disimilitudes entre la concentración de los metales que constituyen las diferentes partes de la planta (raíz (R), tallo (T) y hojas (H)) tanto en el sustrato relave como en el control. Al igual que en la *Baccharis linearis* al agrupar los metales en la figura 49 (b-d) se puede apreciar que el Zn, Mn y el Mo se comportan de manera similar en las plantas extraídas del sustrato relave, al comportándose de manera diferente el Pb, Cu y Cd. Para el sustrato control existe un comportamiento similar en Cu y el Mn. mostrándose un comportamiento diferente en todos los demás metales, al revés de lo que sucedió con la *Baccharis linearis*.

Al realizar ANOVA dos vías no se encontraron diferencias significativas de las concentraciones de Mn, Zn y Pb tanto entre las partes de la planta como dentro de

las plantas extraídas para los dos sitios de estudio, por lo que no existe un comportamiento diferente con respecto a estos metales.

Para el Cu y Mo existen diferencias significativas entre ambos sitios de estudio (ANOVA dos vías, $p_{\text{partes de la planta}} < 0.05$, $p_{\text{sitios de estudio}} < 0.001$, $p_{\text{modelo}} < 0.001$), para el Cd no existen diferencias significativas entre sitios de estudio pero sí entre las diferentes partes de la planta. (ANOVA dos vías, $p_{\text{partes de la planta}} < 0.004$).

Tabla 72. Resumen Comparativo Tukey: *Baccharis pringaea*.

Relación	Cd	Cu	Mn	Mo	Pb	Zn
Tallo- Raíz	☑	x	x	☑	x	x
Hoja- Raíz	x	x	x	☑	x	x
Hoja- Tallo	☑	x	☑	x	x	x
Relave- Control	x	☑	x	☑	x	x

☑ : Existen diferencias significativas (Tukey < 0,05).

x : No existen diferencias significativas (Tukey $\geq 0,05$).

Como se muestra en la tabla 72 existen diferencias significativas en la concentración de Cd hallado en las diferentes partes de la planta siendo éste mayor en los tallos (ver figura 28, Anexo 3), para ambos sitios de estudio.

De acuerdo con la tabla 73, tanto en el sitio control como en el relave existe un mismo patrón de absorción para todos los metales a excepción del Cd, que resultó ser menor en la hoja que en el tallo para la planta extraídas del relave, lo que se atribuiría a los mecanismos que tiene la planta para tolerar el metal, en general el Cd tiende a concentrarse en orden decreciente en raíz, tallo, hojas, frutos y semillas (Rodríguez *et al.* 2008).

Tabla 73. Distribución De Los Metales En La Planta.

Metal	Sustrato control	Sustrato relave
Cd	R< T< H	R< T>H
Mn	R≈ T≈ H	R≈ T≈ H
Pb	R≈ T≈ H	R≈ T≈ H
Cu	R ≈T≈ H	R ≈T≈ H
Mo	R<T≈H (R<H)	R<T≈H (R<H)
Zn	R≈ T≈H	R≈ T≈H

*R: Raíz; T: Tallo; H: Hoja.

Cortaderia rudiusscula Stapf.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en raíz, tallo y hoja en la especie de Cortaderia rudiusscula Stapf.

Tabla 74. Concentración De Metales En Cortaderia rudiusscula Staph.

Parte de la planta	Metal	Concentración (µg/g) planta control	BAC	Concentración (µg/g) planta relave	BAC
Raíz	Cd	< L.C.		< L.C.	
	Cu	40±4	0,52	449±14	13,90
	Mn	271±7	9,34	126±7	35,00
	Mo	< L.C.		42±3	65,63
	Pb	1,6±0,3	1,24	5±2	13,89
	Zn	38,2±0,7	17,36	12±8	32,43
Hoja	Cd	< L.C.		< L.C.	
	Cu	172±17	2,23	160±28	4,95
	Mn	135±10	4,66	85±10	23,61
	Mo	5,9±0,7	178,79	28,0±0,3	43,75
	Pb	3,4±0,5	2,64	1,8±0,2	5,00
	Zn	40±4	18,18	16±1	43,24

La Cortaderia rudiusscula Staph extraída de sustrato control al igual que las dos plantas anteriores, posee una mayor concentración de Mn en todas sus partes y en menor concentración seguirían el Cu y Zn.

La Cortaderia rudiusscula Staph extraída del relave concentra una mayor cantidad de Mo en todas sus partes, seguido del Zn y Mn.

El BAC, calculado para la planta extraída del sustrato control indica que la planta es hiperacumuladora en Mn, Pb, Zn, en todas sus partes, el Cu solo se hiperacumula en la raíz y se acumula en las hojas, el Mo se hiperacumula en las

hojas. Las plantas extraídas del relave hiperacumulan todos los metales en todas sus partes (BAC entre 1- 10).

