

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA



PROYECTO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL QUÍMICO

**“FITOREMEDIACIÓN DE ZONAS DE
TRANSFERENCIA DE POLVOS CONTAMINADAS
CON ARSÉNICO POR MEDIO DEL USO DEL
HELECHO PTERIS VITTATA”**

Ricardo Saldívar Ramírez

Profesores Guía:

Gianni Olguín C.

José Torres T.

Co referente: Jorge Zúñiga

2008

Resumen

Este estudio tiene como propósito encontrar un proceso de descontaminación de arsénico que recupere el contaminante contenido en suelos, buscando la aplicación al terreno de la Zona de Transferencia de Polvos Metalúrgicos de Codelco Norte división Chuquicamata, el cual ha estado en contacto por años con polvos con una alta concentración de arsénico.

El arsénico está presente naturalmente en el suelo y en muchos tipos de rocas, especialmente en minerales que contienen cobre. Cuando estos minerales se calientan en hornos, la mayor parte del arsénico se elimina a través de la chimenea y entra a la atmósfera en forma de polvo fino. Este polvo es recuperado por medio del sistema de extracción de gases de la Fundición de Concentrado Codelco Norte, luego es almacenado transitoriamente en una cancha conocida como la Zona de Transferencia de Polvos, para luego ser tratado en donde el cobre y el arsénico son recuperados.

Se busca definir un proceso de absorción de arsénico desde los suelos contaminados hasta llevarlo a un producto final estabilizado, se propone que desde las áreas de terreno contaminado este proceso sea capaz de entregar el arsénico como producto en solución el cual pueda ser estabilizado a una forma no tóxica para su almacenaje, de tal manera de no presentar un peligro para la naturaleza.

Se desarrollará el estudio de cada una de las etapas del proceso propuesto, de tal manera de poder definir un sistema de limpieza que sea una nueva opción en sistemas de descontaminación.

A lo largo de esta investigación se presenta el estudio de cada una de las partes que dan vida a este proceso y muestra como fue definida cada una de ellas por separado.

En un principio se estudia la planta a utilizar, esta corresponde a la *Pteris Vittata* silvestre, la cual tiene una capacidad especial de hiperacumulación de arsénico.

Se estudiará la posibilidad de implementación del proyecto por medio de un análisis completo, luego de definir las características principales de la *Pteris Vittata* silvestre se compara con una planta modificada genéticamente presentada en el mercado, la cuál tiene unas características muy interesantes.

Se determinan las partes del sistema de acuerdo a patrones de comportamiento del arsénico y se diseña una planta piloto capaz procesar un 20% del terreno en cuestión, disminuyendo la concentración del suelo hasta 40ppm de arsénico en un tiempo comprendido entre 3 años 7 meses a 4 años con 9 meses con un costo total de inversión inicial aproximado de *USD 27,294.88* y un costo de producción aproximado de *USD 2,652 por mes*.

... “Dedicado principalmente a mi Madre, que ya no está en este mundo, pero vive en mi corazón, a toda mi familia y amigos por su apoyo esencial... y especialmente a mi otra mitad; Juliana, ya que tu amor me da la fuerza para ser cada día mejor”...

INDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
INDICE GENERAL.....	III
INDICE DE TABLAS.....	VI
INDICE DE FIGURAS.....	VII
1 CAPITULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 RESUMEN CAPÍTULO I.....	1
1.2 INTRODUCCIÓN.....	2
1.3 LA IMPORTANCIA DE RESOLVER EL PROBLEMA PLANTEADO.....	5
1.4 MARCO LEGAL.....	7
1.5 OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	8
1.5.1 <i>Objetivo General</i>	8
1.5.2 <i>Objetivos específicos de la etapa propuesta</i>	8
1.6 HIPÓTESIS.....	9
1.7 CONCLUSIONES CAPÍTULO I:.....	10
2 CAPITULO II: PROCESOS PRODUCTIVOS FUNDICIÓN DE CONCENTRADO, CODELCO NORTE CHUQUICAMATA.....	11
2.1 RESUMEN CAPÍTULO II.....	11
2.2 FUNDICIÓN DE CONCENTRADO CODELCO NORTE.....	12
2.3 PROCEDENCIA DEL PROBLEMA.....	15
2.3.1 <i>Características generales polvos metalúrgicos</i>	15
2.3.2 <i>Diagramas de flujo de equipos; generación de polvos metalúrgicos</i>	16
2.3.3 <i>Zona de Transferencia de polvos Codelco Norte</i>	18
2.3.4 <i>Tratamiento de polvos metalúrgicos</i>	19
2.4 CONCLUSIONES CAPÍTULO II:.....	20
3 CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN PROCESO DESCONTAMINACIÓN.....	21
3.1 RESUMEN CAPÍTULO III.....	21
3.2 PROPUESTA DE PROCESO DE DESCONTAMINACIÓN.....	22
3.3 RECUPERACIÓN DESDE EL SUELO: FITOEXTRACCIÓN.....	24

3.3.1	<i>Mecanismo de absorción del contaminante en la planta</i>	25
3.4	EXTRACCIÓN DE ARSÉNICO DESDE LOS HELECHOS	31
3.4.1	<i>Preparación de la biomasa</i>	31
3.4.2	<i>Percolación</i>	32
•	Reacción propuesta para la etapa	33
3.5	CONCLUSIÓN CAPÍTULO IV	34
4	CAPITULO IV: SELECCIÓN DE ESPECIE PARA FITOEXTRACCIÓN	35
4.1	RESUMEN CAPÍTULO IV	35
4.2	PTERIS VITTATA	36
4.2.1	<i>Ubicación natural del helecho Pteris Vittata</i>	38
4.3	EDENFERN™	39
4.3.1	<i>Características generales del helecho Edenfern™</i>	39
4.4	DATOS NECESARIOS	41
4.4.1	<i>Caracterización del medio a remediar</i>	41
•	Cantidad de arsénico en el terreno (Laboratorio Central Codelco Norte)	42
•	Resultados Laboratorio Central Codelco Norte: arsénico	43
•	Calidad del terreno para cultivar (Laboratorio de Suelos de PUCV).....	43
•	Resultados análisis fertilidad completa de suelo (Laboratorio de Suelos de PUCV) ..	44
4.4.2	<i>Para cálculo rendimiento de la planta en situación local</i>	45
•	Parámetros característicos de la planta	45
•	Búsqueda ejemplar sustituto	45
•	Datos observados Pteris Chilensis.....	50
4.5	MODELACIÓN MATEMÁTICA DE PROCESO EXTRACCIÓN ARSÉNICO POR MEDIO DE PTERIS VITTATA.....	51
4.6	SIMULACIÓN DEL MODELO DE ABSORCIÓN: STEM.....	55
4.6.1	<i>Parámetros utilizados para modelación</i>	56
4.6.2	<i>Resumen parámetros utilizados en la simulación STEM</i>	58
4.7	SIMULACIÓN LIMPIEZA TERRENO ZONA TRANSFERENCIA DE POLVOS POR MEDIO DEL HELECHO PTERIS VITTATA	60
4.8	COMPARACIÓN HELECHOS	64
4.9	SIMULACIÓN PTERIS VITTATA EN SUELO CONTAMINADO 50PPM	65
4.10	CONCLUSIONES CAPÍTULO IV.....	69

5	CAPÍTULO V: DISEÑO SISTEMA DE EXTRACCIÓN.....	70
5.1	RESUMEN CAPÍTULO V.....	70
5.2	CIRCUITO PERCOLACIÓN.....	71
5.3	ESPECIFICACIONES DEL ESTANQUE PERCOLADOR.....	74
5.4	CAPACIDAD DE EQUIPOS.....	76
5.5	CINÉTICA REACCIÓN ESTANQUE PERCOLADOR.....	80
5.6	CONCLUSIONES CAPÍTULO V.....	82
6	CAPITULO VI: COSTO DE INVERSIÓN.....	83
6.1	RESUMEN CAPÍTULO VI:.....	83
6.2	COSTO DE INVERSIÓN.....	84
6.2.1	<i>Cotizaciones.....</i>	<i>84</i>
6.3	COSTO DE OPERACIÓN.....	87
6.4	CONCLUSIONES CAPÍTULO VI.....	88
7	CAPITULO VII ALCANCES Y RECOMENDACIONES: HOLCUS LANATUS, FITOESTABILIZACION.....	89
7.1	RESUMEN CAPÍTULO VII:.....	89
7.2	RECOMENDACIÓN I: FITOESTABILIZACIÓN.....	90
7.3	PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS HOLCUS LANATUS.....	92
7.3.1	<i>Ubicación Holcus Lanatus II Región.....</i>	<i>92</i>
7.4	RECOMENDACIÓN II: CULTIVO HIDROPÓNICO PTERIS VITTATA.....	94
7.5	CONCLUSIONES CAPÍTULO VII:.....	97
	RESULTADOS.....	98
	CONCLUSIONES GENERALES.....	102
	BIBLIOGRAFÍA.....	104
	GLOSARIO.....	108

INDICE DE TABLAS

Tabla 01: Norma metales pesados en suelos Unión Europea, Estados Unidos y Australia	7
Tabla 02: Toneladas de concentrado procesado por mes	12
Tabla 03: Equipos disponibles proceso fusión, conversión y moldeo	14
Tabla 04: Características generales polvos.....	15
Tabla 05: Ubicación Pteris Vittata.....	38
Tabla 06: Resultados análisis cantidad de arsénico en el suelo a remediar	43
Tabla 07: Resultados Laboratorio calidad de suelo PUCV.....	44
Tabla 08: Datos observados en Pteris Chilensis.....	50
Tabla 09: Definición de variables presentes en el modelo	53
Tabla 10: Pteris Vittata (control P) ANEXO F1.6.....	56
Tabla 11: Valores utilizados para la simulación.....	59
Tabla 12: Datos entrada simulación primera etapa remediación P Vittata.....	60
Tabla 13: Resultado simulación primera etapa	61
Tabla 14: Datos entrada simulación segunda etapa remediación P Vittata	62
Tabla 15: Resultado simulación segunda etapa.....	63
Tabla 16: Datos entrada para la simulación de absorción en terreno 50ppm	65
Tabla 17: Resultados simulación terreno 50ppm	66
Tabla 18: Comparación dos especies	67
Tabla 19: Datos dimensionamiento equipos.....	76
Tabla 20: Datos balance de materia general reactor propuesto.....	77
Tabla 21: Carga estimativa para reactor dimensionamiento	78
Tabla 22: Moles ingresados por carga	79
Tabla 23: Variación de concentraciones en el reactor.....	80
Tabla 24: Cotización fittings necesarios para la construcción ciclo recuperación As.....	84
Tabla 25: Costo de instalación	86
Tabla 26: Costo de instalación y costo de producción.	87
Tabla 27: Preparación Solución de Hoagland	95
Tabla 28: Absorción Pteris Vittata en cultivo hidropónico.....	96

INDICE DE FIGURAS

Figura 01: Diagrama de flujo fundición Codelco Chuquicamata.....	14
Figura 02: Tolva tripartita.....	16
Figura 03: Procedencia polvos metalúrgicos CT2.....	16
Figura 04: Procedencia polvos metalúrgicos Horno Flash	17
Figura 05: Procedencia polvos metalúrgicos Convertidor Peirce - Smith.....	17
Figura 06: Foto Zona de Transferencia de Polvos	18
Figura 07: Descarga en Zona de Transferencia de Polvos	19
Figura 08: Proceso descontaminación	22
Figura 09: Fitoremediación.....	24
Figura 10: Esquema absorción planta	25
Figura 11: Diagrama de bloque absorción arsénico en Pteris Vittata.....	26
Figura 12: Glutación (GSH) gamma-glutamil - cystenil - glicina.....	26
Figura 13: Regeneración del (GSH)	27
Figura 14: Cromatografía de masa para As^{+3} extraído desde las hojas.	28
Figura 15: Primero la estructura del PC y luego la molécula albergando el átomo de As^{+3} en forma de complejo.....	29
Figura 16: Hojas de Pteris Vittata analizadas bajo microscopio.....	30
Figura 17: Pteris Vittata.....	36
Figura 18: Ubicación natural de la planta en según la base de datos de Estados Unidos.....	38
Figura 19: Edenfern.....	39
Figura 20: Recorrido muestreo Zona Transferencia de Polvos	42
Figura 21: Pteris Chilensis.....	46
Figura 22: Ubicación Natural Helecho Pteris Chilensis	46
Figura 23: Bosque Constitución a orillas del río Maule	47
Figura 24: Pequeño helecho Pteris Chilensis nativo	47
Figura 25: Profesor Patricio Peñailillo realizando el transplante	48
Figura 26: Retiro de ejemplar Pteris Chilensis	48
Figura 27: Pteris Chilensis en macetas, listas para traslado	49
Figura 28: Descripción general esquemática de Balance de Masa del rastreo de elemento.....	52
Figura 29: Programa STEM.....	55
Figura 30: Gráfico resultados primera etapa	61
Figura 31: Gráfico resultados segunda etapa.....	63

Figura 32: Edenfern™	64
Figura 33: Pteris Vittata	64
Figura 36: Disminución desde 50ppm iniciales a 17,761ppm en 3 años.....	66
Figura 34: Circuito Percolación.....	71
Figura 35: Circuito para la recuperación de arsénico en forma de solución ácida.	73
Figura 36: Diseño reactor Percolador.....	75
Figura 37: Gráfica simulación estanque percolador	81
Figura 38: Dibujo Holcus Lanatus.....	91
Figura 39: Ejemplar encontrado en la mina, transplantado en tierra normal.....	93
Figura 40: Tierra Zona Transferencia de polvos.....	93
Figura 41: Holcus Lanatus en Tierra de ZTP después de 15 días	94

1 CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Resumen Capítulo I

El arsénico es un contaminante muy dañino capaz de causar grandes problemas en la salud de las personas que se encuentran en contacto con él. Este problema no es un caso aislado al fin del mundo; en países como Estados Unidos, por la cantidad de arsénico que se encuentra de forma natural en la tierra, se ha debido tomar medidas para advertir a la población de lo peligroso que es convivir con este elemento.

Si bien durante los últimos años Codelco ha tenido que disminuir las emisiones de gases de descarga; para poder llevar a cabo este plan fue necesario captar mayor cantidad de gases de proceso, generando mayor cantidad de polvos metalúrgicos.

Los polvos metalúrgicos son producto de precipitar los metales pesados presentes en los gases generados en diferentes etapas del proceso de fundición de cobre.

El Capítulo I tiene como finalidad definir el propósito y la dirección de esta investigación, por medio de la estructuración de la hipótesis y objetivos se presentan el sentido y finalidad de este trabajo.

Se desea hacer un aporte al conocimiento en el área de la fitoremediación, por ser un tema relativamente nuevo en el mundo y especialmente en Chile ahondando en el conocimiento en esta área poco explotada en nuestro país.

La hipótesis planteada quiere probar la aplicación del sistema de fitoremediación, que busca crear un proceso completo, el cual no sólo absorba el arsénico desde el suelo, sino que además sea capaz de entregarlo en solución para su manejo y tratamiento posterior.

1.2 Introducción

Lamentablemente la obtención de cobre por medio de la pirometalurgia es un proceso altamente contaminante gracias a las emanaciones de SO_2 , material particulado y metales pesados, entre estos el arsénico, producidas básicamente en las etapas de fusión y conversión de concentrado de cobre.

Por años estas emisiones fueron liberadas al ambiente por medio de chimeneas y las diferentes emisiones fugitivas existentes a lo largo de todo este proceso.

Este problema se agudizó en la época del cincuenta, con el agotamiento de los minerales oxidados que se procesan por medio de hidrometalurgia, lo que marcó el comienzo de la explotación de los metales sulfurados que se realiza por procesos pirometalúrgicos que en ese momento generaban emanaciones ricas en arsénico, las cuales no fueron controladas durante largos años.

Durante el ultimo tiempo se ha captado gran parte de esos polvos generados en la fundición que antiguamente eran emanados hacia la atmósfera, con objetivo de recuperar el cobre y el arsénico, es así como surge la zona de transferencia de polvos, la cual es una cancha de almacenaje transitoria para este producto, si bien el arsénico ahora está bajo mayor control, sigue afectando el medio ambiente pero en un espacio mas reducido y limitado.

Gracias a que la zona afectada es de un área relativamente pequeña y esta focalizada en un solo sector, en un futuro no muy lejano una vez que se termine de ocupar ese espacio, se desea implementar un proceso de limpieza para este suelo impactado.

Hasta el momento se han hecho todos los cambios posibles en el proceso de fundición para manejar mejor las emanaciones contaminantes y de esa manera ser amigable con el medio ambiente.

Además a fin de mejorar la calidad de los suelos aledaños de la zona, la Fundición de Concentrado de Chuquicamata, Codelco Chile elaboró un plan de descontaminación¹, el cuál fue aprobado mediante Decreto Supremo N°132 de 1993 del Ministerio de Minería. Este instrumento contempló diversas medidas para reducir las emisiones de material particulado y anhídrido sulfuroso.

En cuanto al arsénico, el D.S. 132 de 1993 establecía que la División Chuquicamata de Codelco Chile debería presentar un Plan de Descontaminación de arsénico. A partir del año 1996, se establecen por medio de resoluciones del Servicio de Salud de Antofagasta, límites en la

¹ CHILE. Ministerio de Salud. 13 de Abril 1998. La Resolución N° 1459: Límites en la emisión de arsénico.

emisión de arsénico. La Resolución N° 1459, fijó como límite emisiones de arsénico entre 1180 $\left[\frac{\text{ton}}{\text{año}} \right]$ y 1170 $\left[\frac{\text{ton}}{\text{año}} \right]$ para 1998 y 1999 respectivamente.

El Artículo 4° del D.S. N° 165, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República (DO. 02.06.1999) dicta en el título II con respecto a las cantidades máximas² permitidas de emisión de arsénico al aire por tipo de fuente, para la provincia del Loa II región de Chile, con producción de 1.400.000 $\left[\frac{\text{ton}}{\text{año}} \right]$ de concentrado de cobre pueden emitir como máximo: 1.100 $\left[\frac{\text{ton}}{\text{año}} \right]$ al 2001, 800 $\left[\frac{\text{ton}}{\text{año}} \right]$ desde el 2001 y finalmente 400 $\left[\frac{\text{ton}}{\text{año}} \right]$ para el 2003.

Esto redujo considerablemente las emanaciones de contaminante, pero no reparó el daño que ya se había hecho a los suelos.

A la fecha, la empresa ha implementado la II etapa de su "Plan de Descontaminación de la Fundición", cuyo objetivo es el aumento de la captación de azufre y arsénico manteniendo la capacidad de fusión de concentrados de cobre, a través de la ejecución de 8 subproyectos, orientados al potenciamiento de unidades existentes (Horno Flash, Convertidor Teniente N°2, Planta de Ácido), y al control de las emisiones fugitivas.

Como solución al problema del arsénico depositado por años en los terrenos aledaños y específicamente al suelo impactado de la zona de transferencia de polvos, se presenta en este estudio la fitoremediación.

De manos de la biotecnología surge esta nueva opción hace menos de una década, la cual nos presenta una solución alternativa de mínimo impacto negativo ambiental y menor costo económico. Actualmente en EEUU. están siendo invertidos más de 100 millones de dólares anuales en la investigación y aplicación de este método para la descontaminación de suelos. Países más cercanos como Brasil, también están siguiendo esta tendencia del estudio de nuevas tecnologías que puedan ayudar a mejorar la contaminación de suelos, cumpliendo así con las exigencias sociales y los organismos ambientales locales como la "Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo - CETESB".

En el año 2001 aparece un artículo en la revista Nature³ en donde por primera vez se nombra una planta capaz de concentrar arsénico en sus frondas a altas concentraciones, junto a las

² CHILE. Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República. 02 de Junio de 1999. D.S.N°165: Límites en la emisión de Arsénico.

³ Lena Q. Ma "A fern that hyperaccumulates arsenic" Nature, 1 February 2001 Vol409 p 579

"Fitoremediación de Zonas de Transferencia de Polvos contaminadas con arsénico por medio del uso del helecho *Pteris Vittata*" Codelco Norte Chuquicamata.

posibles aplicaciones de ésta como medio de limpieza y recuperación de suelos de forma natural, este helecho llamado *Pteris Vittata* fue dado a conocer por medio de un artículo escrito por su descubridora la Doctora Lena Ma⁴.

⁴ Lena Qiyang Ma Profesora "Biogeochemistry of Trace Metals" Universidad de Florida, Ph.D. 1991. "Environmental Soil Chemistry". Colorado State University. M.S. 1988. "Environmental Soil Chemistry". Colorado State University. B.S. 1985. "Soil Science." Shenyang Agricultural University, China.

"Fitoremediación de Zonas de Transferencia de Polvos contaminadas con arsénico por medio del uso del helecho *Pteris Vittata*" Codelco Norte Chuquicamata.

1.3 La importancia de resolver el problema planteado

El arsénico está catalogado como el primero de las sustancias tóxicas que se encuentra en la Agencia de Protección ambiental, de los Estados Unidos (EPA), se descubrió que al exponerse incluso a bajas dosis, puede aumentar las posibilidades de contraer algunos tipos de cáncer, diabetes y enfermedades vasculares. En el año 1999 la Academia nacional de Ciencias de Chile confirmó que el arsénico presente en el agua potable podría causar cáncer a la vesícula pulmones y piel⁵, incluso pudiendo llegar a los riñones y el hígado.

Algunas de las características importantes a considerar del grupo de los metales pesados a cual pertenece el arsénico son:

1. Poseen carácter acumulativo, su concentración no experimenta disminución en el tiempo.
2. Son necesarios y beneficiosos para las plantas, pero si excede los niveles de concentración se tornan tóxicos.
3. Se encuentran siempre en los suelos a niveles denominados fondo, concentraciones que no son externas, sino que provienen del material parental originario de las rocas y de las transformaciones de estas, a excepción de la zona de transferencia de polvos donde la contaminación ha sido inducida y concentrada en orden de poder salvar el impacto a otros terrenos.

Sin embargo estos contaminantes pueden movilizarse o cambiar de forma química debido a los cambios en las concentraciones medioambientales, cambios por el uso de suelo o por la saturación de la capacidad de tamponamiento de suelo. Por esta razón se les ha catalogado como bomba de relojería química⁶.

⁵ Smith, A.H.

Marked increase in bladder and lung cancer mortality in a region of Northern Chile due to arsenic in drinking water., J. Epidemiol, 1998, 600-669.

⁶ Sanchez Bascones, Ma Isabel .

Determinación de metales pesados en suelos de mediana del campo (Valladolid): contenidos extraíbles, niveles de fondo y de referencia, 2003 p23

"Fitoremediación de Zonas de Transferencia de Polvos contaminadas con arsénico por medio del uso del helecho *Pteris Vittata*" Codelco Norte Chuquicamata.

Las áreas mas afectadas en el mundo a través de la historia han sido Taiwán, Pakistán, India y Sudamérica. Específicamente en Chile, siendo la región de Antofagasta⁷ una de las mas perjudicadas.

Éste no es un caso aislado al fin del mundo, incluso se han presentado casos en algunos lugares en Estados Unidos donde el agua potable contiene trazas de arsénico, como por ejemplo en el estado de New Hampshire, ubicado al noreste de ese país.

En la publicación de la revista Environmental Health Perspectives⁸, el principal autor del estudio, Sr. Joshua Hamilton, señala:

"Muchos de nosotros estamos expuestos sin saberlo, porque el arsénico no tiene sabor ni olor, la única forma de detectarlo es con pruebas. En New Hampshire estamos tratando de que todos los que tienen pozos privados hagan pruebas en sus pozos", para así llevar mejor control de este contaminante.

Por tanto es de fundamental importancia, sabiendo de antemano las posibles consecuencias para la población y el medio ambiente la presencia en altas concentraciones de este contaminante, hacer conciencia y comenzar a trabajar en este ámbito tan importante como es la protección ambiental y sobretodo de la vida humana. En estos momentos la limpieza de los suelos por medio de fitoremediación está en estudio en el extranjero. La intención de este estudio es seguir profundizando en esta materia para usar este método y así mejorar la calidad de vida de las personas en los lugares afectados.

⁷ Diaz, O., Muñoz, O., Recabarren, E., Montes, S., Martínez, S., Soto, H., Yáñez, M., (...), Montero, R.

Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology UCSB, CA 2005, Bioremediation of soil and irrigation water contaminated with arsenic in the second region of Chile, 2465-2474.

⁸ Hamilton, Joshua "Biomonitoring Study Design, Interpretation, and Communication--Lessons Learned and Path Forward", Environmental Health Perspectives November 2005: Vol 113, Number 11.

"Fitoremediación de Zonas de Transferencia de Polvos contaminadas con arsénico por medio del uso del helecho *Pteris Vittata*" Codelco Norte Chuquicamata.

1.4 Marco Legal

Por medio de averiguaciones en el SAG. (Servicio Agrario y Ganadero del Gobierno de Chile) y de acuerdo a Rosario Valdivia Flores⁹, lamentablemente no existe en nuestro país una reglamentación o resolución donde se apliquen multas a personas o entidades por estar por sobre los límites de arsénico en el suelo establecidos, lo que se hace actualmente es tener antecedentes respecto a las regulaciones en otros países acerca de esta materia y utilizarlas como parámetro de referencia.

Eventualmente lo que podría suceder, en el peor de los escenarios, sería que se presentase una querrela en tribunales de justicia, básicamente porque la contaminación afectase directamente a la comunidad, debido a que en esta zona la erosión del viento es mayor que en otros lugares, por su poder puede arrastrar partículas llegando a ser perjudicial para las personas que habitan en el entorno por medio de contaminación de polvos en suspensión con arsénico.

Pero esto se lleva a cabo como un proceso legal ordinario, el cual involucra informes medioambientales e investigaciones que derivan en que el proceso judicial sea muy largo.

En la siguiente tabla se resume la cantidad de metales pesados aceptados por la normativa vigente en la Unión Europea, Estados Unidos, Australia y Chile.

Metal	Chile ¹		UE ²		U.S. E.P.A. ³			Australia ⁴	
	Suelos aptitud frutal y/o forestal	Suelos degradados	Suelos pH<7	Suelos pH>7	Concentración	Tasa anual	Carga acumulada	Lodo C1	Lodo C2
	Mg kg ⁻¹ MS		mg kg ⁻¹ MS		mg kg ⁻¹ MS	kg ha ⁻¹ yr ⁻¹	kg ha ⁻¹	mg kg ⁻¹	
As	20	40	n.n. ⁵	n.n.	75	2	41	20	60
Cd	8	40	20	40	85	1,9	39	3	20
Cu	1000	1200	1000	1750	4300	75	1500	100	2500
Hg	10	20	16	25	840	15	300	1	15
Ni	80	420	300	400	75	0,90	18	60	270
Pb	300	400	750	1200	420	21	420	150	420
Se	50	100	n.n.	n.n.	100	5	100	3	50
Zn	2000	2800	2500	4000	7500	140	2800	200	2500
Cr	n.n.	n.n.	1000	1500	3000	150	3000	100	500
Mo	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	57	0,85	17	n.n.	n.n.

¹ Norma lodos Nch2952c -2004 (INN,2004); ² Directiva 86/278/EEC (Marmo,2003); ³ Norma 503 - 40 CFR/1993 (US EPA, 1993); ⁴ Norma Australian Standard AS 4454-1999 (ARMICANZ/ANZECC, 2000); ⁵ No normado

Tabla 01: Norma metales pesados en suelos Unión Europea, Estados Unidos y Australia

⁹ Encargada de la Oficina de Informaciones SAG Calama II Región Antofagasta Chile

⁹ "Fitoremediación de Zonas de Transferencia de Polvos contaminadas con arsénico por medio del uso del helecho *Pteris Vittata*" Codelco Norte Chuquicamata.

1.5 Objetivos del proyecto

1.5.1 Objetivo General

Se desea hacer un aporte al conocimiento en el área de la fitoremediación por medio de la generación de una nueva alternativa de descontaminación, diseñada para satisfacer las necesidades ambientales en el ámbito de recuperación de los suelos y estudiando su aplicación a la Zona de Transferencia de Polvos de Codelco Norte división Chuquicamata, que a su vez sea capaz de entregar al final del proceso el arsénico como producto en solución para que luego sea estabilizado, usando como columna central el sistema de fitoextracción.

1.5.2 Objetivos específicos de la etapa propuesta

- Complemento de información necesaria en el mecanismo de Fitoextracción.
- Investigación de los procesos productivos de la Fundición de Concentrado Codelco Norte, para determinar la procedencia de los Polvos Metalúrgicos.
- Determinación del mecanismo de eliminación de arsénico en el sistema – planta.
- Caracterización y análisis del suelo a remediar.
- Determinación modelo matemático de absorción de la planta.
- Estudio del proceso de reextracción desde la planta y diseño de equipos necesarios.
- Análisis de la posibilidad real de utilización planta estudiada.
- Cálculo de costo de inversión del Proyecto.

1.6 Hipótesis

Es factible encontrar un proceso de descontaminación capaz de recuperar el arsénico que se encuentra en suelos contaminados llevándolo a un producto estabilizado no tóxico, que utilice como mecanismo principal de recuperación la fitoremediación por medio de la extracción usando el helecho *Pteris Vittata*, para lograr la disminución de la concentración del arsénico en los suelos afectados y evaluar su aplicación al caso particular de la Zona de Transferencia de Polvos Metalúrgicos de Codelco Norte división Chuquicamata.

1.7 Conclusiones Capítulo I:

En este capítulo se presenta la magnitud de este problema, si bien no existe regularización vigente en Chile, esto no significa que es un tema menor. El arsénico es un contaminante peligroso, el cuál puede traer graves consecuencias a las personas que viven en presencia de éste, las reglas ambientales se han puesto en general cada vez más estrictas, en especial para la minería y un tema como éste no quedará sin regularizar por mucho tiempo.

Los fuertes vientos son capaces de arrastrar e ir esparciendo el contaminante por vastas áreas de terreno, por lo que habrá que tener mucho cuidado con estabilizar y limpiar estas zonas a tiempo, para poder evitar sanciones futuras.

Es de fundamental importancia que Codelco, como la empresa mas grande e importante de Chile, se preocupe con anticipación de estos temas, marcando una pauta en la industria general y la minería chilena, destacándose y entregando una excelente imagen que avala la preocupación de la empresa con temas tan importantes como lo son la preservación del medio ambiente.

En el capítulo I se presentaron además los objetivos y la línea de investigación a seguir, de esta manera es posible canalizar el estudio por medio de la definición de los objetivos e hipótesis. Se desea encontrar un proceso que sea capaz de extraer arsénico desde los suelos contaminados, de una manera distinta nueva, ambientalmente amigable y de menor costo.

2 CAPITULO II: PROCESOS PRODUCTIVOS FUNDICIÓN DE CONCENTRADO, CODELCO NORTE CHUQUICAMATA

2.1 Resumen Capítulo II

En el capítulo II se dan a conocer de manera general los procesos productivos realizados por la Fundición de Concentrado de Codelco Norte División Chuquicamata, la que recibe y es capaz de procesar aproximadamente casi 1.700 $[Kton/mes]$ de concentrado, para generar cobre anódico de pureza aproximada de 98,6% el cual es llevado posteriormente a la planta de refinación electrolítica en donde se purifica en celdas hasta alcanzar una ley del 99,999% el cual es vendido al mercado local y extranjero.

Se presenta información importante acerca de la procedencia del problema; los polvos metalúrgicos, cual es su composición y recorrido que llevan hasta que son depositados finalmente en la cancha de almacenamiento transitorio llamada la Zona de Transferencia de Polvos.

2.2 Fundición de Concentrado Codelco Norte

La fundición de concentrado de la división Chuquicamata de Codelco Chile, puesta en funcionamiento el año 1952 véase ANEXO A Pág. 2, tiene por fin el procesamiento de concentrado y generación de otros subproductos. El principal abastecimiento a la planta proviene desde la Subgerencia Concentración la cual copó la capacidad de fusión hasta el 2002, por lo que a partir del 2003 fue necesario adquirir concentrados externos.

Concentrado tratado	Propio [Kton/mes]	Externo [Kton/mes]	Total [Kton/mes]
2002	1680	0	1680
2003	1643	77	1720
2004	1650	70	1720
2005 - 2009	1664	33	1697

Tabla 02: Toneladas de concentrado procesado por mes

Aproximadamente el 90% del cobre es extraído de minerales sulfurados, estos minerales por ser difíciles de tratar por medio de la hidrometalurgia como lo son los óxidos, se deben tratar en su mayoría por medio del método pirometalúrgico a partir de concentrados.

El proceso comienza¹⁰ con la etapa de reducción de tamaño realizada en la Planta de Chancado para luego, mediante molienda húmeda, obtener un producto apto para alimentar la etapa posterior de flotación. En el proceso de flotación, después de varias etapas de concentración, se obtiene un concentrado de 30 a 36% de cobre y 1% de molibdeno. El producto final del proceso representa un nivel de producción, en términos de cobre fino de 1664 toneladas aproximadas por día.

El concentrado de óxido molibdeno obtenido en la Planta Concentradora se alimenta a la Planta Recuperadora de Molibdeno, donde a través de una flotación diferencial se separa el molibdeno del cobre. La fracción del cobre, con contenido de humedad de 15% pasa a una Planta de Filtros, reduciendo su humedad al 8%.

¹⁰ Jorge Ahumada Ferrera, Antonio Luraschi Gioia Curso Pirometalurgia del Cobre Universidad de Antofagasta 1999.

Debido a que las unidades autógenas de fusión deben trabajar con concentrados con bajos porcentajes de humedad, se requiere de secadores rotatorios, los que permiten obtener un concentrado con 0,2 % de humedad.

El concentrado seco es alimentado a las unidades de fusión, del que se obtienen las fases líquidas ricas en cobre como son el eje (Horno Flash 62% de cobre) y el metal blanco (Convertidores Teniente 72% de cobre). Además, se obtiene una fase oxidada llamada escoria y una fase gaseosa rica en SO_2 . La escoria obtenida en el Horno Flash, dependiendo de su composición química, es llevada a botaderos o a la Planta de Flotación de Escorias, para la recuperación de cobre contenido en ellas. La escoria de los Convertidores Teniente es tratada en el Horno Eléctrico de Limpieza de escorias, del que se obtiene un Metal Blanco, la escoria de éste horno pasa a una planta de granalla, generando un granallado con bajos contenidos de cobre.

El eje y el metal blanco se envían hacia la nave de Convertidores "Peirce Smith" en ollas de gran capacidad (50 y 80 toneladas). En estos convertidores se obtiene un metal de 96-98 % de cobre llamado "Blister", el cual es procesado en las Unidades de Refino a Fuego, donde se eliminan los restos de azufre y se ajustan las cantidades de oxígeno. El cobre "RAF" de 98% de pureza es moldeado en forma de ánodos para luego ser transportado y procesado en la Refinería Electrolítica.

Los gases de los Hornos Convertidores Teniente, Flash y Peirce Smith se limpian en los precipitadores electrostáticos para luego ser utilizados en las plantas de ácido para la producción de éste producto.

Los procesos productivos aquí presentados de manera general están desarrollados con mas detalle en el *ANEXO B Pág. 6*.

A continuación se presenta un diagrama de flujo general de la fundición:

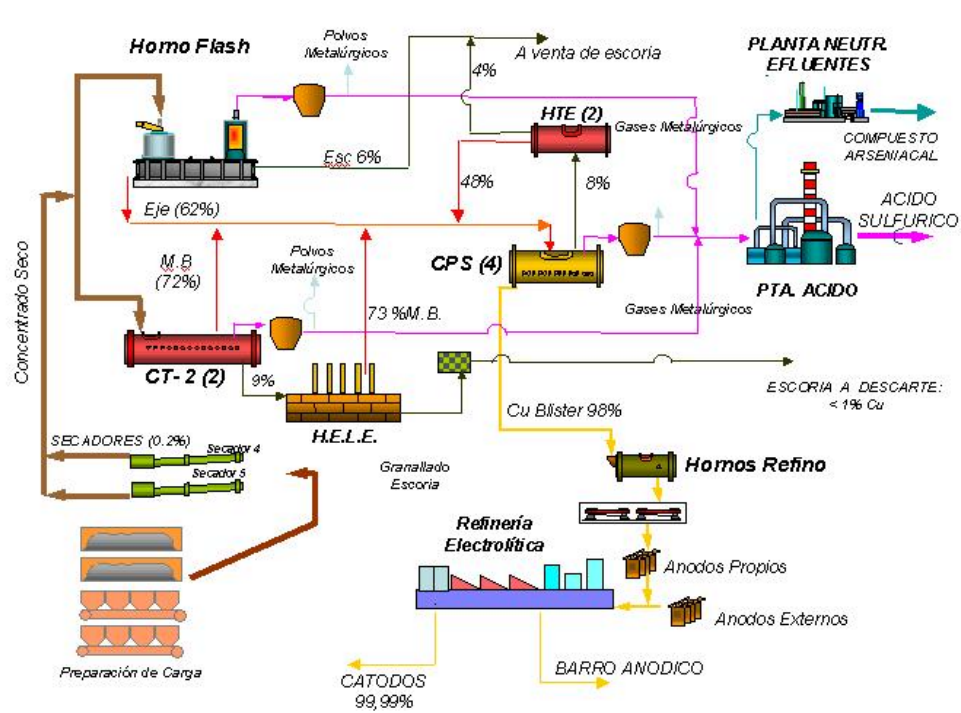


Figura 01: Diagrama de flujo fundición Codelco Chuquicamata

Los equipos que posee la fundición de concentrado para poder generar los ánodos se muestran en la siguiente tabla:

Tecnología Fusión	Información
1 Convertidor Teniente	2.200 [ton / día] 72% Cu M. Blanco
1 Horno Flash	2800 [ton / día] 62% Cu Metal Blanco
Tecnología Conversión	
4 Convertidores Peirce-Smith	con 2,3 unidades soplando
Tecnología Moldeo	
3 Ruedas M – 24	50 [ton / día] velocidad moldeo

Tabla 03: Equipos disponibles proceso fusión, conversión y moldeo

"Fitoremediación de Zonas de Transferencia de Polvos contaminadas con arsénico por medio del uso del helecho Pteris Vittata" Codelco Norte Chuquicamata.

2.3 Procedencia del Problema

2.3.1 Características generales polvos metalúrgicos

Los polvos metalúrgicos son generados durante gran parte del proceso de fundición de concentrado, son productos que provienen desde los equipos de fusión y el convertidos Peirce-Smith (CPS) y estos son retirados por el tren de gases de la fundición.

El contenido químico de los polvos metalúrgicos esta formado en su gran mayoría por cobre y arsénico, además de contener Fe, S, Zn e I. Con una producción diaria máxima de 216 $\left[\frac{ton}{día} \right]$

La caracterización general se resume en la siguiente tabla:

	Valor	Unidad
Polvos por día	216	[ton]
Ley Cu	16	%
Fino Cu	34,6	[ton]
Ley As	22	%
Fino As	47,6	[ton]

Tabla 04: Características generales polvos

Cada sistema de colección está basado en rastras que transportan el polvo hacia tolvas y sistemas de transporte neumático que envían el producto hacia un contenedor de almacenamiento conocida como la tolva tripartita.

Además, cada sistema de colección de polvos posee algunos puntos de descarga de material grueso el cual no puede ser transportado de manera neumática, por lo que precisa un manejo especial por medio del uso de contenedores. El almacenamiento posterior de estos materiales se realiza en una cancha llamada la Zona de Transferencia de Polvos.



Figura 02: Tolva tripartita

2.3.2 Diagramas de flujo de equipos; generación de polvos metalúrgicos

A continuación se presentan tres diagramas de flujo de los equipos de la fundición en que se generan los polvos metalúrgicos.

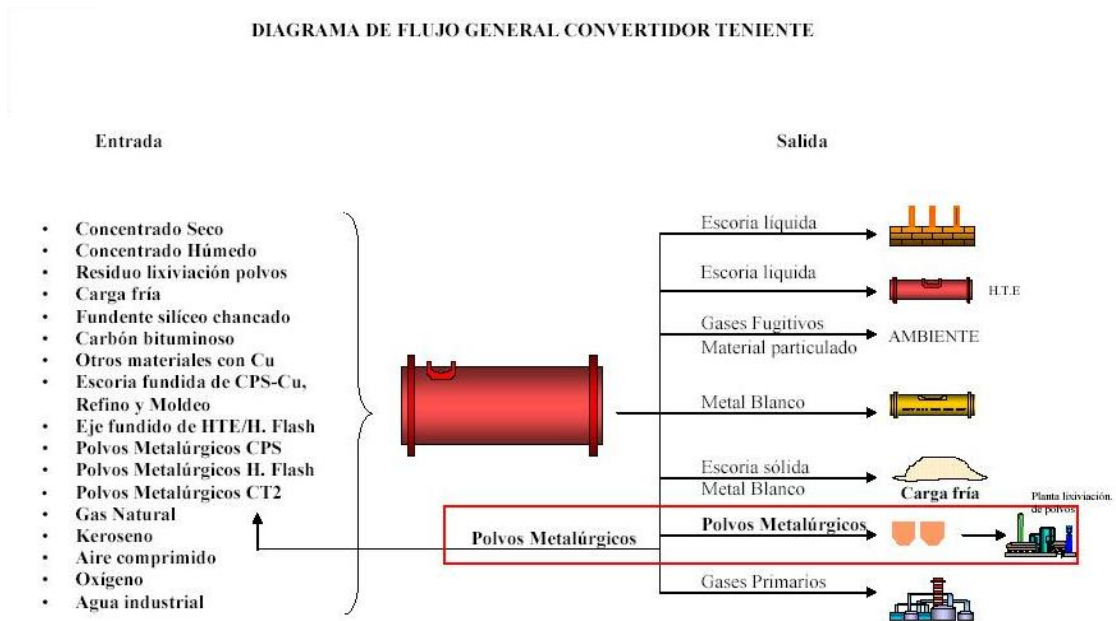


Figura 03: Procedencia polvos metalúrgicos CT2

DIAGRAMA DE FLUJO GENERAL HORNO FLASH

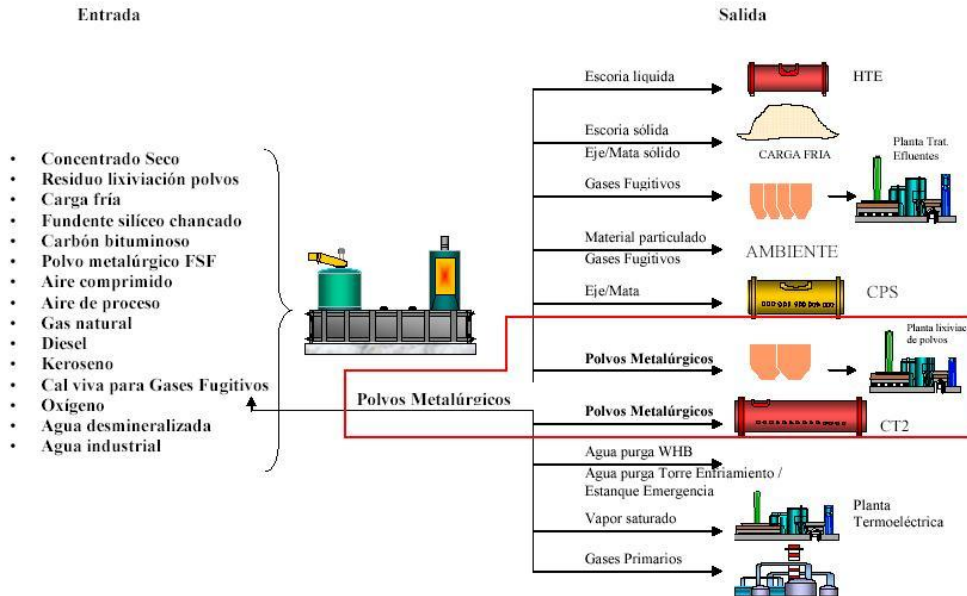


Figura 04: Procedencia polvos metalúrgicos Horno Flash

DIAGRAMA DE FLUJO GENERAL CONVERTIDORES PEIRCE-SMITH

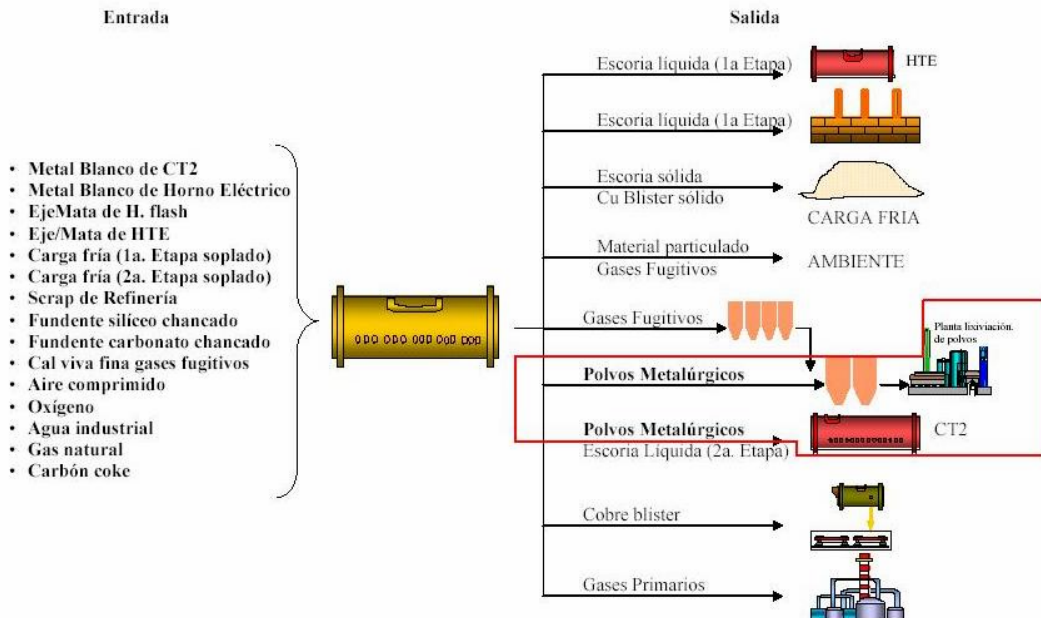


Figura 05: Procedencia polvos metalúrgicos Convertidor Peirce - Smith

2.3.3 Zona de Transferencia de polvos Codelco Norte

La Zona o cancha de Transferencia de Polvos es donde los polvos metalúrgicos se almacenan temporalmente esperando ser trasladados hacia la planta de tratamiento de polvos (PTP); lugar en donde se recupera el arsénico y el cobre contenido en los polvos.

La Zona de Transferencia de Polvos esta ubicada en Latitud 22° ,18'56" S 68° ,52'49" W con una longitud aproximada de 200 [m] de largo por 100 [m] de ancho.



Figura 06: Foto Zona de Transferencia de Polvos

En el futuro se extraerá la totalidad de polvo contenido en la zona (el polvo se puede apreciar en la foto en forma de montículos color gris) quedando a la vista solamente el suelo que se encuentra debajo, por lo que es en ése instante cuando se desea recuperar el suelo que se utilizó para el almacenamiento transitorio de los polvos.

El suelo a recuperar se encuentra bajo la capa gris que se puede apreciar en la fotografía, por lo que se hicieron las pruebas correspondientes para saber la real condición del piso, se espera

que el arsénico haya traspasado un poco hacia abajo, por lo que se busca acondicionar el proceso de fitoremediación para limpiar el suelo contaminado.

2.3.4 Tratamiento de polvos metalúrgicos

Actualmente se encuentra en funcionamiento la planta de tratamiento de polvos (PTP) que trabaja utilizando una lixiviación ácida. Este proceso consiste en tratar los polvos con agua ácida a pH 1,2 para de esta manera disolver el cobre que se encuentre en ellos de la forma de compuestos oxidados y de algunos sulfuros secundarios presentes en los polvos.



Figura 07: Descarga en Zona de Transferencia de Polvos

Luego estos polvos son enviados a la PTP desde la División Codelco Norte en camiones tipo “cementeros” los cuales están completamente sellados, y son capaces de cargar desde 20 a 30 toneladas por pasada, estos camiones fueron especialmente diseñados para este tipo de transporte, para minimizar la contaminación por polvo transportado.

Luego el polvo es fluidizado dentro del camión por medio de aire a presión cercana a 1,5 [bar]. Esto permite retirar el polvo a través de una línea de 4 [pulg.] (10,16 [cm]), de esa manera se transporta hacia un estanque con agitación energética que tiene por fin contactar el polvo de inmediato para generar la mínima emisión al ambiente. El estanque está sellado y posee un filtro en el respirador superior para captar todas las partículas que se puedan haber escapado.

2.4 Conclusiones capítulo II:

Se entrega una visión general acerca de los procesos productivos de la fundición más grande del mundo, la técnica de fundir cobre es una arte el cual se lleva a cabo a gran escala en la Fundición de Concentrado de Codelco Norte Chuquicamata, es un proceso muy complejo, en que intervienen muchas variables que se conjugan en un producto llamado cobre anódico.

El polvo generado en forma de gases de combustión en la fundición, es recuperado y concentrado por medio del uso de precipitadores electrostáticos que entregan el polvo listo para ser almacenado.

El paso transitorio por la Zona de Transferencia de Polvos, ha depositado una cantidad de arsénico desconocida en los suelos que se encuentran debajo de los montículos de polvo metalúrgico y por medio de esta investigación se desea entregar solución al suelo dañado que yace bajo estos polvos.

3 CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN PROCESO DESCONTAMINACIÓN

3.1 Resumen capítulo III

La fitoremediación nace como solución al problema de terrenos contaminados con elementos nocivos para la salud, existe la posibilidad de fitoremediar desde plomo hasta uranio, por lo que es considerada una opción nueva, moderna e interesante de limpiar terrenos y recuperar elementos.

En este capítulo se entrega la descripción de la propuesta del proceso fitoremediación para el caso específico del arsénico en la Zona de Transferencia de Polvos de Codelco Norte, se presenta un proceso de limpieza de suelos que consta de cinco módulos principales, la fitoextracción (absorción del contaminante), cosecha de la planta, secado, compresión y finalmente la extracción del contaminante desde la planta.

Se entrega primero una mirada con detenimiento a la fitoextracción, a escala elemental dentro de la planta, con cada uno de los pasos y las características especiales que posee la *Pteris Vittata* para poder recoger este elemento desde los suelos.

Después de un tiempo, cuando las plantas crezcan, será necesario podarlas, las hojas deberán ser transportadas al siguiente paso del proceso que corresponde al secado de las hojas al sol, de esta manera se busca romper las células que albergan el contaminante, las hojas secas son prensadas y una vez que se alcanza una densidad de material orgánico deseado, se procede al siguiente paso.

Las hojas una vez secas y reducidas en tamaño, se riegan con un flujo ácido nítrico el cual va mojando la composta para poder recuperar el arsénico en solución.

3.2 Propuesta de proceso de descontaminación

Para el sistema completo de descontaminación, se propone un ciclo sencillo que cuenta con cinco módulos bases, los cuales representan la estructura fundamental del proceso de limpieza.

