

## **PROYECTO FIC FNDR 2011 GOBIERNO REGIONAL DE ATACAMA**

ESTUDIO DE LA TRATABILIDAD DE LAS AGUAS CLARAS DEL TRANQUE DE  
RELAVES PAMPA AUSTRAL PARA LA DIVERSIFICACIÓN PRODUCTIVA DE LA  
COMUNA DE DIEGO DE ALMAGRO

### **INFORME FINAL: Diciembre 2012**

Preparado para:

Nibaldo Guaita  
Encargado Área de Fomento Productivo y Empleo  
Gobierno Regional de Atacama

Preparado por:

Dra. Rosanna Ginocchio C.  
Directora Proyecto  
Laboratorio de Fitotoxicidad y Fitorremediación  
CIMM

Santiago, Diciembre 2012

## Resumen Ejecutivo

Las aguas naturales usadas por la Planta de concentración de cobre por flotación de la División Salvador de CODELCO, consideradas como la calidad de agua basal o background de la zona de estudio, poseen altos contenidos de cloruros ( $990 \text{ mg L}^{-1}$ ), sulfatos ( $1.904 \text{ mg L}^{-1}$ ) y algunos elementos traza (e.j. Boro  $11 \text{ mg L}^{-1}$ ), además de alta conductividad ( $4.110 \text{ umhos cm}^{-1}$ ). El proceso de concentración agrega nuevos compuestos y elementos químicos a las aguas naturales, determinando incrementos en los valores de Molibdeno, Manganeso, Arsénico, sulfatos, cloruros y conductividad, los que se evidencian en la calidad química de las aguas claras del tranque de relaves Pampa Austral.

Las regulaciones nacionales vigentes impiden que las aguas claras del tranque Pampa Austral puedan ser descargadas a cursos superficiales de agua. De esta forma, han sido utilizadas en procesos mineros por parte de terceros (Minera Trinidad) y para el riego experimental de cultivos que no son de consumo humano o utilizados para forraje de animales (principalmente Jojoba), según lo autorizado en la Resolución de Calificación Ambiental (RCA N° 016 del 24 de Enero del 2011) de la División Salvador, obtenida para el proyecto *Modificación Ampliación Tranque Pampa Austral, IV Etapa*.

En base a lo establecido en las regulaciones vigentes (DS 90 y NCh 1.333) y a lo discutido con el Comité Técnico del proyecto, se definieron dos escenarios meta-objetivo de calidad de agua post-tratamiento de las aguas claras del tranque Pampa Austral:

- ✓ Escenario 1: Las aguas claras descargadas deben cumplir con los valores máximos establecidos en el DS 90 para cursos de aguas superficiales, independientemente de los valores de los elementos/compuestos en las aguas naturales en el punto de captación. En este escenario, los elementos/compuestos presentes en las aguas claras de relave que necesitan ser tratados y los valores máximos aceptables, son los siguientes: Boro (reducir desde promedio de  $8,7 \text{ mg L}^{-1}$  a  $0,75 \text{ mg L}^{-1}$ ), cloruros (reducir desde promedio de  $2.879 \text{ mg L}^{-1}$  a  $400 \text{ mg L}^{-1}$ ) y sulfatos (reducir desde promedio de  $2.883 \text{ mg L}^{-1}$  a  $1.000 \text{ mg L}^{-1}$ ).
- ✓ Escenario 2: Las aguas claras descargadas deben asimilarse a la calidad de las aguas naturales; en este caso se considera a estas aguas como a las entrantes a la Planta de Flotación de CODELCO-Salvador. En este escenario, los elementos/compuestos presentes en las aguas claras de relave que necesitan ser tratados y los valores máximos aceptables a los que se debe llegar, son los siguientes: Boro (reducir desde promedio de  $8,7 \text{ mg L}^{-1}$  a  $7,76 \text{ mg L}^{-1}$ ), cloruros (reducir desde promedio de  $2.879 \text{ mg L}^{-1}$  a  $990 \text{ mg L}^{-1}$ ), sulfato (reducir desde promedio de  $2.883 \text{ mg L}^{-1}$  a  $1.904 \text{ mg L}^{-1}$ ), Arsénico (reducir desde promedio de  $0,234 \text{ mg L}^{-1}$  a  $0,14 \text{ mg L}^{-1}$ ), Manganeso (reducir desde promedio de  $0,253 \text{ mg L}^{-1}$  a  $< 0,01 \text{ mg L}^{-1}$ ), Molibdeno (reducir desde promedio de  $1,0 \text{ mg L}^{-1}$  a  $< 0,01 \text{ mg L}^{-1}$ ) y conductividad (reducir desde promedio de  $11.795 \text{ umhos cm}^{-1}$  a  $4.110 \text{ umhos cm}^{-1}$ ).

A nivel internacional, existen diversas alternativas de tratamiento para las aguas claras del tranque Pampa Austral. Sin embargo, las tecnologías basadas en el tratamiento pasivo tienen mejores relaciones costo-efectividad, menores impactos ambientales y son más simples de operar y manipular que los tratamientos activos. Las nueve tecnologías de tratamiento pasivo pre-seleccionadas (sedimentación, filtro de arena, enclamiento, tratamiento pasivo biológico anaeróbico, filtro de gravilla plantado, aireación, precipitación con filtro de hierro y sales de hierro, precipitación con peróxido de hidrógeno e intercambio iónico con zeolita) permitirían la remoción de la mayoría de los contaminantes presentes en las aguas clara a los niveles de las

meta-objetivo definidas. Sin embargo, ninguna de ellas sería capaz de remover, por sí sola, todos los compuestos/elementos de interés desde las aguas claras del Tranque Pampa Austral. De esta forma, el tratamiento combinado de las aguas claras, por medio de la combinación de dos tecnologías de tratamiento usadas en forma secuencial, permitiría mejorar el rendimiento en la remoción de los contaminantes y cumplir las meta-objetivo definidas. Estas combinaciones de tecnologías tendrían bajos costos de inversión y de tratamiento, además de bajos impactos ambientales. De las combinaciones posibles, las dos más adecuadas son:

- ✓ Combinación 1: filtro de arena y filtro pasivo biológico anaeróbico.
- ✓ Combinación 2: filtro pasivo biológico anaeróbico y filtro de gravilla plantado.

Ambas combinaciones de tratamiento no requieren de supervisión, control y mantención permanente, tienen bajos requerimientos de energía, no requieren fungibles y son simples de operar. Tienen un amplio rango de aplicaciones y pueden ser fácilmente adaptadas, tanto en forma como en tamaño, a las condiciones específicas de sitio donde se implementen.

Los costos estimados de tratamiento de las aguas claras a los valores meta-objetivo definidos (incluyendo operación, depreciación, mantención y desmantelamiento) ascienden a 70 CLP \$/m<sup>3</sup> para la combinación 1 y a 140 CLP \$/m<sup>3</sup> para la combinación 2. Aunque los costos del tratamiento combinado 2 son el doble del tratamiento combinado 1, su eficiencia en la remoción de los contaminantes de interés es mayor; adicionalmente los impactos ambientales potenciales de la combinación 2 son menores a los de la combinación 1.

Teniendo en cuenta la restricción de uso de las aguas claras del tranque de relaves Pampa Austral para el riego de cultivos que no sean destinados al consumo humano ni animal, según lo autorizado en la Resolución de Calificación Ambiental (RCA N° 016 del 24 de Enero del 2011) de la División Salvador, obtenida para el proyecto *Modificación Ampliación Tranque Pampa Austral, IV Etapa*, las opciones de cultivos técnicamente viables se restringen en forma importante. Específicamente, los análisis de suelo y la caracterización climática (datos existentes y zonificación agroclimática realizada por el presente estudio, respectivamente) permiten concluir que los cultivos técnicamente viables son:

- ✓ Jojoba (*Simmondsia chinensis*) con fines cosméticos (en el caso que se pueda incluir dicho uso en la RCA del proyecto de modificación de la IV etapa del tranque Pampa Austral).
- ✓ Maíz Lluteño (*Zea mays* L. tipo *amylacea*) con fines energéticos.
- ✓ Caña brava (*Arundo donax*) con fines energéticos.
- ✓ Salicornia (*Salicornia bigelovii*) con fines energéticos.

El análisis económico de la Jojoba (producción de semillas y producción de aceite) y el maíz Lluteño, sin incluir los costos de mantención de las dos combinaciones de tratamiento de agua seleccionadas en el presente estudio, arrojan indicadores (VAN y TIR) positivos. Los mayores VAN se alcanzarían con la producción de aceite de Jojoba y las mayores TIR con la producción de maíz Lluteño. Al incluir los costos de mantención de la planta de tratamiento de aguas, el cultivo de Jojoba para la producción de semillas no es rentable bajo la combinación 1 de tratamiento y genera un VAN positivo pero muy bajo para la combinación 2. Para el caso de la producción de aceite de Jojoba, el negocio se hace rentable para ambas combinaciones de tratamiento de agua. Al incluir los costos de tratamientos de agua para el cultivo del maíz Lluteño el negocio no es rentable para los precios de venta actuales de maíz para consumo humano.

El cultivo de la caña brava y la salicornia con fines energéticos se encuentra recién en etapa de investigación a nivel nacional e internacional por lo que su cultivo potencial en la zona de Diego de Almagro está sujeto al desarrollo y la validación técnica de dichos cultivos en el futuro.

En el caso específico de la Jojoba, cultivada en forma experimental en el área desde hace algunos años, en base a la información climática recopilada y a la zonificación agroclimática realizada se descarta que la extensa mortandad de plantas de esta especie existentes en el sector de Diego de Almagro haya sido causada por heladas. La zonificación agroclimática indica sectores adecuados para el cultivo de la Jojoba (con muy baja probabilidad de incidencia de heladas; heladas muy leves). Sin embargo, los resultados del ensayo de salinidad y anegamiento realizados en el presente estudio demuestran que la mortandad de plantas de jojoba puede atribuirse a un efecto del desplazamiento de las sales de la entre hilera hacia la sobre hilera por la incidencia de lluvias. Este efecto se ve aumentado en sectores de mal drenaje, en los que se produce anegamiento. Adicionalmente, se demostró que los clones de Jojoba actualmente cultivados en Diego de Almagro presentan un nivel de tolerancia a la salinidad comparable con clones seleccionados por su tolerancia a la salinidad en la Universidad de Chile.

Los análisis del aceite de Jojoba extraído de semillas cosechadas en el sector de Diego de Almagro y regadas con aguas no tratadas del tranque Pampa Austral arrojaron niveles no detectables de Arsénico, Manganeso y Molibdeno. Los niveles de Boro superaron por un factor de 2,5 los niveles obtenidos en un aceite de Jojoba proveniente del valle de Elqui, regado con agua de riego no salina. El análisis cosmético del aceite indica que los niveles de Boro medidos en el aceite de Jojoba de Diego de Almagro no son incompatibles con su uso con fines cosméticos, según las normas de la Comunidad Económica Europea.

Debido a que el estudio realizado para analizar la viabilidad técnica del cultivo de Jojoba se realizó en una plantación regada con aguas del tranque Pampa Austral que no han sido sometidas a tratamiento, es esperable que los daños por salinidad y los contenidos de Boro en el aceite disminuyan si las plantas se riegan con aguas tratadas.

Finalmente, se recomienda la construcción y operación de una planta piloto de tratamiento de aguas claras del Tranque Pampa Austral, usando la combinación 2 de tratamiento en la localidad de Diego de Almagro, además de un área de cultivos experimentales de Jojoba, Maíz Lluteño, Caña brava y Salicornia. Los resultados obtenidos a partir de la construcción y operación de esta planta piloto permitirían elaborar un diseño ingenieril detallado para plantas de tratamiento de escala real, con una planificación adecuada de costos e instrucciones de operación específicas para el sitio, además de ajustar los costos de inversión y mantención. De esta forma, se asegura que se construirá y operará una planta de tratamiento confiable y eficiente. Adicionalmente, la evaluación del flujo real de agua tratada de la planta piloto, permitiría determinar de mejor forma la rentabilidad de los cultivos sugeridos, ya que un mayor flujo real puede incrementar la rentabilidad de los cultivos estudiados mientras un menor flujo puede hacer que todas las alternativas dejen de ser rentables.

## ÍNDICE

1. Introducción	1
2. Objetivos	3
a. General	3
b. Específicos	3
3. Actividades y resultados:	4
Objetivo específico 1: Evaluación de alternativas tecnológicas para la remediación de aguas claras del tranque Pampa Austral	4
1. Análisis de sitio	4
2. Revisión de normativas pertinentes	20
3. Definición de objetivos-meta de tratamiento de las aguas Claras	29
4. Revisión nacional e internacional de literatura sobre las tecnologías de tratamiento de aguas disponibles	34
5. Revisión nacional e internacional de literatura sobre la experiencia en tratamiento de agua operaciones mineras	48
6. Evaluación de las tecnologías de tratamiento	49
Objetivo específico 2: Evaluación de laboratorio y comparación de las tecnologías de tratamiento de aguas	51
1. Ensayos de factibilidad, de laboratorio, de las tecnologías de tratamiento de aguas priorizadas	51
Objetivo específico 3: Proyecto de factibilidad de la mejor alternativa tecnológica	74
1. Propuesta de ingeniería de detalle con diseño preliminar de obras civiles y equipamiento de la planta de tratamiento de aguas claras y sistema de suministro y distribución hídrico	74
2. Trabajo de ingeniería requerido	102
3. Conceptos y costos operacionales	109
4. Resumen de las estimaciones de costos para las plantas de tratamiento de aguas claras seleccionadas	120

#### Objetivo específico 4:

1. Zonificación agroclimática	123
2. Evaluación de la vulnerabilidad de la Jojoba a las características biofísicas del área de estudio	137
3. Elaboración del listado de especies candidatas	153
4. Análisis técnico y económico de las especies seleccionadas	163
tecnologías de tratamiento de aguas disponibles	34
5. Evaluaciones de calidad del aceite de Jojoba producido en la localidad	192

#### Objetivo específico 5: Actividades de difusión

1. Lanzamiento	195
2. Acciones de difusión	195
3. Reuniones de trabajo con el comité técnico del proyecto	196
4. Taller de transferencia	199

#### 4. Conclusiones y recomendaciones 200

Anexo 1 – Bibliografía

Anexo 2 – Experiencia de BioPlanta en el tratamiento de riles

Anexo 3 – Experiencias nacionales en el tratamiento de aguas claras

Anexo 4 – Metodologías y materiales para la evaluación de las tecnologías de tratamiento preseleccionadas: pruebas de laboratorio

Anexo 5 – Resultados de la remoción de contaminantes por parte de las tecnologías de tratamiento preseleccionadas: pruebas de laboratorio

Anexo 6 – Evaluaciones de Impacto Ambiental de las tecnologías de tratamiento preseleccionadas

Anexo 7 – Cartografía resultante de la modelación climática para la zona de estudio

Anexo 8 – Programa para Google Earth de la zonación climática para la zona de estudio

Anexo 9 – Proyecto de memoria de título de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile

Anexo 10 – Caracterización fisicoquímica de suelos experimentales en Diego de Almagro

Anexo 11– Análisis de costos cultivo de Jojoba

Anexo 12 – Sustancias no permitidas en cosméticos en la UE

Anexo 13 – Ingredientes cosméticos de uso limitado

Anexo 14 –Ingredientes permitidos de uso cosmético

Anexo 15 – Esquema tecnologías de tratamiento combinadas seleccionadas

Anexo 16 – Díptico del proyecto

Anexo 17 – Artículo general de difusión del proyecto

Anexo 18 – Asistentes a reuniones con el Comité Técnico del proyecto

## 1. INTRODUCCIÓN

La Región de Atacama presenta una economía diversificada, sustentada en un encadenamiento de pequeñas y medianas empresas a las principales inversiones y actividades económicas regionales. Los sectores económicos más relevantes son la minería y la agricultura. La minería (cobre, oro, plata, hierro y molibdeno) es la más relevante, mientras que la producción frutícola de exportación, principalmente de uva de mesa en los valles de Copiapó y Huasco, es la más pujante del sector agropecuario, con un 16% de aumento en el período 2001 – 2006 (INE, 2011).

El proceso de desarrollo de la Región de Atacama está marcado por el dinamismo de actividades productivas que requieren un uso intensivo de recursos hídricos, tales como la minería y la agricultura. Es así como la mayor parte de los derechos de agua para uso consuntivo en la región están en manos de los sectores agroindustrial y minero, con porcentajes aproximados de 32% y 62%, respectivamente (DGA, 1999). En el caso de la industria minera regional, el consumo de agua fresca asciende a 1.441 litros por segundo, posicionándola en la tercera región del país con mayor consumo de agua por parte del sector minero (COCHILCO, 2008). Sin embargo, debido al clima transicional desértico que caracteriza a la región, el recurso hídrico es naturalmente escaso y se ha vuelto cada vez más limitado debido a que su demanda se hace cada vez mayor que la oferta. Por ejemplo, aunque la actividad agrícola de la región ha ido creciendo gracias a las condiciones climáticas excepcionales de los valles agrícolas, es limitada la proyección de expansión de este sector productivo debido a la aguda restricción en la disponibilidad de recursos hídricos, cuyo déficit actual se estima en 110 millones de metros cúbicos para el Valle de Copiapó (Fuente: Chile potencia alimentaria, 2006). Este problema se ve, además, agravado por el paulatino proceso de desertificación de la zona. De esta forma, la carencia de agua es uno de los desafíos más grandes para la Región de Atacama.

Para enfrentar este problema, se ha definido una estrategia regional de gestión integral del recurso hídrico, la que incluye la gestión eficiente y sustentable del acuífero. Adicionalmente, se ha incluido la sustentabilidad del recurso hídrico como uno de los aspectos más relevantes dentro de la Estrategia Regional de Desarrollo de Atacama para el período 2007 - 2017. En este contexto, el tratamiento de las aguas residuales industriales a una calidad de agua de riego, como las generadas por el sector minero, permitiría fortalecer el aprovechamiento sustentable de este recurso dentro de la región, asegurando su reutilización en otras actividades productivas, tal como las relacionadas con el sector agropecuario. Esta alternativa es particularmente interesante para la Provincia de Chañaral, donde la actividad minera ha sido históricamente relevante y donde la actividad agrícola ha sido históricamente la menos relevante dentro de la región (Jorquera-Jaramillo, 2008). Por ejemplo, el recurso hídrico de la cuenca del río El Salado, que corresponde a una cuenca que abarca la Provincia de Chañaral, es mayoritariamente utilizado por la población y por CODELCO División El Salvador para uso industrial minero. Un gran porcentaje de las aguas usadas por CODELCO División El Salvador terminan constituyendo aguas industriales, denominadas aguas claras de relaves. Estas aguas claras, contenidas en el tranque de relaves Pampa Austral, se evacúan a un canal de hormigón que recorre 18 km hasta Diego de Almagro.

Las aguas claras evacuadas desde el tranque de relaves Pampa Austral eran antiguamente descargadas a la cuenca del río Salado en la localidad de Diego de Almagro, desde donde seguían el curso de la Quebrada del río Salado hasta Caleta Palito, al norte del Puerto de Chañaral, donde eran descargadas al mar. Sin embargo, a contar del año 2009 la calidad química de estas aguas limitó su descarga a cursos superficiales de agua al superar uno o varios de los niveles máximos estipulados en el Decreto Supremo N° 90 de la SEGPRES del 2001 (*Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales*). En este nuevo contexto, la División Salvador de CODELCO obtuvo una Resolución de Calificación Ambiental (RCA), la que autorizó la generación de contratos con terceros dentro de la Comuna de Diego de Almagro, para el reuso de estas aguas industriales. De esta forma, se generaron contratos con distintos usuarios ubicados a lo largo de la canal de evacuación de las aguas claras, tanto para procesos mineros como para el riego agrícola experimental de cultivos de Jojoba y olivos. A pesar que las aguas claras del tranque Pampa Austral han sido utilizadas en forma experimental para riego agrícola dentro de la Comuna de Diego de Almagro, estas no cumplen con la norma chilena oficial NCh 1.333 de aguas para uso de riego (*Requisitos de calidad de agua para diferentes usos*), ya que se caracterizan por poseer niveles elevados de sulfatos, cloruros y otros elementos, tales como Boro, Cadmio, Molibdeno y Arsénico. Sin embargo, el adecuado tratamiento (costo-efectivo) y la reutilización de estas aguas claras podrían permitir el crecimiento de la agroindustria en la Comuna de Diego de Almagro.

A nivel internacional, existen diversas tecnologías para el tratamiento de aguas industriales como las aguas claras del tranque Pampa Austral, tanto activas como pasivas y de aplicación *in situ* o *ex situ*. Sin embargo, se debe evaluar cuáles de ellas son las más adecuadas al contexto local (sitio-especificidad), de forma de lograr el objetivo deseado (abatimiento de los elementos críticos y reducción de la carga de sulfatos y cloruros). Esto es muy relevante ya que si bien los parámetros fisicoquímicos de las aguas a tratar pueden ser similares, los caudales, las concentraciones, el uso específico requerido y la calidad de los suelos a ser regados, entre otros factores, pueden presentar diferencias importantes respecto a las situaciones en las que han sido aplicados en otros países o localidades del país. Adicionalmente, es fundamental determinar el costo-efectividad de las alternativas tecnológicas disponibles a la realidad local, de forma que el costo de tratamiento no vuelva inviable la posibilidad real de tratamiento de las aguas claras.

De esta forma, el objetivo general de esta iniciativa fue evaluar alternativas tecnológicas que permitan la remediación de las aguas claras almacenadas en el tranque de relaves Pampa Austral, para disponer de parte de los caudales efluentes del tranque para actividades agrícolas, las que podrán ir más allá de los cultivos agrícolas tradicionales de la región. Esto permitirá promover la diversificación productiva e incorporar parte del territorio de la comuna de Diego de Almagro a la superficie agrícola de la Región de Atacama.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 General**

Evaluar alternativas tecnológicas que permitan la remediación de las aguas claras almacenadas en el tranque de relaves Pampa Austral, permitiendo su uso como agua para riego de cultivos agrícolas o industriales que pudieran ser potencialmente desarrollados en la comuna de Diego de Almagro.

### **2.2 Específicos**

- i. Evaluar alternativas tecnológicas que permitan la remediación de las aguas claras, las que pudieran ser aplicadas en el tranque Pampa Austral.
- ii. Evaluar a nivel de laboratorio las diversas alternativas tecnológicas disponibles y factibles, tanto técnica como ambiental y económicamente, llegando a una comparación entre estas.
- iii. Generar un proyecto (nivel de prefactibilidad) con la alternativa determinada que haya resultado como la más conveniente en la evaluación técnica-económica y ambiental.
- iv. Llevar a cabo una evaluación técnica y económica de alternativas de cultivos agrícolas o industriales que pudieran ser potencialmente desarrollados en la comuna de Diego de Almagro, a partir de información indirecta.
- v. Difusión.

### 3. ACTIVIDADES Y RESULTADOS

#### OBJETIVO 1: EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA LA REMEDIACIÓN DE AGUAS CLARAS DEL TRANQUE PAMPA AUSTRAL

Este objetivo específico consideró el desarrollo de siete actividades, tendientes a determinar las condiciones de sitio pertinentes al estudio y a identificar las tecnologías de tratamiento de riles industriales, pertinentes a las aguas claras del tranque Pampa Austral. Estas actividades se detallan a continuación.

#### 1. ANÁLISIS DE SITIO: tranque de relaves Pampa Austral

##### 1.1 Metodología:

Se realizó una recopilación de antecedentes históricos y actuales sobre el tranque de relaves Pampa Austral de la División El Salvador de CODELCO Chile, con la ayuda del Sr. Yermolay Peralta, Ingeniero de estudios del Departamento de Medio Ambiente, Gerencia de Sustentabilidad y Asuntos Externos de la División. En esta revisión se han enfatizado aspectos tales como:

- ✓ Antecedentes generales de la Región de Atacama, con énfasis en las actividades mineras y agropecuarias.
- ✓ Antecedentes de la Comuna de Diego de Almagro, con énfasis en las actividades mineras y agropecuarias, además de las características climáticas.
- ✓ Antecedentes históricos y actuales del tranque de relaves Pampa Austral, con énfasis en la forma de disposición/evacuación de las aguas claras, los flujos de evacuación de las aguas claras, las características fisicoquímicas de las aguas claras, los usos de las aguas claras por parte de terceros y los efectos ya evaluados del uso de las aguas claras para riego en los suelos y los cultivos experimentales.

Adicionalmente, se realizó una visita a terreno por parte de los profesionales de las distintas instituciones involucradas en la ejecución del proyecto, a zonas pertinentes de la Comuna de Diego de Almagro, Región de Atacama, y a una zona experimental en la Región de Antofagasta (División Chuquicamata de CODELCO), con el objetivo de:

- ✓ Conocer *in situ* el tranque de relaves Pampa Austral, el canal de evacuación de aguas claras y los puntos de entrega de las aguas claras a terceros, para su uso en riego de cultivos experimentales de Jojoba y olivos. Esta visita se coordinó con el Sr. Yermolay Peralta, Ingeniero de estudios del Departamento de Medio Ambiente, Gerencia de Sustentabilidad y Asuntos Externos de la División El Salvador de CODELCO.
- ✓ Conocer *in situ* las plantaciones experimentales de Jojoba y olivos que han estado siendo regadas con aguas claras de relaves desde el año 2009/2010. Estas visitas fueron coordinadas con el Presidente de la Asociación Gremial Valle Nuevo, Sr. Rodrigo Varela, y los Sres. Víctor Soto y Miguel Soto, de la empresa desarrollo Agrícola del Desierto.

- ✓ Visitar una zona experimental de tratamiento de aguas claras de relaves en la División Chuquicamata de CODELCO, Región de Antofagasta, por medio de la tecnología de humedales artificiales, en el marco de un proyecto CORFO liderado por la Universidad de Santiago de Chile (Directora de Proyecto, Dra. Claudia Ortiz) y apoyado por la empresa Alemana BioPlanta, uno de los co-ejecutores del presente proyecto. Esta experiencia es única en su tipo en el país, por lo que nos entregará antecedentes relevantes para el proyecto.

## **1.2 Resultados:**

La información más relevante recabada para la zona de interés del presente estudio se sistematiza a continuación.

## **I. ANTECEDENTES GENERALES DE LA REGIÓN DE ATACAMA**

### **I.1 Parámetros naturales**

La III Región de Atacama (aprox. 26° S – 29° S) se encuentra en el límite norte del sistema de valles transversales que se desarrolla entre las cuencas de los ríos Copiapó (Región de Atacama) y Aconcagua (Región de Valparaíso). Al norte de este sistema de valles transversales (Provincia de Chañaral) comienza el dominio de los sistemas altiplánicos intercalados con la precordillera y la cordillera de Domeyko. La Región de Atacama se divide en dos sectores hidrográficos separados por el paralelo 27° S; al norte con muy escasas precipitaciones que se traduce en una zona arreica y, al sur donde las débiles precipitaciones permiten la aparición de una zona exorreica con ríos pluvionivales (ríos Copiapó y Huasco).

El clima predominante en la Región de Atacama es el desértico según la clasificación de Köppen, con precipitaciones anuales inferiores a la evaporación, las que por lo general no superan los 100 mm/año, concentradas en unos pocos días en los meses de invierno. Las precipitaciones aumentan de norte a sur, con promedios de 1,7 mm/año en el norte de la Región (Chañaral) a promedios de 42 mm/año en el sur (Freirina), ambos registros cerca del nivel del mar, y de mar a cordillera, pudiendo aumentar al doble o más hacia el interior gracias al efecto orográfico de la Cordillera de Los Andes. Esto resulta en una región árida, con muy bajos valores de humedad relativa y con extensas superficies desprovistas de vegetación. Las temperaturas son altas y con marcados ciclos diurnos.

Además del ciclo anual, la variabilidad interanual en las precipitaciones es un factor característico de la Región, debida principalmente al sistema El Niño – Oscilación del Sur (ENOS). En esta Región, los eventos El Niño se expresan con montos pluviométricos anormalmente altos, generados lluvias en los sectores medios y bajos y acumulación de nieve en la alta cordillera. La frecuencia con que ocurren estos eventos es variable y en general dentro de un rango entre 3 a 6 años. Por otro lado, los eventos La Niña se asocian con una menor precipitación y una menor acumulación de nieve en la Cordillera de Los Andes, lo que

condiciona negativamente el volumen de los caudales de los ríos en los meses de primavera y verano siguientes.

## **I.2 Actividades económicas**

La III Región de Atacama presenta una economía diversificada, sustentada en un encadenamiento de pequeñas y medianas empresas a las principales inversiones y actividades económicas regionales. Los sectores económicos más relevantes son la minería y la agricultura. La minería (cobre, oro, plata, hierro y molibdeno) es la más relevante, mientras que la producción frutícola de exportación, principalmente de uva de mesa en los valles de Copiapó y Huasco, es la más pujante del sector agropecuario, con un 16% de aumento en el período 2001 – 2006 (INE, 2011).

El proceso de desarrollo de la Región de Atacama está marcado por el dinamismo de actividades productivas que requieren un uso intensivo de recursos hídricos, tales como la minería y la agricultura. Es así como la mayor parte de los derechos de agua para uso consuntivo en la región están en manos de los sectores agroindustrial y minero, con porcentajes aproximados de 32% y 62%, respectivamente (DGA, 1999). En el caso de la industria minera regional, el consumo de agua fresca asciende a 1.441 litros por segundo, posicionándola en la tercera región del país con mayor consumo de agua por parte del sector minero (COCHILCO, 2008). Sin embargo, debido al clima transicional desértico que caracteriza a la región, el recurso hídrico es naturalmente escaso y se ha vuelto cada vez más limitado debido a que su demanda se hace cada vez mayor que la oferta. Por ejemplo, aunque la actividad agrícola de la región ha ido creciendo gracias a las condiciones climáticas excepcionales de los valles agrícolas, es limitada la proyección de expansión de este sector productivo debido a la aguda restricción en la disponibilidad de recursos hídricos, cuyo déficit actual se estima en 110 millones de metros cúbicos para el Valle de Copiapó (Fuente: Chile potencia alimentaria, 2006). Este problema se ve, además, agravado por el paulatino proceso de desertificación de la zona. De esta forma, la carencia de agua es uno de los desafíos más grandes para la Región de Atacama.

Para enfrentar este problema, se ha definido una estrategia regional de gestión integral del recurso hídrico, la que incluye la gestión eficiente y sustentable del acuífero. Adicionalmente, se ha incluido la sustentabilidad del recurso hídrico como uno de los aspectos más relevantes dentro de la Estrategia Regional de Desarrollo de Atacama para el período 2007 - 2017. En este contexto, el tratamiento de las aguas residuales industriales a una calidad de agua de riego, como las generadas por el sector minero, permitiría fortalecer el aprovechamiento sustentable de este recurso dentro de la región, asegurando su reutilización en otras actividades productivas, tal como las relacionadas con el sector agropecuario. Esta alternativa es particularmente interesante para la Provincia de Chañaral, donde la actividad minera ha sido históricamente relevante y donde la actividad agrícola ha sido históricamente la menos relevante dentro de la región (Jorquera-Jaramillo, 2008). Por ejemplo, el recurso hídrico de la cuenca del río El Salado, que corresponde a una cuenca que abarca la Provincia de Chañaral, es mayoritariamente utilizado por la población y por CODELCO División El Salvador para uso industrial minero. Un gran porcentaje de las aguas usadas por CODELCO División El Salvador terminan constituyendo aguas industriales, denominadas aguas claras de relaves.

La Región de Atacama ha reflejado la tendencia general del sector Norte del país, en que la explotación de los recursos naturales ha sido liderada por la minería, siendo secundaria la

actividad agrícola (Jorquera-Jaramillo, 2008). La agricultura regional se vigorizó a partir de la apertura al comercio exterior en los 80', especialmente debido a la fruticultura de exportación (Jorquera-Jaramillo, 2008). En 1973, la superficie de vides en la provincia de Copiapó alcanzaba 292 ha y entre los años 1975 y 1980 llegó a 1.157 ha, lo que representa un aumento de 290%, atribuido principalmente a las plantaciones de uva de mesa (Rodríguez, 1989). Esta actividad ha seguido creciendo gracias a las condiciones climáticas excepcionales de los valles agrícolas de la región (Jorquera-Jaramillo, 2008), llegando a las 8.051 ha en el presente (CIREN, 2011). La segunda especie frutal en superficie en la Región de Atacama es el olivo, con 2.417 ha, seguida de superficies significativamente menores de paltos (229 ha), granado (216 ha) y jojoba (120 ha; CIREN, 2011). Esto refleja la escasa diversificación productiva de la región, en la que dos cultivos (uva de mesa y olivo) concentran un 93% de las 11.232 ha dedicadas a la producción de fruta.

Actualmente, en la actividad agropecuaria regional conviven patrones contrastantes de explotación de los recursos naturales, dominando en superficie la creciente agricultura de exportación; en contraste, se encuentra la pequeña agricultura que se vincula al mercado a través de productos frescos como hortalizas, junto a sistemas agroganaderos de subsistencia en los que la herencia tradicional sobrevive al amparo de pequeñas superficies y de la transhumancia que busca alimentar el ganado, principalmente caprino (Jorquera-Jaramillo, 2008).

Según el VII Censo Nacional Agropecuario y Forestal de 2007, la Región de Atacama posee 29.102 ha de suelos de cultivo, de las cuales 18.973 ha estaban siendo efectivamente usadas al momento de la encuesta (INE, 2007). El rubro principal es la fruticultura, que favorecida por las ventajas fitosanitarias y de contra-estación con el hemisferio Norte, demuestra un aumento sostenido en la superficie de vid de mesa, paltos, cítricos y olivos en la zona Centro-Norte (INE, 1997; 2007). Las plantas forrajeras permanentes y de estación (segundo lugar en superficie) cubren 2.165,8 ha (7,4%). Predomina la alfalfa (95,4% del total de forrajeras). Las hortalizas ocupan el tercer lugar con 1.652 ha (5,7% de los suelos de cultivo), las que abastecen los centros poblados y las zonas mineras, además de la oferta de primores en el mercado nacional (INE, 2007).

En cuanto a las actividades agrícolas de la Región de Atacama, el desarrollo de la tecnificación del riego ha sido el principal factor estimulante para la expansión de la fruticultura, con un aumento de 5.348 ha (37,7%) en la superficie regada de la región, entre los años 1997 y 2007 (INE, 2007). Los aumentos provinciales para este período corresponden a 42%, 32,1% y 1.209% en Huasco, Copiapó y Chañaral, respectivamente (INE, 2007). Cabe destacar que la provincia de Copiapó concentra la mayor superficie de riego (56,2%), siendo secundada por la Provincia de Huasco (42,6%). La SEREMI de Agricultura (2004) reconoce una disponibilidad relativamente segura de riego de unas 21.000 ha, equivalentes al 70% de las 29.800 ha de suelos productivos disponibles, lo que aún podría asegurar un crecimiento de la ocupación agrícola. Sin embargo, para el valle de Copiapó, Golder Associates (2006), precisa que existe un déficit de agua de 110 millones de metros cúbicos, consumiéndose actualmente 140 millones de metros cúbicos por año en diversidad de actividades; para hacer sustentable el uso de agua en este valle, el estudio concluye que el consumo se debe reducir drásticamente a no más de 50 millones de metros cúbicos por año.

Aunque la agricultura está representada a lo largo de toda la región, los suelos de cultivo se concentran en las Provincias de Copiapó (54,6%) y de Huasco (43,4%), siendo

significativamente menor la superficie de suelos de cultivo en la Provincia de Chañaral (1,8%; INE, 2007). Esta distribución se explica por el uso mayoritario del recurso hídrico en actividades mineras en la Provincia de Chañaral, con el consecuente desmedro para las actividades agrícolas, más que por la falta de condiciones climáticas y edáficas dentro de la Provincia.

En los últimos años, el uso experimental de las aguas claras del tranque Pampa Austral como aguas de riego, ha determinado que la Provincia de Chañaral, y particularmente la Comuna de Diego de Almagro, posea la mayor superficie de cultivos industriales de la región (220 ha versus 28,6 ha y 68 ha en las Provincias de Copiapó y Huasco, respectivamente; INE, 2007), debido a la imposibilidad de producir cultivos de consumo humano con aguas que no cumplen con la calidad de riego. Sin embargo, la posibilidad de reutilizar aguas industriales generadas por el sector minero local para riego agrícola, una vez que sus contaminantes han sido removidos por tratamientos adecuados, permitiría desarrollar el potencial agrícola y/o agroindustrial en algunas comunas de la región, tal como la comuna de Diego de Almagro. Adicionalmente, el considerar alternativas de cultivos agrícolas o industriales que pudieran ser potencialmente desarrollados en la comuna de Diego de Almagro, distintos de los tradicionalmente cultivados en la región, permitiría la diversificación productiva, generando nuevas oportunidades de negocios y de agregación de valor. Por ejemplo, existen 71,2 ha de jojoba en algunas áreas de la Provincia de Chañaral (CIREN, 2011), especie que se ha adaptado a las condiciones edafoclimáticas de la zona y que cuenta con un mercado asegurado, relacionado con la industria cosmética, tanto para las semillas como para el aceite. Dicho mercado ha mostrado un interesante aumento en los precios de dichos productos en el último año. Adicionalmente, el interés por la jojoba quedó de manifiesto por la reciente visita a la región de ejecutivos de la empresa Flora Tech, la principal compradora de semillas y de aceite de jojoba en el mundo, con el fin de contactar nuevos proveedores. Este ejemplo ilustra que la identificación de otros cultivos industriales de interés, constituye un tema relevante para este sector del país.

## **II. ANTECEDENTES GENERALES DE LA COMUNA DE DIEGO DE ALMAGRO**

La comuna de Diego de Almagro se ubica en la provincia de Chañaral, tiene una superficie de 18.663,80 km<sup>2</sup>. De acuerdo a las proyecciones del INE para 2010, se estima una población de 12.159 habitantes, con una densidad de 0,65 hab/km<sup>2</sup>, lo que equivale a un 4,33 % de la población regional. Presenta un 94,30% de población urbana versus un 5,7% de población rural (Fuente: SINIM).