Tabla 75. AF Cortaderia rudiusscula Staph.

Parte de la planta	Metal	AF Control	AF Relave
Hoja	Cd		
	Cu	4,30	0,36
	Mn	0,50	0,67
	Mo		0,67
	Pb	2,13	0,36
	Zn	1,05	1,33

De acuerdo con los resultados del AF las plantas extraídas del sustrato control como del sustrato relave son aptas para fitoextraer, Cu, Mn, Pb, Zn. En el caso de la planta extraída del relave también es apta para fitoextraer Mo.

Al realizar ANOVA dos vías no se encontraron diferencias significativas en la concentración de Pb entre las partes de la planta y entre los dos sitios de estudio, por lo que no existe un comportamiento diferente con respecto al Pb.

Para el resto de los metales sí existen diferencias significativas entre ambos sitios de estudio (ANOVA dos vías, $p_{\text{sitios de estudio}} < 0.05$), pero no entre la raíces y las hojas.

Tabla 76. Resumen Comparativo Tukey: Cortaderia rudiusscula Staph.

Relación	Cu	Mn	Mo	Pb	Zn
Hoja- Raíz	x	☑	x	x	x
Relave- Control	☑	☑	☑	x	☑

☑ : Existen diferencias significativas (Tukey < 0,05).

x : No existen diferencias significativas (Tukey $\geq 0,05$).

Como se muestra en la tabla 76 existen diferencias significativas en la concentración de Mn hallado en las diferentes partes de la planta siendo éste mayor en las raíces (ver figura 29, Anexo 3), para ambos sitios de estudio.

Tabla 77. Distribución De Los Metales En La Planta.

Metal	Sustrato control	Sustrato relave
Cd	R≈ H	R≈ H
Mn	R>H	R>H
Pb	R≈H	R≈H
Cu	R ≈ H	R ≈ H
Mo	R≈H	R≈H
Zn	R≈H	R≈H

*R: Raíz; T: Tallo; H: Hoja.

Las especies; *Baccharis linearis*, *Baccharis pringaea*, *Cortaderia rudiussua* *Staph* son naturalmente hiperacumuladoras y acumuladoras de los diferentes metales planteados en el estudio, siendo todas las plantas extraídas del relave hiperacumuladoras de la gran mayoría de los metales.

El BAC y AF calculados para las tres especies, demuestran que son capaces de fitoextraer la mayoría de los metales, lo que lleva al traspaso de ellos a la cadena trófica, dado a que los metales se translocarían a la parte aérea de la planta, la *Cortaderia rudiussua* *Staph* tiende a concentrar todos los metales del estudio en hojas y raíces, a excepción del Mn que se tiende a acumular en las raíces. La *Baccharis pringaea* tiende en general a concentrar Cd y Mo en la parte aérea de la planta, encontrándose el resto de los metales distribuidos homogéneamente dentro de las diferentes partes de la planta y La *Baccharis linearis* tiende a concentrar Cd y Zn en tallos y hojas, el Mo en hojas y el Cu en tallos y raíces.

Los diferentes metales medidos tanto totales como disponibles en los tres sustratos indican que existen diferencias significativas entre la zona no contaminada (control) y el relave en todos los parámetros medidos a excepción del Pb que no se encontraron diferencias significativas entre el sustrato control y el relave-planta. Todas las concentraciones de metales disponibles fueron mayores en el sustrato control que en los sustratos relaves a excepción del Mo, en cambio para las concentraciones de metales totales el Zn y el Cu fueron menores en el sustrato control.

Se encontró que existen diferencias significativas en la concentración de cloruros, CO₂, pH y las concentración de Cu, Pb y Mo totales, entre los sustrato relave y relave-planta por lo que se podría decir que estos parámetros son los que conseguirían estar influyendo en que en un lugar crezca plantas y en el otro no.

Acevedo, E., M. Carrasco, *et al.* (2005). Criterios de calidad de suelo agrícola. Departamento de ingeniería civil División de recursos hídricos y medio ambiente, Universidad de Chile. Santiago, SAG: 217.

Alloway, B.J. (1995). Soil process and the behavior of heavy metals. Heavy metals in soils. Blackie academic and professional Second edition. London. **2**. 11-37.

145

Bautista, F. (1999). Contaminación del ambiente. Introducción al estudio de la contaminación del suelo por metales pesados. Universidad autónoma de Yucatán Mérida, Yucatán, México. **1**. 18-20.