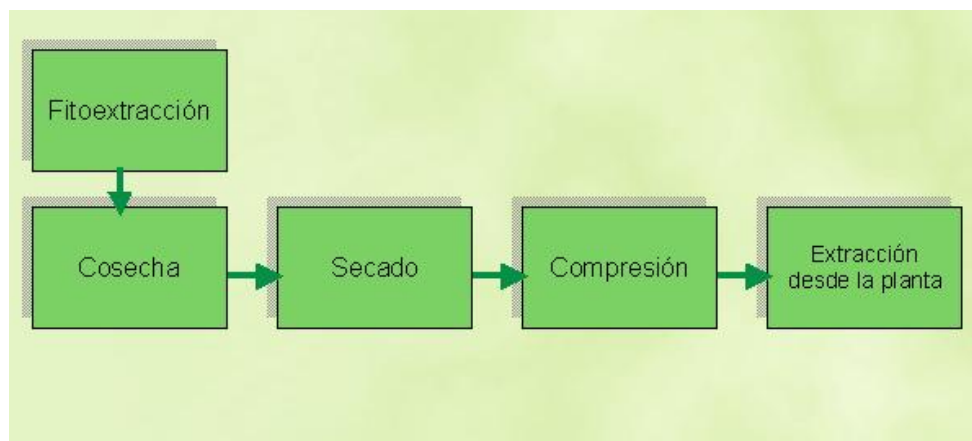


Figura 08: Proceso descontaminación

Los módulos presentados en el esquema anterior serán explicados brevemente:

1. **Fitoextracción:** Corresponde a la primera etapa del proceso, en donde el arsénico que se encuentra en el lugar contaminado es absorbido por las raíces de la planta y por medio de un proceso bioquímico es acumulado en las hojas. Las especies factibles de usar para esta etapa debido al nivel de su estudio y la información existente, corresponden a dos ejemplares principales; *Pteris Vittata* y *Edenfern™*¹¹ la segunda corresponde a una variación genética de la primera, por lo que el mecanismo de absorción es básicamente el mismo.
2. **Cosecha:** Se deben cosechar las hojas superiores de la planta para poder recuperar desde ahí el arsénico, este bloque es importante ya que de esta manera se asegura que el contaminante sea recuperado y no vuelva al piso, si no se cosechan las hojas a tiempo, estas pueden caer y devolver el contaminante al suelo.

¹¹ Edenfern Edenspaces, < <http://www.edenspace.com/edenfern.html> > [consulta: 10 de Agosto 2006]

"Fitoremediación de Zonas de Transferencia de Polvos contaminadas con arsénico por medio del uso del helecho *Pteris Vittata*" Codelco Norte Chuquicamata.

3. **Secado:** Para procesos de percolación donde se desea retirar una sustancia o elemento desde un sólido, es necesario realizar el acondicionamiento previo del sólido a tratar, en este caso como se trata de una composta vegetal, es necesario secarla al sol, ya que de esta manera después de un tiempo, las paredes celulares que alojan el elemento se rompen, por lo que facilitan la liberación del arsénico, aumentando la velocidad de reacción con el lixiviante.

4. **Compresión:** La compresión se realiza para aumentar la densidad de la composta vegetal, de esta manera se disminuye el volumen de la composta para poder procesar mayor cantidad por pasada.

5. **Extracción de arsénico desde la planta:** Para esta etapa se diseña un ciclo de percolación en donde se desea utilizar un reactor capaz de retirar el contaminante alojado en las hojas de las plantas cosechadas traspasándolo a una solución rica en arsénico. La solución retirada, rica en arsénico, se deberá tratar posteriormente para poder precipitar y estabilizar el contaminante, esto se logrará usando Cal, la cual forma un precipitado estable y seguro.
Este paso no forma parte de esta memoria, ya que actualmente se posee el sistema requerido en la planta de ácido de Codelco Norte División Chuquicamata.

3.3 Recuperación desde el suelo: Fitoextracción

Como solución al problema del arsénico depositado por años en los terrenos aledaños a las mineras se presenta la fitoremediación¹² la cual consiste en retirar los contaminantes presentes en los terrenos afectados por medio de la absorción en plantas vegetales.

El significado de fitoremediación se puede deducir por medio del desglose de la palabra, donde el prefijo Fito (Phyto) se utiliza para la denominación de plantas y remediación que significa dar una solución a un daño o problema.

Como lo muestra la figura a continuación la fitoremediación consiste en usar plantas que tienen la capacidad de retirar contaminantes desde el suelo (representados con la letra blanca C), llevarlo hacia las raíces de la planta, para finalmente transportarlo y acumularlo en el follaje.

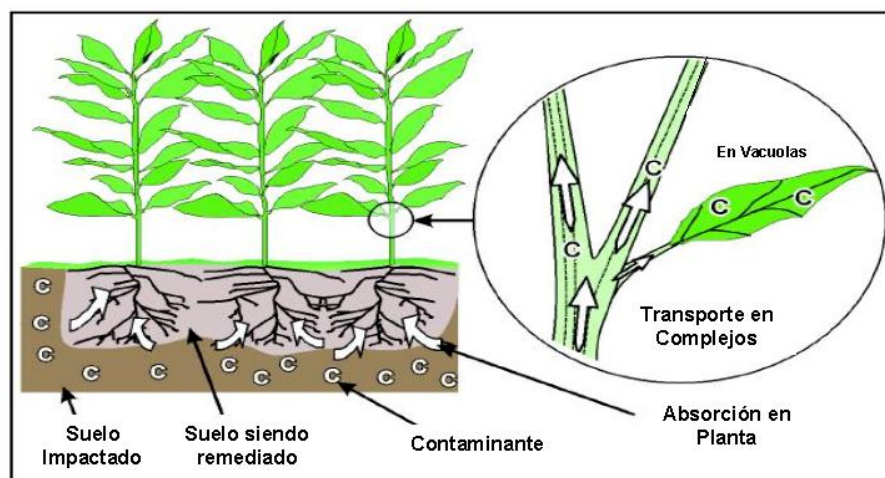


Figura 09: Fitoremediación

La fitoremediación se define como la utilización de plantas vegetales para llevar a cabo acciones de eliminación o transformación de contaminantes. La ventaja de esta técnica se basa en lo bajo de su costo, su contribución a la estabilización y limpieza del suelo tratado, la mejora del paisaje además reduce los lixiviados de agua y el transporte de los contaminantes inorgánicos del suelo por medio de su propagación por debido al viento, aunque evidentemente el tiempo requerido para llevar a cabo este tipo de remediación es más largo que el utilizado en otras tecnologías.

¹² Ambiente Ecológico <http://www.ambiente-ecologico.com/ediciones/2003/087_02.2003/087_Investigacion_ValquiriaCampos_Esp.php3>[consulta: 12 de Agosto 2005]

"Fitoremediación de Zonas de Transferencia de Polvos contaminadas con arsénico por medio del uso del helecho *Pteris Vittata*" Codelco Norte Chuquicamata.

3.3.1 Mecanismo de absorción del contaminante en la planta

A continuación se muestra el mecanismo de absorción¹³ para el caso especial de fitoremediación de suelos contaminados con arsénico por medio de la *Pteris Vittata*; helecho endémico proveniente desde China, actualmente expandido por gran parte del mundo.

Primero se muestra un esquema gráfico con el sistema de fitoextracción y luego un diagrama de bloque del proceso llevado a cabo por la planta:

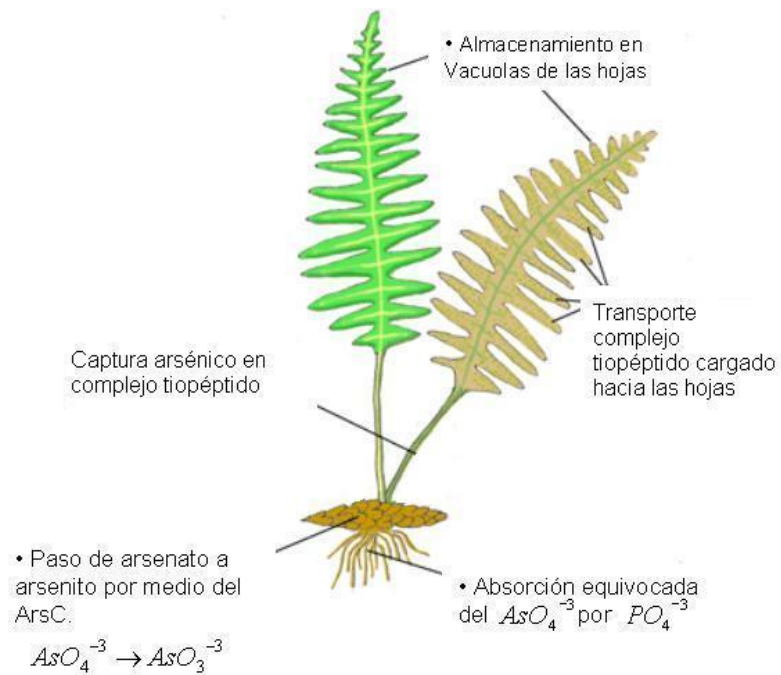


Figura 10: Esquema absorción planta

¹³ Strategies for the phytoremediation of arsenic, <http://www.genetics.uga.edu/rbmlab/phyto/Asstrategies.html> [consulta: 25 Abril 2006]

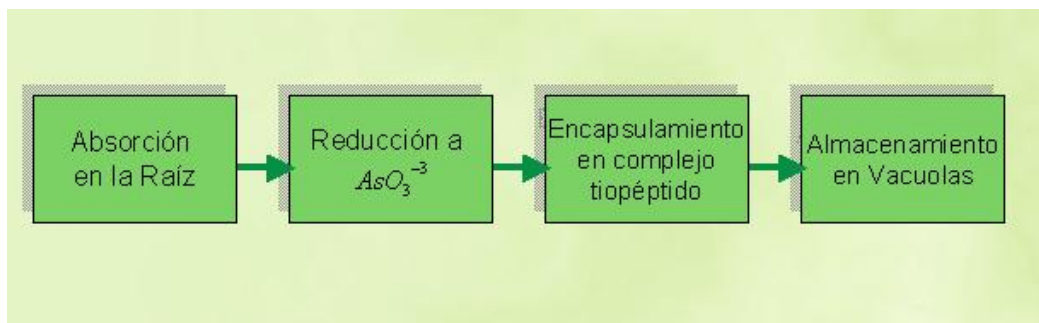


Figura 11: Diagrama de bloque absorción arsénico en Pteris Vittata

El mecanismo de fitoextracción esta formado por cuatro etapas importantes:

1. **Absorción en la raíz:** El arsénico entra por error a la planta en la forma de arsenato AsO_4^{-3} (con As en estado de oxidación +5), el cual es reconocido incorrectamente por la planta como un fosfato y es recogido por la raíz de la planta por medio de la cinética de Michaelis - Menten de interacción enzimática.
2. **Reducción a AsO_3^{-3} :** Este tipo de plantas, posee una enzima llamada “Escherichia Coli arsenato reductasa” **ArsC**, la cual es capaz de reducir el arsenato a arsenito AsO_3^{-3} , usando el Glutati6n como el donante de electrones¹⁴.

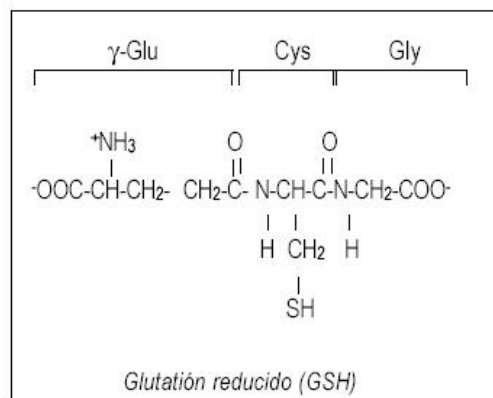


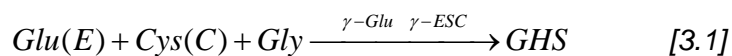
Figura 12: Glutati6n (GSH) gamma-glutamil - cistenil - glicina

¹⁴ Phytoremediation Biological remediation of environmental problems using plants 2002

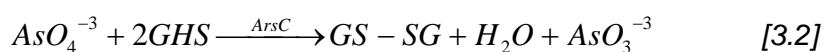
<<http://www.mobot.org/jwcross/phytoremediation/>> [consulta: 02 Mayo 2006]

“Fitoextracci6n de Zonas de Transferencia de Polvos contaminadas con ars6nico por medio del uso del helecho Pteris Vittata” Codelco Norte Chuquicamata.

Para la formación del GSH, 3 moléculas reaccionan gracias a la acción combinada de las enzimas γ -glutamyl cistenil glicina sintetasa y γ -ESC¹⁵:



Luego el **GSH** obtenido en la ecuación [3.1] es utilizado en la siguiente reacción [3.2] para la transformación del arsenato a arsenito por medio de la enzima **ArsC**:



El GSH que fue separado a **GS – SG** en la reacción anterior ver ecuación [3.2], es capaz de regenerarse una y otra vez por medio de la acción de la glutatión reductasa para así poder entregar constantemente los electrones que se necesitan en la reducción del arsenato.

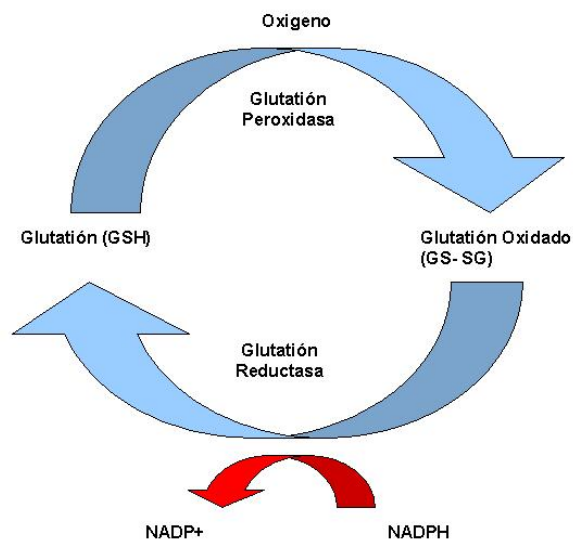


Figura 13: Regeneración del (GSH)

¹⁵ Ute Kramer Phytoremediation: novel approaches to cleaning up polluted soils Elsevier Science Direct 2006.

"Fitoremediación de Zonas de Transferencia de Polvos contaminadas con arsénico por medio del uso del helecho Pteris Vittata" Codelco Norte Chuquicamata.

Luego el AsO_3^{-3} obtenido es inmovilizado por medio del complejo tiopéptido para su transporte hacia las vacuolas en donde finalmente es almacenado.

3. **Encapsulamiento en complejo tiopéptido:** Luego en el tallo de la planta el arsenato generado en el paso anterior AsO_3^{-3} es separado y el átomo As^{+3} almacenado por un complejo tiopéptido. Los péptidos son un tipo de moléculas formadas por la unión de varios aminoácidos mediante enlaces peptídicos, el enlace peptídico tiene lugar mediante la pérdida de una molécula de agua entre el grupo amino de un aminoácido y el carboxilo de otro, el resultado es un enlace covalente CO-NH.

Se llama péptido a una cadena de aminoácidos menor a diez, el prefijo tio (thio) significa que esta formado por un radical, y al final un átomo de azufre e hidrógeno.

Experimentalmente se descubrió en una patente¹⁶ de la doctora Lena Q. Ma que el arsénico está presente en las vacuolas de la manera As^{+3} se muestra en la siguiente figura la cual representa una cromatografía del As^{+3} desde una solución extraída desde las hojas seguida de una extracción realizada en una columna Sephadex G-25.

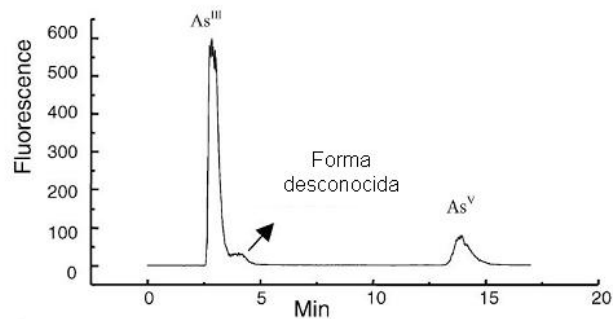


Figura 14: Cromatografía de masa para As^{+3} extraído desde las hojas.

¹⁶ Weihua Zhang a, Yong Cai a, Kelsey R. Downmumb, Lena Q. Mac. Arsenic complexes in the arsenic hyperaccumulator *Pteris Vittata* (Chinese Brake Fern). Department of Chemistry and Biochemistry and Southeast Environmental Research Center, Florida International University, 2004. 249-254p Journal of Chromatography Elsevier.

En la misma patente, por medio de análisis in vitro de estabilidad de complejos comparando los pH presentes en las hojas se llegó a dos posibles candidatos, sin embargo uno es muy inestable por lo que se sospecha que el complejo responsable de la desintoxicación del As^{+3} para su almacenamiento corresponde al complejo $As^{+3} - PC_2$, el cual es estable a pH 4 correspondiente a su medio de formación en las hojas.

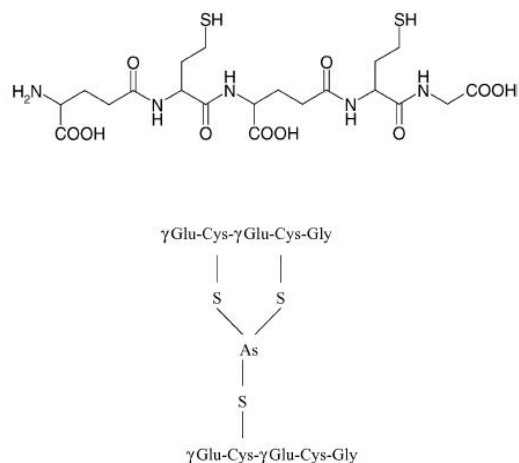


Figura 15: Primero la estructura del PC y luego la molécula albergando el átomo de As^{+3} en forma de complejo.

Este complejo resulta ser insensible a cambios de temperatura e iones metálicos, pero principalmente sensible a los cambios de pH, característica importante para el proceso de extracción del contaminante desde la planta.

El arsenito posee gran afinidad por los complejos, de esta manera se limita e inmoviliza dentro de las células donde fue formado.

4. **Almacenamiento en vacuolas:** El contaminante al cual su toxicidad ya fue controlada por el encapsulamiento en un complejo, es transportado hacia las hojas, quedando atrapado en las vacuolas de la planta.

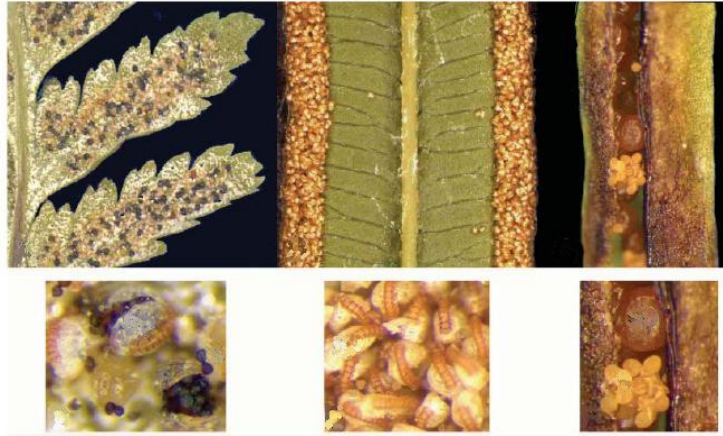


Figura 16: Hojas de Pteris Vittata analizadas bajo microscopio.

En la Figura¹⁷ 16 se puede observar el arsénico depositado dentro de las vacuolas, las cuales son una especie de receptáculo de desechos que se encuentra en el citoplasma de la célula en la epidermis de la hoja, de esta manera la planta consigue crear un mecanismo natural de defensa contra los depredadores.

¹⁷ Luke Gumaelius, Brett Lahner,

"Arsenic hyperaccumulation in gametophytes of pteris vittata. a new model system for analysis of arsenic hyperaccumulation", Plant Physiol. Vol. 136: 3198-3207 Marzo 2004

"Fitoremediación de Zonas de Transferencia de Polvos contaminadas con arsénico por medio del uso del helecho Pteris Vittata" Codelco Norte Chuquicamata.

3.4 Extracción de arsénico desde los helechos

El proceso de extracción del contaminante desde la planta es muy importante, ya que es la base para poder obtener el arsénico estabilizado y evitar su vuelta al medio ambiente.

A continuación se presenta de manera general el proceso de extracción desde la planta que prosigue a la cosecha de las hojas.

3.4.1 Preparación de la biomasa

Muchos productos orgánicos naturales se separan de sus estructuras originales mediante lixiviación¹⁸. Por ejemplo, el azúcar se separa por lixiviación de la remolacha con agua caliente, los aceites vegetales se recuperan a partir de semillas, como las de soya y de algodón mediante la lixiviación con disolventes orgánicos, además muchos productos farmacéuticos se recuperan a partir de raíces y hojas de plantas.

El té y el café se preparan doméstica e industrialmente por operaciones de lixiviación.

Los cuerpos vegetales y animales tienen una estructura celular, los productos naturales que se van a lixiviar a partir de estos materiales se encuentran generalmente dentro de las células o vacuolas. Si las paredes celulares permanecen intactas después de la exposición a un disolvente adecuado, entonces en la acción de lixiviación interviene la ósmosis del soluto a través de las paredes celulares. Éste puede ser un proceso lento. Sin embargo, moler el material a trozos pequeños como para liberar el contenido de las células es poco práctico y algunas veces indeseable.

Así, la remolacha se corta en rebanadas delgadas, antes de la lixiviación, a fin de reducir el tiempo requerido para que el agua disolvente llegue a cada célula vegetal. Sin embargo, las células se dejan deliberadamente intactas, de forma que el azúcar pase a través de las paredes celulares semipermeables y que los indeseables materiales coloidales y albumínicos queden casi completamente detrás.

En el caso de muchos productos farmacéuticos, recuperados a partir de raíces, tallos y hojas vegetales, el material vegetal con frecuencia se seca antes del tratamiento; esto favorece la ruptura de las paredes celulares y la liberación del soluto mediante la acción directa del disolvente.

¹⁸ Robert E. Treybal Operaciones de Transferencia de Masa traducido por Amelia García Rodríguez 2da edición Mc graw Hill Buenos Aires Difusión y Transferencia de Masa p23 – 140 Lixiviación p792 – 819.

"Fitoremediación de Zonas de Transferencia de Polvos contaminadas con arsénico por medio del uso del helecho *Pteris Vittata*" Codelco Norte Chuquicamata.

Para esta etapa se procederá a secar las hojas al sol, para romper las células que contienen el arsénico, esto se hará dentro del reactor a utilizar, para luego comprimir y comenzar con la lixiviación del arsénico.

3.4.2 Percolación

Los sólidos que poseen un tamaño intermedio, pueden ser tratados por medio del uso de tanques de percolación, estos tanques permiten la lixiviación del arsénico por medio de la colocación del sólido en un fondo de rejilla o filtro el cual recibe el sólido previamente tratado para ser lixiviado. La construcción de estos tanques es relativamente sencilla, deben ser contruidos de materiales que no sean atacados por los componentes de la reacción. Son tanques relativamente baratos, y similares a los reactores. La construcción más sencilla consiste en un fondo falso el cual puede estar construido de madera y una rejilla intercalada para que descansa la composta vegetal.

Este enrejado esta diseñado para que una vez que el sólido fue lixiviado, se extraiga el licor por el fondo y luego la biomasa quede sobre el enrejado para poder retirarla.

Sobre el enrejado de madera se puede colocar una lona tensa para asegurarse de filtrar correctamente sin dejar pasar fase orgánica al licor. Este converge hacia un set de cañerías colocadas al fondo del reactor las cuales fluyen hacia fuera del reactor.

Los estanques también pueden construirse completamente de metal con fondos perforados, sobre el cual se coloca una tela filtro, que puede ser reemplazada cuando sea necesario.

Este tipo de tanque, no muy grande, puede tener compuertas laterales cerca del fondo para extraer el sólido lixiviado una vez que se ha retirado todo el arsénico desde las hojas.

Es necesario que la composta vegetal tenga un tamaño uniforme y no tan pequeño para que sea más sencillo manejarlos antes y después de la extracción. De esta manera el porcentaje de huecos es mayor y menor la caída de presión, para el flujo líquido de lixiviación¹⁹.

Se desea mezclar las funciones de un reactor con fondo falso para poder realizar la reacción de dilución del arsénico, por lo que se va ir regando el sólido con el liquido lixivante, hasta sumergirlo, luego una vez realizada la extracción se procederá a percolar el liquido abriendo la válvula de salida para retirar el licor por bajo el fondo.

¹⁹ Warren L. Mac Abe, Julian C. Smith, Peter Harriot Operaciones Unitarias en Ingeniería Química traducido por Elita Guardiola Fomento 4ta edición Mc graw Hill Madrid 1991 Lixiviación y extracción p518.

"Fitoremediación de Zonas de Transferencia de Polvos contaminadas con arsénico por medio del uso del helecho *Pteris Vittata*" Codelco Norte Chuquicamata.

Después de que el estanque se carga con sólido, se agrega lentamente un lote de disolvente, lo suficiente para sumergir al sólido, se estudiará la posibilidad de bombear en el tanque y dejar que toda la masa se empape o remoje durante cierto periodo. A lo largo de este periodo, el lote del líquido puede circularse sobre el sólido mediante bombeo. Finalizado el proceso, el líquido puede drenarse del sólido a través del fondo falso del tanque. Toda esta operación representa una sola etapa. Con la repetición de este proceso se obtendrá la disolución final de todo el soluto. Entonces, el único soluto retenido es el que está disuelto en la solución que humedece al sólido drenado. Por medio de la cinética de reacción de un proceso batch se determinará la cantidad de tiempo que necesita estar operando para la correcta extracción del licor con arsénico.

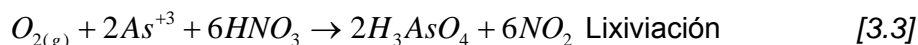
- **Reacción propuesta para la etapa**

La Dra. Lena Q Ma pionera en el estudio del helecho *Pteris Vittata*, muestra en otra de sus patentes²⁰, el método usado para la extracción del contaminante desde las hojas en el laboratorio.

Esta experiencia se llevó a cabo como método cuantitativo en el estudio de la capacidad que el hiperacumuladora de arsénico de la *Pteris Vittata*, lo interesante de acerca de este procedimiento es que utiliza ácido nítrico para efectuar la extracción del arsénico presente en la planta para traspasarlo a una solución desde donde finalmente es medido.

Por lo tanto para retirar el arsénico presente en las hojas y llevarlo a una solución de ácido arsénico, se propone para el ciclo de extracción el uso de ácido nítrico debido a su acción solubilizadora de arsénico ya comprobada por la doctora Lena Q. Ma.

Por lo tanto la reacción que gobierna este proceso es:



²⁰ Lena Q. Ma; Ken M Komar, Methods for removing pollutants from contaminated soils materials with a fern plant US 6,302,942 Oct. 2001

"Fitoremediación de Zonas de Transferencia de Polvos contaminadas con arsénico por medio del uso del helecho *Pteris Vittata*" Codelco Norte Chuquicamata.

3.5 Conclusión capítulo IV

En este capítulo se presentó el sistema de absorción de arsénico de la *Pteris Vittata*, planta que posee la capacidad especial de hiperacumular arsénico en sus hojas.

La planta logra transformar y luego encapsular el contaminante, aislando completamente por medio del complejo tiopéptido el átomo de arsénico, de esta manera se crea una cobertura en torno a este átomo envolviendo y protegiendo la planta de los efectos dañinos del metal.

Una vez realizada esta etapa el contaminante es transportado hacia las hojas en donde se depositan en las vacuolas, este sistema da como resultado una planta que es capaz de recoger el arsénico contenido en el suelo.

No sería una buena idea una vez acumulado al arsénico en la planta dejarlo volver al suelo, o botarlo directamente a la basura como lo hacen los métodos tradicionales de fitoremediación, todo esto debido a la gran toxicidad del contaminante, si bien la planta lo tiene encapsulado minimizando sus efectos tóxicos, siempre hay que tener cuidado con el manejo del arsénico.

Se propuso en este capítulo la extracción del arsénico desde la planta, por medio de la creación de un sistema el cual pueda lixiviar el arsénico desde las hojas y llevarlo a solución.

Esto se llevará a cabo en un reactor percolador alimentado ácido el cual entregará como producto una solución de ácido arsénico.

Los complejos tio - péptidos formados son inestables a los cambios de pH, por esta razón y debido a las experiencias realizadas por la doctora Lena Q Ma, es que se decide utilizar el ácido nítrico para la solubilización del arsénico, el ácido al entrar en contacto con el arsénico forma ácido arsénico, el cual permanece en forma líquida, de esa manera se puede recuperar el contaminante desde las hojas de la planta por el fondo del reactor percolador.

Para la preparación de la composta vegetal se propone secar las hojas al sol, debido a que el contaminante se encuentra en las células de la planta, es necesario abrirlas para mejorar la velocidad de reacción.

4 CAPITULO IV: SELECCIÓN DE ESPECIE PARA FITOEXTRACCIÓN

4.1 Resumen capítulo IV

En este capítulo se presentan las principales características de dos plantas capaces de realizar hiperacumulación; *Pteris Vittata* y *Edenfern™*. Se entrega información general acerca de la primera como lugar de residencia natural y clima necesario para crecer, por otra parte se presenta la *Edenfern™*, que corresponde a un helecho que ha sido alterado genéticamente por la empresa *Edenspaces™* que promete un rendimiento mayor al de la planta natural,

Se caracterizan los suelos a ser tratados, por medio del muestreo y el desarrollo de un análisis foliar completo y de concentración total de arsénico. Se busca una planta sustituta por medio de la asesoría de un doctor en botánica, que fuese físicamente similar a la propuesta, ya que la *Pteris Vittata* no se encuentra en Chile para realizar las observaciones de los parámetros característicos de la planta.

Una vez obtenidos los datos del lugar y planta a utilizar se desarrolla el modelo matemático que describe el comportamiento de la planta en el terreno contaminado determinado, definiendo un volumen de control alrededor de la raíz se realiza un balance de masa cuyo equilibrio químico queda definido por las ecuaciones características de transferencia de masa.

Con el contacto del director del departamento de Ciencias Ambientales de la Universidad de California Riverside, y por medio de una red de cooperación, se obtiene el programa simulador S.T.E.M. el cual entrega los detalles de predicción de resultados que funciona con el mismo balance de masa antes calculado.

Este programa ya ha sido utilizado en la tesis doctoral de Mauricio Molina R, de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

Finalmente con la información entregada por los fabricantes de *edenfern™* se hace una comparación con respecto a los rendimientos de ambas plantas en un terreno contaminado con 50 [ppm] de arsénico.

4.2 Pteris Vittata

Corresponde a un helecho robusto capaz de hiperacumular arsénico, en otros países puede crecer incluso en la calle sin necesidad de mayores cuidados. Pteris (helecho) es un género que está formado de unas 280 especies siendo nativo de regiones tropicales y subtropicales del mundo.



Figura 17: Pteris Vittata.

- **Clima tropical**²¹: Clima típico de los trópicos. La clasificación ampliamente reconocida de Wladimir Peter Köppen²² lo define como clima no árido en el que los doce meses tienen temperaturas superiores a los 18 °C.
- **Clima subtropical**²³: Propio de las zonas adyacentes a los trópicos; están generalmente caracterizados por veranos muy cálidos y una elevada humedad ambiental a lo largo del año y muy frío en invierno

En las clasificaciones climáticas, el clima subtropical se clasifica por lo general entre los templados. Simplificadamente, suelen definirse como subtropicales las regiones en que la

²¹ Enciclopedia libre http://es.wikipedia.org/wiki/Clima_tropical [Agosto 2007]

²² Meteorólogo, climatólogo y botánico alemán. Elaboró el sistema de clasificación climática de Köppen, usado hasta hoy para agrupar climas

²³ Enciclopedia libre http://es.wikipedia.org/wiki/Clima_subtropical consulta [Agosto 2007]

temperatura media anual no baja de 20 °C, y la mínima del mes más frío del año se encuentra entre esta marca y los 0 °C, pero las distintas clasificaciones contemplan también otros parámetros. Se distinguen también climas subtropicales de humedad constante de aquellos en que una u otra estación es seca; este último es el caso del clima mediterráneo, con veranos muy secos que determinan las características específicas de su flora.

Algunos de estos helechos son populares en el cultivo decorativo, la *Pteris vittata* (comúnmente conocida en Estados Unidos como brake fern) se descubrió que tiene la capacidad de "hiperacumular arsénico en sus frondas" (absorber grandes cantidades de arsénico desde los suelos).

El descubrimiento fue un tanto accidental, el helecho fue creciendo naturalmente en un sitio central de Florida que estaba contaminado con grandes cantidades de arseniato de cobre. La Dr Lena Q. Ma de la Universidad de Florida descubrió más tarde que el helecho había acumulado considerables cantidades de arsénico del suelo. El descubrimiento dio a lugar a la utilización de *Pteris Vittata* como una posible planta de biorremediación.

4.2.1 Ubicación natural del helecho *Pteris Vittata*

Esta planta crece en forma natural en lugares de clima tropical o subtropical véase 4.2 , a continuación se entrega un mapa con los lugares donde se puede encontrar la planta en su hábitat natural dentro de los Estados Unidos²⁴.

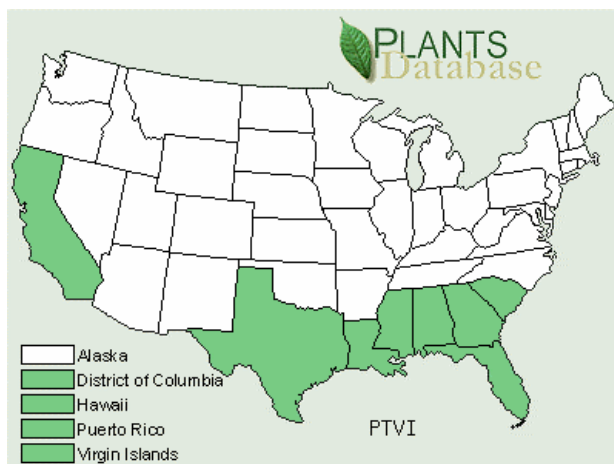


Figura 18: Ubicación natural de la planta en según la base de datos de Estados Unidos

Además se muestra una tabla con los países que poseen la planta de manera silvestre:

<i>Pteris Vittata</i> L.	
Distribución General	<i>California</i> <i>Sur Este Estados Unidos</i> <i>América Central</i> <i>Perú</i> <i>Brasil</i> <i>Antillas</i> <i>Islas Virgenes</i> <i>Barbados</i> <i>Trinidad</i> <i>Asia</i> <i>Africa</i> <i>Australia</i> <i>Hawaii</i>

Tabla 05: Ubicación *Pteris Vittata*

²⁴ US Department of Agriculture Natural Resources Conservation Services <<http://plants.usda.gov/java/profile?symbol=PTVI>> [consulta Abril 2006]

²⁵ "Fitoremediación de Zonas de Transferencia de Polvos contaminadas con arsénico por medio del uso del helecho *Pteris Vittata*" Codelco Norte Chuquicamata.

4.3 Edenfern™

Es una planta perteneciente a una nueva generación de alto rendimiento desarrollada por Edenspace™. Tiene la capacidad especial de que el rendimiento de la planta y la tasa de crecimiento son proporcionales al nivel de arsénico en el suelo.



Figura 19: Edenfern

4.3.1 Características generales del helecho Edenfern™

Según Edenspace™²⁵ el helecho Edenfern™ es una planta que concentra el arsénico del suelo y aguas subterráneas en sus hojas a niveles mayores que 100 veces que en las otras plantas naturales.

El follaje se cosecha para la disposición del contaminante. El proceso de limpieza es mucho más ecológico, y en la mayoría de los casos mucho más barato, que los otros tratamientos alternativos tales como excavación. Se preserva la tierra vegetal mientras que se quita el arsénico.

Algunas características interesantes que ofrece la Edenfern™ son las siguientes según sus creadores:

- La planta no necesita invernadero, Edenfern™ crece bien en situaciones soleadas eso si que la planta necesita drenaje libre, y riego durante períodos secos. Además no es necesario agregar solubilizantes al suelo para diluir el arsénico, es un absorbedor excelente sin el uso de agentes o cualquier otro aditivo.

“Fitoremediación de Zonas de Transferencia de Polvos contaminadas con arsénico por medio del uso del helecho Pteris Vittata” Codelco Norte Chuquicamata.

- La planta necesita de los mismos requisitos de nutrientes que otras plantas, como la aplicación de fertilizante, y un suelo con un pH de aproximadamente 8, recomendable para el crecimiento óptimo, puede sobrevivir los inviernos suaves, sino quizás necesite protección adicional.
- La edenfern™ para reducir la concentración de arsénico en 10ppm desde un suelo que tiene inicialmente 50ppm, toma típicamente cerca de 2 a 4 meses con una velocidad calculada de entre **2,5 – 5ppm por mes**. La edenfern™ puede extraer el arsénico de un suelo desde una gama de concentraciones presente en el suelo que se extienden de menos de 1ppm hasta 2.500ppm.
- La planta es capaz además de limpiar el agua subterránea, la edenfern™ quita el arsénico eficazmente en el caso de un agua suavemente contaminada, edenfern™ podría reducir el arsénico a los límites del agua potable en el plazo de dos días.
- La edenfern™ es una planta visualmente atractiva que puede alcanzar 60 a 100 [cm] en altura. El follaje nuevo crece rápidamente después de que se cosechan los viejos, es típicamente es más eficaz en quitar el arsénico de 15 a 30 [cm] de profundidad de suelo. El arsénico que se encuentra en un sitio más profundo se puede tratar a través de la excavación parcial del suelo. Para el tratamiento rápido (una estación de crecimiento), se podría necesitar cerca de una planta por el pie cuadrado (929[cm²]) de área del tratamiento, pero para mayor velocidad se recomienda (cerca de 10 por el metro cuadrado) Para el tratamiento de más largo plazo, se puede utilizar cerca de 4 a 6 por metro cuadrado.
- Las plantas no son peligrosas al tacto o la manipulación. Pero el arsénico es un veneno, por lo que las plantas que han acumulado el arsénico no deben ser comidas por animales. De hecho, una teoría biológica es de que las plantas desarrollaron la capacidad de la acumulación de arsénico para disuadir a los parásitos e insectos.

²⁵ Edenfern Edenspaces, < <http://www.edenspace.com/edenfern.html> > [consulta 10 de Agosto 2006]

*Fitoremediación de Zonas de Transferencia de Polvos contaminadas con arsénico por medio del uso del helecho Pteris Vittata” Codelco Norte Chuquicamata.

- Según el fabricante las hojas cosechadas se deben almacenar en bolsas de plástico o en otro envase hermético para su post tratamiento. El arsénico permanece en la edenfern™ después de que extrae el arsénico de suelo ya que almacena el arsénico en su follaje donde no es volátil.
- Edenfern™ ha probado ser efectiva en una variedad amplia de suelos y de lugares, según el fabricante se usan desde 4 a 10 plantas por metro cuadrado dependiendo de la velocidad de limpieza deseada.

4.4 Datos necesarios

Los datos necesarios para poder efectuar la selección de la planta por medio de comparar sus rendimientos basándose en los tiempos de recuperación de contaminante son:

1) Caracterización del medio a remediar.

- i) Cantidad de arsénico en el terreno (Laboratorio Central Codelco Norte)
- ii) Calidad del terreno (Laboratorio de Suelos de PUCV)

2) Para cálculo rendimiento de la planta en situación local

- i) Parámetros característicos de la planta.

Era necesario conocer las condiciones en el terreno seleccionado, para eso fue necesario hacer primero las pruebas que puedan caracterizar el suelo a tratar.

4.4.1 Caracterización del medio a remediar

Se desarrollará una caracterización del lugar en donde se desea implementar el sistema de fitoremediación; por medio del desarrollo de un perfil de contaminación se desea conocer la cantidad exacta de arsénico contenido en el suelo; luego por un análisis foliar, que consiste en un estudio que entrega la calidad del suelo para cultivo junto con datos importantes acerca de los elementos que lo conforman, se puede llegar a conocer el estado real del lugar en donde se desea implantar el sistema de fitoremediación.

- **Cantidad de arsénico en el terreno (Laboratorio Central Codelco Norte)**

Para la caracterización del suelo a remediar, se visitó la Zona de Transferencia de Polvos, donde se constató de que se trata de un terreno bastante deteriorado. Este terreno es utilizado para almacenar transitoriamente polvos metalúrgicos que son obtenidos en los procesos productivos de la obtención de cobre.

Para saber la magnitud real del problema, se tomaron dos muestras diferentes del terreno para mandarlas al laboratorio.

El proceso de muestreo para la **muestra 1** se llevó a cabo según el procedimiento²⁶ entregado por el C.I.E.F.A.P²⁷. Véase ANEXO C Pág. 33.



Figura 20: Recorrido muestreo Zona Transferencia de Polvos

Luego se escarbaron aproximadamente 30 [cm], hasta que se llegó al suelo original del lugar, el cual posee un color mas claro, se tomó otra muestra y se envió al laboratorio rotulada como **muestra 2**.

²⁶ Carlos Buduba "Muestreo de suelos criterios básicos" Patagonia Forestal, Abril 2004, año X p.9-12

²⁷ C.I.E.F.A.P. Centro de Investigación y Extensión Andino Patagónico de Argentina.

"Fitoremediación de Zonas de Transferencia de Polvos contaminadas con arsénico por medio del uso del helecho *Pteris Vittata*" Codelco Norte Chuquicamata.

- **Resultados Laboratorio Central Codelco Norte: arsénico**

Luego las muestras tomadas el día 2 de agosto de 2007 fueron enviadas al Laboratorio Químico Central de la Gerencia de Estrategia y Control Gestión, en donde se le hizo el perfil de arsénico en suelo llegándose a los siguientes resultados.

Resultados	As %	ppm
Muestra 1	<i>5,76</i>	<i>57.600</i>
Muestra 2	<i>0,03</i>	<i>300</i>

Tabla 06: Resultados análisis cantidad de arsénico en el suelo a remediar

- **Calidad del terreno para cultivar (Laboratorio de Suelos de PUCV)**

Se desea efectuar un estudio de la calidad de suelo para saber si es posible cultivar en ese sector, tener un perfil y ver la calidad del terreno que se quiere remediar.

Para este análisis la muestra retirada fue llevada a Quillota al laboratorio de suelos de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso en donde fue analizada, para ver las características del suelo que se posee y cuales son las posibilidades reales de cultivar en él.

De esta manera se puede saber que es necesario hacer para transformarlo en un terreno mas adecuado para el cultivo. Estos valores pueden ser de gran importancia para el momento de la implementación del proyecto.

- **Resultados análisis fertilidad completa de suelo (Laboratorio de Suelos de PUCV)**

La **muestra 2** fue enviada al laboratorio de suelos de la PUCV, para conocer el real estado del piso de la Zona de Transferencia de Polvos los resultados se presentan a continuación:

Elemento	Cantidad	Unidad
pH	7,3	
CE*	12,9	[mm ohm/cm]
Materia Orgánica	0,06	%
Nitrógeno disponible	12,4	[ppm]
Fósforo disponible	65,6	[ppm]
Potasio disponible	664	[ppm]
Zinc disponible	43,9	[ppm]
Manganeso disponible	2,63	[ppm]
Hierro disponible	8,39	[ppm]
Cobre disponible	271	[ppm]
Densidad aparente	2,13	[g / cm ³]

*CE Conductividad eléctrica

Tabla 07: Resultados Laboratorio calidad de suelo PUCV

Según el análisis realizado al terreno en cuestión, se puede decir que el suelo posee los metales esenciales para poder realizar un buen cultivo, sin embargo es claro que existe un déficit en la cantidad de materia orgánica disponible, la cual puede ser entregada por medio de una fertilización de terreno.

4.4.2 Para cálculo rendimiento de la planta en situación local

Como las especies vegetales capaces de limpiar el terreno contaminado con arsénico, no se encuentran en nuestro país y debido a los largos tiempos de espera que se necesitan para poder llevar a cabo el trámite de internación de nuevas especies al país véase *ANEXO D 1.2 Pág. 37*, se propone hacer una simulación del comportamiento del helecho en las condiciones locales. Por ésta razón es necesario realizar algunas observaciones y conocer ciertos parámetros para poder predecir rendimientos de absorción.

- **Parámetros característicos de la planta**

Debido a que el helecho *Pteris Vittata* no se encuentra en Chile; para poder observar los parámetros característicos de la planta sin necesidad de importarla, se buscó la asesoría del profesor Doctor Patricio Peñailillo²⁸ para localizar alguna planta del medio local con características parecidas para realizar las observaciones necesarias.

- **Búsqueda ejemplar sustituto**

El profesor Patricio Peñailillo ayudó a buscar una planta que tuviese características similares a la *Pteris Vittata* y accedió a recomendar un sustituto que pudiese ser extraído de su medio, para poder conocer el ejemplar y hacer las observaciones pertinentes.

El ejemplar elegido fue el familiar *Pteris Chilensis*, helecho herbáceo, endémico de Chile, el cual crece en el continente desde la provincia de Petorca hasta Osorno.

Se viajó a Talca, para realizar una reunión de cooperación con el profesor Patricio Peñailillo y efectuar el viaje para la extracción de la planta a la provincia de Constitución en donde habita el helecho.

Se retiró de su lugar de origen para ser transplantado a macetas las cuales viajaron finalmente hasta Calama.

²⁸ Patricio Peñailillo colaborador, Profesor de Botánica y Agronomía Universidad de Talca; Licenciado en Biología, Doctor en Botánica Universidad de Chile < <http://biologia.otalca.cl/patricio.html> > [consulta: 25 de Julio 2007]



Figura 21: Pteris Chilensis

Una vez transplantado el helecho, fue trasladado vía terrestre hasta la 5ta región, en donde se le proporcionaron los cuidados necesarios según las recomendaciones dadas por el profesor Patricio Peñailillo.

Después de 4 días de recuperación 3 ejemplares viajaron vía aérea a Calama donde se radicarían por el resto del tiempo.

A continuación se presentan las fotos del transplante, y traslado



Figura 22: Ubicación Natural Helecho Pteris Chilensis



Figura 23: Bosque Constitución a orillas del río Maule



Figura 24: Pequeño helecho *Pteris Chilensis* nativo



Figura 25: Profesor Patricio Peñailillo realizando el trasplante



Figura 26: Retiro de ejemplar *Pteris Chilensis*



Figura 27: *Pteris Chilensis* en macetas, listas para traslado

Por medio de esta secuencia de fotos se muestran los pasos del retiro del ejemplar desde su zona de origen, luego se trasladó hacia la ciudad de Calama el macetero número 2, dejando el número 1 en Viña del Mar, para tenerlo como muestra testigo o reserva.

- **Datos observados Pteris Chilensis**

Parámetro	Valor	Unidad	Medido en
Densidad de raíz helecho	100	[cm / cm ²]	Laboratorio Química PUCV
Densidad fronda	0,042	[g / cm ³]	Laboratorio Química PUCV
pH suelo	6,8		Laboratorio Química PUCV
Tamaño	30	[cm]	Laboratorio Química PUCV
Peso aproximado	50	[g]	Laboratorio Química PUCV

Tabla 08: Datos observados en Pteris Chilensis

4.5 Modelación matemática de proceso extracción arsénico por medio de *Pteris Vittata*

Para poder conocer con anterioridad los resultados de la fitoextracción se desarrollará un modelo de absorción²⁹ de arsénico para la forma natural del helecho *Pteris Vittata*.

De esta manera se pueden predecir los tiempos que necesita la planta para recuperar el contaminante en las condiciones locales, lo que es de gran ayuda al momento de tomar la decisión de que ejemplar utilizar, el factor a comparar será el rendimiento de cada una de ellas.

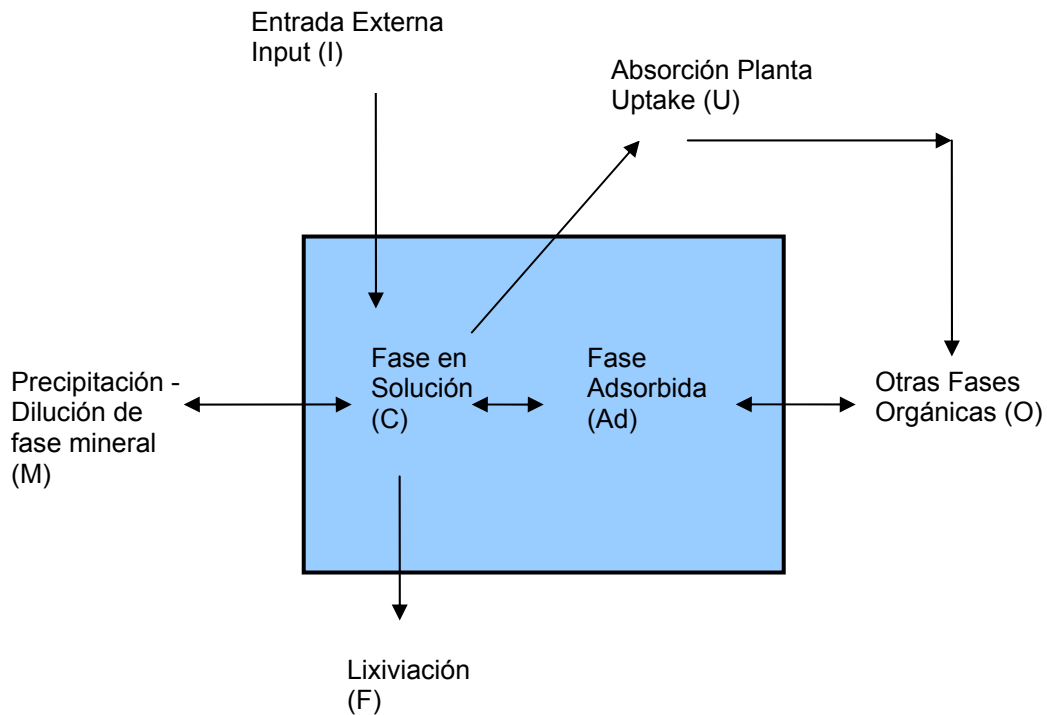
Por medio del conocimiento del rendimiento de la planta se puede determinar de antemano si el ejemplar será capaz de satisfacer las exigencias de la limpieza en el medio local determinando llegando a deducir cuanto tiempo tomaría en limpiar el lugar seleccionado.

Para encontrar el modelo característico representativo del sistema suelo - planta, es necesario desarrollar un balance de masa general del elemento de rastreo; para este caso arsénico.

El modelo considerará los procesos que gobiernan la precipitación - disolución del elemento de rastreo en la fase mineral, la lixiviación en el perfil del suelo, el uptake (absorción) por las plantas, y la reincorporación de los residuos de la cosecha (biomasa) junto con la mineralización de arsénico desde formas orgánicas.