De acuerdo al Plan de Desarrollo Comunal (PLADECO), la comuna de Diego de Almagro presenta en su territorio tres cuencas. Una de ellas es de tipo endorreico y comprende una vasta zona que excede los límites comunales donde se han formado salares y sus cursos de agua no tienen salida al mar, siendo el más importante el río La Ola. En el norte de la comuna, la cuenca correspondiente al río Doña Inés Chica es de escurrimiento esporádico y la cuenca del río Salado es de tipo exorreico en la zona sur-oeste. El río Salado es una cuenca exorreica de transición, con una superficie de 8.000 km<sup>2</sup>, que participa de características que la asemejan tanto a los ríos del norte árido como del semiárido (Errázuriz et al., 2000).

Respecto al clima, la comuna corresponde a un área clasificada como desértica y de muy baja pluviometría. Específicamente, se encuentra en un dominio árido subtropical, con amplios rangos de amplitud térmica y montos de precipitaciones del orden de los 19 mm anuales en la localidad de El Salvador.

Uno de los hitos más importantes en la historia de la comuna corresponde al inicio de las actividades del mineral El Salvador, en cuyo campamento se instalan unas 7.000 personas. Desde sus comienzos, a fines de la década de los '50, esta faena minera lanza sus desechos al río Salado, produciéndose el embancamiento de la bahía de Chañaral, situación que se revierte con el acopio de este tipo de desechos (relaves) en el tranque de relaves de 'Pampa Austral'.

### III. TRANQUE DE RELAVES PAMPA AUSTRAL

El tranque de Relaves Pampa Austral de la División El Salvador de CODELCO Chile está ubicado 18 km al norte de la ciudad de Diego de Almagro, comuna de Diego de Almagro, Región de Atacama (UTM 391402 E – 7095317 S). Comenzó sus operaciones el año 1989 y actualmente posee una superficie aproximada de 1.500 hectáreas, con tres muros de contención construidos en base a suelos de empréstito. El cierre del tranque está programado para el año 2021.

En un sector del tranque se forma una laguna de aguas claras, la que tiene una dimensión de entre 200 y 300 hectáreas. Las aguas de la laguna se evacúan a un canal de hormigón con capacidad de caudal de  $380 \text{ L s}^{-1}$ , a través de un sistema de bombas, el que recorre unos 16-18 km hasta la ciudad de Diego de Almagro. En este punto, las aguas claras eran antiguamente descargadas a la Quebrada del río Salado, donde seguían su curso hasta Caleta Palito, al norte del Puerto de Chañaral, donde eran descargadas al mar.

Cuando las aguas claras se descargaban al río Salado, estas se infiltraban unos pocos kilómetros al poniente de Diego de Almagro; se presumía que esas aguas eran las que afloraban en la localidad de El Salado, sin embargo una vez que se solicitó a la División Salvador eliminar la descarga de aguas claras al cauce del río Salado y se inició la entrega a terceros, esas aguas continuaron aflorando en igual cantidad en el sector El Salado.

El proyecto Ampliación Tranque Pampa Austral, IV Etapa, que dispone de una Resolución de Calificación Ambiental favorable (RCA N° 084, otorgada en Copiapó el 25 de octubre del año 2005), establece la continuidad de la descarga de las aguas claras a la quebrada del río Salado, con un caudal aproximado de 210 - 220 litros por segundo por períodos aproximados de 16 horas al día. Esta cuarta etapa de ampliación permitió a la División El Salvador seguir depositando relaves en Pampa Austral entre diciembre del 2005 y hasta diciembre del 2010.

Con la entrada en vigencia del Decreto Supremos N° 90 del 2001, que regula las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales, exigible a partir del 3 de Septiembre del 2006, la operación del depósito de relaves se enfrentó a una fuerte restricción en el manejo de la laguna de aguas claras del tranque. Esto motivó a la División Salvador a realizar un estudio detallado del manejo de la laguna y proyección del crecimiento del depósito, bajo las nuevas condiciones de operación hasta el cierre de la obra, programado a partir de Enero de 2012. Según la información disponible en la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS), el tranque de relaves Pampa Austral de la División Salvador ha presentado cero descarga desde Agosto del 2009.

La forma en la cual la División Salvador logró dar cumplimiento al requerimiento de cero descargas de aguas claras a la quebrada del río Salado fue a través de la entrega total del flujo a

terceros. Para ello, el año 2009, la División El Salvador sometió al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) una Declaración de Impacto Ambiental (DIA) del proyecto *Modificación Ampliación Tranque Pampa Austral, IV Etapa*. El objetivo de este proyecto era obtener la calificación ambiental para el desarrollo del proyecto tendiente a entregar la totalidad del flujo de las aguas claras a terceros. Esto, porque de acuerdo al Reglamento del SEIA, Título I, Art. 3, letra o7, deben ingresar al SEIA todos los proyectos de disposición de residuos industriales líquidos cuyos efluentes tratados se usen para riego, en atención a que el tranque de relaves se comporta como un sistema de tratamiento. Esta DIA fue aprobada a través de la Resolución de Calificación Ambiental (RCA) N° 016 del 24 de Enero del 2011 y la Resolución Exenta N° 188 del 2 de Junio de 2011 del Servicio de Evaluación Ambiental, III Región Atacama. La vida útil de estos Convenios o Contratos caduca en el mes de diciembre del año 2010 para los regantes y en el 2011 para minera Trinidad, los cuales podrán extenderse hasta la fecha cierre de las instalaciones de la línea de sulfuros de la División El Salvador.

Debido a que el recurso hídrico es limitado dentro de la Región de Atacama, las aguas claras del tranque han sido evaluadas en forma experimental para su uso en riego de cultivos (ej. claveles) en una estación experimental ubicada en Pampa Austral. Posteriormente, una parte de las aguas claras evacuadas desde el tranque (caudal medio mensual máximo de 210 litros por segundo, aproximadamente) han sido aprovechadas para el regadío de plantaciones experimentales de jojoba y olivos ( $146 \text{ L s}^{-1}$ ) en suelos salinos adyacentes al canal de aguas claras y en la localidad de Diego de Almagro, en parcelas pertenecientes a terceros. La otra parte de las aguas claras (caudal medio mensual máximo de  $16 \text{ L s}^{-1}$ ) ha sido suministrada a la Sociedad Contractual Minera Trinidad, una empresa minera de mediano tamaño ubicada en las cercanías de Diego de Almagro, para procesos industriales metalúrgicos. La materialización de estas entregas se ha realizado a través de Convenios de Cooperación y Contratos entre los terceros y la División. Actualmente (año 2012), se entrega un caudal de aguas claras de  $50 \text{ L s}^{-1}$  a la Sociedad Contractual Minera Trinidad y  $166 \text{ L s}^{-1}$  a los agricultores para sus plantaciones experimentales.

#### **IV. USO EXPERIMENTAL DE LAS AGUAS CLARAS TRANQUE DE RELAVES PAMPA AUSTRAL, CODELCO DIVISIÓN EL SALVADOR, PARA EL RIEGO DE CULTIVOS EN EL DESIERTO**

En el año 1998, en el marco de un contrato entre la División El Salvador y la empresa SOTGAR, se inició el trabajo de convertir parte del desierto en un vergel, el que comenzó con un proyecto de cultivo de claveles regados con las aguas claras del tranque de relaves Pampa Austral. Posteriormente, se incorporaron plantaciones de otros cultivos, para finalizar en cultivos de jojoba.

En el marco del Protocolo de Acuerdo con la Ilustre Municipalidad de Diego de Almagro de Noviembre del 2002 y la Declaración de Intenciones suscrita con el Gobierno Regional de fecha 30 de Mayo del 2003, La División Salvador de CODELCO Chile se comprometió con el desarrollo productivo de la comuna de Diego de Almagro, mediante el uso alternativo de las aguas claras provenientes del tranque de relaves Pampa Austral, mientras estas se encuentren disponibles (CODELCO Chile – División Salvador, 2009).

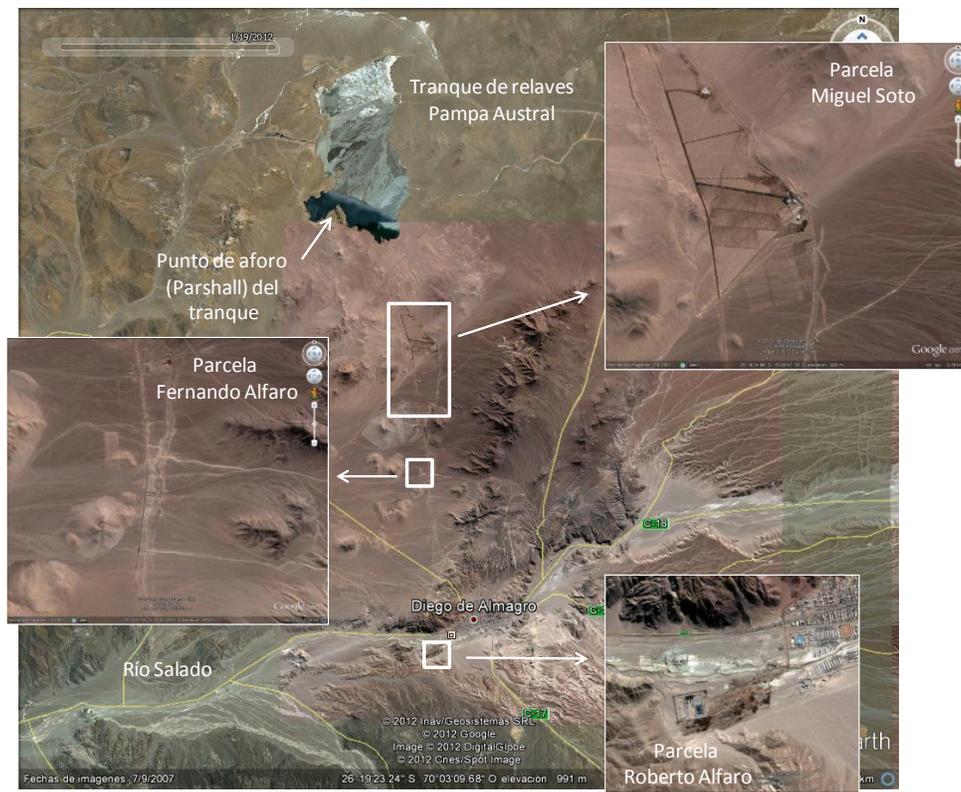
Posteriormente, el Proyecto *Modificación Ampliación Tranque Pampa Austral IV Etapa*, de la División El Salvador de CODELCO consideró la entrega total del flujo de aguas claras del tranque a terceros ubicados a lo largo de la canal de evacuación de aguas claras, entre el punto de aforo

(Parshall) a la salida del Tranque Pampa Austral y la ruta C-13 en el sector de Diego de Almagro. La materialización de estas entregas se ha realizado desde el 2009 a través de Convenios de Cooperación y Contratos entre los terceros y la División, los que son renovados anualmente.

Los terceros han estado usando las aguas claras para riego experimental de cultivos de jojoba y olivos en suelos salinos adyacentes al canal de aguas claras, y para procesos metalúrgicos de un proyecto minero de la mediana minería ubicado en las cercanías de la ciudad de Diego de Almagro (Minera Trinidad). Específicamente, los usuarios de estas aguas claras son (**Figura 1**):

- Sr. Miguel Ángel Soto García.
- S.M.C. Ltda. representada por Fernando Alfaro Olave.
- Sr. Roberto Alfaro Alfaro.
- Sociedad Contractual Minera Trinidad, representada por Sr. Robert George Kidd.

Al año 2009, la superficie total de riego experimental de cultivos era de 696 ha, las cuales eran distribuidas en tres regantes, correspondiendo su distribución a: Miguel Soto 500 ha, Fernando Alfaro (SMC) 176 ha y Roberto Alfaro 20 ha.



**Figura 1.** Ubicación de las parcelas experimentales de cultivos de jojoba y olivos regados con las aguas claras del tranque de relaves Pampa Austral, División El Salvador de CODELCO Chile, comuna de Diego de Almagro, Región de Atacama.

Estas parcelas con riego experimental buscan evaluar el potencial de utilizar las aguas claras provenientes del Tranque de Relave Pampa Austral en los cultivos de Jojoba y olivos de las áreas circundantes, sin generar riesgos a la población. Esta acción será evaluada mediante un plan de seguimiento realizado por profesionales calificados, durante todo el periodo que dure el proyecto, con el fin de determinar la efectividad de esta actividad. Además, el concepto experimental se basa en que ninguno de los productos generados en estos predios, serán utilizados para consumo humano, tanto directa, como indirectamente. Al respecto, en la Adenda 2 de la RCA del Proyecto *Modificación Ampliación Tranque Pampa Austral IV Etapa*, CODELCO Salvador declara su compromiso y atención a que los productos generados de los cultivos agrícolas regados con aguas claras de relave, no ingresarán a una cadena de consumo alimenticio humano directo e indirecto.

En el caso de las plantaciones de Jojoba el producto final será aceite industrial y en el caso de plantación de olivos, su utilización está orientada sólo a la mantención de áreas verdes.

La situación al año 2010 era la siguiente:

#### Proyecto de plantación de Miguel Angel Soto

Considera la utilización de las aguas claras en riego de 152 ha de cultivos experimentales de Jojoba en el desierto, para lo cual la División Salvador proporciona un máximo de  $50 \text{ L s}^{-1}$ , valor referencial que varía de acuerdo a los requerimientos y disponibilidad del recurso. Dicha entrega se realiza a través de 11 compuertas ubicadas a lo largo del Canal de Aguas Claras, las que se abren y cierran de acuerdo a los sectores que se desee regar. La canalización dentro del predio se realiza a través de surcos. La técnica de riego utilizada en el cultivo de jojoba es mediante surcos o riego tendido durante 16 horas al día.

#### Proyecto de plantación de Fernando Alfaro Olave

Se encuentra en vías de desarrollo y contempla la utilización de las aguas claras en riego de 176 ha de cultivos experimentales de jojoba en el desierto, para lo cual la División Salvador le proporciona un máximo de  $80 \text{ L s}^{-1}$ . Dicha entrega se realiza a través de una bocatoma cuyas coordenadas UTM son 7080267 E – 394559 S. La técnica de riego a ser utilizada es mediante surcos o riego tendido. Esta entrega se realiza siempre y cuando exista la disponibilidad del recurso.

#### Proyecto de plantación de Roberto Alfaro Alfaro

Considera la utilización de aguas claras en riego de 20 ha de cultivos experimentales de olivos, orientados a la mantención de áreas verdes, para lo cual la División Salvador proveerá al interesado un máximo de  $16 \text{ L s}^{-1}$ . Cuenta con un punto de entrega en el Canal Aguas, la cual tiene una válvula de regulación, que conecta una tubería que llega hasta el predio. La canalización dentro del predio se realiza a través de tubería, por goteo. Esta entrega se realiza siempre y cuando exista la disponibilidad del recurso.

La vigencia de estos 3 convenios es hasta el 31 de diciembre del 2010, los cuales podrán extenderse hasta la fecha cierre de las instalaciones de la línea de sulfuros de la División Salvador. Sólo 2 de estos 3 contratos han sido renovados en el año 2012.

La situación en el año 2012 es la siguiente:

#### Proyecto de plantación de Miguel Angel Soto

Considera la utilización de las aguas claras en riego de 120 ha de cultivos experimentales de jojoba en el desierto, para lo cual la División Salvador proporciona un máximo de  $100 \text{ L s}^{-1}$ . Sin embargo, debido a la baja en la producción de semillas de jojoba desde el año 2009 en adelante, también han realizado plantaciones de *Acacia saligna* (Aromo Australiano), con fines de generar bosquetes fijadores de gases invernadero.

#### Proyecto de plantación de Fernando Alfaro Olave

Esta plantación se encuentra bastante reducida en superficie y con mantención esporádica, debido a la muerte de algunos individuos y a la muy baja producción de frutos desde el año 2009 en adelante. La utilización de las aguas claras es esporádica, pero la División Salvador le proporciona un máximo de aprox.  $46 \text{ L s}^{-1}$ .

#### Proyecto de plantación de Roberto Alfaro Alfaro

Esta plantación se encuentra abandonada y los árboles de olivo están muertos. Ya no se entrega aguas claras a este proyecto. Los árboles habrían muerto debido a la falta de riego.

### **IV.1. Características químicas de las aguas claras**

El agua que abastece al proceso de la planta concentradora de la División Salvador deriva del salar de Pedernales, por lo que presenta en forma natural un contenido elevado de sales disueltas (e.j. cloruros  $1.141 \text{ mg L}^{-1}$ , sulfatos  $1.904 \text{ mg L}^{-1}$ ) y elementos traza (e.j. Boro  $11 \text{ mg L}^{-1}$ ), con alta conductividad ( $4.110 \text{ umhos cm}^{-1}$ ). Esta agua es, sin embargo, mezclada con aguas dulces antes de entrar a la planta de flotación, por lo que las concentraciones de estos compuestos son reducidas a los valores indicados en la **Tabla 1** (ver Agua Industrial Planta Flotación); esta agua, una vez que es utilizada en el proceso metalúrgico, da origen a las aguas claras del tranque Pampa Austral.

Las características químicas actuales (años 2010 y 2011) de las aguas claras del tranque de relaves Pampa Austral, en el punto de aforo del canal de aguas claras (punto de descarga desde el tranque al canal de evacuación) se sistematizan en la **Tabla 1**. En comparación a los valores de las aguas naturales entrantes a la planta concentradora, es posible inferir que el proceso de concentración altera el agua entrante a la planta, particularmente aumentando los valores de Molibdeno, Manganeseo, Arsénico, sulfatos, cloruros y conductividad en las aguas de salida de la planta, denominadas aguas claras (**Tabla 1 y Figura 2**).

En comparación a los valores límite establecidos en la Norma Chilena de Riego (NCh 1.333 de 1978, *Requisitos de Calidad del Agua para Diferentes Usos, punto sexto, Requisitos de Agua para Riego*), se observa que la concentración de Molibdeno (Mo) de las aguas claras es 100 veces mayor, la de cloruros ( $\text{Cl}^-$ ) es 14,4 veces mayor, la de sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y Boro (B) es 11,6 veces mayor, la de Bario (Ba) es 2,3 veces mayor y la de Manganeseo (Mn) es 1,3 veces mayor; adicionalmente, los valores de conductividad están muy por sobre el valor establecido en la NCh.1.333 (**Tablas 1 y 2**). De esta forma, los niveles B,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , Mn y Mo, además de los altos niveles de Na, de las aguas claras del tranque de relaves Pampa Austral exceden en promedio la NCh 1.333, por lo que ameritan usos con restricciones de acuerdo a determinadas

características del sitio específico (características fisicoquímicas del suelo, tolerancia de las especies vegetales, niveles de sulfatos para la asimilación del Molibdeno). Adicionalmente, diversos parámetros de las aguas claras superan los valores máximos establecidos para la descarga de residuos líquidos industriales a los cuerpos de agua marina y continentales superficiales (**Tabla 2**), establecidos en el Decreto Supremo (D.S.) N°90 (Ministerio Secretaría General de la presidencia, SEGPRES, *Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales*).

Según los resultados del Estudio Técnico para la Evaluación de Riesgo Toxicológico y de Bioacumulación de Metales en Cultivos de Jojoba y Olivos para Consumo Humano, realizado por CODELCO salvador el año 2010, las conclusiones más relevantes sobre el uso de estas aguas claras para riego de cultivos en suelos de la zona son las siguientes:

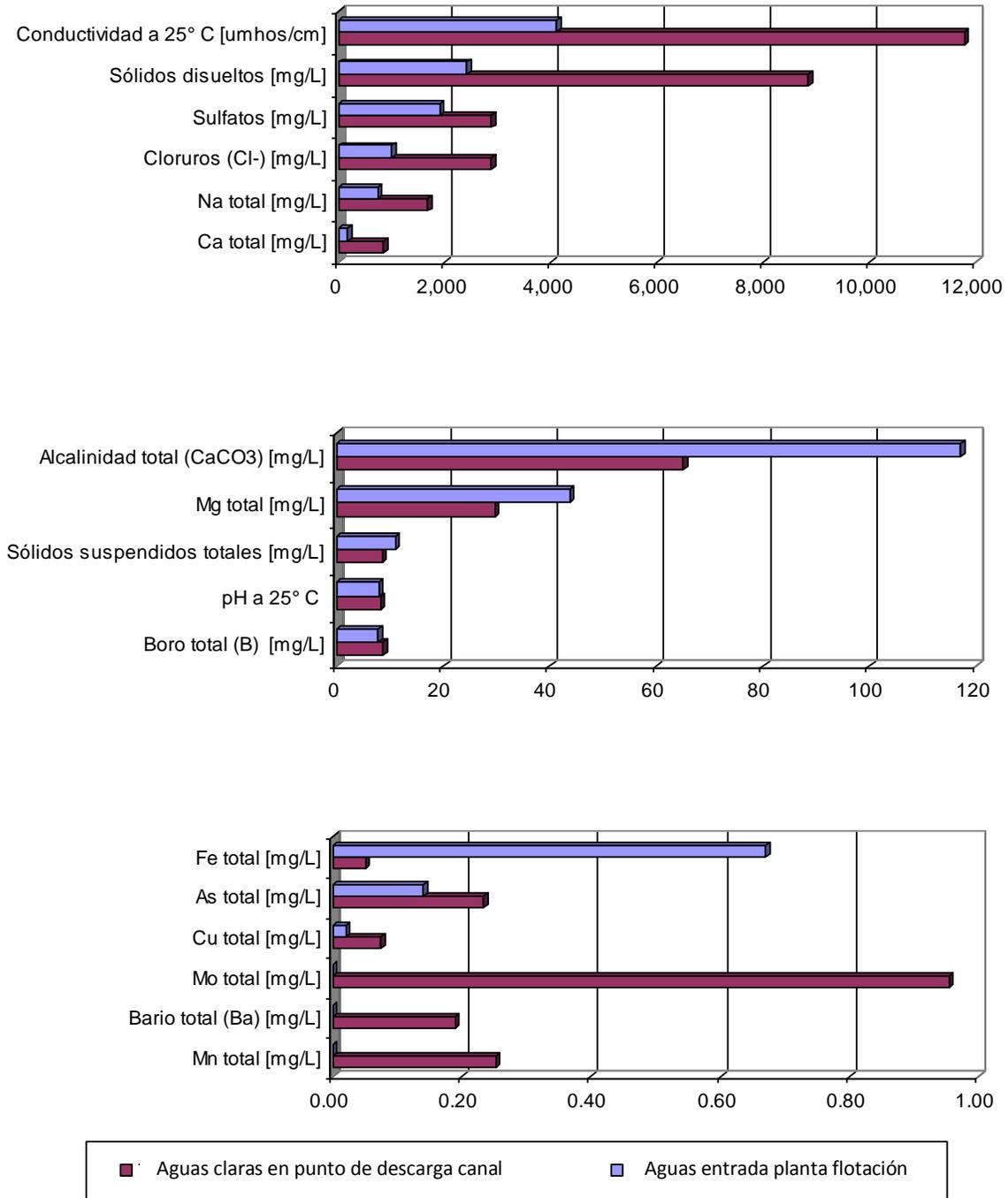
- ✓ Según el criterio del DWAF (Guía de Calidad de agua de Sudáfrica) utilizado como referencia internacional, las concentraciones de sales ( $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$ ) y de B presentan niveles con potencial tóxico en plantas y requieren el uso de cultivos tolerantes y suelos con características físico-químicas que limitan la disponibilidad de estos elementos.
- ✓ Según la misma fuente, los niveles de Mn presentan algún nivel de restricción en suelo y los niveles de Mo un nivel de restricción severo. El DWAF recomienda usar este tipo de agua solo en suelos de textura fina y de pH neutro a alcalino respecto a las concentraciones de Mn y en suelos textura fina y de pH ácido respecto a las concentraciones de Mo. En este contexto, los suelos de las parcelas experimentales presentan restricciones respecto a textura (esencialmente franco-arcillosa) y pH para del Mo.
- ✓ En relación con los niveles de salinidad y sodicidad, el agua clara presenta un grado de restricción severo en lo referido a su salinidad con un peligro muy alto de salinizar el suelo. En relación con el peligro de sodicidad, este tipo de agua no produciría problemas de infiltración en el suelo, atendiendo a los altos tenores de salinidad observados.

En razón a estos resultados cabe señalar que la Autoridad Sanitaria ha recomendado a los titulares de diversos proyectos que han considerado manejar sus efluentes tratados a través de riego de áreas verdes en sus instalaciones, el cumplimiento de la NCh 1.333 de 1978. Debido a que dicho manejo corresponde a una acción de disposición final de estos efluentes, la Autoridad Sanitaria no acepta que residuos industriales tratados, destinados a riego, que excedan los criterios de calidad de la NCh 1.333 se utilicen para riego de especies vegetales para consumo humano.

**Tabla 1.** Características químicas de las aguas claras del tranque de relaves Pampa Austral, CODELCO División Salvador, en el punto de aforo del canal de aguas claras, y de las aguas del río Salado. Se muestra los valores promedio y la desviación estándar para muestras tomadas trimestralmente entre los años 2010 y 2011. Fuente: CODELCO-División El Salvador.

Parámetro	L.D.**	Unidad	Aforo Canal de Aguas Claras			Río Salado *			Agua Industrial Planta Flotación****	NCh 1333 Agua de riego
			Promedio	DS	N***	Promedio	DS	N***		
Aceites y grasas	10	mg/L	< 10	0	4	< 10	0,00	4	-	-
Alcalinidad total (CaCO3)	0,2	mg/L	65,0	14,58	4	73,5	9,98	4	117	-
Al total	0,05	mg/L	0,060	0,04	4	0,041	0,03	4	-	5
As total	0,001	mg/L	0,234	0,05	4	0,023	0,03	4	0,14	0,1
Bario total (Ba)	0,1	mg/L	0,190	0,14	4	0,170	0,17	4	< 0,1	4
Berilio total (Be)	0,01	mg/L	< 0,01	0,00	4	0,023	0,02	4	-	0,1
Boro total (B)	0,01	mg/L	8,7	1,12	4	42,3	20,60	4	7,76	0,75
Cd total	0,01	mg/L	0,001	0,00	4	0,171	0,28	4	-	0,01
Ca total	0,01	mg/L	849,5	288,74	4	825,3	333,00	4	163,95	-
Cianuro total (CN-)	0,05	mg/L	0,149	0,25	4	< 0,05	0,00	4	-	0,2
Zn total	0,01	mg/L	0,040	0,01	4	0,060	0,06	4	-	2
Cloruros (Cl-)	5	mg/L	2879	350,42	4	45670	2087,16	4	990	200
Co total	0,05	mg/L	< 0,05	0,00	4	< 0,05	0,00	4	-	0,05
Cu total	0,01	mg/L	0,075	0,03	4	0,230	0,18	4	0,02	0,2
Conductividad a 25° C	1	umhos/cm	11795	816,44	4	104625	3748,22	4	4110	<1500 *****
Cromo total	0,05	mg/L	< 0,05	0,00	4	0,055	0,03	4	-	0,1
Hidrocarburos fijos	10	mg/L	< 10	0,00	4	< 10	0,00	4	-	-
Fe total	0,01	mg/L	0,050	0,04	4	0,5	0,60	4	0,67	5
Fe disuelto		mg/L	-	-	-	-	-	-	< 0,01	-
Mg total	0,01	mg/L	29,7	15,84	4	774	162,41	4	43,8	-
Mn total	0,01	mg/L	0,253	0,12	4	0,040	0,07	4	< 0,01	0,2
Hg total	0,001	mg/L	< 0,001	0,00	4	< 0,001	0,00	4	-	0,001
Mo total	0,001	mg/L	1,0	0,78	4	0,067	0,09	4	< 0,1	0,01
Ni total	0,05	mg/L	< 0,05	0,00	4	< 0,05	0,00	4	-	0,2
pH a 25° C	0,1		8,3	0,17	4	7,6	0,12	4	7,98	5,5 - 9,0
Pb total	0,05	mg/L	< 0,05	0,00	4	0,220	0,31	4	-	5
Na total	0,01	mg/L	1679	187,99	4	26895	1776,22	4	732	-
Sólidos disueltos	5	mg/L	8846	500,32	4	61453	35822,95	4	2410	-
Sólidos sedimentables	0,5	mL/L	< 0,5	0,00	4	0,375	0,14	4	-	-
Sólidos suspendidos totales	5	mg/L	8,6	4,58	4	47,6	44,78	4	11	-
Sulfatos	10	mg/L	2883	304,91	4	2933	446,48	4	1904	250
Sulfuro total	0,2	mg/L	< 0,2	0,00	4	< 0,2	0,00	4	-	-
Vanadio total	0,1	mg/L	< 0,1	0,00	4	< 0,1	0,00	4	-	0,1

\* Aguas 'naturales' derivadas de un dren artificial construido en el Salar de Pedernales en 1930.  
\*\* L.D., límite de detección.  
\*\*\* N corresponde a muestreos trimestrales realizados en los años 2010 y 2011  
\*\*\*\* Estas aguas corresponden a una mezcla en partes iguales de agua dulce y agua natural que abastecería el Río Salado  
\*\*\*\*\* Limite máximo de conductividad para agua de riego, la que puede tener algunos efectos negativos en cultivos sensibles.  
NCh 1333, Norma Chilena para calidad de aguas con distintos usos (sólo se considera aquí las aguas para riego)



**Figura 2.** Comparación de la calidad de las aguas antes y después de la planta concentradora de minerales de cobre en la División Salvador de CODELCO.

**Tabla 2.** Parámetros relevantes de las aguas naturales de entrada a la planta de concentración de minerales de CODELCO Salvador y de las aguas claras del tranque Pampa Austral en el punto de descarga al canal de evacuación.

Prámetro	Unidad	NCh 1333, para riego	Valores Máximos DS 90	Agua Industrial Planta Flotación			Aforo Canal de Aguas Claras		
				Valor	Excede NCh 1.333	Excede DS 90	Valor	Excede NCh 1.333	Excede DS 90
Mo total	[mg/L]	0.01	1	0	no	no	0.96	sí	no
As total	[mg/L]	0.1	0.5	0.14	sí	no	0.23	sí	no
Boro total	[mg/L]	0.75	0.75	7.76	sí	sí	8.70	sí	sí
Cloruros (Cl-)	[mg/L]	200	400	990	sí	sí	2879	sí	sí
Sulfatos	[mg/L]	250	1000	1904	sí	sí	2883	sí	sí
Conductividad a 25° C	[umhos/cm]	<1500	-	4110	sí	no	11795	sí	no
Mn total	[mg/L]	0.2	0.3	0	no	no	0.25	sí	no

#### IV.2. Caudal de aguas claras

El caudal medio actual de las aguas claras del tranque de relaves Pampa Austral es de 210 L s<sup>-1</sup>, por períodos aproximados de 16 h/día, los cuales han sido distribuidos y establecidos en los respectivos convenios/contrato con terceros.

El agua es conducida por una canal de media sección de fibrocemento, con un caudal máximo de 380 L s<sup>-1</sup>; el sistema de bombas como el canal de aguas claras no tiene capacidad para entregar más de 210 L s<sup>-1</sup>.

#### IV.3 Disponibilidad temporal de las aguas claras

La disponibilidad temporal de las aguas claras para los regantes se estima hasta la fecha de cierre de las instalaciones de la línea de sulfuros de División Salvador (año 2021) y/o hasta que no sea factible la extracción de las aguas claras provenientes de la poza del depósito.

El uso de las aguas claras en riego experimental de cultivos de jojoba y olivos está sujeto al término de las operaciones mineras de División Salvador, en el marco del Protocolo de Acuerdo con la Ilustre Municipalidad de Diego de Almagro de Noviembre de 2002 y la Declaración de Intenciones suscritas con el Gobierno Regional de fecha 30 de mayo de 2003.

#### IV.4 Parcelas experimentales de Jojoba y olivos

El año 2010, CODELCO Salvador realizó el "Estudio Técnico para la Evaluación de Riesgo Toxicológico y de Bioacumulación de Metales en Cultivos de Jojoba y Olivos para Consumo Humano" contenido en la Adenda 1 de la RCA. Según los resultados de ese estudio, las conclusiones más relevantes para los componentes suelo y cultivos vegetales son:

- ✓ Los niveles de pH del suelo se encuentra por sobre 7,8 unidades, que corresponde al valor crítico para la mayoría de los cultivos, en cuanto a que pueden observarse problemas de deficiencia o exceso a partir de este valor. El pH observado, en consecuencia, sitúa a los suelos del área de estudio en una condición edáfica alcalina general.
- ✓ Según antecedentes para la zona norte de Chile, se puede observar que el contenido total de boro del suelo se encuentra en torno al máximo esperado. El contenido total de cobre en los suelos es particularmente variable respecto del lugar de muestreo, superando en la parcela E2 los niveles esperados. Por su parte, en ningún caso el manganeso total alcanza niveles o concentraciones por sobre el valor máximo esperado. Respecto al molibdeno, en la mayoría de las muestras sus niveles son bajos y se observa algunos aumentos puntuales difíciles de relacionar con los aportes del agua clara utilizada en riego.
- ✓ En cuanto a lo observado en suelos de cultivos se observan mayores contenidos totales de boro y manganeso en parcelas de Jojoba respecto a los suelos testigos que podrían atribuirse a la calidad del agua de riego, en el sentido que ésta presenta un alto aporte químico relacionado con estos micro elementos.
- ✓ Respecto a los niveles disponibles, se observa que las concentraciones del boro, cobre y manganeso son superiores en las parcelas experimentales en relación con los testigos asociados, con una diferencia marcada para el manganeso en las tres parcelas y para el boro en las parcelas de jojoba (E1 y E2). En términos relativos, se observa un aumento del porcentaje de disponibilidad para los tres elementos anteriormente citados. Este aumento de disponibilidad podría atribuirse a los aportes provenientes del agua clara del Tranque Pampa Austral utilizada como fuente de riego y generar aumento de absorción en plantas regadas.
- ✓ En relación con las semillas de jojoba, se destaca que el molibdeno presenta niveles inferiores al límite analítico para todas las muestras analizadas. El manganeso presenta niveles similares en parcela experimental y testigo. Los niveles de cobre presentan fluctuaciones más marcadas sin presentar un patrón de comportamiento significativo. Al contrario, los niveles de boro presentan niveles superiores en parcelas experimentales en relación con los testigos (factor de 2,3 en promedio). Esta acumulación significativa de boro en parcelas experimentales refleja los altos niveles de disponibilidad del elemento en suelo (11,74 y 10,35 mg kg<sup>-1</sup> en J1 y J2 respectivamente) en relación con el niveles de la parcela testigo (2 mg kg<sup>-1</sup>). Por otra parte, se concluye que los niveles de boro, cobre y manganeso observados son bajo los niveles esperados indicados en la bibliografía.
- ✓ Respecto a los frutos de olivo, se destaca que el molibdeno presenta niveles inferiores al límite analítico para todas las muestras analizadas. El cobre y el manganeso presentan niveles similares en parcela experimental y testigo. Al contrario, los niveles de boro

presentan niveles superiores en parcela experimental en relación con la parcela testigo (factor de 4,5). Los niveles de molibdeno y cobre se encuentran dentro del rango esperado para frutos de la parcela experimental y testigo. Los rangos de manganeso se encuentran en la cercanía del nivel máximo esperado en ambas parcelas. Para el caso del boro, los niveles en frutos de la parcela experimental supera del orden de 2,6 veces este límite pero se encuentran dentro del rango esperado en la parcela testigo. Esta acumulación significativa de boro en parcela experimental refleja el alto nivel de disponibilidad del elemento en suelo ( $11,07 \text{ mg kg}^{-1}$ ) en relación con el nivel de la parcela testigo ( $2,65 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Navarro y Navarro (2003) indica como referencia de boro disponible en suelo un rango incluido entre  $0,4$  y  $5 \text{ mg kg}^{-1}$ , este antecedente indica que la fracción disponible del elemento en la parcela experimental es alta.

Según estos resultados, CODELCO Salvador se ha comprometido a que se establecerá un conjunto de parcelas permanentes en los predios sometidos a riego en las cuales se tomarán muestras de tejidos, las que deberán ser enviadas a un laboratorio certificado. Con los resultados se emitirá informe respectivo y se podrá generar un detalle histórico del comportamiento de especies y sus componentes al ser regadas con aguas claras de relave. Dependiendo de la evolución que presenten las variables ambientales relevantes, como presencia de metales pesados Mo, Mn, Cu, Fe, As y B, mortandad de plantas a consecuencia de valores de registro de elementos, cuya medición y evaluación de resultados de los indicadores se incluirán en el Programa de Seguimiento del proyecto, durante toda la vida útil de éste, CODELCO Salvador definirá si el proyecto de riego experimental se mantendrá operativo.

El estudio técnico de hidrogeología realizado por CODELCO Salvador el año 2010 e incluido en la Adenda 1 de la RC del proyecto, concluyó que:

- ✓ En las parcelas experimentales de Miguel Soto y de Fernando Alfaro no se encontró un nivel freático en los sondajes de exploración de las zonas de estudio, por lo que no existen aguas subterráneas en estas parcelas de estudio.
- ✓ En la parcela de Roberto Alfaro, se ha estimado que la profundidad del nivel freático se encuentra a unos 50 m de profundidad. Las aguas subterráneas de esta zona son de tipo cloruradas sódicas, con CE que varían entre 90.000 y 360.000  $\mu\text{mhos/cm}$  y pH entre 6,9 y 7,6. Los análisis de las muestras de aguas provenientes de esta napa, demuestran que corresponden a aguas no potables y no destinadas a consumos humanos, por lo que de existir infiltración de las aguas de riego a las napas, no se altera la calidad de éstas ni se afecta la salud de las personas.

Según esos resultados, el Proyecto se comprometió a incluir un *Programa de Seguimiento del Estudio Técnico* indicado en la Adenda 2 de la RCA. Este estudio considera la medición de la infiltración de aguas a través de mediciones en calcatas con periodicidad trimestral; en estas verificaciones, en caso de evidenciarse una infiltración igual o superior a 15 m, se debe detener el regadío por un período con el fin de evitar que continúe la infiltración. Estas calcatas se deben ubicar dentro de las 20 hectáreas del predio del señor Roberto Alfaro.

Actualmente, al año 2012, la plantación de olivos está abandonada y los árboles se encuentran muertos. Las plantaciones experimentales de jojoba no han tenido el éxito esperado inicialmente, debido a que aunque hubo una primera producción de frutos y semillas, en los años posteriores la producción de frutos y semillas ha sido muy baja e insuficiente para mantener un sistema productivo. Podría existir diversidad de causas para explicar esta situación. Dentro de las explicaciones más probables estarían problemas del manejo de riego por inundación, ocurrencia de heladas en la época de floración y estadios iniciales de desarrollo de los frutos, salinización del suelo, entre otros. Este problema se evalúa en mayor profundidad en el objetivo específico 4.