Benoit, I. (1989). Libro rojo de la flora silvestre de Chile. Santiago, Chile, Corporación nacional forestal.

Bercerril, J., O. Barrutia, *et al.* (2007). "Especies nativas de suelos contaminados por metales: aspectos ecofisiológicos y su uso en fitorremediación " Ecosistemas **16**(2): 50-55.

Besoain, E. (1970). Curso de mineralogía en suelos. Turrialba, Costa Rica, Instituto interamericano de ciencias agrícolas de la OEA centro de enseñanza e investigación tropical. 243

Brandy, N. y H. Buckman (1977). Naturaleza y propiedades de los suelos. Barcelona, España, Montaner y Simón. 590

Cantún, J. (2007). "¿Qué es un pasivo ambiental?". Retrieved 6 de Abril, 2010, from <http://inaremorelos.obolog.com/pasivo-ambiental-44115>.

Carpena, R. y M. Bernal (2007). "Claves de la fitorremediación: fitotecnologías para la recuperación de suelos." *Ecosistemas* **16**(2): 1-3.

Chileflora (2005). Retrieved 14 de Diciembre, 2010, from <http://www.chileflora.com/Shome.htm>.

Das, M. y S. Kumar (2007). "Metal accumulation en 5 native plants growing on abandoned Cu-talings ponds." Center of mining environment, indian school of mines, Dhanbad, Jharkhand: 9.

de la Barrera, S. (2007). Fitoextracción de cobre y zinc desde compost de biosólidos. Chile, Universidad de Concepción. **Biologo**: 52.

Domingez, M. (2010). "Elementos traza en el sistema planta-suelo: implicaciones para la ecología de especies leñosas mediterráneas y la restauración de zonas contaminadas." *Ecosistemas* **19**(1): 92-96.

Duffus, J. (2002). "Heavy metals a meaningless term?" *International union of pure and applied chemistry* **74**(5): 793-807.

Erston, V. y Ph. Miller (1967). *Fisiología vegetal*. México. Ediciones UTEHA. 126-143.

Fassbender, H.W. (1969). *Química de suelos*. Turrialba, Costa Rica, Instituto interamericano de ciencias agrícolas de O.E.A. Centro de enseñanza e investigación.

Fassbender, H.W. (1975). *Química de Suelos: énfasis en suelos de América Latina*. Turrialba, Costa rica, IICA. 398

Ginocchio, R., C. Santibáñez, *et al.* (2007). "Fitoestabilización de tranques de relaves en Chile: un aporte al cierre de desechos mineros masivos." Retrieved 24 de Agosto, 2010, from

<http://www.innovamineria.cl/contenidos.phtml?seccion=3&contenido=2218>.

Hoffmann, A. (1998). Flora silvestre de Chile, zona central. Santiago, Fundación Claudio Gay. Cuarta. 254

Hoffmann, A., M Arroro, *et al.* (1988). Plantas altoandinas en la flora silvestre de chile. Santiago, Chile. Ediciones Fundación Claudio Gay. 280

Ibañez, L. (2004). Registro de especies colonizadoras en tranques de relaves antiguos de mina El Soldado V región. Departamento de biología y ciencias ambientales, Universidad Valparaíso: 20-24.

Induambiente (2006) La apuesta verde. **80**.

Induambiente (2008) Relaves para toda ocasión. **91**.

Induambiente (2009). "Pasivos en la mira." **99**: 61-69.

Induambiente (2009) Relaves en verde. **99**.

Jansen y Salisbury (1988). Nutrición mineral de las plantas. Botánica. McGraw-Hill México. **14**. 258- 262.

Jansen y Salisbury (1988). Química del suelo. Botánica. McGraw-Hill México. **14**. 267-270

Jansen y Salisbury (1988). Transporte en plantas. Botánica McGraw-Hill. México. **15**. 283-306.

Kabata, A. y H. Pendias (2000). Trace elements in soil and plants. New York Washington, D.C., CRC PRESS. Third edition. Hardcover. 413

Lasat, M. (2000). "The Use of Plants for the Removal of Toxic Metals from Contaminated Soil." American association for the advancement of science ; Environmental science and engineering fellow: 33.

Lopez, J.R. y J.M. Lopez (1990). El diagnóstico de suelos y plantas , métodos de campo y laboratorio. Madrid, Ediciones Mundi-Prensa. Cuarta edición. 363

Llugany, M., R. Tolrá, *et al.* (2007). "Hiperacumulación de metales:¿una ventaja para la planta y para el hombre?" Ecosistemas **16**(2): 4-9.

Malayeri, B., A. Chehregani, *et al.* (2008). "Identification of the hyper accumulator plants in copper and iron mine in Iran." Departamen of biology, Bu-Ali Sina University and Departament of environment, Islamic Azad University, Hamendan, Iran: 3.