²⁹ Andrew C. Chang, Weiping Chen, Beni Bar-Yosef, Albert L. Page, Seongju Kim. Plant Uptake Parameters. A Generalized Trace Element Mass Balance Model for Cropland Soils: Arsenic and Cadmium. January, 2004, p. 11 - 85

Los procesos interactivos que determinan las concentraciones de arsénico en suelos pueden ser generalizados por medio del sistema de reacciones descritas en el siguiente diagrama esquemático



Volumen de control para modelación de arsénico en sistema alrededor de la raíz

Figura 28: Descripción general esquemática de Balance de Masa del rastreo de elemento

El cambio del elemento de rastreo en el volumen de control del balance de masa global de arsénico presente en el suelo se representa como (Q) con respecto al tiempo. Tomando en cuenta una capa uniforme y perfectamente homogeneizada de suelo, esto se expresa matemáticamente en la siguiente ecuación global:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -\frac{\partial F}{\partial z} + \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial O}{\partial t} - U + I \quad [4.1]$$

Variables	Unidad	Descripción
Q	$\left[\frac{\mu\text{mol}}{L_{\text{suelo}} \cdot h} \right]$	Fracción elemento de rastreo en este caso arsénico.
F	$\left[\frac{\mu\text{mol}}{L_{\text{suelo}} \cdot h} \right]$	Representa la lixiviación de arsénico fuera de la capa del suelo considerado z en [cm] y t [años]
M	$\left[\frac{\mu\text{mol}}{L_{\text{suelo}} \cdot h} \right]$	Corresponde a la cantidad de arsénico en la forma mineral
O	$\left[\frac{\mu\text{mol}}{L_{\text{suelo}}} \right]$	Es el arsénico de forma orgánica contenida en el suelo
U	$\left[\frac{\mu\text{mol}}{L_{\text{suelo}}} \right]$	Es la absorción (uptake) de la planta del suelo.
I	$\left[\frac{\mu\text{mol}}{L_{\text{suelo}}} \right]$	Representa la suma de entradas (Inputs) de contaminante gracias a fuentes externas, entiéndase por contaminación por medio de otras fuentes.
K_d	$\left[\frac{l \text{ solución suelo}}{l \text{ suelo}} \right]$	Corresponde a distribución lineal de adsorción en el suelo
K_{hf}	$\left[\frac{cm}{h} \right]$	Conductividad hidráulica del campo o tasa de percolación.
K_m	$[\mu M]$	Coefficiente de permeabilidad de la raíz
k_f, k_b	$\left[\frac{1}{h} \right]$	Constantes de la tasa de la precipitación y disolución
k_{im}	$\left[\frac{1}{h} \right]$	Tasa de mineralización
R_d	$\left[\frac{cm}{cm^2} \right]$	Densidad de la raíz
σ	$\left[\frac{l_{H_2O}}{l \text{ suelo}} \right]$	Cantidad de agua en el suelo
$C_{(0)}$	$[\mu M]$	Concentración inicial del contaminante en el suelo

Tabla 09: Definición de variables presentes en el modelo

Realizando la linealización y correspondientes reemplazos, véase ANEXO E 3 Pág. 44, la ecuación de balance de masa [4.1] queda redefinida como el modelo que representa la absorción de arsénico desde el suelo contaminado por medio de una planta en plano Laplace:

$$C_{(s)} = \frac{K_1}{[\tau \cdot s + 1]} \cdot J_{\max(s)} + \frac{K_2}{s \cdot [\tau \cdot s + 1]} + \frac{K_3}{[\tau \cdot s + 1]} \quad [4.2]$$

Para la simplificación de la ecuación superior se utilizaron los siguientes reemplazos:

$$\tau = \frac{(K_d + \sigma)}{(K_{hf} \cdot \sigma + k_f(K_d + \sigma))} \quad [4.3]$$

$$K_1 = -R_d \cdot (K_{hf} \cdot \sigma + k_f(K_d + \sigma)) \cdot \left(\frac{C_{(0)}}{K_m + C_{(0)}} \right) \quad [4.4]$$

$$K_2 = (K_d + \sigma) \cdot C_{(0)} \cdot (K_{hf} \cdot \sigma + k_f(K_d + \sigma)) \quad [4.5]$$

$$K_3 = (I - (k_b \cdot M - K_{im} \cdot O)) \cdot (K_{hf} \cdot \sigma + k_f(K_d + \sigma)) \quad [4.6]$$

4.6 Simulación del modelo de absorción: STEM

Para la simulación del modelo presentado se utilizará un programa desarrollado para el proyecto de tesis de un P.h.d. dirigido por el Doctor Andrew C. Chang³⁰ en conjunto con el Doctor Weiping Chen. El cual fue desarrollado con las mismas ecuaciones presentadas anteriormente.

El programa fue enviado personalmente por el Doctor Andrew C. Chang para la simulación de la absorción de la planta en este estudio, los parámetros fueron ajustados a las condiciones locales del suelo y a las características de la *Pteris Vittata* natural, para de esta manera poder modelar y tener resultados de absorción en las condiciones locales.

El programa utilizado fue creado por Dr. Chang, en conjunto con Xuan Wu y Weiping Chen corresponde al modelo de un balance de masa de una capa simple, el programa se llama "Soil Trace Element Model" S.T.E.M."³¹

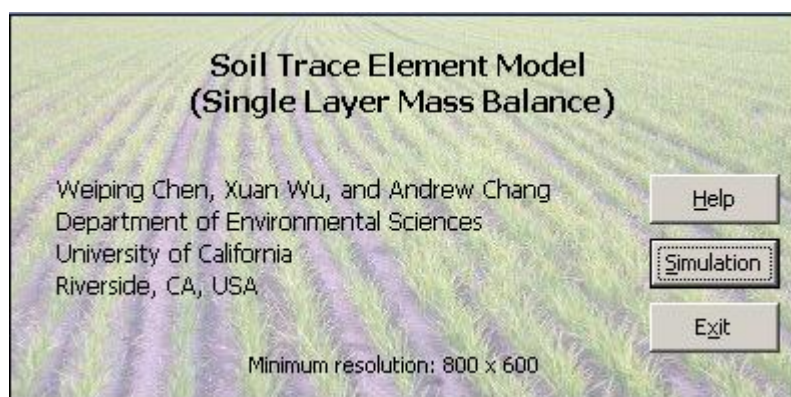


Figura 29: Programa STEM

³⁰ Andrew C. Chang profesor Universidad California RIVERSIDE "Agricultural Engineering", Director UC "Center for Water Resources", Ph.D., Purdue University, Lafayette, Indiana, 1971

³¹ Programa STEM Andrew C. Chang, < <http://www.envisci.ucr.edu/faculty/chang.html> > [consulta: 30 de Julio 2007]

4.6.1 Parámetros utilizados para modelación

Arsénico

- Contenido Total As: Laboratorio Central Codelco Norte Véase 4.4.1 Pág. 50
- Fase Mineral: Escalamiento Constantes Bibliográficas Véase ANEXO F1.2 Pág. 49
- Fase Orgánica: Escalamiento Constantes Bibliográficas Véase ANEXO F1.2 Pág. 49
- Concentración en Solución: Escalamiento Constantes Bibliográficas Véase ANEXO F1.2 Pág. 49

Propiedades del Suelo

- Perfil Profundidad: Profundidad a remediar
- Densidad bulk: densidad aparente resultados Laboratorio suelos PUCV; Véase 4.4.1 Pág.51
- Conductividad Hidráulica: Constantes Bibliográficas Véase ANEXO F1.5 Pág. 54
- Contenido Volumétrico de Agua: Laboratorio Escuela Ingeniería Química PUCV, cantidad de agua necesaria en suelo para albergar un helecho. Análisis hecho a tierra de hoja original de extracción del helecho.

Absorción de la Planta (Uptake)

- Coeficiente de Permeabilidad de Raíz: K_m Constantes Bibliográficas Véase ANEXO F1.6 Pág. 55 *Pteris Vittata (P-Deficiente)*
- Flujo ingreso máximo J_{max} : Constantes Bibliográficas Véase ANEXO F1.6 Pág. 55 *Pteris Vittata (P-Deficiente)*
- Densidad de la raíz: Observada desde ejemplar *Pteris Chilensis* Véase 4.4.2 Pág. 56
- Factor de retorno Biomasa (fracción del total): Se debe cosechar con cuidado de no permitir el retorno de biomasa al suelo, se desprecia.

Para la simulación se utilizaron los siguientes datos de la planta:

	J_{max}^*	K_m^*	J_{max}
Especie	[nmol/g raíz h]	[μ M]	[μ mol/cm h]
<i>Pteris Vittata</i> (<i>P - Deficiente</i>)	$318,6 \pm 25,8$	$0,97 \pm 0,37$	$1,0e-04$

Tabla 10: *Pteris Vittata* (control P) ANEXO F1.6

Constantes de Reacción

- Concentración de Mineral en Equilibrio: Constantes proporcionadas STEM
- Constante tasa Disolución/precipitación: Constantes proporcionadas STEM
- Constante de tasa de Mineralización a fase Orgánica: Constantes proporcionadas STEM
- Constante de distribución de adsorción: Constantes Bibliográficas ANEXO F1.4 Pág. 52
- Entrada de Trazas Elemento: Al realizarse en invernadero*, se puede despreciar
- Entrada Continua: Al realizarse dentro de un invernadero*, se puede despreciar
- Entrada Discreta: Al realizarse dentro de un invernadero*, se puede despreciar

*Por las condiciones de humedad necesarias por la planta y por los beneficios que brinda con respecto a la protección de las especies, la simulación del modelo de absorción se realiza dentro de un invernadero. De esta manera es posible cuidar las especies y mejorar la velocidad de limpieza del terreno, ya que el invernadero protege el cultivo, minimizando la contaminación debida a las precipitaciones de contaminante desde los gases emanados desde la mina.

Al llevarse a cabo la operación dentro de un invernadero los parámetros de entrada de trazas, continua y discreta pueden despreciarse.

4.6.2 Resumen parámetros utilizados en la simulación STEM

En la siguiente tabla se presentan los valores de entrada utilizados en la simulación que se realiza por medio del programa STEM, el cual entrega resultados acerca de la variación de la concentración de arsénico en el suelo contaminado en el tiempo.

Parámetros	Cantidad	Unidad	Referencia
Contenido total	300	[mg / kg]	Laboratorio Central Codelco Norte Véase 4.4.1 Pág. 50
Fase mineral	194	[mg / kg]	Escalamiento Constantes Bibliográficas ANEXO F1.2 Pág. 49
Fase orgánica	19,48	[mg / kg]	Escalamiento Constantes Bibliográficas ANEXO F1.2 Pág. 49
Concentración en solución suelo	3,11	[μ M]	Escalamiento Constantes Bibliográficas ANEXO F1.2 Pág. 49
Propiedades del Suelo			
Perfil profundidad	20	[cm]	Profundidad a remediar
Densidad aparente (bulk)	2,13	[kg / l]	Laboratorio suelos PUCV Véase 4.4.1 Pág. 51
Conductividad hidráulica	0,236	[cm / h]	Constantes Bibliográficas ANEXO F1.5 (Loam soil) Pág. 54
Contenido volumétrico de agua	0,28	[l / l]	Laboratorio Escuela Ingeniería Química PUCV

Absorción de la Planta (Uptake)			
Coeficiente de Permeabilidad de Raíz; <i>Km</i>	0,97	[μM]	Constantes Bibliográficas ANEXO F1.6 Pág. 55
Flujo ingreso máximo; <i>Jmax</i>	0,0001	[$\mu\text{mol} / \text{cm h}$]	Constantes Bibliográficas ANEXO F1.6 Pág. 55
Densidad de la raíz	100	[cm / cm^2]	<i>Pteris Chilensis</i> véase 4.4.2 Pág. 56
Factor de retorno Biomasa (fracción del total)	0		En invernadero, despreciable

Constantes de Reacción			
Tasa Precipitación Dilución Inversa	0,001	[1 / h]	Constantes proporcionadas STEM
Constante adsorción	100	[l / kg]	Constantes proporcionadas STEM
Tasa mineralización	1E-6	[1 / h]	Constantes proporcionadas STEM
Tasa Disolución precipitación	0,01	[1 / h]	Constantes proporcionadas STEM

Entrada de Trazas Elemento			
Entrada Continua	0	[g / año]	En invernadero, despreciable
Entrada Discreta	0	[g / año]	En invernadero, despreciable

Tabla 11: Valores utilizados para la simulación

4.7 Simulación limpieza terreno Zona Transferencia de Polvos por medio del helecho Pteris Vittata.

Para efectuar la limpieza del terreno de la Zona de Transferencia de Polvos, se realizó una simulación en dos etapas de 3 años cada una, se hizo de esa manera considerando que la planta tiene una vida útil relativa de 3 años. Por lo que esta simulación se realiza sobre la base de 2 cosechas completas, los resultados son entregados a continuación:

- **Primera etapa:**

Parámetros entrada	Valor	Unidad
Concentración en solución suelo	3,11	[$\mu\text{g/l}$]
Fase mineral	194	[mg/kg]
Fase orgánica	19,48	[mg/kg]
Contenido total	300	[mg/kg]
Período de simulación		
Comienzo	0	[año]
Final	3	[año]
Paso	1	[hora]
Suma pasos	8.760	[hora]
Información entrada		
Entrada continua	0	[g/ año]
Propiedades del Suelo		
Profundidad	20	[cm]
Densidad aparente	2,13	[kg/l]
Conductividad hidráulica	0,236	[cm/h]
Humedad	0,28	[l/l]
Información planta		
Permeabilidad raíz	0,97	[μM]
Retorno biomasa	0	
Flujo ingreso máximo	0,0001	[$\mu\text{mol/cm raíz/h}$]
Densidad de raíz	100	[cm/cm ²]
Constantes		
Tasa Precipitación Dilución Inversa	0,001	[1/h]
Constante adsorción	100	[l/kg]
Tasa mineralización	1,00E-06	[1/h]
Tasa Disolución precipitación	0,01	[1/h]

Tabla 12: Datos entrada simulación primera etapa remediación P Vittata

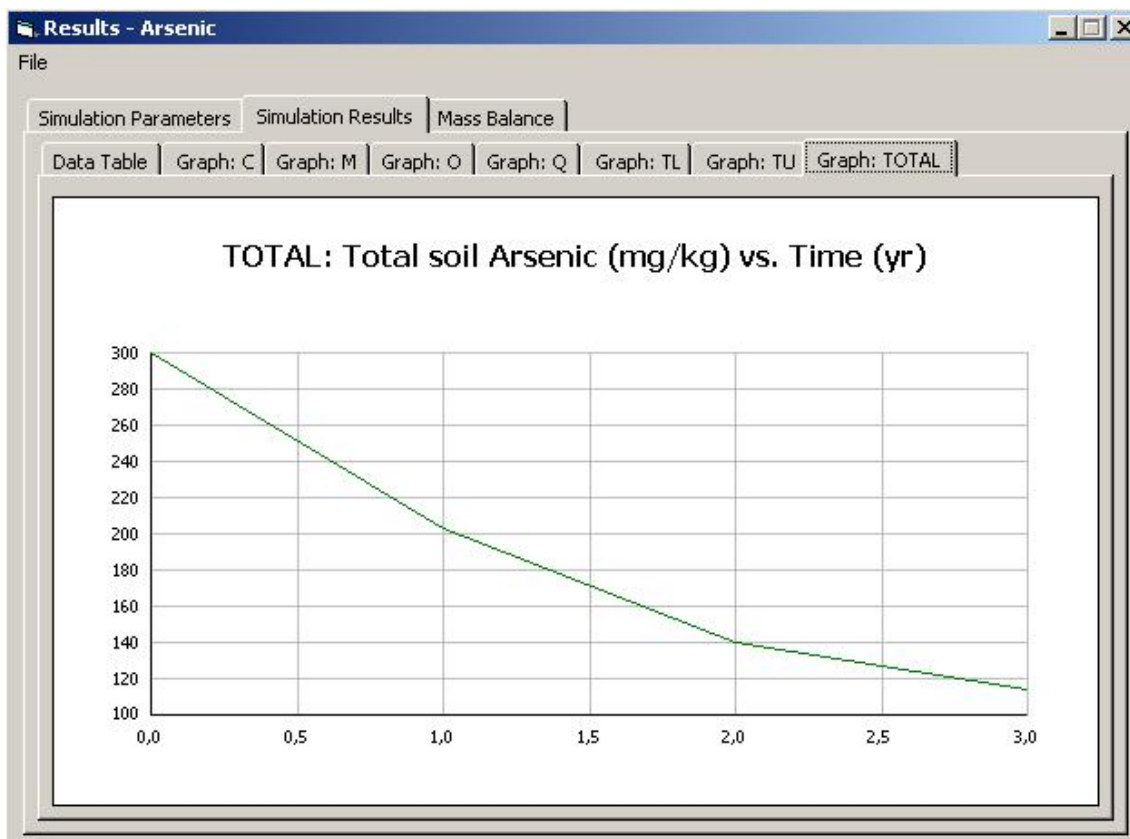


Figura 30: Gráfico resultados primera etapa

Tiempo [años]	Arsénico total
0	300
1	203,405
2	140,338
3	114,083

Tabla 13: Resultado simulación primera etapa

En la primera etapa se logró una reducción de concentración del contaminante alojado en el suelo desde 300[ppm] a 114,083[ppm] en un plazo de 3 años.

- Segunda etapa:

Parámetros entrada	Valor	Unidad
Concentración en solución suelo	1,185	[µg/l]
Fase mineral	74,07	[mg/kg]
Fase orgánica	7,407	[mg/kg]
Contenido total	114,083	[mg/kg]
Período de simulación		
Comienzo	0	[año]
Final	3	[año]
Paso	1	[hora]
Suma pasos	8.760	[hora]
Información entrada		
Entrada continua	0	[g/ año]
Propiedades del Suelo		
Profundidad	20	[cm]
Densidad aparente	2,13	[kg/l]
Conductividad hidráulica	0,236	[cm/h]
Humedad	0,28	[l/l]
Información planta		
Permeabilidad raíz	0,97	[µM]
Retorno biomasa	0	
Flujo ingreso máximo	0,0001	[µmol/cm raíz/h]
Densidad de raíz	100	[cm/cm ²]
Constantes		
Tasa Precipitación Dilución Inversa	0,001	[1/h]
Constante adsorción	100	[l/kg]
Tasa mineralización	1,00E-06	[1/h]
Tasa Disolución precipitación	0,01	[1/h]

Tabla 14: Datos entrada simulación segunda etapa remediación P Vittata

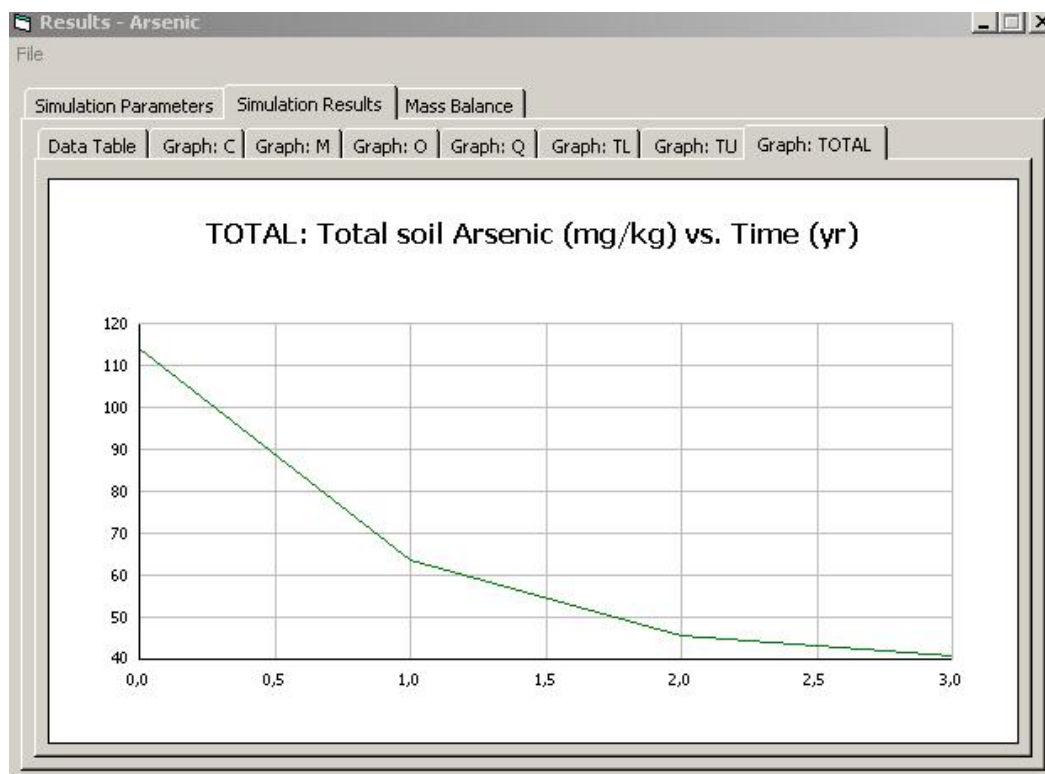


Figura 31: Gráfico resultados segunda etapa

Tiempo [años]	Arsénico total
0	114,083
1	63,566
2	45,363
3	40,893

Tabla 15: Resultado simulación segunda etapa

En la segunda etapa se logró una reducción de concentración del contaminante alojado en el suelo desde 114,083 a 49,893[ppm] en un plazo de 3 años.

Finalmente en la segunda etapa se logró una reducción de concentración del contaminante alojado en el suelo hasta el límite requerido para suelos degradados según la normativa para Chile véase 1.4 *Tabla 01*, una concentración de arsénico aproximada de 40[ppm].

Por lo que la limpieza del terreno por medio del uso de la *Pteris Vittata* natural se realiza en un plazo de 6 años.

4.8 Comparación helechos

Para poder comparar los rendimientos de los helechos, se lleva a cabo en un punto neutral que posea las mismas condiciones de contaminación.

En las especificaciones del fabricante de la edenfern™ se da a conocer una experiencia realizada a un terreno contaminado con 50[ppm] de arsénico. Por medio de la simulación de la Pteris Vittata en un terreno con la misma concentración inicial, se busca encontrar los resultados de absorción característicos, para luego comparar de rendimientos.

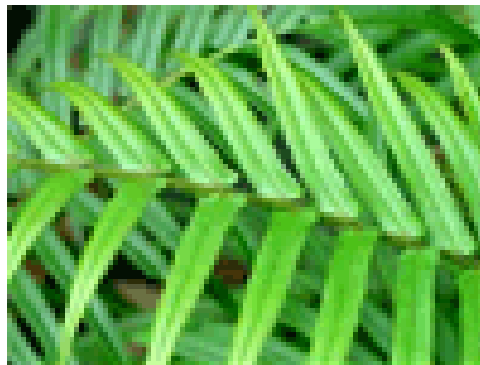


Figura 32: Edenfern™



Figura 33: Pteris Vittata

4.9 Simulación Pteris Vittata en suelo contaminado 50ppm

A modo de escoger la mejor opción entre las dos plantas, se busca comparar los rendimientos de la Pteris Vittata y la Edenfern™ en idénticas condiciones. Como punto de referencia se modeló el sistema para un terreno contaminado con 50[ppm] de arsénico.

Se proyectaron los datos de la Zona de Transferencia de Polvos para una cantidad total en el suelo a 50[ppm] y se simuló el sistema para la Pteris Vittata natural por medio del programa STEM.

Parámetros entrada	Valor	Unidad
Concentración en solución suelo	0,519	[µg/l]
Fase mineral	32,467	[mg/kg]
Fase orgánica	3,246	[mg/kg]
Contenido total	50	[mg/kg]
Período de simulación		
Comienzo	0	[año]
Final	3	[año]
Paso	1	[hora]
Suma pasos	8.760	[hora]
Información entrada		
Entrada continua	0	[g/ año]
Propiedades del Suelo		
Profundidad	20	[cm]
Densidad aparente	2,13	[kg/l]
Conductividad hidráulica	0,236	[cm/h]
Humedad	0,28	[l/l]
Información planta		
Permeabilidad raíz	0,97	[µM]
Retorno biomasa	0	
Flujo ingreso máximo	0,0001	[µmol/cm raíz/h]
Densidad de raíz	100	[cm/cm ²]
Constantes		
Tasa Precipitación Dilución Inversa	0,001	[1/h]
Constante adsorción	100	[l/kg]
Tasa mineralización	1,00E-06	[1/h]
Tasa Disolución precipitación	0,01	[1/h]

Tabla 16: Datos entrada para la simulación de absorción en terreno 50ppm

Una vez ingresados los valores para la simulación se ejecuta el programa, entregando los siguientes resultados:

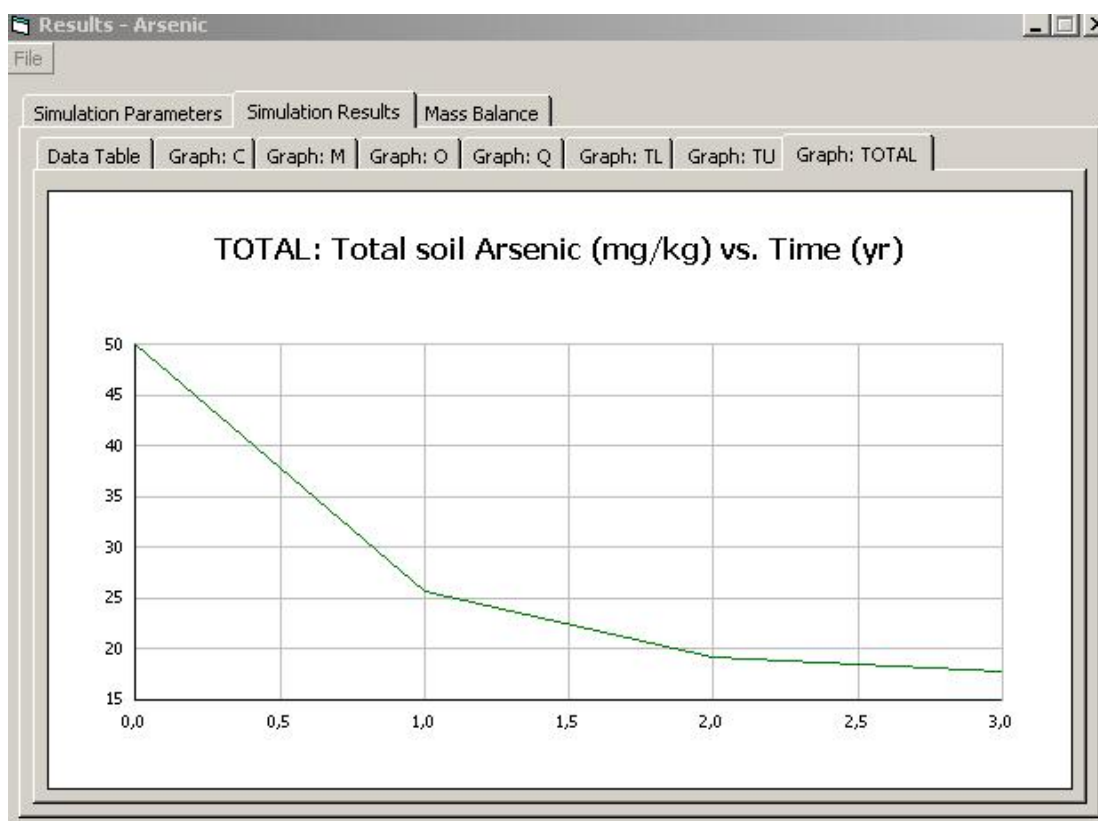


Figura 36: Disminución desde 50ppm iniciales a 17,761ppm en 3 años.

Tiempo [años]	Arsénico total
0	50
1	25,630
2	19,167
3	17,761

Tabla 17: Resultados simulación terreno 50ppm

En una simulación a 3 años utilizando el programa STEM un helecho *Pteris Vittata* en su forma natural puede disminuir la concentración desde 50[ppm] iniciales hasta 40[ppm] finales para un suelo considerado limpio según las normas internacionales, en un plazo aproximado de 5 meses.

Entonces el helecho será capaz de absorber 10[ppm] durante este tiempo, entregando un rendimiento calculado de **2[ppm] por mes**.

	Pteris Vittata	Edenfern™
Clima necesario	<i>Tropical Subtropical véase 4.2</i>	<i>Tropical, Subtropical, Frío y Mediterráneo³²</i>
Procedencia	<i>Estados Unidos, Caribe y Brasil véase 4.2.1</i>	<i>Estados Unidos</i>
Limpieza suelo desde 50ppm a 40ppm	<i>5 meses</i>	<i>2 – 4 meses</i>
Costo de planta	<i>Internación</i>	<i>Internación + USD 2,95 por planta</i>
Resistencia máxima	<i>2500ppm</i>	<i>2500ppm</i>
Rendimiento	<i>2 [ppm/mes] véase 4.9</i>	<i>2,5 - 5 [ppm/mes] véase 4.3.1</i>

Tabla 18: Comparación dos especies

³² Edenfern Edenspaces, < <http://www.edenspace.com/edenfern.html> > [consulta 10 de Agosto 2006]

"Fitoremediación de Zonas de Transferencia de Polvos contaminadas con arsénico por medio del uso del helecho *Pteris Vittata*" Codelco Norte Chuquicamata.

La característica más interesante de la edenfern™ es que puede rebajar los tiempos necesarios para extracción del contaminante desde el suelo recortando el tiempo total del proceso, por lo que representa una alternativa interesante. Por medio del contacto con la empresa que vende esta especie, la se recibe una cotización, con un valor de USD 2,95 por planta véase Anexo D.1.3 Pág. 38

Cabe recordar que ninguna de las dos plantas se encuentra en Chile, por lo que cualquiera de las dos opciones debe ser internada al país, ingresar una especie nueva al país puede llevar desde 6 a 12 meses, procedimiento de internación consultado con el SAG véase ANEXO D1.2. Pág. 37

4.10 Conclusiones capítulo IV

Al momento de seleccionar la planta para ser usada en el proyecto, se deben tomar en cuenta algunos factores importantes, con respecto al ejemplar que se desea utilizar.

El primer factor a considerar es el tiempo. Se busca minimizar el tiempo que la especie seleccionada se demorará en absorber el contaminante desde un suelo contaminado. Por medio de la modelación matemática se llegó al resultado que la especie natural de *Pteris Vittata* en su forma natural, era capaz de absorber y limpiar el terreno, en un plazo de 6 años. La planta proporcionada por Edenfern™, nos presenta una especie la cual fue alterada genéticamente y es capaz de bajar los tiempos de absorción de manera interesante, presentando rendimientos en velocidad hasta de un 250% mayor que la planta común.

Otro factor importante al momento de tomar la decisión en que especie será la principal en este proyecto es el costo, es muy importante de que la planta seleccionada sea de un costo razonable, porque de esa manera los gastos se pueden mantener dentro de los márgenes, para que así el proyecto sea económicamente viable.

Finalmente por las razones entregadas se decide proponer la edenfern™, que posee un rendimiento entre 125% a 250% veces mejor por el ofrecido por ejemplar natural, capaz de recortar los tiempos de espera en la absorción del contaminante desde la Zona de Transferencia de Polvos de Codelco Norte división Chuquicamata Chile a un 40% del tiempo total (aproximadamente a 2 años y cinco meses)

5 CAPÍTULO V: DISEÑO SISTEMA DE EXTRACCIÓN

5.1 Resumen capítulo V

En este capítulo se diseña el sistema de extracción de arsénico desde la planta, este sistema esta compuesto por tres estanques: alimentador, estanque percolador donde se lixiviará el arsénico que se encuentra en las hojas de las plantas y finalmente el estanque receptor donde se guarda la solución ácida que contiene el arsénico en solución.

El diseño completo de los equipos y cañerías del sistema fue dimensionado para poder procesar una cantidad determinada de plantas generadas en la limpieza de un terreno de 625[m²]

Una vez presentado el sistema, se realiza la simulación del reactor percolador, para saber cuales serán los tiempos aproximados de residencia en el reactor para poder llevar a cabo la reacción propuesta.

5.2 Circuito Percolación

El circuito está constituido por tres estanques, los cuales están conectados por un circuito de cañerías diseñado especialmente para este proceso véase ANEXO G Pág.56.

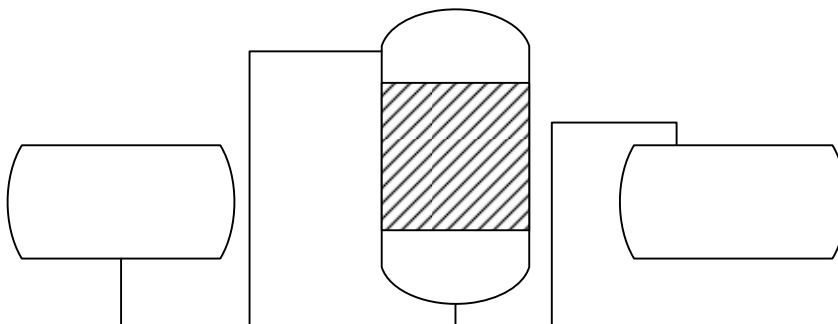


Figura 34: Circuito Percolación

Estanque alimentador: Corresponde al estanque que contiene el ácido nítrico, este estanque es el encargado de alimentar la solución ácida necesaria para bañar y sumergir la composta vegetal que se encuentra alojada dentro del reactor percolador. La alimentación de la solución ácida se lleva a cabo por medio de bombeo.

Estanque Percolador: El segundo estanque corresponde a un estanque diseñado para realizar la percolación, este estanque tiene como finalidad retirar el Arsénico que se encuentra contenido en las hojas de las plantas, pasándolo a solución ácida.

Este estanque es el mas importante dentro del ciclo de percolación, por lo que se entregan las características importantes véase punto 5.3

Estanque receptor: El tercer estanque corresponde al estanque receptor de la solución ácida rica en arsénico generada en el reactor percolador.

Una vez determinados los equipos necesarios para poder llevar a cabo el ciclo, se realiza el diseño mecánico completo de los estanques requeridos en la operación de retirar el arsénico desde las plantas, véase ANEXO H Pág. 86

Para el diseño de las líneas y los elementos a utilizar primero se elabora un bosquejo del sistema a dimensionar, para eso fue necesario encontrar la mejor distribución de equipos para maximizar el uso de la bomba, para que con tan sólo una, se puedan hacer las tareas necesarias para llevar a cabo el sistema de extracción de arsénico desde el helecho.

Las tareas principales del ciclo de extracción son las siguientes:

- Efectuar la carga del reactor por medio de una bomba dirigiendo el flujo de reactivo (HNO_3) hacia el reactor percolador, desde el estanque de alimentación, donde previamente se preparó la solución ácida.
- Por medio de un ciclo de recirculación se pretende entregar las condiciones de agitación necesarias para la homogenización de la solución de ácido arsénico dentro del reactor y así cumplir con las condiciones necesarias para la cinética de reacción de un proceso batch.
- Finalmente una vez ocurrida la reacción y todo el arsénico se encuentra en solución, se descarga el estanque utilizando la misma bomba.

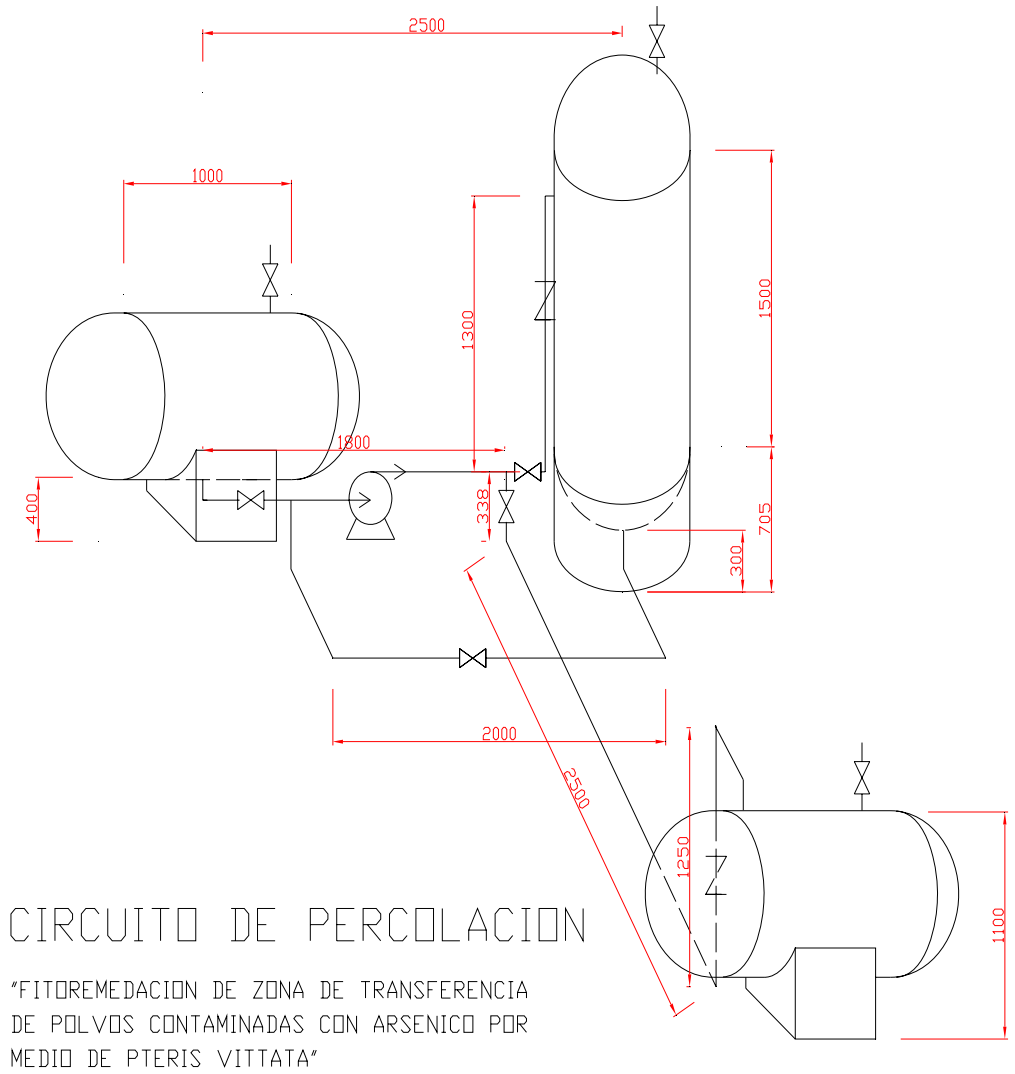
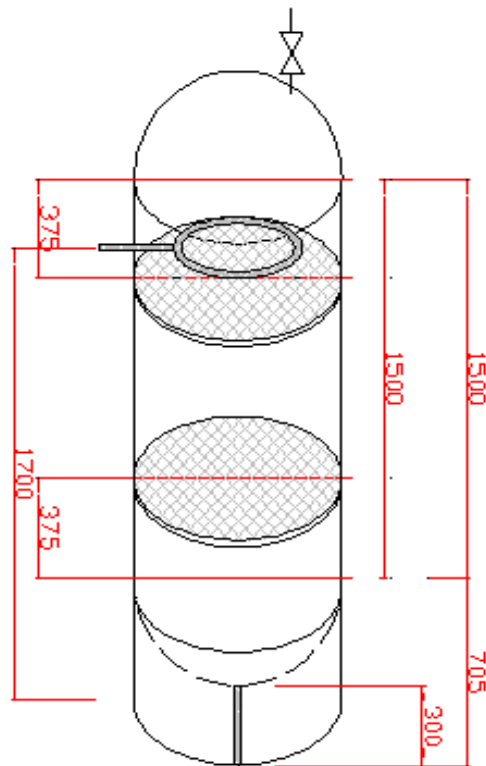


Figura 35: Circuito para la recuperación de arsénico en forma de solución ácida.

5.3 Especificaciones del estanque percolador

Este estanque posee dos filtros interiores entre los cuales se carga la composta vegetal. La recuperación del arsénico en solución se realiza en tres etapas:

1. **Primera etapa (carga y compresión del vegetal):** Se carga el reactor por medio de su parte superior, se llena hasta el nivel del segundo filtro. Una vez cargado con las plantas, el reactor se deja con la tapa abierta para que el sol se encargue de secar la composta uniformemente, esto se realiza por medio de revolver manualmente, cada determinado tiempo el material a secar, por un tiempo aproximado de 2 días. De esta manera se logran romper las células que contienen el arsénico facilitando su posterior extracción con el ácido, a la composta una vez deshidratada, se le realiza una compresión manual para aumentar la capacidad de procesamiento en el reactor.
2. **Segunda etapa (carga de ácido nítrico):** Luego que el reactor esta cargado con la composta vegetal seca y esta listo para poder funcionar, se ubica el filtro superior y tapa. Se procede a regar por medio de un aspersor, el cuál reparte la solución ácida sobre la composta vegetal hasta que el estanque se encuentre lleno a su capacidad.
3. **Tercera etapa (reacción y retiro solución):** Finalmente una vez que el estanque esta cargado con los reactivos, se activa la bomba y se da el paso al ciclo que recircula la solución hasta que la mayor cantidad de arsénico haya pasado a solución. Después de aproximadamente 20[*min*] y una vez terminada la reacción, se retira el arsénico en solución ácida y luego se bombea hacia el estanque receptor.
4. **Cuarta etapa (Limpieza sustrato):** Finalmente para poder mantener la eficiencia del proceso se debe lavar el equipo percolador para limpiar restos de sustrato sólido, para eso se realiza una pasada con ácido nítrico diluido por el equipo vacío, para recuperar todo el sustrato que pudiese haber quedado adherido a las paredes del equipo.



REACTOR PERCOLADOR

“FITOREMEDACION DE ZONA DE TRANSFERENCIA DE POLVOS CONTAMINADAS CON ARSENICO POR

Figura 36: Diseño reactor Percolador

5.4 Capacidad de equipos

Para poder calcular las dimensiones de los equipos necesarios para conocer el costo de inversión inicial. Se calculará la capacidad del sistema de percolación en base de cálculo de limpieza de un terreno de 25 x 25 [m] ó 625 [m²], correspondiente a una planta piloto que cubre aproximadamente un 20% del terreno total a limpiar.

De acuerdo al fabricante del helecho edenfern™, se necesitan un mínimo de 4 plantas por [m²] para llevar a cabo una limpieza de un terreno, por lo que para el terreno seleccionado correspondería a una compra inicial de 2.500 plantas.

Se diseña un estanque percolador sea capaz de procesar la materia vegetal generada en las cosechas, se calcula la cantidad de plantas a ser tratadas y se dimensiona para poder satisfacer las necesidades de ejecución del proceso. En este caso el volumen elegido es de 0,377 [m³].

Parámetro	Valor	Unidad
Superficie plantada	625	[m ²]
Cantidad especies por unidad de superficie recomendado	4	[unidad/m ²]
Cantidad total plantas	2500	[unidad]
Masa por unidad	0,05	[kg/unidad]
Masa total de plantas a procesar	125	[kg]
Razón de fluido lixivante	1	[vol / vol]
Densidad Carga Comprimida	60	[kg/m ³]
Volumen comprimido a procesar	2,083	[m ³]
Volumen total lixivante necesario	2,083	[m ³]
Extracción As	93,219	%
Tiempo de residencia calculado por cinética química	60	[min]
Volumen reactor propuesto	0,377	[m³]
Número de etapas para procesar todas las plantas	11,052	veces

Tabla 19: Datos dimensionamiento equipos

En reactor por pasada	Volumen	Unidad
Carga líquido	0,188	[m ³]
Carga plantas	0,188	[m ³]
Porcentaje retención solución en materia orgánica	12,5	%

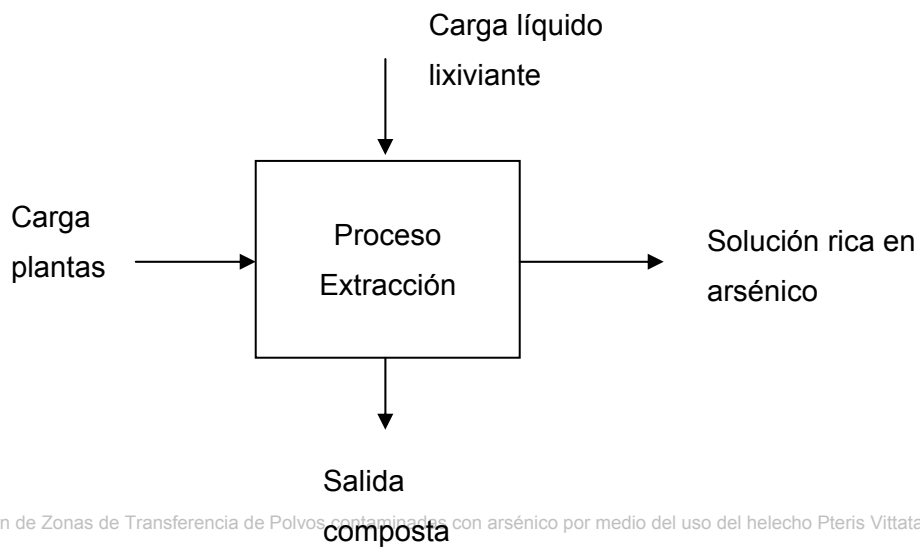
Con los siguientes datos:

	Densidad	Unidad
Carga líquido	1000	[kg/m ³]
Carga plantas	60	[kg/m ³]

Se determinan las corrientes entrada y salida:

En reactor por pasada	Masa	Unidad
Entrada: Carga líquido lixivante	188,5	[kg]
Entrada: Carga plantas	11,310	[kg]
<i>Solución retenida en materia orgánica</i>	<i>23,562</i>	<i>[kg]</i>
Salida: Solución rica en arsénico	164,937	[kg]
Salida: Composta vegetal	34,872	[kg]

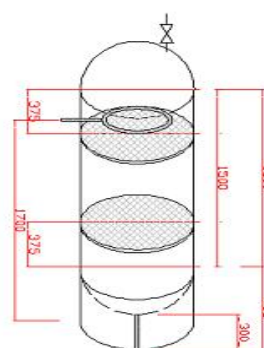
Tabla 20: Datos balance de materia general reactor propuesto



De acuerdo a que la relación lixivante - materia vegetal (uno es a uno) el reactor percolador se diseña con la distribución de los elementos internos de tal manera para que la capacidad de carga de plantas vegetales corresponda al 50% del volumen total del equipo.

Una vez definida la capacidad necesaria para procesar las plantas calculadas se puede determinar el volumen requerido del estanque de alimentación, que corresponde al volumen de líquido necesario para llenar el reactor percolador, el estanque receptor de solución ácida debe ser capaz de albergar ese mismo volumen. Se concluye que el estanque alimentador y receptor de solución deben ser del mismo tamaño.

Carga Reactor percolador	Valor	Unidad
Diámetro	0,8	[m]
Área total equipo	0,502	[m ²]
Alto equipo	1,5	[m]
Volumen total equipo	0,753	[m ³]
Volumen para cargar hojas	0,376	[m ³]
<i>*Equipo cargado al 50%</i>		
Estanque alimentador		
Volumen requerido	0,376	[m ³]
Estanque receptor		
Volumen requerido	0,376	[m ³]



REACTOR PERCOLADOR
 *FITOREMEDIACION DE ZONA DE TRANSFERENCIA DE POLVOS CONTAMINADAS CON ARSENICO POR

Tabla 21: Carga estimativa para reactor dimensionamiento

Una vez dimensionado, el reactor debe ser cargado con las plantas, cada planta es capaz de acumular hasta 7.500 [ppm] en sus frondas por lo que con la densidad de la planta, (dato observado desde la Pteris Chilensis; véase 4.4.2 Datos observados Pteris Chilensis Pág. 56i)), se puede calcular cuantas plantas son cargadas y cuantos moles de arsénico son ingresados aproximadamente por carga.

Datos por carga	Cantidad	Unidad	Referencia
Acumulación máxima por planta	7.500	[mg / kg]	
Densidad normal de las hojas	42	[kg / m ³]	P. Chilensis véase 4.4.2
Peso planta promedio	0,05	[kg]	P. Chilensis véase 4.4.2
Carga máxima en reactor	0,377	[m ³]	véase tabla 21
Densidad carga comprimida	60	[kg / m ³]	Compresión experimental realizada en laboratorio PUCV.
Carga en peso	22,62	[kg]	
Resultados			
Número plantas cargadas	453		
As total cargado	3392920,066	[mg / kg]	
Masa as total cargado	76746,044	[g]	
Moles as cargado	1024,373	mol	
Concentración inicial As	2,717	[mol / l]	

Tabla 22: Moles ingresados por carga

5.5 Cinética reacción estanque percolador

Para saber que acontece con la reacción propuesta dentro del sistema propuesto, se calcula la variación de concentraciones en la extracción, la cual corresponde a un proceso batch con reciclo para homogeneización de la solución lixivante véase cálculos en ANEXO J. Pág. 116

La variación de concentraciones dentro del estanque se muestra a continuación:

t [min]	[HNO ₃] [moles/l]	[As] [moles/l]	[H ₃ AsO ₄] [moles/l]	[NO ₂] [moles/l]
0	0,000	2,717	0	0
15	1,503	0,436	0,873	2,619
30	1,854	0,038	1,093	3,280
45	1,808	0,023	1,108	3,326
60	1,790	0,017	1,114	3,344

Tabla 23: Variación de concentraciones en el reactor

Graficando los resultados se llega a:

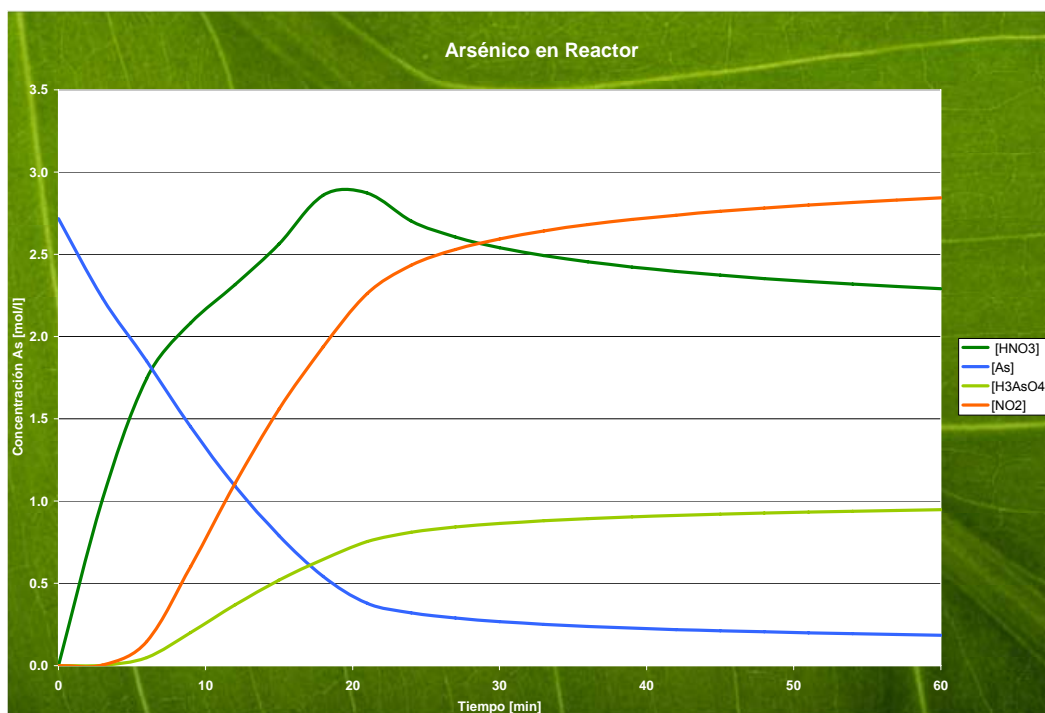


Figura 37: Gráfica simulación estanque percolador

De acuerdo a los resultados obtenidos se observa que el arsénico que ingresa en la planta, pasa casi por completo a H_3AsO_4 . Se deberá cargar el reactor y luego recircular por un tiempo aproximado de 30[min] para que todos los reactivos puedan terminar de reaccionar.

Por lo tanto el proceso de extraer el arsénico desde las plantas tiene una duración aproximada de 50[min], momento en que se puede descargar del circuito, enviando la solución rica en arsénico hacia el estanque receptor.

5.6 Conclusiones capítulo V

En este capítulo se presenta el sistema de extracción de arsénico desde la planta y se desarrolla el diseño de los equipos necesarios para este ciclo.

Los estanques fueron diseñados con volumen suficiente para poder procesar las plantas generadas en la limpieza de un terreno de 625[m²], las dimensiones de los estanques requeridos son un poco mayores a lo necesario, para asegurar la capacidad necesaria y brindar un margen para el tratamiento de una posible mayor cantidad de plantas en el futuro.