## **2. REVISIÓN DE NORMATIVAS PERTINENTES**

### **2.1 Metodología:**

Se realizó una recopilación de antecedentes a nivel nacional relacionados con las normativas de calidad de agua para riego y de descargas de riles industriales en cursos de agua en Chile.

### **2.2 Resultados:**

La información más relevante recabada sobre las normativas relacionadas con la calidad de agua para riego y descargas de riles industriales en cursos de agua en Chile se sistematiza a continuación.

## **I. NORMAS JURÍDICAS GENERALES**

- **Constitución Política de la República de Chile:**
  - Garantiza el derecho a la vida y a la integridad física y psíquica de la persona. Esto implica derecho a la salud.
  - Garantiza el derecho a vivir en un medio ambiente libre de contaminación y se consagra el deber del Estado de velar porque dicho derecho no se afecte y de tutelar la preservación de la naturaleza.
  - Garantiza el derecho a desarrollar cualquier actividad económica, respetando las normas legales que regulan su ejercicio, incluyendo normas sanitarias y ambientales, entre otras.
  
- **Ley N° 19.300 (1994) sobre Bases Generales del Medio Ambiente:**
  - Es responsabilidad de la CONAMA, a través de las Comisiones Regionales de Medio Ambiente (COREMAS) coordinar la generación de las normas de calidad ambiental, tanto primarias como secundarias, a cuyo efecto debe contar con el concurso del Ministerio de Salud, si se trata de las primarias, y del ministerio sectorial que corresponda (Agricultura, Minería, etc.) si se trata de las secundarias. Además, debe coordinar la generación de normas de emisión, de los planes de prevención y de descontaminación cuando ello sea procedente según la ley.

- **Código de aguas:** este cuerpo legal permite la constitución de derechos de aprovechamiento sobre las aguas y regula la forma en que éstos se deben constituir. Las regulaciones principales, aparte de los aspectos de carácter administrativo, dicen relación con la cantidad y calidad de las aguas.
  - o El artículo 14 dispone que el derecho de aprovechamiento de aguas no consuntivo es aquel que permite emplear el agua sin consumirla y obliga a restituirla en la forma que lo determine el acto de adquisición o de constitución del derecho. Agrega que la extracción o restitución de las aguas se hará siempre en forma que no perjudique los derechos de terceros constituidos sobre las mismas aguas, en cuanto a su cantidad, calidad, substancia, oportunidad de uso y demás particularidades. Esto no aplica al derecho de aprovechamiento consuntivo, ya que está concebido para que el titular consuma toda el agua a que tiene derecho, sin obligación de devolver nada de agua. Sin embargo, se da frecuentemente en estos últimos casos que los titulares devuelven el sobrante no ocupado (en forma directa o indirecta, como infiltración) al cauce o masa de agua.

## II. NORMAS JURÍDICAS ESPECÍFICAS

- **Norma Chilena Oficial (NCh) 1.333 - Requisitos de calidad de agua para diferentes usos** <sup>1</sup>. Esta norma fue elaborada y dictada en el año 1978 por el Instituto Nacional de Normalización (INN-Chile), órgano encargado del estudio y preparación de las normas técnicas a nivel nacional. La NCh 1.333, sobre requisitos de calidad de aguas; no es jurídicamente una norma de calidad ambiental, sino un estándar para el uso del agua. Esta norma contempla diferentes criterios (científicos) de calidad del agua según el uso que se les asigne a dichas aguas, con el objeto de proteger y preservar la calidad de las aguas que se destinen a usos específicos, de la degradación producida por la contaminación

**Es importante destacar que esta norma debe aplicarse únicamente a aquellas aguas con residuos contaminantes destinadas a ser vaciadas en masas o cursos de aguas, lugares donde precisamente se capturan las aguas destinadas a riego y a consumo humano y de animales o de otro uso definido en la norma.** Por ende, esta norma establece una exigencia de calidad de las aguas que debe darse necesariamente por relación de dos factores: vaciamiento de aguas con residuos contaminantes o masas o cursos de agua y el uso específico que se les dará a esas aguas. De esta forma, el ámbito de protección de esta norma consiste en establecer diferentes requisitos de calidad de las aguas de acuerdo al uso específico que se les dará, partiendo de la base que son captadas desde los cursos o masas de agua naturales. Los diferentes usos de las aguas implican el cumplimiento de determinados estándares de calidad, lo cual se manifiesta en las diversas concentraciones que se especifican para distintos elementos químicos. Dentro de los usos del agua que se aplica a esta norma se señala el agua de riego. En este caso, los estándares de calidad definidos están destinados a proteger la vida humana.

**Es importante enfatizar que quien tiene derecho de aprovechamiento consuntivo de aguas (ej. derecho de aprovechamiento no consuntivo de las aguas de CODELCO**

---

<sup>1</sup> Documentos revisados: (a) Instituto Nacional de Normalización. 1999. NCh 1.333.de 78. Requisitos de calidad del agua para diferentes usos. 9 p. (b) del Fávoro G & Katz R. 1998. El uso de normas de calidad y de emisión en la gestión de los recursos hídricos. Estudios Públicos 69: 85-104

**Salvador), tiene la obligación de restituir las aguas en la misma cantidad y con la misma calidad que las extrajo, cumpliendo además con los requisitos de calidad de las aguas de acuerdo a la NCh 1.333.** Carece de racionalidad económica hacer cumplir determinadas calidades de agua si éstas varían fuertemente dependiendo del uso que se les dará, al margen de la calidad natural disímil que puede presentar el recurso hídrico en el cuerpo o masa de agua de que se trate. O sea, existen restricciones de uso de carácter natural de los recursos hídricos existentes en el país, las que deben ser conjugadas con el carácter de bien nacional de uso público que las aguas tienen mientras se encuentren en sus cauces, ya que ello genera ciertos derechos de las personas sobre las aguas.

El término 'riego' usado en esta norma no está definido y se utiliza en su sentido genérico y natural. Por lo tanto, no se especifica a qué tipo de riego se refiere y, en principio, se aplicaría a todo tipo de plantaciones, lo que obviamente significa que deben ser valores promedio y que, por lo tanto, deberían ser sujeto de análisis en función de lo que se regaría y dónde se regaría. Sin embargo, a partir del uso que se da a la norma, su finalidad última, el numerando 6° de la NCh Oficial N° 1.333 se aplicaría únicamente al agua para riego de usos agrícolas u hortifrutícolas. Esto es, para el riego de cultivos destinados a producir alimentos para el consumo humano o de animales, que luego son utilizados para el consumo humano. Por ende, se trata de prevenir procesos de contaminación que pudieran poner en riesgo la vida o salud de las personas.

La tabla 1 del numerando 6° (mostrada más abajo) establece las concentraciones máximas de elementos químicos en el agua para riego. Estas concentraciones son altamente exigentes, en consideración a que el ámbito de protección de la norma es la vida y salud de las personas. En consecuencia, si en la práctica no se diera un "riego" en el sentido que lo trata la NCh N° 1.333, esto es, un riego destinado a cultivos agrícolas y hortifrutícolas para el consumo humano (sea directa o indirectamente) o estas aguas no fueran vaciadas a masas o cursos de aguas de las cuales se captarán aguas para el riego de cultivos agrícolas u hortifrutícolas destinados al consumo humano, esta norma no sería aplicable, y además no operaría en este caso como norma de calidad ambiental.

La NCh 1.333 fue declarada norma oficial según el D.S. N° 867 del Ministerio de obras públicas el 05/07/1978, modificado por el D.S. N° 105 del Ministerio de Obras Públicas el 22/05/1987.

Los requisitos químicos del agua para riego establecidos por esta normativa son:

- ✓ El agua de riego debe tener un pH comprendido entre 5.5 y 9.0
- ✓ Concentraciones máximas de elementos químicos en agua para riego

El Ministerio de Obras Públicas puede autorizar valores mayores o menores para los límites máximos, mediante resolución fundada para casos calificados.

- ✓ Relación de adsorción de sodio. La autoridad competente debe establecerla en cada caso específico
- ✓ Conductividad específica y sólidos disueltos totales. Clasificación de aguas de riego según su salinidad.

Elemento		Unidad	Límite máximo
Aluminio	(Al)	mg/l	5.00
Arsénico	(As)	mg/l	0.10
Bario	(Ba)	mg/l	4.00
Berilio	(Be)	mg/l	0.10
Boro	(B)	mg/l	0.75
Cadmio	(Cd)	mg/l	0.010
Cianuro	(CN <sup>-</sup> )	mg/l	0.20
Cloruro	(Cl <sup>-</sup> )	mg/l	200.00
Cobalto	(Co)	mg/l	0.050
Cobre	(Cu)	mg/l	0.20
Cromo	(Cr)	mg/l	0.10
Fluoruro	(F)	mg/l	1.00
Hierro	(Fe)	mg/l	5.00
Litio	(Li)	mg/l	2.50
Litio (cítricos)	(Li)	mg/l	0.075
Manganeso	(Mn)	mg/l	0.20
Mercurio	(Hg)	mg/l	0.001
Molibdeno	(Mo)	mg/l	0.010
Níquel	(Ni)	mg/l	0.20
Plata	(Ag)	mg/l	0.20
Plomo	(Pb)	mg/l	5.00
Selenio	(Se)	mg/l	0.020
Sodio porcentual	(Na)	%	35.00
Sulfato	(SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> )	mg/l	250.00
Vanadio	(V)	mg/l	0.10
Zinc	(Zn)	mg/l	2.00

Clasificación	Conductividad específica, c, $\mu$ mhos/cm a 25°C	Sólidos disueltos totales, s, mg/L a 105°C
Agua con la cual generalmente no se observarán efectos perjudiciales.	c < 750	s < 500
Agua que puede tener efectos perjudiciales en cultivos sensibles.	750 < c < 1500	500 < s < 1000
Agua que puede tener efectos adversos en muchos cultivos y necesita de métodos de manejo cuidadosos.	1500 < c < 3000	1000 < s < 2000
Agua que puede ser usada para plantas tolerantes en suelos permeables con métodos de manejo cuidadosos.	3000 < c < 7500	2000 < s < 5000

- **D.S. N°90 (Ministerio Secretaría General de la presidencia, SEGPRES) - Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales.**

Este Decreto Supremo fue promulgado el 30 de Mayo del 2000, con fecha de publicación en el Diario Oficial del 7 de Marzo del 2001, fecha en la cual entró en vigencia. Existe una única versión de este DS. Tiene como objetivo de protección ambiental prevenir la contaminación de las aguas marinas y continentales superficiales de la República, mediante el control de los contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a cuerpos receptores. Esta norma se aplica a todo el territorio nacional.

Establece la concentración máxima de contaminantes permitida para los residuos líquidos descargados por las fuentes emisoras (ver tabla más abajo), a los cuerpos de agua marina y continentales superficiales. Sin embargo, esta normativa estipula que ***Si el contenido natural y/o de captación de un contaminante excede al exigido en esta norma, el límite máximo permitido de la descarga será igual a dicho contenido natural y/o de captación.*** También considera los procedimientos medición y control de las descargas.

Los organismos fiscalizadores del cumplimiento de la norma son: Superintendencia de Servicios Sanitarios (SSIS), Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (DIRECTEMAR) y los Servicios de Salud.

Según el decreto, **contenido natural** se define como la concentración de un contaminante en el cuerpo receptor, que corresponde a la situación original sin intervención antrópica más las situaciones permanentes, irreversibles o inmodificables de origen antrópico. **Contenido de captación** se define como la concentración media del contaminante, presente en la captación de agua de la fuente emisora, siempre y cuando dicha captación se realice en el mismo cuerpo de agua donde se produzca la descarga. Este contenido debe ser informado por la fuente emisora a la Dirección general de Aguas (DGA).

Las fuentes emisoras pueden aprovechar la capacidad de dilución del cuerpo receptor.

Las fuentes emisoras existentes al momento de la entrada en vigencia de esta normativa deberán cumplir con los límites máximos permitidos, a contar del quinto año de la entrada en vigencia del presente decreto, salvo aquellas que a la fecha de entrada en vigencia del mismo, tengan aprobado por la autoridad competente y conforme a la legislación vigente, un cronograma de inversiones para la construcción de un sistema de tratamiento de aguas residuales, en cuyo caso el plazo de cumplimiento de esta norma será el que se encuentre previsto para el término de dicha construcción.

LÍMITES MÁXIMOS PERMITIDOS PARA LA DESCARGA DE RESIDUOS LÍQUIDOS A CUERPOS DE AGUA FLUVIALES

Contaminantes		Unidad	Límite máximo permitido
Aceites y grasas	A y G	mg/l	20
Aluminio	Al	mg/l	5.00
Arsénico	As	mg/l	0.50
Boro	B	mg/l	0.75
Cadmio	Cd	mg/l	0.01
Cianuro	CN <sup>-</sup>	mg/l	0.20
Cloruros	Cl <sup>-</sup>	mg/l	400
Cobre total	Cu)	mg/l	1
Coliformes fecales oTermotolerantes	NMP/100ml	Coli/100ml	1000
Indice de fenol	Fenoles	mg/l	0.5
Cromo hexavalente	Cr <sup>+6</sup>	mg/l	0.05
DBO <sub>5</sub>	DBO <sub>5</sub>	mg O <sub>2</sub> /l	35 *
Fósforo	P	mg/l	10
Fluoruro	F <sup>-</sup>	mg/l	1.5
Hidrocarburos fijos	HF	mg/l	10
Hierro disuelto	Fe	mg/l	5
Manganeso	Mn	mg/l	0.3
Mercurio	Hg	mg/l	0.001
Molibdeno	Mo	mg/l	1
Níquel	Ni	mg/l	0.2
Nitrógeno total Kjeldahl	NKT	mg/l	50
Pentaclorofenol	C <sub>6</sub> OHCl <sub>5</sub>	mg/l	0.009
pH	pH	unidad	6.0 – 8.5
Plomo	(Pb)	mg/l	0.05
Poder espumógeno	PE		7
Selenio	Se	mg/l	0.01
Sólidos suspendidos totales	SS	%	80 *
Sulfatos	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	mg/l	1000
Sulfuros	S <sup>-2</sup>	mg/l	1
Temperatura	T	°C	35
Tetracloroetano	C <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub>	mg/l	0.04
Tolueno	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub>	mg/l	0.7
Tricloroetano	CHCl <sub>3</sub>	mg/l	0.2
Xileno	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	mg/l	0.5
Zinc	Zn	mg/l	3

### III. ANTECEDENTES COMPLEMENTARIOS

- **Guía CONAMA para el establecimiento de las normas secundarias de calidad ambiental para aguas continentales superficiales y marinas. CONAMA 2006.**
  - ✓ Objetivo principal optimizar los resultados obtenidos del proceso de elaboración de: Norma de calidad para la protección de las aguas continentales superficiales  
Anteproyecto de la norma de calidad de aguas marinas.
  - ✓ Servir de base técnica para la elaboración de las normas secundarias de calidad de aguas del país.

Considera los criterios nacionales específicos para el establecimiento de las normas secundarias de calidad ambiental para la protección de las aguas continentales superficiales. Los valores a considerar tendrán por objetivo proteger, mantener o recuperar la calidad de las aguas continentales superficiales y dentro de los objetivos específicos esta proteger la calidad de las aguas para riego de manera de conservar los suelos y las especies vegetales. Los valores máximos y mínimos que se deben considerar son los indicados en la tabla de más abajo.

También indica las clases de calidad que se deben considerar

- a) Excepcional: Indica un agua de mejor calidad que la Clase 1, que por su extraordinaria pureza y escasez, forma parte única del patrimonio ambiental de la República.
- b) Clase 1: Muy buena calidad. Indica un agua adecuada para la protección y conservación de las comunidades acuáticas, para el riego irrestricto y para los usos comprendidos en las clases 2 y 3.
- c) Clase 2: Buena calidad. Indica un agua adecuada para el desarrollo de la acuicultura, de la pesca deportiva y recreativa, y para los usos comprendidos en la Clase 3.
- d) Clase 3: Regular calidad. Indica un agua adecuada para bebida de animales y para riego restringido.
- e) Clase 4: Agua de mala calidad, no apta para riego

En el caso que la calidad natural de un cuerpo o curso de agua sea inferior a la Clase 3, deberá ser protegido hasta el valor de su calidad natural.

	Grupo de compuestos o elementos	Unidad	Clase de excepción	Clase 1	Clase 2	Clase 3
<b>INDICADORES FÍSICOS Y QUÍMICOS</b>						
1.	Conductividad eléctrica	μS/cm	< 600	750	1500	2250
2.	DBO <sub>5</sub>	mg/L	< 2	5	10	20
3.	Color aparente	Pt-Co	<16	20		
4.	Oxígeno Disuelto	mg/L	>7.5	7.5		
5.	pH	Unidad	6.5 – 8.5	6.5 – 8.5	6.5 – 8.5	6.5 – 8.5
6.	RAS	-	<2.4	3	6	9
7.	Sólidos disueltos	mg/L	<400	500	1000	1500
8.	Sólidos suspendidos	mg/L	<24	30	50	80
9.	Temperatura	ΔT°C	<0.5	1.5	1.5	3
<b>INORGÁNICOS</b>						
10.	Amonio	mg/L	<0.5	1	1.5	2.5
11.	Cianuro	μg/L	<4	5	10	50
12.	Cloruro	mg/L	<80	100	150	200
13.	Fluoruro	mg/L	<0.8	1	1.5	2
14.	Nitrito	mg/L	<0.05	0.06	>0.06	>0.06
15.	Sulfato	mg/L	<120	150	500	1000
16.	Sulfuro	mg/L	<0.04	0.05	0.05	0.05
<b>METALES ESENCIALES (disuelto)</b>						
45.	Boro	mg/L	<0.4	0.5	0.75	0.75
46.	Cobre	μg/L	<7.2	9	200	1000
47.	Cromo total	μg/L	<8	10	100	100
48.	Hierro	mg/L	<0.8	1	5	5
49.	Manganeso	mg/L	<0.04	0.05	0.2	0.2
50.	Molibdeno	mg/L	<0.008	0.01	0.15	0.5
51.	Níquel	μg/L	<42	52	200	200
52.	Selenio	μg/L	<4	5	20	50
53.	Zinc	mg/L	<0.096	0.120	1	5
<b>METALES NO ESENCIALES (disuelto)</b>						
54.	Aluminio	mg/L	<0.07	0.09	0.01	5
55.	Arsénico	mg/L	<0.04	0.05	0.1	0.1
56.	Cadmio	μg/L	<1.8	2	10	10
57.	Estaño	μg/L	<4	5	25	50
58.	Mercurio	μg/L	<0.04	0.05	0.05	1
59.	Plomo	mg/L	<0.002	0.0025	0.2	5

- **Guía de evaluación ambiental. Aplicación de efluentes al suelo. G-PR-GA-001-versión 02. Ministerio de Agricultura, Servicio Agrícola y Ganadero.**

Fecha de entrada en vigencia: 26-07-2010.

Su objetivo es contribuir a la homologación de criterios técnicos en la evaluación ambiental de declaraciones y estudios de impacto ambiental de proyectos sometidos al Sistema de Evaluación Ambiental (SEIA) que consideren la aplicación de efluentes en suelos.

Considera los requisitos y aplicación de residuos líquidos mineros o efluentes mineros al suelo, para ello contempla: descripción del proyecto, línea base, evaluación ambiental, medidas ambientales, requisitos y condiciones de la aplicación, plan de la aplicación y plan de monitoreo.

- **Diagnóstico y clasificación de los cuerpos y cursos de agua según objetivos de calidad. Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Aguas. 2004**

El objetivo es establecer un procedimiento para clasificar los cursos de agua superficiales para el establecimiento de normas secundarias de calidad.

Los objetivos específicos del estudio son:

- ✓ Identificar los factores que inciden o puedan incidir en el futuro en la calidad del agua
- ✓ Establecer la calidad natural de cursos de agua
- ✓ Caracterizar la calidad actual y su variabilidad espacial y temporal
- ✓ Caracterizar usos actuales y futuros in situ y extractivos
- ✓ Establecer un índice de cumplimiento de calidad objetivo I-2
- ✓ Definir procedimientos para el establecimiento de la zona de dilución (zonas de mezcla o de exclusión), y aplicar a la situación actual de los cursos en estudio.
- ✓ Identificar los cursos de agua que estarán bajo incumplimiento de norma
- ✓ Diseñar un Plan de Monitoreo Estándar
- ✓ Elaborar un Informe Público sobre la calidad de los cursos de agua.

Las cuencas estudiadas que aparecen en el informe son: Lauca, Lluta, Isluga, Tarapacá, Loa, Salar de Atacama, Copiapó, Huasco, Elqui, Limarí, Pupío, Choapa, Petorca, Ligua, Aconcagua, Maipo, Rapel, Mataquito, Maule, Itata, Andalién, Paicaví, Bío-Bío, Imperial, Toltén, Valdivia, Bueno, Maullín, Cisnes, Aysén, Serrano, Las Minas y Side.

- **Criterios de calidad de aguas o efluentes tratados para uso en riego. Informe final 2005. Universidad de Chile – Servicio Agrícola y Ganadero.**

El estudio considera:

- ✓ Caracterización de los recursos hídricos para su uso en riego. Caracterización de la calidad de los recursos naturales y de las aguas intervenidas. Dentro de las aguas intervenidas hace mención a la calidad de aguas de efluentes de tranques de relaves.
- ✓ Antecedentes nacionales e internacionales del uso de aguas de baja calidad o intervenidas. Revisión de normativa internacional (Canadá, Estados Unidos, Nueva Zelanda) y nacional.
- ✓ Antecedentes sobre los parámetros de calidad de aguas relevantes al caso chileno, por ej.: boro, sulfato, molibdeno y cobre.
- ✓ Propuesta de criterios de calidad de aguas o efluentes tratados para uso en riego, esta debe:
  - Considerar el tipo de cultivo, la calidad del suelo, las tecnologías de riego y las condiciones climáticas en la evaluación final de la calidad del agua de riego.
  - Tener prácticas de manejo adecuadas para superar el potencial problema que representa un agua con parámetros diferentes a los considerados clásicos.

- Considerar proteger el recurso suelo y asegurar su capacidad productiva presente y futura.
- Considerar que en agua de riego, los valores que son considerados como límites máximos no debieran ser tomados como valores absolutos, deberán adecuarse a las condiciones locales y considerar los aportes de otras fuentes. Para ello deben hacerse estudios de situación y desarrollar herramientas de gestión apropiadas.

### 3. DEFINICIÓN DE LOS OBJETIVOS-META DE TRATAMIENTO DE LAS AGUAS CLARAS

#### 3.1 Metodología:

En base a la revisión crítica de los antecedentes regulatorios entregados en el punto anterior y a la discusión de estos antecedentes con los miembros del Comité Técnico del proyecto en una reunión presencial sostenida durante el mes de Abril del 2012, se tomaron decisiones consensuadas sobre la calidad química objetivo de las aguas claras deseada una vez tratadas.

#### 3.2 Resultados:

La discusión informada por parte de los profesionales del proyecto permitió definir dos escenarios de metas-objetivo de calidad de las aguas claras para su tratamiento, las que permitan cumplir con las regulaciones vigentes y con el tipo de cultivos que se desea desarrollar en la zona. El detalle se describe a continuación.

##### **(a) Antecedentes:**

A partir de la información de sitio recabada, se sistematizan en la **Tabla 3** las características químicas de las aguas del tranque de relaves Pampa Austral en el punto de descarga al canal de desagüe de aguas claras (aforo canal de aguas claras; datos años 2010 y 2011; Fuente, CODELCO-Salvador). Los datos entregados en esta tabla se consideran representativos de la calidad de las aguas claras usadas para el riego experimental de cultivos en el sector de Diego de Almagro, de interés del presente proyecto.

Adicionalmente, se entrega en la **Tabla 3** la calidad 'natural' de las aguas del Río Salado, derivadas del dren artificial construido en el Salar de Pedernales en la década de 1930 y de las aguas que abastecen el proceso metalúrgico de CODELCO-Salvador; o sea, de las aguas entrantes a la planta de flotación, las que derivan de una mezcla de aguas naturales y aguas dulces. Estas aguas se consideran en este estudio como referenciales de las aguas naturales presentes en la localidad.

Finalmente, se incluyen en la **Tabla 3** los valores para calidad de agua de riego considerados en la NCh 1.333 y los valores máximos de emisión permitidos para la descarga de riles industriales a cursos de aguas superficiales y marinos establecidos en el Decreto Supremo (DS) 90. Los valores destacados en amarillo para estas regulaciones en la **Tabla 3** indican que los valores de las aguas claras descargadas desde el tranque de relaves Pampa Austral al canal de evacuación

están por sobre los valores permitidos por estas regulaciones. Al considerar/comparar ambas regulaciones, es importante destacar lo siguiente:

- ✓ Los valores estipulados en la NCh 1.333 son más restrictivos que los valores estipulados en el DS 90, ya que los primeros tienen como objetivo la protección de la salud humana mientras que los segundos tienen como objetivo la protección del medio ambiente y de los recursos hídricos del país. O sea, equivale el primer set de regulaciones (NCh 1.333) a criterios de calidad primaria y el segundo set (DS90) a criterios de calidad secundarios.
- ✓ Los valores de la NCh 1.333 indicados en la **Tabla 3** son sólo aplicables a aguas contaminadas que serán descargadas a cursos de aguas superficiales y que, además, serán usadas para riego.
- ✓ De acuerdo con la NCh 1.333, los valores de la **Tabla 3**:
  - Son aplicables a aguas de riego con fines agrícolas y hortícolas, ya que el objetivo fundamental de esta normativa es proteger la salud humana, ya sea directa (a través de la producción segura de cultivos que serán para consume humano) o indirectamente (a través de la producción de forraje para animales que serán de consumo humano). De esta forma, si las aguas claras serán usadas para el riego de otros tipos de plantas, las que no sean de consumo humano, tales como plantas para la producción de biomasa, ornamentales o de materias primas industriales, entre otras, estos estándares no serían aplicables.
  - Son aplicables a derechos de agua no consuntivos, como los de CODELCO-Salvador. Esto implica que las aguas naturales captadas y usadas en los procesos metalúrgicos deben ser devueltas en el mismo volumen y con la misma calidad que las aguas captadas originalmente; sin embargo, de ser usadas para el riego con fines agrícolas y hortícolas, estas deben cumplir con los criterios establecidos para calidad de agua de riego.
  - El Ministerio de Obras Públicas puede autorizar valores menores o superiores a los límites máximos establecidos en la NCh 1333, en casos específicos y fundamentados.
- ✓ De acuerdo con el DS 90, los valores de la **Tabla 3**:
  - Están pensados para prevenir la contaminación de las aguas continentales superficiales del país.
  - Determinan los valores máximos aceptables para que aguas industriales sean descargadas en cursos naturales, superficiales de aguas.
  - Son irrelevantes cuando los contenidos naturales de los elementos/compuestos considerados están por sobre los valores máximos estipulados. En consecuencia, si el contenido en las aguas naturales de un elemento/compuesto supera los requerimientos de esta normativa en el punto de captación de las aguas para el proceso industrial, el valor máximo de descarga aceptado para ese elemento será igual al del contenido en las aguas naturales.
  - En este decreto, se considera como contenido natural a la concentración del contaminante (elemento/compuesto) en el agua de captación, la que corresponde a la situación sin intervención humana.

#### **(b) Definición de escenarios metas-objetivo de calidad de aguas:**

Considerando los antecedentes entregados en el punto (a) anterior, se han definido dos escenarios de metas-objetivo para la calidad de agua, los que involucran distintos requerimientos de tratamiento de las aguas claras del tranque de relaves Pampa Austral. Los escenarios son los siguientes:

### **ESCENARIO 1 (menos restrictivo):**

Criterios:

- ✓ Las aguas claras descargadas deben cumplir con los valores máximos establecidos en el DS 90 para cursos de aguas superficiales (mostrados en la **Tabla 3**), independientemente de los valores de los elementos/compuestos en las aguas naturales en el punto de captación.
- ✓ Las aguas claras tratadas serán usadas para el riego de plantas distintas a las agrícolas y hortícolas; o sea, plantas que no estén destinadas para el consumo humano o para el uso como forraje de animales de consumo humano (cultivos industriales).
- ✓ Se deben identificar y usar plantas adecuadas para ser cultivadas en suelos salinos, dado que las aguas claras tratadas aún pueden contener concentraciones de Boro (B) mayores a  $0.5 \text{ mg L}^{-1}$ , las que pueden imponer problemas de fitotoxicidad (Adriano, 2001).
- ✓ La concentración de sulfatos será reducida en las aguas tratadas, pero puede ocurrir salinización del suelo si las prácticas de manejo agrícola no son aplicadas adecuadamente.

En este escenario, los elementos/compuestos presentes en las aguas claras de relave que necesitan ser tratados y los valores máximos aceptables a los que se debe llegar, son los siguientes:

Parámetro	Aforo canal de aguas claras (promedio $\pm$ DS)	Meta-objetivo de agua
		DS 90 Concentración máxima
Boro (mg/L)	8,7 $\pm$ 1,12	0,75
Cloruros (mg/L)	2879 $\pm$ 350,4	400
Sulfatos (mg/L)	2883 $\pm$ 304,9	1000

### **ESCENARIO 2 (más restrictivo):**

Criterios:

- ✓ Las aguas claras descargadas deben asimilarse a la calidad de las aguas 'naturales'; en este caso se considera a estas aguas como a las entrantes a la Planta de Flotación de CODELCO-Salvador (mostrados en la **Tabla 3**).
- ✓ Las aguas claras tratadas serán usadas para el riego de plantas distintas a las agrícolas y hortícolas; o sea, plantas que no estén destinadas para el consumo humano o para el uso como forraje de animales de consumo humano (cultivos industriales).
- ✓ Se deben identificar y usar plantas adecuadas para ser cultivadas en suelos salinos.
- ✓ La concentración de sulfatos será reducida en las aguas tratadas, pero puede ocurrir salinización del suelo si las prácticas de manejo agrícola no son aplicadas adecuadamente.

En este escenario, los elementos/compuestos presentes en las aguas claras de relave que necesitan ser tratados y los valores máximos aceptables a los que se debe llegar, son los siguientes:

Parámetro	Aforo canal de aguas claras (promedio $\pm$ DS)	Meta-objetivo de agua
		Aguas entrante a Planta Flotación CODELCO-Salvador
Boro (mg/L)	8,7 $\pm$ 1,12	7,76
Cloruros (mg/L)	2879 $\pm$ 350,4	990
Sulfato (mg/L)	2883 $\pm$ 304,9	1904
Arsénico (mg/L)	0,234 $\pm$ 0,05	0,14
Manganeso (mg/L)	0,253 $\pm$ 0,12	< 0,01
Molibdeno (mg/L)	1,0 $\pm$ 0,78	< 0,1
Conductividad (umhos/cm) a 25° C	11795 $\pm$ 816	4110

**Tabla 3.** Calidad química de las aguas claras del tranque de relaves Pampa Austral, de las aguas del Río Salado y de las aguas entrantes al proceso de concentración de minerales de cobre por flotación. Las dos últimas columnas sistematizan los valores máximos permitidos por la NCh 1.333 y el DS 90.

Parámetro	L.D.**	Unidad	Aforo Canal de Aguas Claras			Río Salado *			Agua Industrial Planta Flotación****	NCh 1333 Agua de riego	DS 90 Valores máximos
			Promedio	DS	N***	Promedio	DS	N***			
Aceites y grasas	10	mg/L	< 10	0	4	< 10	0,00	4	-	20	
Alcalinidad total (CaCO3)	0,2	mg/L	65,0	14,58	4	73,5	9,98	4	117	-	
Al total	0,05	mg/L	0,060	0,04	4	0,041	0,03	4	-	5	
As total	0,001	mg/L	0,234	0,05	4	0,023	0,03	4	0,14	0,5	
Bario total (Ba)	0,1	mg/L	0,190	0,14	4	0,170	0,17	4	< 0,1	-	
Berilio total (Be)	0,01	mg/L	< 0,01	0,00	4	0,023	0,02	4	-	0,1	
Boro total (B)	0,01	mg/L	8,7	1,12	4	42,3	20,60	4	7,76	0,75	
Cd total	0,01	mg/L	0,001	0,00	4	0,171	0,28	4	-	0,01	
Ca total	0,01	mg/L	849,5	288,74	4	825,3	333,00	4	163,95	-	
Cianuro total (CN-)	0,05	mg/L	0,149	0,25	4	< 0,05	0,00	4	-	0,2	
Zn total	0,01	mg/L	0,040	0,01	4	0,060	0,06	4	-	2	
Cloruros (Cl-)	5	mg/L	2879	350,42	4	45670	2087,16	4	990	200	
Co total	0,05	mg/L	< 0,05	0,00	4	< 0,05	0,00	4	-	0,05	
Cu total	0,01	mg/L	0,075	0,03	4	0,230	0,18	4	0,02	0,2	
Conductividad a 25° C	1	umhos/cm	11795	816,44	4	104625	3748,22	4	4110	<1500 *****	
Cromo total	0,05	mg/L	< 0,05	0,00	4	0,055	0,03	4	-	0,1	
Hidrocarburos fijos	10	mg/L	< 10	0,00	4	< 10	0,00	4	-	-	
Fe total	0,01	mg/L	0,050	0,04	4	0,5	0,60	4	0,67	5	
Fe disuelto		mg/L	-	-	-	-	-	-	< 0,01	5	
Mg total	0,01	mg/L	29,7	15,84	4	774	162,41	4	43,8	-	
Mn total	0,01	mg/L	0,253	0,12	4	0,040	0,07	4	< 0,01	0,2	
Hg total	0,001	mg/L	< 0,001	0,00	4	< 0,001	0,00	4	-	0,001	
Mo total	0,001	mg/L	1,0	0,78	4	0,067	0,09	4	< 0,1	0,1	
Ni total	0,05	mg/L	< 0,05	0,00	4	< 0,05	0,00	4	-	0,2	
pH a 25° C	0,1		8,3	0,17	4	7,6	0,12	4	7,98	5,5 - 9,0	
Pb total	0,05	mg/L	< 0,05	0,00	4	0,220	0,31	4	-	5	
Na total	0,01	mg/L	1679	187,99	4	26895	1776,22	4	732	-	
Sólidos disueltos	5	mg/L	8846	500,32	4	61453	35822,95	4	2410	-	
Sólidos sedimentables	0,5	mL/L	< 0,5	0,00	4	0,375	0,14	4	-	-	
Sólidos suspendidos totales	5	mg/L	8,6	4,58	4	47,6	44,78	4	11	80	
Sulfatos	10	mg/L	2883	304,91	4	2933	446,48	4	1904	250	
Sufuro total	0,2	mg/L	< 0,2	0,00	4	< 0,2	0,00	4	-	1	
Vanadio total	0,1	mg/L	< 0,1	0,00	4	< 0,1	0,00	4	-	0,1	

\* Aguas 'naturales' derivadas de un dren artificial construido en el Salar de Pedernales en 1930.

\*\* L.D., límite de detección.

\*\*\* N corresponde a muestreos trimestrales realizados en los años 2010 y 2011

\*\*\*\* Estas aguas corresponden a una mezcla en partes iguales de agua dulce y agua natural que abastecería el Río Salado

\*\*\*\*\* Límite máximo de conductividad para agua de riego, la que puede tener algunos efectos negativos en cultivos sensibles.

NCh 1333, Norma Chilena para calidad de aguas con distintos usos (sólo se considera aquí las aguas para riego)

DS 90, Estándares de emisión de contaminantes presentes en aguas industriales a aguas continentales y marinas

## 4. REVISIÓN NACIONAL E INTERNACIONAL DE LITERATURA SOBRE LAS TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS INDUSTRIALES DISPONIBLES

### 4.1 Metodología:

Se realizó una revisión en la literatura internacional sobre la experiencia en el tratamiento de aguas industriales, con énfasis en la remoción de los elementos/compuestos de interés del presente proyecto (sulfatos, cloruros, Boro, Arsénico, Manganeseo y Molibdeno, además de alta conductividad).

Para ello, se revisó las bases de datos disponibles a través de internet, informes técnicos y libros especializados. La información recabada fue sistematizada.

### 4.2 Resultados:

Las tecnologías de tratamiento identificadas para los elementos/compuestos de interés del presente proyecto se sistematizan a continuación.

Se han identificado diversas tecnologías para el tratamiento de aguas residuales industriales, como las aguas claras del tranque Pampa Austral, las que se clasifican según:

- ✓ Tipo de tratamiento: activos versus pasivos (Younger et al., 2002), de acuerdo a si requieren del uso de electricidad y de químicos o si usan fuentes naturales de energía (energía potencial o energía solar), respectivamente; biológicos versus fisicoquímicos, de acuerdo al tipo de mecanismo utilizado en el proceso de tratamiento. Ejemplos de tratamientos pasivos son humedales artificiales y cascadas de aireación. En la mayoría de los casos, las aguas de operaciones mineras con bajas concentraciones de contaminantes son tratadas con métodos pasivos.

Existe una gran cantidad de referencias internacionales, en el ámbito de la minería, donde se indica el uso de métodos pasivos para el tratamiento y reciclado de aguas residuales. El diseño de un sistema de tratamiento adecuado depende de varios factores, tales como:

- Condiciones de sitio y clima
- Química y volumen del agua a ser tratada
- Tipo de contaminante y concentración

Un ejemplo bien conocido de tratamiento pasivo de aguas residuales mineras es el de Wheal Jane en el condado de Cornwall en Inglaterra (**Figura 3**). La planta piloto consiste en los siguientes sistemas secuenciales de tratamiento (Hallberg, 2003):

- Camas rojas aeróbicas, para la remoción de hidróxido/oxihidróxido de Hierro y Arsénico.
- Una celda anaeróbica diseñada para la remoción de Cinc, Cadmio y Hierro por medio de la reducción bacteriana del sulfato.

- Un filtro rocoso aeróbico diseñado para la remoción del manganeso por medio de la promoción del crecimiento de microalgas.
  