Manahan, S. (2007). Introducción a la química ambiental. México, Reverté. Universidad nacional autónoma de México. 725.

Matthei J, Oscar. (1995). Manual de malezas que crecen en Chile. Santiago, Chile., INIA. 545

Moreno, C. (2001). Métodos para medir la biodiversidad. México, M&T manuales y tesis SEA. CYTED, ORCYT- UNESCO, Sociedad entomológica Argonesa. 86.

Navarro, J., I. Aguilar, *et al.* (2007). "Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas." Ecosistemas **16**(2): 10-25.

Novoa, D. y S. Palma (2008). Efecto de hongos micorrízicos, sobre la concentración de cobre en alfalfa (*Medicago sativa* L.), cultivada en suelos agrícolas de la región de Valparaíso, Chile. Departamento de biología y ciencias ambientales. Valparaíso, Chile, Universidad de Valparaíso: 14.

Novoa, F. y M. Contreras (2010). Flora y vegetación en Minera los Pelambres, Centro de ecología aplicada Ltda. 296

ONU (1992). Convenio sobre la diversidad biológica. Rio de Janeiro. **2010**.

Ortiz, H., R. Trejo, *et al.* (2009). "Fitoextracción de plomo y cadmio en suelos contaminados usando Quelite (*Amaranthus hybridus* L.) y micorrizas." Revista Chapingo Serie Horticultura **15**(2): 161-168.

Pérez, P., G. Ouro, *et al.* (1998). "Descomposición de la materia orgánica, biomasa microbiana y emisión de CO₂ en unsuelo forestal bajo diferentes manejos servícolas." Edafología **5**: 83-93.

Prieto, J., C. Gonzáles, *et al.* (2009). "Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua." Tropical and subtropical agroecosystems **10**(1): 29-44.

Ramírez, N. (2007). Guía técnica de operación y control de depósitos de relaves 8-11.

Renner, S. y R. Ponce (2003). "Proyecto "Bases para la remediación de pasivos ambientales mineros"." Retrieved 27 de Agosto, 2010, from <http://www.areaminera.com>.

Riedemann, P. y G. Aldunate (2004). Flora nativa de valor ornamental, identificación y propagación, Chile zona centro. Chile, Corporación jardín botánico Chagual. Segunda. 566

Rivas, S. y C. Martínez (2003). Guía de buenas prácticas ambientales para la pequeña minería. SERNAGEOMIN. Chile.

Rodríguez, M., N. Martínez de la casa, *et al.* (2008). "Toxicidad del cadmio en plantas." *Ecosistemas* **17**(3): 139-146.

SAG (2010). "Metales pesados en el suelo." Retrieved 27 de Agosto, 2010, from http://www2.sag.gob.cl/Recursos-Naturales/criterios_calidad_suelos_agricolas/pdf/5_metales_pesados_suelo.pdf.

SERNAGEOMIN (2008). "Estadísticas de concesiones mineras." Retrieved 22 de Agosto, 2010, from http://www.sernageomin.cl/index.php?option=com_content&task=view&id=199&Itemid=259.

SERNAGEOMIN (2009). Anuario de la minería chilena. Instituto nacional de estadísticas. Santiago, Chile.: 227-228.

SERNAGEOMIN (2010). "Recursos minerales." Retrieved 22 de Agosto, 2010, from http://www.sernageomin.cl/index.php?option=com_content&task=view&id=43&Itemid=75.

SERNAGEOMIN. y JICA. (2007). "Mapa del Abandono." *Induambiente* **87**: 57.

Stanley, E. (2007). Macronutrientes del suelo. Introducción a la química ambiental. Liberdúplex, S.L.U Primera. Barcelona, España. **7**. 319-325

Steubing, L., R. Godoy, *et al.* (2001). Métodos de ecología vegetal. Santiago, Chile, Editorial universitaria S.A. Primera edición. 343

Villagrán, C. y V. Castro (2004). Ciencia indígena de Los Andes del norte de Chile. Santiago, Chile, Editorial universitaria. Primera edición. 357

Volke, T. y J. Velasco (2002). Tecnologías de remediación para suelos contaminados. México, Jiménez Editores e Impresores, S.A. 62.

Volke, T., J. Velasco, *et al.* (2005). Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación. México, Sy G Editores, S.A. 144.

Wilson, C. y W. Loomis (1968). Botánica. México, UTEHA. Primera edición. 680.

Zunino, S., J. Arancibia, *et al.* (2006). Manual de ecología aspectos teóricos y prácticos. Valparaíso, Universidad de Valparaíso.