El estanque percolador diseñado tiene una capacidad total de 0,753[m³], debido a la distribución de diseño del equipo se limita la capacidad de carga de composta vegetal a un 50% del total, por lo que el estanque alimentador y receptor deben poseer una capacidad mínima de 0,376[m³] para suministrar y almacenar respectivamente la solución ácida utilizada.

Por medio del desarrollo de la cinética química del proceso se puede observar como la concentración de arsénico contenida en la planta se reduce traspasándose a la solución de ácido arsénico, el equilibrio de la reacción se alcanza cerca de los 60 [min]; con un flujo de alimentación de 18 [l / min] de ácido nítrico, el estanque se llena a los 20 [min] por lo que después de eso, es necesario accionar la recirculación por 30 [min] para terminar la reacción.

Gracias a los cálculos realizados en el *ANEXO J.2 Pág. 121* respecto al análisis de las concentraciones en el reactor se puede observar que casi todo el arsénico contenido en las plantas puede ser llevado a la solución ácida que es almacenada finalmente en el estanque receptor.

6 CAPITULO VI: COSTO DE INVERSIÓN

6.1 Resumen capítulo VI:

Un factor decisivo es el costo de inversión, por medio de una base de cálculo determinando el área de terreno a limpiar, se obtienen la cantidad de plantas vegetales a procesar con esa información se dimensionan los equipos para satisfacer las necesidades de producción y finalmente de acuerdo a estos valores se estima un costo inicial de inversión.

Para el cálculo del costo de inversión inicial se utilizaron los datos obtenidos desde las plantillas de Excel generadas para el CAPITULO V: DISEÑO SISTEMA DE EXTRACCIÓN. Por medio de los resultados del dimensionamiento de equipos se sabe la cantidad de materiales que se deben comprar y de acuerdo a esto el dinero a invertir en el proyecto.

6.2 Costo de inversión

Para poder conocer el costo de inversión se hace un cálculo sobre los elementos necesarios para implementar el sistema de percolación presentado anteriormente, véase 5.2

Una vez diseñado el sistema, se determina el inventario de compra por medio de los cálculos realizados en el ANEXO G y H

A continuación se presentan las cotizaciones y finalmente el costo de inversión aproximado inicial de este proyecto.

6.2.1 Cotizaciones

Se calculan por medio de las ecuaciones presentadas en el ANEXO G y H las dimensiones de las cañerías y equipos necesarios para realizar la recuperación del arsénico desde la planta, a continuación se entregan los valores del inventario de compra:

- **Fittings:** Según cotización en Attex® los precios de los fittings necesarios son; para cotización.

Cantidad		Descripción	Medida	Precio Unitario	Precio Total
12	[m].	Cañería de Acero Inoxidable A312 C/Costura Sch 10s	1/2"	\$ 6.230	\$ 74.760
6	[m].	Cañería de Acero Inoxidable A312 C/Costura Sch 10s	3/4"	\$ 8.080	\$ 48.480
2	c/u	Válvula de Globo Full Inox NPT	1/2"	\$ 85.440	\$ 170.880
2	c/u	Válvula de Check Full Inox NPT	1/2"	\$ 15.250	\$ 30.500
6	c/u	Codo R.C 90° Inoxidable NPT	1/2"	\$ 1.360	\$ 8.160
2	c/u	Válvula de Globo Full Inox NPT	3/4"	\$ 22.770	\$ 45.540
2	c/u	Válvula de Compuerta Full Inox NPT	3/4"	\$ 65.380	\$ 130.760
5	c/u	Codo R.C 90° Inoxidable NPT	3/4"	\$ 1.520	\$ 7.600
		Precio total cotización fittings			\$ 516.680

Tabla 24: Cotización fittings necesarios para la construcción ciclo recuperación As

Las cotizaciones de las bombas se hicieron en línea en un sitio de estimación de costos de equipos de acuerdo a sus características principales³³:

- **Bomba:** Tipo motor a petróleo con capacidad de bombeo $3,9 \left[\frac{gal}{min} \right]$, construida en hierro fundido, por un valor de USD \$ 200 (FOB)
- **Estanque percolador:** Construido en acero inoxidable INOX 304 sin elementos interiores, precio estimado por peso total del equipo 311,516 [kg] a \$ 9.000 Pesos Chilenos por kilo aproximadamente \$2.803.644 Pesos Chilenos.
- **Estanque alimentador; receptor:** Para estos dos equipos, se proponen estanques construidos en acero inoxidable INOX 304 sin elementos interiores, precio estimado por peso total del equipo 95[kg] a \$ 9.000 Pesos Chilenos por kilos aproximadamente \$855.000 Pesos Chilenos

Finalmente el valor de las plantas necesarias para poder realizar la limpieza del terreno propuesto, estos datos fueron entregados por la empresa edenspace™

- **Plantas:** Para la limpieza del terreno propuesto de 625[m²] se necesita una cantidad de 2500 plantas con valor aproximado de USD 2.95 por unidad con precio total de inversión de USD 7,375 (FOB)

³³ Matche's Process Equipment Cost Estimates, < <http://matche.com/equipcost/> > [consulta: 6 de Noviembre 2007]

"Fitoremediación de Zonas de Transferencia de Polvos contaminadas con arsénico por medio del uso del helecho Pteris Vittata" Codelco Norte Chuquicamata.

Ítem cotizado en Chile	Valor en Pesos Chilenos	Valor en Dólares
Estanque percolador	\$2,803,644.00	USD 5,497.34
Estanque alimentador	\$855,000.00	USD 1,676.47
Estanque receptor	\$855,000.00	USD 1,676.47
Fittings	\$516,680.00	USD 1,013.10
Total cotización Chile	\$5,030,324.00	USD 9,863.38

Ítem cotizado en USA	Valor Dólar FOB	CIF
Plantas	USD 7,375.00	USD 9,218.75
Bomba	USD 200.00	USD 250.00
Total cotización USA	USD 7,575	USD 9,468.75

Equipos	Valor en dólares	Costo equipos (Chilton 1,5)
Estanque percolador	USD 5,497.34	USD 8,246.01
Estanque alimentador	USD 1,676.47	USD 2,514.71
Estanque receptor	USD 1,676.47	USD 2,514.71
Bomba	USD 250.00	USD 375.00
Total costo equipos	USD 9,100.28	USD 13,650.42

Ingeniería y construcción	Factor Chilton	Costo
Complejidad: Simple	0,20	USD 2,730.08
Factor tamaño: Pequeña	0,05	USD 682.52
Total ingeniería y construcción		USD 3,412.61

Final	Costo
Equipos Instalados	USD 13,650.42
Ingeniería y Construcción	USD 3,412.61
Plantas	USD 9,218.75
Fittings	USD 1,013.10
Costo total inversión	USD 27,294.88

Tabla 25: Costo de instalación

6.3 Costo de operación

Se realiza un cálculo aproximado del costo que significa procesar la composta vegetal generada durante la temporada de crecimiento, considerando el mes que sea necesario cosechar, en ese caso, como se presentó anteriormente se deben realizar 11 pasadas para recuperar el arsénico desde la plantación.

Acido nítrico		
Cantidad necesaria	4,147	[m ³]
Concentración	1,300	[g/l]
	5,391	[kg]
Acido nítrico USD 1,36 por kilo	7.332	USD
Agua CLP 591 por litro	2.450	CLP

	Costos de Operación	Costo mensual
Costos Fijos	Mano de obra directa	USD 2,000
	Mantenimiento	USD 200
Consumibles	Productos Quimicos	USD 7.33
	Agua proceso	USD 4.90

Servicios		Costo mensual
	Electricidad	USD 40.00
	Agua regadio	USD 400.00
Costo total op		USD 2,652

Tabla 26: Costo de instalación y costo de producción.

6.4 Conclusiones capítulo VI

Para conocer el costo del proyecto se realizó una cotización de construcción de la estación, basándose en recuperar un terreno relativamente pequeño, de esa manera se busca minimizar los costos y disminuir el factor de riesgo de perder muchas plantas en la etapa inicial del proyecto.

Para la correcta implementación del cultivo, se sugiere buscar ayuda de un Ingeniero Agrónomo, que sea capaz de con los datos recopilados en este trabajo, crear un plan de adaptación al proceso a la región y efectuar la multiplicación de los ejemplares importados en Chile, para de esta manera poder disminuir los gastos de inversión del proyecto.

De acuerdo con la cotización del inventario de compra definido después de haber dimensionado los equipos necesarios para poder llevar a desde 625 [m²] se llega a un costo total de inversión inicial aproximada de *USD 27,294.88*

Este valor representa el dinero que debe ser invertido para poder comprar los elementos para realizar la limpieza y recuperación del contaminante en la forma de ácido arsénico. Con esto se lograría bajar la concentración de arsénico desde 300[ppm] contenidas en la Zona de Transferencia de Polvos a 40[ppm].

El costo de operación del proyecto calculado en base a las necesidades para poder trabajar correctamente, es de un valor aproximado de *USD 2,652 mensual*

7 CAPITULO VII ALCANCES Y RECOMENDACIONES: HOLCUS LANATUS, FITOESTABILIZACION

7.1 Resumen capítulo VII:

Éste capítulo entrega información extra recopilada a través de la investigación, como alternativas en el tratamiento de arsénico en suelos. Se propone la utilización de una planta llamada *Holcus Lanatus*, reconocida por el común de la gente como un tipo de espiga maleza, la cual tiene una capacidad de poder vivir en condiciones de arsénico. Para experimentar se transplantaron ejemplares desde un jardín de la mina a un depósito con tierra de la Zona de Transferencia de Polvos. Los ejemplares sobrevivieron de buena manera, por lo que esto representa una solución simple y efectiva llamada fitoestabilización.

Si bien esta técnica no recoge el contaminante que se encuentra en el piso, por medio del uso de una planta local, sólo se estabiliza en el lugar, impidiendo la propagación debida especialmente a los vientos.

Luego se hacen algunos alcances acerca de los rendimientos de la *pteris vittata* en soluciones hidropónicas, como posible recomendación para una experimentación posterior.

7.2 Recomendación I: Fitoestabilización

Existen dos tipos de fito tratamientos aplicables³⁴ a los suelos contaminados por elementos tóxicos, la fitoestabilización y la fitoextracción.

La fitoestabilización se utiliza en los suelos en donde la gran cantidad de contaminantes imposibilita la fitoextracción o como en este caso, debido a las posibles limitantes climáticas que complican el desarrollo natural del ejemplar propuesto.

La fitoestabilización se basa en el uso de plantas tolerantes a los metales para inmovilizarlos a través de su absorción y acumulación en las raíces, reduciendo así su movilidad y su biodisponibilidad para otras plantas o microorganismos.

La diferencia con la fitoextracción, también conocida como fitoacumulación, es que esta última consiste en la absorción y translocación de los metales desde las raíces hasta las partes aéreas de las plantas, como lo hace el helecho propuesto *Pteris Vittata*, que posteriormente se cortarán y serán tratadas con el objetivo de reciclar los metales.

Las planta adecuada para llevar a cabo estas acciones, generalmente son difíciles de encontrar ya que debe ser tolerante al metal que se desea eliminar (plantas hiperacumuladoras), que la acumulación se produzca fundamentalmente en la parte aérea de la planta, y que presenten un rápido crecimiento, así como una alta producción de biomasa en la parte aérea. Una de las líneas de investigación actuales es la transferencia y mejora de los genes de estas plantas hiperacumuladoras, co aconteció con la edenfern™.

El *Holcus Lanatus* L es una especie de pasto maleza, el cual tiene una tolerancia natural al arsénico³⁵, crece en condiciones ácidas pH 3,5 a 5,5, en suelos secos a relativamente húmedos. Se puede encontrar principalmente en lugares soleados, pero también posee la capacidad de poder vivir en la sombra.

Este ejemplar es conocido popularmente como Heno Blanco y habita gran parte de nuestro país, ésta planta fue detectada dentro de las instalaciones de la mina, creciendo como maleza en los jardines de las oficinas de la planta de Molibdeno y el campamento de Chuquicamata, por lo que se trata de un ejemplar muy firme y capaz de resistir las condiciones climáticas existentes de forma natural sin acondicionamiento especial.

³⁴ Seoáñez, M. (1999), "Contaminación del suelo: estudios, tratamiento y gestión". Ediciones Mundi-Prensa. España.

³⁵ The Nature of Arsenic- Phytochelatin Complexes in *Holcus Lanatus* and *Pteris Cretica*. <<http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=389935>>. consulta [consulta: 27 Julio 2007]

En un estudio llamado “An altered phosphate uptake system arsenate-tolerant *Holcus Lanatus* L.”³⁶ se dan a conocer por primera vez las capacidades de tolerancia al arsénico del *Holcus Lanatus*, al igual que la *Pteris Vittata*, un mecanismo alterado de absorción de fosfato, permite la absorción del arsénico en las raíces a muy baja cantidad, pero el flujo debe ser mínimo para permitir la desintoxicación del arsenato en la planta.

Si bien este ejemplar no es capaz de hiperacumular arsénico en sus frondas, puede sobrevivir en condiciones de terrenos contaminados, por esto se presenta como posibilidad de utilización.



Figura 38: Dibujo *Holcus Lanatus*

³⁶ Andrew A. Meharg y Mark Macnair, An altered phosphate uptake system arsenate-tolerant *Holcus Lanatus* L May 1990 p29-35
“Fitoremediación de Zonas de Transferencia de Polvos contaminadas con arsénico por medio del uso del helecho *Pteris Vittata*” Codelco Norte Chuquicamata.

7.3 Principales características *Holcus Lanatus*

El *Holcus Lanatus* L, no es capaz de limpiar un terreno por si sólo, esto es debido a no poseer la capacidad de hiperacumular el arsénico en sus frondas como lo hace la *Pteris Vittata*, por lo que sólo puede ser utilizado como un estabilizador de terreno.

Es una planta firme, que necesita de pocos cuidados, adaptada naturalmente al entorno existente, con capacidad de tolerar condiciones de arsénico y acidez en los suelos.

Como es una maleza, no se debe comprar por lo que no significa gran costo movilizar los ejemplares hacia la Zona de Transferencia de Polvos, ya que se encuentran disponible en la región.

Esto constituye a una alternativa para la estabilización del contaminante, hasta que se decida limpiar definitivamente, en estos momentos no existe reglamentación respecto a las cantidades de arsénico depositadas en los suelos, si no se tiene urgencia en limpiar, se podría trasladar esta maleza al lugar sólo para estabilizar el terreno.

7.3.1 Ubicación *Holcus Lanatus* II Región

Según Juan Pablo Gabella³⁷, el *Holcus Lanatus* L crece naturalmente en el sector de La Negra. Antofagasta:

“Cerca de la intersección entre la Norte Sur y el camino que lleva a Coloso, cercano a un lugar llamado ojo de agua, hay muchos ejemplares, casi una pradera³⁸”.

Se trata de una maleza resistente con capacidad de sobrevivir a estos cambios, se encuentra diseminada por la región en forma de maleza e incluso se encontraron unos ejemplares como maleza en unos jardines de la planta de molibdeno.

Se transplantaron y trajeron a la fundición, en donde se plantaron en un macetero, estuvieron en observación por un tiempo con resultados de adaptación positivos.

De manera de poder conocer la planta un poco mejor, se decidió hacer este tipo de pruebas, es posible que los resultados no sean significativos, por no tener los conocimientos necesarios para poder manejar estas especies.

Si bien, no se encuentra dentro de los objetivos de la investigación, se hicieron observaciones para poder complementar la información obtenida.

³⁷ Juan Pablo Gabella Petridis. Ingeniero Agrónomo Director de Fauna Chile

³⁸ Correo electrónico recibido 03 10 2007 de Juan Pablo Gabella [jpgabella@faunachile.cl]

“Fitoremediación de Zonas de Transferencia de Polvos contaminadas con arsénico por medio del uso del helecho *Pteris Vittata*” Codelco Norte Chuquicamata.



Figura 39: Ejemplar encontrado en la mina, transplantado en tierra normal.

El *Holcus Lanatus* una vez aclimatado al lugar luego se transplantó en la tierra correspondiente a la muestra 2 de la Zona de Transferencia de Polvos, para ver si resistía al terreno.



Figura 40: Tierra Zona Transferencia de polvos



Figura 41: Holcus Lanatus en Tierra de ZTP después de 15 días

7.4 Recomendación II: Cultivo hidropónico Pteris Vittata

Debido posibles respuestas negativas a las características para el cultivo de plantas en la zona desértica ya sea por la aridez del suelo, las oscilaciones en la temperatura durante día y noche la alta acidez del suelo esta podría ser una buena alternativa en caso de no funcionar el cultivo en el suelo.

El cultivo hidropónico³⁹ puede ser una solución, ya que de esta manera se pueden utilizar las características absorbedoras de la planta, sin necesidad de ser integrada al suelo árido, de esta manera se le puede entregar medio mejorado, con los nutrientes necesarios.

En otra patente⁴⁰ de la Doctora Lena Q Ma, se presenta el estudio de la absorción de la Pteris Vittata, en una solución Hoagland⁴¹.

La solución Hoagland es una mezcla de nutrientes esencial para el crecimiento de las plantas, la cual se prepara sobre la base de la siguiente tabla:

³⁹ Francisco Castañeda Manual de Cultivos Hidropónicos Populares: Producción de Verduras sin usar la Tierra Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá (INCAP) y Organización Panamericana de la salud (OPS) 1997 p4 – 25}

⁴⁰ Lena Q. Ma, Cong Tu; Compositions and methods for removing pollutants from contaminated wafer with a fern US 7,069,690 B2 Jul. 4 2006

⁴¹ Solución de Hoagland, < <http://usuarios.arsys.es/julian/ecologia/solucion.htm>> [consulta: 23 de Agosto 2007]

Solución de Hoagland

Compuesto	Concentración
KNO_3	1,02 [g/l]
$Ca(NO_3)_2 \cdot 4 H_2O$	0,492 [g/l]
$NH_4H_2(PO_4)$	0,23 [g/l]
$MgSO_4 \cdot 7 H_2O$	0,49 [g/l]
H_3BO_3	2,86 [mg/l]
$MnCl_2 \cdot 2 H_2O$	1,81 [mg/l]
$CuSO_4 \cdot 5 H_2O$	0,08 [mg/l]
$ZnSO_4 \cdot 5 H_2O$	0,22 [mg/l]
$Na_2MoO_4 \cdot H_2O$	0,09 [mg/l]
$FeSO_4 \cdot 7 H_2O$ 0,5 %	0,6 [mg/l]

Tabla 27: Preparación Solución de Hoagland

Se estudiaron los rangos de absorción de la planta en la patente citada, por medio de una planta que fue transplantada a un recipiente, que contenía 200 [ml] de solución nutritiva Hoagland, a pH 7,5, se llevaron a cabo experiencias con soluciones con cantidad de arsénico entre 1 y 100 [ppm], la *Pteris Vittata* natural, no sólo soportó las cantidades agregadas, sino que además fue capaz de acumular hasta 2.700ppm en su fronda, se sabe que las concentraciones generalmente no pasan las 100[ppm] en los suelos, en el caso de la *edenfern*TM, se sabe que es capaz de sobrevivir en terrenos con concentraciones de hasta 2.500[ppm], por lo que se puede ocupar en terrenos fuertemente afectados.

Se sabe que la planta además logra llevar el contaminante hacia las hojas superiores, las cuales son más fáciles de cosechar para realizarles el tratamiento posterior,

La concentración en las hojas superiores de la planta llega a ser mayor a 30 veces en relación que en la solución hidropónica, comprobándose así la capacidad hiperacumuladora de ésta. En un total de 20 días se analizaron las cantidades de arsénico absorbidas por la planta realizando un perfil del contaminante, en la raíz y las hojas superiores. Los resultados son presentados en la siguiente tabla:

Nivel de As		
<i>As en Solución hidropónica [ppm]</i>	<i>Hojas Superiores [ppm]</i>	<i>Raíz [ppm]</i>
1	118	22
10	651	222
50	2424	480
100	2715	60

Tabla 28: Absorción Pteris Vittata en cultivo hidropónico

Se comprueba de esta manera un buen rendimiento de la planta en condiciones acuosas, por lo que se recomienda en caso de no obtener resultados con la adaptación del helecho a las condiciones locales debido a la aridez característica del suelo, utilizar el suelo como sustrato inerte y por medio de la adición de una solución nutritiva solubilizar el arsénico a arsenato, esta solución entrega los nutrientes necesarios para sobrevivir a la planta y además desde la solución ésta puede retirar el contaminante.

7.5 Conclusiones capítulo VII:

Por medio de este capítulo se entregan algunas alternativas para la implementación del proyecto, la fitoestabilización es una posibilidad más económica y sencilla de implementar, si bien no logra reducir la concentración de los metales en la tierra, logra mantenerlos en el terreno impidiendo que se propaguen libremente por los alrededores debido al viento.

La hidroponía es una opción interesante, puede ser utilizada para mejorar el rendimiento de absorción del contaminante por la planta, especialmente cuando el terreno en que se desea recuperar es de muy mala calidad para cultivos, este sistema se utiliza ocupando el terreno disponible como material inerte y por medio de una solución de nutrientes se crea un ambiente de crecimiento favorable para la planta, así el terreno a remediar sólo aportaría con el arsénico que posee ya que los nutrientes son ingresados por medio de soluciones especiales.

RESULTADOS

Con respecto a las pruebas realizadas en la Zona de Transferencia de Polvos con fin de conocer el estado real del terreno a remediar, acerca del resultado correspondiente a la **muestra 1**, en relación a la cantidad de arsénico contenida en la Zona de Transferencia de Polvos véase 4.4, llevado a cabo en el Laboratorio Central de Codelco Norte división Chuquicamata, presenta un valor bastante alto de 5700ppm, gracias a este análisis se descubrió que esa capa de alta concentración correspondía a un tipo de polvo que contiene 5% de arsénico que se encontraba comprimido sobre la superficie, por lo que no se trata del suelo del lugar y se procederá a retirar el polvo para realizar el tratamiento correspondiente.

Por lo tanto para efectuar el proceso de descontaminación por medio de fitoremediación en la Zona de Transferencia de Polvos es necesario retirar una capa de suelo aproximadamente de 20 a 30[cm] y tratarlo por medio del sistema de tratamiento de polvos (PTP) dejando el suelo descubierto para hacer la limpieza por fitoremediación.

El resultado de la **muestra 2** correspondiente a la cantidad de arsénico de la prueba tomada a profundidad, revela que el verdadero suelo posee sólo una concentración de 300[ppm] de arsénico, por lo que el proceso de fitoremediación sería de gran ayuda para poder bajar esta concentración, un punto favorable para ésta técnica es que la *Pteris Vittata* es capaz de sobrevivir en ambientes que presentan concentraciones hasta de 2.500[ppm] por lo que un suelo con 300[ppm] no sería problema para el proyecto propuesto.

Como se mencionó anteriormente véase 1.4 en Chile aún no existe una normativa que regule la cantidad de arsénico contenido en suelos que no se utilicen con fines agrícolas, las pautas a seguir están dadas por normas internacionales, como por ejemplo en Alemania, donde el límite máximo en un suelo degradado es de 40[ppm], por lo que para este proyecto se fija como meta bajar desde 300[ppm] hasta 40[ppm], para cumplir con la reglamentación europea.

Sin embargo el factor posible "limitante" para el desarrollo del sistema de limpieza resulta ser el clima de la región. Para hacer las observaciones necesarias para concebir el proceso de descontaminación, se internó a la región un helecho de la familia *Pteris* el *Pteris Chilensis*, que corresponde a un helecho herbáceo delicado, proveniente desde la VII región de Chile, el cual lamentablemente no fue capaz de sobreponerse completamente al traslado, por lo que se debe tener en consideración si se desea importar ejemplares desde el extranjero, es un viaje largo y existe la posibilidad de que algunas de las plantas puedan secarse afectando directamente la inversión inicial del proyecto.

Si bien el Pteris Chilensis es un familiar no posee características idénticas al Pteris Vittata; que según el profesor Patricio Peñailillo argumenta ser un helecho robusto y más resistente.

De acuerdo a la empresa Edenspace™, creadora de la versión transgénica de esta especie de alto rendimiento, asegura que el helecho de Edenfern™ es firme y resistente, dice preferir el sol y en situaciones de sequía sólo necesita abundante agua, por lo que se debe tener en consideración que no deja de ser complicado internar un helecho en esta región y de llevarlo a cabo será necesario entregarle las condiciones ambientales necesarias para su sobre vivencia, este trabajo puede ser dirigido por un profesional con conocimiento y calificado en el área botánica. Se sabe que se pueden construir lugares cerrados con atmósferas controladas para entregar la humedad ambiental necesaria con lo que se puede contrarrestar la aridez del lugar. Por medio de la implementación de un invernadero además se minimiza el efecto de contaminación debida a la precipitación del contaminante desde gases emanados desde la fundición, favoreciendo también la velocidad de limpieza del terreno.

Se simuló la absorción de arsénico con la planta Pteris Vittata desde la Zona de Transferencia de Polvos, por medio del uso del modelo matemático absorción de arsénico desde el suelo a la planta y de acuerdo a los resultados obtenidos, se puede decir que son positivos con respecto a la extracción de arsénico, garantizando que este sistema es factible y funciona.

Lamentablemente estos resultados pueden no ser del todo satisfactorios con respecto al factor tiempo de operación, se realizó una simulación en dos etapas a tres años cada una, comenzando con una concentración inicial en el terreno de 300[ppm], finalmente en la segunda etapa, se alcanza una concentración aproximada 40[ppm] en el último año, por lo que sumando los tiempos de las dos etapas, se concluye que se puede reducir la concentración de arsénico de la Zona de Transferencia de Polvos desde 300[ppm] iniciales hasta 40[ppm] finales (aceptado por las reglas internacionales) en un período aproximado de 6 años por medio del uso de la Pteris Vittata natural.

En caso de que el tiempo de limpieza sea una prioridad, este resultado hace esta técnica poco atractiva, por el contrario, si el tiempo no es un factor decisivo para la limpieza, éste es un mecanismo resulta muy interesante, ya que logra el objetivo de la limpieza habilitando áreas verdes atractivas para la vista especialmente en el desierto.

Para mejorar la velocidad del proceso se decide buscar un reemplazante para la planta Pteris Vittata Natural, la empresa bioquímica norteamericana Edenspace™ presenta una versión mejorada del helecho Pteris Vittata natural el cual posee un rendimiento mucho mayor, capaz de reducir el tiempo de ejecución del proyecto de manera considerable.

El helecho *Pteris Vittata* silvestre, logra bajar cerca de 32,239ppm de un terreno contaminado con 50ppm iniciales en un período de 3 años, con una velocidad promedio de absorción calculada de **2[ppm] por mes**.

Por otra parte, por información suministrada por Edenspace™, sabiendo que 50[ppm] es el total de contaminante inicial en el suelo, la edenfern™ absorberá 10[ppm] entre 2 a 4 meses con un velocidad calculada **entre 2,5 a 5 [ppm] por mes**, rendimiento aproximadamente entre **1,25 a 2,5 veces mayor reduciendo los plazos en un 20% a un 60%** al entregado por el modelo para helecho *Pteris Vittata* en su forma natural.

Estos resultados son importantes al momento de decidir por una especie ya que la edenfern™ sería capaz de recortar los tiempos de limpieza considerablemente, disminuyéndolos desde **6 [años]** a un tiempo de limpieza total del terreno de un período comprendido entre **3 años 7 meses a 4 años con 9 meses**.

Además se debe considerar que la edenfern™ puede extraer el arsénico de un suelo de una gama de concentraciones arsénico que se extienden de menos de 1[ppm] hasta 2.500ppm.

En relación al análisis realizado en el Laboratorio de suelos de la PUCV revela que el pH del suelo de la Zona de Transferencia de Polvos de Codelco Norte, es de 7,73 muy cercano al pH 8 requerido por la edenfern™ para poder limpiar, además los resultados revelan de que existe una concentración de 8,39 [ppm] de hierro en el suelo, factor importante ya que el hierro tiende a acomplejarse con el arsénico de la forma $Fe - As^{+5}$ dificultando la extracción de arsénico, por lo que una baja concentración de Fe ayuda a la rápida recuperación de arsénico véase *ANEXO F.1.4 Pág. 52*

Las experiencias realizadas a través del planeta avalan la efectividad del proceso de absorción de arsénico por medio de la fitoremediación, algunos antecedentes de resultados en pruebas y experimentaciones que se han realizado utilizando el ejemplar seleccionado la edenfern™; esta tecnología de absorción se ha aplicado en muchos lugares a lo largo de los Estados Unidos. Los ejemplos mas destacados incluyen Magic Marker en New Jersey, un terreno de Daimler Chrysler en Detroit y finalmente en Michigan en donde se trató un caso de acumulación inducida del plomo en suelo por medio de otra especie generada por edenspace empresa creadora de la edenfern™.

Mas información acerca de rendimientos comprobados de la edenfern™ son presentados en los anexos de esta investigación véase *ANEXO D1.1 Pág. 35*

Por las razones antes indicadas de velocidad de hiperacumulación, la absorción y tolerancia a grandes concentraciones de arsénico, se decidió seleccionar para este proyecto la planta de

edenfern™, la cual presenta un rendimiento considerablemente mayor en la velocidad de acumulación de arsénico, por medio de una evaluación comparando las características de las dos plantas posibles se toma la decisión de adoptar esta especie como la principal en este proyecto de fitoremediación.

CONCLUSIONES GENERALES

Considerando los objetivos planteados al inicio de esta investigación; véase 1.6, es decir; que es factible encontrar un proceso de descontaminación el cuál sea capaz de recuperar el arsénico que se encuentra en suelos contaminados llevándolo a un producto estabilizado no tóxico, que utilice como mecanismo principal de recuperación la fitoremediación por medio de la extracción usando el helecho *Pteris Vittata* para lograr la disminución de la concentración del arsénico en los suelos afectados y evaluar su aplicación al caso particular de la “Zona de Transferencia de Polvos Metalúrgicos”, se concluye que: La hipótesis se cumple satisfactoriamente, pero posee una condicionante; Se deben entregar las condiciones climáticas necesarias para el desarrollo natural de la planta en el terreno a remediar. Si se realiza el acondicionamiento ambiental correcto en el lugar a limpiar se puede afirmar con toda propiedad que:

El sistema de fitoremediación por medio del helecho creado por edenfern™ puede ser considerado como un sistema efectivo de limpieza y presenta una opción real de recuperación de terrenos contaminados con arsénico, el sistema de fitoremediación realmente funciona, presentando una cantidad considerable de ventajas competitivas sobre las técnicas convencionales.

En la actualidad no existen en Chile regulaciones legales para la cantidad de arsénico contenido en suelos que no se deseen utilizar como terrenos de cultivo agrícola. Siguiendo las tendencias internacionales, se debe prever una reglamentación cada vez más rigurosa en el ámbito ambiental.

En materia general, cada vez se delimitan mejor las libertades de las empresas con respecto a emisiones de contaminantes, junto a las reglamentaciones para el cuidado y respeto por el medio ambiente. Esta tendencia no es ajena al campo de la minería, todo lo contrario, las fiscalizaciones son cada vez más exigentes para este rubro, por lo que es necesario proyectar soluciones y estar preparado para cuando sea necesario entrar en acción.

La imagen de Codelco, como la empresa mas importante de producción de cobre a nivel mundial, se ve beneficiada al mostrar una preocupación previa por la preservación y limpieza del medio ambiente y en especial por apoyar y desarrollar el estudio de tecnologías vanguardistas, acrecentando el prestigio y demostrando estar un paso al frente a los desafíos futuros.

Se entrega un aporte importante al conocimiento en el ámbito de la fitoremediación, generando un estudio moderno e innovador en el área de mantención y limpieza ambiental.

En esta investigación se presentan las herramientas necesarias para poder retirar el contaminante desde terrenos degradados, y gracias a la modelación matemática presentada, se puede conocer con anticipación los rendimientos y tiempos de operación de este sistema aplicado a cualquier división o lugar en donde sea necesario reducir la cantidad de arsénico en terrenos impactados ecológicamente.

Otra ventaja importante de la técnica aquí presentada, surge al compararla con los métodos de fitoremediación convencionales, el proceso aquí desarrollado cuenta además con el diseño ingenieril de una planta de extracción de arsénico desde las especies vegetales cosechadas, es un sistema ideado y presentado como solución para poder confinar finalmente el elemento contaminante. Este sistema de reextracción del contaminante desde la planta, hasta ahora no ha sido diseñado ni nombrado por otros investigadores que trabajan en la fitoremediación en el mundo, este sistema agrega un valor considerable a este trabajo, entregando ventaja por sobre los otros procesos fitoremediadores tradicionales.

En la propuesta presentada en este trabajo, por medio del traspaso del arsénico a una solución ácida, se recupera el contaminante desde las especies vegetales, para luego en un paso posterior será precipitado en la planta de ácido de Codelco Norte para minimizar la toxicidad y facilitar el manejo seguro.

Se puede concluir finalmente que ésta es una técnica capaz de satisfacer las necesidades exigentes de limpieza de terrenos de manera exitosa y posee un rango de operación bastante amplio, puede trabajar en terrenos con índices menores a 1[ppm] hasta terrenos degradados con concentraciones tan altas de hasta 2.400[ppm], según la empresa Edenspace™, fabricante de edenfern™, su capacidad absorbedora se incrementa linealmente con la cantidad de arsénico contenido en los suelos a tratar, entregando mejores rendimientos en condiciones complejas.

Con respecto al valor de la inversión inicial, si bien puede parecer elevada USD 27940, esto corresponde a la etapa mas cara que corresponde a la puesta en marcha del proyecto, es necesario considerar de que la mantención no representa un costo elevado y al tratarse de especies vegetales, una vez internadas al país es posible multiplicarlas para obtener mayor cantidad de especies para ejecutar la limpieza terrenos, el costo involucrado trae como beneficio obtener un terreno limpio libre de arsénico, evitando “costosas sanciones” futuras.

BIBLIOGRAFÍA

1. CHILE. Ministerio de Salud. 13 de Abril 1998. La Resolución N° 1459: Límites en la emisión de arsénico.
2. CHILE. Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República. 02 de Junio de 1999. D.S.N°165: Límites en la emisión de Arsénico.
3. Lena Q. Ma "A fern that hyperaccumulates arsenic" Nature, 1 February 2001 Vol409 p 579
4. Lena Qiying Ma Profesora "Biogeochemistry of Trace Metals" Universidad de Florida, Ph.D. 1991. "Environmental Soil Chemistry". Colorado State University. M.S. 1988. "Environmental Soil Chemistry". Colorado State University. B.S. 1985. "Soil Science." Shenyang Agricultural University, China.
5. Smith, A.H.
Marked increase in bladder and lung cancer mortality in a region of Northern Chile due to arsenic in drinking water,. J. Epidemiol, 1998, 600-669.
6. Sanchez Bascones, Ma Isabel
Determinación de metales pesados en suelos de mediana del campo (Valladolid):
Contenidos extraíbles, niveles de fondo y de referencia, 2003 p23
7. Diaz, O., Muñoz, O., Recabarren, E., Montes, S., Martínez, S., Soto, H., Yáñez, M., (...),
Montero, R.
Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology UCSB, CA 2005,
Bioremediation of soil and irrigation water contaminated with arsenic in the second region of
Chile, 2465-2474.
8. Hamilton, Joshua "Biomonitoring Study Design, Interpretation, and Communication--Lessons
Learned and Path Forward", Environmental Health Perspectives November 2005: Vol 113,
Number 11.

9. Encargada de la Oficina de Informaciones SAG Calama II Región Antofagasta Chile.
10. Jorge Ahumada Ferrera, Antonio Luraschi Gioia Curso Pirometalurgia del Cobre Universidad de Antofagasta 1999.
11. Edenfern Edenspaces, < <http://www.edenspace.com/edenfern.html>> [consulta: 10 de Agosto 2006]
12. Ambiente Ecológico <http://www.ambiente-ecologico.com/ediciones/2003/087_02.2003/087_Investigacion_ValquiriaCampos_Esp.php3>[consulta: 12 de Agosto 2005]
13. Strategies for the phytoremediation of arsenic, <http://www.genetics.uga.edu/rbmlab/phyto/Asstrategies.html> [consulta: 25 Abril 2006]
14. Phytoremediation Biological remediation of environmental problems using plants 2002 <<http://www.mobot.org/jwccross/phytoremediation/>> [consulta: 02 Mayo 2006]
15. Ute Kramer Phytoremediation: novel approaches to cleaning up polluted soils Elsevier Science Direct 2006.
16. Weihua Zhang a, Yong Cai a, Kelsey R. Downumb, Lena Q. Mac. Arsenic complexes in the arsenic hyperaccumulator *Pteris Vittata* (Chinese Brake Fern). Department of Chemistry and Biochemistry and Southeast Environmental Research Center, Florida International University, 2004. 249-254p Journal of Chromatography Elsevier.
17. Luke Gumaelius, Brett Lahner,
18. "Arsenic hyperaccumulation in gametophytes of *Pteris Vittata*. a new model system for analysis of arsenic hyperaccumulation", Plant Physiol. Vol. 136: 3198-3207 Marzo 2004
19. Robert E. Treybal Operaciones de Transferencia de Masa traducido por Amelia García Rodríguez 2da edición Mc graw Hill Buenos Aires Difusión y Transferencia de Masa p23 – 140 Lixiviación p792 – 819.

20. Warren L. Mac Abe, Julian C. Smith, Peter Harriot Operaciones Unitarias en Ingeniería Química traducido por Elita Guardiola Fomento 4ta edición Mc graw Hill Madrid 1991 Lixiviación y extracción p518.
21. Lena Q. Ma; Ken M Komar, Methods for removing pollutants from contaminated soils materials with a fern plant US 6,302,942 Oct. 2001
22. Enciclopedia libre http://es.wikipedia.org/wiki/Clima_tropical [Agosto 2007]
23. Enciclopedia libre http://es.wikipedia.org/wiki/Clima_subtropical consulta [Agosto 2007]
24. US Department of Agriculture Natural Resources Conservation Services <<http://plants.usda.gov/java/profile?symbol=PTVI>> [consulta Abril 2006]
25. Carlos Buduba “Muestreo de suelos criterios básicos” Patagonia Forestal, Abril 2004, año X p.9-12
26. Patricio Peñailillo colaborador, Profesor de Botánica y Agronomía Universidad de Talca; Licenciado en Biología, Doctor en Botánica Universidad de Chile <<http://biologia.otalca.cl/patricio.html>> [consulta: 25 de Julio 2007]
27. Andrew C. Chang, Weiping Chen, Beni Bar-Yosef, Albert L. Page, Seongju Kim. Plant Uptake Parameters. A Generalized Trace Element Mass Balance Model for Cropland Soils: Arsenic and Cadmium. January, 2004, p. 11 - 85
28. Programa STEM Andrew C. Chang, < <http://www.envisci.ucr.edu/faculty/chang.html> > [consulta: 30 de Julio 2007]
29. Matche's Process Equipment Cost Estimates, < <http://matche.com/EquipCost/>> [consulta: 6 de Noviembre 2007]
30. Seoáñez, M. (1999), “Contaminación del suelo: estudios, tratamiento y gestión”. Ediciones Mundi-Prensa. España.

31. The Nature of Arsenic- Phytochelatin Complexes in *Holcus Lanatus* and *Pteris Cretica*. <<http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=389935>>. consulta [consulta: 27 Julio 2007]
32. Andrew A. Meharg y Mark Macnair, An altered phosphate uptake system arsenate-tolerant *Holcus Lanatus* L May 1990 p29-35
33. Francisco Castañeda Manual de Cultivos Hidropónicos Populares: Producción de Verduras sin usar la Tierra Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá (INCAP) y Organización Panamericana de la salud (OPS) 1997 p4 – 25}
34. Lena Q. Ma, Cong Tu; Compositions and methods for removing pollutants from contaminated wafer with a fern US 7,069,690 B2 Jul. 4 2006
35. Solución de Hoagland, < <http://usuarios.arsys.es/julian/ecologia/solucion.htm>> [consulta: 23 de Agosto 2007]
36. Clima Antofagasta, <<http://www.bcn.cl/siit/regiones/region2/clima.htm>> [consulta: 10 de Agosto 2007]

GLOSARIO

- **Fitoremediación:** Uso de plantas vegetales para retirar contaminantes que se encuentren alojados por diferentes circunstancias en suelos.
- **Composta vegetal:** Biomasa generada por medio de la disminución del material con fines de lixiviación.
- **Polvos metalúrgicos:** Polvos generados por la precipitación de gases captados que se generan en la fundición de cobre.
- **Zona de Transferencia de Polvos:** Cancha o terreno que se utiliza para depositar los polvos metalúrgicos transitoriamente antes de ser llevados a su tratamiento posterior en la PTP.
- **PTP:** Planta de tratamiento de Polvos, en este lugar los polvos que habían sido almacenados en la Zona de Transferencia de Polvos, son lixiviados con agua ácida pH 1,2 para poder retirar el cobre. Luego desde esa solución es precipitado el arsénico.
- **Complejo tiopéptido:** Complejo formado por una molécula peptídica que atrapa el arsénico en la fase previa al transporte a las vacuolas en el proceso de absorción de arsénico que realiza la *Pteris Vittata*.
- **Vacuolas:** Receptáculo que se encuentra en el citoplasma de las células cerca del ribosoma, que tiene por fin almacenar desechos generados por la célula.
- **Lixiviación:** Proceso de recolección de un elemento desde un sólido, generalmente se realiza en la minería para recuperar metales de alto valor desde rocas inertes o que no pueden ser tratadas por medio de la pirometalurgia.
- **Percolación:** Drenaje que se le realiza a un sólido con una solución para extraer un elemento valioso, por medio del traspaso del elemento desde el sólido al líquido.

- **Hiperacumulación:** Referida a *Pteris Vittata*; capacidad de acumular gran cantidad del contaminante generando una razón alta entre el elemento alojado en la fronda con respecto a la concentración que se encuentra en el suelo.
- **Análisis foliar:** Prueba que se hace a los suelos de preferencia agrícola antes de realizar una plantación, para ver la calidad real del suelo y obtener el mejor rendimiento de la tierra a cultivar.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERIA QUÍMICA

ANEXOS

**“FITOREMEDIACIÓN DE ZONAS DE
TRANSFERENCIA DE POLVOS CONTAMINADAS
CON ARSÉNICO POR MEDIO DEL USO DEL
HELECHO PTERIS VITTATA”**

Ricardo Saldívar Ramírez

Profesores guía:

Gianni Olguín

José Torres Titus

Co referente: Jorge Zúñiga

2007

INDICE ANEXOS

INDICE ANEXOS	I
INDICE TABLAS	V
INDICE DE FIGURAS	VII
A CODELCO NORTE DIVISIÓN CHUQUICAMATA	1
A.1 HISTORIA	2
A.2 PRODUCCIÓN	3
B PROCESOS PRODUCTIVOS FUNDICIÓN DE CONCENTRADO CODELCO NORTE.....	6
B.1 SECADO DE CONCENTRADOS	6
B.2 FUSIÓN DE CONCENTRADO DE COBRE	7
<i>B.2.1 Horno flash.....</i>	<i>8</i>
• Tecnología de fusión flash (horno flash Outokumpu).....	10
• Horno flash Outokumpu	11
<i>B.2.2 Convertidor teniente.....</i>	<i>12</i>
B.3 CONVERSIÓN DE LA FASE SULFURADA	14
<i>B.3.1 Convertidor Peirce Smith (CPS)</i>	<i>15</i>
B.4 PIROREFINACIÓN DEL COBRE BLISTER	17
<i>B.4.1 Oxidación</i>	<i>18</i>
<i>B.4.2 Reducción</i>	<i>20</i>
<i>B.4.3 Moldeo</i>	<i>23</i>
B.5 TRATAMIENTO DE ESCORIAS	25
<i>B.5.1 Pérdidas de cobre en la escoria.....</i>	<i>25</i>
<i>B.5.2 Proceso pirometalúrgico de tratamiento de escorias</i>	<i>26</i>
<i>B.5.3 Tratamiento en horno eléctrico</i>	<i>27</i>
<i>B.5.4 Proceso HTE.....</i>	<i>29</i>
B.5.4.1 Etapa de Reducción	31
B.5.4.2 Etapa de Sedimentación	32

C	PROCEDIMIENTO DE MUESTREO DE SUELO EN ZONA DE TRANSFERENCIA DE POLVOS.....	33
C.1	MUESTRA 1.....	33
C.2	MUESTRA 2.....	34
D	ACERCA DE EDENFERN™.....	35
D.1.1	<i>Resultados registros experimentales de la Edenfern™</i>	35
D.1.2	<i>Trámite de internación a Chile de la Edenfern™:</i>	37
D.1.3	<i>Costo de la edenfern™</i>	38
E	CÁLCULOS PARA LA OBTENCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO ABSORCIÓN	39
E.1	BALANCE DE MASA DEL ELEMENTO DE RASTREO.....	39
E.2	RELACIONES UTILIZADAS PARA LA OBTENCIÓN DEL MODELO.....	40
E.3	LINEALIZACIÓN Y OBTENCIÓN DEL MODELO DE PRIMER ORDEN	44
E.3.1	<i>Resultados</i>	47
F	PARÁMETROS BIBLIOGRÁFICOS COMPLEMENTARIOS DE REFERENCIA PARA EL MODELO MATEMÁTICO DE ABSORCIÓN.....	48
F.1.1	<i>Distribución promedio elemento de rastreo en suelos</i>	48
F.1.2	<i>Datos distribución arsénico en suelos</i>	49
F.1.3	<i>Clasificación de arsénico presente en los suelos</i>	50
F.1.4	<i>Adsorción de arsénico en la superficie</i>	52
F.1.5	<i>Parámetros de la característica del suelo</i>	54
F.1.6	<i>Parámetros de absorción (uptake) de la planta</i>	55
G	SISTEMA DE CAÑERÍAS PARA CIRCUITO.....	56
G.1	TRAMO I: CARGA.....	58
G.1.1	<i>Pérdidas por descarga del sistema en tramo I</i>	60
G.1.2	<i>Pérdidas por succión del sistema en tramo I: Carga</i>	62
G.1.3	<i>Balance Energía tramo I: Carga</i>	64
G.2	TRAMO II: RECIRCULACIÓN	68
G.2.1	<i>Pérdidas por descarga del sistema tramo II: Recirculación</i>	69
G.2.2	<i>Pérdidas por succión de la bomba en tramo II: Recirculación</i>	71
G.2.3	<i>Balance Energía tramo II: Recirculación</i>	73
G.3	TRAMO III: DESCARGA.....	77

G.3.1	<i>Pérdidas por descarga del sistema tramo III Descarga</i>	78
G.3.2	<i>Pérdidas por succión de la bomba en tramo III: Recirculación</i>	80
G.3.3	<i>Balance Energía tramo III: Descarga</i>	82
H	DISEÑO MECÁNICO EQUIPOS SISTEMA PERCOLADOR	86
H.1	DISEÑO MECÁNICO DE ESTANQUE PERCOLADOR	86
H.1.1	<i>Cálculo de espesor</i>	86
H.1.2	<i>Cabezal tapa plana</i>	87
H.1.3	<i>Cálculos de esfuerzos en el reactor</i>	89
•	Presión Interna	89
•	Pesos Muertos	90
•	Esfuerzos por vientos	92
•	Esfuerzo por sismo	93
H.1.4	<i>Análisis esfuerzos en equipo percolador</i>	94
•	Análisis equipo operando	94
•	Análisis equipo sin operar	97
H.2	DISEÑO LOS ESTANQUES DE ESTANQUE ALIMENTACIÓN HNO ₃ Y RECEPTOR SOLUCIÓN	101
H.2.1	<i>Cálculo de espesor</i>	101
H.2.2	<i>Cabezales toriesféricos</i>	102
H.2.3	<i>Cálculos de esfuerzos en equipos alimentación HNO₃ y receptor de solución ácida</i> 103	
•	Presión Interna	103
•	Pesos Muertos	105
•	Esfuerzos por vientos	106
•	Esfuerzo por sismo	107
H.2.4	<i>Análisis esfuerzos en equipos alimentación HNO₃ y receptor de solución ácida</i> ..	108
•	Análisis equipos operando	108
•	Análisis equipo sin operar	111
I	DATOS REACCIÓN LIXIVIACIÓN	115
J	CINÉTICA DE REACCIÓN	116
J.1	DATOS ENTRADA CÁLCULO DE REACCIÓN	119
J.2	RESULTADOS CINÉTICA REACCIÓN	121

K	INVENTARIO DE COMPRA	123
K.1	CAÑERÍAS NECESARIAS:	123
K.2	BOMBA.....	124
K.3	INVENTARIO DE COMPRA: ESTANQUES	125
L	BIBLIOGRAFÍA: ANEXOS	127
M	INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA	128
M.1	RESULTADOS LABORATORIOS.....	128
M.2	RESULTADOS LABORATORIO SUELOS PUCV	129

INDICE TABLAS

Tabla 01: Producción de cobre y molibdeno, en toneladas métricas finas.....	4
Tabla 02: Dimensiones del horno flash Outokumpu.....	11
Tabla 03: Reacciones de las impurezas.....	16
Tabla 04: Composiciones de S y O en las etapas de la Pirorefinación.....	19
Tabla 05: Composición cobre anódico.....	23
Tabla 06: ppm promedio en diferentes suelos.....	48
Tabla 07: Promedio As en estado California.....	49
Tabla 08: Concentración en fases.....	49
Tabla 09: Propiedades del arsénico en suelos.....	50
Tabla 10: Constantes lineales de adsorción de Arsénico en Suelos.....	52
Tabla 11: Conductividad hidráulica de diferentes suelos.....	54
Tabla 12: Tasas de absorción de arsénico de diferentes plantas.....	55
Tabla 13: Largos equivalentes sistema descarga tramo 1.....	60
Tabla 14: Largos equivalentes sistema tramo I.....	61
Tabla 15: Largos equivalentes sistema succión tramo 1.....	62
Tabla 16: Constantes flujo en cañería.....	63
Tabla 17: Datos curva sistema tramo 1.....	67
Tabla 18: Largos equivalentes sistema descarga tramo 2.....	69
Tabla 19: Constantes tramo II.....	70
Tabla 20: Largos equivalentes sistema succión tramo 2.....	71
Tabla 21: Cálculo factor Darcy sistema tramo II.....	72
Tabla 22: Datos curva de sistema tramo 2.....	76
Tabla 23: Largos equivalentes sistema descarga tramo 3.....	79
Tabla 24: Cálculo factor Darcy sistema tramo 3.....	79
Tabla 25: Largos equivalentes sistema succión tramo 3.....	80
Tabla 26: Cálculo factor Darcy sistema tramo III.....	81
Tabla 27: Datos curva de sistema tramo 2.....	85
Tabla 28: Espesor estanque percolador.....	86
Tabla 29: Factor C Apéndice H Brownell.....	87
Tabla 30: Presiones en el estanque.....	88
Tabla 31: Espesores cabezales estanque percolador.....	88
Tabla 32: Constantes para esfuerzo viento.....	92

Tabla 33: constantes para esfuerzo sismo	93
Tabla 34: Determinación esfuerzo controlante	94
Tabla 35: Determinación esfuerzo controlante	94
Tabla 36: Tensión equipo percolador operando	95
Tabla 37: Compresión equipo percolador operando	96
Tabla 38: Tensión equipo percolador operando	98
Tabla 39: Compresión equipo percolador operando	99
Tabla 40: Espesor estanques	101
Tabla 41: Constantes para el cabezal	103
Tabla 42: Espesores cabezales.....	103
Tabla 43: Constantes para esfuerzo viento	104
Tabla 44: Cañerías en estanques.....	105
Tabla 45: Constantes esfuerzo viento	106
Tabla 46: Esfuerzo viento	106
Tabla 47: Constantes esfuerzo sismo	107
Tabla 48: Determinación esfuerzo controlante	108
Tabla 49: Tensión equipo percolador operando	109
Tabla 50: Compresión equipo percolador operando	110
Tabla 51 Tensión equipo percolador operando	112
Tabla 52: Compresión equipo percolador operando	113
Tabla 53: Constantes y características reacción disolución del arsénico en reactor HSC.....	115
Tabla 54: Parámetros de la reacción de disolución de arsénico	116
Tabla 55: variables presentes en el desarrollo cinética química	117
Tabla 56: Datos entrada cálculo cinética de reacción	119
Tabla 57: Pesos moleculares para cálculo cinética de reacción	120
Tabla 58: Variación de concentraciones en el reactor.....	121
Tabla 59: Cañerías	123
Tabla 60: Fittings para cañería de 1/2"	123
Tabla 61: Fittings para cañería de 3/4"	123
Tabla 62: Especificaciones para bomba.....	124
Tabla 63: Inventario compra estanques	125
Tabla 64: Inventario compra estanques receptor alimentador	126

INDICE DE FIGURAS

Figura 01: Mina Chuquicamata.....	1
Figura 02: Fundición en sus primeros años.....	2
Figura 03: Gráfico precio del cobre desde 1935.....	4
Figura 04: Horno Flash.....	11
Figura 05: Convertidor Teniente.....	13
Figura 06: Descarga del CT2, convertidor teniente.....	13
Figura 07: Convertidor Peirce Smith.....	15
Figura 08: Refino a fuego y ruedas de moldeo.....	22
Figura 09: Ruedas de moldeo.....	23
Figura 10: Rueda de moldeo.....	24
Figura 11: Ánodos en rueda de moldeo.....	24
Figura 12: Horno limpieza Escoria.....	30
Figura 13: Patrón de recorrido para extraer submuestras en área homogénea.....	33
Figura 14: Proceso cuarteo muestra homogénea.....	34
Figura 15: Incremento absorción respecto As en suelo.....	35
Figura 16: Reducción arsénico en suelos por medio de cosechas.....	36
Figura 17: Descripción general esquemática de Balance de Masa del rastreo de elemento.....	39
Figura 18: Disposición tramo I: Carga, para curva de sistema.....	58
Figura 19: Sistema descarga tramo I.....	60
Figura 20: Sistema succión tramo I.....	62
Figura 21: Puntos de Bernoulli sistema en tramo 1.....	64
Figura 22: Curva sistema tramo I.....	67
Figura 23: Disposición tramo II: recirculación, para curva de sistema.....	68
Figura 24: Sistema descarga tramo II.....	69
Figura 25: Sistema succión tramo II: Recirculación.....	71
Figura 26: Puntos de Bernoulli sistema en tramo 2.....	73
Figura 27: Curvas sistema tramo II.....	76
Figura 28: Disposición tramo III Descarga.....	77
Figura 29: Sistema descarga tramo III.....	78
Figura 30: Sistema succión tramo 3: Recirculación.....	80
Figura 31: Puntos de Bernoulli sistema en tramo 2.....	82
Figura 32: Curva de sistema tramo III.....	85

Figura 33: Tapa plana.....	87
Figura 34: Gráfico análisis esfuerzos equipo percolador operando	97
Figura 35: Gráfico análisis esfuerzos equipo percolador operando	100
Figura 36: Cabezal Toriesférico.....	102
Figura 37: Gráfico análisis esfuerzos equipo percolador operando	111
Figura 38: Gráfico análisis esfuerzos equipo percolador operando	114
Figura 39: Gráfica simulación estanque percolador	122

1 Codelco Norte División Chuquicamata

La división Chuquicamata de Codelco Norte⁴², se encuentra ubicada a 16 [km] al norte de la ciudad de Calama, esta corresponde a la mina de cobre a cielo abierto más grande del mundo.