- ✓ Forma de aplicación: *in situ* o *ex situ*, de acuerdo a si el tratamiento se realiza en el lugar de generación de las aguas residuales o estas requieren ser trasladadas a otro lugar para su tratamiento (INAP, 2003). La **Figura 4** muestra una planta de tratamiento compartimentalizada, la que puede ser fácilmente transportada e instalada en el sitio de interés, como ejemplos sistemas de tratamiento in situ de aguas industriales
  
- ✓ Tipo de facilidad: centralizada o descentralizada, de acuerdo al tamaño físico de las plantas de tratamiento. Los sistemas de tratamiento de aguas descentralizados permiten mayor flexibilidad en el manejo de los riles, ya que la combinación de una serie de procesos pueden permitir lograr las metas-objetivo de tratamiento, superar condiciones restrictivas de sitio y lograr los requerimientos de protección ambiental. Los sistemas descentralizados de tratamiento son alternativas viables, de largo plazo, al igual que las plantas de tratamiento centralizadas, particularmente en comunidades rurales, pequeñas, donde logran mejor relación costo-efectividad.



**Figura 3.** Construcción del sistema de tratamiento pasivo de aguas residuales mineras en la mina Wheal Jane, condado de Cornwall, Inglaterra.  
(<http://projects.exeter.ac.uk/geomincentre/estuary/Main/jane.htm>)



**Figura 4.** Planta de tratamiento de aguas industriales compartimentalizada, lista para ser transportada e instalada en terreno.

#### **4.2.1 Sistemas de tratamiento identificados para la remoción de contaminantes presentes en las aguas claras del tranque de relaves Pampa Austral**

##### **I. Precipitación y Floculación:**

La precipitación es un método a través del cual los contaminantes que se encuentran disueltos o en suspensión en una solución como las aguas residuales son eliminados de la solución como un precipitado sólido (eliminación por decantación o clarificación). Este precipitado puede ser luego filtrado, centrifugado o separado por otras vías desde la fase líquida (eliminación por filtración). Los sólidos removidos deben ser dispuestos en forma adecuada. Esta metodología ha sido tradicionalmente utilizada para la remoción de metales (iones metálicos) desde las aguas industriales residuales mineras.

La precipitación química es una tecnología ampliamente usada y probada internacionalmente para la remoción de metales y de compuestos orgánicos desde aguas residuales industriales (EPA, 200a; Benefield y Morgan, 1990). Los iones metálicos presentes en aguas residuales industriales pueden convertirse en hidróxidos o carbonatos de metal, los que son insolubles, gracias a la adición de compuestos de tipo hidróxidos a las aguas de interés. Por ejemplo, el Bauxol es una mezcla compleja de oxihidróxidos de Hierro y Aluminio y de aluminio hidroxicarbonatos complejos. Este compuesto consiste en partículas muy finas, con una alta proporción área superficial a volumen y una alta proporción carga a masa, lo que permite la remoción de metales tóxicos y difíciles de remover, a través de la formación de compuestos muy insolubles. El Bauxol normalmente remueve el 99,99% de los metales contenidos en aguas, incluyendo Arsénico y Cianuro, además de acidez. Su capacidad de neutralizar la acidez es muy alta, debido a que sus fases cristalinas minerales amorfas forman bases débiles.

Cuando se agrega Bauxol de granulometría fina a aguas residuales cargadas con metales, éstos precipitan rápidamente y decantan dentro de las 48 h siguientes, formando una capa de sedimento (<http://www.epa.gov/aml/tech/appenc.pdf>; Despland et al., 2011).

Uno de los aditivos más comúnmente usado para la precipitación química en aguas residuales de la minería es la cal (**Figura 5**), ya que la precipitación es normalmente facilitada a través del aumento del pH de las aguas residuales (EPA, 2000b). Adicionalmente, pueden formarse sulfuros metálicos insolubles cuando existen sulfuros en las aguas residuales o cuando se agregan sulfuros a las aguas que desean ser tratadas. Al hacerlos insolubles, los contaminantes precipitan y decantan.



**Figura 5.** Construcción de una barrera reactiva, usando piedra caliza como material encalante y plástico como sellante. La operación usa el gradiente natural.

La solubilidad de los metales es dependiente del pH; la mayoría de ellos son menos solubles a pHs mayores (soluciones alcalinas) y más solubles a pHs menores (soluciones ácidas). El pH óptimo de precipitación depende del tipo de metal y del contra-ión usado como agente precipitador (hidróxido, carbonato u sulfuro). El mejor procedimiento de tratamiento debe, por lo tanto, ser determinado caso a caso. Una vez que el pH óptimo es determinado, el proceso de decantación de los precipitados puede ser acelerado por medio de la adición de floculantes (polímeros coagulantes). Estos polímeros aglomeran a los precipitados, agrandando el tamaño de las partículas y, por ende, acelerando su decantación por gravedad (EPA, 2000a). Los floculantes más comunes son el sulfato de aluminio y el sulfato férrico.

La precipitación involucra los siguientes pasos:

- Mezclado de los químicos precipitadores con el agua residual industrial.
- Formación de una matriz sólida a través de precipitación, co-precipitación o una combinación de estos procesos (decantación por gravedad).
- Separación de la matriz sólida desde el agua por métodos físicos (filtración).

Es importante considerar que existen diversos factores directos e indirectos que pueden afectar los costos de remoción de contaminantes por precipitación, tales como:

- Tipo de químico agregado: el químico agregado influye en los costos de esta metodología. Por ejemplo, el hipoclorito de calcio es un oxidante mucho más barato que el permanganato de potasio.
- Dosis del químico: el costo normalmente aumenta según la cantidad del químico utilizada. Cantidades mayores normalmente resultan en costos mayores.
- Objetivo de tratamiento: dependiendo de la calidad de agua deseada, se podría requerir de tratamientos adicionales, particularmente cuando se desea lograr calidades de agua muy buenas.
- Disposición de lodos: los lodos producidos por el proceso de precipitación / co-precipitación pueden ser considerados residuos peligrosos y requerir, por ende, tratamiento adicional antes de su disposición o disposición segura, lo que agrega nuevos costos.

A continuación se indican los métodos disponibles de tratamiento por precipitación para los distintos elementos/contaminantes de interés de las aguas claras del tranque de relaves pampa Austral, incluyendo la disminución de la conductividad.

### **I.1 Precipitación de Manganeso:**

La remoción de Manganeso (Mn) a través de métodos fisicoquímicos se puede realizar por la oxidación del  $Mn^{2+}$  a  $Mn^{4+}$ , el cual precipita como dióxido de manganeso ( $MnO_2$ ). El precipitado es luego separado de las aguas por medio de filtración con arena.



En muchos casos, la oxidación con oxígeno no es suficiente para el Mn en soluciones de pH neutro. Pueden usarse oxidantes más fuertes en forma complementaria, tales como dióxido de cloro ( $ClO_2$ ), cloro ( $Cl_2$ ), permanganato de potasio ( $KMnO_4$ ) u Ozono ( $O_3$ ).

## **I.2 Precipitación de Arsénico:**

La remoción de Arsénico (As) por medio de precipitación / co-precipitación normalmente involucra ajustes de pH y la adición de un agente químico precipitante o coagulante. También puede considerarse la adición de un químico oxidante en forma adicional.

La oxidación del As a una forma menos soluble como el estado As(V) aumenta la efectividad del proceso de precipitación / co-precipitación y puede realizarse como un paso de pre-tratamiento o como parte del proceso de precipitación.

Algunos procesos de pre-tratamiento que oxidan el As(III) a As(V) incluyen la ozonación o la adición de químicos oxidantes tales como permanganato de potasio, hipoclorito de sodio o peróxido de hidrógeno.

La clarificación y la filtración son comúnmente usados para remover los precipitados sólidos.

La química de precipitación / co-precipitación es, en este caso, compleja y depende de una diversidad de factores, tales como la especiación del arsénico, los agentes químicos precipitantes usados y sus concentraciones, el pH del agua y la presencia de otros químicos. Consecuentemente, los mecanismos particulares que ocurren en la remoción del As a través de tratamientos de precipitación / co-precipitación son proceso-específicos, y en algunos casos no son comprendidos totalmente.

Los químicos usados para la precipitación / co-precipitación del As son (EPA, 2002): sales férricas (ej. cloruro férrico), sulfato férrico, hidróxido férrico, sulfato de amonio, Alum (hidróxido de aluminio), ajuste de pH, ablandamiento con cal, piedra caliza, hidróxido de calcio, sulfato de manganeso, sulfato de cobre y sulfuro.

## **I.3 Precipitación de Molibdeno:**

Para la precipitación del Molibdeno (Mo) se puede utilizar cloruro de calcio. El pH óptimo es de 7,5 (Shoji Shigenori, 2002). La literatura menciona la remoción de Mo a partir de aguas industriales mineras con precipitados de iones férricos. Aún se está evaluando la factibilidad de remover este elemento a través de este último método y de otros métodos de precipitación.

## **I.4 Precipitación de Boro:**

En la literatura se describe la remoción de Boro (Bo) por precipitación con químicos inorgánicos y orgánicos. La mayoría de ellos no son factibles porque los niveles residuales de Bo en las aguas tratadas es de aproximadamente 50 mg L<sup>-1</sup>. En el caso de las aguas claras de interés, se debe llegar a concentraciones menores de 8 mg L<sup>-1</sup>. El uso de sales metálicas o de polielectrolitos orgánicos tampoco es adecuado porque se llega a concentraciones residuales de Bo por sobre a los 400 mg L<sup>-1</sup>.

Para lograr concentraciones menores a  $50 \text{ mg L}^{-1}$ , se requiere usar altas dosis de químicos y usar medidas complementarias. Investigaciones realizadas sobre el uso de cal para la remoción de Bo indican una alta dependencia del valor de pH. También se ha investigado la adición de químicos inorgánicos, tales como sales de calcio, aluminio, magnesio, cinc, manganeso, hierro (III) y hierro (II). Se han logrado concentraciones de Bo menores a  $0,16 \text{ mg L}^{-1}$  por adiciones secuenciales de sulfato de aluminio (Yonglan Xu, 2008).

Aún se está evaluando la factibilidad de remover este elemento a través de otros métodos de precipitación

## **II. Aireación / Oxidación:**

Si el agua residual es aireada, esta se oxida y los contaminantes precipitan. La mayor eficiencia de precipitación por aireación se logra para el Hierro (Schmidt, 2004) y el Manganeseo.

La introducción de aire al agua residual puede hacerse a través de distintos sistemas. Los aireadores mecánicos de superficie son los más comunes. Aireadores en línea de tipo aspersores de alta velocidad mejoran el contacto del aire con el agua residual. También pueden usarse métodos pasivos (**Figuras 6 y 7**), los que no requieren del uso de energía eléctrica. Por ejemplo, sistemas de aireación pasivos pueden lograrse simplemente por caídas de agua tipo cascada, piletas y tablas de dispersión.



**Figura 6.** Cascadas de aireación en Nueva Escocia, Canadá.



**Figura 7.** Cascada de aireación por gravedad en un ángulo de 25°.

### **III. Adsorción y Biosorción:**

Los metales presentes en aguas residuales pueden ser removidos con matrices adsorbentes, tales como carbón activado, óxidos de metal y productos agrícolas. La adsorción con carbón activado es la forma clásica más efectiva, ya que su tasa de remoción supera el 99% para algunos iones metálicos. Sin embargo, debido a su costo relativamente alto y que el carbón activado no puede ser regenerado y re-utilizado, ha habido intentos para usar adsorbentes naturales de bajo costo (Aksu et al., 1997).

La biosorción es una de las tecnologías más prometedoras para la remoción de metales desde soluciones acuosas y aguas residuales industriales y sanitarias (Senthikumar et al., 2000). Tiene costos bajos e involucra el uso de biomasa muerta o viva derivada de materiales de origen biológico, los que remueven los metales del agua residual o los lodos (Azza et al., 2009). Las ventajas de este proceso son:

- Recuperación de metales.
- Regeneración del bio-sorbente.
- Minimización del volumen de lodos químicos y/o biológicos que requieren ser dispuestos.
- Alta eficiencia de limpieza de efluentes con contenidos bajos de contaminantes (Goksungur et al., 2005).

Biomasa proveniente de algas (Hamdy, 2000), hongos (Kapoor et al., 1999), bacterias (Ozturk, 2007), algas marinas (Elangovan, 2008) y algunas plantas superiores (Rahman et al., 2005) ha sido usada en forma efectiva y exitosa en estudios de remoción de metales.

#### **IV. Intercambio Iónico:**

El intercambio iónico remueve los iones desde la fase líquida a través del intercambio de cationes o aniones por los contaminantes presentes en la solución, a través del uso de materiales de intercambio iónico. Este método ha demostrado ser muy efectivo para la remoción de metales desde soluciones acuosas, particularmente de aquellas con bajas concentraciones de metales (Dizge et al., 2009; Hamdoui, 2009). Todos los elementos metálicos presentes como especies solubles en aguas residuales, ya sea aniones o cationes, pueden ser removidos con este método. La concentración límite máxima para el intercambio iónico es de 2000 mg L<sup>-1</sup> de metales disueltos. Concentraciones mayores resultan en una saturación rápida de los materiales intercambiadores, con costos subsecuentemente altos de regeneración de los materiales ([http://www.frtr.gov/matrix2/section2/2\\_8\\_3.html](http://www.frtr.gov/matrix2/section2/2_8_3.html)).

Los materiales de intercambio consisten en resinas fabricadas a base de materiales orgánicos sintéticos que contienen grupos funcionales iónicos a los cuales se unen las formas iónicas de los contaminantes (iones de metales). Adicionalmente, material minerales sintéticos, como las zeolitas, han sido usados como intercambiadores iónicos para la remoción de metales en aguas residuales (Wong y Riveros, 1995). Los intercambiadores iónicos también pueden ser materiales inorgánicos y polímeros naturales. Para aplicaciones en aguas residuales, se han desarrollado las resinas llamadas resinas quelantes, las que son altamente selectivas por ciertos iones metálicos.

El intercambio iónico normalmente continúa hasta que existan suficientes iones disponibles en las resinas o materiales intercambiadores usados como para ser intercambiados por los iones de interés de remover desde la solución; o sea, hasta que los grupos funcionales se saturan con los iones de interés. Una vez que la capacidad de las resinas para intercambiar iones se satura, estas pueden ser regeneradas para su re-uso.

#### **V. Electrodialisis:**

La electrodialisis (ED, en sus siglas en inglés) es usada para transportar los iones desde una solución a otra a través de membranas de intercambio iónico, usando diferencias de potencial eléctrico como fuente conductora. Esto se realiza en celdas de electrodialisis. Las celdas consisten en un compartimento de alimentación y un compartimento de concentración, separadas por una membrana de intercambio aniónico y una membrana de intercambio catiónico puestas entre dos electrodos.

En casi todos los procesos prácticos de electrodialisis, se disponen varias celdas de electrodialisis en pilas, alternando las membranas de intercambio catiónico y aniónico. Los procesos de electrodialisis se diferencian de otros procesos basados en membranas, como la osmosis reversa, porque las especies disueltas son removidas desde la corriente alimentadora (Davis, 1990; Strathmann, 1992 and 2004; Mulder, 1996; Sata, 2004; cited under <http://en.wikipedia.org/wiki/Electrodialysis>).

## **VI. Procesos de Membrana: Osmosis Reversa y Nanofiltración**

Este proceso reduce la dureza permanente o temporal (Calcio y Magnesio) y los metales a medida que el agua pasa por presión a través de la membrana. El tratamiento de aguas residuales basado en osmosis reversa involucra el paso forzado de las aguas a través de una membrana semi-permeable, por presión (presión osmótica). De esta forma, se genera un concentrado como producto del tratamiento. Este concentrado usualmente consiste en una solución salina que requiere de un tratamiento y disposición especial (Mortazavi, 2008).

El factor más relevante para el tratamiento de aguas residuales industriales por medio de osmosis reversa es el pre-tratamiento, el que protege a la membrana del recubrimiento orgánico, la formación de escamas minerales y la degradación química (ensuciadores). Antes de decidir el uso de este tratamiento, debe realizarse un balance completo cationes/aniones y se deben identificar los potenciales ensuciadores. Altos niveles de Carbono Orgánico Disuelto (COD) y de Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) también pueden aportar al ensuciamiento de la membrana.

Las aplicaciones de la osmosis reversa incluyen el tratamiento de efluentes de la industria química, textil, petroquímica, electroquímica, celulosa, papel y alimenticia. El tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios para evitar la contaminación de aguas superficiales y/o subterráneas también es posible con este método (EPA, 1996).

La nanofiltración también es una forma de filtración basada en membranas semi-permeables, pero los poros de la membrana son de mucho mayor tamaño que los de las membranas de la osmosis reversa, cercanos al diámetro de un nanómetro. De esta forma, la nanofiltración es una filtración menos eficiente que la osmosis reversa (<http://www.epa.gov/aml/tech/appenc.pdf>). Las membranas típicas de nanofiltración permiten el paso de un alto porcentaje de iones de sales monovalentes y un menor paso de iones di- y tri-valentes.

## **VII. Tratamiento Biológico Usando Humedales Artificiales**

Las tecnologías de tratamiento basadas en humedales artificiales usan procesos geoquímicos y biológicos naturales, inherentes a los ecosistemas de tipo humedal, para acumular y remover metales, explosivos y otros contaminantes a partir de las aguas de alimentación. Los humedales artificiales han sido usados comúnmente para el tratamiento de aguas residuales que contienen materia orgánica y nutrientes, tales como nitrógeno y fósforo. Adicionalmente, han sido usados para tratar aguas ácidas de mina generadas por la minería del carbón o la minería metálica, las que contienen altos contenidos de metales y se caracterizan por ser ácidas. El proceso también puede ser adaptado para el tratamiento de soluciones neutras y alcalinas.

Las reacciones para el tratamiento del efluente incluyen:

- Reducción biológica del sulfato.
- Precipitación de Hierro y otros sulfuros de metal.
- Precipitación de hidróxidos de Hierro y Manganeso.
- Adsorción de metales por hidróxidos férricos.

- Acumulación de metales en la biomasa (plantas y microorganismos).
- Filtración del material suspendido y coloidal.
- Adsorción o intercambio de iones metálicos en los biomateriales.

Los humedales pueden ser diseñados y construidos para dar condiciones aeróbicas y anaeróbicas para sustentar los procesos microbianos necesarios y las reacciones abióticas. Es importante la consideración de la hidráulica (velocidad de flujo, conductividad hidráulica) para la efectividad del sistema.

Los humedales artificiales pueden ser diseñados para promover la reducción microbiana de sulfato, lo que reduce el sulfato a sulfuro de hidrógeno en condiciones anaeróbicas. El sulfuro de hidrógeno reacciona con los iones metálicos presentes en la solución, formando sulfuros de metal, los que precipitan.

En la **Figura 8** se muestra un ejemplo de sistema de tratamiento pasivo biológico de pequeño tamaño, instalado en un campo agrícola, para el tratamiento de aguas residuales industriales en Chile, mientras que en la **Figura 9** se muestra un sistema de tratamiento de mediano tamaño instalado en Alemania.



**Figura 8.** Sistema para el reciclaje de aguas residuales industriales instalado en Chile de tipo pasivo-biológico de pequeño tamaño.



**Figura 9.** Sistema de tratamiento de aguas industriales de mediano tamaño, tipo pasivo-biológico, instalado en Alemania.

### **VIII. Sistemas de Reactores Microbiológicos**

Los sistemas de reactores microbiológicos o biorreactores son sistemas de tratamiento que contienen un sustrato biodegradable para sustentar el crecimiento de los microorganismos, los que metabolizan el sustrato y general ácidos orgánicos de cadena corta. Estos ácidos orgánicos promueven la reducción microbiana del sulfato.

Estos sistemas son altamente dependientes de los consorcios microbianos, a diferencia de otros sistemas de tratamiento biológicos pasivos, los que están basados en una combinación de actividad microbiana, adsorción en plantas y/o en macrófitas, precipitación o captación de metales. La actividad Microbiana en el biorreactor puede ser o no suplementada con reacciones químicas inorgánicas, tales como ajuste de pH por disolución de piedra caliza (EPA, 1999).

El medio aeróbico promueve la oxidación de los metales (Manganeso y Hierro). Después de la oxidación, el Manganeso y el Hierro precipitan y potencialmente eliminan a otros contaminantes (Arsénico) por co-precipitación. El medio anaeróbico promueve la reducción de los sulfatos, nitratos, metales oxidados y metaloides. Como sub-producto de los procesos biológicos anaeróbicos se forma bicarbonato, el que aumenta el pH. El Sulfuro que puede ser originado por la reducción del sulfato promueve la precipitación de los sulfuros de metal (Cobre, Cadmio, Cinc, Plomo, Níquel; Hierro). Bajo condiciones reductoras el As(V) y el Mo(VI) pueden ser reducidos y precipitados como sulfuros ( $As_2S_3$ ,  $MoS_2$ ). También se remueven algunos metales por co-precipitación con hidróxidos de Aluminio y Hierro.

## **IX. Disminución de la conductividad, los cloruros y los sulfatos:**

Para disminuir la conductividad de las aguas claras del tranque de relaves Pampa Austral, se debe evaluar la remoción de la fuerza iónica. Los iones más importantes en estas aguas son los cloruros, sulfatos y los iones de calcio y sodio.

### **IX.1 Cloruro y Sodio:**

Existen varias técnicas para reducir los contenidos de cloruros en aguas residuales, tales como demineralización, osmosis reversa, coagulación, precipitación y electrodiálisis. Las técnicas de remoción descritas en la literatura incluyen el uso de deionización electrostática o ESD, en sus siglas en inglés (Shelp, 2011). EDS purifica el agua por medio de deionización capacitiva (CDI, en sus siglas en inglés), usando electrodos de carbono.

El EDS es efectivo en la remoción de una gran variedad de sales disueltas, tales como nitratos y amonios. Sus ventajas son:

- Imperceptible formación de escamas y recubrimientos.
- Puede realizarse en un amplio rango de pH.
- Es un proceso operacional robusto y simple; puede ser automatizado fácilmente.
- Muestra consumos decrecientes de energía a medida que las etapas de procesamiento aumentan.
- Bajos costos operacionales y altas recuperaciones de aguas. Esta característica la hace interesante para la desalinización del agua de mar.

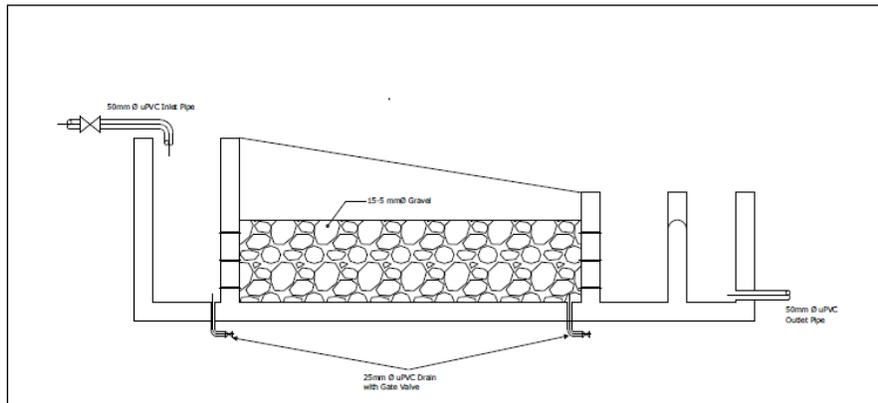
### **IX.2 Sulfato:**

Los procesos de tratamiento de sulfato se pueden dividir en cuatro categorías:

- Tratamiento químico con precipitación mineral. Este tratamiento considera la adición de cal, el tratamiento con piedra caliza o la adición de sales de Bario.
- Tecnologías de membrana.
- Intercambio iónico.
- Remoción biológica. Este tipo de tratamiento incluye bio-reactores, humedales artificiales, sistemas productores de alcalinidad y barreras reactivas permeables. La reducción del sulfato por medio de microorganismos en los humedales artificiales puede remover el sulfato pero también metales disueltos, además de generar alcalinidad. Por ejemplo, en una planta piloto diseñada y construida por BioPlanta en un sitio minero de Alemania, la que ha sido operada y monitoreada por algún tiempo, el contenido de sulfato de 1200 mg L<sup>-1</sup> ha sido reducido a menos de 300 mg L por medio de la reducción del sulfato con microorganismos en un sistema anaeróbico.

## X. Remoción de sólidos totales disueltos

Nkwonta (2010) investigó el uso de filtros 'roughing' para la remoción de los sólidos totales disueltos en aguas residuales (**Figura 10**). Estos filtros redujeron hasta un 97% el contenido de sólidos totales disueltos, desde un valor inicial de  $28 \text{ mg L}^{-1}$ . Este sistema de filtración es considerado como una buena forma de pre-tratamiento.



**Figura 9.** Planta de escala piloto para la disminución de sólidos totales disueltos por filtración (Nkwonta, 2010).

## 5. REVISIÓN NACIONAL E INTERNACIONAL DE LITERATURA SOBRE LA EXPERIENCIA EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS DE OPERACIONES MINERAS

### 5.1 Metodología:

Se realizó una revisión en la literatura nacional e internacional sobre la experiencia en el tratamiento de aguas de operaciones mineras, con énfasis en la remoción de los elementos/compuestos de interés del presente proyecto (sulfatos, cloruros, Boro, Arsénico, Manganeso y Molibdeno, además de alta conductividad). El énfasis, en este caso, se puso en ejemplos de tratamientos de aguas operacionales de la gran minería y, por ende, con caudales importantes de aguas para ser tratados.

Para ello, se revisó las bases de datos disponibles a través de internet, informes técnicos y libros especializados. En el caso de las experiencias internacionales, la experiencia previa de la empresa co-ejecutora de este proyecto, BioPlanta, en el tratamiento de aguas industriales derivadas de la minería fue privilegiada. La información recabada fue sistematizada, de forma de contrastarla con la información sistematizada en el punto anterior.

### 5.2 Resultados:

#### **5.2.1 Internacionales**

La experiencia previa de la empresa BioPlanta en el tratamiento de aguas operacionales mineras permite evidenciar que es posible abatir en forma eficiente elementos/compuestos tales como sulfatos, Manganeso, Arsénico, Cobre, Plomo, Cadmio, y Uranio, entre otros, además de eliminar la acidez de las aguas cuando esta existe. De estas experiencias es importante destacar, sin embargo, que el volumen de los caudales que requieren ser tratados es un aspecto crítico, ya que algunas de las tecnologías de tratamiento disponibles a nivel internacional no son apropiadas para el tratamiento de grandes caudales de aguas industriales mineras. El **Anexo 2** entrega una serie de tablas donde se sistematizan algunas de las experiencias en este tema (casos de estudio seleccionados) por parte de la empresa BioPlanta y los resultados obtenidos para los tratamientos aplicados.

#### **5.2.2 Nacionales**

La experiencia nacional en el tratamiento de aguas derivadas de operaciones mineras es reducida y se ha centrado fundamentalmente en el tratamiento de (1) las aguas derivadas del proceso de secado o filtración de concentrados de Cobre y Molibdeno y de (2) las aguas claras de relaves. En el **Anexo 3** se sistematizan las experiencias identificadas a nivel de la industria minera nacional.

## 6. EVALUACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO

En la **Tabla 4** se indican en forma comparativa las tecnologías que han sido identificadas y que poseen potencial de aplicación para el tratamiento de las aguas claras del tranque de relaves Pampa Austral. Esta tabla fue desarrollada como una matriz para apoyar la toma de decisiones. Integra aspectos económicos, técnicos, ecológicos y de operación, los que permiten comparar los costos y beneficios de las distintas tecnologías de tratamiento. Los resultados de esta evaluación permiten priorizar aquellas tecnologías más adecuadas para el objetivo del proyecto.

De esta forma, las principales tecnologías identificadas como adecuadas para la remoción de los elementos/compuestos contenidos en las aguas claras del tranque de relaves Pampa Austral, de forma de cumplir con los objetivos-meta de tratamiento establecidos (escenarios 1 y 2) son las siguientes:

- ✓ Tratamiento basado en enclamiento.
- ✓ Tratamiento pasivo biológico de tipo anaeróbico.
- ✓ Tratamiento basado en filtros de grava plantados.
- ✓ Precipitación con oxígeno.
- ✓ Precipitación con filtros de hierro y sales férricas.
- ✓ Intercambio de iones con zeolitas (ej. mordenita).
- ✓ Precipitación con peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ), permanganato de potasio ( $KMnO_4$ ) y Ozono ( $O_3$ ).

Los efectos de cada uno de estos tratamientos tecnológicos fueron evaluados a través de pruebas preliminares de laboratorio, usando muestras de aguas claras del tranque de relaves Pampa Austral, los que son desarrollados en el Objetivo Específico 2 del presente proyecto.

**Tabla 4.** Tecnologías que han sido identificadas y que poseen potencial de aplicación para el tratamiento de las aguas claras del tranque de relaves Pampa Austral.

					TECNOLOGÍAS											
	Parámetro	Unidad	Valor objetivo (aguas entrantes planta flotación)	Valor objetivo (DS 90)	Valor indicado	Tratamiento basado en encalamiento	Tratamiento pasico-biológico anaeróbico	Filtro de grava plantado	Precipitación con oxígeno	Precipitación con hierro y sales férricas	Intercambio iónico con zeolitas (ej. mordenita)	Precipitación con peróxido de hidrógeno (H2O2), permanganato de potasio (KMnO4) u Ozono (O3)	Osmosis inversa****	Precipitación con cloruro de calcio	Precipitación con sales sulfuradas y sulfáticas	Precipitación con sulfato de aluminio
Capacidad del tratamiento para remover	Arsénico***	mg/l	0,14	0,50	0,23	+	+	+	+	+	+	-	+	-	+	-
	Boro**	mg/l	7,76	0,75	8,70	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+
	Cloruro**	mg/l	990	400	2.879	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-
	Molibdeno	mg/l	< 0,1	1,00	1,00	-	+	-	-	+	+	-	+	+	-	-
	Manganeso**	mg/l	< 0,01	0,30	0,25	-	+	+	+	+	-	++	+	-	-	-
	Sulfato***	mg/l	1.904	1.000	2.883	+	++	-	-	+	+	-	+	-	-	-
	Conductividad*,****	µS/cm	4.110	-	11.795	+	+	+	+	+	-	+	++	+	+	+
					Puntaje preliminar	2	3	2	2	3	2	2	3	1	1	1
					40% puntaje valorado	0,8	1,2	0,8	0,8	1,2	0,8	0,8	1,2	0,4	0,4	0,4
Costos de inversión y operación tecnología específicos					40%	Puntaje preliminar	3	2	3	2	2	2	1	2	2	2
						10% puntaje valorado	1,2	0,8	1,2	0,8	0,8	0,8	0,4	0,8	0,8	0,8
Efectos medio ambientales / sustentabilidad						Puntaje preliminar	3	3	3	2	2	2	1	2	2	2
						10% puntaje valorado	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2
Simpleza de manipulación y operación						Puntaje preliminar	3	3	3	3	3	2	1	2	2	2
						10% puntaje valorado	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2
				<b>Suma</b>	<b>100%</b>	<b>2,6</b>	<b>2,6</b>	<b>2,6</b>	<b>2,5</b>	<b>2,4</b>	<b>2,1</b>	<b>2,0</b>	<b>1,8</b>	<b>1,6</b>	<b>1,6</b>	<b>1,6</b>
Observaciones						Reemplazo de mediano plazo del material encalante y disposición de los precipitados	De ser necesario, reemplazo regular de la fuente de carbono biodisponible	Baja mantención y sin remoción de residuos	Remoción al mediano plazo de precipitados	Reemplazo regular de los agentes precipitadores y disposición de los precipitados	Reemplazo regular o reactivación de la zeolita	Reemplazo regular de los agentes precipitadores y disposición de los precipitados	Problemas operacionales causados por obstrucción del filtro membrana; tecnología muy cara; se generan soluciones muy concentradas que son residuos peligrosos y tienen que ser dispuestas a alto costo	Reemplazo regular de los agentes precipitadores y disposición de los precipitados	Reemplazo regular de los agentes precipitadores y disposición de los precipitados	Reemplazo regular de los agentes precipitadores y disposición de los precipitados
<b>Leyenda:</b>		valores límite excedidos por las aguas claras														
		Estimación específica costo-beneficio: buena														
		Estimación específica costo-beneficio: promedio														
		Estimación específica costo-beneficio: bajo el promedio														
* los iones más importantes son cloruro, calcio, sodio y sulfato																
** causa principal geoquímica natural																
*** causa principal procesamiento del mineral																
**** El intercambio de iones es una alternativa a la Osmosis Reversa con una remoción similar de un rango de contaminantes. Probablemente esta tecnología es incluso más cara en cuanto a inversión y operación																

## OBJETIVO 2: EVALUACIÓN DE LABORATORIO Y COMPARACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS

Este objetivo consideró el desarrollo de siete actividades específicas, con el propósito de evaluar y comparar las tecnologías preseleccionadas en el objetivo específico 1, para seleccionar la más adecuada (costo-efectiva) para el tratamiento de las aguas claras del traque Pampa Austral. Estas actividades se detallan a continuación.

### 1. ENSAYOS DE FACTIBILIDAD, DE LABORATORIO, DE LAS TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS PRIORIZADAS

#### 1.1 Metodología

En base a los antecedentes recabados y definidos para el objetivo específico n° 1 del presente estudio, se definieron las tecnologías de tratamiento de aguas industriales mineras más adecuadas y priorizadas. En base a estas tecnologías priorizadas, se definieron 10 pruebas de laboratorio, las que fueron realizadas y analizadas, de forma de evaluar su efectividad en forma comparativa; o sea, su eficiencia de remoción de los contaminantes de interés desde las aguas claras de relaves del traque Pampa Austral (sulfato, cloruro, arsénico, boro, manganeso, molibdeno y conductividad), según los objetivo-meta de calidad de tratamiento definidas previamente.

Las tecnologías de tratamiento evaluadas a escala de laboratorio se indican en la **Tabla 5**. Se realizaron pruebas primarias (tecnologías por separado: 1 a 2.2 en la **Tabla 5**) en una primera etapa, y secundarias (combinaciones de tratamiento) en una segunda etapa, para verificar la aplicabilidad real de ellas y su eficiencia en la remoción de los contaminantes de interés a los niveles objetivo-meta definidos en el objetivo específico n° 1 del presente estudio.

Los ensayos de laboratorio seleccionados para realizar las evaluaciones de la efectividad de las tecnologías de tratamiento identificadas como adecuadas para las aguas claras del tranque de relaves Pampa Austral y estimar las eficiencias de tratamiento, se describen en detalle en el **Anexo 4**.

Estos primeros ensayos, individuales para cada tecnología identificada, permitieron definir los parámetros específicos de diseño y operación de las tecnologías de tratamiento, según las condiciones adecuadas de sitio.

En base a los resultados de eficiencia logrados para las evaluaciones de tratamiento individuales, se definieron posteriormente cuatro combinaciones de tratamiento, las que fueron evaluadas y desarrolladas. Estas corresponden a:

- ✓ Filtro de arena y tratamiento biológico pasivo anaeróbico, usando un filtro de gravilla nivelado
- ✓ Tratamiento biológico pasivo anaeróbico y filtro de gravilla plantado
- ✓ Tratamiento con hierro granulado y tratamiento biológico pasivo anaeróbico
- ✓ Tratamiento biológico pasivo anaeróbico y oxidación usando peróxido de hidrógeno

Finalmente, para todos los tratamientos individuales y las combinaciones de tratamiento considerados, se estimaron:

- ✓ Los costos de inversión y operación
- ✓ La calidad del agua post-tratamiento
- ✓ Los impactos ambientales, considerando los impactos posibles desde la etapa de pre-construcción (ej. producción y transporte de los materiales), a las etapas de construcción y operación/mantenimiento

Estos aspectos se desarrollan en las siguientes secciones.

Los ensayos de laboratorio fueron realizados por la empresa BioPlanta, en sus laboratorios en Alemania, usando aguas claras del tranque de relaves Pampa Austral colectadas en terreno (Mayo 2012) por parte de profesionales del CIMM. Se colectaron 50 litros de aguas claras en dos bidones plásticos limpios (previamente lavados al ácido para evitar la contaminación de las muestras de agua) de 25 litros cada uno, para su envío a Alemania donde fueron caracterizadas químicamente al momento de su arribo y usadas para los ensayos de laboratorio. Adicionalmente, se colectaron 6 litros de aguas claras en botellas plásticas de 1 litro (previamente lavados al ácido para evitar la contaminación de las muestras de agua), para su caracterización química en los laboratorios del CIMM en Santiago. De esta forma, se determinó si durante el período de transporte a Alemania las características químicas relevantes de estas aguas fueron alteradas o no.

**Tabla 5.** Tecnologías de tratamiento de aguas claras de relaves del tranque Pampa Austral evaluadas a través de pruebas de laboratorio realizadas por la empresa BioPlanta en Alemania.

Número de la prueba	Nombre de la prueba de laboratorio
1	Sedimentación
2	Filtración con filtro de arena
3	Encalado
4	Tratamiento biológico pasivo anaeróbico
5	Aireación
6	Tratamiento con zeolita* basado en intercambio iónico
7	Tratamiento con hierro granulado y sal de hierro
8	Oxidación con peróxido de hidrógeno (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )
9	Filtro de gravilla plantado
2.2	Filtración en filtro de arena (varios usos)

\*La zeolita usada corresponde a mordenita, el tipo de la zeolita más común presente en Chile. Zeolita granulada disponible en Chile fue enviada a BioPlanta en Alemania para la realización de este ensayo.

## 1.2 Resultados

### I. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE LAS AGUAS CLARAS USADAS EN LOS ENSAYOS DE LABORATORIO

En la **Tabla 6** se muestran las características química generales de las aguas claras del tranque de relaves Pampa Austral, determinadas en el CIMM y en BioPlanta. Estos valores se comparan con los entregados por CODELCO Salvador para los monitoreos trimestrales realizados en los años 2010 y 2011, para las aguas claras colectadas en el punto de aforo del canal de relaves del tranque Pampa Austral.

**Tabla 6.** Características químicas generales de las aguas claras del tranque de relaves Pampa Austral, colectadas en la canal de relaves en el mes de Mayo 2012 por profesionales del CIMM y determinadas en los monitoreos trimestrales realizados por CODELCO Salvador durante los años 2010 y 2011. Se entregan las características de las aguas claras una vez llegadas a BioPlanta en Alemania.