La empresa Guggenheim Bross. de Estados Unidos, produjo la primera barra de cobre fino el 18 de mayo 1915, a lo que siguió un período durante el cual la empresa recibe sucesivos nombres como Chile Copper Co. , Anaconda Co. y Chilex Exploration Co.

Miles de mineros llegaron en busca de oportunidades cuando comenzaron las primeras extracciones masivas de cobre. La compañía propiedad de los hermanos Guggenheim adquirió los derechos de la antigua sociedad y rebautizó la firma como "Chile Exploration Company".

El complejo minero de Codelco Norte consta de tres minas a cielo abierto. Mina Sur, la más pequeña, Mina Radomiro Tomic y Mina Chuquicamata.

La mina Chuquicamata se caracteriza por contener el cobre a flor de tierra, por lo que se explota a cielo abierto, en una extensión de forma elíptica semejante a un anfiteatro de 4.000[m] de largo, 1.900[m] de ancho y de 950[m] de profundidad. Diariamente se extrae aproximadamente 600.000[ton] del material, de las cuales 180.000[ton] corresponden a un mineral con una ley aproximada de 1% de cobre.

Durante su historia el Campamento de Chuquicamata que se había construido cerca de la mina albergaba a la mayoría de los trabajadores de Codelco Norte, pero debido a las nuevas exigencias ambientales y la necesidad de declarar el sector como zona industrial, la compañía Codelco, que maneja la mina actualmente, tuvo que trasladarlo a la ciudad de Calama llevándose todos sus pobladores, con plazo final el 10 de Agosto del 2007.



Figura 01: Mina Chuquicamata

⁴² Memorias Públicas Codelco edición 2006

"Fitoremediación de Zonas de Transferencia de Polvos contaminadas con arsénico por medio del uso del helecho *Pteris Vittata*" Codelco Norte Chuquicamata.

7.6 Historia

Cientos de años antes de Cristo, culturas precolombinas que habitaban los faldeos de los Andes en el norte de Chile, ya utilizaban el cobre. Ellos desarrollaron la tecnología necesaria para poder explotar y trabajar el metal, incluso para producir aleaciones.

En la colonia, la explotación de cobre se realizaba a pequeña escala, se tienen registros de que para el año 1810 en Chile se producían 19.000 toneladas de mineral. Entre el año 1820 y el 1900 Chile produjo 2 millones de toneladas, llegando a ser el país más productor de este metal, la empresa se vio desvanecida por un tiempo por causa de la explotación del atractivo salitre en el norte del país, además del agotamiento de los minerales de alta ley. En 1897 se produjeron apenas 21.000 toneladas de cobre.

A comienzos del siglo XX comienzan las inversiones en El Teniente y Chuquicamata con la llegada de varias empresas norteamericanas, las cuales tenían casi el poder absoluto sobre la minería Chilena. En el año 1951 se firma el Convenio Washington, el cual daba la facultad a Chile de disponer de sólo el 20% de la producción de cobre.

Luego de varios años y negociaciones que le daban a Chile mayores atribuciones en el negocio minero, el año 1971 a través de la modificación del Art. 10 de la constitución, se produce la nacionalización del cobre.

Al artículo se le agregó una disposición transitoria que decía “por exigirlo el interés nacional y en ejercicio del interés soberano e inalienable del Estado de disponer de sus riquezas y recursos naturales, se nacionalizan y declaran por tanto incorporadas al pleno y exclusivo dominio de la Nación las empresas extranjeras, que constituyen la gran minería del cobre”,

El 1º de Abril de 1976 se crea la Corporación Chilena del Cobre, Codelco Chile a través del Decreto de Ley N°1.350. La compañía agrupó los yacimientos existentes en una sola empresa minera, industrial y comercial, con personalidad jurídica y patrimonio propio, de duración indefinida que se relaciona a través del entonces Ministerio de Minería.

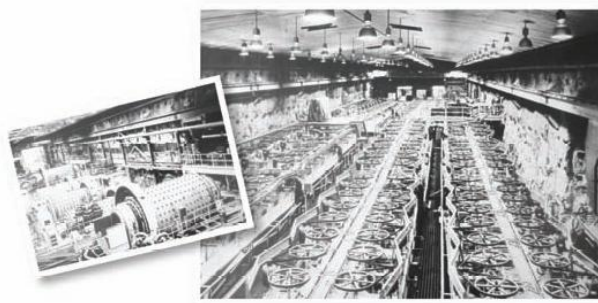


Figura 02: Fundición en sus primeros años

“Fitoremediación de Zonas de Transferencia de Polvos contaminadas con arsénico por medio del uso del helecho *Pteris Vittata*” Codelco Norte Chuquicamata.

7.7 Producción

Actualmente Codelco comprende 5 divisiones, las que son detalladas a continuación:

- 1) **División Codelco Norte:** fusión de Divisiones de Chuquicamata y Radomiro Tomic en agosto del 2002.
 - a) Chuquicamata, la mayor mina a cielo abierto del mundo, en operaciones desde 1910.
 - b) Radomiro Tomic, en operaciones desde 1997.

- 2) **División Salvador:**
 - a) Mina Vieja (1920-1959), era el yacimiento original de la zona hasta su reemplazo por El Salvador.
 - b) El Salvador, en operaciones desde 1959.
 - c) Gerencia de operaciones Fundición - Refinería.

- 3) **División Andina:**
 - a) Río Blanco, en operaciones desde 1970.

- 4) **División El Teniente:**
 - a) El Teniente, la mina subterránea más grande del mundo, en operaciones desde 1904.

- 5) **División Ventanas** (creada el 2005):
 - a) Fundición y Refinería de Ventanas, inaugurada en 1964 por Enami y traspasada por la Ley N° 19.993 del 2005 a Codelco.

Por la Ley N° 19.137, del 12 de mayo de 1992, Codelco se puede asociar terceros para realizar sus actividades mineras. La principal asociación ha sido la SCM El Abra, para el yacimiento de cobre del mismo nombre ubicado en la II Región. Formada en 1994 teniendo Codelco un 45% de participación y el 55% Phelps Dodge (EE.UU.).

La producción de cobre propio alcanzó 1.675.916 toneladas métricas finas de cobre, durante el año 2006, con participación mayoritaria de Codelco Norte con 964.931 en el 2005 y 940.613 toneladas métricas finas de cobre.

	Cobre [ton]		Molibdeno [ton]	
	2005	2006	2005	2006
<i>Codelco Norte</i>	964,931	940,613	28,826	17,781
<i>Salvador</i>	77,52	80,615	1,248	1,366
<i>Andina</i>	248,137	236,356	3,244	3,308
<i>El Teniente</i>	437,393	418,332	5,249	4,749
<i>El Abra</i>	103,203	107,122	-	-
Total	1.181,135	1.783,038	36,567	27,204

Tabla 01: Producción de cobre y molibdeno, en toneladas métricas finas

Las alzas en el precio del cobre se han doblado en este último tiempo hasta 305.3 centavos de dólar por libra de cobre fino, precio promedio para el 2006, comparados con los 167.1 correspondientes al 2005.

Si bien las gráficas del precio del cobre generalmente son oscilatorias decrecientes, a partir del año 2006 tuvieron un salto importante para el país el cual es presentado a continuación.

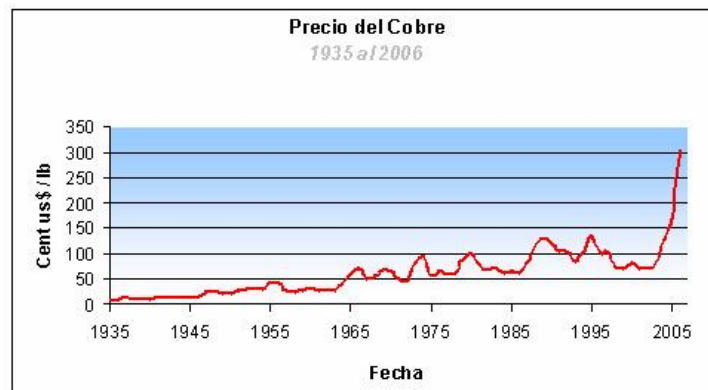


Figura 03: Gráfico precio del cobre desde 1935

"Fitoremediación de Zonas de Transferencia de Polvos contaminadas con arsénico por medio del uso del helecho *Pteris Vittata*" Codelco Norte Chuquicamata.

Esto junto a una productividad estable han entregado un excedente importante lo que pone a Codelco como la empresa más importante en Chile, con el aporte económico más grande al país. En el año 2006 Codelco registró excedentes por US \$ 9.215 millones, lo que representa un aumento del 88% respecto del año anterior.

2 PROCESOS PRODUCTIVOS FUNDICIÓN DE CONCENTRADO CODELCO NORTE

7.8 Secado de concentrados

El secado en un principio no correspondía a una etapa aislada, pero desde que la tecnología de horno Flash ha ido creciendo en importancia, ha sido necesario separarla como una etapa independiente.

Para la etapa de secado es muy importante para alcanzar la humedad requerida por los reactores, en el caso del convertidor Flash Outokumpu y Convertidor Teniente precisan un grado de humedad en el concentrado de un índice menor al 0,2% para poder operar correctamente⁴³.

Para este proceso la fundición posee dos secadores rotatorios, los que trabajan con flujos paralelos, con una temperatura de salida de materiales de 100 °C, los flujos son enviados posteriormente por medio de un sistema de transporte neumático hacia las unidades de fusión. Este tipo de secador es uno de los de mayor costo, no sólo por la inversión que significa, sino también por lo que representa la operación y consumo de energía.

Los secadores se dividen en cuatro zonas operacionales:

- **Cámara de combustión:** Componente diseñado para la generación de gases calientes necesarios para secar el concentrado.
- **Secador:** Corresponde al cilindro que tiene fijado en si diferentes elementos auxiliares de acero cuyo objetivo es mover la carga húmeda, separarla y disgregarla, para de esa manera aumentar el área de contacto gránulo aire.
- **Descarga:** Ubicada en el extremo opuesto a la alimentación, corresponde a una superficie lisa que permite la fluidez del concentrado seco.

⁴³ Mario Sánchez. Pirometalurgia del cobre y comportamiento de sistemas fundidos única edición Vicerectoría Académica Dirección de Docencia Universidad de Concepción 2002 Capitulo II, III, IV, V.

- **Recuperación de polvo:** por medio de ciclones centrífugos lavadores de gases húmedos y filtros de mangas para capturar los polvos generados durante el secado del concentrado.

7.9 Fusión de concentrado de cobre

Las cargas que se alimentan a las etapas de fusión están formadas por una variedad de materiales sólidos con contenidos de cobre muy variables, siendo los concentrados de cobre los componentes más importantes⁸. Adicionalmente se agregan materiales en estado líquido, cargas frías, escorias y restos de Ejes o Metales Blancos. Junto a estos materiales se añaden componentes auríferos como piritas y cuarzos, además de fundentes silíceos, siendo la carga más importante la de concentrado con una ley aproximada entre 30 y 36%.

Uno de los factores más importantes en los procesos de fusión es la correcta caracterización de las entradas y salidas del sistema. Dentro de ésta, la especificación de carga es un ítem preponderante en la obtención de altas eficiencias operativas, debido a que es función de ella y de algunos parámetros externos anexos, que debieran definir las variables de mayor incidencia en la operación, por ejemplo: enriquecimiento de oxígeno, flujo de fundentes, flujo de concentrado, flujos de aire, etc.

A partir del conocimiento de las composiciones de los concentrados, es posible, a través de balances de masa apoyados en relaciones derivadas de las características deseadas para la escoria a conseguir (viscosidad, contenido de cobre, punto de fusión, etc.), obtener las razones de mezcla de concentrado requeridas, junto con la cantidad óptima de fundente a suministrar.

Las dos soluciones de interés que se producen durante la fusión, dejando de lado la fase gaseosa y las fases sólidas presentes en los materiales refractarios, se describen a continuación:

- **Eje o Mata:** Básicamente es una solución de sulfuros de cobre (Cu_2S) y de fierro (FeS) presente en proporciones muy variables, en la cual se disuelven otros sulfuros metálicos en base Ni, Co, Bi, Pb y Zn (Ni_3S_2 , Co_3S_2 , PbS , ZnS , etc.), de acuerdo a la mineralogía del concentrado. Además se disuelven como elementos menores seleniuros y telururos tanto de cobre como de metales nobles, arseniuros, antimoniuros, sulfoarseniuros y sulfantimoniuros de cobre y casi la totalidad de los metales nobles que acompañan al mineral de cobre. Finalmente pueden encontrarse también en el eje disueltas pequeñas cantidades de oxígeno y trazas de óxidos tales como Al_2O_3 y SiO_2 .

*Fitoremediación de Zonas de Transferencia de Polvos contaminadas con arsénico por medio del uso del helecho *Pteris Vittata*" Codelco Norte Chuquicamata.

- **Escoria:** tienen composiciones que varían apreciablemente de una fundición a otra según la naturaleza de los concentrados, fundentes, condiciones de operación y diversos otros factores. Los óxidos fundamentales son FeO y Fe₃O₄, SiO₂, CaO y Al₂O₃, suspensiones de sulfuros y gases atrapados. Las escorias de fusión son frecuentemente fayalíticas, aunque un exceso de oxígeno las hace saturarse fácilmente en magnetita y un exceso de sílice (SiO₂) las hace saturarse en tridimita. En la práctica normal las presiones parciales de oxígeno no son tan bajas como para alcanzarse una saturación en hierro o incluso en wusita.

7.9.1 Horno flash

Corresponde a un horno de tecnología Finlandesa Outokumpu de fusión inmediata, donde el concentrado que proviene con un nivel de humedad del 0,2%, se funde mientras está suspendido en el gas que provee el oxígeno necesario para que se produzcan las reacciones⁸. Al entrar el concentrado se comporta como combustible, debido principalmente a su pequeña granulometría correspondiente a un 80% bajo las 200 mallas y la naturaleza exotérmica de las reacciones de oxidación del hierro y el azufre.

El concentrado con un 33% en cobre, proveniente desde la planta tuvo que pasar por un secador el cual disminuyó la humedad de ésta hasta un 0,2 % luego este concentrado ya seco es inyectado a los hornos de fusión en paralelo, al Convertidor Teniente y un horno Flash encargados de realizar la fusión del cobre.

El objetivo de esta etapa es formar una fase de sulfuros líquidos llamado metal blanco, que contenga en lo posible todo el cobre alimentado y otra fase oxidada líquida, llamada escoria, en lo posible exenta de cobre.

La escoria pobre en el metal es caracterizada es sometida a una etapa adicional de recuperación de metal.

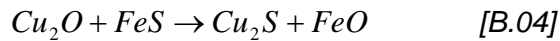
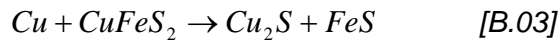
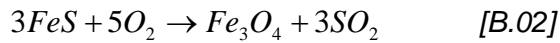
La mata conocida como metal blanco constituida principalmente por sulfuros de cobre y hierro pasa a una etapa posterior llamada conversión que se realiza por medio de la oxidación.

La reacción de producción de metal blanco puede ser representada por



⁸“Fitoremediación de Zonas de Transferencia de Polvos contaminadas con arsénico por medio del uso del helecho Pteris Vittata” Codelco Norte Chuquicamata.

Las reacciones principales que gobiernan este proceso son:



El silicato de hierro y el óxido de hierro forman una capa separada que flota en la mata y puede ser separado, efectuando una primera separación parcial del Fe y el Cu. Las reacciones que se verifican en la cubeta de fusión pueden representarse en la siguiente forma:

Donde

Metal Blanco esta formado por: Cu_2S , FeS (principalmente)

Escoria: FeO , Fe_3O_4 , SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , Cu_2O , otros

Gas: O_2 , SO_2 , N_2 , CO , CO_2 , H_2 , H_2O , entre otros.

La separación natural se puede alterar ventajosamente agregando fundente, como la sílice, a 1200°C y en ausencia de este fundente no existirían dos fases claras para poder separarlas. Su principal función, es la de reaccionar con los óxidos de hierro formados durante la fusión, para formar, una escoria que pueda ser removida fácilmente. Otras propiedades son:

- Formar una escoria inmisible con el metal blanco
- Tener una baja solubilidad en cobre
- Poseer una fluidez apropiada.

- **Tecnología de fusión flash (horno flash Outokumpu)**

Se conoce como proceso Flash aquellos en donde el concentrado se funde al ser introducido en suspensión en aire al horno, donde el aire que acompaña al concentrado tiene la energía suficiente para provocar las reacciones de fusión y conversión.

El concentrado seco es inyectado por un quemador hacia un reactor tubular, donde por la temperatura existente en el reactor, gracias al intercambio de calor por convección desde el gas hacia las partículas de concentrado y por radiación desde las paredes del convertidor, se produce la oxidación formándose pequeñas gotas de metal fundido, las cuales caen y se sedimentan en el fondo del Horno, donde se separan en escoria y mata.

El producto final de la torre, es principalmente, una mezcla heterogénea de sulfuros de cobre fundido Cu_2S , sulfuros de hierro FeS , magnetita Fe_3O_4 , sílice SiO_2 y ganga, los que se separan en dos fases en la zona llamada de asentamiento o settler, formando la escoria, el eje y los gases.

El proceso de fusión Flash Outokumpu combina las operaciones convencionales de tostación, fusión y conversión en un solo proceso.

El proceso está diseñado para ser autógeno y retira la energía desde el aire precalentado enriquecido con oxígeno, el horno de fusión Flash es alimentado por la parte superior de la torre de reacción con el concentrado seco más aire de distribución, fundente silíceo y por otra entrada se alimenta aire junto con oxígeno de proceso.

Luego que se realiza la reacción, se recupera el Eje o Metal blanco por una salida lateral y la escoria por otra, la cual va hacia otro proceso para recuperar el cobre que se encuentra en ella antes de su eliminación.

Por la parte superior del Horno Flash se encuentra la salida de los gases con 10 - 30% SO_2 para usarlo en la planta de ácido sulfúrico y polvos metalúrgicos, ricos en Arsénico y Azufre, estos son direccionados hacia la Planta de Acido por medio del tren de gases.

La escoria resultante del horno Flash se dirige hacia el horno HTE el cual es capaz de recuperar desde esta un poco más de metal blanco cuya ley es del 72% en cobre.

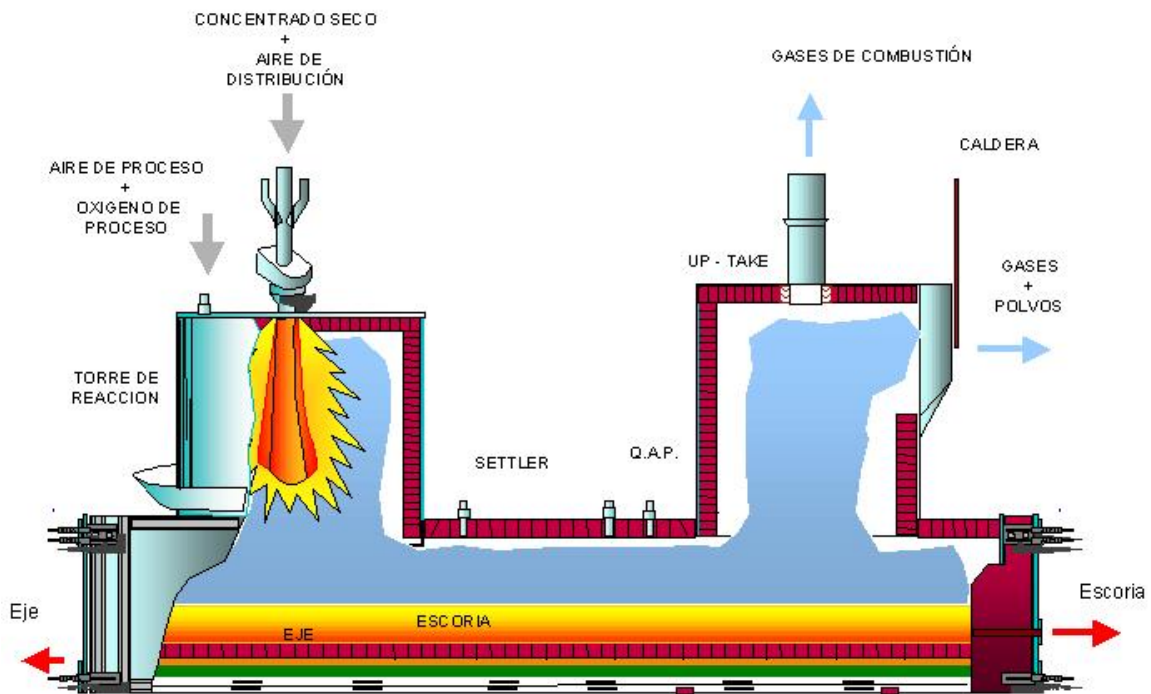


Figura 04: Horno Flash

- **Horno flash Outokumpu**

Especificaciones Técnicas

Settler:	21[m] Largo x 8[m] de Ancho x 2[m] Alto
Reaction Shaft:	6[m] Diámetro x 6[m] alto
Up - Take:	4[m] Diámetro x 7,5[m] Alto

Tabla 02: Dimensiones del horno flash Outokumpu

La producción de horno esta entre las 1000 a 2500 $\left[\frac{\text{ton}}{\text{día}} \right]$ de concentrado fundido.

7.9.2 Convertidor teniente

La otra parte del concentrado seco es inyectada al Convertidor Teniente el cual con 5[m] de diámetro y 22[m] recibe la otra parte del concentrado seco, en él es inyectado por medio de toberas que se encuentran en la parte inferior lateral del convertidor, una mezcla con aire de inyección, además existe otra tobera por el costado del reactor la cual es utilizada para inyectar aire de soplado.

Por la parte superior se alimenta un concentrado húmedo la carga fría y el fundente, además de aire y oxígeno por medio de otra alimentación superior que se encuentra a un costado, para favorecer la combustión.

Dentro del reactor se forman tres capas inmiscibles en la fase de metal líquido, la escoria, la interfase y el metal blanco, Para lograr esta separación el metal debe ser fundido y para ello debe ser llevado a una temperatura de $1250^{\circ}C$, la separación se logra retirando la capa superior del líquido el cual corresponde a la escoria la cual se elimina por un costado del convertidor teniente, por el otro costado pero a un nivel inferior esta ubicada otra salida la cuál está destinada para recoger el metal blanco, gracias a que la densidad del éste es mayor, y se deposita en el fondo del reactor.

Por la parte superior del convertidor teniente se retiran los gases los cuales son conectados a la línea de gases metalúrgicos ricos en Arsénico y Azufre, los cuales se dirigen hacia la planta de ácido donde son convertidos en ácido sulfúrico.

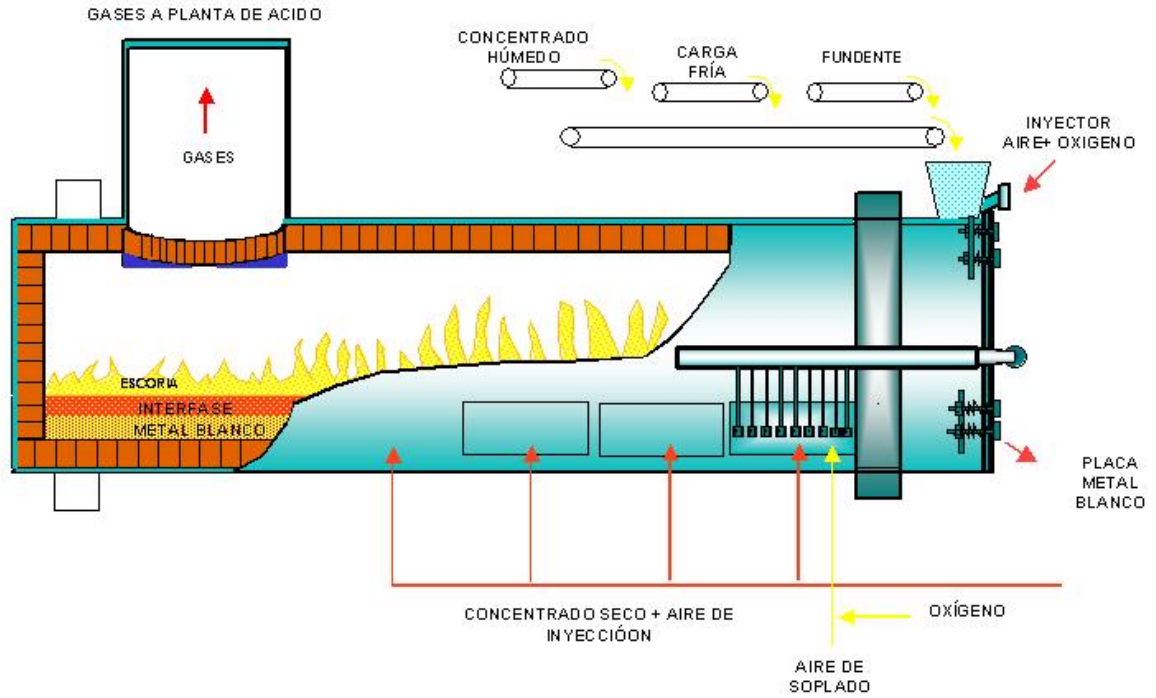


Figura 05: Convertidor Teniente

Dimensiones:

5 [m] de diámetro por 22 [m] de largo.

La escoria proveniente del horno Flash es dirigida hacia el HTE.



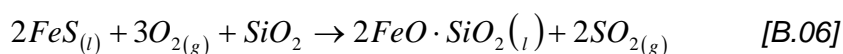
Figura 06: Descarga del CT2, convertidor teniente

7.10 Conversión de la fase sulfurada

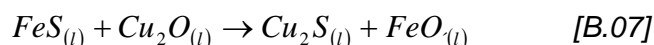
La conversión de cobre consiste en la oxidación con aire de la fase líquida de metal blanco proveniente desde la fase de fusión.

Este metal es oxidado para remover el hierro y el azufre disueltos, gracias a que este metal viene a muy alta temperatura 1100°C, las reacciones de oxidación de hierro y azufre tienen la energía suficiente para ocurrir por lo que se conoce como un proceso autógeno.

La conversión se lleva a cabo en dos partes importantes, la primera corresponde a la oxidación del hierro por medio de la reacción.

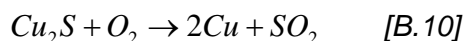
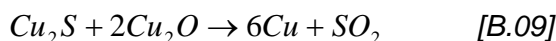
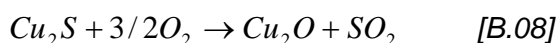


El óxido de hierro formado es escorificado a un compuesto fayalítico por medio de la adición de sílice para formar $2FeO \cdot SiO_2$.



Esta reacción se lleva a cabo ya que el hierro posee una mayor afinidad al oxígeno que el cobre, si bien existe una reacción competitiva con el cobre capturando el oxígeno disuelto, esta es menor. Es por esta razón que la ley del cobre blister puede llegar por sobre el 98% de pureza.

El sulfuro cuproso se combina con el oxígeno para producir óxido cuproso y anhídrido sulfuroso. Además, el sulfuro cuproso y el óxido cuproso reaccionan para formar cobre metálico y anhídrido sulfuroso en los convertidores.



7.10.1 Convertidor Peirce Smith (CPS)

La conversión es llevada a cabo en un convertidor Peirce-Smith.

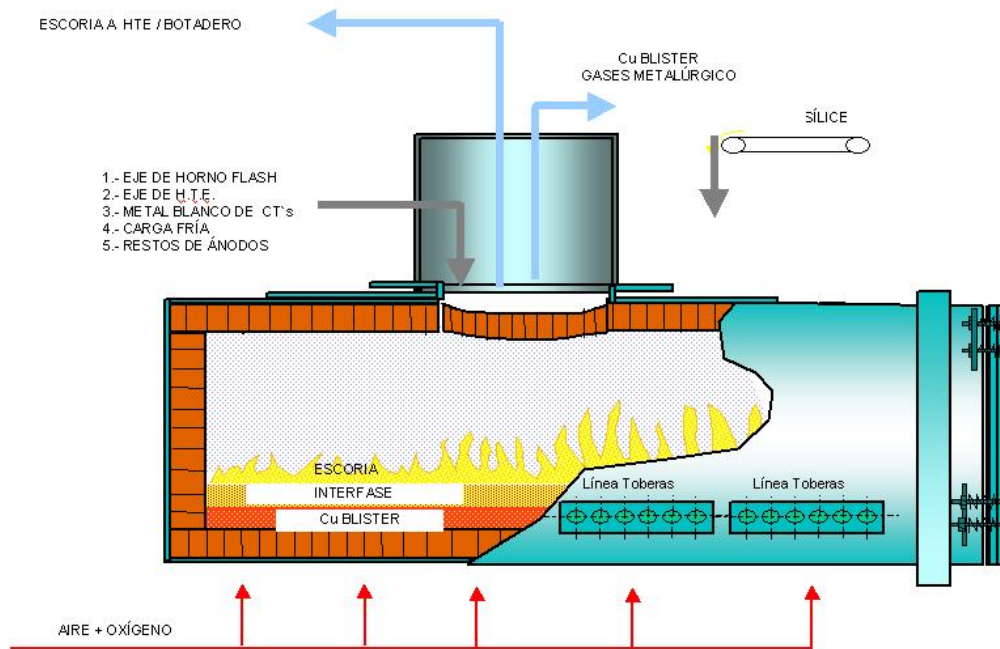


Figura 07: Convertidor Peirce Smith

El convertidor es alimentado con Eje o metal blanco proveniente desde el **HTE**, horno Flash CT2 después de haberlo pasado por el **HELE** el cual posee una ley del 72%, también es cargado por la parte superior con restos de los ánodos los cuales provienen de la refinería.

Los gases ricos en SO_2 son enviados a la planta de recuperación de gases, o planta de ácido.

El cobre blister es enviado directamente a los hornos de refino.

Dentro de la conversión se eliminan una gran cantidad de impurezas por medio de la evaporación de estas a estado gaseoso, por lo que pueden ser retiradas como gases.

Algunas de las impurezas extraídas en este proceso están en la siguiente tabla.

N°	REACCION
1	$As_2(g) = 2 As(g)$
2	$As_3(g) = \frac{1}{2} As_6(g)$
3	$\frac{1}{2} As_2(g) + \frac{1}{2} O_2(g) = AsO(g)$
4	$\frac{1}{2} As_2(g) + \frac{1}{2} S_2(g) = AsS(g)$
5	$3 As_2(g) = 2 As_3(g)$
6	$As_4(g) = 2 As_2(g)$
7	$As_2(g) + \frac{3}{2} O_2(g) = As_2O_3(g)$
8	$2 As_2(g) + 3 O_2(g) = As_4O_6(g)$
9	$Sb_2(g) = 2Sb(g)$
10	$Sb_3(g) = \frac{1}{2} Sb_6(g)$
11	$\frac{1}{2} Sb_2(g) + \frac{1}{2} O_2(g) = SbO(g)$
12	$\frac{1}{2} Sb_2(g) + \frac{1}{2} S_2(g) = SbS(g)$
13	$Bi_2(g) = 2 Bi(g)$
14	$\frac{1}{2} Bi_2(g) + \frac{1}{2} O_2(g) = BiO(g)$
15	$\frac{1}{2} Bi_2(g) + S_2(g) = BiS(g)$
16	$Pb(l) + \frac{1}{2} O_2(g) = PbO(l)$
17	$Pb(l) + \frac{1}{2} S_2(g) = PbS(s)$
18	$Zn(l) = Zn(g)$
19	$Zn(l) + \frac{1}{2} S_2(g) = ZnS(g)$
20	$Se_2(g) = 2 Se(g)$
21	$Se_3(g) = \frac{1}{3} Se_6(g)$
22	$\frac{1}{2} Se_2(g) + \frac{1}{2} O_2(g) = SeO(g)$
23	$\frac{1}{2} Se_2(g) + O_2(g) = SeO_2(g)$
24	$\frac{1}{2} Se_2(g) + \frac{1}{2} S_2(g) = SeS(g)$

Tabla 03: Reacciones de las impurezas

7.11 Pirorefinación del cobre blister

Casi todo el cobre blister obtenido en el proceso fusión conversión es subsecuentemente sometido al proceso de refinación electrolítica, En consecuencia el cobre entregado por la fundición debe estar a la altura de las necesidades en la electrorefinación. Algunas de las especificaciones a cumplir son por ejemplo calidad química donde requiere llegar a niveles bajos de impurezas para provocar la correcta electrorefinación, sin contaminar el electrolito, obtener un buen rendimiento y un depósito homogéneo.

También se debe cumplir con especificaciones físicas, los ánodos requieren ser moldeados en láminas relativamente delgadas y resistentes para ser colgadas entre los cátodos donde se realizará la refinación y una solidificación homogénea sin defectos, para que su desgaste sea parejo y no provocar alteraciones en las superficies de los cátodos.

El cobre anódico obtenido de una pureza del 98,6% en refinación a fuego deberá ser llevado a la refinería para producir cátodos de alta pureza 99,99% en cobre los cuales son comercializados.

Las impurezas presentes aunque sea en una cantidad muy pequeña, que son arrastradas desde sus minerales, pueden afectar la calidad de los ánodos.

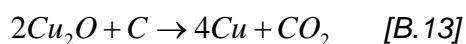
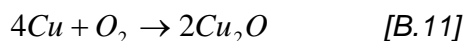
La presencia de cobre y oxígeno remanentes de la conversión puede ser causa de formación de blisters, ampollas de SO_2 durante la solidificación del metal crudo.

Por lo tanto el fin de la Pirorefinación es disminuir la cantidad de 200ppm de azufre y 2000ppm de oxígeno a valores del orden menor que 20ppm y 100ppm respectivamente.

Para lograr el objetivo anterior la pirorefinación se lleva a cabo en dos etapas, la primera corresponde a una oxidación, donde el azufre es eliminado como SO_2 , y la segunda etapa reductora donde el cobre es desoxidado.

En la refinación a fuego, se eliminan las últimas impurezas por la acción de un proceso de reducción mediante la mezcla reductora: combustible - vapor de agua.

El proceso puede ser descrito según las siguientes reacciones:



7.11.1 Oxidación

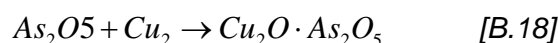
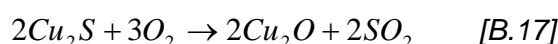
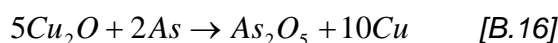
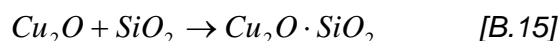
Durante esta etapa se le inyecta aire al cobre fundido durante 1,5 a 2 horas. La gran parte del oxígeno del aire se disuelve en el cobre, ya que su solubilidad límite en este metal es de 1.5% bastante mayor que la del hierro por ejemplo.

Como fue presentado antes en esta etapa es soplado aire de proceso enriquecido en oxígeno para provocar la remoción de las impurezas presentes en el cobre blister, esto se realiza por medio de la oxidación de estas y la escorificación de otras tales como el Fe Zn Si Al y Mg, las que son volatilizadas son el Pb Zn Cd las cuales son llevadas a fase gaseosas y extraídas como gases, Otros elementos como el As y Sb, solo pueden ser eliminados por medio de su escorificación, para esto se debe agregar fundente como el CaO y Na₂O.

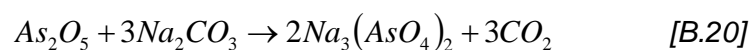
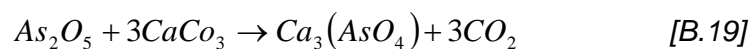
La manera de agregar estos fundentes es por medio de la inyección por toberas hacia el metal líquido donde entra en contacto con la fase líquida para su separación.

La escoria es retirada al final del período de oxidación, esta continúa hasta que no hay más formación de escoria y empieza a notarse el óxido cuproso líquido sobre el baño. Este líquido tiene aspecto aceitoso y su presencia indica que la oxidación se ha completado y que el baño está saturado con oxígeno en la forma de óxido cuproso (Cu₂O) lo que corresponde a aproximadamente 0,6 a 0,9% C (ó 6 a 10% de Cu₂O) a la temperatura de trabajo (1150-1200°C).

En esta etapa de la oxidación se toman muestras y se dejan solidificar, la apariencia de su superficie y fractura de ella indica la condición del baño. Si se ha alcanzado el grado de saturación en oxígeno el aspecto es de color rojo ladrillo, toscamente cristalino, opaco y quebradizo. Este recibe el nombre de "set copper".



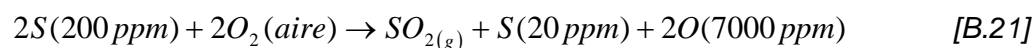
Cuando la oxidación llega a su fin, si es necesario, se agrega carbonato sódico y carbonato de calcio para eliminar As, estos compuestos pasan a la escoria.



	% en Peso Azufre	% en peso Oxígeno
Cobre Blister	0,02 - 0,1	0,5 - 0,8
Después de Oxidación	0,001 - 0,003	0,6 - 1,0
Después Reducción	0,001 - 0,003	0,05 - 0,2
Ánodos	0,001 - 0,003	0,05 0,3

Tabla 04: Composiciones de S y O en las etapas de la Pirorefinación.

Durante la desulfurización el oxígeno es inyectado dentro del baño fundido, el oxígeno disuelto reacciona con el azufre disuelto formando SO₂, lo cual puede formar burbujas y dejar el baño. La reacción es la siguiente:



7.11.2 Reducción

Una vez que el cobre es oxidado, una cantidad del oxígeno que fue inyectado queda disuelto en el metal, una concentración del 0,7 a 1 % en peso de oxígeno en el líquido, este oxígeno está disuelto y no en fase gaseosa el problema radica en que si la temperatura del fundido baja el oxígeno reaccionará con el Cu formando Oxido cuproso, por medio de la siguiente reacción.



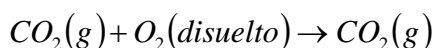
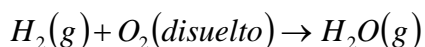
El exceso de óxido de cobre causa problemas en la electrorefinación, ya que una cantidad mayor que la deseada con el ácido sulfúrico formará sulfato de cobre el cual aumentará la cantidad de cobre en solución del electrolito, bajando el rendimiento de la celda.

La refinación electrolítica opera normalmente con 40 a 50 [kg/m³] de cobre. El exceso de oxígeno en el ánodo promueve también la pasivación del ánodo (no se disuelve) con la consecuente pérdida de eficiencia de corriente.

Para esta etapa, la meta es eliminar la cantidad de oxígeno en el cobre fundido, llegando desde un valor de recepción entre 1200ppm y 1800ppm hasta un producto después de refinación a fuego de 300 a 500ppm

Esto se lleva a cabo utilizando agentes reductores, sólidos, líquidos o gaseosos, los cuales directa o indirectamente suministran CO, H₂ y C.

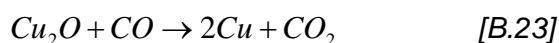
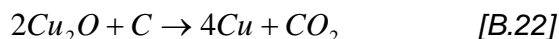
Las reacciones principales que ocurren con el oxígeno presente en el baño son las siguientes:



La reducción del óxido cuproso es efectuada por la introducción de un reductor como por ejemplo petróleo, gas natural o incluso palos de madera de eucalipto verde.

Los gases reductores reducen el óxido cuproso a cobre metálico.

Este cobre se conoce como “tough pitch”. Durante la etapa final el baño se cubre con una capa de carbón de leña o coque de bajo contenido de azufre, para prevenir la reoxidación. Las reacciones probables de esta etapa son:



El cobre obtenido se conoce como “tough pitch” contiene alrededor de 0,05% de O. La otra calidad de cobre es el OFHC (oxygen free high conductivity copper) que tiene mayor conductividad eléctrica y tenacidad que el “tough - pitch” y puede ser usado en esas condiciones. El cobre OFHC se obtiene agregando desoxidantes más poderosos tales como fósforo o una aleación boro calcio.

Aunque el OFHC tiene mejores propiedades no es el que se usa más comercialmente porque durante la solidificación en el lingote se forman grandes cavidades de “rechupes”, lo que no pasa con la calidad “tough-pitch”.

Se recomienda un 20% en exceso de vapor sobre el estequiométrico para completar la reacción, reportándose un 50% de eficiencia. La mezcla vapor / reductor es generalmente inyectada al horno basculante por toberas, las cuales pueden estar compuestas por dos tubos concéntricos, mejorando su desempeño y vida. Varias otras alternativas de agentes reductores han sido estudiadas a escala laboratorio, tal como coque o carbón inyectado con aire o nitrógeno al baño fundido. Las eficiencias de estos reductores alcanzaron del 34 a 95%. Para la producción de ánodos de cobre el uso de carbón está limitado a su contenido de azufre.

El oxígeno en exceso, disuelto durante la oxidación es reducido en esta segunda etapa. Ello es necesario pues este elemento, al ocurrir la solidificación precipitará como Cu_2O (ello causa prácticamente el 6% en peso de óxido inclusionario en el cobre sólido, ya que a bajas temperaturas, la solubilidad del oxígeno es muy pequeña).

La refinación se hace por medio de la inyección de gas natural, propano otros hidrocarburos o amoníaco a través de toberas hasta que la concentración de oxígeno se haya reducido al orden de los 1000ppm. Esto ocurre durante un lapso de 3,5 a 4 horas aproximadamente.

La reacción global de la etapa de oxidación se puede representar de la siguiente manera.

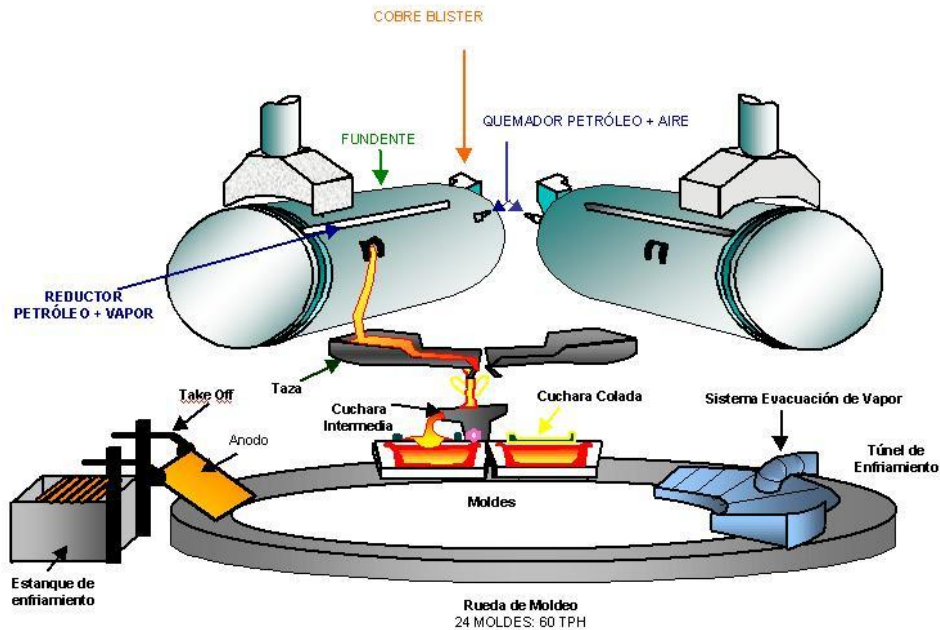
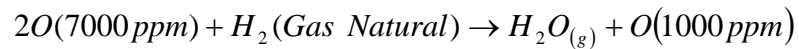


Figura 08: Refino a fuego y ruedas de moldeo

Este proceso se lleva a cabo en los hornos de refinación a fuego los cuales son alimentados con cobre blister, fundente petróleo vapor y aire para la oxidación. Finalmente se retira el cobre refinado el cual va a la rueda de moldeo que entrega los ánodos para la electrorefinación.

Las dimensiones de los hornos de refino son: 9 [m] de largo con 4[m] de diámetro con una capacidad de 250 a 350 $\left[\frac{\text{ton}}{\text{carga}} \right]$

Estos ánodos deben cumplir con ciertas características especiales, las normas generales para todas las fundiciones del mundo varían de acuerdo a los límites exigidos que se representan a continuación.

Elemento	Rango de Composiciones (ppm)
Cu	98.5 – 99.8 % en peso *
O ₂	130 – 4000
Au	8 – 73
Ag	90 – 7000
Pb	7 – 4300
Se	8 – 2200
As	5 – 2700
Sb	1 – 2200
Bi	3 – 300
Te	1 – 300
Ni	90 – 6700

Tabla 05: Composición cobre anódico

7.11.3 Moldeo

Una vez realizada la oxigenación y reducción del cobre, es moldeado esto se lleva a cabo por medio de una rueda de moldeo la cual va recibiendo el cobre a derretido y va dando vida a los ánodos.

Este proceso se lleva a cabo como se puede apreciar en la figura:



Figura 09: Ruedas de moldeo

La estación de moldeo esta conformada básicamente por seis partes fundamentales las cuales se pueden ver claramente en la Figura 09, el número (1) corresponde Unidad doble de moldeo y pesaje, (2) corresponde a la rueda de moldeo, (3) es el sistema de rociado para el enfriamiento del molde (4) Es el colector de ánodos y sistema de manejo (5) Es el sistema de lavado de molde finalmente (6) es la sala de control de proceso.



Figura 10: Rueda de moldeo



Figura 11: Ánodos en rueda de moldeo

7.12 Tratamiento de escorias

La recuperación de cobre desde la escoria⁹ desde hace un tiempo es muy importante, se conoce que antiguamente, grandes cantidades de cobre eran eliminadas en la escoria, por lo que el tratamiento de escoria se propuso como un proceso independiente para mejorar la recuperación y así disminuir los costos asociados a la operación de fundición, logrando mayores utilidades.

7.12.1 Pérdidas de cobre en la escoria

La escoria se puede perder en el proceso de dos maneras:

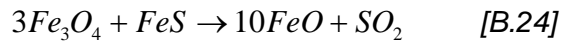
- Ya sea por medio de la disolución sulfúrica Cu_2S y oxidica CuO del cobre debido mezcla entre la escoria y el eje que tienen una tendencia a formar un oxisulfuro homogéneo fundido.
- Atrapamiento físico del eje o cobre en la escoria, por medio de la flotación o por una mala sedimentación, y que dependen de propiedades físicas tales como la densidad, tensión superficial y viscosidad de las fases presentes. Las escorias fayalíticas contienen magnetita y tienen una alta viscosidad. Esto aumenta la cantidad de cobre atrapado debido a que el tiempo de sedimentación es mayor ya que la magnetita sólida en si misma tiende a atrapar partículas con cobre.

Existen tres medios de atrapamiento de eje o metal en la escoria:

1. A medida que se calienta el concentrado, ocurren una serie de descomposiciones gas - sólido entre las que destacan la descomposición de los sulfuros superiores simples o dobles. Los concentrados de cobre lamentablemente contienen un alto porcentaje de calcopirita $CuFeS_2$ la cual se une a partículas que carecen de valor económico.
2. La agitación que se produce debido a la inyección de aire con concentrado, esta aplicación aumenta las pérdidas de cobre. La violenta agitación del eje y la escoria provoca un arrastre de eje, por esta razón si se desea disminuir el efecto se requieren de grandes tiempos muertos para la sedimentación, lo que en este tipo de procesos y ritmo de producción es imposible conseguir.

⁹"Fitoremediación de Zonas de Transferencia de Polvos contaminadas con arsénico por medio del uso del helecho *Pteris Vittata*" Codelco Norte Chuquicamata.

3. Otro factor que influye en la pérdida de cobre por medio del transporte de eje a la escoria, se produce por el ascenso de burbujas de SO_2 a través de la interfase eje - escoria debidas a la siguiente reacción:



Las burbujas de SO_2 transportan una película de eje a través de la interfase eje / escoria. Llevándolas hasta el núcleo de la escoria.

7.12.2 Proceso pirometalúrgico de tratamiento de escorias

Para recuperar el cobre contenido en la escoria se requiere una etapa de reducción para reducir la magnetita utilizando reductores orgánicos o sulfuros, tales como; pirita, pirrotita o concentrado.

Una vez la escoria limpia puede ser difícil separar el eje, por lo tanto, se requiere una etapa de sedimentación.

Para este proceso es necesario:

1. Un agente reductor el cual puede ser, carbón o coque, y un quemador sub estequiométrico de combustible. Generalmente se agregan sulfuros los cuales actúan principalmente como colector de los metales, pero también como reductores.
2. La sedimentación depende de las propiedades físicas de la escoria y del eje (composición, viscosidad, densidad, tensión superficial, etc.), agitación del baño, tamaño de las partículas de eje / metal dispersados y profundidad de la escoria.
3. El grado de aproximación al equilibrio, entre las fases del sistema escoria-metal (eje)-gas. Además el diseño del horno debe considerar la entrega de un tiempo de reducción adecuado.

4. Exponer la escoria a flujos turbulentos con aire puede resultar en una reoxidación de la escoria reducida y en lo posible debe evitarse.

7.12.3 Tratamiento en horno eléctrico

Este horno es usado en el proceso de limpieza de escoria para la recuperación de cobre. El HELE es una parte integral del proceso y actúa como una unidad separadora de la mezcla eje - escoria producida por el horno CT2. El horno eléctrico consiste de un crisol cilíndrico cubierto con refractarios, un equipo de carguío, el sistema de enfriamiento, equipos de suministro de potencia eléctrica, y un equipo de abatimiento y limpieza de gases.

Además se cuenta con un equipo de granulación y transferencia de la escoria de descarte. El horno eléctrico está dimensionado de modo tal que el movimiento de la escoria no gaste excesivamente la línea de refractarios y que no se vaya tanto calor al techo y para dar un tiempo de residencia de dos a tres horas y una escoria de cobre final entre 0,55 a 0,6 % en peso. El consumo de energía varía con el tamaño de la operación y la cantidad de recirculante tratado, pero esta entre 100 a 160 [kW/h] por tonelada de escoria, incluyendo escoria de conversión. Sus dimensiones típicas son 5 m de alto y 10 m de diámetro.

La escoria del CT2 es sangrada a través de sangrías de escoria y se transporta mediante una canaleta que descarga en el horno eléctrico a través de una abertura en su pared.

Las aberturas en las paredes del horno eléctrico se cierran con tapas después que se ha cargado la escoria. Las sangrías deben cubrirse cuidadosamente para evitar pérdidas de calor innecesarias e infiltraciones de aire.

La escoria se limpia en el horno eléctrico, separando el eje que debido a su mayor gravedad específica sedimenta al fondo del horno, desde donde se sangra periódicamente mediante una sangría que descarga en una canaleta. La escoria limpia o de descarte, de menor gravedad específica, se sangra desde el orificio de sangría de escoria a una canaleta y posteriormente es granulada. El horno eléctrico se opera como un horno de resistencia, controlando el voltaje de modo tal que el calor se suministre según el requerimiento térmico. Se utilizan electrodos tipo Södenberg o de grafito para el suministro de calor necesario y para llevar a cabo la reducción de la magnetita. La potencia eléctrica se necesita para:

- Fundir carga circulante
- Reducir la magnetita a 2 - 3%
- Aumentar la temperatura de la escoria en 20°C
- Compensar las pérdidas de calor y el calor que fluye fuera del horno en los gases de desecho.

Dentro del horno eléctrico se lleva a cabo la reducción de la magnetita y sedimentación de un eje entre 50 a 60 % de ley. Para llevar a cabo la reducción puede agregarse un sulfuro tal como pirita o concentrado de cobre y un reductor tal como el coque. La recuperación de cobre como eje depende del tiempo de sedimentación, los tiempos mayores favorecen la recuperación. La sedimentación de gotas de eje depende de la viscosidad de la escoria, tamaño de la gota, y diferencia de densidad entre la gota y la escoria.

Aumentando la temperatura o alimentando algún material adicional la escoria se puede disminuir su viscosidad y así disminuir el tiempo de sedimentación. El eje sedimentado es sangrado y enviado a los convertidores. La escoria limpiada es escoriada o fluye continuamente a descarte.

7.12.4 Proceso HTE

La tecnología de limpieza de escorias permite la recuperación de cobre contenido en las escorias de alta ley (4 a 18 % en peso), proveniente tanto de los procesos de fusión como conversión. En estas escorias el cobre se encuentra principalmente atrapado mecánicamente. Fundamentalmente, el proceso cambia las características físico - químicas de la escoria, logrando separar una fase rica en cobre (eje) y una escoria de descarte.

El horno de limpieza de escorias es un reactor cilíndrico horizontal de acero, de 4 [m] de diámetro y 12 [m] de largo, que tiene una boca para descargar los productos fundidos ubicada en el centro del manto de 1,08 [m²]. Hacia uno de los costados del horno se encuentra la boca de 1,50 [m²] que permite la salida de los gases del proceso.

Los costados del horno cuentan con tapas de acero sujetas al manto por un sistema de pernos, tornillos y resortes. En la tapa correspondiente al extremo de la boca de gases existe una entrada de carga por donde se alimenta la escoria. El quemador proporciona el calor necesario para compensar las pérdidas del horno, reacciones de reducción, fusión del fundente, etc. La operación del quemador es continua, sin embargo, la cantidad de calor requerida varía según sea la etapa de operación en que se encuentre el equipo, con el consiguiente ajuste de los flujos de petróleo y aire.

Todo el interior del horno está revestido con ladrillos de cromo – magnesita de liga directa. Esto permite mantener en su interior un baño de escoria líquida y realizar los procesos de reducción y sedimentación a 1250°C.

En la siguiente figura se muestra el horno, sus flujos de entrada y salida y sus equipos principales.



Figura 12: Horno limpieza Escoria

El proceso de limpieza de escorias en horno basculante es un proceso discontinuo consistente de un ciclo compuesto por las siguientes etapas:

- Espera de Carga
- Carguío de la escoria al Horno de Limpieza de Escoria
- Espera de Reducción
- Reducción de la escoria mediante la inyección de reductores (petróleo)
- Sedimentación
- Descarga de la escoria limpia.

El ciclo completo de 150 toneladas de escoria cargada toma aproximadamente 5 horas en procesar. La capacidad diaria de tratamiento del HTE es de 900 toneladas y la recuperación de

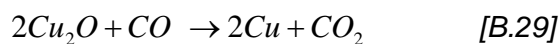
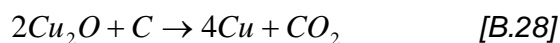
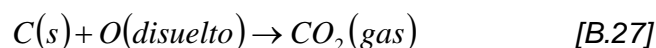
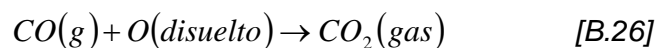
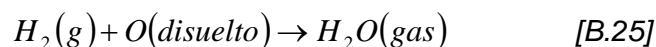
cobre alcanza 90 a 93 %. Para llevar a cabo la reducción y mantener el soporte térmico del horno se consumen 3 - 14 [kg] de petróleo por [ton] de escoria.

2.1.1.1 Etapa de Reducción

El proceso contempla una primera etapa de reducción del contenido de magnetita de la escoria altamente oxidada y por lo tanto con una alta viscosidad, a través de un medio reductor sólido, líquido o gaseoso.

El efecto de reducir la magnetita se traduce en una disminución de la viscosidad de la escoria, lo que permite la separación de las fases presentes. El agente reductor proveniente de la combustión del petróleo con el aire es suministrado por medio de toberas ubicadas en el manto del horno. Una vez concluida la reducción se retiran las toberas, y se deja el baño quieto para que comience la siguiente etapa.

Las reacciones químicas de reducción son endotérmicas por lo cual se requiere como soporte térmico un quemador que esta ubicado en la culata, para mantener la temperatura del baño en 1200 °C y de esa manera favorecer sus condiciones de viscosidad. Las reacciones posibles son las siguientes:



2.1.1.2 Etapa de Sedimentación

Una vez que la etapa de reducción ha sido completada, un tiempo de sedimentación permite la colección del Cu que se encuentra en la escoria, lo que permite generar una escoria de descarte y una fase rica en cobre. Un quemador suministra el calor requerido para mantener la escoria a una temperatura relativamente alta (1180 – 1200°C).

Los productos obtenidos después de la etapa de sedimentación son una escoria de descarte (1,5 % Cu) que se extrae por la boca de descarga y es transportada al escorial mediante ollas montadas en camiones, mientras que el eje recuperado se extrae por boca y retorna mediante ollas a los convertidores.

3 Procedimiento de muestreo de suelo en zona de transferencia de polvos

7.13 Muestra 1

Se obtiene la muestra 1 de área, en el terreno contaminado usando una cuadrícula tipo zigzag, la muestra general estuvo compuesta de 5 submuestras, con disposición equidistante de aproximadamente 4 [m] de separación. El recorrido utilizado está representado en la siguiente figura, las muestras fueron tomadas el 2 de Agosto del 2007.

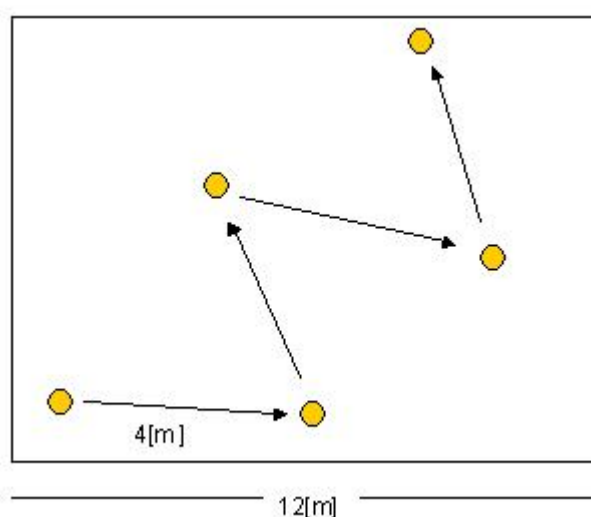


Figura 13: Patrón de recorrido para extraer submuestras en área homogénea

Las submuestras fueron guardadas en bolsas limpias, las cuales se trasladaron al laboratorio de suelos, para obtener la muestra compuesta se depositaron las submuestras obtenidas sobre un plástico, luego se rolearon y separaron por método de cuarteo, el cual consiste en dividir la tierra una vez homogeneizada en cuatro partes iguales y extraer sólo una. La idea de este método es obtener la muestra compuesta de la manera más aleatoria posible.

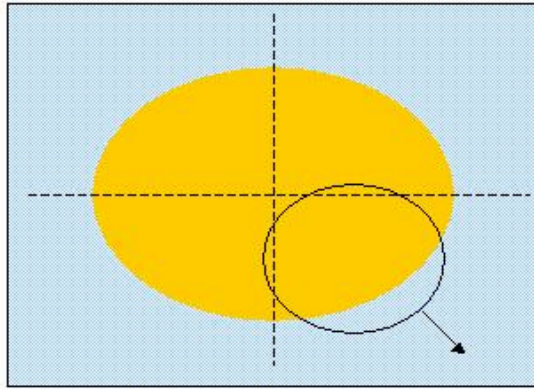


Figura 14: Proceso cuarteo muestra homogénea.

Luego la muestra obtenida del cuarteo fue enviada al laboratorio de la empresa donde se realizó el análisis de cantidad de arsénico.

El perfil para poder estimar la capacidad orgánica para albergar especies vegetales es realizado en el laboratorio de suelos y análisis foliar de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

7.14 Muestra 2

Luego se toma una segunda muestra rotulada como (muestra número 2) correspondiente al suelo que se encuentra aproximadamente a 30[cm] de profundidad, finalmente se repitió el mismo procedimiento de roleo y cuarteo ejecutado para la muestra número 1.

4 ACERCA DE EDENFERN™

7.14.1 Resultados registros experimentales de la Edenfern™

Como antecedentes complementarios se desea adjuntar información de resultados anteriores, se sabe que se realizaron fitoremediaciones de arsénico en Carolina del Norte y New Jersey utilizando la edenfern™

Se llevaron a cabo 8 experiencias para diferentes suelos en Florida, New Jersey, Virginia, Texas y el estado de Washington, dando como resultado que a mayor concentración de arsénico presente en los suelos la planta presenta un mejor rendimiento.

La línea diagonal muestra la relación 1:1 valor arsénico en planta / suelo, por lo tanto los valores sobre esta demuestran éxito en la hiperacumulación.

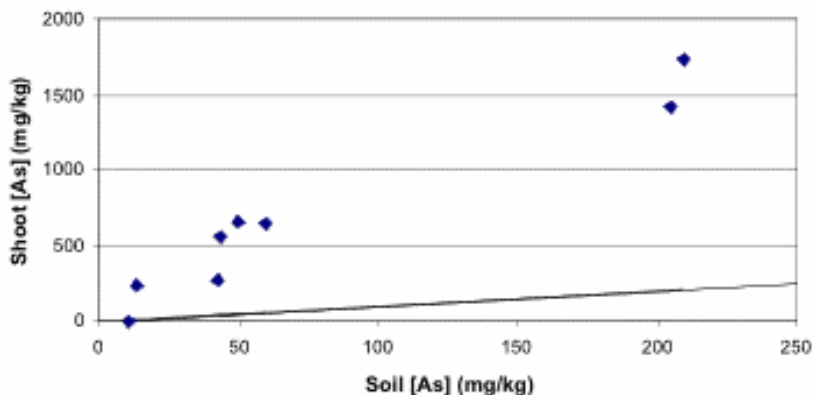


Figura 15: Incremento absorción respecto As en suelo

A continuación se entrega una gráfica que muestra por medio de una escala en diferentes colores la desintoxicación de un terreno en Carolina del Norte, después de 3 cosechas se logró pasar desde un terreno contaminado con cerca 1.200[ppm] de arsénico en algunos sectores, hasta un suelo con un promedio de 300[ppm], la disminución es evidente.

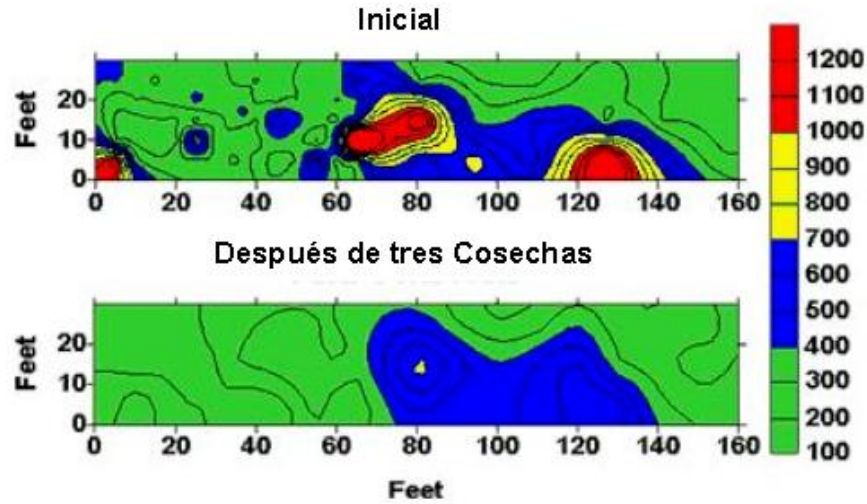


Figura 16: Reducción arsénico en suelos por medio de cosechas

Se tiene como antecedente extra que para el estado de Carolina del Norte fue necesario disminuir el contaminante hasta un valor final de 0,4 [mg/kg] para cumplir con la reglamentación estatal, esto fue logrado con éxito por un usuario de la Edenfern™ bajando los índices desde 10

$\left[\frac{mg}{kg} \right]$ en una área de un poco mas de media hectárea.

7.14.2 Trámite de internación a Chile de la Edenfern™:

Como la especie vegetal *Pteris Vittata* no está reglamentada en Chile (no aparece en las Resoluciones del SAG ni tiene ARP vigente), esta deberá ser internada al país si se desea efectuar la implementación del proyecto.

Para realizar este proceso se debe seguir el procedimiento descrito en las resoluciones de importación 3815 del año 2003 y 2781 del año 2006 que se pueden bajar desde la página del SAG⁴⁴.

Para internar la planta a nuestro país es necesario realizar el siguiente procedimiento:

1. Llenar el Formulario 1 presente en la página del SAG de las resoluciones de importación 3815 del año 2003, firmarlo y presentarlo en una oficina del SAG, luego de este trámite quedará formalizado.
2. El primer paso sirve para que el formulario sea ingresado al SAG Central y agendar la solicitud, con eso se logra prioridad cuando llegue el Formulario 2 el cual tiene que ser llenado en el país de procedencia de la especie, para el caso de la Edenfern™, Estados Unidos, en el caso de la *Pteris Vittata*, Brasil, Perú, Estados Unidos o cualquiera de los países antes nombrados en el capítulo IV.
3. Se debe hacer llegar el Formulario 2 al país de donde se desea efectuar la importación. Luego, por medio de la O.N.P.F. (Organización Fitosanitaria Oficial), similar al SAG, quién debe enviar en forma oficial el Formulario N°2 al SAG de Chile específicamente a Santiago división "Protección Agrícola".
4. En caso de no poder llenar el formulario en el país desde donde se desea importar, también una Universidad u otro organismo de investigación puede completar el formulario 2, pero la ONFP lo debe validar y luego enviar al SAG de Chile.

⁴⁴ Servicio Nacional Agricultura y Ganadero <<http://www.sag.cl>>[consulta: 15 de Julio 2006]

7.14.3 Costo de la edenfern™

Se hicieron las cotizaciones respectivas para saber los precios de la edenfern™, planta propuesta para realizar la desintoxicación de los suelos determinados en el proyecto.

Las plantas edenfern™ vienen en dos presentaciones, éstas se pueden encontrar en formato Cell Pack que están disponibles en bandejas de 72 plantas.

Cada planta tiene 3" (7,62 [cm]) de alto, a un costo de USD \$2.95 por unidad, la bandeja completa tiene un costo total de USD \$212.40 más los gastos de envío e internación al país.

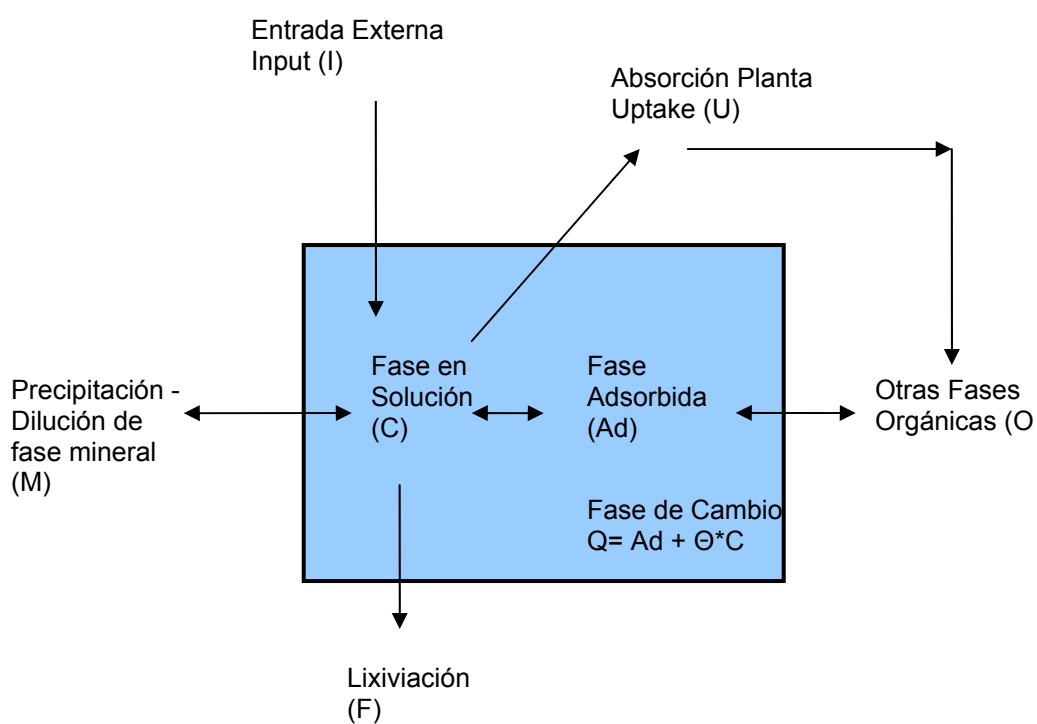
También es entregada en una segunda presentación llamada 4" Pot (10,16 [cm]) son módulos disponibles en cajas de 30 plantas, las cuales vienen con una altura de 4-6 [pulgadas] (10,16 [cm] - 15,24 [cm]), cada planta viene con un macetero propio de 4 [pulgadas] (10,16 [cm]).

Con un costo unitario de US \$5.95 por planta, cada caja cuesta US \$178.50 más gastos de envío e internación.

5 CÁLCULOS PARA LA OBTENCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO ABSORCIÓN

7.15 Balance de masa del elemento de rastreo

Los procesos interactivos que determinan las concentraciones de arsénico en suelos pueden ser generalizados con un sistema de reacciones descritas por el siguiente diagrama esquemático:



Volumen de control para modelación de arsénico en sistema alrededor de la raíz

Figura 17: Descripción general esquemática de Balance de Masa del rastreo de elemento

El cambio del elemento de rastreo en el volumen de control del balance de masa global⁴⁵ de arsénico presente en el suelo se representa como (Q) con respecto al tiempo. Tomando en cuenta una capa uniforme y perfectamente homogeneizada de suelo, esto se expresa matemáticamente en la siguiente ecuación global:

$$\boxed{\frac{\partial Q}{\partial t} = -\frac{\partial F}{\partial z} + \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial O}{\partial t} - U + I} \quad [E.1]$$

7.16 Relaciones utilizadas para la obtención del modelo

Cada término del equilibrio total en esta ecuación es definido matemáticamente por los parámetros que caracterizan los procesos bio - geoquímicos representados en el balance. El arsénico en la fase Q, es la suma de éstos que se pueden expresar matemáticamente como:

$$Q = Ad + \sigma \cdot C \quad [E.2]$$

Donde

$$Ad = K_d \cdot C \quad [E.3]$$

$$\boxed{Q = K_d \cdot C + \sigma \cdot C} \quad [E.4]$$

La constante K_d es lineal y corresponde a distribución lineal de adsorción $\left[\frac{l \text{ solución suelo}}{l \text{ suelo}} \right]$ y

C es la concentración del elemento de rastreo en la solución del suelo $[\mu M]$, y σ es el contenido en agua volumétrico del suelo $\left[\frac{l}{l \text{ suelo}} \right]$.

⁴⁵ Andrew C. Chang, Weiping Chen, Beni Bar-Yosef, Albert L. Page, Seongju Kim. Plant Uptake Parameters. A Generalized Trace Element Mass Balance Model for Cropland Soils: Arsenic and Cadmium. January, 2004, p. 11 - 85

El término del flujo, F, en la ecuación de balance general [E.1] representa el índice de lixiviación fuera del sistema (es decir el leaching) y se expresa matemáticamente como:

$$F = D_p \cdot \frac{dC}{dz} + v \cdot \sigma \cdot C \quad [E.5]$$

Donde en [E.5] D_p es el coeficiente de difusión de arsénico en la solución del suelo $\left[\frac{cm^2}{h} \right]$,

es la velocidad v del agua a través de poro $\left[\frac{cm^2}{h} \right]$

El segundo término en el lado derecho de la ecuación [E.5] representa el arsénico transportado por la difusión por medio de película al agua. Si se asume que el contenido en agua del perfil del suelo es uniforme, C y σ serán constantes a través de la capa de suelo.

Entonces en [E.5] si el transporte difusivo $\frac{\partial C}{\partial z}$ es cero, el gradiente de concentración por la

primera ley de Fick $D_p \cdot \frac{\partial C}{\partial z}$ también es cero.

$$D_p \cdot \frac{\partial C}{\partial z} = 0$$

La velocidad v del agua a través de poro en [E.5] se puede reemplazar por la conductividad hidráulica del suelo K_{hf} cuando $\frac{\partial C}{\partial z} = 0$, por lo que la ecuación se puede simplificar a:

$$v = K_{hf}$$

$$\text{Cuando } \frac{\partial C}{\partial z} = 0$$

$$F = v \cdot \sigma \cdot C = K_{hf} \cdot \sigma \cdot C$$

Quedando:

$$\boxed{F = K_{hf} \cdot \sigma \cdot C} \quad [E.6]$$

Donde K_{hf} es la conductividad hidráulica del campo o tasa de percolación $\left[\frac{cm}{h} \right]$.

El M en la ecuación de balance de masa inicial es la cantidad neta de arsénico pasando a fase mineral también conocida como cristalización fraccionada del arsénico $\left[\frac{\mu mol}{Lsuelo \cdot h} \right]$, definida como:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = k_f (Kd + \sigma) \cdot C - k_b \cdot M \quad [E.7]$$

Donde k_f, k_b son las constantes de la tasa de la precipitación y disolución $\left[\frac{1}{h} \right]$ respectivamente y M el elemento en fase mineral

O representa la cantidad de arsénico en fase orgánica que se mineraliza en el suelo, por medio de la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial O}{\partial t} = -k_{im} \cdot O \quad [E.8]$$

Donde $k_{im} \left[\frac{1}{h} \right]$ es la tasa de mineralización, y O la cantidad de materia orgánica contenida $\left[\frac{\mu mol}{Lsuelo} \right]$

El U en la ecuación principal de balance de masa es el uptake de la planta $\left[\frac{\mu mol}{Lsuelo \cdot h} \right]$ que se describe como:

$$U = R_d \cdot \frac{J}{z} \quad [E.9]$$

Donde R_d es la densidad de la raíz $\left[\frac{cm \text{ raíz}}{cm^2 \text{ suelo}} \right]$ en la capa del suelo a una profundidad z [cm]

$J \left[\frac{\mu mol}{cm \cdot raíz \cdot h} \right]$ es el flujo de uptake de arsénico justo en las cercanías más próximas de las raíces, lo que es descrito por medio de la ecuación de la cinética enzimática de Michaelis-Menten:

$$J = J_{max} \cdot \left[\frac{C}{K_m + C} \right] \quad [E.10]$$

Combinando [E.9] con [E.10] se obtiene finalmente:

$$R_d \cdot J_{max}(t) \cdot \left(\frac{C(t)}{K_m + C(t)} \right) \quad [E.11]$$

Siendo J_{max} el máximo valor para absorción, el K_m es el coeficiente de permeabilidad de la raíz $[\mu M]$ De este modo, cada término en la ecuación se expresa en términos de concentración en la solución del suelo, C , del elemento.

El término $I \left[\frac{\mu mol}{L \text{ suelo}} \right]$ de la en la ecuación de balance general [E.1] representa el flujo de entrada de arsénico al suelo. En el cálculo, puede ser considerado como fuente discreta del punto entrada en un momento dado, por ejemplo el uso del fertilizante, la irrigación o la reincorporación de los residuos de la cosecha de biomasa o como entrada continua, tal como polvillo contaminante atmosférico.

7.17 Linealización y obtención del modelo de primer orden

Reemplazando [E.4] [E.6] [E.7] [E.11], en la ecuación que representa el modelo de absorción de la planta [E.1], se llega a:

$$(Kd + \sigma) \cdot \frac{dC}{dt} = -K_{hf} \cdot \sigma \cdot C(t) + K_f (K_d + \sigma) \cdot C(t) - K_b \cdot M - K_{im} \cdot O - R_d \cdot J_{max}(t) \cdot \left(\frac{C(t)}{K_m + C(t)} \right) + I \quad [E.12]$$

Para el caso particular de la expresión:

$$R_d \cdot J_{max}(t) \cdot \left(\frac{C(t)}{K_m + C(t)} \right) \quad [E.11]$$

Es necesario linealizar la expresión [E.11] antes de aplicar el Laplace, utilizando la expansión de Taylor, con los valores iniciales:

$$J_{max(0)} = 0$$

$$C_{(0)} = C_{(0)}$$

Se desarrolla la siguiente expansión:

$$G_T(J_{max}, C) = G(J_{max(0)}, C_{(0)}) + \frac{\partial G}{\partial J}(J_{max(0)}, C_{(0)}) \cdot [J_{max} - J_{(0)}] + \frac{\partial G}{\partial C}(J_{max(0)}, C_{(0)}) \cdot [C - C_{(0)}] \quad [E.12]$$

Para [E.11]

Primero se construyen los términos de la expansión:

$$1. \quad G(J_{max(0)}, C_{(0)}) = R_d \cdot J_{max(0)} \cdot \left(\frac{C_{(0)}}{K_m + C_{(0)}} \right) = 0 \quad [E.12]$$

$$2. \quad \frac{\partial G}{\partial J_{max}}(J_{max(0)}, C_{(0)}) \cdot [J_{max} - J_{(o)}] = \left[R_d \cdot \left(\frac{C_{(0)}}{K_m + C_{(0)}} \right) + 0 \right] \cdot [J_{max}(t) - J_{max(0)}] = R_d \cdot J_{max}(t) \cdot \left(\frac{C_{(0)}}{K_m + C_{(0)}} \right) \quad [E.13]$$

$$3. \quad \frac{\partial G}{\partial C}(J_{max(0)}, C_{(0)}) \cdot [C - C_{(0)}] = 0 + \left(\frac{(K_m + C_{(0)}) - C_{(0)}}{(K_m + C_{(0)})^2} \right) \cdot R_d \cdot J_{max(0)} = 0 \quad [E.14]$$

Finalmente la expansión de Taylor queda reducida a:

$$G_T(J_{max}, C) = R_d \cdot J_{max}(t) \cdot \left(\frac{C_{(0)}}{K_m + C_{(0)}} \right) \quad [E.15]$$

Entonces la ecuación queda redefinida cómo:

$$(Kd + \sigma) \cdot \frac{dC}{dt} = -K_{hf} \cdot \sigma \cdot C(t) + K_f(K_d + \sigma) \cdot C(t) - K_b \cdot M - K_{im} \cdot O - R_d \cdot J_{max}(t) \cdot \left(\frac{C_{(0)}}{K_m + C_{(0)}} \right) + I \quad [E.16]$$

Aplicando Laplace y ordenando⁴⁶:

$$(Kd + \sigma) \cdot (s \cdot C_{(s)} - C_{(0)}) = -K_{hf} \cdot \sigma \cdot C_{(s)} + K_f (K_d + \sigma) \cdot C_{(s)} - \frac{(K_b \cdot M - K_{im} \cdot O)}{s}$$

$$-R_d \cdot J_{\max(s)} \cdot \left(\frac{C_{(0)}}{K_m + C_{(0)}} \right) + \frac{I}{s} \quad [E.17]$$

$$(Kd + \sigma) \cdot s \cdot C_{(s)} + K_{hf} \cdot \sigma \cdot C_{(s)} - K_f (K_d + \sigma) \cdot C_{(s)} = (Kd + \sigma) \cdot C_{(0)}$$

$$-R_d \cdot J_{\max(s)} \cdot \left(\frac{C_{(0)}}{K_m + C_{(0)}} \right) + \frac{I - (K_b \cdot M - K_{im} \cdot O)}{s} \quad [E.18]$$

$$C_{(s)} \cdot [(Kd + \sigma) \cdot s + (K_{hf} \cdot \sigma - K_f (K_d + \sigma))] = (Kd + \sigma) \cdot C_{(0)} + \frac{(I - (K_b \cdot M - K_{im} \cdot O))}{s}$$

$$-R_d \cdot J_{\max(s)} \cdot \left(\frac{C_{(0)}}{K_m + C_{(0)}} \right) \quad [E.19]$$

$$\frac{1}{(K_{hf} \cdot \sigma - K_f (K_d + \sigma))} \cdot C_{(s)} \cdot \left[\frac{(Kd + \sigma)}{(K_{hf} \cdot \sigma - K_f (K_d + \sigma))} \cdot s + 1 \right] = (Kd + \sigma) \cdot C_{(0)} + \frac{(I - (K_b \cdot M - K_{im} \cdot O))}{s}$$

$$-R_d \cdot J_{\max(s)} \cdot \left(\frac{C_{(0)}}{K_m + C_{(0)}} \right) \quad [E.20]$$

$$C_{(s)} = \frac{(Kd + \sigma) \cdot C_{(0)} \cdot (K_{hf} \cdot \sigma + K_f (K_d + \sigma))}{\left[\frac{(Kd + \sigma)}{(K_{hf} \cdot \sigma + K_f (K_d + \sigma))} \cdot s + 1 \right]} + \frac{(I - (K_b \cdot M - K_{im} \cdot O)) \cdot (K_{hf} \cdot \sigma + K_f (K_d + \sigma))}{s \cdot \left[\frac{(Kd + \sigma)}{(K_{hf} \cdot \sigma + K_f (K_d + \sigma))} \cdot s + 1 \right]}$$

$$- \frac{R_d \cdot J_{\max(s)} \cdot (K_{hf} \cdot \sigma + K_f (K_d + \sigma))}{\left[\frac{(Kd + \sigma)}{(K_{hf} \cdot \sigma + K_f (K_d + \sigma))} \cdot s + 1 \right]} \cdot \left(\frac{C_{(0)}}{K_m + C_{(0)}} \right) \quad [E.21]$$

⁴⁶ Murray Spiegel. Manual y tablas matemáticas traducción Orlando Ribero Barreiro 1era edición Mc graw Hill México Laplace p161.

Agrupando

$$C_{(s)} = -\frac{J_{\max(s)} \cdot R_d \cdot (K_{hf} \cdot \sigma + K_f(K_d + \sigma)) \cdot \left(\frac{C_{(0)}}{K_m + C_{(0)}} \right) + \frac{(Kd + \sigma) \cdot C_{(0)} \cdot (K_{hf} \cdot \sigma + K_f(K_d + \sigma))}{\left[\frac{(Kd + \sigma)}{(K_{hf} \cdot \sigma + K_f(K_d + \sigma))} \cdot s + 1 \right]}}{\left[\frac{(Kd + \sigma)}{(K_{hf} \cdot \sigma + K_f(K_d + \sigma))} \cdot s + 1 \right]} + \frac{(I - (K_b \cdot M - K_{im} \cdot O)) \cdot (K_{hf} \cdot \sigma + K_f(K_d + \sigma))}{s \cdot \left[\frac{(Kd + \sigma)}{(K_{hf} \cdot \sigma + K_f(K_d + \sigma))} \cdot s + 1 \right]}$$

[E.22]

7.17.1 Resultados

Finalmente realizando los reemplazos:

$$\tau = \frac{(Kd + \sigma)}{(K_{hf} \cdot \sigma + K_f(K_d + \sigma))} \quad [E.23]$$

$$K_1 = -R_d \cdot (K_{hf} \cdot \sigma + K_f(K_d + \sigma)) \cdot \left(\frac{C_{(0)}}{K_m + C_{(0)}} \right) \quad [E.24]$$

$$K_2 = (Kd + \sigma) \cdot C_{(0)} \cdot (K_{hf} \cdot \sigma + K_f(K_d + \sigma)) \quad [E.25]$$

$$K_3 = (I - (K_b \cdot M - K_{im} \cdot O)) \cdot (K_{hf} \cdot \sigma + K_f(K_d + \sigma)) \quad [E.26]$$

Finalmente se llega a

$$C_{(s)} = \frac{K_1}{[\tau \cdot s + 1]} \cdot J_{\max(s)} + \frac{K_2}{s \cdot [\tau \cdot s + 1]} + \frac{K_3}{[\tau \cdot s + 1]} \quad [E.27]$$

6 PARÁMETROS BIBLIOGRÁFICOS COMPLEMENTARIOS DE REFERENCIA PARA EL MODELO MATEMÁTICO DE ABSORCIÓN.

El sistema del equilibrio presentado en el CAPITULO IV es genérico en su naturaleza pues la distribución de cualquier elemento de rastreo en suelos se puede dividir en las mismas zonas contorneadas y usar las expresiones matemáticas presentadas y las transformaciones se pueden caracterizar por el mismo sistema de ecuaciones.

Es muy interesante ya que el modelo, por lo tanto, puede representar el equilibrio total de cualquier elemento de rastreo cuando las condiciones iniciales de su distribución en suelos y las constantes de tasa de reacción sean determinadas.

Los datos que fueron utilizados para definir las condiciones iniciales y las constantes necesitadas fueron recopiladas experimentalmente, de esta manera se pudieron realizar los cálculos antes de la aplicación a la Zona de Transferencia de Polvos y así tener una idea de los resultados de posible rendimiento de absorción con la planta propuesta.

En este anexo se presentan algunos datos de referencia en otros lugares⁴⁷.

7.17.2 Distribución promedio elemento de rastreo en suelos

En el cálculo del equilibrio total, las concentraciones y las distribuciones iniciales de As en suelos deben ser conocidas. Se revisó la bibliografía publicada y se determinó concentraciones As de los suelos que son representante de los suelos del terreno de cultivo y se definieron las condiciones iniciales de acuerdo:

Categoría	Rango As	Promedio ppm
Podzols y Suelos Arenosos	<0,1 a 30	5,1
Suelos Arcillosos	1,7 a 27	7,7
Chemozems	1,9 a 23	8,8
Suelos Bosques	<0,1 a 93	7
Suelos para la cosecha	<1 a 93	7

Tabla 06: ppm promedio en diferentes suelos

⁴⁷ Andrew C. Chang, Weiping Chen, Beni Bar-Yosef, Albert L. Page, Seongju Kim. Plant Uptake Parameters. A Generalized Trace Element Mass Balance Model for Cropland Soils: Arsenic and Cadmium. January, 2004, p. 11 - 85

"Fitoremediación de Zonas de Transferencia de Polvos contaminadas con arsénico por medio del uso del helecho *Pteris Vittata*" Codelco Norte Chuquicamata.

Se calculó un promedio general para poder realizar la simulación de arsénico en suelos de California, tabla con estadísticas descriptivas de concentraciones de As muestreados en 50 lugares diferentes en el estado de California.

Elemento	Rango [mg/kg]	Mediana [mg/kg]	Promedio [mg/kg]	* σ [mg/kg]
As	1,8 a 16,6	6,5	7,6	3,9

* σ utilizado para representar la Desviación Standard

Tabla 07: Promedio As en estado California

7.17.3 Datos distribución arsénico en suelos

La siguiente tabla contiene las condiciones iniciales para As en suelos del terreno de cultivo.

Categoría	Arsénico
Concentración total en el suelo [mg/kg]	7,7
Concentración en solución en suelo [μ M]	0,08
En fase Mineral [mg/kg]	5
En fase orgánica [mg/kg]	0,5

Tabla 08: Concentración en fases

Para la simulación de rendimiento del proyecto realizada en STEM, se escalan las constantes de distribución de arsénico en el suelo aquí presentadas tomadas de una experiencia del Doctor Chang⁴⁸, debido a que éste tipo de pruebas no se realizan en los laboratorios que fueron consultados a nivel nacional por el Laboratorio de Químico de la Dirección de Gestión de Calidad de Codelco Norte Chile.

⁴⁸ Andrew C. Chang profesor Universidad California Riverside "Agricultural Engineering", Director UC "Center for Water Resources", Ph.D., Purdue University, Lafayette, Indiana, 1971

"Fitoremediación de Zonas de Transferencia de Polvos contaminadas con arsénico por medio del uso del helecho *Pteris Vittata*" Codelco Norte Chuquicamata.

7.17.4 Clasificación de arsénico presente en los suelos

Propiedades del arsénico:

Compuesto	Fórmula	Punto de fusión	Punto de ebullición	Densidad	Solubilidad en el agua
		°C	°C	(g/cm ³)	(g/L)
Arsénico	As	613	---	5,73 a 14°C	insoluble
Trióxido de arsénico	As ₂ O ₃	312,3	465	3,74	37 a 20 °C
Pentóxido de arsénico	As ₂ O ₅	315	---	4,32	1500 a 16°C
Sulfuro de arsénico	As ₂ S ₃	300*	300*	3,43	5x10 ⁻⁴
Ácido dimetilarsénico	(CH ₃) ₂ AsO (OH)	200	---	---	829 a 22 °C
Arsenato de plomo	PbHAsO ₄	720	---	5,79	<i>poco soluble</i>
Arsenato de potasio	KH ₂ AsO ₄	288	---	287	190 a 16 °C
Arsenito de potasio	KH ₂ AsO ₄	---	---	---	<i>Soluble</i>

Tabla 09: Propiedades del arsénico en suelos

El arsénico puede ganar o perder electrones en reacciones de oxidación - reducción. Como resultado de ese fenómeno, el arsénico puede estar presente en la naturaleza en diversos estados de oxidación (-3, +3 y +5), si bien se suele encontrar en los suelos en dos estados de valencia: arsenito As⁺³ y arsenato As⁺⁵. El arsenato predomina en condiciones oxidantes, mientras que el arsenito predomina cuando las condiciones son suficientemente reductoras.

*Fitoremediación de Zonas de Transferencia de Polvos contaminadas con arsénico por medio del uso del helecho *Pteris Vittata* Codelco Norte Chuquicamata.

El arsénico presente en suelos, puede tener reacciones posibles con otros componentes. El arsenato, As^{+5} , puede formar minerales estables con muchos elementos que pueden estar presentes en los suelos.

Se concluyó que $Ca_3(AsO_4)_2$ y $Mn_3(AsO_4)_2$ eran los más posibles de encontrar en la forma As^{+5} en suelos.

En suelos bien - oxidados y alcalinos, $Ca_3(AsO_4)_2$ era el más abundante y estable As^{+5} y fue seguido por $Mn_3(AsO_4)_2$.

El arsenato As^{+5} es la forma más abundante en ambientes aerobios⁴⁹ (zona superficial del suelo) y en general es la especie estable en experimentos en condiciones habituales de aireación. En condiciones naturales de pH, el As^{+5} existe en disolución como $H_2AsO_4^-$ y $HAsO_4^{2-}$. El arsenito As^{+3} es la forma más tóxica y destruye todos los tejidos con los que entra en contacto, por reacción con los grupos sulfhídricos de las proteínas. Además es más soluble y móvil por lo que su disponibilidad para la absorción por los cultivos es mayor. El As^{+3} se encuentra en disolución en forma de H_3AsO_3 y $H_2AsO_3^-$.

En el 93% de las muestras, el arsénico se encuentra como arsenatos con un estado de oxidación (V) y el 7 % se encuentran como arsenito⁺³, la cual es la especie del arsénico más tóxica y móvil.

⁴⁹ J. Álvarez-Benedí, S. Bolado Rodríguez, I. Cancillo Carro, C. Calvo Revuelta "Dinámica de adsorción – desorción de arsénico (v) en suelos de cultivo en castilla y león" Estudios de la Zona No Saturada del Suelo Vol. VI. J. Álvarez-Benedí y P. Marinero, 2003 p 332-333

"Fitoremediación de Zonas de Transferencia de Polvos contaminadas con arsénico por medio del uso del helecho *Pteris Vittata*" Codelco Norte Chuquicamata.

7.17.5 Adsorción de arsénico en la superficie

La mayoría de los investigadores presentaron que la adsorción de arsénico por los suelos se puede describir por Langmuir o por el modelo de isoterma de la adsorción de Freundlich. Los estudios se centraron sobre todo en reacciones con As^{+5} en la gama superior de las concentraciones del equilibrio, que excedieron las concentraciones encontradas normalmente en suelos.

En suelos naturales o agrícolas, se espera que el total de arsénico del suelo al igual que las concentraciones y las entradas sean considerablemente más bajos que la gama cubierta comúnmente en experimentos del laboratorio y, bajo condiciones naturales o agrícolas del suelo, los isotermas de la adsorción se puede reducir a un modelo lineal, tal que, $Ad = K_d \times C$ La constante lineal, K_d , varía considerablemente dependiendo de los suelos. Influyendo, la textura del suelo, el pH, la materia orgánica, el contenido de arcilla y del hidróxido etc.

Suelos	Total de As [ppm]	Constante Lineal de Adsorción [l/kg]		Referencias
		As (V)	As (III)	
Wasco (California)		10,1	6,8	Manning and Goldberg, 1997
Fallbrook (California)		49,5	28,4	
Wyo (California)		165,1	83,7	
Plainfield (Arenoso Winconsin)	0,8	4,4		Jacobs et al. 1970
Waupun (Arcilloso)	3,7	9,1		
Superior (Arcilloso)	3,4	13,5		
Madison River Valley (Sin Irrigación)	20	17,4		Jones et al. 1999
Madison River Valley (Irrigado)	14,9	14,7		
Suelos Australianos				
Alfiol	0,6	3		Smith et al. 1999
Oxisol	0,59	26		
Alfisol	0,67	3,5		
Oxisol	1,94	46		

Tabla 10: Constantes lineales de adsorción de Arsénico en Suelos.

Un número de estudios se han enfocado en la adsorción de arsénico por los óxidos del Fe debido a su afinidad adsorbente para As^{+5} . Estos estudios indican que el $HAsO_4^{-2}$ el anión forma el complejos superficiales de $Fe - As^{+5}$.

Se han hecho intentos de correlacionar absorción de arsénico con el contenido del óxido del Fe de suelos. Cuando los datos a partir de un solo estudio eran analizados, las constantes de la adsorción aumentaron linealmente en proporción con el contenido del óxido del Fe de los suelos estudiados. Sin embargo, los otros componentes minerales del suelo también han demostrado desempeñar un papel importante en la adsorción de arsénico, por ejemplo los minerales del hidróxido del aluminio y del filosilicato (es decir arcilla).

7.17.6 Parámetros de la característica del suelo

En el modelo del equilibrio total, los suelos se clasifican en términos de su contenido volumétrico en agua θ y conductividad hidráulica K_h . Los contenidos en agua volumétricos se generalizan en términos de textura del suelo (tabla 13). De acuerdo con la ecuación de Genuchten, la conductividad hidráulica del suelo, $K(\theta)$, varía con los contenidos volumétricos de agua en el suelo, y se puede estimar de la siguiente manera:

$$K(\theta) = K_s \times \Theta^{1/2} \times [1 - (1 - \Theta^{1/m})^m]^2 \quad [F.1]$$

Donde $\Theta = (\theta_f - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ y $m = (1 - 1/n)$. Los θ_s y el K_s son saturados contenido en agua volumétrico y su conductividad hidráulica correspondiente, respectivamente. El θ_f representa el contenido volumétrico en agua del suelo. El θ_r representa el contenido en agua residual. Generalmente, el valor de n varía entre 2 (suelo de la arcilla) a > 4 (suelo de la arena). Asumiendo $n = 4$ para la arena y el suelo arenoso del norte y $n = 2$ para todo el otro suelo, la conductividad hidráulica para los suelos en el contenido de agua del campo se pueden obtener, basado en datos del manual de la ciencia de suelo y la ecuación [F.1]

Soil	θ_f ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	θ_r ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	θ_s ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	K_s (cm hr^{-1})	$K(\theta)$ (cm hr^{-1})
Sand	0.143	0.035	0.31	21.00	0.66
Sandy loam	0.164	0.055	0.35	2.59	0.067
Loam	0.236	0.08	0.43	1.32	0.0097
Silt loam	0.314	0.1	0.46	0.68	0.020
Clay loam	0.343	0.15	0.5	0.23	0.0047
Clay	0.371	0.2	0.6	0.06	0.00036

Tabla 11: Conductividad hidráulica de diferentes suelos

7.17.7 Parámetros de absorción (uptake) de la planta.

La tasa de absorción de arsénico por plantas puede ser diferente debido a muchas razones obviamente varía de acuerdo a los tipos de planta, luego a la concentración de arsénico en el suelo, las características del suelo; tales como del pH y contenido de arcilla y la presencia de otros iones.

El factor del uptake de la planta representado por la letra J se puede expresar en términos de parámetros de la cinética de Michaelis - Menten para la absorción, pero el J_{max} y el K_m (coeficiente de permeabilidad de raíz de la planta) son constantes características

La tabla resume los datos disponibles de la bibliografía para la absorción de As en diferentes especies:

Especie	J_{max}^* [nmol/g raíz h]	K_m^{**} [μM]	J_{max} [μmol/cm h]	Referencia
<i>H. Lanatus</i> (No tolerante)	284,8 ± 21,8	30 ± 4	8,9e-05	Mcharg
<i>H. Lanatus</i> (Tolerante)	449,6 ± 34,9	37 ± 4	1,4e-04	and Machair (1992)
Arroz (Aman)	132,9 ± 13,4	5,9 ± 1,2	4,2e-05	Adedin
Arroz (Boro)	97,0 ± 10,3	6,3 ± 2,6	3,0e-05	et al. (2002)
<i>Pteris Vittata</i> (Control P)	129,6 ± 19,7	0,52 ± 0,21	4,1e-05	Wang
<i>Pteris Vittata</i> (P-Deficiente)	318,6 ± 25,8	0,97 ± 0,37	1,0e-04	et al. (2002)

* J_{max} : Velocidad máxima absorción.

** K_m : Coeficiente de permeabilidad de raíz.

Tabla 12: Tasas de absorción de arsénico de diferentes plantas

7 Sistema de Cañerías para Circuito

Para dimensionar las líneas que se van a ocupar, se definió primero el flujo de carga y recirculación del sistema, por lo que el flujo de bombeado a utilizar será:

$$Q = 18 \left[\frac{l}{min} \right]$$

De acuerdo a mecánica de fluidos la velocidad recomendada texto guía para mecánica de fluidos escuela Ingeniería Química en cañerías para flujos es de:

$$v = 6 \left[\frac{ft}{s} \right]$$

Por medio de la ecuación de caudal $Q = A \cdot v$ despejando se puede encontrar el área de la cañería a utilizar

$$A = 0,254 \left[in^2 \right]$$

Por medio de la ecuación de área de un círculo, se calcula el diámetro de la cañería de alimentación

$$A = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \quad [G.1]$$

Despejando

$$d = 0,568 \left[in \right]$$

Para éste diámetro calculado se determina comprar la cañería con diámetro más cercano que corresponde a:

Línea descarga:

Diámetro Nominal de ½ " Schedule 10S
con diámetro interno real de 0,545[in]

Recalculando el área interna de la cañería por medio de la ecuación

$$A_{real} = \pi \cdot \frac{d_{real}^2}{4} \quad [G.2]$$

Se obtiene un área real de 0,233 [in²] con el cual se recalcula la velocidad real de descarga por medio de la ecuación de caudal

$$Q = A_{real} \cdot v_{real} \quad [G.3]$$

Con lo que se obtiene una velocidad real de carga de 6,539 $\left[\frac{ft}{s} \right]$.

Para facilitar el diseño, el sistema se dividió en 3 tramos, en donde se calcularán las curvas características para cada del sistema para poder dimensionar la bomba.

Una vez obtenidas las 3 curvas de los tramos, se podrá definir por medio de la curva más exigente la bomba necesaria para poder satisfacer el proceso.