Parámetro	Unidad	CIMM - Mayo 2012		BioPlanta Junio 2012	Codelco Salvador - 2010 y 2011		
		Promedio	DS		Promedio	DS	
Temperatura - momento colecta	° C	19,5	0,55	19,4			
Temperatura - laboratorio	° C	19,25	0,27				
pH - momento colecta		8,57	0,05				
pH - laboratorio		8,29	0,02	8,3	8,30	0,17	
CE - momento colecta	umhos/cm	12440	450	11600			
CE - laboratorio	umhos/cm	12520	90			11795	816
Potencial Redox	mV	No determinado			275		
O2	mg/L	No determinado		7,9			
Sólidos totales - momento colecta	mg/L	6,14	0,06	3000	8,60	4,58	
Sólidos disueltos - laboratorio	mg/L	8824	176,42			8846	500,32
Cloruro	mg/L	3251	84,84			2879	350,42
Sulfato	mg/L	2467	62,34	2716	2883	604,91	
RAS	(meq/L)0,5	24,66	0,68		No determinado		
Cu total disuelto	mg/L	0,050	0,006	0,417	0,08	0,03	
Zn total disuelto	mg/L	0,049	0,074			0,04	0,01
Fe total disuelto	mg/L	0,101	0,001			No determinado	
Mn total disuelto	mg/L	0,299	0,005		0,25	0,12	
Cd total disuelto	mg/L	<1,00			0,01	0,00	
Pb total disuelto	mg/L	<0,005			< 0,05	0,00	
As total disuelto	mg/L	0,19	0,01	0,199	0,23	0,05	
Mo total disuelto	mg/L	2,22	0,06		2,28	0,78	
B total disuelto	mg/L	14,40	0,14	13,9	8,70	1,12	
Ca total disuelto	mg/L	2496,67	57,15		849,50	288,74	
Mg total disuelto	mg/L	68,09	4,69		29,70	15,84	
Sodio total disuelto	mg/L	4578,33	86,16		1679,00	187,99	

CE, conductividad eléctrica; RAS, proporción de adsorción de sodio

En general, los valores determinados por el CIMM y BioPlanta fueron similares, por lo que las aguas claras no habrían sufrido una alteración química importante durante su traslado a Alemania. Sin embargo, existen diferencias importantes para los valores determinados para algunos parámetros por el CIMM y los de los monitoreos anuales de CODELCO Salvador. Específicamente, los valores para concentraciones totales disueltas de B, Ca, Mg y Na fueron

mucho mayores en las determinaciones del CIMM que las de CODELCO Salvador. Esto se explicaría porque los valores de CODELCO Salvador son promedios anuales (representativos de un año, donde existe variación intra-anual en la calidad de las aguas), mientras que los del CIMM corresponden a un momento puntual de muestreo. Además, los métodos usados para las determinaciones analíticas pueden no ser los mismos, lo que también genera diferencias en los resultados generados. En todo caso, que los valores para algunos parámetros sean más altos en el caso de las aguas claras usadas para los ensayos constituye una ventaja, ya que se trabajará con aguas que representan la peor condición posible.

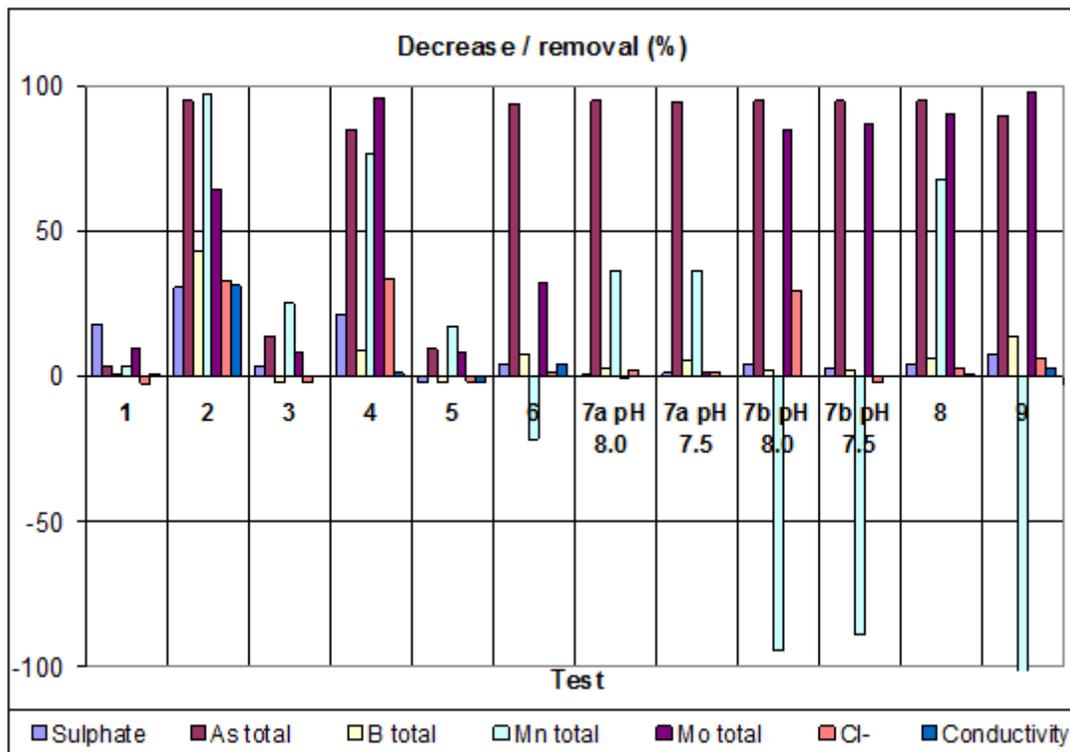
## II. PRUEBAS DE LABORATORIO PARA EVALUAR LA EFICACIA DE LOS TRATAMIENTOS IDENTIFICADOS: EVALUACIONES INDIVIDUALES

Los ensayos realizados para las distintas técnicas identificadas con potencial de remoción de los contaminantes de interés desde las aguas claras fueron evaluados en cuanto a su efectividad para dar cuenta de los parámetros críticos definidos y comparados entre sí (detalle de resultados se entregan en el **Anexo 5**). En la **Tabla 7** y **Figura 11** se sistematizan las técnicas evaluadas en cuanto a su potencia para reducir o aumentar los contaminantes de interés del presente estudio. En la **Tabla 7** se destacan los 1ºs, 2ºs y 3ºs mejores resultados en cuanto a disminución de los contaminantes de interés (remoción en porcentaje) y en reducción de la conductividad.

**Tabla 7.** Evaluación comparativa de la remoción de los contaminantes de interés y del mejoramiento de la conductividad de las aguas claras del tranque de relaves Pampa Austral por las distintas tecnologías evaluadas a nivel de laboratorio. Códigos de las pruebas según Tabla 5.

Prueba	Disminución / remoción (%)*											
	1	2	3	4	5	6	7a pH8.0	7a pH7.5	7b pH8.0	7b pH7.5	8	9
Sulfato	18.05	30.77	3.69	21.60	-2.12	4.22	0.46	1.33	4.53	2.78	4.16	7.61
As total	3.52	94.97	14.07	84.92	9.55	93.97	94.97	94.47	94.97	94.97	94.97	89.95
B total	0.72	43.53	-2.16	9.35	-2.16	7.91	2.88	5.76	2.16	2.16	6.47	13.67
Mn total	3.60	97.36	25.42	76.74	17.27	-21.58	36.69	36.69	-94.48	-88.97	67.87	-245
Mo total	9.65	64.12	8.33	96.14	8.33	32.46	-0.44	1.32	85.22	87.24	90.31	98.16
Cloruro	-2.33	33.00	-2.00	34.00	-1.67	1.33	2.33	1.67	29.67	-2.00	2.67	6.33
Conduc-tividad	0.86	31.29	0.43	1.21	-1.98	4.57	0.09	0.09	0.43	0.00	0.86	2.93

1º en disminución  
 2º en disminución  
 3º en disminución  
 \* Los valores negativos indican aumentos



Test 1	Sedimentación
Test 2	Filtración usando filtro de arena
Test 3	Encalamiento
Test 4	Tratamiento biológico anaeróbico pasivo
Test 5	Precipitación con oxígeno usando aire (aireación)
Test 6	Tratamiento con zeolita basado en intercambio iónico
Test 7a pH 8.0	Tratamiento con hierro y sal de hierro (15 mg/L cloruro de hierro(III)) pH 8.0
Test 7a pH 7.5	Tratamiento con hierro y sal de hierro (15 mg/L cloruro de hierro(III)) pH 7.5
Test 7b pH 8.0	Tratamiento con hierro y sal de hierro (75 g/L hierro granular) pH 8.0
Test 7b pH 7.5	Tratamiento con hierro y sal de hierro (75 g/L hierro granular) pH 7.5
Test 8	Precipitación con peróxido de hidrógeno (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ) (0,36mg/L)
Test 9	Tratamiento con filtro de gravilla plantado

**Figura 11.** Evaluación comparativa (en porcentaje) de la remoción/disminución de los contaminantes de interés y del mejoramiento de la conductividad de las aguas claras del tranque de relaves Pampa Austral por las distintas tecnologías evaluadas a nivel de laboratorio.

El tratamiento basado en el filtro de arena (Prueba 2 o test 2) fue el que mostró los mejores resultados en la reducción de los contaminantes de interés del presente estudio. Además, es el tratamiento más simple de instalar. Por ello, se diseñó una segunda fase de prueba para este tratamiento, basado en la eficacia del filtro de arena luego de varios usos.

Los resultados de esta prueba experimental (Prueba 2.2) muestran las siguientes consecuencias en la calidad de las aguas claras:

- Disminución del pH desde valores > 8 a condiciones de neutralidad.
- No hay cambios en la conductividad.
- Aumento leve en el potencial redox, entre un 15% y 20%.
- Aumento leve en el contenido de oxígeno, el que permanece entre 6 y 7 mg L<sup>-1</sup> la mayor parte del tiempo.
- Disminución en las concentraciones de sulfato, entre 10% y 15%.
- Las concentraciones de arsénico (As) disminuyen en forma constante, por debajo de los límites de detección del equipo (0,01 mg L<sup>-1</sup>).
- Aumento en las concentraciones de boro (B) en las aguas tratadas, por sobre los valores de las aguas no tratadas, con un exceso de 3 a 5 mg L<sup>-1</sup>.
- Disminución de la concentración de manganeso por debajo del límite de detección del equipo (0,01 mg L<sup>-1</sup>).
- Disminución leve de la concentración de molibdeno, en un rango de 4% y 17%.
- Aumento en la concentración de cloruro en las aguas tratadas, por sobre los valores de las aguas no tratadas, con un exceso de 150 a 270 mg L<sup>-1</sup>.

En base a estos resultados (**Tabla 7** y **Figura 11**), se puede concluir que las tecnologías con mejores resultados para remover los contaminantes de interés de las aguas claras de relave del tranque Pampa Austral serían las siguientes:

- ✓ Filtración con filtro de arena (Prueba 2)
- ✓ Tratamiento biológico pasivo anaeróbico (Prueba 4)
- ✓ Tratamiento con hierro granulado y sal de hierro a pH 8,0 (Prueba 7b)
- ✓ Oxidación con peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) (Prueba 8)
- ✓ Filtro de gravilla plantado (Prueba 9)

Sin embargo, los estudios de factibilidad demostraron que ninguna de las tecnologías es capaz, por sí sola, de remover todos los contaminantes de interés desde las aguas claras del tranque Pampa Austral. Por ejemplo, el uso de filtros biológicos anaeróbicos pasivos de flujo continuo permite una remoción del sulfato > 80%, a diferencia de otros tratamientos evaluados, pero no es eficiente en la remoción de Boro (**Figura 11**).

La evaluación de los resultados resumidos en la **Figura 11** permitió identificar cuatro combinaciones favorables de tecnologías de tratamiento, las que fueron contrastadas en términos de remoción de los contaminantes de interés del presente estudio. Estas combinaciones son:

- Combinación 1: filtro de arena y tratamiento biológico anaeróbico pasivo.
- Combinación 2: tratamiento biológico anaeróbico pasivo y filtro de gravilla plantado.
- Combinación 3: tratamiento con hierro granulado y tratamiento biológico anaeróbico pasivo.
- Combinación 4: tratamiento biológico anaeróbico pasivo y oxidación con peróxido de hidrógeno.

## II. EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL DE LAS TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO PRIORIZADAS

Las evaluaciones de impacto ambiental de las tecnologías de tratamiento son necesarias para identificar, predecir, evaluar y mitigar los efectos en:

- ✓ Aguas (superficiales y napas subterráneas)
- ✓ Suelo
- ✓ Aire
- ✓ Clima
- ✓ Salud humana
- ✓ Flora
- ✓ Fauna
- ✓ Paisaje

Para las evaluaciones de impacto ambiental deben considerarse todas las actividades tecnológicas necesarias para:

- ✓ La producción de los materiales y el tratamiento de aditivos
- ✓ Las medidas para la construcción de la planta de tratamiento
- ✓ El transporte de suministros
- ✓ La formación y disposición de residuos

En base a criterios tales como emisiones, ruidos, uso de la tierra, consumo de energía y otros, se realizó una evaluación de cada una de las tecnologías identificadas. Los conceptos usados para estimar los resultados ambientales de las distintas tecnologías de tratamiento de las aguas claras se detallan en la **Tabla 8**.

**Tabla 8.** Conceptos usados para estimar los resultados ambientales de las distintas tecnologías de tratamiento de aguas identificadas y priorizadas.

Objetivo de protección	Evaluación de los resultados ambientales	
	Magnitud del impacto	Incidencia
Etapa de pre-construcción	0 – sin impacto	0 – sin incidencia
Etapa de construcción	+/-1 – impacto marginal	1 – incidencia baja
Etapa operacional	+/-2 – impacto medio	2 – incidencia media
-	+/-3 – impacto alto	3 – incidencia alta

La magnitud (M) representa la cantidad y calidad del impacto, el que puede ser positivo o negativo, dependiendo del impacto que es generado:

- ✓ Impacto positivo: benéfico para el parámetro medio ambiental analizado.
- ✓ Impacto negativo: dañino para el parámetro medio ambiental analizado.

La incidencia (I) representa la severidad del impacto. Para la determinación de la incidencia deben ser considerados parámetros tales como extensión, tiempo, periodicidad, sinergia, etc.

El peso (W) es determinado en forma subjetiva por la persona experta que toma las decisiones. En general, esta persona distribuye un total de 100 puntos entre distintos parámetros ambientales. De esta forma, se asegura de representar la importancia de cada parámetro medio ambiental en una región determinada.

El valor medio del impacto ambiental (V) generado por cada acción del proyecto es calculado a través de la multiplicación de la magnitud, la incidencia y el peso. De esta forma:

$$V = M \times I \times W$$

Cada alternativa de tratamiento fue examinada en forma independiente. En el **Anexo 6** se entregan los resultados detallados de las evaluaciones de impacto ambiental para cada una de las tecnologías identificadas como las más apropiadas para el abatimiento de los contaminantes de interés del presente estudio

Luego de este proceso, se comparó en forma simultánea diferentes alternativas de tratamiento. En la **Tabla 9** se entregan los valores medio del impacto ambiental para las tecnologías identificadas como las más apropiadas para el abatimiento de los contaminantes de interés del presente estudio: filtro de arena, filtro biológico anaeróbico pasivo, planta de precipitación con peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) y filtro de gravilla plantado.

**Tabla 9.** Valores medio del impacto ambiental (V) para las tecnologías identificadas como las más apropiadas para el abatimiento de los contaminantes de interés del presente estudio.

Número de la prueba	Nombre de la prueba de laboratorio	Valor medio del impacto ambiental (V)
2	Filtración con filtro de arena	-55
4	Tratamiento biológico pasivo anaeróbico	-110
8	Oxidación con peróxido de hidrógeno (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	-370
9	Filtro de gravilla plantado	95

Como se desprende de estos resultados de todas las tecnologías evaluadas, en cuanto a los impactos ambientales de las etapas de pre-construcción, construcción y operación/mantenimiento, el tratamiento con filtro de gravilla plantado tiene los menores impactos ambientales, siendo positivo el valor medio del impacto ambiental (**Tabla 9**).

### III. COMPARACIÓN COSTO-BENEFICIO DE LAS TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO PRIORIZADAS

Entrevistas de terreno sostenidas con agricultores situados a lo largo del canal de aguas claras de relaves del tranque Pampa Austral indicaron un uso aproximado de ellas en riego de 40 m<sup>3</sup> por día y hectárea (0,46 L s<sup>-1</sup>), lo que corresponde a 14.000 m<sup>3</sup> al año por hectárea (1.400 mm).

De forma de realizar una comparación simple de costos estimados por tipo de tratamiento de las aguas claras antes de ser usadas para riego, se realizaron predicciones basadas en una capacidad de tratamiento de 40 m<sup>3</sup> por día. Sobre esta base, el agua tratada sería suficiente para el riego de una hectárea.

Los costos de inversión están basados en experiencias de construcción de plantas de tratamiento de aguas en Chile y en otros países. Para el riego de superficies mayores a una hectárea, los costos aumentan dependiendo de la cantidad de agua que desea ser tratada.

#### III.1 Factores relacionados con los costos

Existen numerosos factores que pueden afectar los costos del tratamiento de las aguas. Estos incluyen:

- ✓ Calidad del agua (tipo y concentración de contaminantes).
- ✓ Volumen de agua (ej. plantas de tratamiento más grandes son a menudo más económicas que varias plantas del mismo tipo, más pequeñas, debido al principio de economía de escala).
- ✓ Requerimientos energéticos. Este factor es crítico, ya que la energía puede llegar a constituir entre un 20% y un 50% de los costos operacionales, dependiendo de la tecnología usada y el precio de la energía.
- ✓ Manejo de residuos. La generación de residuos problemáticos impone costos más altos, ya que su disposición es cara.
- ✓ Tipo y capacidad de pre-tratamiento requerido.
- ✓ Aspectos normativos.
- ✓ Costos de la tierra.
- ✓ Posibilidades de refinanciamiento, como por ejemplo la venta de las aguas tratadas, sustitución de aguas frescas por aguas tratadas (recicladas) y ahorro de costos por menor requerimiento de compra de aguas frescas.

Adicionalmente, los factores de costo y la posibilidad real de uso de las aguas tratadas en un lugar determinado también dependen de las condiciones y actividades sitio-específicas.

#### III.2 Consideraciones costo-beneficio para las tecnologías de tratamiento: Evaluación preliminar

##### a) Criterios de selección

Una comparación completa y apropiada entre las tecnologías de tratamiento identificadas en forma preliminar como las técnicamente más adecuadas tiene que considerar todos los criterios relevantes de selección y de evaluación, además de los aspectos estratégicos que correspondan en cada caso. La siguiente tabla (**Tabla 10**) indica los distintos tipos de criterios de selección relevantes de considerar, tomando

como ejemplo de selección el tratamiento de aguas residuales a través de un sistema de piscinas o de de un sistema de lodos activados.

**b) Criterios de evaluación**

En la práctica, los criterios de evaluación más importantes usados para la comparación entre opciones de tratamiento aplicables son los estándares de efluentes que serán obtenidos por cada una de las plantas de tratamiento identificadas. Otro criterio de evaluación importante a considerar entre los costos operacionales es el consumo de energía. En la **Tabla 11** se indica los distintos tipos de criterios de evaluación relevantes de considerar, tomando como ejemplo de selección el tratamiento de aguas residuales a través de un sistema de piscinas o de de un sistema de lodos activados

**c) Criterios estratégicos**

La **Tabla 12** indica los principales criterios estratégicos a ser considerados al comparar entre distintos sistemas de tratamiento de aguas residuales. Se toma como ejemplo la comparación entre el tratamiento de aguas residuales por medio de un sistema de piscinas o a través de sistema de lodos activados (ASS, de sus siglas en inglés, activated sludge system).

El grado de control técnico de los procesos de tratamiento es un criterio importante desde el punto de vista de los operadores. Por ejemplo, el sistema AAS (o aquellas tecnologías con procesos puramente mecánicos-físicos) puede ser dirigido a través de la operación de botones y joysticks mientras que el sistema de piscinas ofrece menores posibilidades de influencia directa para su manipulación. El proceso de tratamiento a través de piscinas es altamente complejo y requiere de conocimiento profundo sobre los procesos hidráulicos y bioquímicos involucrados. Por otra parte, las piscinas son mucho más flexibles en relación a las condiciones de entrada debido a su gran capacidad amortiguadora y tiempo de detención. El sistema de piscinas puede ser actualizado y ampliado fácilmente.

La **Tabla 13** enumera los parámetros que requieren ser incluidos en un análisis de costo-beneficio para las plantas de tratamiento de aguas residuales. Mientras que el valor monetario de los costos del proyecto son relativamente fáciles de estimar, la valoración de los beneficios en términos monetarios es normalmente muy difícil de realizar, debido a que el término 'beneficios' incluye todos aquellos efectos positivos de una inversión, tanto en el medio ambiente como en la sociedad, la economía, la salud pública, etc.

**Tabla 10.** Criterios de selección entre el tratamiento de aguas residuales por medio de un sistema de piscinas o a través de sistema de lodos activados.

No	Palabras clave	Consideraciones importantes	
1	Requerimiento de tierra	-	Nota: hasta el 40% de este requerimiento se debe a infraestructura y no para instalación de los reactores de proceso
2	Rendimiento en invierno	-	La reducción de Nitrógeno es prácticamente imposible por debajo de los 5° C
3	Capacidad de almacenamiento	+	Para el agua de reuso, el agua de lluvia y para cambios de nivel estacionales (de existir), etc.
4	Aspectos operacionales	+	En el caso de las piscinas estos aspectos son menores, pero no inexistentes
5	Costos de inversión	+	Trabajos civiles caros (ej. El sellado de multicapas para la piscina puede llevar a costos altos)
6	Pérdidas por evaporación	[-]	Debido a áreas superficiales grandes; la aireación continua también puede producir tasas de evaporación excesiva por m <sup>2</sup> , como es el caso de los sistemas de lodos activados
	+ = ventaja - = desventaja		( ) = dependiente de procesos tecnológicos específicos y de condiciones de sitio [ ] = asumida; se requiere más investigación

**Tabla 11.** Criterios de evaluación entre el tratamiento de aguas residuales por medio de un sistema de piscinas versus un sistema de lodos activados (ASS, de sus siglas en inglés, activated sludge system).

No	Palabras clave	Consideraciones importantes	
a	Estándares de efluentes, orgánicos	(+/-)	Reducir en forma adicional el COD, la DBO, SS; pasos adicionales pueden ayudar a lograr esto en el caso de las piscinas y del ASS.
	Estándares de efluentes, nutrientes	(+/-)	Unidades avanzadas de proceso de tratamiento, tanto para el sistema de piscinas como el ASS.
	Estándares de efluentes, microorganismos	(+/-)	El ASS necesita desinfección adicional. Las piscinas también podrían requerir de esto, para asegurar su rendimiento. En promedio, las piscinas son mejores, particularmente en cuanto a la reducción de virus.

No	Palabras clave	Consideraciones importantes	
	Estándares de efluentes, algas	(-)	Pudiera requerirse la remoción de algas desde los efluentes de las piscinas a través de medidas específicas.
	Estándares de efluentes, biocenosis (comunidad biológica)	(+)	Podría requerirse un tratamiento post-piscinas para prevenir el shock de la comunidad biológica asociada y asegurar su similitud con el de las aguas naturales.
b	Energía, consumo neto	(+)	Las piscinas no aireadas no requieren de energía, excepto por las bombas, pantallas, etc. Existe disponibilidad de la opción de biogás tanto para las piscinas como para el ASS.
	Energía, sensibilidad de suministro	(+)	Las piscinas pueden seguir funcionando por unos días en caso de falla de suministro energético, mientras que el AAS falla inmediatamente y requiere de operaciones complejas de re-inicio
c	Huella de carbono, balance de CO <sub>2</sub>	(+)	Las emisiones son proporcionales (en forma aproximada) a la reducción de la DBO; el AAS puede abordarse en forma más simple, pero tiene altos consumos energéticos
	Huella de carbono, emisiones de gases invernadero	[-/+]	Las piscinas descubiertas y en condiciones operacionales inapropiadas podrían liberar óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> ) y metano (CH <sub>4</sub> ). Las piscinas bien operadas deberían generar menos gases de efecto invernadero (GEI) que el AAS bajo aspectos del ciclo de vida que incluyen temas de consumo energético
d	Olores (y VOC)	(+/-)	En el caso de las piscinas bien operadas, la intensidad de los olores producidos debería ser menor que el AAS. Sin embargo, la cobertura y la recolección del aire de salida es más fácil en el AAS
e	Mosquitos, moscas y ratones	(-)	Estos vectores pueden ser controlados a través del diseño y operación adecuados
f	Residuos sólidos	(+)	La producción de lodos en las piscinas es menor que en el caso del AAS, particularmente cuando la carga es alta. La producción de lodos en las piscinas es menor que en el AAS, particularmente a cargas altas. No existen diferencias de residuos entre las pantallas (ambos sistemas deben tener sistemas apropiados) y las arenas usadas

**Tabla 12.** Criterios estratégicos comparativos entre el tratamiento de aguas residuales por medio de un sistema de piscinas versus un sistema de lodos activados (ASS, de sus siglas en inglés, activated sludge system).

$\alpha$	Incentivos financieros	(-)	Soporte por parte de los fabricantes de los equipos y costos de asesoría mayores en el caso del AAS, lo que influye en la toma de decisiones, en desmedro del sistema de piscinas.
$\beta$	Grado de control técnico	(-)	La modificación y control de los procesos hidráulicos y de purificación de las piscinas requieren de capacidades más sofisticadas y continuas que las máquinas y reactores del AAS.
$\gamma$	Flexibilidad en relación a las condiciones de entrada + capacidad amortiguadora alta + tiempo de detención; flexibilidad de actualización y expansión	(+)	Las piscinas pueden ser actualizadas y ampliadas fácilmente, además de poder ser combinadas tanto con tecnologías convencionales como con tecnologías de punta, de cualquier tipo
$\delta$	Potencial acuícola	[+]	La cosecha de algas y de plantas para aumentar la producción de biogás, la recuperación de nutrientes, la producción de fibras naturales y de agentes farmacéuticos son promisorias.

**Tabla 13.** Requerimiento básico de datos para la evaluación costo-beneficio de una planta de tratamiento de aguas residuales.

Item	Consideración
Costos de inversión	Se dividen entre los costos de construcción / excavación, maquinaria y aparatos eléctricos (→ re-inversiones)
Costos operacionales	Se dividen en costos de personal, mantención, disposición de los lodos, energía (cuando aplica).
Tasa de interés de los préstamos	Para calcular los costos de capital.
Tasa de inflación	Diferenciada por valor de la energía, costos de la mano de obra, etc.

#### d) Aspectos sitio-específicos

Es fundamental que los componentes de costo reflejen la situación sitio-específica. Esto aplica específicamente a los costos de mano de obra (ej. cercanos a cero en regiones con alto desempleo), electricidad (ej. en algunos países puede estar subsidiada y no refleja el valor real) y recursos naturales (como uso de la tierra).

Adicionalmente, dentro de las consideraciones de sitio se estimó una demanda promedio de agua por hectárea en base a la información disponible de suelos irrigados y el consumo de agua (aguas claras de relaves) por parte de los agricultores de Diego de Almagro (176 ha Sr. Alfaro, 152 ha Sr. Soto y 50 – 120 L s<sup>-1</sup>). Para la determinación de la cantidad de agua requerida por superficie de suelo a regar, se seleccionó una superficie de 1 hectárea. Se definió un requerimiento de aproximadamente 40 m<sup>3</sup> al día para el riego de 1 hectárea cultivada. De esta forma, se seleccionó una planta de tratamiento de aguas claras de relave de 40 m<sup>3</sup> por día para los primeros análisis comparativos de costo-beneficio.

Las tecnologías de tratamiento identificadas como potencialmente aplicables para el tratamiento de las aguas claras del tranque Pampa Austral (**Tabla 5**) fueron comparadas a través de una matriz de apoyo a la toma de decisiones (**Tabla 4**). Esta matriz integra los aspectos financieros, técnicos, ecológicos y de manipulación. Esta matriz permite una primera comparación de costos y beneficios de las distintas tecnologías de tratamiento. Según esta matriz, las tecnologías con una buena relación costo-beneficio son las siguientes:

- ✓ Encalado
- ✓ Tratamiento pasivo biológico anaeróbico
- ✓ Filtro de gravilla plantado.
- ✓ Aireación (precipitación con oxígeno)
- ✓ Tratamiento con hierro granulado y sal de hierro (precipitación con filtro de hierro y sales férricas)

Estas tecnologías se investigaron posteriormente más a fondo.

### III.4 Integración de resultados

Se evaluaron diversas tecnologías de tratamiento usando una matriz multi-criterio, lo que permitió identificar las tecnologías más favorables para el proyecto (**Tabla 14**). Se asignó un peso a cada uno de los criterios relacionados con los objetivos del estudio.

El Criterio técnico está directamente relacionado con los demás criterios. Los factores considerados en el criterio técnico tuvieron relación con la superficie necesaria para la instalación de la planta, la necesidad de energía y de materiales/reactivos a lo largo de toda la vida operacional de la planta. El peso asignado al criterio técnico fue de 1.

El Criterio económico es el más restrictivo. Las tecnologías de tratamiento preferidas tienen que ser sustentable en términos financieros. Los factores estudiados en los criterios económicos fueron los costos de construcción, la primera inversión, los costos de

mantención y las inversiones necesarias a lo largo de todo el período de operación. El peso asignado al criterio económico fue de 1,25.

El Criterio funcional es el más importante del estudio. Los factores estudiados en este criterio fueron la remoción de los contaminantes de interés, la eficiencia del tratamiento, la operatividad en relación a los períodos de detención requeridos, cambio de material, limpieza del sistema, etc. El peso del criterio funcional fue de 4.

El Criterio ambiental es muy importante en el estudio porque está fuertemente relacionado con el objetivo del estudio. Los factores estudiados en este criterio fueron los impactos ambientales. El peso del criterio ambiental fue de 1,5.

Sólo aquellas tecnologías con valores positivos de evaluación (valores totales en la **Tabla 14**) fueron usadas para la determinación de las tecnologías más adecuadas.

### **III.5 Determinación de las tecnologías de tratamiento más adecuadas**

Para determinar la combinación de tecnologías de tratamiento de aguas más adecuada para la remoción de los contaminantes de interés del presente estudio se evaluaron y compararon los costos de inversión, operacionales y los impactos ambientales (**Tabla 14**). Los resultados de la matriz de multi-evaluación fueron verificados con los resultados de las pruebas de laboratorio, lo que permitió definir cuatro tecnologías combinadas de tratamiento, las que fueron evaluadas en mayor profundidad:

- ✓ Combinación 1: filtro de arena y tratamiento anaeróbico
- ✓ Combinación 2: tratamiento anaeróbico y filtro de gravilla plantado
- ✓ Combinación 3: tratamiento con hierro granulado y tratamiento anaeróbico
- ✓ Combinación 4: tratamiento anaeróbico y oxidación con peróxido de hidrógeno

La remoción de los contaminantes se estimó tomando en cuenta los resultados de las pruebas de laboratorio. Los costos de inversión fueron estimados considerando los costos de los servicios de construcción y los materiales para proyectos de tratamiento de aguas realizados en Chile y en otros países.

Entrevistas con los agricultores ubicados a lo largo de la canal de evacuación de las aguas claras de relaves del tranque Pampa Austral indicaron que son usados 40 m<sup>3</sup> por día y hectárea de aguas claras (0,46 L s<sup>-1</sup>), lo que corresponde a 14.000 m<sup>3</sup> por hectárea y año o 1.400 mm.

**Tabla 14.** Matriz comparativa de las distintas alternativas de tratamiento de las aguas claras del tranque Pampa Austral.

Parámetro	Técnico	Económico	Funcional	Ambiental	TOTAL
<b>Peso</b>	<b>1</b>	<b>1,25</b>	<b>4</b>	<b>1,5</b>	
Sedimentación	1	1	-1	1	-0,25
Filtro de arena	1	1	1	1	7,75
Encalado	0	0	0	0	0
Tratamiento Pasivo biológico anaeróbico	-1	-1	1	0	1,75
Aireación (precipitación)	1	1	-1	-1	-3,25
Filtro con zeolita	0	0	0	0	0
Tratamiento basado en hierro	-1	-1	1	-1	0,25
Precipitación con peróxido de hidrógeno	-1	-1	1	-1	0,25
Filtro de gravilla plantado	1	0	1	1	6,5

Rango del criterio      1 – aplicabilidad más adecuada  
 -1 – aplicabilidad más inadecuada

De forma de realizar una comparación adecuada de los costos estimados para el tratamiento de las aguas claras de relave antes de ser usadas para riego, las siguientes predicciones se basaron en una capacidad de tratamiento de 40 m<sup>3</sup> por día. Sobre esta base, el agua tratada sería suficiente para regar 1 hectárea al día. Para el riego de más de 1 hectárea al día, los costos aumentan con la cantidad de agua que desee ser tratada. En este sentido, el diseño, construcción y operación/mantenimiento de una sola planta de tratamiento para todo el caudal de aguas claras del canal de evacuación del tranque de relaves Pampa Austral, centralizada, no sería la opción más adecuada, debido a diversas desventajas y dificultades, tales como:

- ✓ Cómo prorratear los costos de inversión y de operación/mantenimiento entre los distintos actores involucrados
- ✓ Quién sería el responsable de la operación y mantenimiento de la planta de tratamiento, así como de la distribución de las aguas tratadas
- ✓ Cómo se asumen las pérdidas de agua por evaporación del agua tratada

- ✓ Las aguas que son destinadas a uso industrial (empresa minera mediana que actualmente tiene convenio con CODELCO Salvador) no tienen los mismos requerimientos de tratamiento que las aguas tratadas para ser destinadas a riego de cultivos

De esta forma, se sugiere optar por una alternativa de varias plantas pequeñas o medianas de tratamiento distribuidas a lo largo del canal de evacuación de aguas claras de relaves Pampa Austral. Así, cada usuario o grupo de usuarios (ej. consorcios o asociaciones) será(n) responsable(s) de la construcción y operación de la o las plantas de tratamiento de aguas claras requeridas.

Para la estimación de los costos operacionales, se usaron precios locales de electricidad, materiales/reactivos y mano de obra (técnicos calificados). A partir de esta estimación se evidenciaron costos elevados, particularmente para algunos materiales, tal como la melaza (una fuente de carbono). La melaza es un material requerido en las cuatro combinaciones de tratamiento de aguas seleccionadas, para la reducción microbiológica del sulfato (tratamiento pasivo biológico anaeróbico). Como resultado, se están identificando fuentes alternativas de carbono, disponibles localmente (ej. lodos sanitarios de la planta de tratamiento de aguas servidas de Diego de Almagro); alternativamente, el diseño de la unidad de tratamiento debe ser modificado (ej., incorporación de una capa de compost), de forma de diseñar una tecnología que sea económicamente factible. De esta forma, se hace necesario investigar en mayor profundidad la eficiencia y necesidad de fuentes alternativas de carbono.

En cuanto a los requerimientos de energía eléctrica para la operación de las bombas y los equipos de medición y control de la planta de tratamiento, hay dos alternativas posibles: instalación de una pequeña planta solar (**Figura 12**) o uso de un terminal eléctrico estándar.



**Figura 12.** Ejemplo de una planta solar pequeña para la generación de la energía eléctrica requerida en la planta de tratamiento de aguas.

Los costos de chequeo de operación serían menores en relación a los costos de los fungibles de operación.

A continuación se entregan los efectos y costos de inversión estimados para cada una de las cuatro combinaciones de tratamientos. Los efectos (en cuanto a la remoción de contaminantes) se han estimado tomando en cuenta los resultados de las pruebas de laboratorio realizadas, según se describió en informes pasados. Los costos de inversión se han estimado considerando los costos de los materiales y los servicios de construcción, según la experiencia previa de otros proyectos realizados en Chile y a nivel internacional.

**Combinación 1: filtro de arena y tratamiento biológico anaeróbico pasivo usando un filtro de gravilla nivelado.**

Para esta combinación se requiere un filtro de arena, seguido de una cuenca de sedimentación y un filtro de gravilla nivelado. A través de la combinación de estas tecnologías todos los contaminantes relevantes de interés disminuyen por debajo de los valores meta-objetivo definidos (valores máximos DS 90 y calidad de las aguas naturales entrantes a la planta de flotación), con excepción del boro y los cloruros. La **Tabla 15** muestra los efectos derivados de las pruebas de laboratorio realizadas mientras que la **Tabla 16** muestra los costos estimados de inversión, para esta combinación.

**Tabla 15.** Efectos de los tratamientos combinados de filtro de arena y tratamiento biológico anaeróbico pasivo (combinación 1).

Combinación 1:					Filtro de Arena		Tratamiento Anaeróbico*	
Filtro de arena + tratamiento anaeróbico					Remoción %	Calidad de salida	Remoción %	Calidad de salida
Parámetro	unidad	Aguas claras de relave	Calidad aguas naturales	DS 90, valores máximos				
Sulfato	[mg/L]	2,883	<b>1,904</b>	1,000	12.1	2,534	80.00*	507
As total	[mg/L]	0.23	0.14	<b>0.5</b>	95.0	0.01	84.92	0.00
Boro total	[mg/L]	8.70	<b>7.8</b>	0.75	0.0	8.7	9.35	7.9
Mn total	[mg/L]	0.25	0	<b>0.3</b>	97.4	0.01	76.74	0.00
Mo total	[mg/L]	0.96	0	<b>1</b>	8.9	0.87	96.14	0.03
Cloruro (Cl-)	[mg/L]	2,879	<b>990</b>	400	0.0	2,879	34.00	1,900
Conductividad	[ms/cm ]	11.8	4.11	n/a	0.0	11.8	1.21	11.65

Notas:

- \* 80% es el porcentaje mínimo de remoción de sulfatos en el tratamiento anaeróbico pasivo.
- Nºs en negrita: Indican que las concentraciones de las aguas naturales o los valores máximos del DS 90 han sido sobrepasadas en las aguas tratadas.
- Cuadro rojo: Valor por sobre el valor más alto de los dos objetivo-meta definidos (aguas naturales entrantes al proceso de flotación y valores máximos del DS 90)
- Cuadro verde: Valor por debajo del valor más alto de los dos objetivo-meta definidos (aguas naturales entrantes al proceso de flotación y valores máximos del DS 90)
- n/a: Sin límite definido

**Tabla 16.** Estimación de los costos de inversión para la combinación 1 de tratamiento. Calculados en base a una capacidad hidráulica de tratamiento de 40 m<sup>3</sup>/día.