7.18 Tramo I: Carga

El tramo I corresponde al sistema de carga del reactor y la configuración espacial es la siguiente:

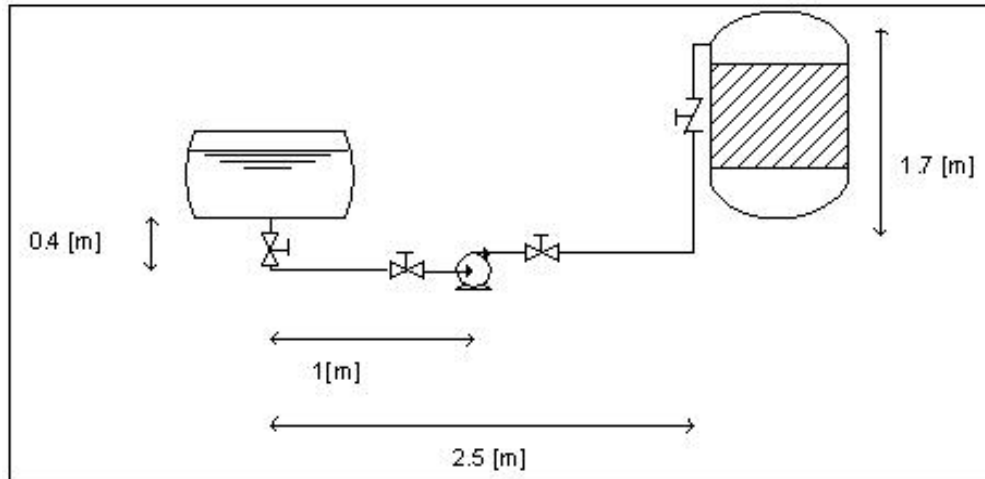


Figura 18: Disposición tramo I: Carga, para curva de sistema

Para conocer la velocidad de succión de la bomba se estima según la relación:

$$v_{\text{succión}} = 2/3 v_{\text{descarga}} \quad [G.4]$$

Con velocidad real de descarga de la bomba $6,539 \left[\frac{ft}{s} \right]$ se estima una velocidad de succión

$$4,276 \left[\frac{ft}{s} \right]$$

Luego por medio de la ecuación de continuidad:

$$Q = A_{\text{succión}} \cdot v_{\text{succión}} \quad [G.5]$$

Se despeja el valor del área necesaria

$$A_{succión} = 0,349 [in^2]$$

Y por medio de la ecuación del área de un círculo, se llega

$$A_{succión} = \pi \cdot \frac{d_{succión}^2}{4} \quad [G.6]$$

$$d_{succión} = 0,667 [in]$$

Para este diámetro calculado se propone el uso de una cañería para la succión:

Diámetro Nominal de 3/4 " Schedule 10S
con diámetro interno real de 0,674 [in]

Recalculando el área interna de la cañería de descarga por medio de la ecuación

$$A_{realsucción} = \pi \cdot \frac{d_{realsucción}^2}{4} \quad [G.7]$$

La cañería propuesta tiene un área real de succión 0,356 [in²] con el cual se recalcula la velocidad real de succión por medio de la ecuación de continuidad.

$$Q = A_{real} \cdot v_{real} \quad [G.8]$$

Con lo que se obtiene una velocidad real de succión de $4,276 \left[\frac{ft}{s} \right]$.

7.18.1 Pérdidas por descarga del sistema en tramo I

Para poder determinar la curva del sistema correspondiente al tramo I, se deben identificar las pérdidas por descarga en el tramo, las cuales corresponden al siguiente sector:

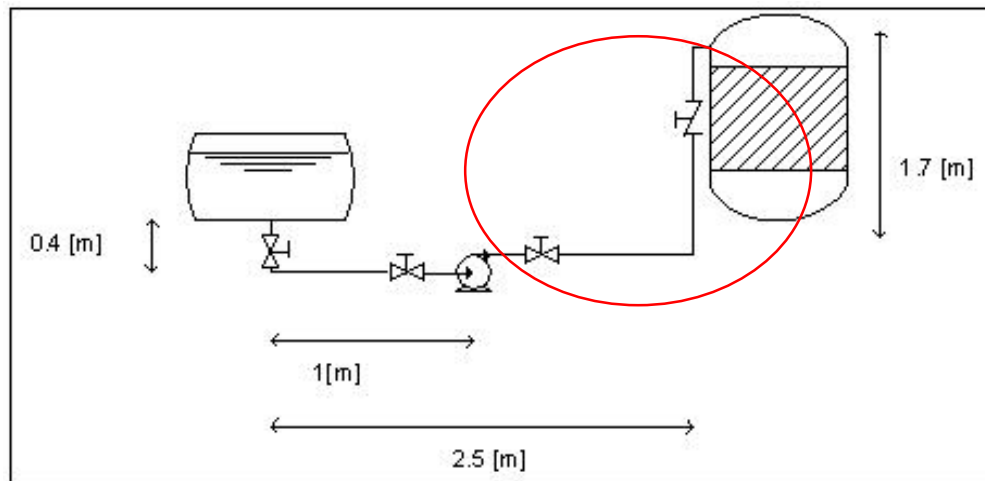


Figura 19: Sistema descarga tramo I

Descarga tramo I	1/2"		
Largo equivalente			
Largo cañería	9,180 [ft]	2,798	[m]
Válvula globo	16,000 [ft]	4,877	[m]
Válvula Check	4,250 [ft]	1,295	[m]
Codos 2	2,400 [ft]	0,732	[m]
Aspersor	40,000 [ft]	12,192	
Descarga	1 altura		
Total	71,83 [ft]	21,894 [m]	+ 1 altura

Tabla 13: Largos equivalentes sistema descarga tramo 1

Luego se calculan los valores necesarios para encontrar el factor de Darcy,

Factor	Ecuación	Resultado
Rugosidad relativa	$R_r = 0,00015 / d_{desc\ arg\ a}$	0,00027523
Reynolds	$Re = \frac{\rho \cdot v_{desc\ arg\ a} \cdot d_{desc\ arg\ a}}{\mu}$	27579,4548
fd	Tabla	0,025

Tabla 14: Largos equivalentes sistema tramo I

Finalmente se determina el hf de descarga por medio de la siguiente ecuación:

$$h_{fdesc\ arg\ a} = f_d \cdot \frac{\sum l_{eq} \cdot v_{realdesc\ arg\ a}^2}{d_{realdesc\ arg\ a} \cdot 2 \cdot g_c} + \frac{v_{realdesc\ arg\ a}^2}{2 \cdot g_c} \left[\frac{lbf \cdot ft}{lbm} \right]$$

[G.9]

$$h_{fdesc\ arg\ a} = 26,922 \left[\frac{lbf \cdot ft}{lbm} \right]$$

7.18.2 Pérdidas por succión del sistema en tramo I: Carga

Al igual que para la descarga para poder determinar la curva del sistema correspondiente al tramo 1, se deben identificar las pérdidas por succión en el tramo, las cuales corresponden a:

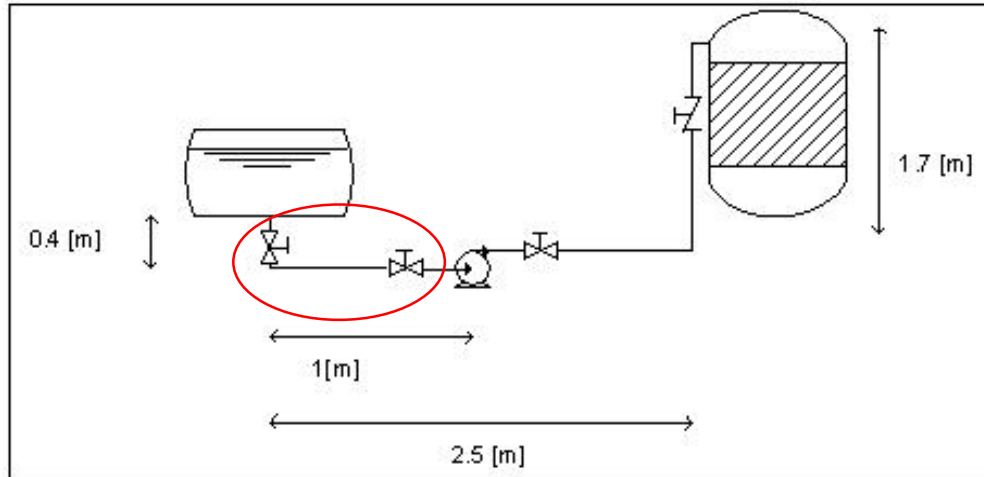


Figura 20: Sistema succión tramo I

Succión tramo I	3/4"		
Largo equivalente			
Largo cañería	4,593	[ft]	1,400 [m]
Válvula compuerta	0,390	[ft]	0,119 [m]
Codos 1	1,5	[ft]	0,457 [m]
Válvula globo	20	[ft]	6,096 [m]
Total	26,48	[ft]	8,072 [m]

Tabla 15: Largos equivalentes sistema succión tramo 1

Luego se calculan los valores necesarios para encontrar el factor de Darcy,

Factor	Ecuación	Resultado
Rugosidad relativa	$R_r = 0,00015 / d_{succión}$	0,00222552
Reynolds	$Re = \frac{\rho \cdot v_{succión} \cdot d_{succión}}{\mu}$	22300,8945
fd	tabla	0,03

Tabla 16: Constantes flujo en cañería

Finalmente se determina el hf de descarga por medio de la siguiente ecuación:

$$h_{fsucción} = f_d \cdot \frac{\sum l_{eq} \cdot v_{realsucción}^2}{d_{realsucción} \cdot 2 \cdot g_c} \left[\frac{lbf \cdot ft}{lbm} \right]$$

[G.10]

$$h_{fsucción} = 10,081 \left[\frac{lbf \cdot ft}{lbm} \right]$$

Con los valores obtenidos se puede desarrollar la ecuación de Bernoulli para conocer el trabajo de la bomba, el balance energético se desarrolla de la siguiente manera:

$$\frac{\Delta P}{\rho} + \frac{v^2}{2g_c} + \Delta z \cdot \frac{g}{g_c} = hf + W_b$$

[G.11]

7.18.3 Balance Energía tramo I: Carga

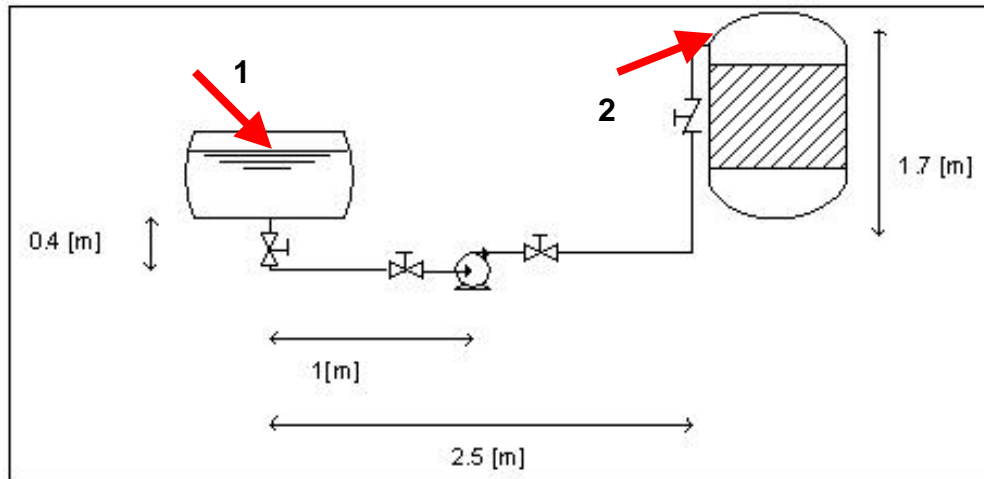


Figura 21: Puntos de Bernoulli sistema en tramo 1

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2g_c} + z_1 \cdot \frac{g}{g_c} = \frac{P_2}{\rho} + \frac{v_d^2}{2g_c} + z_2 \cdot \frac{g}{g_c} + hf_s + hf_d + W_b$$

$$W_b = \frac{P_2}{\rho} - \frac{P_1}{\rho} + \frac{v_d^2}{2g_c} - \frac{v_1^2}{2g_c} + z_2 \cdot \frac{g}{g_c} - z_1 \cdot \frac{g}{g_c} + hf_s + hf_d$$

$$W_b = \frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta v^2}{2g_c} + \Delta z \cdot \frac{g}{g_c} + hf_s + hf_d$$

[G.12]

El balance de energía se realizara en los puntos indicados, los dos estanques están abiertos por medio de una válvula de venteo la cual mantiene los dos equipos a presión atmosférica por lo tanto el $\Delta P = 0$

$$W_{b1} = \frac{\Delta v^2}{2g_c} + \Delta z \cdot \frac{g}{g_c} + hf_s + hf_d \quad [G.13]$$

Suponiendo que v_1 es despreciable contra v_d , esto se puede comprobar por medio de la ecuación de continuidad ya que conociendo la velocidad de descarga se puede calcular la velocidad dentro de los estanques, quedando:

$$W_{bt} = \frac{v_d^2}{2g_c} + \Delta z \cdot \frac{g}{g_c} + hf_s + hf_d \quad [G.14]$$

La potencia de la bomba esta dada por:

$$Potencia = \frac{-W_b \cdot \rho \cdot Q}{\eta} \quad [G.15]$$

Potencia 1,456 HP

Donde η corresponde a la eficiencia de la bomba

Curva característica del sistema esta dada por el balance de energía de este, y corresponde a:

$$H_{sist1} = \frac{v_d^2}{2g_c} + \Delta z \cdot \frac{g}{g_c} + hf_s + hf$$

$$v_d^2 = \frac{Q^2}{A^2}$$

$$H_{sist1} = \frac{Q^2}{2g_c \cdot \left(\pi \cdot \frac{d_d^2}{4} \right)^2} + \Delta z \cdot \frac{g}{g_c} + hf_s + hf$$

$$H_{sist1} = \frac{Q^2}{g_c \cdot \pi^2 \cdot \frac{d_d^4}{8}} + \Delta z \cdot \frac{g}{g_c} + hf_s + hf$$

[G.16]

Curva característica del sistema esta dada por el balance de energía de este, y corresponde a:

$$H_{sist1} = \frac{8 \cdot Q^2}{g_c \cdot \pi^2 \cdot d_d^4} + \Delta z \cdot \frac{g}{g_c} + hf_s + hf \quad [G.17]$$

Con esta expresión luego se grafica la curva del sistema para los diferentes caudales.

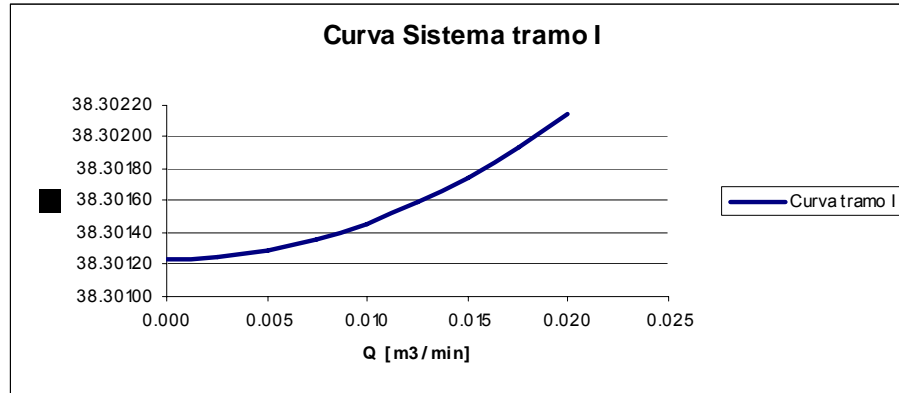


Figura 22: Curva sistema tramo I

Q [m ³ /min]	H1
0,000	38,30123
0,003	38,30124
0,005	38,30129
0,008	38,30136
0,010	38,30146
0,013	38,30159
0,015	38,30175
0,018	38,30193
0,020	38,30215

Tabla 17: Datos curva sistema tramo 1

7.19 Tramo II: Recirculación

El tramo II corresponde al sistema de recirculación del reactor en orden de mantener una concentración homogénea dentro del reactor y cumplir con las condiciones del sistema batch la configuración utilizada es la siguiente:

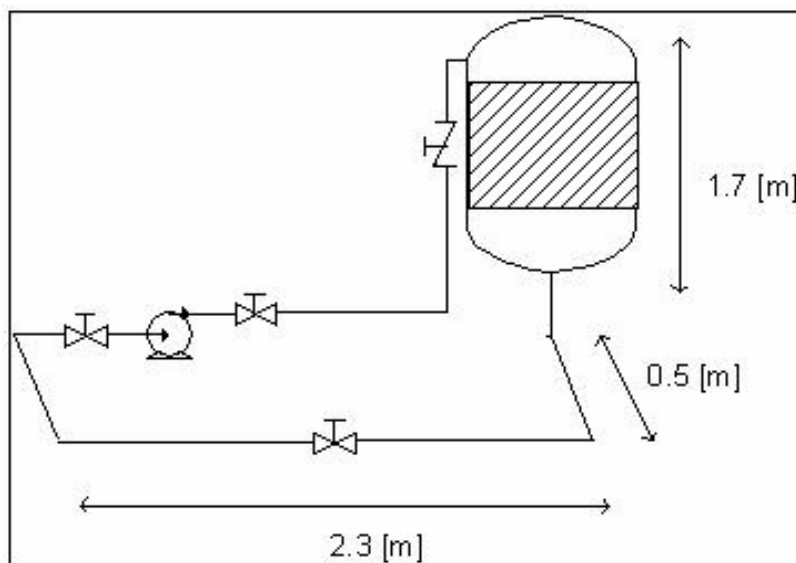


Figura 23: Disposición tramo II: recirculación, para curva de sistema

Utilizando las cañerías antes calculadas

Línea descarga al reactor

Diámetro Nominal de $\frac{1}{2}$ " Schedule 10S
con diámetro interno real de 0,545 [in]

Para este diámetro calculado se propone el uso de una cañería para la succión:

Diámetro Nominal de $\frac{3}{4}$ " Schedule 10S
con diámetro interno real de 0,674 [in]

7.19.1 Pérdidas por descarga del sistema tramo II: Recirculación

Para poder determinar la curva del sistema correspondiente al tramo II, se deben identificar las pérdidas por descarga en el tramo, las cuales corresponden al siguiente sector:

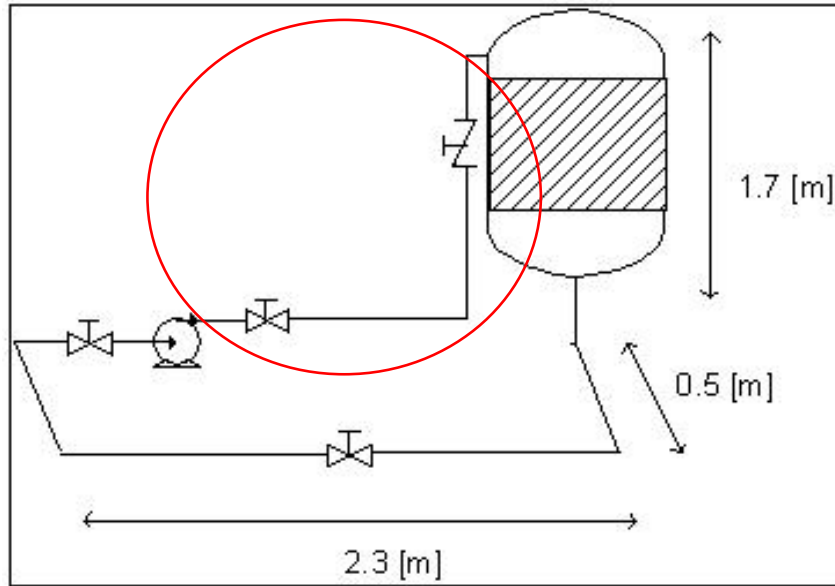


Figura 24: Sistema descarga tramo II

Descarga tramo I	1/2"		
Largo equivalente			
Largo cañería	9,180 [ft]	2,798	[m]
Válvula globo	16,000 [ft]	4,877	[m]
Válvula Check	4,250 [ft]	1,295	[m]
Codos 2	2,400 [ft]	0,732	[m]
Aspersor	40,000 [ft]	12,192	
Descarga	1 altura		
Total	71,83 [ft]	21,894 [m]	+ 1 altura

Tabla 18: Largos equivalentes sistema descarga tramo 2

Luego se calculan los valores necesarios para encontrar el factor de Darcy,

Factor	Ecuación	Resultado
Rugosidad relativa	$R_r = 0,00015 / d_{succión}$	0,00222552
Reynolds	$Re = \frac{\rho \cdot v_{succión} \cdot d_{succión}}{\mu}$	22300,8945
fd	tabla	0,03

Tabla 19: Constantes tramo II

Finalmente se determina el hf de descarga por medio de la siguiente ecuación:

$$h_{fdesc\ arg\ a} = f_d \cdot \frac{\sum l_{eq} \cdot v_{realdesc\ arg\ a}^2}{d_{realdesc\ arg\ a} \cdot 2 \cdot g_c} + \frac{v_{realdesc\ arg\ a}^2}{2 \cdot g_c} \left[\frac{lbf \cdot ft}{lbm} \right]$$

[G.18]

$$h_{fdesc\ arg\ a} = 26.922 \left[\frac{lbf \cdot ft}{lbm} \right]$$

7.19.2 Pérdidas por succión de la bomba en tramo II: Recirculación

Al igual que para la descarga para poder determinar la curva del sistema correspondiente al tramo 2, se deben identificar las pérdidas por succión en el tramo, las cuales corresponden a:

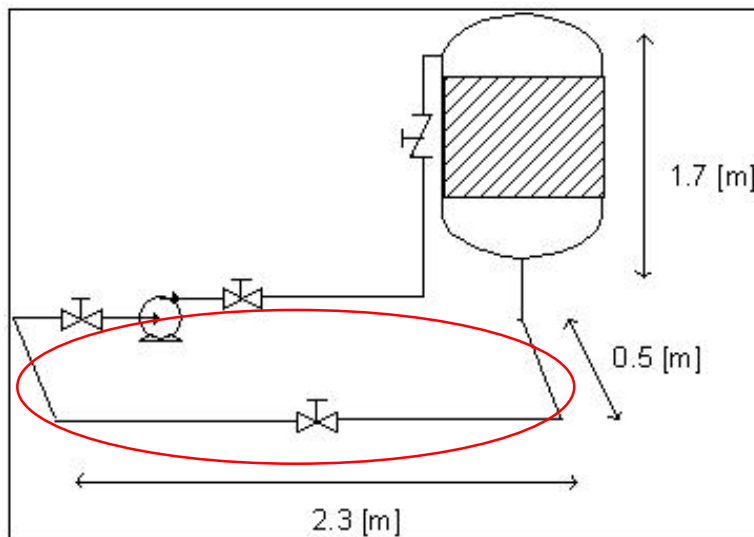


Figura 25: Sistema succión tramo II: Recirculación

Succión tramo 2	3/4"	
Largo cañerías	14,11 [ft]	4,91 [m]
Válvula Compuerta	0,37 [ft]	0,13 [m]
Válvula globo	20,00 [ft]	6,96 [m]
Codos 4	7,20 [ft]	2,51 [m]
total	41,68 [ft]	14,50 [m]

Tabla 20: Largos equivalentes sistema succión tramo 2

Luego se calculan los valores necesarios para encontrar el factor de Darcy,

Factor	Ecuación	Resultado
Rugosidad relativa	$R_r = 0,00015 / d_{succión}$	0,00222552
Reynolds	$Re = \frac{\rho \cdot v_{succión} \cdot d_{succión}}{\mu}$	22300,8945
fd	tabla	0,029

Tabla 21: Cálculo factor Darcy sistema tramo II

Finalmente se determina el hf de descarga por medio de la siguiente ecuación:

$$h_{fsucción} = f_d \cdot \frac{\sum l_{eq} \cdot v_{realsucción}^2}{d_{realsucción} \cdot 2 \cdot g_c} \left[\frac{lbf \cdot ft}{lbm} \right]$$

$$h_{fsucción} = 6,1092 \left[\frac{lbf \cdot ft}{lbm} \right]$$

[G.19]

Con los valores obtenidos se puede desarrollar la ecuación de Bernoulli para conocer el trabajo de la bomba, el balance energético se desarrolla de la siguiente manera:

$$\boxed{\frac{\Delta P}{\rho} + \frac{v^2}{2g_c} + \Delta z \cdot \frac{g}{g_c} = hf + W_b} \quad [G.20]$$

7.19.3 Balance Energía tramo II: Recirculación

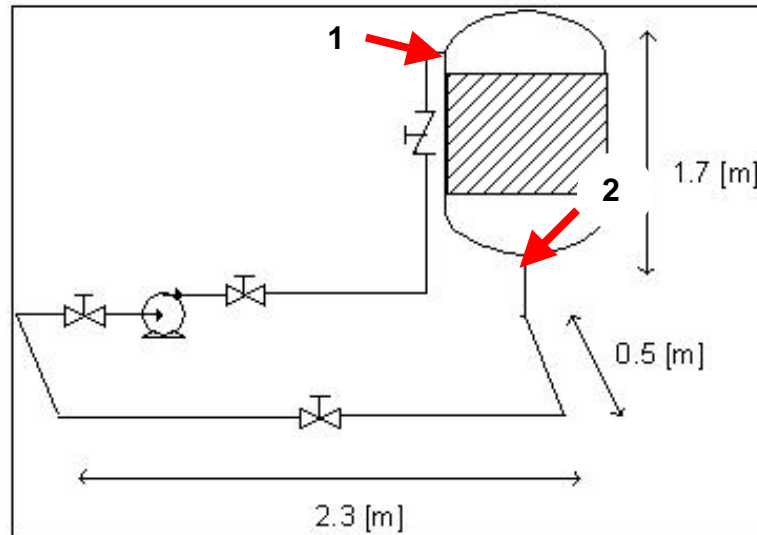


Figura 26: Puntos de Bernoulli sistema en tramo 2

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2g_c} + z_1 \cdot \frac{g}{g_c} = \frac{P_2}{\rho} + \frac{v_d^2}{2g_c} + z_2 \cdot \frac{g}{g_c} + hf_s + hf_d + W_b$$

$$W_b = \frac{P_2}{\rho} - \frac{P_1}{\rho} + \frac{v_2^2}{2g_c} - \frac{v_1^2}{2g_c} + z_2 \cdot \frac{g}{g_c} - z_1 \cdot \frac{g}{g_c} + hf_s + hf_d$$

$$W_b = \frac{P_2}{\rho} - \frac{P_{atm}}{\rho} + \frac{v_s^2}{2g_c} - \frac{v_d^2}{2g_c} + z_2 \cdot \frac{g}{g_c} - z_1 \cdot \frac{g}{g_c} + hf_s + hf_d \quad [G.21]$$

$$W_b = \frac{\Delta P}{\rho} + \Delta \left(\frac{v^2}{2g_c} \right) + \Delta z \cdot \frac{g}{g_c} + hf_s + hf_d$$

$$\Delta(v^2) = v_s^2 - v_d^2$$

[G.22]

El balance de energía se realizara en los puntos indicados, el estanque está abierto por medio de una válvula de venteo la cual mantiene el equipo a presión atmosférica por lo tanto el

$$\Delta P = P_2 - P_{atm} \quad [G.23]$$

Por medio de la regla de presión hidrostática la presión en el punto 2, corresponde a:

$$P_2 = \rho \cdot g \cdot h + P_{atm} \text{ por lo que el } \Delta P \text{ queda definido como:}$$

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot h + P_{atm} - P_{atm} = \rho \cdot g \cdot h \quad [G.24]$$

Por lo tanto el trabajo de la bomba queda redefinido como:

$$W_{b2} = \frac{\rho \cdot g \cdot h}{\rho} + \frac{v_s^2 - v_d^2}{2g_c} + \Delta z \cdot \frac{g}{g_c} + hf_s + hf_d \quad [G.25]$$

La potencia de la bomba esta dada por:

$$Potencia = \frac{-W_b \cdot \rho \cdot Q}{\eta}$$

Potencia 0,074 HP

donde η corresponde a la eficiencia de la bomba

Curva característica del sistema esta dada por el balance de energía de este, y corresponde a:

$$H_{sist2} = \frac{\rho \cdot g \cdot h}{\rho} + \frac{v_s^2 - v_d^2}{2g_c} + \Delta z \cdot \frac{g}{g_c} + hf_s + hf_d \quad [G.26]$$

Considerando la ecuación de continuidad para

$$v_s^2 = \frac{Q^2}{A_s^2}$$

[G.27]

$$v_d^2 = \frac{Q^2}{A_d^2}$$

$$H_{sist2} = \frac{\rho \cdot g \cdot h}{\rho} + \frac{v_s^2 - v_d^2}{2g_c} + \Delta z \cdot \frac{g}{g_c} + hf_s + hf_d$$

$$H_{sist2} = g \cdot h + \frac{Q^2}{2g_c \cdot \left(\pi \cdot \frac{d_s^2}{4}\right)^2} - \frac{Q^2}{2g_c \cdot \left(\pi \cdot \frac{d_d^2}{4}\right)^2} + \Delta z \cdot \frac{g}{g_c} + hf_s + hf_d$$

[G.28]

$$H_{sist2} = g \cdot h + \frac{Q^2}{g_c \cdot \pi^2 \cdot \frac{d_s^4}{8}} - \frac{Q^2}{g_c \cdot \pi^2 \cdot \frac{d_d^4}{8}} + \Delta z \cdot \frac{g}{g_c} + hf_s + hf_d$$

[G.29]

$H_{sist2} = g \cdot h + \frac{8 \cdot Q^2}{g_c \cdot \pi^2 \cdot d_s^4} - \frac{8 \cdot Q^2}{g_c \cdot \pi^2 \cdot d_d^4} + \Delta z \cdot \frac{g}{g_c} + hf_s + hf_d$
--

[G.30]

Con esta expresión luego se grafica la curva del sistema para los diferentes caudales en el tramo II: Recirculación.

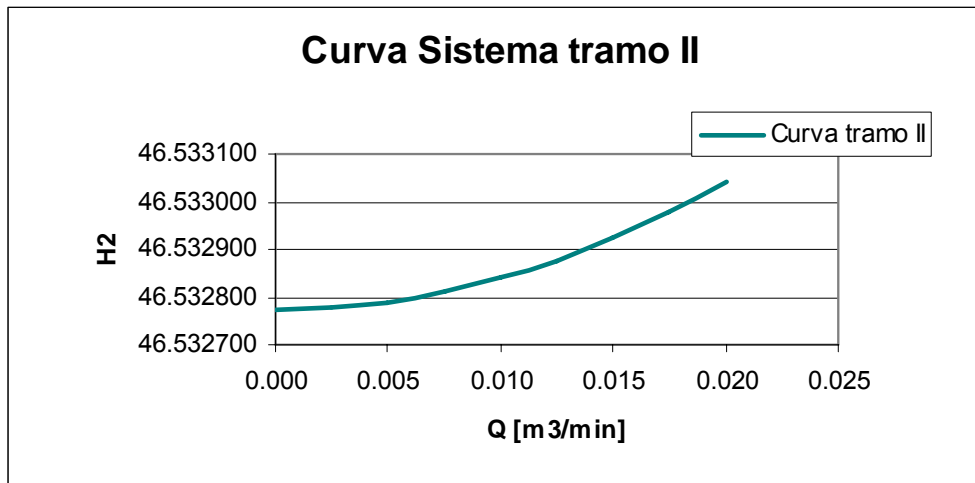


Figura 27: Curvas sistema tramo II

Q [m ³ /min]	H2
0,000	46,532772
0,003	46,532777
0,005	46,532789
0,008	46,532810
0,010	46,532839
0,013	46,532877
0,015	46,532923
0,018	46,532977
0,020	46,533040

Tabla 22: Datos curva de sistema tramo 2

7.20 Tramo III: Descarga

El tramo III corresponde al sistema de descarga del reactor hacia el estanque receptor de la solución de arsénico una vez que la reacción ya ha terminado.

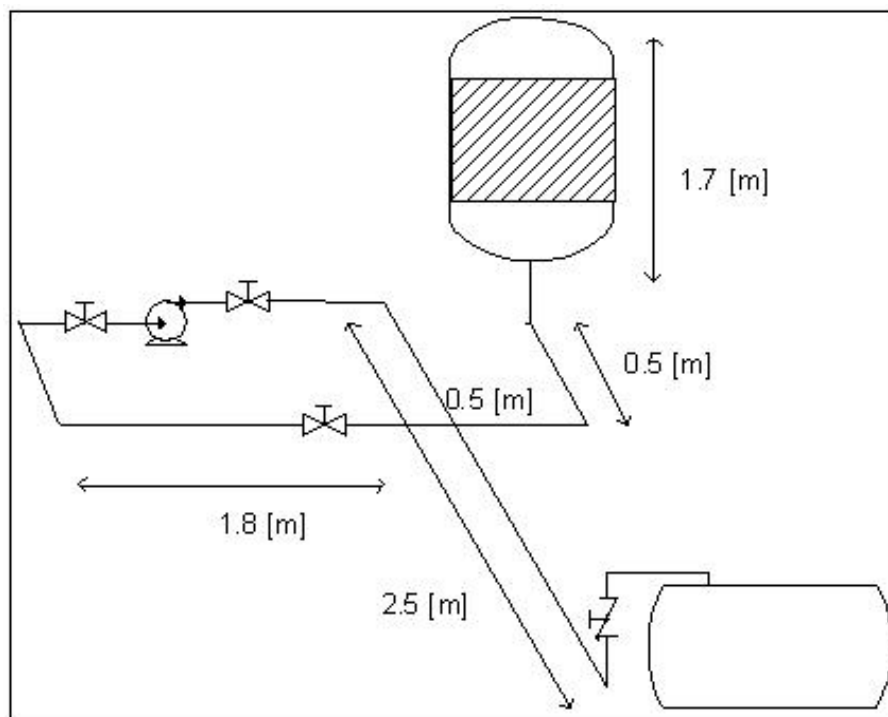


Figura 28: Disposición tramo III Descarga

Utilizando las cañerías antes calculadas

Línea descarga al estanque receptor

Diámetro Nominal de $\frac{1}{2}$ " Schedule 10S
con diámetro interno real de 0,545 [in]

Para este diámetro calculado se propone el uso de una cañería para la succión:

Diámetro Nominal de 3/4 " Schedule 10S
con diámetro interno real de 0,674 [in]

7.20.1 Pérdidas por descarga del sistema tramo III Descarga

Para poder determinar la curva del sistema correspondiente al tramo III, se deben identificar las pérdidas por descarga en el tramo, las cuales corresponden al siguiente sector:

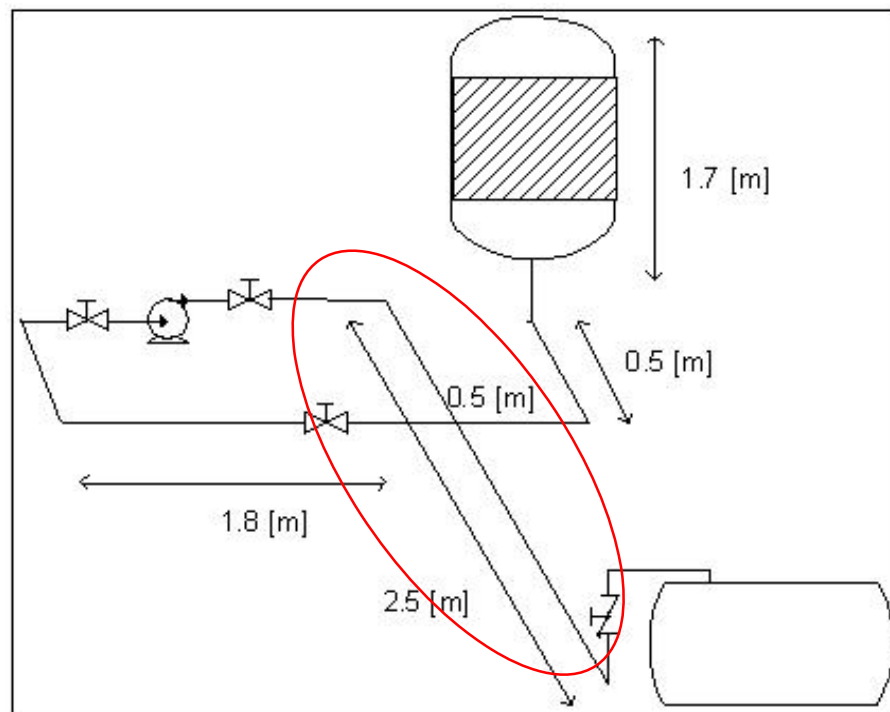


Figura 29: Sistema descarga tramo III

Descarga tramo 3		1/2"
Largo cañerías	16,40 [ft]	5,00 [m]
Válvula Check	4,00 [ft]	1,22 [m]
Válvula globo	15,00 [ft]	4,57 [m]
Codos 4	6,00 [ft]	1,83 [m]
Total	41,40 [ft]	12,62 [m]

Tabla 23: Largos equivalentes sistema descarga tramo 3

Luego se calculan los valores necesarios para encontrar el factor de Darcy,

Factor	Ecuación	Resultado
Rugosidad relativa	$R_r = 0,00015 / d_{desc\ arg\ a}$	0,00222552
Reynolds	$Re = \frac{\rho \cdot v_{desc\ arg\ a} \cdot d_{desc\ arg\ a}}{\mu}$	22300,8945
fd	tabla	0,029

Tabla 24: Cálculo factor Darcy sistema tramo 3

Finalmente se determina el hf de descarga por medio de la siguiente ecuación:

$$h_{f_{desc\ arg\ a}} = f_d \cdot \frac{\sum l_{eq} \cdot v_{real_{desc\ arg\ a}}^2}{d_{real_{desc\ arg\ a}} \cdot 2 \cdot g_c} + \frac{v_{real_{desc\ arg\ a}}^2}{2 \cdot g_c} \left[\frac{lbf \cdot ft}{lbm} \right]$$

[G.31]

$$h_{f_{desc\ arg\ a}} = 17.557 \left[\frac{lbf \cdot ft}{lbm} \right]$$

7.20.2 Pérdidas por succión de la bomba en tramo III: Recirculación

Al igual que para la descarga para poder determinar la curva del sistema correspondiente al tramo II, se deben identificar las pérdidas por succión en el tramo, las cuales corresponden a:

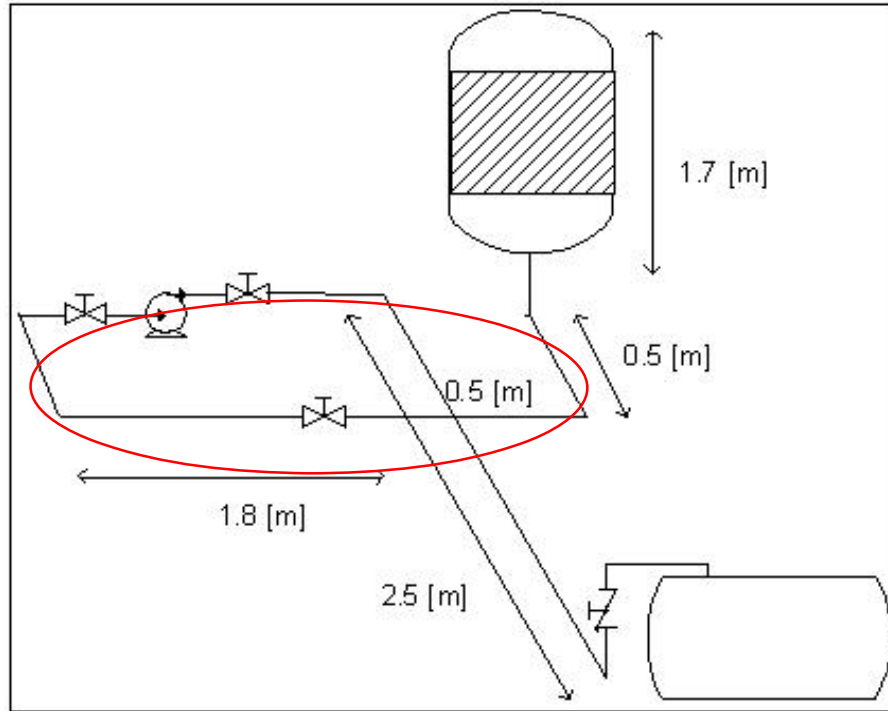


Figura 30: Sistema succión tramo 3: Recirculación

Succión tramo 2	3/4"		
Largo cañerías	14,11	[ft]	4,91 [m]
Válvula Compuerta	0,37	[ft]	0,13 [m]
Válvula globo	20,00	[ft]	6,96 [m]
Codos 4	7,20	[ft]	2,51 [m]
total	41,68	[ft]	14,50 [m]

Tabla 25: Largos equivalentes sistema succión tramo 3

Luego se calculan los valores necesarios para encontrar el factor de Darcy,

Factor	Ecuación	Resultado
Rugosidad relativa	$R_r = 0,00015 / d_{succión}$	0,00222552
Reynolds	$Re = \frac{\rho \cdot v_{succión} \cdot d_{succión}}{\mu}$	22300,8945
f_d	tabla	0,029

Tabla 26: Cálculo factor Darcy sistema tramo III

Finalmente se determina el h_f de descarga por medio de la siguiente ecuación:

$$h_{fsucción} = f_d \cdot \frac{\sum l_{eq} \cdot v_{realsucción}^2}{d_{realsucción} \cdot 2 \cdot g_c} \left[\frac{lbf \cdot ft}{lbm} \right]$$

$$h_{fsucción} = 6,1092 \left[\frac{lbf \cdot ft}{lbm} \right]$$

[G.32]

Con los valores obtenidos se puede desarrollar la ecuación de Bernoulli para conocer el trabajo de la bomba, el balance energético se desarrolla de la siguiente manera:

$$\frac{\Delta P}{\rho} + \frac{v^2}{2g_c} + \Delta z \cdot \frac{g}{g_c} = hf + W_b$$

[G.33]

7.20.3 Balance Energía tramo III: Descarga

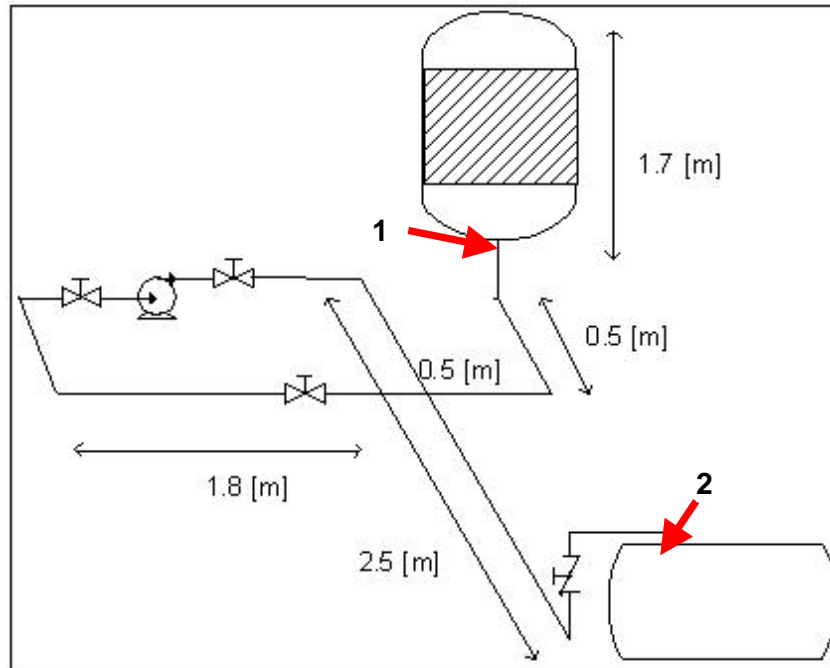


Figura 31: Puntos de Bernoulli sistema en tramo 2

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2g_c} + z_1 \cdot \frac{g}{g_c} = \frac{P_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2g_c} + z_2 \cdot \frac{g}{g_c} + hf_s + hf_d + W_{b3}$$

$$W_{b3} = \frac{P_2}{\rho} - \frac{P_1}{\rho} + \frac{v_2^2}{2g_c} - \frac{v_1^2}{2g_c} + z_2 \cdot \frac{g}{g_c} - z_1 \cdot \frac{g}{g_c} + hf_s + hf_d$$

$$W_{b3} = \frac{P_2}{\rho} - \frac{P_1}{\rho} + \frac{v_s^2}{2g_c} - \frac{v_d^2}{2g_c} + z_2 \cdot \frac{g}{g_c} - z_1 \cdot \frac{g}{g_c} + hf_s + hf_d \quad [G.34]$$

$$W_{b3} = \frac{\Delta P}{\rho} + \Delta \left(\frac{v^2}{2g_c} \right) + \Delta z \cdot \frac{g}{g_c} + hf_s + hf_d$$

$$\Delta(v^2) = v_s^2 - v_d^2$$

[G.35]

El balance de energía se realizara en los puntos indicados, los dos estanques están abiertos por medio de una válvula de venteo la cual mantiene los dos equipos a presión atmosférica por lo tanto el $\Delta P = 0$

Por lo tanto el trabajo de la bomba queda redefinido como:

$$W_{b3} = \Delta \left(\frac{v^2}{2g_c} \right) + \Delta z \cdot \frac{g}{g_c} + hf_s + hf_d \quad [G.36]$$

La potencia de la bomba esta dada por:

$$Potencia = \frac{-W_b \cdot \rho \cdot Q}{\eta} \quad [G.37]$$

Potencia 0,047 HP

Donde η corresponde a la eficiencia de la bomba

Curva característica del sistema esta dada por el balance de energía de este, y corresponde a:

$$H_{sist3} = \frac{v_s^2 - v_d^2}{2g_c} + \Delta z \cdot \frac{g}{g_c} + hf_s + hf_d \quad [G.38]$$

Considerando la ecuación de continuidad para

$$v_s^2 = \frac{Q^2}{A_s^2} \quad [G.39]$$

$$v_d^2 = \frac{Q^2}{A_d^2}$$

$$H_{sist2} = \frac{v_s^2 - v_d^2}{2g_c} + \Delta z \cdot \frac{g}{g_c} + hf_s + hf_d$$

$$H_{sist2} = \frac{Q^2}{2g_c \cdot \left(\pi \cdot \frac{d_s^2}{4}\right)^2} - \frac{Q^2}{2g_c \cdot \left(\pi \cdot \frac{d_d^2}{4}\right)^2} + \Delta z \cdot \frac{g}{g_c} + hf_s + hf$$

[G.40]

$$H_{sist2} = \frac{Q^2}{g_c \cdot \pi^2 \cdot \frac{d_s^4}{8}} - \frac{Q^2}{g_c \cdot \pi^2 \cdot \frac{d_d^4}{8}} + \Delta z \cdot \frac{g}{g_c} + hf_s + hf$$

$H_{sist2} = \frac{8 \cdot Q^2}{g_c \cdot \pi^2 \cdot d_s^4} - \frac{8 \cdot Q^2}{g_c \cdot \pi^2 \cdot d_d^4} + \Delta z \cdot \frac{g}{g_c} + hf_s + hf$	[G.41]
--	--------

Con esta expresión luego se grafica la curva del sistema para los diferentes caudales en el tramo 3: Descarga.

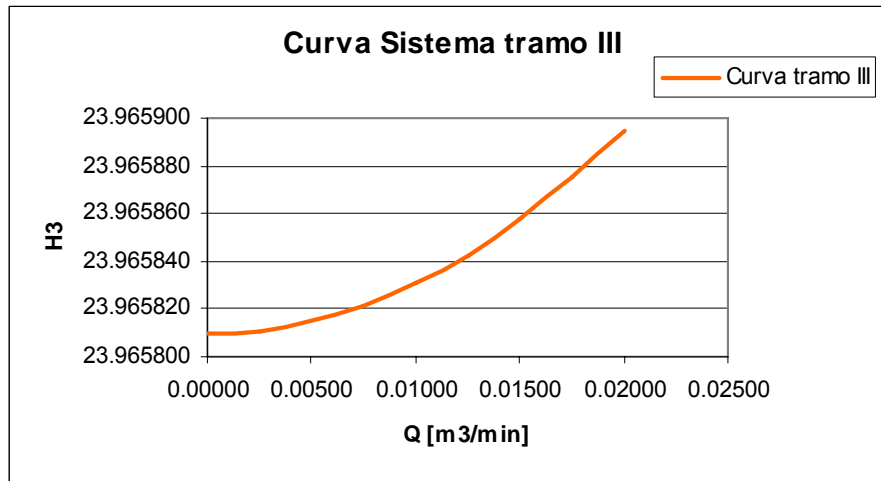


Figura 32: Curva de sistema tramo III

Q [m ³ /min]	H3
0,000	23,965810
0,003	23,965811
0,005	23,965815
0,008	23,965822
0,010	23,965831
0,013	23,965843
0,015	23,965858
0,018	23,965875
0,020	23,965895

Tabla 27: Datos curva de sistema tramo 3

8 DISEÑO MECÁNICO EQUIPOS SISTEMA PERCOLADOR

7.21 Diseño mecánico de estanque percolador

7.21.1 Cálculo de espesor

Para la determinación del espesor del equipo a utilizar se calculó por medio del modelo ASME el cual es válido para la relación espesor radio interno del equipo:

$$\frac{r_i}{t} > 5$$

Ri/t
116,020

El modelo ASME propone el cálculo del espesor según:

$$t = \frac{P \cdot r_i}{\sigma_{ADM} \cdot E - 0.6 \cdot P} \quad [H.1]$$

Luego al espesor calculado se le agrega un desgaste por corrosión y luego se realiza la estandarización al espesor comercial.

$t_{(asme)}$	0,448	[mm]
$t_{\text{corrosión}}$	3,000	[mm]
t	3,448	[mm]
$t_{\text{comercial}}$	4	[mm]

Tabla 28: Espesor estanque percolador

7.21.2 Cabezal tapa plana

Para este equipo se seleccionó un cabezal tipo tapa plana, este tipo de cabezal no tiene muy buena resistencia a las presiones, pero es más cómodo para poder destapar el reactor y así poder cargarlo con las plantas sin mayor problema.



Figura 33: Tapa plana

El cálculo del espesor se llevó a cabo por medio de:

$$t = d \cdot \sqrt{C \cdot \frac{P}{E \cdot \sigma_{adm}}} \quad [H.2]$$

Donde el C corresponde al factor de empalme a la carcaza, los cabezales serán apernados por lo tanto utilizando la tabla de factor C del Brownell.

Tipo Empalme a Carcaza	Curvatura (icr)	Pestaña	C
Soldado	No	No	0,25
Soldado	Si	Si/No	0,162
Apernado	Si	Si/No	0,162

Tabla 29: Factor C Apéndice H Brownell

Para el cabezal de tope se utiliza presión atmosférica, pero para el de fondo, se debe considerar la presión que ejercería la carga si el equipo estuviese en el caso más crítico que sería lleno de líquido.

$$P_{tope} = P_{atm} \quad [H.3]$$

$$P_{fondo} = \rho \cdot g \cdot h$$

P _{tope}	1,157	[bar]	115,7	[kpa]
P _{fondo}	1,304	[bar]	130,4	[kpa]
E	0,6			
C _{apernado}	0,162			

Tabla 30: Presiones en el estanque

Finalmente se realiza la correspondiente suma del valor al gasto por corrosión y su estandarización al ancho comercial.

t _{tope}	12,434	[mm]
t _{fondo}	13,200	[mm]
t _{tope}	12,434	[mm]
t _{cab} = t + c	12,436	[mm]
t_{comercial tope}	14	[mm]
t _{fondo}	13.201	[mm]
t _{cab} = t + c	14.201	[mm]
t_{comercial fondo}	16.000	[mm]

Tabla 31: Espesores cabezales estanque percolador

7.21.3 Cálculos de esfuerzos en el reactor

Los esfuerzos calculados fueron los siguientes:

- Presión Interna

$$F_x = \frac{P_i \cdot d_o}{t_c} \quad [H.4]$$

F _x	233,714	Bar
----------------	---------	-----

Carcaza (lineal)

$$w_c = \pi(r_o^2 - r_i^2) \cdot \rho_{acero} \cdot g \cdot x \quad [H.5]$$

$$F_c = \frac{w_c}{A_e}$$

F _c	0,769	x	+0	Bar
----------------	-------	---	----	-----

Cabezal tapa plana (carga puntual)

$$A_e = \pi \left(\frac{d_{externo}}{4} \right)^2 \quad [H.6]$$

$$w_{cab} = A_e \cdot t \cdot \rho_{acero} \cdot g$$

$$F_{cab} = \frac{w_{cab}}{A_e}$$

F _{cab}	2,133	Bar
------------------	-------	-----

- **Pesos Muertos**

Escala (lineal)

$$w_{esc} = \rho_{escala} \cdot g \cdot x \quad [H.7]$$

W_{escala}	147 x	N
--------------	-------	---

Líquido en estanque

$$w_{liq} = \pi \cdot r_i^2 \cdot H \quad [H.8]$$

W_{carga}	3694,513	N
-------------	----------	---

Línea cañerías:

	DN (in)	DN mm	ρ (kg/m)
línea alimentación	1,5		4,05
línea fondo	1,25		3,39

Tabla 32: Diámetros líneas de cañerías

$$w_{lineas} = (\rho_{alimentacion} + \rho_{fondo}) \cdot g \quad [H.9]$$

W_{lineas}	72,912 x	N
--------------	----------	---

Filtros y carga sobre filtros:

$$a_{\text{filtros}} = \pi \cdot r_i^2$$

$$w_{\text{filtros}} = a_{\text{filtros}} \cdot \rho_{\text{filtro}} \cdot \text{Numero} \cdot g \quad [H.10]$$

$$w_{\text{hojas}} = V_{\text{ocupado}} \cdot \rho_{\text{hojas}} \cdot g \quad [H.11]$$

W Filtros	295,561	N
-----------	---------	---

W Hojas	517,232	N
---------	---------	---

Anillos soporte filtros:

$$\text{Perímetro} = \pi \cdot d_i \quad [H.12]$$

$$w_{\text{soportes}} = \text{perímetro} \cdot \text{numero} \cdot \rho_{\text{anillos}} \cdot g \quad [H.13]$$

W anillos	178,814	N
-----------	---------	---

Esfuerzos pesos muertos:

$$F_{pm} = \frac{\sum w_{\text{lineales}} \cdot x + \sum w_{\text{puntuales}}}{A_e} \quad [H.14]$$

W total pm	997,164	x +	8626,441	N
F total pm	1,636	x +	33,984	Bar

- **Esfuerzos por vientos**

$$P_w = \frac{0.004}{30} \cdot P_{atm} \cdot v_w^2 \cdot F_s \cdot F_h$$

$$d_{ew} = d_0 + 2 \cdot t_{ais} + d_{lineal}$$

[H.15]

$$area_{esfuerzo} = 2 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot t_c$$

$$F_w = \frac{P_w \cdot d_{ew}}{area_{esfuerzo}} \cdot x^2$$

[H.16]

Con las siguientes constantes:

B =	551,000	[mmHg]
	21,693	[inHg]
V _w	100,000	[Km/h]
	54,054	[Nudos]
F _s	0,6	
F _h	2,187	
D _{ef}	822,700	[mm]

Tabla 32: Constantes para esfuerzo viento

Los esfuerzos calculados por vientos son los siguientes:

F _w	424962,664	x ²	[pa]
F _w	4,250	x ²	[bar]

- **Esfuerzo por sismo**

$$T = \sqrt{\frac{W_{\text{masa lineal}} \cdot h_{\text{total}}^4}{E \cdot r_0^3 \cdot t_c}} \quad [H.17]$$

$$F_s = \frac{W_{\text{peso total}} \cdot C}{\pi \cdot r_0 \cdot t_c \cdot h_{\text{total}}^2} \cdot \left(h_{\text{total}} - \frac{x}{3} \right) \cdot x^3$$

Con las siguientes constantes:

h	1,500	[m]
r ₀	0,404	
W _{(peso)total cargado}	6969,043	[N]
W _{masa lineal}	474,085	[Kg/m]
E	30000000,000	[psi]
	2068965,517	[bar]
	206896551724,138	[pa]
C	0,2	
W [*] _{masa total}	711,127	[Kg]

W^{*}_{masa total}: Cuando dice masa total de equipo, esta considerando el caso en que el equipo esta cargado de solución y hojas.

Tabla 33: constantes para esfuerzo sismo

El esfuerzo de sismo calculado es el siguiente:

F _s =	-4,027	x ³ +	18,122	x ²	[bar]
F _{s máx.} =	27,183	[bar]			

Luego para la determinación de esfuerzo controlante se evalúa cada una de las expresiones en el $x = h$ para saber cuál es más importante. Para este caso particular el **esfuerzo controlante resulta ser el sismo.**

Determinación Esfuerzo Controlante			
			(x = h)
Sismo	F_s	27,183	[bar]
Viento	F_w	9,562	[bar]

Tabla 34: Determinación esfuerzo controlante

7.21.4 Análisis esfuerzos en equipo percolador

- Análisis equipo operando

Si es realizado al lado a favor del sismo:

$F_{\text{tensión}} =$	F_s	$+ F_x - F_{pm}$
F_{adm}	1293,103	[bar]
E	0,8	
$F_{\text{tensión}}$	1034,483	[bar]

Tabla 35: Determinación esfuerzo controlante

Reemplazando la expresión se llega a:

$$F \text{ tensión} = -4,027 x^3 + 18,122 x^2 + -1,636 x + 214.285 \text{ [bar]}$$

x [m]	F [bar]	F máx. tensión [bar]
0,000	214,285	1034,483
0,100	214,450	1034,483
0,200	214,944	1034,483
0,300	215,769	1034,483
0,400	216,923	1034,483
0,500	218,406	1034,483
0,600	220,220	1034,483
0,700	222,363	1034,483
0,800	224,836	1034,483
0,900	227,638	1034,483
1,000	230,771	1034,483
1,100	234,233	1034,483
1,200	238,025	1034,483
1,300	242,146	1034,483
1,400	246,597	1034,483
1,500	251,378	1034,483
1,600	256,489	1034,483
1,700	261,930	1034,483
1,800	267,700	1034,483

Tabla 36: Tensión equipo percolador operando

*A los 1,5 m del equipo aún resiste para mantenerse erguido.

Si es realizado al lado contrario del sismo equipo operando:

$F = -F_s + F_x - F_{pm}$	[bar]
F_{adm}	3712,881 [psi]
$F_{compresión}$	-255,923 [bar]
E	0,8
$F_{compresión}$	-217,534 [bar]

Reemplazando la expresión se llega a:

$$F_{compresión} = 4,027 x^3 + -18,122 x^2 + -1,636 x + -19,429 \text{ [bar]}$$

X [m]	F [bar]	F máx. tensión [bar]
0,000	214,285	-217,534
0,100	213,940	-217,534
0,200	213,233	-217,534
0,300	212,163	-217,534
0,400	210,731	-217,534
0,500	208,937	-217,534
0,600	206,780	-217,534
0,700	204,260	-217,534
0,800	201,378	-217,534
0,900	198,134	-217,534
1,000	194,527	-217,534
1,100	190,558	-217,534
1,200	186,227	-217,534
1,300	181,533	-217,534
1,400	176,476	-217,534
1,500	171,057	-217,534
1,600	165,276	-217,534
1,700	159,132	-217,534
1,800	152,626	-217,534

Tabla 37: Compresión equipo percolador operando

*A los 1,5 m del equipo aún resiste lo necesario para mantenerse erguido.

Luego los resultados son graficados a continuación:

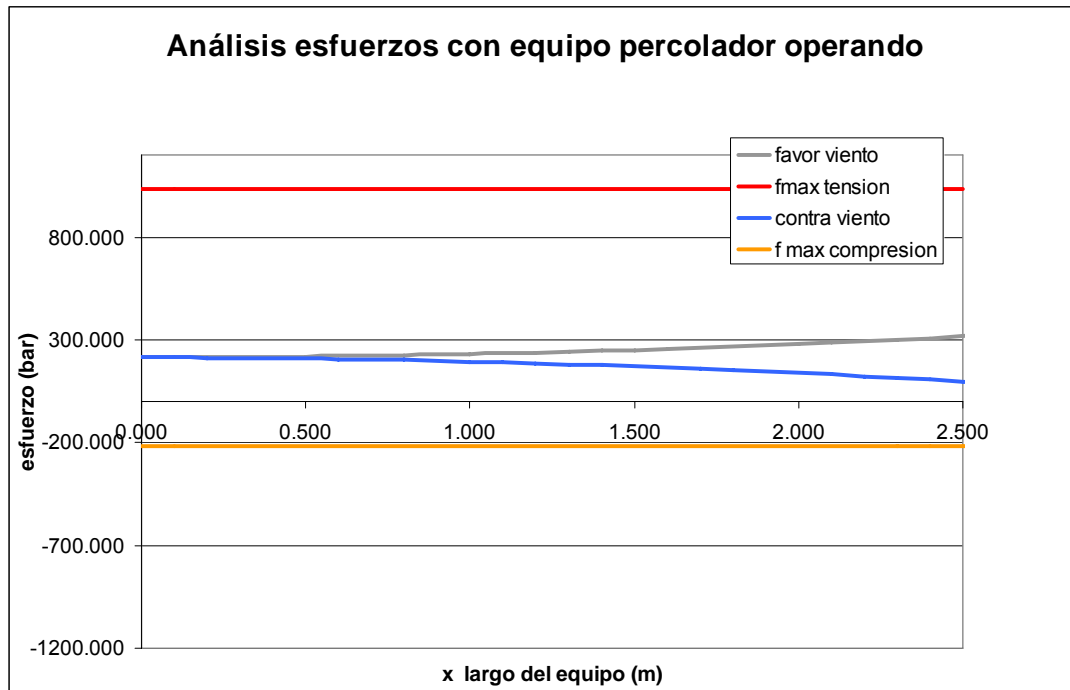


Figura 34: Gráfico análisis esfuerzos equipo percolador operando

- **Análisis equipo sin operar**

Si es realizado al lado a favor del sismo:

$F_{\text{tensión}} =$	F_s	$- F_{pm}$
F_{adm}	1293,103	[bar]
E	0,8	
$F_{\text{tensión}}$	1034,483	[bar]

Reemplazando la expresión se llega a:

$$F_{\text{tensión}} = -4,027 x^3 + 18,122 x^2 + -1,636 x + -19,429 \text{ [bar]}$$

x [m]	F [bar]	F máx. tensión [bar]
0,000	-19,429	1034,483
0,100	-19,412	1034,483
0,200	-19,031	1034,483
0,300	-18,289	1034,483
0,400	-17,184	1034,483
0,500	-15,717	1034,483
0,600	-13,887	1034,483
0,700	-11,695	1034,483
0,800	-9,140	1034,483
0,900	-6,223	1034,483
1,000	-2,943	1034,483
1,100	0,699	1034,483
1,200	4,703	1034,483
1,300	9,070	1034,483
1,400	13,799	1034,483
1,500	18,891	1034,483
1,600	24,345	1034,483
1,700	30,162	1034,483
1,800	36,341	1034,483

Tabla 38: Tensión equipo percolador operando

*A los 1,5 m del equipo aún resiste y se mantiene erguido.

Si es realizado al lado contrario del sismo equipo sin operar:

$F = -F_s - F_{pm}$	[bar]
F_{adm}	3712,881 [psi]
$F_{compresión}$	-255,923 [bar]
E	0,8
$F_{compresión}$	-217,534 [bar]

Reemplazando la expresión se llega a:

$$F_{\text{compresión}} = 4,027 x^3 - 18,122 x^2 + -1,636 x + -93,938 \text{ [bar]}$$

x [m]	F [bar]	F máx. tensión [bar]
0,000	214,285	-217,534
0,100	213,940	-217,534
0,200	213,233	-217,534
0,300	212,163	-217,534
0,400	210,731	-217,534
0,500	208,937	-217,534
0,600	206,780	-217,534
0,700	204,260	-217,534
0,800	201,378	-217,534
0,900	198,134	-217,534
1,000	194,527	-217,534
1,100	190,558	-217,534
1,200	186,227	-217,534
1,300	181,533	-217,534
1,400	176,476	-217,534
1,500	171,057	-217,534
1,600	165,276	-217,534
1,700	159,132	-217,534
1,800	152,626	-217,534

Tabla 39: Compresión equipo percolador operando

*A los 1,5 m del equipo aún resiste y se mantiene erguido.

Luego los resultados son graficados para mejor representación:

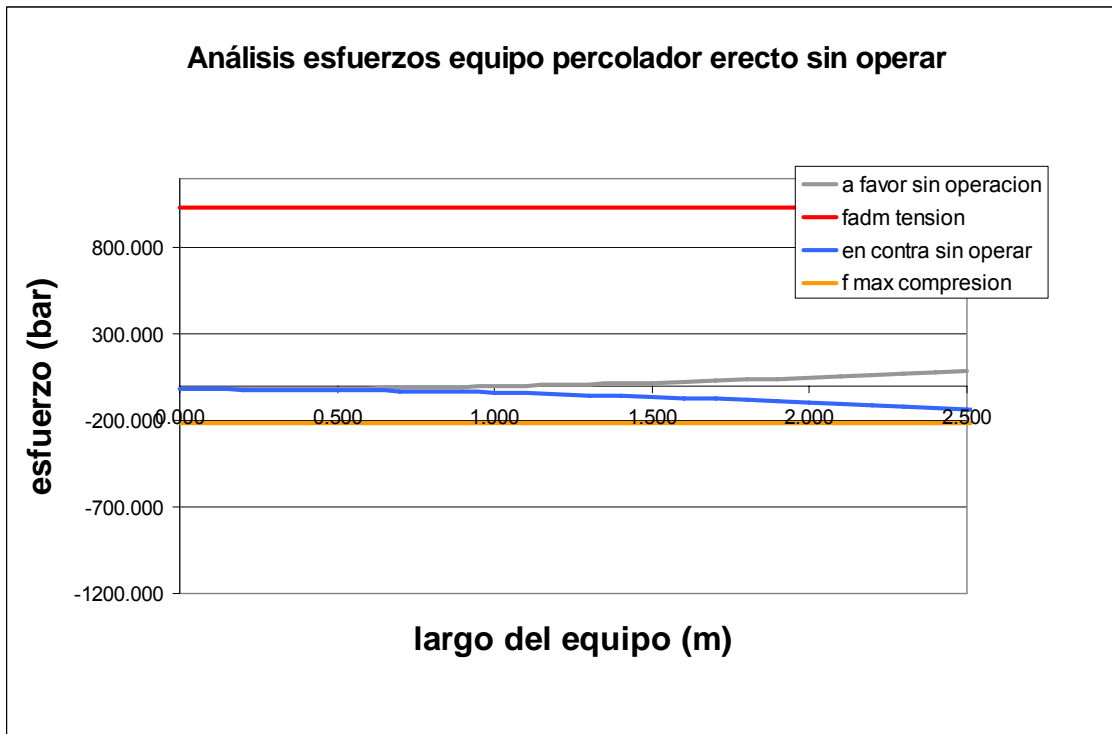


Figura 35: Gráfico análisis esfuerzos equipo percolador operando

7.22 Diseño los estanques de estanque alimentación HNO₃ y receptor solución

Los estanques a utilizar como alimentador y receptor tienen las mismas dimensiones, por lo que los valores calculados son en común para los dos.

7.22.1 Cálculo de espesor

Para la determinación del espesor del equipo a utilizar se calculó por medio del modelo ASME el cual es válido para la relación espesor radio interno del equipo:

$$\frac{r_i}{t} > 5$$

El modelo ASME propone el cálculo según:

$$t = \frac{P \cdot r_i}{\sigma_{ADM} \cdot E - 0.6 \cdot P} \quad [H.18]$$

Luego al espesor calculado se le agrega un desgaste por corrosión y finalmente la estandarización comercial.

t _(asme)	0,500	[mm]
t _{corrosión}	2,000	[mm]
t	2,500	[mm]
t comercial	3,000	[mm]
t _c	1,000	[mm]

Tabla 40: Espesor estanques

7.22.2 Cabezales toriesféricos

Por ser uno de los más utilizados, y básicamente su resistencia a esfuerzos sobre su superficie, junto con el costo moderado y la facilidad de construcción se seleccionó el cabezal tipo toriesférico.

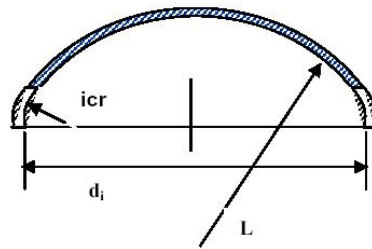


Figura 36: Cabezal Toriesférico

Para el cabezal se seleccionó el L como el diámetro interno del equipo y el icr o radio de curvatura de pestaña más común de 100 [mm].

$$t = \frac{P \cdot L \cdot M}{2 \cdot \sigma_{ADM} \cdot E - 0.2 \cdot P} \quad [H.19]$$

Con:

$$M = \frac{1}{4} \cdot \left(3 + \sqrt{\frac{L}{icr}} \right) \quad [H.20]$$

M 1,541

suposiciones		
L = Din	1000	[mm]
icr	100	[mm]
L/icr	10	

Tabla 41: Constantes para el cabezal

Con la correspondiente suma del valor al gasto por corrosión y su estandarización al ancho comercial.

t	0,770	[mm]
t _{cab} = t + c	2,770	[mm]
t_{comercial}	3	[mm]
t _c	0,001	[mm]

Tabla 42: Espesores cabezales

7.22.3 Cálculos de esfuerzos en equipos alimentación HNO₃ y receptor de solución ácida

Los esfuerzos calculados fueron los siguientes:

- **Presión Interna**

$$F_x = \frac{P_i \cdot d_o}{t_c} \quad [H.21]$$

Fx 260,177 [bar]

Carcaza (lineal)

$$w_c = \pi(r_o^2 - r_i^2) \cdot \rho_{acero} \cdot g \cdot x \quad [H.22]$$

$$F_c = \frac{w_c}{A_e}$$

$$F_c = 0,769 \cdot x + 0 \text{ [bar]}$$

Cabezales toriesféricos (carga puntual)

$$d_{eq} = S_f + \frac{S_f}{42} + 2 \cdot S_f + \frac{2}{3} \cdot icr$$

$$A_e = \pi(d_{eq})^2 \quad [H.23]$$

$$w_{cab} = A_e \cdot t \cdot \rho_{acero} \cdot g$$

[H.24]

$$F_{cab} = \frac{w_{cab}}{A_e}$$

[H.25]

Área Cabezal	1,152	[m ²]
D _{eq}	1210,919	[mm]
D _{eq}	1,211	[m]
W _{cab}	265,789	[N]
F _{cab}	84098,691	[pa]
F _{cab}	0,841	[bar]

Tabla 43: Constantes para esfuerzo viento

- **Pesos Muertos**

En estanque cargado con el de líquido:

$$w_{liq} = \pi \cdot r_i^2 \cdot \frac{H}{2} \quad [H.26]$$

Línea cañerías:

	DN [in]	ρ [kg/m]
Línea alimentación	0,500	4,050
Línea fondo	0,750	3,390

Tabla 44: Cañerías en estanques

$$w_{lineas} = (\rho_{alimentacion} + \rho_{fondo}) \cdot g \quad [H.27]$$

w líneas	72,912	x	[N]
----------	--------	---	-----

Esfuerzos pesos muertos:

$$F_{pm} = \frac{\sum w_{lineales} \cdot x + \sum w_{puntuales}}{A_e} \quad [H.28]$$

W _{totalpm}	800,135	x +	4114,240	[N]
F _{totalpm}	1,000	x +	13,018	[bar]

- **Esfuerzos por vientos**

$$P_w = \frac{0.004}{30} \cdot P_{atm} \cdot v_w^2 \cdot F_s \cdot F_h$$

$$d_{ew} = d_0 + 2 \cdot t_{ais} + d_{lineal}$$

[H.29]

$$area_{esfuerzo} = 2 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot t_c$$

$$F_w = \frac{P_w \cdot d_{ew}}{area_{esfuerzo}} \cdot x^2$$

[H.30]

B =	551,000	[mmHg]
	21,693	[inHg]
V _w	100	[Km/h]
	54,054	[Nudos]
F _s	0,6	
F _h	2,187	
D _{ef}	1018,700	[mm]
	1,019	[m]

Tabla 45: Constantes esfuerzo viento

P _w	11,091	[lb/pie ²]
	0,077	[psi]
	531,018	[Pa]
F _w	340282,339	x ² [pa]
F _w	3,403	x ² [bar]
F _{wmax}	0,851	[bar]

Tabla 46: Esfuerzo viento

- **Esfuerzo por sismo**

$$T = \sqrt{\frac{W_{\text{masa lineal}} \cdot h_{\text{total}}^4}{E \cdot r_0^3 \cdot t_c}} \quad [H.31]$$

$$F_s = \frac{W_{\text{peso total}} \cdot C}{\pi \cdot r_0 \cdot t_c \cdot h_{\text{total}}^2} \cdot \left(h_{\text{total}} - \frac{x}{3} \right) \cdot x^3 \quad [H.32]$$

H	0,500	[m]
r _o	0,503	
W _{(peso)total}	4780,097	[N]
W _{masa lineal}	975,530	[Kg/m]
E	30000000	[psi]
	2068965,517	[bar]
	206896551724,138	[pa]
C	0,2	
W _{masa total}	487,765	[Kg]

Tabla 47: Constantes esfuerzo sismo

El esfuerzo de sismo calculado es el siguiente:

F _s =	-16,037	x ³ +	24,055	x ²	[bar]
F _{s máx.} =	4,009				[bar]

Luego para la determinación de esfuerzo controlante se evaluó cada una de las expresiones en el $x = h$ para saber cuál es más importante.

Resultando ser **controlante el sismo**.

Esfuerzo Controlante		($x = h$)
Sismo	F_s	4,009 [bar]
Viento	F_w	0,851 [bar]

Tabla 48: Determinación esfuerzo controlante

7.22.4 Análisis esfuerzos en equipos alimentación HNO_3 y receptor de solución ácida

- Análisis equipos operando

Si es realizado al lado a favor del sismo:

$F_{\text{tensión}} =$	F_s	$+ F_x - F_{pm}$
F_{adm}	1293,103	[bar]
E	0,800	
$F_{\text{tensión}}$	1034,483	[bar]

Reemplazando la expresión se llega a:

$$F_{\text{tensión}} = -16,037 x^3 + 24,055 X^2 + -1,000 x + 247,159 \text{ [bar]}$$

X [m]	F [bar]	F máx. tensión [bar]
0.000	247.159	1034.483
0.100	247.389	1034.483
0.200	248.081	1034.483
0.300	249.234	1034.483
0.400	250.848	1034.483
0.500	252.923	1034.483
0.600	255.459	1034.483
0.700	258.456	1034.483
0.800	261.914	1034.483
0.900	265.834	1034.483
1.000	270.214	1034.483
1.100	275.056	1034.483
1.200	280.358	1034.483
1.300	286.122	1034.483
1.400	292.347	1034.483
1.500	299.033	1034.483
1.600	306.180	1034.483
1.700	313.789	1034.483
1.800	321.858	1034.483

Tabla 49: Tensión equipo percolador operando

*A los 1, 5m del equipo aún resiste y se mantiene erguido.

Si es realizado al lado contrario del sismo equipo operando:

$F = -F_s + F_x - F_{pm}$	[bar]
F_{adm}	2982,107 [psi]
$F_{compresión}$	-205,552 [bar]
E	0,8
$F_{compresión}$	-174,720 [bar]

Reemplazando la expresión se llega a:

$$F_{compresión} = 16,037 x^3 + -24,055 x^2 + -1,000 X + 247,159 \text{ [bar]}$$

x [m]	F [bar]	F máx. tensión [bar]
0.000	247.159	-174.720
0.100	246.818	-174.720
0.200	245.997	-174.720
0.300	244.694	-174.720
0.400	242.910	-174.720
0.500	240.645	-174.720
0.600	237.899	-174.720
0.700	234.672	-174.720
0.800	230.963	-174.720
0.900	226.774	-174.720
1.000	222.104	-174.720
1.100	216.952	-174.720
1.200	211.319	-174.720
1.300	205.205	-174.720
1.400	198.610	-174.720
1.500	191.534	-174.720
1.600	183.977	-174.720
1.700	175.939	-174.720
1.800	167.420	-174.720

Tabla 50: Compresión equipo percolador operando

*A los 1,5m del equipo aún resiste y se mantiene erguido.

Luego los resultados son graficados para mejor representación:

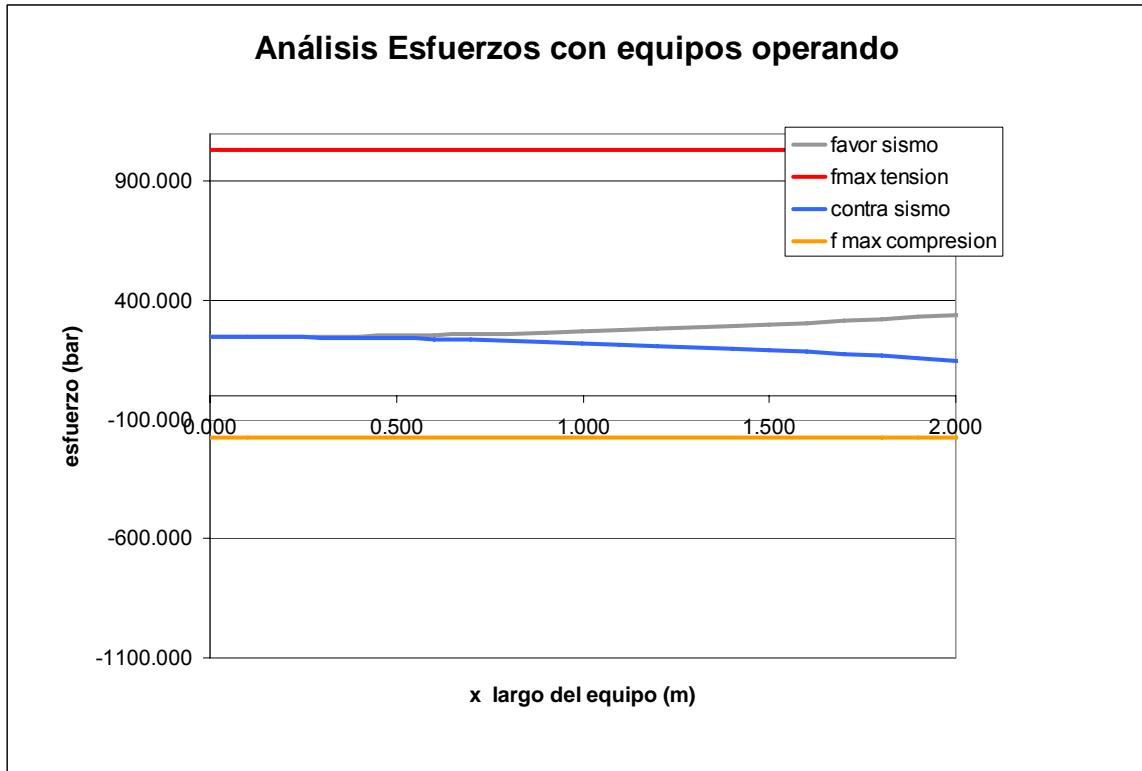


Figura 37: Gráfico análisis esfuerzos equipo percolador operando

- **Análisis equipo sin operar**

Si es realizado al lado a favor del sismo:

$F_{\text{tensión}} =$	F_s	$- F_{pm}$
F_{adm}	1293,103	[bar]
E	0,800	
$F_{\text{tensión}}$	1034,483	[bar]

Reemplazando la expresión se llega a:

$$F_{\text{tensión}} = -16,037 x^3 + 24,055 x^2 + -1,000 x + -13,018 \text{ [bar]}$$

x [m]	F [bar]	F máx. tensión [bar]
0.000	-13.018	1034.483
0.100	-12.877	1034.483
0.200	-12.256	1034.483
0.300	-11.153	1034.483
0.400	-9.569	1034.483
0.500	-7.504	1034.483
0.600	-4.958	1034.483
0.700	-1.931	1034.483
0.800	1.577	1034.483
0.900	5.567	1034.483
1.000	10.037	1034.483
1.100	14.989	1034.483
1.200	20.422	1034.483
1.300	26.336	1034.483
1.400	32.730	1034.483
1.500	39.607	1034.483
1.600	46.964	1034.483
1.700	54.802	1034.483
1.800	63.121	1034.483

Tabla 51 Tensión equipo percolador operando

*A los 1,5 m del equipo resiste y se mantiene erguido.

Si es realizado al lado contrario del sismo equipo sin operar:

$F = -F_s + F_x - F_{pm}$	[bar]
F_{adm}	2982,107 [psi]
$F_{\text{compresión}}$	-205,552 [bar]
E	0,8
$F_{\text{compresión}}$	-174,720 [bar]

Reemplazando la expresión se llega a:

$$F_{\text{compresión}} = 16,037 x^3 - 24,055 X^2 + -1,000 x + -13,018 \text{ [bar]}$$

X [m]	F [bar]	F máx. tensión [bar]
0.000	-13.018	-174.720
0.100	-13.358	-174.720
0.200	-14.180	-174.720
0.300	-15.483	-174.720
0.400	-17.267	-174.720
0.500	-19.532	-174.720
0.600	-22.278	-174.720
0.700	-25.505	-174.720
0.800	-29.213	-174.720
0.900	-33.403	-174.720
1.000	-38.073	-174.720
1.100	-43.225	-174.720
1.200	-48.858	-174.720
1.300	-54.971	-174.720
1.400	-61.566	-174.720
1.500	-68.642	-174.720
1.600	-76.200	-174.720
1.700	-84.238	-174.720
1.800	-92.757	-174.720

Tabla 52: Compresión equipo percolador operando

*A los 1,5m del equipo resiste y se mantiene erguido.

Luego los resultados son graficados para mejor representación:

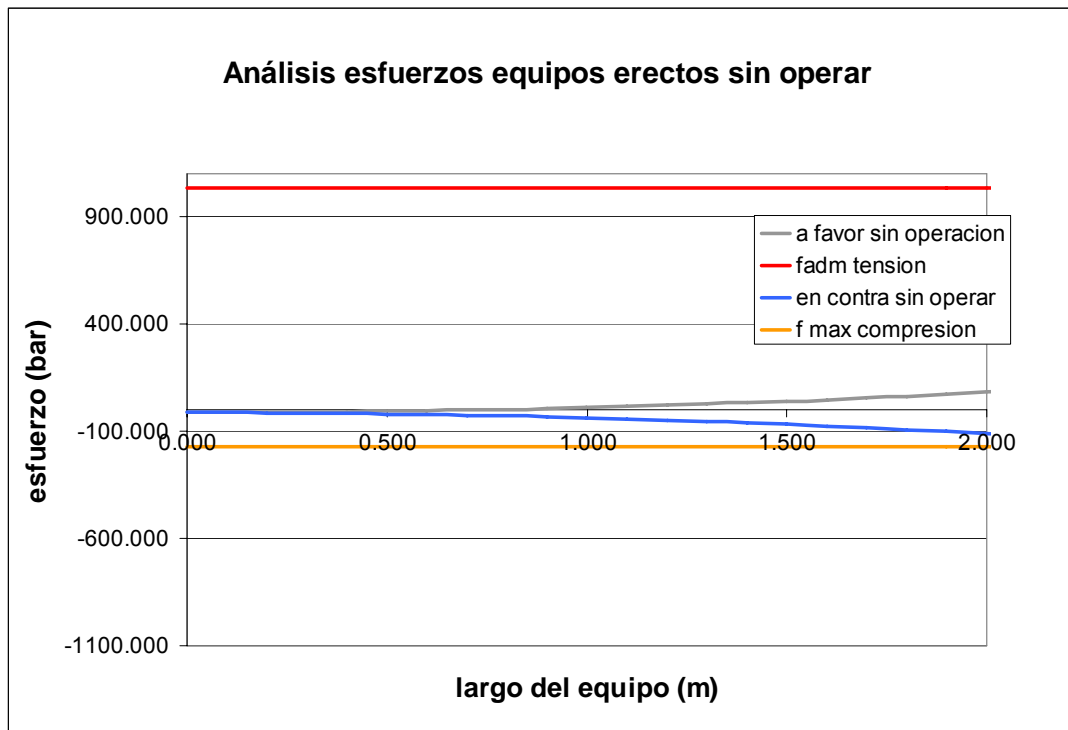


Figura 38: Gráfico análisis esfuerzos equipo percolador operando

9 Datos reacción lixiviación

A continuación se presentan las tablas con la que muestran los valores de la entalpía entropía y delta G junto con los K de formación, datos necesarios para el diseño de los reactores.

1O2(g) + 2As + 6HNO3 = 2H3AsO4(a) + 6NO2(g)					
T	deltaH	deltaS	deltaG	K	Log(K)
C	kcal	cal/K	kcal		
25,000	-132,646	143,115	-175,316	3,315E+128	128,521
30,000	-133,006	141,916	-176,028	8,214E+126	126,915
35,000	-133,369	140,730	-176,735	2,272E+125	125,356
40,000	-133,732	139,560	-177,436	6,982E+123	123,844
45,000	-134,096	138,408	-178,131	2,372E+122	122,375
50,000	-134,459	137,276	-178,820	8,866E+120	120,948
55,000	-134,821	136,163	-179,503	3,632E+119	119,560
60,000	-135,183	135,069	-180,181	1,624E+118	118,211
65,000	-135,544	133,994	-180,854	7,898E+116	116,898
70,000	-135,902	132,942	-181,521	4,162E+115	115,619
75,000	-136,259	131,910	-182,184	2,368E+114	114,374
80,000	-136,613	130,900	-182,841	1,451E+113	113,162
85,000	-136,965	129,911	-183,493	9,547E+111	111,980
90,000	-137,314	128,943	-184,140	6,723E+110	110,828
95,000	-137,660	127,997	-184,782	5,055E+109	109,704
100,000	-138,003	127,071	-185,420	4,048E+108	108,607
Formula	FM	Conc.	Amount	Amount	Volume
	g/mol	wt-%	mol	g	l or ml
O2(g)	31,999	5,715	1,000	31,999	22,414
As	74,922	26,762	2,000	149,843	26,060
HNO3	63,013	67,524	6,000	378,077	243,921
	g/mol	wt-%	mol	g	l or ml
H3AsO4(a)	141,943	50,701	2,000	283,886	0,000
NO2(g)	46,006	49,299	6,000	276,033	134,482

Tabla 53: Constantes y características reacción disolución del arsénico en reactor HSC

"Fitoremediación de Zonas de Transferencia de Polvos contaminadas con arsénico por medio del uso del helecho *Pteris Vittata*" Codelco Norte Chuquicamata.

10 Cinética de reacción

Con el fin de poder conocer los tiempos de reacción para el proceso de recuperación de arsénico desde la composta vegetal, se realizó una simulación programada de la cinética química de la reacción de lixiviación.

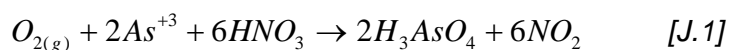
Planteamiento del modelo para el reactor percolador con reacción⁵⁰.

Constantes y parámetros de la reacción

Parámetros de la reacción	Símbolo	Valor	Unidad	Referencia
Factor pre exponencial	k_o	353,23	[l ⁸ /mol ⁸ min]	Estimación desde Patente ⁵¹
Energía de activación	E	8000	[cal/mol]	ΔEnergía Gibbs Anexo I
Entalpía de reacción	D _{Hrx}	-175,316	[cal/mol de As]	Δ Entalpía Anexo I

Tabla 54: Parámetros de la reacción de disolución de arsénico

Para la reacción:



⁵⁰ J.M Smith. Ingeniería de la cinética Química traducido por Ingeniero Químico Antonio Eroles 3ra edición Mc graw Hill México 1991 Capítulo 2: Cinética Química.

⁵¹ Nicholas P Greco "Process of preparation arsenic acid" US 4,769,230 Sep 6 1988

*Fitoremediación de Zonas de Transferencia de Polvos contaminadas con arsénico por medio del uso del helecho Pteris Vittata" Codelco Norte Chuquicamata.

Las variables utilizadas para el desarrollo de la cinética química son:

Variable	Unidad	Descripción
cam	M	Concentración molar HNO_3 en el tiempo
cbm	M	Concentración molar As en el tiempo
ccm	M	Concentración molar H_3AsO_4 en el tiempo
cdm	M	Concentración molar NO_2 en el tiempo
FA	$\left[\frac{l}{h}\right]$	Flujo alimentación solución HNO_3
cao	$\left[\frac{g}{l}\right]$	Concentración HNO_3
Ma	$\left[\frac{g}{gmol}\right]$	Peso molecular HNO_3
Tr	K	Temperatura en el reactor
V	$[l]$	Volumen
k_o	$[l^8/mol^8min]$	Factor preexponencial ecuación Arrhenius
E	$\left[\frac{cal}{mol}\right]$	Energía activación reacción lixiviación
R	$\left[\frac{cal}{min K}\right]$	Constante universal de los gases (1,987)
T	K	Temperatura
UA	$\left[\frac{cal}{min K}\right]$	Transferencia calor reactor
Hrx	$\left[\frac{cal}{mol b}\right]$	Entalpía de reacción por mol de arsénico
Tao	K	Temperatura alimentación HNO_3
cpr		cp ponderado en el reactor
n_{total}		Moles totales en reactor

Tabla 55: variables presentes en el desarrollo cinética química

La constante de cinética química según Arrhenius:

$$k(T) = k_0 \cdot e^{-E/(R \cdot (T + 273))} \quad [J.2]$$

Balance de masa para HNO_3

$$\left(FA \cdot \frac{C_{ao}}{Ma} \cdot -6 \cdot k(T) \cdot ccm^6 \cdot cbm^2 \cdot V \right) = \frac{d(V \cdot cam)}{dt} \quad [J.3]$$

Balance de masa para As

$$-2 \cdot k(T) \cdot ccm^6 \cdot cbm^2 \cdot V = \frac{d(V \cdot cbm)}{dt} \quad [J.4]$$

Balance de masa para H_3AsO_4

$$2 \cdot k(T) \cdot ccm^6 \cdot cbm^2 \cdot V = \frac{d(V \cdot ccm)}{dt} \quad [J.4]$$

Balance de masa para NO_2

$$6 \cdot k(T) \cdot ccm^6 \cdot cbm^2 \cdot V = \frac{d(V \cdot ccm)}{dt} \quad [J.5]$$

Haciendo el siguiente balance de energía en el reactor⁵²

$$FA(\text{moles}) \cdot C_{pFA} \cdot T_{ao} - UA \cdot T_r + \Delta H_{rx} \cdot k(T) \cdot c_{cm}^6 \cdot cbm^2 \cdot V = \frac{d(T \cdot C_{pr} \cdot n_{total} \cdot V)}{dt} \quad [J.6]$$

7.23 Datos entrada cálculo de reacción

Parámetros del reactor	Valor	Unidad
Altura total	1,5	[m]
Diámetro	0,8	[m]
Producto U*A	2500	[cal/(min*°K)]
Parámetros de operación	Valor	Unidad
Concentración HNO3 en FA	1,3	[g/l]
Temperatura de FA	25	°C
Parámetros de la reacción	Valor	Unidad
Factor pre exponencial	353,23	
Energía de activación	8000	[cal/mol]
Entalpía de reacción	-175,316	[cal/mol de As]
Calores específicos a 273°K	Valor	Unidad
HNO ₃	0,231	[cal/mol °K]
As	5,867	[cal/mol °K]
H ₃ AsO ₄	41,638	[cal/mol °K]
Agua	1,026	[cal/mol °K]
Condiciones al arrancar	Valor	Unidad
HNO ₃	0	[g/l]
As	203,58	[g/l]
H ₃ AsO ₄	0	[g/l]
Temperatura en el reactor	25	°C

Tabla 56: Datos entrada cálculo cinética de reacción

⁵² Octave Levenspiel Ingeniería de las reacciones Químicas traducido por Gabriel Tojo Barreiro 2da edición Editorial Reverté Barcelona 1996 Reactor Ideal Discontinuo p108-110.

"Fitoremediación de Zonas de Transferencia de Polvos contaminadas con arsénico por medio del uso del helecho Pteris Vittata" Codelco Norte Chuquicamata.

Peso molecular	Valor	Unidad
HNO ₃	63,1	[g/gmol]
As	74,92	[g/gmol]
H ₃ AsO ₄	141,943	[g/gmol]
Agua	18	[g/gmol]

Tabla 57: Pesos moleculares para cálculo cinética de reacción

Se considera que la densidad de todas las corrientes y en el reactor es de $1 \left[\frac{Kg}{l} \right]$ esto debido a que la cantidad de agua en las corrientes es considerablemente mayor que el resto de los compuestos, véase 7.23 y

7.24 Resultados cinética reacción

Para el cálculo de la cinética se utilizaron los datos presentados en la tabla anterior, la variación de concentraciones en el reactor es:

t [min]	[HNO3] [moles/l]	[As] [moles/l]	[H3AsO4] [moles/l]	[NO2] [moles/l]
0	0,000	2,717	0	0
3	0,854	2,182	0,053	0,160
6	0,998	1,602	0,297	0,892
9	1,123	1,131	0,520	1,560
12	1,281	0,747	0,713	2,141
15	1,503	0,436	0,873	2,619
18	1,845	0,203	0,983	2,950
21	1,990	0,083	1,048	3,144
24	1,911	0,057	1,074	3,223
27	1,876	0,045	1,086	3,258
30	1,854	0,038	1,093	3,280
33	1,840	0,033	1,098	3,294
36	1,829	0,029	1,101	3,305
39	1,820	0,027	1,104	3,313
42	1,814	0,024	1,106	3,320
45	1,808	0,023	1,108	3,326
48	1,803	0,021	1,110	3,330
51	1,799	0,020	1,111	3,334
54	1,796	0,019	1,112	3,338
57	1,793	0,018	1,113	3,341
60	1,790	0,017	1,114	3,344

Tabla 58: Variación de concentraciones en el reactor

Graficando los resultados se llega a:

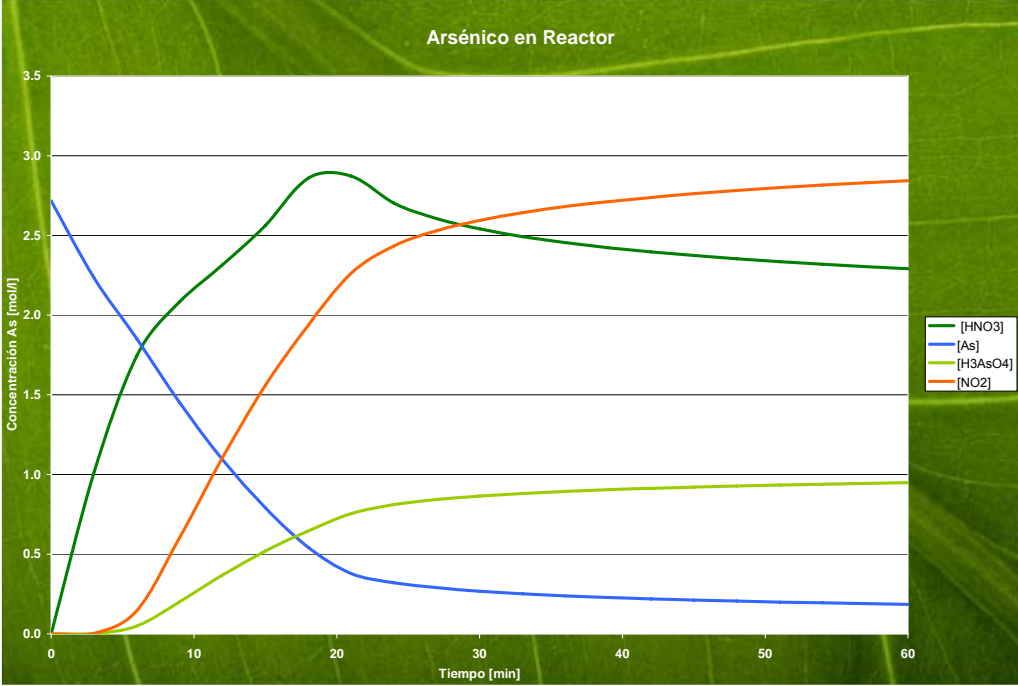


Figura 39: Gráfica simulación estanque percolador

11 Inventario de compra

7.25 Cañerías necesarias:

Líneas de Cañerías	Largo calculado	Largo a comprar
Cañería Nominal 1/2" Schedule 10S	25,58 [ft]	
Cañería Nominal 1/2" Schedule 10S	7,80 [m]	8 [m]
Cañería Nominal 3/4" Schedule 10S	18,70 [ft]	
Cañería Nominal 3/4" Schedule 10S	5,70 [m]	6 [m]

Tabla 59: Cañerías

A continuación se detallan los fittings necesarios para el montaje del ciclo de percolación, divididos en dos recuadros respectivos a los dos diámetros de cañería diferentes:

Fittings 1/2"	Cantidad
Válvulas globo	2
Válvula check	2
Codos	6

Tabla 60: Fittings para cañería de 1/2"

Fittings 3/4"	Cantidad
Válvulas globo	2
Válvula compuerta	2
Codos	5

Tabla 61: Fittings para cañería de 3/4"

7.26 Bomba

Bomba	
Tipo engranaje	
HP	1,41
Succión	3/4"
Descarga	1/2"

Tabla 62: Especificaciones para bomba

7.27 Inventario de compra: Estanques

Las planchas y materiales necesarios para la construcción del equipo son:

Estanque Percolador			
<i>Lámina de Acero</i>	t	5,00	[mm]
Inox tipo 304(SA 167)	Alto	1,50	[m]
	Largo	2,54	[m]
<hr/>			
<i>2 x Cabezal tapa plana</i>	t	25,00	[mm]
Inox tipo 304(SA 167)	Diámetro cabezal	0,81	[m]
	tope		
	Diámetro cabezal	0,81	[m]
	fondo		
<hr/>			
<i>Lámina para Faldón</i>	t	10,00	[mm]
Inox tipo 304(SA 167)	Alto	0,50	[m]
	Largo	2,58	[m]
<hr/>			
<i>Escala</i>	Largo	2,00	[m]
	Densidad	15,00	Kg/m
<hr/>			
<i>2x Filtros</i>	Área	0,50	[m ²]
<hr/>			
<i>2x Soportes Perfil 2x2x3/16</i>	Largo	2,52	[m]
<hr/>			
<i>Regador solución</i>	Aspersor		

Tabla 63: Inventario compra estanques

Los materiales necesarios para los estanques de alimentación y receptor de solución son:

Estanque alimentador				
<i>Lámina de Acero</i>	t	3,00	[mm]	
Inox tipo 304(SA 167)	Alto	0,50	[m]	
	Largo	3,16	[m]	
<i>2 x Cabezal Toriesférico</i>	L = Din	1000,00	[mm]	
Inox tipo 304(SA 167)	icr	100,00	[mm]	
	t	5,00	[mm]	
Estanque Receptor				
<i>Lámina de Acero</i>	t	3,00	[mm]	
Inox tipo 304(SA 167)	Alto	0,50	[m]	
	Largo	3,16	[m]	
<i>2 x Cabezal Toriesférico</i>	L = Din	1000,00	[mm]	
Inox tipo 304(SA 167)	icr	100,00	[mm]	
	t	5,00	[mm]	

Tabla 64: Inventario compra estanques receptor alimentador


12 BIBLIOGRAFÍA: ANEXOS

1. Memorias Públicas Codelco edición 2006
2. Mario Sánchez. Pirometalurgia del cobre y comportamiento de sistemas fundidos única edición Vicerrectora Académica Dirección de Docencia Universidad de Concepción 2002 Capitulo II, III, IV, V.
3. Servicio Nacional Agricultura y Ganadero <<http://www.sag.cl>>[consulta: 15 de Julio 2006]
4. Andrew C. Chang, Weiping Chen, Beni Bar-Yosef, Albert L. Page, Seongju Kim. Plant Uptake Parameters. A Generalized Trace Element Mass Balance Model for Cropland Soils: Arsenic and Cadmium. January, 2004, p. 11 – 85
5. J. Álvarez-Benedí, S. Bolado Rodríguez, I. Cancillo Carro, C. Calvo Revuelta “Dinámica de adsorción – desorción de arsénico (v) en suelos de cultivo en castilla y león” Estudios de la Zona No Saturada del Suelo Vol. VI. J. Álvarez-Benedí y P. Marinero, 2003 p 332-333
6. J.M Smith. Ingeniería de la cinética Química traducido por Ingeniero Químico Antonio Eroles 3ra edición Mc graw Hill México 1991 Capítulo 2: Cinética Química.
7. Nicholas P Greco “Process of preparation arsenic acid” US 4,769,230 Sep 6 1988
8. Octave Levenspiel Ingeniería de las reacciones Químicas traducido por Gabriel Tojo Barreiro 2da edición Editorial Reverté Barcelona 1996 Reactor Ideal Discontinuo p108-110.

13 Información Complementaria

7.28 Resultados Laboratorios

Página 1 of 1
Fecha: 24-08-2007 08:59:19


DIRECCION DE GESTION DE CALIDAD
Laboratorio Químico

Consulta por Orden de Trabajo 398468

Cliete : Fundicion de Concentrado
Obs. : Ricardo Saldívar (memorista)

Fecha Operación : 02-08-2007 09:52:00
Estado OT : A

Material	Muestra	Lote	As
Muestra especial	2817735	Submtra	0.030
	2817736	Submtra	5.760

*Fitoremediación de Zonas de Transferencia de Polvos contaminadas con arsénico por medio del uso del helecho Pteris Vittata” Codelco Norte Chuquicamata.

7.29 Resultados Laboratorio suelos PUCV



Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Facultad de Agronomía
Laboratorio de Suelos y Análisis Foliar
Calle San Francisco s/n, La Palma, Casilla 4-D, Quillota, Chile
Fonos: 56-32-274566, 33-310524, Fono Fax: 56-32-274523, E-mail: lab.suelo@ucv.cl

Laboratorio acreditado por la Comisión de Normalización y Acreditación de la Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo, año 2006

Informe de ensayo Fertilidad completa de suelo RG-2.10.1-P

S 228/07

Nombre cliente: Corporación Nacional del Cobre de Chile
Dirección cliente: Avda. Balmaceda 1291, V. Exótica, Calama

Tipo de muestra: Suelo mineral

Fecha ingreso muestra(s): 11 09 07
Fecha elaboración informe: 27 09 07

Fecha inicio análisis: 20 09 07
Fecha término análisis: 26 09 07

N° del laboratorio	Identificación muestra	pH	CE (dS/m)	Materia orgánica (%)	Nitrógeno disponible (mg/kg)	Fosforo disponible (mg/kg)	Potasio intercambiable (mg/kg)	Potasio intercambiable (cmol+/kg)	Zinc disponible (mg/kg)	Manganeso disponible (mg/kg)	Hierro disponible (mg/kg)	Cobre disponible (mg/kg)	Densidad aparente (g/cm ³)	
													Desviación	
17320	Única	7.73	12.9	0.06	12.4	65.6	664	1.70	43.9	2.63	8.39	271	2.13	0.20

Observaciones:

pH y CE, determinación en extracto de saturación

CE = conductividad eléctrica

dS/m = mmho/cm ppm = mg/kg cmol+/kg o cmol+/kg = mg/100 g

Densidad aparente = promedio de tres terrones, de la cual se deriva la desviación estándar

Referencia método: Sazdawk A., Carrasco M. A., Grez R., Mora M. L., Flores H., Neaman A. 2006. Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile. INIA, Santiago.

Densidad aparente: Blake G. R., 1965. Bulk density, Pp 374 - 390. In: Black C.A., Methods of Soils Analysis. Part 1. American Society of Agronomy, Madison WI, USA.

Se prohíbe la reproducción total o parcial de este informe, sin previa autorización del Laboratorio de Suelos y Análisis Foliar. Los resultados informados son válidos sólo para la(s) muestra(s) analizada(s).

Yasna Peña Plaza
Analista Químico
Jefe de Laboratorio

Alexander Neaman
Doctor en Ciencias del Suelo
Gerente de Laboratorio