Pasos de tratamiento	Cantidad/unidad		Costos estimados	
			Costo unitario	Costo total
1. Filtración con arena				
1.1. Filtro de arena	47	m <sup>2</sup>	28.100 CLP	1.330.067 CLP
1.2. Cuenca de sedimentación	40	m <sup>3</sup>	13.000 CLP	520.000 CLP
2. Tratamiento anaeróbico				
2.1. Filtro gravilla nivelado	267	m <sup>3</sup>	30.700 CLP	8.186.667 CLP
<b>Costos totales de inversión</b>				<b>10.036.733 CLP</b>

**Combinación 2: tratamiento biológico anaeróbico pasivo y filtro de gravilla plantado.**

Para la combinación 2 se consideran un filtro anaeróbico (filtro de gravilla nivelado) y un filtro de gravilla plantado. A través de la combinación de estas tecnologías todos los contaminantes relevantes de interés disminuyen por debajo de los valores meta-objetivo definidos (valores máximos DS 90 y calidad de las aguas naturales entrantes a la planta de flotación), con excepción de los cloruros. La **Tabla 17** muestra los efectos derivados de las pruebas de laboratorio realizadas mientras que la **Tabla 18** muestra los costos estimados de inversión, para esta combinación.

**Tabla 17.** Efectos de los tratamientos combinados de tratamiento biológico anaeróbico pasivo y filtro de gravilla plantado (combinación 2).

Combinación 2:					Tratamiento anaeróbico*		Filtro de gravilla plantado	
Tratamiento anaeróbico + Filtro de gravilla plantado					Remoción %	Calidad de salida	Remoción %	Calidad de salida
Parámetro	unidad	Aguas claras de relave	Calidad aguas naturales	DS 90, valores máximos				
Sulfato	[mg/L]	2.883	<b>1.904</b>	1.000	80,00*	576,6	7,61	532,7
As total	[mg/L]	0,23	0,14	<b>0,5</b>	84,92	0,04	89,95	0,0
Boro total	[mg/L]	8,70	<b>7,8</b>	0,75	9,35	7,89	13,67	6,8
Mn total	[mg/L]	0,25	0	<b>0,3</b>	76,74	0,06	0,00	0,06
Mo total	[mg/L]	0,96	0	<b>1</b>	96,14	0,04	98,16	0,001
Cloruro (Cl-)	[mg/L]	2.879	<b>990</b>	400	34,00	1.900	6,33	1.779,6
Conductividad	[ms/cm]	11,8	4,11	<b>n/a</b>	1,21	11,7	2,93	11,3

Notas:

- \* 80% es el porcentaje mínimo de remoción de sulfatos en el tratamiento anaeróbico pasivo.
- Nºs en negrita: Indican que las concentraciones de las aguas naturales o los valores máximos del DS 90 han sido sobrepasadas en las aguas tratadas.
- Cuadro rojo: Valor por sobre el valor más alto de los dos objetivo-meta definidos (aguas naturales entrantes al proceso de flotación y valores máximos del DS 90)
- Cuadro verde: Valor por debajo del valor más alto de los dos objetivo-meta definidos (aguas naturales entrantes al proceso de flotación y valores máximos del DS 90)
- n/a: Sin límite definido

**Tabla 18.** Estimación de los costos de inversión para la combinación 2 de tratamiento. Calculados en base a una capacidad hidráulica de tratamiento de 40 m<sup>3</sup>/día.

Pasos de tratamiento	Cantidad/unidad	Costos estimados	
		Costo unitario	Costo total
1. Tratamiento anaeróbico			
1.1. Filtro gravilla nivelado	267 m <sup>3</sup>	30.700 CLP	8.186.667 CLP
2. Filtro gravilla plantado			
2.1. Filtro gravilla y plantas	933 m <sup>2</sup>	23.800 CLP	22.213.333 CLP
<b>Costos totales de inversión</b>			<b>30.400.000 CLP</b>

**Combinación 3: tratamiento usando hierro granulado y tratamiento biológico anaeróbico pasivo.**

Para la combinación 3 se consideran una cuenca parcialmente llena con hierro granulado y un filtro anaeróbico (filtro de gravilla nivelado). A través de la combinación de estas tecnologías todos los contaminantes relevantes de interés disminuyen por debajo de los valores meta-objetivo definidos (valores máximos DS 90 y calidad de las aguas naturales entrantes a la planta de flotación), con excepción de los cloruros. La **Tabla 19** muestra los efectos derivados de las pruebas de laboratorio realizadas mientras que la **Tabla 20** muestra los costos estimados de inversión, para esta combinación.

**Tabla 19.** Efectos de los tratamientos combinados de hierro granulado y biológico anaeróbico pasivo (combinación 3).

Combinación 3:					Tratamiento usando hierro granulado		Tratamiento anaeróbico*	
Tratamiento con hierro granulado (a pH 8) + tratamiento anaeróbico					Remoción %	Calidad de salida	Remoción %	Calidad de salida
Parámetro	unidad	Aguas claras de relave	Calidad aguas naturales	DS 90, valores máximos				
Sulfato	[mg/L]	2.883	<b>1.904</b>	1.000	4,53	2.752	80,00*	550
As total	[mg/L]	0,23	0,14	<b>0,5</b>	94,97	0,01	84,92	0,002
Boro total	[mg/L]	8,70	<b>7,8</b>	0,75	2,16	8,51	9,35	7,72
Mn total	[mg/L]	0,25	0	<b>0,3</b>	0,00	0,25	76,74	0,06
Mo total	[mg/L]	0,96	0	<b>1</b>	85,22	0,14	96,14	0,01
Cloruro (Cl-)	[mg/L]	2.879	<b>990</b>	400	29,67	2.025	34,00	1.336
Conductividad	[ms/cm]	11,8	4,11	n/a	0,43	11,74	1,21	11,60

Notas:

- \* 80% es el porcentaje mínimo de remoción de sulfatos en el tratamiento anaeróbico pasivo.
- N°s en negrita: Indican que las concentraciones de las aguas naturales o los valores máximos del DS 90 han sido sobrepasadas en las aguas tratadas.
- Cuadro rojo: Valor por sobre el valor más alto de los dos objetivo-meta definidos (aguas naturales entrantes al proceso de flotación y valores máximos del DS 90)
- Cuadro verde: Valor por debajo del valor más alto de los dos objetivo-meta definidos (aguas naturales entrantes al proceso de flotación y valores máximos del DS 90)
- n/a: Sin límite definido

**Tabla 20.** Estimación de los costos de inversión para la combinación 3 de tratamiento. Calculados en base a una capacidad hidráulica de tratamiento de 40 m<sup>3</sup>/día.

Pasos de tratamiento	Cantidad/unidad	Costos estimados	
		Costo unitario	Costo total
1. Tratamiento con hierro granulado			
1.1. Cuenca de tratamiento con hierro granulado (75 kg/m <sup>3</sup> )	10 m <sup>3</sup>	45.700 CLP	457.000 CLP
2. Tratamiento anaeróbico			
2.1. Filtro gravilla nivelado	267 m <sup>3</sup>	30.700 CLP	8.186.667 CLP
<b>total invest costs</b>			<b>8.643.667 CLP</b>

**Combinación 4: tratamiento biológico anaeróbico pasivo y oxidación con peróxido de hidrógeno.**

Para la combinación 4 se consideran un filtro anaeróbico (filtro de gravilla nivelado) y un estanque de mezclado con una estación dosificadora para incorporar el peróxido de hidrógeno. A través de la combinación de estas tecnologías todos los contaminantes relevantes de interés disminuyen por debajo de los valores meta-objetivo definidos (valores máximos DS 90 y calidad de las aguas naturales entrantes a la planta de flotación), con excepción de los cloruros. La **Tabla 21** muestra los efectos derivados de las pruebas de laboratorio realizadas mientras que la **Tabla 22** muestra los costos estimados de inversión, para esta combinación.

**Tabla 21.** Efectos de los tratamientos combinados biológico anaeróbico pasivo y de oxidación con peróxido de hidrógeno (combinación 4).

Combinación 4:					Tratamiento anaeróbico*		Oxidación con peróxido de hidrógeno	
Tratamiento anaeróbico + oxidación con peróxido de hidrógeno					Remoción %	Calidad de salida	Remoción %	Calidad de salida
Parámetro	unidad	Aguas claras de relave	Calidad aguas naturales	DS 90, valores máximos				
Sulfato	[mg/L]	2.883	<b>1.904</b>	1.000	80,00*	576,6	4,16	553
As total	[mg/L]	0,23	0,14	<b>0,5</b>	84,92	0,04	94,97	0,002
Boro total	[mg/L]	8,70	<b>7,8</b>	0,75	9,35	7,89	6,47	7,38
Mn total	[mg/L]	0,25	0	<b>0,3</b>	76,74	0,06	67,87	0,02
Mo total	[mg/L]	0,96	0	<b>1</b>	96,14	0,04	90,31	0,004
Cloruro (Cl <sup>-</sup> )	[mg/L]	2.879	<b>990</b>	400	34,00	1.900	2,67	1.849
Conductividad	[ms/cm]	11,8	4,11	n/a	1,21	11,7	0,86	11,55

Notas:

- \* 80% es el porcentaje mínimo de remoción de sulfatos en el tratamiento anaeróbico pasivo.
- N°s en negrita: Indican que las concentraciones de las aguas naturales o los valores máximos del DS 90 han sido sobrepasadas en las aguas tratadas.
- Cuadro rojo: Valor por sobre el valor más alto de los dos objetivo-meta definidos (aguas naturales entrantes al proceso de flotación y valores máximos del DS 90)
- Cuadro verde: Valor por debajo del valor más alto de los dos objetivo-meta definidos (aguas naturales entrantes al proceso de flotación y valores máximos del DS 90)
- n/a: Sin límite definido

**Tabla 22.** Estimación de los costos de inversión para la combinación 4 de tratamiento. Calculados en base a una capacidad hidráulica de tratamiento de 40 m<sup>3</sup>/día.

Pasos de tratamiento	Cantidad/unidad		Costos estimados	
			Costo unitario	Costo total
1. Oxidación con peróxido de hidrógeno				
1.1. Estanque de mezclado	40	m <sup>3</sup>	425.800 CLP	17.032.000 CLP
1.2. Estación dosificadora de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	1	-	11.374.800 CLP	11.374.800 CLP
2. Tratamiento anaeróbico				
2.1. Filtro de gravilla nivelado	267	m <sup>3</sup>	30.700 CLP	8.186.667 CLP
<b>Costos totales de inversión</b>				<b>36.593.467 CLP</b>

Con la información disponible hasta ahora, en cuanto a la eficiencia en la remoción de los contaminantes de interés, los costos de inversión y de operación y los impactos ambientales, se definió un ranking de tecnologías más adecuadas de tratamiento. De las cuatro combinaciones evaluadas, el tratamiento combinado que considera tratamiento pasivo biológico anaeróbico y filtro de gravilla plantado (Combinación 2), resultó ser el más favorable (**Figura 13**).

### III.6 Revisión de patentes para las tecnologías de tratamiento más adecuadas

Finalmente, se realizó una revisión de patentes para las tecnologías de tratamiento más adecuadas. Para ello, se realizó una revisión en la Oficina Alemana de Patentes y Marcas Registradas (DPMA).

Se identificaron dos patentes centradas en la remoción de metales desde aguas, las que son comparables con tecnologías probadas en este estudio:

- ✓ DE 000069906148 T2 – EU patent
- ✓ DE 000019923796 A1 – patent application

#### DE 000069906148 T2 – Resumen

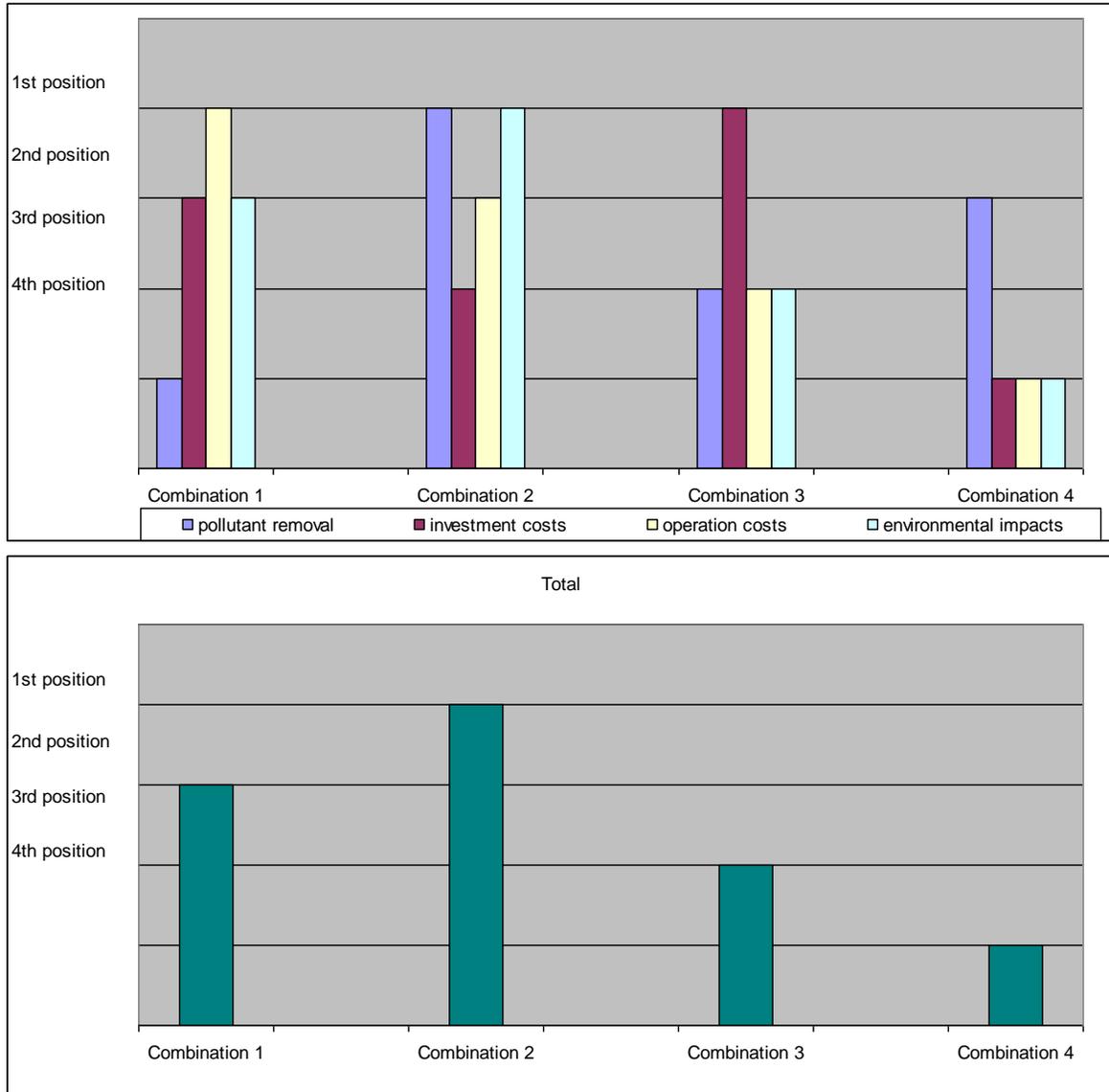
Una cama dinámica de arena es usada para la filtración simultánea de metales desde aguas residuales y los metales removidos precipitan en el filtro de arena. Es una cama dinámica de arena porque es cosechada continuamente. Esta técnica es diferente a una cama fluida, ya que la biomasa es inmovilizada en las partículas de arena. El metal reducido reacciona en precipitados insolubles, los que pueden ser removidos del agua y de las partículas de arena.

#### DE 000019923796 A1 – Resumen

El agua se hace pasar a través de un filtro de arena. Después de la filtración, el agua se pasa a través de un reactor fijo para reducir el carbono orgánico disuelto (COD). El agua es entonces dividida en dos flujos. El primero se somete a nanofiltración. El segundo se envía a un intercambiador catiónico. Los iones calcio (Ca) del agua se intercambian con iones sodio (Na), para prevenir daños a la membrana. Una válvula de control regula las tasas de flujo volumétricas de las corrientes. Las dos corrientes se vuelven a juntar y son filtradas

en una planta de nanofiltración. El diseño asegura que todas las características de calidad de agua requeridas son alcanzadas.

Estas patentes, sin embargo, no afectan la aplicación de las tecnologías seleccionadas.



**Figura 13.** Ranking de alternativas de tratamiento combinadas en base a los costos, resultados de tratamiento e impactos ambientales (1st position: la más favorable).

### **OBJETIVO 3: PROYECTO DE FACTIBILIDAD DE LA MEJOR ALTERNATIVA TECNOLÓGICA**

Este objetivo consideró el desarrollo de tres actividades específicas, con el propósito de generar un proyecto de ingeniería a nivel de prefactibilidad para las dos combinaciones de tratamiento que mostraron ser las más adecuadas para el tratamiento de las aguas claras del tranque Pampa Austral (combinaciones 1 y 2). Estas actividades se detallan a continuación.

#### **1. PROPUESTA DE INGENIERÍA DE DETALLE CON DISEÑO PRELIMINAR DE OBRAS CIVILES Y EQUIPAMIENTO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS CLARAS Y SISTEMA DE SUMINISTRO Y DISTRIBUCIÓN HÍDRICO**

Esta actividad se desarrolló en base a los resultados generados a partir del objetivo específico 2. Específicamente, se desarrolló la ingeniería de detalle con diseño preliminar de obras civiles y equipamiento de la planta de tratamiento de aguas claras y sistema de suministro y distribución hídrico para las dos opciones de tratamiento combinado seleccionadas en el objetivo específico 2. Las dos opciones de tratamiento de las aguas claras del tranque Pampa Austral seleccionadas son las siguientes:

- Combinación 1: Filtro de arena y tratamiento pasivo biológico anaeróbico.
- Combinación 2: Tratamiento pasivo biológico anaeróbico y filtro de gravilla plantado.

Aunque la opción de tratamiento combinado 2 demostró mayor eficiencia en la remoción de los contaminantes de interés del presente estudio que la opción de tratamiento combinado 1, se realizaron estudios de factibilidad para ambas alternativas de tratamiento.

##### **1.1 ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD COMBINACIÓN 1: Tecnología de tratamiento de aguas claras por filtro de arena y método pasivo biológico anaeróbico:**

Esta combinación es la segunda opción de tratamiento más adecuada para dar cumplimiento a los objetivo-meta definidos para las aguas claras de relaves del tranque Pampa Austral consideradas en el presente estudio. A continuación se describe en detalle el pre-diseño de ingeniería de esta opción de tratamiento.

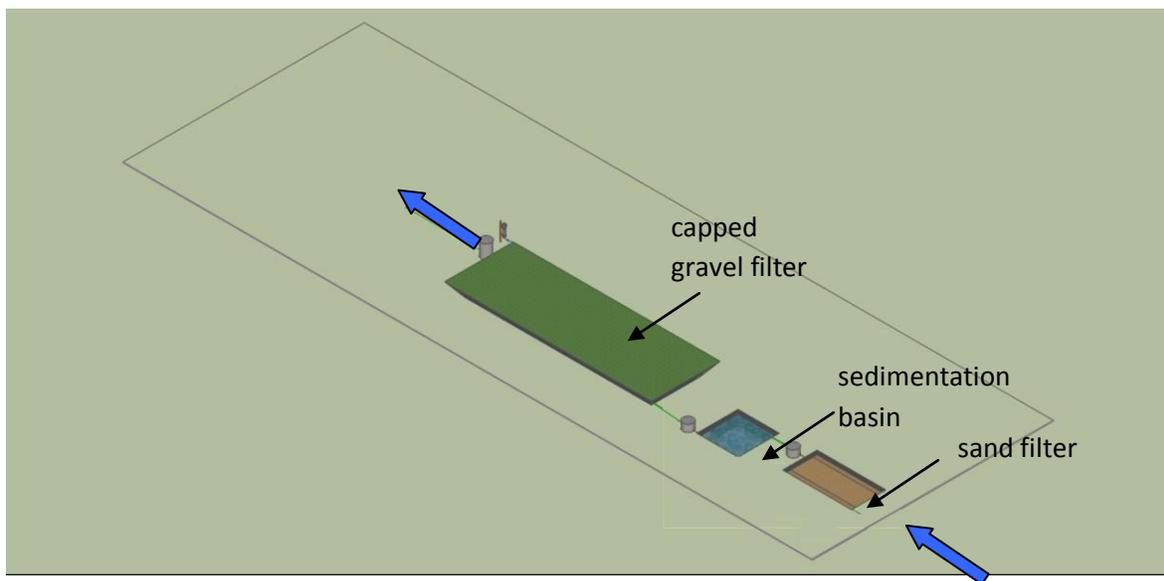
##### **I. Detalles de ingeniería y equipamiento:**

Los detalles de diseño descritos en las próximas secciones están basados en formatos básicos para plantas de tratamiento de este tipo, ya que no existe definición del lugar exacto donde se instalaría la planta de tratamiento de interés en la localidad de Diego de Almagro. Sin embargo, se consideran las características climáticas áridas del área y otras condiciones generales de la localidad.

La planta de tratamiento consiste en tres módulos: un filtro de arena, seguido por una pequeña cuenca de sedimentación y luego un módulo para el tratamiento pasivo biológico anaeróbico (**Figura 14 y Anexo 15**). Los tres módulos deben ser dispuestos sobre cuencas construidas en el suelo e impermeabilizadas. El agua a ser tratada se direcciona al primer módulo de tratamiento (filtro de arena), de ahí al segundo (cuenca de sedimentación) y finalmente al tercero (filtro de gravilla nivelado). Cada módulo está equipado con un pozo de monitoreo (manhole en inglés) para regular el nivel del agua y permitir los muestreos de aguas para verificar la calidad de ésta a lo largo del proceso.

Aunque se propone una geometría específica para los módulos, esta no es obligatoria. La proporción largo-ancho de cada uno de los módulos puede ser modificada o cada módulo puede ser subdividido en dos o más unidades, de forma de adaptarlos a las condiciones específicas del sitio donde efectivamente se instale la planta de tratamiento; lo importante es mantener la superficie total indicada.

El diseño está basado en un caudal de tratamiento de  $40 \text{ m}^3/\text{día}$ , correspondiente a un caudal adecuado para regar 1 hectárea de superficie agrícola. Capacidades mayores de tratamiento requieren que algunos componentes de la planta de tratamiento sean aumentados. Por ejemplo, si se desea construir una planta para un caudal de tratamiento de  $400 \text{ m}^3/\text{día}$  en lugar de  $40 \text{ m}^3/\text{día}$ , las superficies de cada módulo deben ser aumentadas en diez veces; adicionalmente, deben usarse cañerías y fittings de mayores diámetros. El número de pozos de monitoreo puede mantenerse, pero también debe incrementarse su diámetro.



**Figura 14.** Esquema de la planta de tratamiento para la Combinación 1, basada en un filtro de arena (módulo 1, inferior derecho; sand filter), una cuenca de sedimentación (módulo 2, centro; sedimentation basin) y un filtro de gravilla nivelado (módulo 3, superior izquierdo; capped gravel filter). Las flechas azules indican la dirección de flujo del agua. Cada unidad cuenta con un pozo de monitoreo (cilindros grises).

**a) Diseño de los módulos filtro de arena y cuenca de sedimentación:**

✓ Dimensiones mínimas:

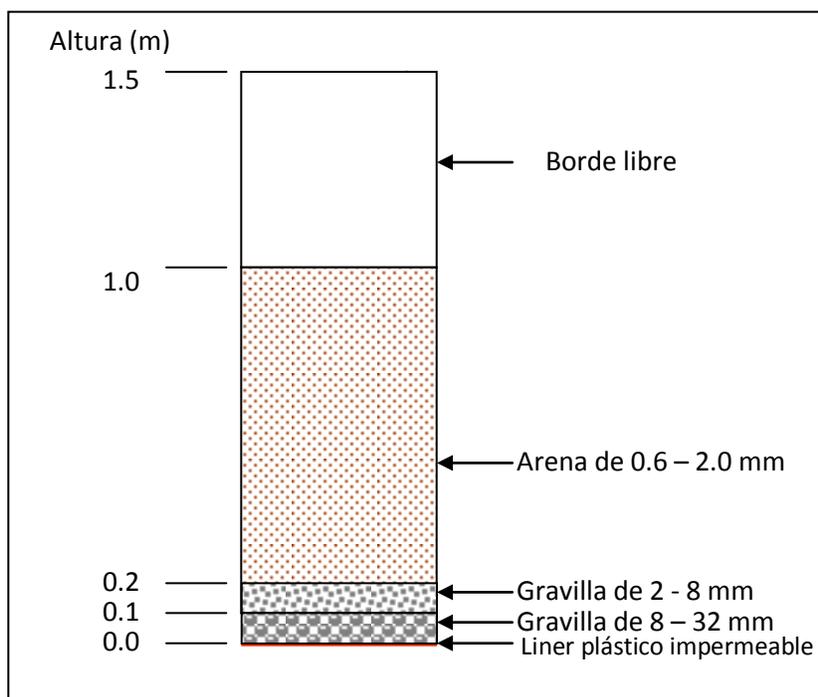
- Para tratar 40 m<sup>3</sup>/día (flujo referencial para el riego de 1 ha de superficie agrícola), las dimensiones mínimas son las siguientes:
  - Filtro de arena:
    - Superficie de 47 m<sup>2</sup>
    - Profundidad de 100 cm de alto para la arena, más aprox. 50 cm de borde = 150 cm en total
  - Cuenca de sedimentación:
    - Superficie de 40 m<sup>2</sup>
    - Profundidad de 100 cm de alto para el agua, más aprox. 50 cm de borde = 150 cm en total
- Para tratar 3.460 m<sup>3</sup>/día (40 L/s), las dimensiones mínimas son las siguientes:
  - Filtro de arena:
    - Superficie de 4.120 m<sup>2</sup>
    - Profundidad de 100 cm de alto para la arena, más aprox. 50 cm de borde = 150 cm en total
  - Cuenca de sedimentación:
    - Superficie de 3.500 m<sup>2</sup>
    - Profundidad de 100 cm de alto para el agua, más aprox. 50 cm de borde = 150 cm en total

✓ Ensamblaje del módulo filtro de arena:

La **Figura 15** muestra un esquema vertical del ensamblaje del filtro de arena. La base debe ser impermeable al agua; su construcción está basada en una multicapa, construida con los siguientes materiales, de arriba hacia abajo:

- Geotextil
- Membrana PELD de 1,00 mm (liner plástico impermeable)
- Geotextil
- Arena
- Suelo compactado libre de piedras

El material de filtrado es arena con un tamaño de gránulo entre 0,6 y 2,0 mm. El cuarzo ha demostrado buenos resultados como arena de filtrado, pero puede usarse cualquier material mineral que sea durable al estar sumergido en agua, el que sea lo suficientemente estable para sostener su propio peso y que no sea una fuente de contaminantes.



**Figura 15.** Diseño vertical del módulo de filtro de arena.

Se utiliza una bomba de 2,8 kW para la entrega de las aguas a ser tratadas al filtro de arena. Esta bomba debe ser capaz de trabajar con aguas con alta carga de sedimento y tener una capacidad de bombeo de 150 L/m o superior, dependiendo del desnivel que exista en el lugar específico de construcción de la planta de tratamiento. La entrega de agua al filtro de arena no es continua, sino a intervalos regulares de 1 hora. Cañerías de distribución (cañerías de drenaje perforadas), ubicadas por sobre la superficie de arena, distribuyen el agua sobre toda la superficie de este módulo. Se ubican cañerías de recolección (cañerías de drenaje perforadas) en la base del filtro de arena, para coleccionar el agua y poder dirigirla hacia la cuenca de sedimentación. Las cañerías de recolección del agua se disponen sobre una cama de gravilla gruesa (tamaño de partícula de 8-32 mm). La gravilla gruesa se separa de la arena por una capa intermedia de gravilla fina (tamaño de partícula de 2-8 mm), tal como se muestra en la **Figura 15**.

✓ Ensamblaje del módulo cuenca de sedimentación:

La base de la cuenca de sedimentación debe ser impermeable al agua; su construcción está basada en una multicapa, construida con los siguientes materiales, de arriba hacia abajo:

- Geotextil
- Membrana PELD de 1,00 mm (liner plástico impermeable)
- Geotextil

- Arena
- Suelo compactado libre de piedras

✓ Nivel de agua y detalles hidráulicos del filtro de arena:

El agua fluye verticalmente a través del filtro de arena. El filtro se inunda con el agua a ser tratada a intervalos regulares de 1 hora; esto permite la entrada de oxígeno a la arena luego de cada evento de inundación.

El filtro de gravilla tiene que cumplir con algunas condiciones físicas. La arena debe tener un tamaño de partícula entre 0,6 y 2,0 mm, para:

- Garantizar la permeabilidad hidráulica necesaria. La porosidad o espacios libres entre los gránulos es de aproximadamente 30% a esta granulometría. La conductividad hidráulica en este caso es de aproximadamente  $10^{-3}$  m/s.
- Entregar una superficie específica grande, para asegurar las interacciones físicas, químicas y microbiológicas, las que tienen un rol importante en el tratamiento del agua.

✓ Nivel de agua y detalles hidráulicos de la cuenca de sedimentación:

La cuenca de sedimentación se mantiene permanentemente llena con agua. Su función es aquietar las aguas y sedimentar los residuos sólidos contenidos en el agua.

✓ Parámetros clave del filtro de arena:

- |  |                            |
|--|----------------------------|
| ○ Carga superficial total por día (L):                                     | L = 850 mm/d               |
| ○ Carga superficial por intervalos de 1 hora (L):                          | L = 35 mm/h                |
| ○ Altura del filtro de arena (h):  | h = 1,00 m                 |
| ○ Conductividad hidráulica del filtro de arena ( $k_f$ ):                  | $k_f = 10^{-3}$ m/s        |
| ○ Tiempo teórico (t) de paso a través del filtro de arena ( $t = h/k_f$ ): | t = 1.000 s<br>(=16,7 min) |

✓ Parámetros clave de la cuenca de sedimentación:

- |   |                         |
|---|-------------------------|
| ○ Volumen de almacenamiento de agua (V)= 40 m <sup>2</sup> x 1 m: | L = 40 m <sup>3</sup>   |
| ○ Flujo de agua (Q):  | Q = 40m <sup>3</sup> /d |
| ○ Tiempo de retención hidráulico (t)= V/Q:                        | t = 24 h                |

## b) Diseño del módulo de tratamiento anaeróbico:

### ✓ Dimensiones mínimas:

- Para tratar 40 m<sup>3</sup>/día (flujo referencial para el riego de 1 ha de superficie agrícola), las dimensiones mínimas son las siguientes:
  - Superficie de 267 m<sup>2</sup>
  - Profundidad de 100 cm de alto para la gravilla, más aprox. 10-20 cm para la cubierta biológica y más aprox. 50 cm de borde = 170 cm en total
- Para tratar 3.460 m<sup>3</sup>/día (40 L/s), las dimensiones mínimas son las siguientes:
  - Superficie de 23.200 m<sup>2</sup>
  - Profundidad de 100 cm de alto para la gravilla, más aprox. 10-20 cm para la cubierta biológica y más aprox. 50 cm de borde = 170 cm en total

### ✓ Ensamblaje del módulo:

La **Figura 16** muestra un esquema vertical del ensamblaje del módulo. La base debe ser impermeable al agua; su construcción está basada en una multicapa, construida con los siguientes materiales, de arriba hacia abajo:

- Geotextil
- Membrana PELD de 1,00 mm (liner plástico impermeable)
- Geotextil
- Arena
- Suelo compactado libre de piedras

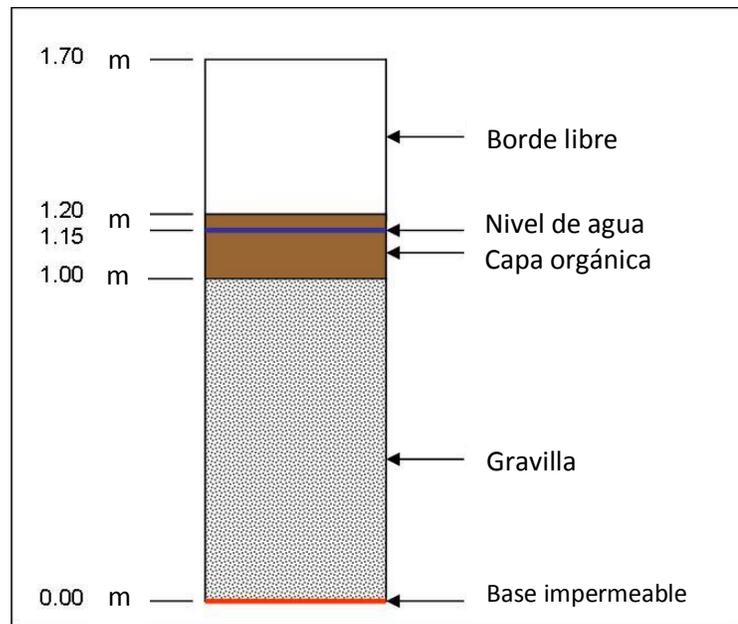
El material de filtrado es gravilla con un tamaño de gránulo entre 2 y 8 mm. El cuarzo ha demostrado buenos resultados como gravilla de filtrado, pero puede usarse cualquier material mineral que sea durable al estar sumergido en agua, el que sea lo suficientemente estable para sostener su propio peso y que no sea una fuente de contaminantes. La capa de gravilla es cubierta con una capa de material orgánico rico en Carbono, tal como melaza, compost, guano animal, lodos sanitarios (biosólidos) o cualquier otro material similar. Esta capa orgánica es fundamental para evitar la infiltración de oxígeno a la capa de gravilla y es una fuente de compuestos carbonados biodisponibles para estimular los procesos de tratamiento microbiológico en el filtro de gravilla. El nivel de agua en el filtro debe ser ajustado a 5 cm por debajo de la capa orgánica.

La disponibilidad de materiales orgánicos ricos en Carbono, a bajo costo, en los volúmenes requeridos en este tipo de filtros (aprox. 40 m<sup>3</sup> para una planta pequeña de 40 m<sup>3</sup>/día y 3.500 m<sup>3</sup> para una planta grande, de 40 L/s) es muy restringida en la localidad de Diego de Almagro, debido a que las actividades agropecuarias de la Comuna de Diego de Almagro son menores. Sin embargo, se ha identificado la disponibilidad de lodos sanitarios (biosólidos) estabilizados, clase B, en la planta de tratamiento de aguas servidas domiciliarias de la ciudad de Diego de Almagro, perteneciente a la empresa Aguas Chañar. Se debe evaluar, sin embargo, la posibilidad real de uso de ellos con estos fines, de acuerdo a las normativas ambientales vigentes. A nivel de la Región de Atacama, existe disponibilidad de algunos residuos orgánicos derivados de las distintas actividades agropecuarias desarrolladas hacia el Sur de la Región, tales como orujos de uva de las

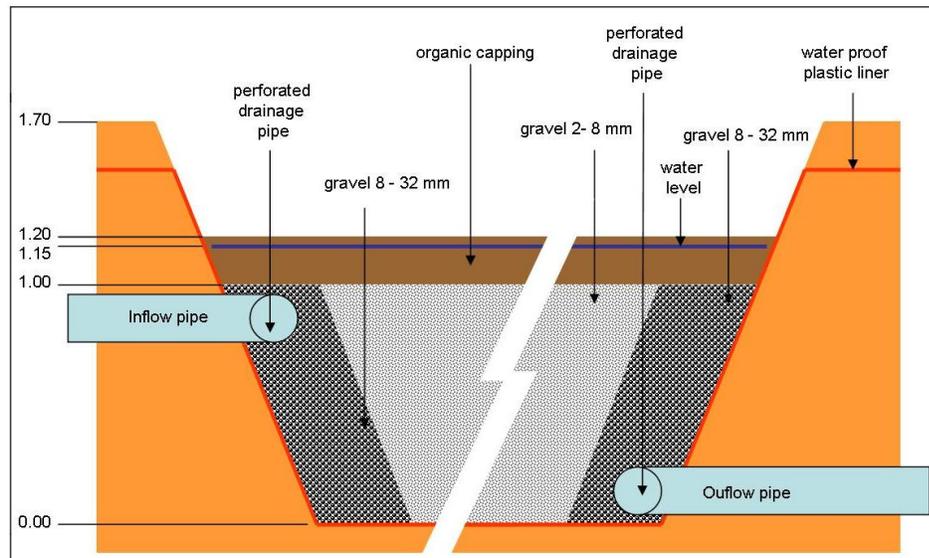
pisqueras (Pisco Capel y otras), compost generado a partir de purines y guanos de cerdo (planta Freirina de Agrosuper) y alperujos derivados de la producción de aceite de oliva (plantas, por ejemplo, en Freirina y Copiapó).

En el caso que estos materiales no estén disponibles en los volúmenes requeridos a nivel local y/o regional, no sean adecuados para los fines de la planta de tratamiento de agua (i.e. su actividad microbiológica sea baja o inadecuada) y/o tengan restricciones de uso por las regulaciones ambientales vigentes, deberá adquirirse este material en otras zonas del país. Por ejemplo, puede usarse melaza como fuente de Carbono orgánico. La melaza es un subproducto generado por la producción de azúcar refinada a partir de la remolacha. En el país, la fuente más cercana de melaza se encuentra en una planta de la empresa Iansa ubicada en la Región del Maule, por lo que los costos de transporte de esta alternativa son extremadamente altos. Una alternativa como esta aumentará en forma significativa los costos operacionales de la planta de tratamiento.

La **Figura 17** muestra un esquema horizontal del ensamblaje desde la zona de entrada de agua a la izquierda a la zona de salida de agua a la derecha. Los costados y la base del filtro están recubiertos con liner plástico impermeable al agua. El material de filtrado es gravilla de tamaño entre 2 y 8 mm. En las zonas de entrada y de salida del agua se utiliza gravilla más gruesa, mayor a 8 mm. Se recomienda el uso de gravilla con tamaño de partícula entre 8 y 32 mm. En la zona de entrada y salida de agua se utiliza cañerías de drenaje perforadas para la distribución y la recolección del agua.



**Figura 16.** Diseño vertical del módulo de filtro de gravilla cubierto.



**Figura 17.** Diseño vertical del módulo de filtro de gravilla cubierto. Water proof plastic liner, liner plástico impermeable al agua; gravel, gravilla; organic capping, cubierta orgánica (zona café); water level, nivel de agua (línea azul); free board, borde libre; inflow pipe, cañería de entrada; outflow pipe, cañería de salida; perforated drainage pipe, cañería perforada de drenaje.

✓ Nivel de agua y detalles hidráulicos:

El agua fluye horizontalmente a través del filtro. El filtro está permanentemente lleno con agua. El nivel de agua en este módulo tiene que ser ajustado a 5 cm por debajo de la superficie de la capa orgánica (**Figuras 16 y 17**); de esta forma, la capa orgánica se encuentra en la zona saturada pero no hay agua en la superficie de ésta. De no ser así, pueden producirse flujos de agua en la superficie lo que disminuye la eficacia del tratamiento.

El filtro de gravilla tiene que cumplir con algunas condiciones físicas. La gravilla debe tener un tamaño de partícula entre 2 y 8 mm, para:

- Garantizar la permeabilidad hidráulica necesaria. La porosidad o espacios libres entre los gránulos es de aproximadamente 30% a esta granulometría.
- Entregar una superficie específica grande, para asegurar el establecimiento de los microorganismos, los que tienen un rol importante en la conversión del sulfato en sulfuro, el que es co-precipitado en forma permanente como sulfuro metálico.

✓ Parámetros clave:

- Tiempo de retención mínimo del agua en el filtro (t):  $t = 2$  días
- Porosidad del filtro de gravilla ( $\Phi$ ):  $\Phi = 30\%$
- Volumen mínimo del filtro (V) por tasa de flujo de agua de  $Q = 1 \text{ m}^3/\text{d}$ :  $V = Q \cdot t / \Phi = 6,7 \text{ m}^3$

- Volumen mínimo del filtro por tasa de flujo de agua de  $Q = 40 \text{ m}^3/\text{d}$ :  $V = 268 \text{ m}^3$
- Volumen mínimo del filtro por tasa de flujo de agua de  $Q = 3.460 \text{ m}^3/\text{d}$ :  $V = 23.200 \text{ m}^3$  (40 LTS)

### c) Pozos de monitoreo:

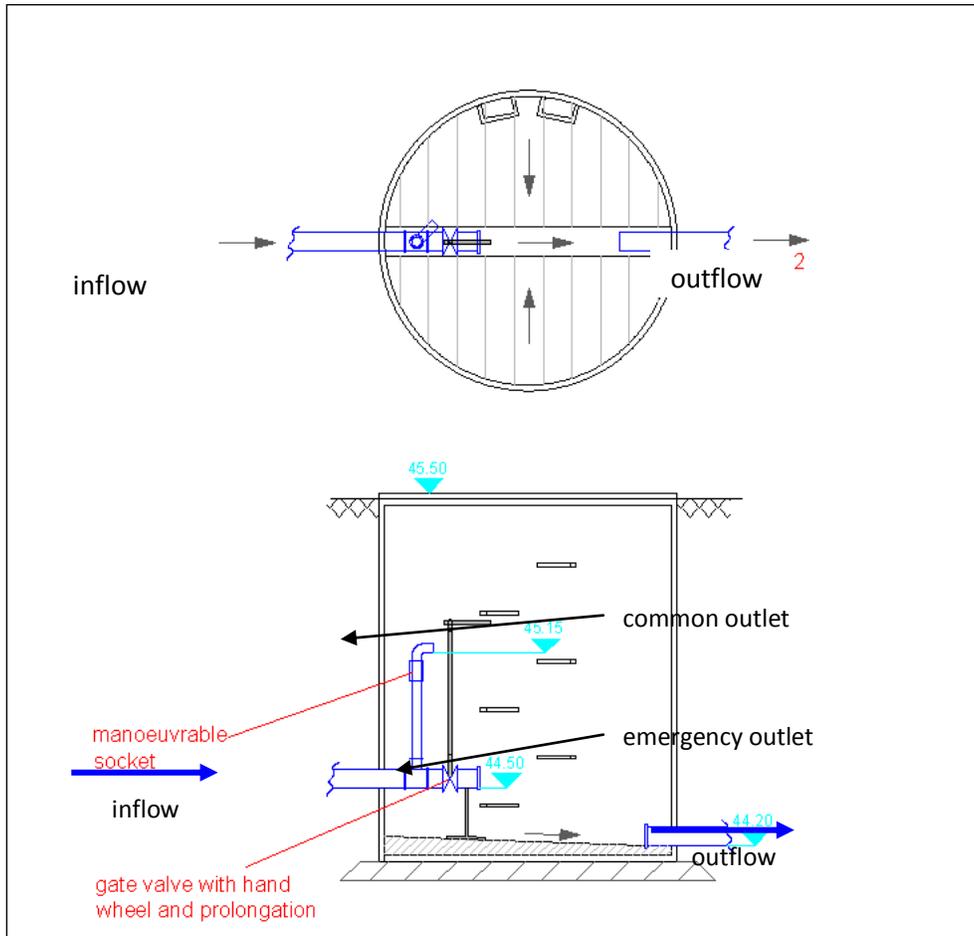
Se requieren tres pozos de monitoreo para la planta de tratamiento; uno entre el filtro de arena y la cuenca de sedimentación; otro entre la cuenca de sedimentación y el filtro de gravilla nivelado y otro después del filtro de gravilla nivelado (**Figura 14**). Los pozos de monitoreo cumplen dos funciones:

- Son un punto de control visual y de muestreo del agua que fluye a través de la planta de tratamiento.
- El ubicado al final, a la salida del filtro de gravilla nivelado, es el lugar donde se instalan los aparatos para la regulación del agua.

Los pozos de monitoreo (**Figura 18**) están equipados con una cañería de entrada y otra de salida. La cañería de entrada está conectada con una válvula reguladora de emergencia. En el caso de los pozos ubicados a la salida de la cuenca de sedimentación y del filtro de gravilla nivelado, además de la válvula de emergencia, las cañerías de entrada están conectadas a una cañería dispuesta verticalmente. La cañería vertical es la salida normal del agua y es de longitud variable, de forma de poder controlar el nivel de agua en el módulo ubicado aguas arriba. La longitud puede ser cambiada adosando la cañería vertical a un arco con un trozo de tubo móvil. Este trozo de tubo móvil consiste en un trozo de cañería con O rings de goma en ambos extremos, lo que permite desplazarlo hacia arriba y abajo sin riesgo de fugas de agua; se muestra un ejemplo en la **Figura 19**. Otra posibilidad para ajustar la altura de la cañería vertical es usar un tubo colapsable como se muestra en la **Figura 20**.

La salida de emergencia está equipada con una válvula de compuerta de escape (**Figura 18**). En estado normal de operación esta válvula está cerrada. Al abrir la válvula, es posible vaciar completamente el módulo ubicado aguas arriba.

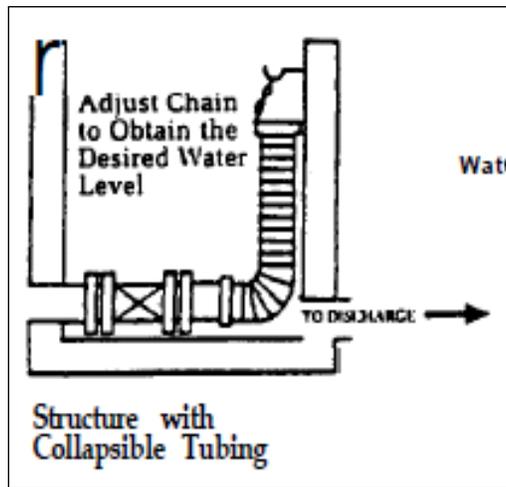
Los pozos de monitoreo pueden adquirirse pre-fabricados o ser construidos en el lugar. Debido a la composición particularmente agresiva de las aguas claras de relaves y a las condiciones climáticas del área, se recomienda usar pozos de monitoreo de plástico PE/PP más bien que de concreto o acero inoxidable (**Figura 21**). Se consideró este tipo de material en la estimación de costos. La altura de los pozos debe ser ajustada a las condiciones del sitio de construcción. El diámetro debe ser entre 100 y 150 cm y deben ser de fácil acceso para su inspección. Los pozos de monitoreo deben ser tapados adecuadamente para evitar accidentes. Las tapas usadas deben ser resistentes a la radiación UV.



**Figura 18.** Esquema técnico en vistas superior y lateral de un pozo de monitoreo (ejemplo). Inflow, flujo de entrada; outflow, flujo de salida; common outlet, salida normal de agua; emergency outlet, salida de emergencia de agua; manoeuvrable socket, tubo móvil; gate valve with hand wheel and prolongation, válvula de compuerta con rueda manual y prolongación.



**Figura 19.** Trozo de tubo móvil.



**Figura 20.** Cañería vertical para regular el nivel de agua construido con tubería colapsable.



**Figura 21.** Pozo de monitoreo plástico, prefabricado.

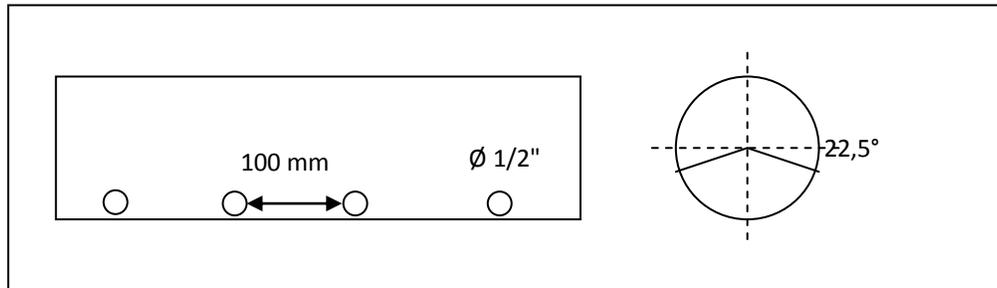
**d) Cañerías:**

Todas las cañerías, sus conexiones, sus pasadas a través del liner plástico de los módulos de tratamiento, sus pasadas a los pozos de monitoreo y sus conexiones a las tuberías y válvulas deben ser a prueba de filtraciones. El diámetro de las cañerías que conectan los tres módulos de tratamiento y los pozos de monitoreo dependen de los caudales de agua, el ángulo de la pendiente y el material del sistema de cañerías. Las cañerías de conexión deben ser enterradas y dispuestas sobre una cama de arena compactada.

Por toda la superficie del filtro de arena se deben instalar cañerías de distribución de las aguas. La distancia entre las cañerías de distribución debe ser de 2,0 m. Las cañerías de recolección de las aguas dispuestas en la base del filtro de arena deben ser dispuestas en forma escalonada. Tanto las cañerías de distribución como las de recolección de las aguas

corresponden a cañerías de drenaje. Estas cañerías poseen perforaciones de al menos  $\frac{1}{2}$ ", distribuidas homogéneamente por todo su largo (**Figura 22**).

En las zonas de entrada y de salida ubicadas al interior del módulo de tratamiento anaeróbico se ponen cañerías perforadas de drenaje, para la distribución y recolección del agua. Las cañerías de drenaje se disponen a todo lo largo de los sitios de entrada y salida.



**Figura 22.** Sistema de cañerías perforadas (drenajes de entrada y salida).

**e) Hidráulica:**

El filtro de arena debe ser alimentado de agua a intervalos regulares de 1 hora. La alimentación de agua a la cuenca de sedimentación y el filtro de gravilla nivelado es por gravedad natural. Esta opción tiene la ventaja de prescindir de bombas para mover el agua.

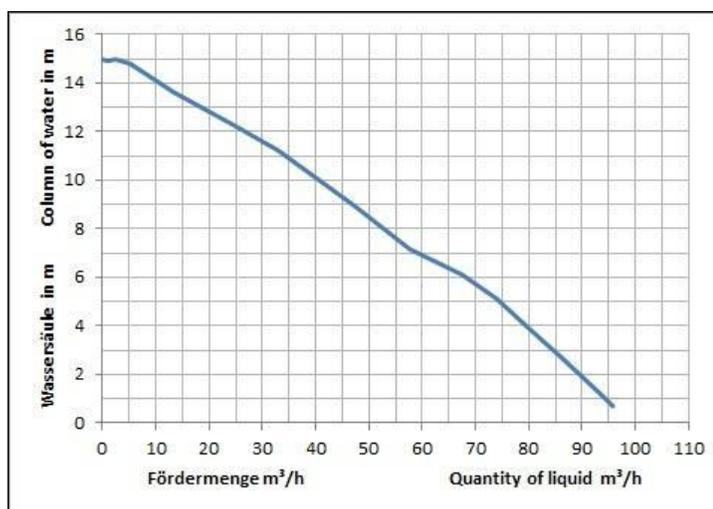
**f) Equipos eléctricos y requerimientos de electricidad:**

Se requiere de energía eléctrica para operar la bomba de alimentación del filtro de arena. Se requiere de energía adicional para los equipos de medición, tales como medidores de caudal y sensores para medir la calidad del agua.

La demanda de energía depende de:

- El consumo de energía de la bomba.
- Las horas diarias de uso de la bomba. Estas horas dependen del flujo de entrega de la bomba  $Q$  [L/s] en el sitio y especialmente de la diferencia de altura entre el punto de toma del agua y de descarga del agua. La relación entre la diferencia en altura y la tasa de entrega es específica para cada bomba y es normalmente ilustrada en un diagrama, tal como el de la **Figura 23**. Por ejemplo, para bombear  $40 \text{ m}^3/\text{d}$  (el flujo referencial de agua para regar 1 hectárea), en un desnivel de 2 m con la bomba de 2,8 kW descrita en la **Figura 23**, se requiere un consumo de energía de 1,25 kWh. Esto resulta en un consumo de aproximadamente 455 kWh al año.

En comparación con el consumo de energía de las bombas, el consumo de los equipos de medición es despreciable.



**Figura 23.** Diagrama de rendimiento de una bomba (ejemplo de una bomba de inmersión con un consumo de energía de 2,8 kW).

**g) Vida útil del sistema, monitoreo y remoción de contaminantes:**

✓ Vida útil del sistema y monitoreo:

Los sistemas de tratamiento basados en los filtros propuestos en la Combinación 1, como el propuesto para el tratamiento de las aguas claras del tranque Pampa Austral, pueden tener una vida útil ilimitada si son mantenidos en forma adecuada.

La eficacia de la planta de tratamiento de aguas (rendimiento del filtro de tratamiento), debe ser monitoreada en intervalos regulares. Se recomienda analizar las concentraciones de los contaminantes de interés del agua antes de entrar a la planta de tratamiento, entre los dos módulos de tratamiento y a la salida de la planta de tratamiento. Se recomienda el siguiente cronograma de monitoreo:

- Meses 1 a 3: cada dos semanas
- Meses 4 a 12: cada cuatro semanas
- A partir de los 13 meses: cada 6 meses

Para aquellos contaminantes que son retenidos parcialmente en el filtro de gravilla, como los sulfuros de metal, se debe monitorear la acumulación de estas sustancias en forma periódica (al menos una vez al año), de forma de evaluar el rendimiento del filtro. De ser necesario, las entradas y salidas del filtro pueden ser limpiadas por medio de reflujos. Dependiendo de su composición química el agua de reflujos puede ser, por ejemplo, filtrada o dispuesta en el depósito de relaves o precipitada y los residuos sólidos dispuestos en forma segura. Si esto debe realizarse, y con qué frecuencia, debe ser determinado en una planta operativa.

✓ Remoción de contaminantes:

Considerando los pre-ensayos de laboratorio de remoción de los contaminantes de interés realizados por BioPlanta en Alemania, para las tecnologías involucradas en esta combinación, la remoción estimada para el tamaño de planta considerada se muestran en la **Tabla 23**.

**Tabla 23.** Remoción de contaminantes según los pre-ensayos de laboratorio realizados por BioPlanta.

Parámetro	Unidad	Aguas claras	Filtro arena	Filtro gravilla plantado	Remoción total
			Calidad de salida	Calidad de salida	
SO <sub>4</sub>	[mg/L]	2.883	2.534	507	2.376
As total	[mg/L]	0,23	0,01	0,00	0,23
B total	[mg/L]	8,70	8,70	7,89	0,81
Mn total	[mg/L]	0,25	0,01	0,00	0,25
Mo total	[mg/L]	0,96	0,87	0,03	0,92
Cl <sup>-</sup>	[mg/L]	2.879	2.879	1.900	979
Conductividad a 25° C	[ms/cm]	11,80	11,80	11,65	0,14

Considerando las capacidades potenciales de tratamiento (velocidad de flujo del agua a través del sistema de tratamiento), las cargas de contaminantes removidas se estiman en los valores indicados en la **Tabla 24**. Este cálculo es una estimación gruesa basada en las prueba de laboratorio. Factores que influyen, tales como el lavado lento de los contaminantes que están ligados / trasferidos a compuestos ambientalmente seguros (los que podrían no ser detectados en la salida debido a cambios en la composición química), no pueden ser calculados. También puede ocurrir volatilización de contaminantes a través de las plantas y fijación de ellos al material orgánico del filtro de gravilla cubierto, lo que no puede ser calculado. De esta forma, la generación exacta de residuos en los filtros de gravilla debe ser monitoreada periódicamente (al menos una vez al año).

**Tabla 24.** Cargas de contaminantes removidos en un sistema combinado (filtro de arena, cuenca de sedimentación y filtro de gravilla plantado).

		Capacidad de tratamiento 1 m <sup>3</sup> /d	Capacidad de tratamiento 40 m <sup>3</sup> /d	Capacidad de tratamiento 40 L/s = 3,460 m <sup>3</sup> /d
Parámetro	Remoción total [mg/L]	Carga removida de contaminantes [g/d]	Carga removida de contaminantes [g/d]	Carga removida de contaminantes [kg/d]
SO <sub>4</sub> -S	803	803	32.122	2.779
As total	0,23	0,23	9,3	0,8
B total	0,81	0,81	32,6	2,8
Mn total	0,25	0,25	10,0	0,9
Mo total	0,92	0,92	36,9	3,2
Cl <sup>-</sup>	979	979	39.151	3.387

#### h) Desmantelamiento:

El desmantelamiento de la planta de tratamiento sigue los mismos procedimientos de desmantelamiento de cualquier proyecto de trabajo estructural. La planta de tratamiento consiste en los siguientes tipos de materiales:

- Filtro de arena
- Filtro de gravilla
- Material de la capa orgánica
- Liner plástico
- Cañerías, fittings, válvulas
- Pozos de monitoreo
- Equipamiento eléctrico

Generalmente, todos los materiales deben ser desmantelados y apilados en forma separada en el sitio para permitir el transporte específico, reuso o disposición.

Se recomienda muestrear y analizar los filtros de arena y de gravilla y la capa orgánica del filtro de gravilla nivelado antes de que sean removidos del lugar. Estos materiales deben ser analizados en cuanto a su contenido de contaminantes. Dependiendo de los resultados del análisis se debe decidir si la arena y/o gravilla pueden ser reutilizadas directamente como materiales de construcción, si deben ser limpiadas (lavada o secada y tamizada) antes de ser reusada como materiales de construcción o si deben ser dispuestas en forma

segura. Si la arena y/o gravilla deben ser limpiadas, el agua de lavado o el residuo del tamizado debe ser tratado y/o dispuesto en forma adecuada.

La capa orgánica también debería ser muestreada y analizada antes de ser removida. Dependiendo de los resultados del análisis se debe decidir si éste puede ser reutilizado, por ejemplo para la generación de biogás o como enmienda de suelo. Si esto no es posible, entonces debe ser dispuesta en forma segura.

El liner plástico puede ser reutilizado por ejemplo para la construcción de piletas o para el cubrimiento de materiales. Otra opción es llevarlo a una empresa recicladora de plástico.

Las cañerías, fittings, válvulas, equipamiento eléctrico y trabajos en acero deben ser chequeados en cuanto a su condición y funcionalidad y pueden ser vendidos, reutilizados en otros sitios o llevados a una empresa de reciclaje.

## **1.2 ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD COMBINACIÓN 2: Tecnología de tratamiento de aguas claras por método pasivo biológico anaeróbico y filtro de gravilla plantado:**

Esta combinación es la opción de tratamiento más adecuada para dar cumplimiento a las meta-objetivo definidas para las aguas claras de relaves del tranque Pampa Austra, consideradas en el presente estudio. A continuación se describe en detalle el pre-diseño de ingeniería de esta opción de tratamiento.

### **I. Detalles de ingeniería y equipamiento hidráulico:**

Los detalles de diseño descritos en las próximas secciones están basados en formatos básicos para plantas de tratamiento de este tipo, ya que no existe definición del sitio específico donde se instalaría la planta de tratamiento de interés en la localidad de Diego de Almagro. Sin embargo, se consideran las características climáticas áridas del área y otras condiciones generales de la localidad.

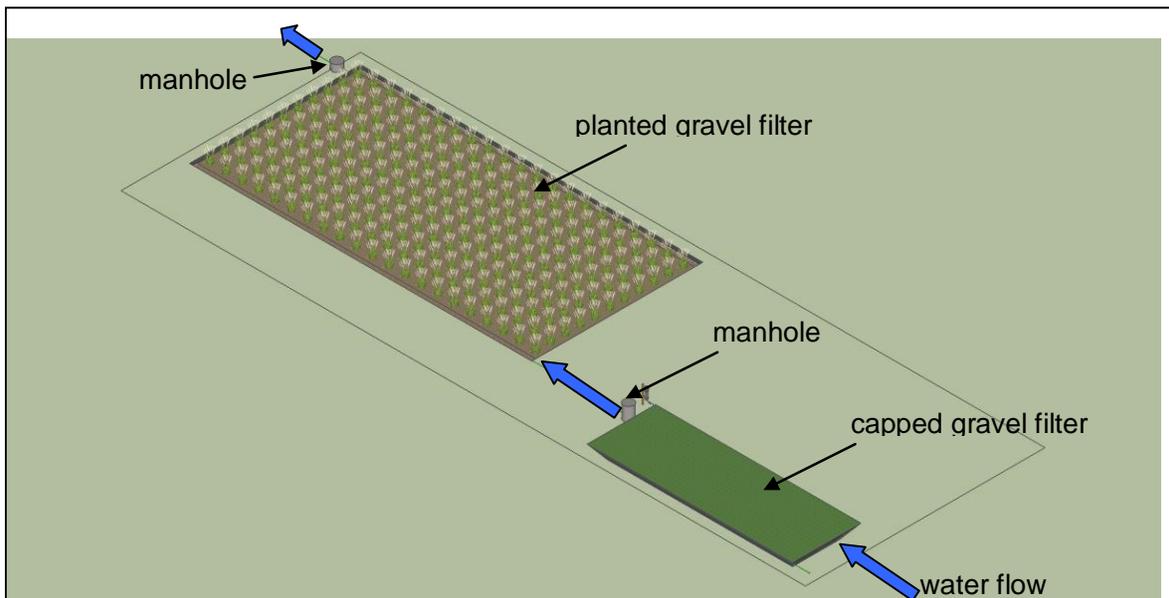
La planta de tratamiento consiste en dos módulos: un filtro de gravilla nivelado, más pequeño, consistente en un módulo para el tratamiento pasivo biológico anaeróbico y un filtro de mayor tamaño consistente en el módulo de tratamiento de gravilla plantado (**Figura 24 y Anexo 15**).

Ambos módulos deben ser dispuestos sobre una superficie de suelo impermeabilizada. El agua a ser tratada se direcciona al primer módulo de tratamiento y de ahí al segundo. Cada módulo está equipado con un pozo de monitoreo (manhole en inglés) para regular el nivel del agua y hacer muestreos para verificar la calidad de ésta en el punto de salida.

Aunque se propone una geometría específica para los módulos, esta no es obligatoria. La proporción largo-ancho de cada uno de los módulos puede ser modificada o cada módulo puede ser subdividido en dos o más unidades, de forma de adaptarlos a las condiciones

específicas del sitio donde efectivamente se instale la planta de tratamiento; lo importante es no cambiar la superficie total indicada.

El diseño está basado en un caudal de tratamiento de  $40 \text{ m}^3/\text{día}$ , correspondiente a un caudal adecuado para regar 1 hectárea de superficie agrícola. Capacidades mayores de tratamiento requieren que algunos componentes de la planta de tratamiento sean agrandados. Por ejemplo, si se desea construir una planta para un caudal de tratamiento de  $400 \text{ m}^3/\text{día}$  en lugar de  $40 \text{ m}^3/\text{día}$ , las superficies de cada módulo deben ser aumentadas en diez veces; adicionalmente, deben usarse cañerías y fittings de mayor diámetro. El número de pozos de monitoreo puede mantenerse, pero también debe aumentarse su diámetro.



**Figura 24.** Esquema de la planta de tratamiento para la Combinación 2, basada en un filtro de gravilla nivelado (módulo 1, inferior derecho, capped gravel filter) y un filtro de gravilla plantado (módulo 2, superior izquierda, planted gravel filter). Las flechas azules indican la dirección de flujo del agua. Cada unidad cuenta con un pozo de monitoreo (Manhole, en inglés).

#### a) Diseño del módulo de tratamiento anaeróbico:

##### ✓ Dimensiones mínimas:

- Para tratar  $40 \text{ m}^3/\text{día}$  (flujo referencial para el riego de 1 ha de superficie agrícola), las dimensiones mínimas son las siguientes:
  - Superficie de  $267 \text{ m}^2$
  - Profundidad de 100 cm de alto para la gravilla, más aprox. 10-20 cm para la cubierta biológica y más aprox. 50 cm de borde = 170 cm en total
- Para tratar  $3.460 \text{ m}^3/\text{día}$  ( $40 \text{ L/s}$ ), las dimensiones mínimas son las siguientes:
  - Superficie de  $23.200 \text{ m}^2$

- Profundidad de 100 cm de alto para la gravilla, más aprox. 10-20 cm para la cubierta biológica y más aprox. 50 cm de borde = 170 cm en total

✓ Ensamblaje del módulo:

La **Figura 25** muestra un esquema vertical del ensamblaje del módulo. La base debe ser impermeable al agua; su construcción está basada en una multicapa, construida con los siguientes materiales, de arriba hacia abajo:

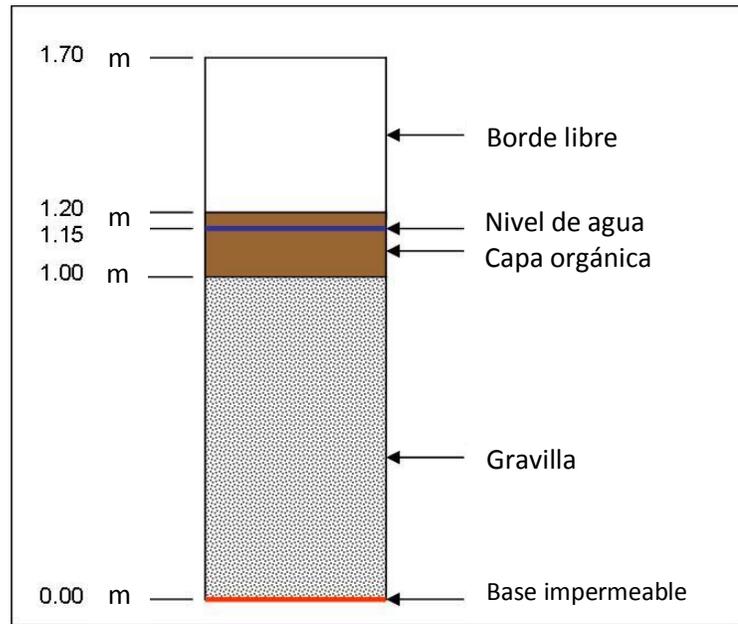
- Geotextil
- Membrana PELD de 1,00 mm (liner plástico impermeable)
- Geotextil
- Arena
- Suelo compactado libre de piedras

El material de filtrado es gravilla con un tamaño de gránulo entre 2 y 8 mm. El cuarzo ha demostrado buenos resultados como gravilla de filtrado, pero puede usarse cualquier material mineral que sea durable al estar sumergido en agua, el que sea lo suficientemente estable para sostener su propio peso y que no sea una fuente de contaminantes. La capa de gravilla es cubierta con una capa de material orgánico rico en Carbono, tal como melaza, compost, guano animal, lodos sanitarios (biosólidos) o cualquier otro material similar. Esta capa orgánica es fundamental para evitar la infiltración de oxígeno a la capa de gravilla y es una fuente de compuestos carbonados biodisponibles para estimular los procesos de tratamiento microbiológico en el filtro de gravilla. El nivel de agua en el filtro debe ser ajustado a 5 cm por debajo de la capa orgánica.

La disponibilidad de materiales orgánicos ricos en Carbono, a bajo costo, en los volúmenes requeridos en este tipo de filtros (aprox. 40 m<sup>3</sup> para una planta pequeña de 40 m<sup>3</sup>/día y 3.500 m<sup>3</sup> para una planta grande, de 40 L/s) es muy restringida en la localidad de Diego de Almagro, debido a que las actividades agropecuarias de la Comuna de Diego de Almagro son menores. Sin embargo, se ha identificado la disponibilidad de lodos sanitarios (biosólidos) estabilizados, clase B, en la planta de tratamiento de aguas servidas domiciliarias de la ciudad de Diego de Almagro, perteneciente a la empresa Aguas Chañar. Se debe evaluar, sin embargo, la posibilidad real de uso de ellos con estos fines, de acuerdo a las normativas ambientales vigentes. A nivel de la Región de Atacama, existe disponibilidad de algunos residuos orgánicos derivados de las distintas actividades agropecuarias desarrolladas hacia el Sur de la Región, tales como orujos de uva de las pisqueras (Pisco Capel y otras), compost generado a partir de purines y guanos de cerdo (planta Freirina de Agrosuper) y alperujos derivados de la producción de aceite de oliva (plantas, por ejemplo, en Freirina y Copiapó).

En el caso que estos materiales no estén disponibles en los volúmenes requeridos a nivel local y/o regional, no sean adecuados para los fines de la planta de tratamiento de agua (i.e. su actividad microbiológica sea baja o inadecuada) y/o tengan restricciones de uso por las regulaciones ambientales vigentes, deberá adquirirse este material en otras zonas del país. Por ejemplo, puede usarse melaza como fuente de Carbono orgánico. La melaza es un subproducto generado por la producción de azúcar refinada a partir de la remolacha. En el país, la fuente más cercana de melaza se encuentra en una planta de la empresa Iansa ubicada en la Región del Maule, por lo que los costos de transporte de esta

alternativa son extremadamente altos. Una alternativa como esta aumentará en forma significativa los costos operacionales de la planta de tratamiento.

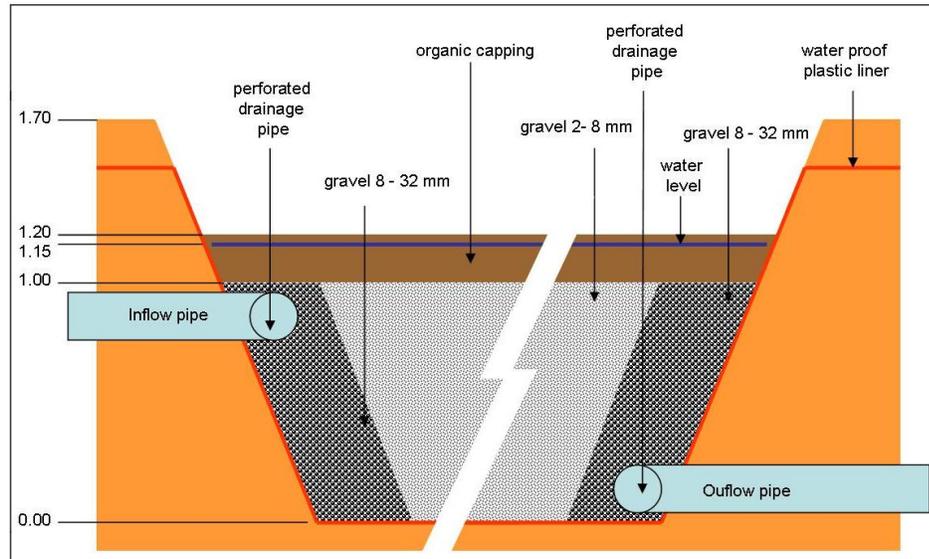


**Figura 25.** Diseño vertical del módulo de filtro de gravilla cubierto.

La **Figura 26** muestra un esquema horizontal del ensamblaje desde la zona de entrada de agua a la izquierda a la zona de salida de agua a la derecha. Los costados y la base del filtro están recubiertos con liner plástico impermeable al agua. El material de filtrado es gravilla de tamaño entre 2 y 8 mm. En las zonas de entrada y de salida del agua se utiliza gravilla más gruesa, mayor a 8 mm. Se recomienda el uso de gravilla con tamaño de partícula entre 8 y 32 mm. En la zona de entrada y salida de agua se utiliza cañerías de drenaje perforadas para la distribución y la recolección del agua.

✓ Nivel de agua y detalles hidráulicos:

El agua fluye horizontalmente a través del filtro. El filtro está permanentemente lleno con agua. El nivel de agua en este módulo tiene que ser ajustado a 5 cm por debajo de la superficie de la capa orgánica (**Figuras 25 y 26**); de esta forma, la capa orgánica se encuentra en la zona saturada pero no hay agua en la superficie de ésta. De no ser así, pueden producirse flujos de agua en la superficie lo que disminuye la eficacia del tratamiento.



**Figura 26.** Diseño vertical del módulo de filtro de gravilla cubierto. Water proof plastic liner, liner plástico impermeable al agua; gravel, gravilla; organic capping, cubierta orgánica (zona café); water level, nivel de agua (línea azul); free board, borde libre; inflow pipe, cañería de entrada; outflow pipe, cañería de salida; perforated drainage pipe, cañería perforada de drenaje.

El filtro de gravilla tiene que cumplir con algunas condiciones físicas. La gravilla debe tener un tamaño de partícula entre 2 y 8 mm, para:

- Garantizar la permeabilidad hidráulica necesaria. La porosidad o espacios libres entre los gránulos es de aproximadamente 30% a esta granulometría.
- Entregar una superficie específica grande, para asegurar el establecimiento de los microorganismos, los que tienen un rol importante en la conversión del sulfato en sulfuro, el que es co-precipitado en forma permanente como sulfuro metálico.

✓ Parámetros clave:

- Tiempo de retención mínimo del agua en el filtro (t):  $t = 2$  días
- Porosidad del filtro de gravilla ( $\Phi$ ):  $\Phi = 30\%$
- Volumen mínimo del filtro (V) por tasa de flujo de agua de  $Q = 1 \text{ m}^3/\text{d}$ :  $V = Q \cdot t / \Phi = 6,7 \text{ m}^3$
- Volumen mínimo del filtro por tasa de flujo de agua de  $Q = 40 \text{ m}^3/\text{d}$ :  $V = 268 \text{ m}^3$
- Volumen mínimo del filtro por tasa de flujo de agua de  $Q = 3.460 \text{ m}^3/\text{d}$ :  $V = 23.200 \text{ m}^3$  (40 L7S)

## b) Diseño del módulo de filtro de gravilla:

### ✓ Dimensiones mínimas:

- Para tratar 40 m<sup>3</sup>/día (flujo referencial para el riego de 1 ha de superficie agrícola), las dimensiones son las siguientes:
  - Superficie de 933 m<sup>2</sup>
  - Profundidad de 105 cm de alto para la gravilla más aprox. 50 cm de borde = 155 cm en total
  
- Para tratar 3.460 m<sup>3</sup>/día (40 L/s), las dimensiones son las siguientes:
  - Superficie de 80.700 m<sup>2</sup>
  - Profundidad de 105 cm de alto para la gravilla más aprox. 50 cm de borde = 155 cm en total

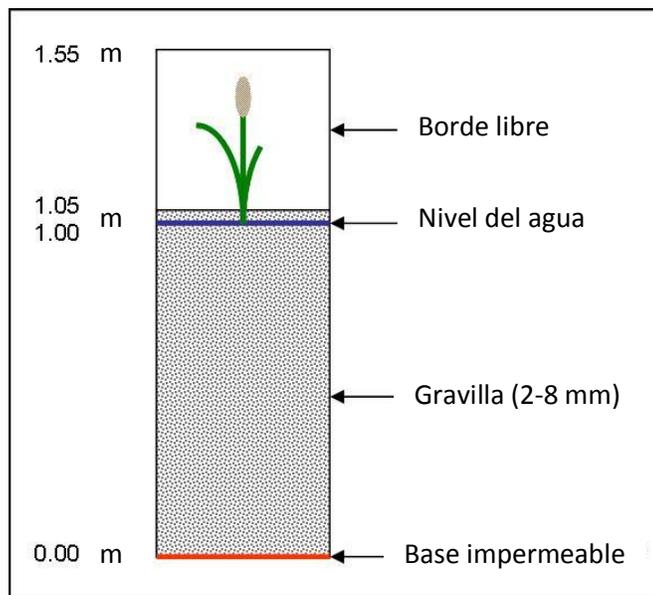
### ✓ Ensamblaje del módulo:

La **Figura 27** muestra un esquema vertical del ensamblaje del módulo. La base debe ser impermeable al agua; su construcción está basada en una multicapa, construida con los siguientes materiales, de arriba hacia abajo:

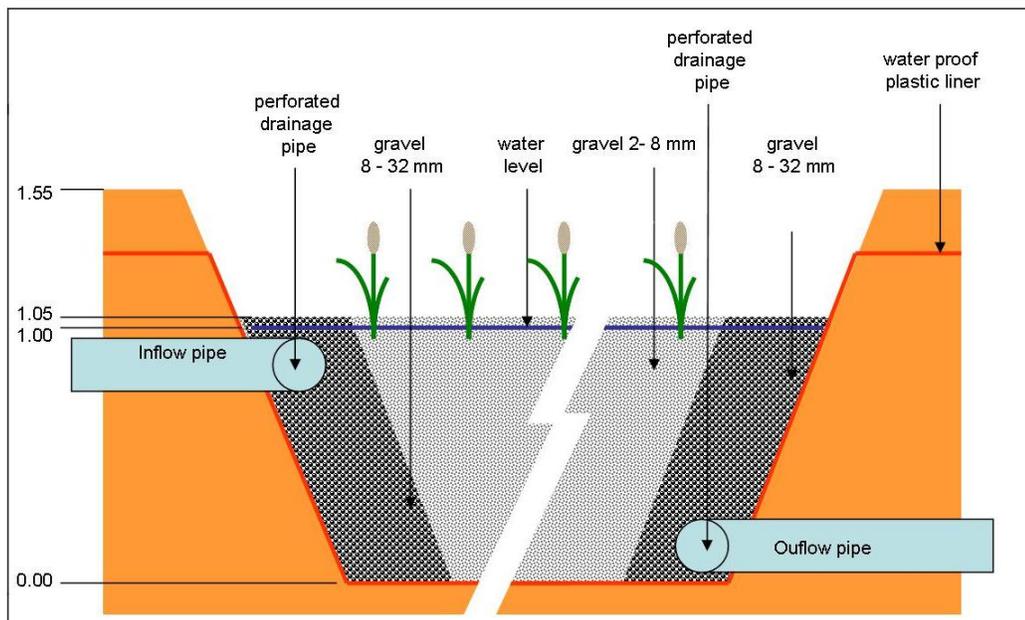
- Geotextil
- Membrana PELD de 1,00 mm (liner plástico impermeable)
- Geotextil
- Arena
- Suelo compactado libre de piedras

El material de filtrado es gravilla con un tamaño de 2 a 8 mm. El cuarzo ha demostrado buenos resultados como gravilla de filtrado, pero puede usarse cualquier material mineral que sea durable al estar sumergido en agua, que sea lo suficientemente estable para sostener su propio peso y que no sea una fuente de contaminantes. El filtro es luego plantado con plantas halófitas (aprox. 6-8 plantas por metro cuadrado). Se recomienda el uso de caña común (*Phragmites australis*), una planta que es abundante en muchos lugares del mundo y que es capaz de tolerar una gran variedad de calidades de agua. El nivel de agua en el filtro de gravilla tiene que ser ajustado a 5 cm por debajo de la superficie de la gravilla.

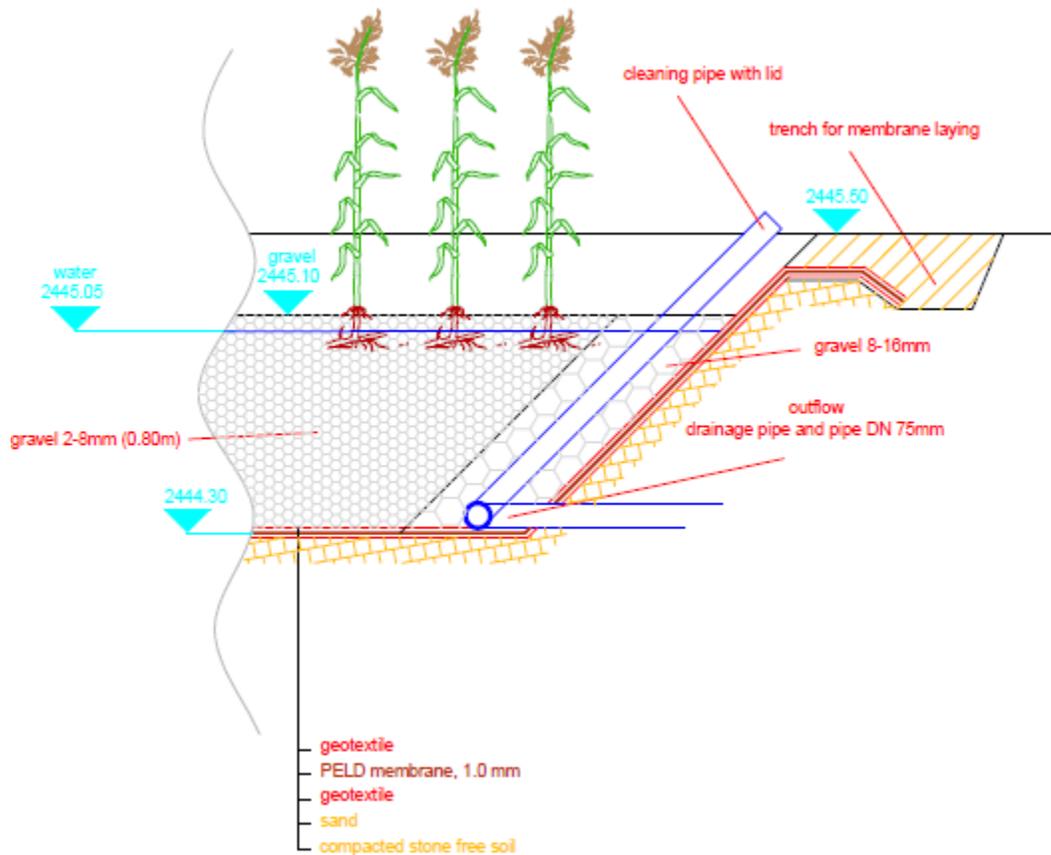
La **Figura 28A** muestra un esquema horizontal del ensamblaje del módulo desde la zona de entrada de agua en la izquierda a la salida de agua a la derecha. La base y los costados de la cubeta están cubiertas con liner plástico impermeable al agua. El material de filtrado es gravilla de tamaño entre 2 y 8 mm. Como en el módulo anterior, se usa gravilla más gruesa (entre 8 y 32 mm) en las zonas de entrada y salida del agua. En las zonas de entrada y salida del agua cañerías de drenaje perforadas se disponen para la adecuada distribución y recolección del agua. La **Figura 28B** muestra un detalle de la zona de salida de agua desde el filtro.



**Figura 27.** Diseño vertical del módulo de filtro de gravilla plantado.



**Figura 28A.** Diseño vertical del módulo de filtro de gravilla plantado. Water proof plastic liner, liner plástico impermeable al agua; gravel, gravilla; water level, nivel de agua (línea azul); free board, borde libre; inflow pipe, cañería de entrada; outflow pipe, cañería de salida; perforated drainage pipe, cañería perforada de drenaje.



**Figura 28B.** Detalle del diseño vertical del sector de salida de agua del filtro de gravilla plantado. Cleaning pipe with lid, cañería de limpiado con tapa; trench for membrane laying, zanja para afirmar la membrana impermeable al agua; gravel, gravilla; water level, nivel de agua (línea azul); outflow drainage pipe and pipe DN, cañería de drenaje de salida y cañería DN; geotextile, geotextil; PELD membrane, membrana PELD; sand, arena; compacted Stone free soil, suelo compactado libre de piedras.

✓ Nivel de agua y detalles hidráulicos:

El agua fluye horizontalmente a través del filtro. El filtro está permanentemente lleno con agua. El nivel de agua en este módulo tiene que ser ajustado a 5 cm por debajo de la superficie de la gravilla (**Figuras 27 y 28**); de esta forma, las raíces de las plantas se encuentran en la zona saturada pero no hay agua en la superficie de la gravilla. De no ser así, pueden producirse flujos de agua en la superficie lo que disminuye la eficacia del tratamiento.

El filtro de gravilla tiene que cumplir con algunas condiciones físicas. La gravilla debe tener un tamaño de partícula entre 2 y 8 mm, para:

- Garantizar la permeabilidad hidráulica necesaria. La porosidad o espacios libres entre los gránulos es de aproximadamente 30% a esta granulometría.
- Entregar una superficie específica grande, para asegurar el establecimiento de los microorganismos, los que tienen un rol importante en la mineralización de los compuestos orgánicos.

✓ Parámetros clave:

- Tiempo de retención mínimo del agua en el filtro (t):  $t = 7$  días
- Porosidad del filtro de gravilla ( $\Phi$ ):  $\Phi = 30\%$
- Volumen mínimo del filtro (V) por tasa de flujo de agua de  $Q = 1 \text{ m}^3/\text{d}$ :  $V = Q \cdot t / \Phi = 23,3 \text{ m}^3$
- Volumen mínimo del filtro por tasa de flujo de agua de  $Q = 40 \text{ m}^3/\text{d}$ :  $V = 933 \text{ m}^3$
- Volumen mínimo del filtro por tasa de flujo de agua de  $Q = 3.460 \text{ m}^3/\text{d}$ :  $V = 80.700 \text{ m}^3$   
(40 LTS)

**c) Pozos de monitoreo:**

Ver punto 1.1.1.c más arriba

**d) Cañerías:**

Ver punto 1.1.1.d más arriba

**e) Hidráulica:**

Debería usarse la gravedad natural para permitir el flujo del agua a través del sistema, si es que las condiciones topográficas de diferencia de altura en el sitio de construcción entre los puntos de entrada y salida del agua lo permiten. Esta opción tiene la ventaja de prescindir de bombas para mover el agua.

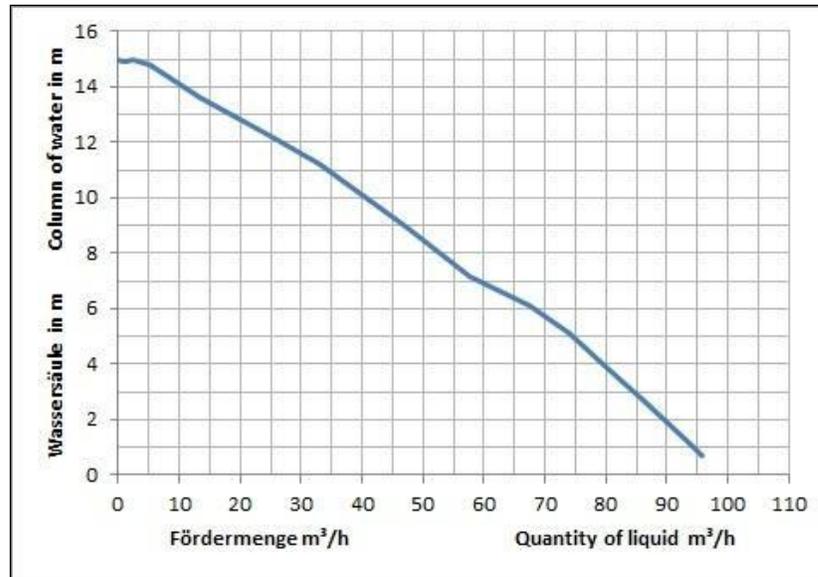
**f) Equipos eléctricos y requerimientos de electricidad:**

Si las condiciones de altura del sitio no permiten el flujo de agua por gravedad, se requiere de energía eléctrica para operar bombas. Se requiere de energía adicional para los equipos de medición, tales como medidores de caudal y sensores para medir la calidad del agua.

La cantidad de energía eléctrica depende principalmente de si se requiere una bomba para la distribución del agua; de ser este el caso, la demanda de energía depende de:

- El consumo de energía de la bomba.
- Las horas diarias de uso de la bomba. Estas horas dependen del flujo de entrega de la bomba  $Q$  [L/s] en el sitio y especialmente de la diferencia de altura entre el punto de toma del agua y de descarga del agua. La relación entre la diferencia en altura y la tasa de entrega es específica para cada bomba y es normalmente ilustrada en un diagrama, tal como el de la **Figura 29**.

En comparación con el consumo de energía de las bombas, el consumo de los equipos de medición es despreciable.



**Figura 29.** Diagrama de rendimiento de una bomba (ejemplo de una bomba de inmersión con un consumo de energía de 2,8 kW).

Existen dos aproximaciones para cubrir los requerimientos de electricidad para la operación de las bombas y los equipos de medición:

- Generación de electricidad en el sitio, como a través de la instalación de una planta solar pequeña o una turbina eólica con acumulador (**Figura 30**).
- Conexión a un sistema eléctrico existente. Se consideró este último para la estimación de costo de la planta de tratamiento de agua.



**Figura 30.** Planta solar pequeña (izquierda) y turbina eólica (derecha).

**g) Vida útil del sistema, monitoreo y remoción de contaminantes:**

✓ Vida útil del sistema y monitoreo:

Los sistemas de tratamiento basados en filtros de gravilla biológicos, como el propuesto para el tratamiento de las aguas claras del tranque Pampa Austral, pueden tener una vida útil ilimitada si son mantenidos en forma adecuada. Un número de estos sistemas han estado operando para el tratamiento de aguas de alcantarillado por más de 20 años con una pérdida muy pequeña de efectividad, si es que ocurre.

La eficacia de la planta de tratamiento de aguas (rendimiento del filtro de tratamiento), en cuanto a la remoción de los contaminantes de interés (**Tabla 1**), debe ser monitoreada en intervalos regulares. Se recomienda analizar las concentraciones de los contaminantes de interés del agua antes de entrar a la planta de tratamiento, entre los dos módulos de tratamiento y a la salida de la planta de tratamiento. Se recomienda el siguiente cronograma de monitoreo:

- Meses 1 a 3: cada dos semanas
- Meses 4 a 12: cada cuatro semanas
- A partir de los 13 meses: cada 6 meses

Para aquellos contaminantes que son retenidos parcialmente en el filtro de gravilla, como los sulfuros de metal, se debe monitorear la acumulación de estas sustancias en forma periódica (al menos una vez al año), de forma de evaluar el rendimiento del filtro. De ser necesario, las entradas y salidas del filtro pueden ser limpiadas por medio de reflujos. Dependiendo de su composición química el agua de reflujos puede ser, por ejemplo, filtrada o dispuesta en el depósito de relaves o precipitada y los residuos sólidos

dispuestos en forma segura. Si esto debe realizarse, y cuan seguido, debe ser determinado en una planta operativa.

✓ Remoción de contaminantes:

Considerando los resultados de remoción de contaminantes de los pre-ensayos de laboratorio realizados por BioPlanta, las cantidades removidas de contaminantes se muestran en la **Tabla 26**.

Considerando las capacidades potenciales de tratamiento (caudales a través del sistema de tratamiento) la remoción calculada de contaminantes se muestra en la **Tabla 27**. Este cálculo es una estimación gruesa basada en las prueba de laboratorio. Factores que influyen, tales como el lavado lento de los contaminantes que están ligados / trasferidos a compuestos ambientalmente seguros (los que podrían no ser detectados en la salida debido a cambios en la composición química), no pueden ser calculados. También puede ocurrir volatilización de contaminantes a través de las plantas y fijación de ellos al material orgánico del filtro de gravilla cubierto, lo que no puede ser calculado. De esta forma, la generación exacta de residuos en los filtros de gravilla debe ser monitoreada periódicamente (al menos una vez al año).

El material orgánico del primer módulo está sujeto a descomposición, lo que tiene un efecto positivo ya que los compuestos carbonados y los nutrientes son liberados para abastecer a los microorganismos en el filtro de gravilla, los que son necesarios para el tratamiento del agua. El grosor y composición de la capa orgánica tiene que ser monitoreada periódicamente (al menos una vez al año). De ser necesario, debe ser rellenada.

**h) Desmantelamiento:**

El desmantelamiento de la planta de tratamiento sigue los mismos procedimientos de desmantelamiento de cualquier proyecto de trabajo estructural. La planta de tratamiento consiste en los siguientes tipos de materiales:

- Filtro de gravilla
- Material de la capa orgánica
- Plantas
- Liner plástico
- Cañerías, fittings, válvulas
- Pozos de monitoreo
- Equipamiento eléctrico

**Tabla 26.** Remoción de contaminantes según los pre-ensayos de laboratorio realizados por BioPlanta.

			Tratamiento Anaeróbico	Filtro de gravilla plantado		
Parámetro	Unidad	Aguas claras	Calidad de salida	Calidad de salida	Remoción total	
SO <sub>4</sub>	[mg/L]	2.883	576,6	532,7	2.350	mg/L
As total	[mg/L]	0,23	0,04	0,0	0,23	mg/L
B total	[mg/L]	8,70	7,89	6,8	1,89	mg/L
Mn total	[mg/L]	0,25	0,06	0,06	0,19	mg/L
Mo total	[mg/L]	0,96	0,04	0,001	0,95	mg/L
Cl <sup>-</sup>	[mg/L]	2.879	1.900	1.779,6	1.099	mg/L
Conductividad a 25° C	[ms/cm]	11,8	11,7	11,3	0,48	ms/cm

**Table 27.** Cargas de contaminantes removidos en un sistema combinado (filtro de gravilla cubierto y filtro de gravilla plantado).

		Capacidad de tratamiento: 1 m <sup>3</sup> /d	Capacidad de tratamiento: 40 m <sup>3</sup> /d	Capacidad de tratamiento: 40 L/s = 3.460 m <sup>3</sup> /d
Parámetro	Remoción total [mg/L]	Carga de contaminante removida [g/d]	Carga de contaminante removida [g/d]	Carga de contaminante removida [kg/d]
SO <sub>4</sub> -S	794	794	31.800	2.750
As total	0,23	0,23	9,21	0,8
B total	1,89	1,89	75,69	6,5
Mn total	0,19	0,19	7,75	0,7
Mo total	0,95	0,95	38,18	3,3
Cl <sup>-</sup>	1.099	1.099	44.000	3.800

Generalmente, todos los materiales deben ser desmantelados y apilados en forma separada en el sitio para permitir el transporte específico, reuso o disposición.

Se recomienda muestrear y analizar el filtro de gravilla y la capa orgánica del filtro de gravilla cubierto antes de que sea removido del lugar. Ambos materiales deben ser analizados en cuanto a su contenido de contaminantes. Dependiendo de los resultados del análisis se debe decidir si la gravilla puede ser reutilizada directamente como material de construcción, si debe ser limpiada (lavada o secada y tamizada) antes de ser reusada como material de construcción o si debe ser dispuesta en forma segura. Si la gravilla debe ser limpiada, el agua de lavado o el residuo del tamizado debe ser tratado y/o dispuesto en forma adecuada.

La capa orgánica también debería ser muestreada y analizada antes de ser removida. Dependiendo de los resultados del análisis se debe decidir si éste puede ser reutilizado, por ejemplo para la generación de biogás o como enmienda de suelo. Si esto no es posible, entonces debe ser dispuesta en forma segura.

Las plantas del filtro de gravilla plantado no están contaminadas. Ellas pueden ser reutilizadas en forma separada o conjunta con el material orgánico en una planta de biogás.

El liner plástico puede ser reutilizado por ejemplo para la construcción de piletas o para el cubrimiento de materiales. Otra opción es llevarlo a una empresa recicladora de plástico.

Las cañerías, fittings, válvulas, equipamiento eléctrico y trabajos en acero deben ser chequeados en cuanto a su condición y funcionalidad y pueden ser vendidos, reutilizados en otros sitios o llevados a una empresa de reciclaje.

## 2. TRABAJO DE INGENIERÍA REQUERIDO

### 2.1 Listado de materiales y trabajos de construcción

La **Tabla 28** detalla el listado de materiales y los trabajos de construcción de la planta de tratamiento de aguas claras, según la Combinación 1 (filtro de arena y tratamiento pasivo biológico anaeróbico), mientras que la **Tabla 29** detalla el listado de materiales y los trabajos de construcción de la planta según la Combinación 2 (tratamiento pasivo biológico anaeróbico y filtro de gravilla plantado).

**Tabla 28.** Listado de materiales y trabajos de construcción de la planta de tratamiento de aguas claras, según la Combinación 1.

<b>1. Obras civiles</b>
Remoción del suelo superficial (top soil) y disposición en el sitio
Recolección y colocación del suelo superficial en el sitio
Excavación del suelo para las cuencas (cumplimiento con el diseño horizontal y vertical y traslado del suelo)
Construcción final fina (compactación del suelo; 45 MN/m <sup>2</sup> ; Plano +/- 0,5 cm)
Perfilado de taludes
Excavación del suelo para las zanjas de las cañerías y construcciones periféricas (excavación del suelo y acumulación a un costado)
Construcción de las zanjas de cañerías (construcción de las camas de soporte de las cañerías; adquisición, entrega, postura; material libro de piedras para las camas; densidad Proctor de compresión 97%)
Rellenado y compresión de las zanjas de cañerías y construcciones alledañas
Preparación de la base de las cuencas (entrega y colocación de la arena, granulometría de 0 - 4 mm, postura del liner plástico, grosor de 0,10 m)
Instalación del tubo protector para el sistema eléctrico y cables de control
<b>2. Cubrimiento de las bases</b>
Liner plástico (plástico PLED); grosor de 1,5 mm; entrega y colocación; pegado de uniones profesional; generación de pliegues de expansión, fijación del liner plástico usando zanjas rellenas con suelo
Tubos pasa cables ( preparación de tubos para pasar los cables a través del liner plástico, que sea a prueba de agua)
<b>3.a) Capa filtrante – filtro de arena</b>
Filtro de arena: granulometría de 0,6 – 2,0 mm; conductividad hidráulica/kf $\geq 1 \cdot 10^{-3}$ m/s, entrega y colocación en capa descompactada. La conductividad eléctrica debe ser determinada a través de análisis tamizados de ciclos combinados de seco y húmedo, la conductividad eléctrica depende del diámetro de las partículas de los residuos tamizados a 10% de masa del total de la masa tamizada (= d10);se requiere un valor calculado de acuerdo a BEYER
Gravilla fina por debajo del filtro de arena: granulometría de 2 - 8 mm; conductividad eléctrica/kf $> 1 \cdot 10^{-3}$ m/s, U>5 (U/factor de uniformidad= d60/d10), d10/residuos de tamizado de 10% de masa>0,32 mm; entrega y colocación en capa descompactada. La conductividad eléctrica debe ser determinada a través de análisis tamizados de ciclos combinados de seco y húmedo, la conductividad eléctrica depende del diámetro de las partículas de los residuos tamizados a 10% de masa del total de la masa tamizada (= d10);se requiere un valor calculado de acuerdo a BEYER
Gravilla gruesa por debajo de la capa de gravilla fina: granulometría de 8 - 32 mm; conductividad eléctrica/kf $> 1 \cdot 10^{-3}$ m/s, U>5 (U/factor de uniformidad= d60/d10), d10/residuos tamizados de 10% de masa>0,32 mm; entrega y colocación en capa descompactada La conductividad eléctrica debe ser determinada a través de análisis tamizados de ciclos combinados de seco y húmedo, la conductividad eléctrica depende del diámetro de las partículas de los residuos tamizados a 10%

de masa del total de la masa tamizada (= d10);se requiere un valor calculado de acuerdo a BEYER

Arena protectora del liner plástico: tamaño de grano entre 0 - 4 mm; conductividad hidráulica / kf > 1\*10<sup>-3</sup> m/s, U>5 (U/factor de uniformidad= d60/d10), d10/residuos de tamizado de 10% de masa>0,32 mm; entrega y colocación de una capa descompactada, cuya conductividad debe ser determinada después de un análisis combinado seco y húmedo; la conductividad eléctrica depende del diámetro de las partículas de los residuos tamizados a 10% de masa del total de la masa tamizada (= d10);se requiere un valor calculado de acuerdo a BEYER

Mayores detalles deben ser determinados durante la fase de ingeniería

### **3.b) Capa filtrante - Módulo de tratamiento anaeróbico**

Filtro de gravilla: granulometría de 2 - 8 mm; conductividad hidráulica/kf > 1\*10<sup>-3</sup> m/s, U>5 (U/factor de uniformidad= d60/d10), d10/ residuos tamizados de 10% de masa>0,32 mm; entrega y colocación en capa descompactada

La conductividad eléctrica debe ser determinada a través de análisis tamizados de ciclos combinados de seco y húmedo, la conductividad eléctrica depende del diámetro de las partículas de los residuos tamizados a 10% de masa del total de la masa tamizada (= d10);se requiere un valor calculado de acuerdo a BEYER

Arena protectora del liner plástico: tamaño de grano entre 0 - 4 mm; conductividad hidráulica / kf > 1\*10<sup>-3</sup> m/s, U>5 (U/factor de uniformidad= d60/d10), d10/residuos de tamizado de 10% de masa>0,32 mm; entrega y colocación de una capa descompactada, cuya conductividad debe ser determinada después de un análisis combinado seco y húmedo; la conductividad eléctrica depende del diámetro de las partículas de los residuos tamizados a 10% de masa del total de la masa tamizada (= d10);se requiere un valor calculado de acuerdo a BEYER

Gravilla gruesa zonas de entrada y salida de agua en el módulo de tratamiento anaeróbico: granulometría de 8 - 32 mm; conductividad hidráulica/kf > 1\*10<sup>-3</sup> m/s, U>5 (U/factor de uniformidad= d60/d10), d10/ residuos de tamizado de 10% de masa>0,32 mm; entrega y colocación de una capa descompactada

La conductividad eléctrica debe ser determinada a través de análisis tamizados de ciclos combinados de seco y húmedo, la conductividad eléctrica depende del diámetro de las partículas de los residuos tamizados a 10% de masa del total de la masa tamizada (= d10);se requiere un valor calculado de acuerdo a BEYER

Mayores detalles deben ser determinados durante la fase de ingeniería

### **4. Instalación de pozos de monitoreo y cañerías**

Tres pozos de monitoreo de plástico PE/PP con tapa resistente a la luz UV, incluyendo su equipamiento: válvulas, fittings de vaciado, sellos, cañerías elevadas, fittings, acoples, bridas, reductores, material de fijación

Instalación de las cañerías conectoras bajo tierra en camas de arena compactada, incluyendo los fittings y los tubos pasa cables

Instalación de las cañerías de drenaje perforadas, incluyendo los fittings para la distribución de agua sobre el filtro de arena, la recolección de agua en la base del filtro de arena, distribución y recolección de agua en las zonas de entrada y salida dentro del módulo de tratamiento anaeróbico (filtro de gravilla nivelado)
<b>5. Equipos técnicos</b>
Instalación de los cables de energía y de control, panel de fusibles y de distribución, conexión a la red eléctrica existente, instalación de otros equipos eléctricos

**Tabla 29.** Listado de materiales y trabajos de construcción de la planta de tratamiento de aguas claras, según la Combinación 2.

<b>1. Obras civiles</b>
Remoción del suelo superficial (top soil) y disposición en el sitio
Recolección y colocación del suelo superficial en el sitio
Excavación del suelo para las cuencas (cumplimiento con el diseño horizontal y vertical y traslado del suelo)
Construcción final fina (compactación del suelo; 45 MN/m <sup>2</sup> ; Plano +/- 0,5 cm)
Perfilado de taludes
Excavación del suelo para las zanjas de las cañerías y construcciones periféricas (excavación del suelo y acumulación a un costado)
Construcción de las zanjas de cañerías (construcción de las camas de soporte de las cañerías; adquisición, entrega, postura; material libro de piedras para las camas; densidad Proctor de compresión 97%)
Rellenado y compresión de las zanjas de cañerías y construcciones alledañas
Preparación de la base de las cuencas (entrega y colocación de la arena, granulometría de 0 - 4 mm, postura del liner plástico, grosor de 0,10 m)
Instalación del tubo protector para el sistema eléctrico y cables de control
<b>2. Cubrimiento de las bases</b>
Liner plástico (plástico PLED); grosor de 1,5 mm; entrega y colocación; pegado de uniones profesional; generación de pliegues de expansión, fijación del liner plástico usando zanjas rellenas con suelo
Tubos pasa cables ( preparación de tubos para pasar los cables a través del liner plástico, que sea a prueba de agua)
<b>3. Capas filtrantes</b>
Gravilla; granulometría de 2 - 8 mm; conductividad eléctrica / $k_f > 1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ , $U > 5$ (U/factor de uniformidad= $d_{60}/d_{10}$ ), $d_{10}/\text{residuos de tamizado de } 10\% \text{ de masa} > 0,32 \text{ mm}$ ; entrega y colocación en capa descompactada, cuya conductividad hidráulica debe ser determinada después de un análisis combinado seco y húmedo; la conductividad eléctrica depende del diámetro de las partículas de los residuos tamizados a 10% de masa del total de la masa tamizada (= $d_{10}$ );se requiere un valor calculado de acuerdo a BEYER
Arena; tamaño de grano entre 0 - 4 mm; conductividad hidráulica / $k_f > 1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ , $U > 5$ (U/facor de uniformidad= $d_{60}/d_{10}$ ), $d_{10}/\text{residuos de tamizado de } 10\% \text{ de masa} > 0,32 \text{ mm}$ ; entrega y colocación de una capa descompactada, cuya conductividad debe ser determinada después de un análisis combinado seco y húmedo; la conductividad eléctrica depende del diámetro de las partículas de los residuos tamizados a 10% de masa del total de la masa tamizada (= $d_{10}$ );se requiere un valor calculado de acuerdo a BEYER

Gravilla; tamaño de grano entre 8 - 32 mm; conductividad hidráulica/kf > 1*10 <sup>-3</sup> m/s, U>5 (U/factor de uniformidad= d60/d10), d10/residuos de tamizado de 10% de masa>0,32 mm; entrega y colocación de una capa descompactada, cuya conductividad debe ser determinada después de un análisis combinado seco y húmedo; la conductividad eléctrica depende del diámetro de las partículas de los residuos tamizados a 10% de masa del total de la masa tamizada (= d10);se requiere un valor calculado de acuerdo a BEYER
Mayores detalles deben ser determinados durante la fase de ingeniería
<b>4.Instalación de pozos de monitoreo y cañerías</b>
Dos pozos de monitoreo de plástico PE/PP con tapa resistente a la luz UV, incluyendo su equipamiento: válvulas, fittings de vaciado, sellos, cañerías elevadas, fittings, acoples, bridas, reductores, material de fijación
Instalación de las cañerías conectoras bajo tierra en camas de arena compactada, incluyendo los fittings y los tubos pasa cables
Instalación de las cañerías de drenaje perforadas, incluyendo los fittings en las zonas de entrada y salida dentro de los módulos de tratamiento
<b>5. Plantación</b>
Entrega y plantación de las plantas (caña, 6-8 per m <sup>2</sup> )
<b>6. Equipos técnicos</b>
Instalación de los cables de energía y de control, panel de fusibles y de distribución, conexión a la red eléctrica existente, instalación de otros equipos eléctricos

Basados en experiencias nacionales e internacionales de proyectos de tratamiento de aguas, los costos estimados de inversión (materiales y obras de construcción indicadas) para la combinación 1 serían de aproximadamente \$ 10.037.000 CLP (**Tabla 30**).

**Tabla 30.** Costos de inversión estimados para la combinación 1, basada en un filtro de arena y en el tratamiento pasivo biológico anaeróbico (planta de capacidad aproximada de 40 m<sup>3</sup>/d).

Item	Cantidad/unidad	Costos estimados	
		Costo unitario	Costos totales
Filtro de arena	47 m <sup>2</sup>	28.100	1.330.067
Cuenca de sedimentación	40 m <sup>3</sup>	13.000	520.000
Reactor tratamiento anaeróbico	267 m <sup>3</sup>	30.700	8.186.667
<b>Costos totales de inversión</b>			<b>10.036.733</b>

Basados en experiencias nacionales e internacionales de proyectos de tratamiento de aguas, los costos estimados de inversión (materiales y obras de construcción indicadas) para la opción 2 serían de aproximadamente \$ 10.037.000 CLP (**Tabla 31**).

**Tabla 31.** Costos de inversión estimados para la combinación 2, basada en un filtro de arena y en el tratamiento pasivo biológico anaeróbico (planta de capacidad aproximada de 40 m<sup>3</sup>/d).

Item	Cantidad/unidad		Costos estimados	
			CLP \$	
			Costo unitario	Costos totales
1. Tratamiento anaeróbico				
1.1. filtro gravilla nivelado	267	m <sup>3</sup>	30.700	8.186.667
2. Filtro gravilla plantado				
2.1. Filtro de gravilla y plantas	933	m <sup>2</sup>	23.800	22.213.333
<b>Costos totales de inversión</b>				<b>30.400.000</b>

## **2.2 Pasos siguientes para materializar la construcción de la planta de tratamiento de aguas claras**

En este proyecto se elabora un estudio de factibilidad y de pre-planificación de dos plantas de tratamiento para las aguas claras de descarga del tranque Pampa Austral: combinación de tratamiento 1 y combinación de tratamiento 2, ambas basadas en métodos pasivos de tratamiento.

El trabajo de ingeniería necesario para construir cualquiera de las plantas de tratamiento sugeridas para las aguas claras es similar y se divide en las etapas descritas a continuación.

### **a) Prueba piloto de terreno**

La realización de una prueba piloto, la que involucra la construcción de una planta piloto en alguna de las zonas con cultivos experimentales de Jojoba de la localidad de Diego de Almagro, es opcional pero se recomienda encarecidamente antes de construir una planta escala real. La planta piloto es relevante toda vez que permitirá los efectos de los tratamientos bajo condiciones reales (*in situ*). Esta experiencia permite optimizar la planta de tratamiento y, posiblemente, realizar ajustes, tales como la posibilidad de reducir el tamaño del filtro requerido. Esto último tendría implicancias en los costos de inversión (reducción de ellos).

**b) Etapa de planificación y diseño detallado.**

En esta etapa se designa el contrato de ingeniería y se elaboran en detalle la planificación y diseño técnicos. Los costos del proyecto y el cronograma son actualizados y se desarrolla una estimación de costos para la operación y mantención. De ser necesario, deben obtenerse los permisos apropiados.

Si el propietario no posee una propiedad adecuada, en esta etapa será necesaria la adquisición de un sitio apropiado.

**c) Etapa de asignación de contratos principales.**

En esta etapa se asignan los contratos principales para la construcción y administración del proyecto. Al final de esta etapa y después de que el contrato principal es asignado y firmado, se identifican y negocian contratos secundarios, menores.

Los documentos formales del contrato deberían incluir la planificación técnica detallada y diseñar una descripción detallada de las labores y servicios con toda la documentación relevante, documentos adjuntados, dibujos, medidas de seguridad del contratista y los montos asignados a los servicios asignados.

**d) Etapa de inicio de construcción.**

Una vez que se ha seleccionado el contratista, se debe establecer un sistema de chequeo de cumplimiento de las metas definidas y de los costos del proyecto.

El sitio de construcción debe ser organizado con facilidades temporales tales como bodegas de almacenamiento de materiales, oficinas para los profesionales y sanitarios. Se deben preparar las zonas de acceso, entrega y almacenaje. Una vez completadas estas actividades, la construcción comienza.

**e) Etapa de construcción.**

Esta etapa cubre las actividades de construcción del sitio, así como las actividades de monitoreo, documentación y seguimiento financiero de la construcción.

Las cuencas para los filtros de gravilla deben ser excavados y las paredes y piso preparados. Posteriormente, deben disponerse las cañerías, pozos de monitoreo y liners plásticos impermeables. Se debe verificar que el sistema sea impermeable al agua. Si son impermeables, entonces se dispone la gravilla y las cañerías de drenaje en las cuencas preparadas. La primera cuenca se cubre entonces con el material orgánico y la segunda cuenca se planta. En paralelo, se debe instalar los equipos eléctricos.

Además de la calidad del trabajo de construcción, también es importante la seguridad y la protección medio ambiental en el sitio de construcción. Puede ser ventajoso contratar un experto independiente para la construcción, monitoreo, documentación y seguimiento financiero del proyecto.

#### f) Etapa de término de la construcción.

Cuando la construcción está casi finalizada, se deben realizar una serie de actividades antes de considerar como completadas las actividades desarrolladas por el contratista. Se deben chequear todos los equipos eléctricos y mecánicos, se debe limpiar el sitio y se deben realizar inspecciones y trabajos de remediación que pudieran ser necesarios.

Se deben documentar todas las pruebas y chequeos y todos los cambios realizados al diseño original.

Se debe verificar si la construcción fue realizada correctamente a través de una operación de marcha blanca de unas 4 a 8 semanas. Si todo funciona correctamente en esta etapa de prueba, la etapa de construcción se da por finalizada y comienza la etapa de operación normal de la planta.

### 3. CONCEPTOS Y COSTOS OPERACIONALES

Los aspectos relacionados con la operación de las plantas de tratamiento detalladas para las combinaciones 1 y 2 de tratamiento de las aguas claras del tranque Pampa Austral se describen a continuación, junto con los costos de operación involucrados en cada alternativa.

#### **3.1 Conceptos y costos operacionales para la Combinación 1: filtro de arena y tratamiento pasivo biológico anaeróbico**

##### **I. Caudal y bomba**

El caudal de tratamiento para la planta de tratamiento prediseñada para la combinación 1 es de 40 m<sup>3</sup> por día. El filtro de arena es cargado con agua a intervalos de tiempo, usando una bomba adecuada (detallada en las secciones anteriores). La bomba toma aguas claras desde el canal de evacuación y la entrega al filtro de arena. Es importante asegurarse que la bomba no funcione en seco. La bomba es controlada con un timer, ajustable a minutos. Los intervalos de la bomba deberían ser los siguientes:

✓ Intervalos por día	24
✓ Frecuencia entre intervalos de funcionamiento	1 h
✓ Tiempo de operación por intervalo	12 min
✓ Caudal de entrega de agua	140 L min <sup>-1</sup>

Si el caudal de bombeo es distinto de 140 L min<sup>-1</sup>, el interruptor de encendido/apagado de la bomba debe ser ajustado de forma de asegurar que el caudal total de aguas claras sea de 40 m<sup>3</sup>/d.

La cuenca de sedimentación y el filtro de tratamiento pasivo biológico anaeróbico están aguas abajo del filtro de arena. Ellos son cargados con agua desde el filtro de arena por gravedad (sin bombas adicionales). La velocidad de flujo del agua es medida a la entrada y la salida de la planta de tratamiento a través de instrumentos adecuados.

## **II. Filtro de arena**

Cañerías de distribución (cañerías perforadas) dispuestas sobre la superficie de la arena distribuyen el agua por toda la superficie del filtro. La superficie del filtro es cargada con agua a intervalos regulares (cada una hora), dando tiempo para que el aire (y el oxígeno en él contenido) ingrese al filtro luego de cada carga de agua.

El agua fluye verticalmente en el filtro de arena. El agua cargada debería demorarse sólo unos pocos minutos en infiltrar a través del filtro de arena. Si la infiltración demora más de 20 minutos, eso indica un malfuncionamiento del filtro.

## **III. Pozo de monitoreo 1**

El pozo de monitoreo 1 está equipado con una cañería de entrada y una de salida. Desde ellas pueden tomarse muestras de agua, para monitorear la calidad de ésta a la salida del filtro de arena.

## **IV. Cuenca de sedimentación**

La cuenca de sedimentación debe estar permanentemente llena con agua y es usada para aposar el agua y lograr la sedimentación de los residuos sólidos contenidos en el agua en tratamiento.

Los sedimentos deben ser removidos desde el fondo de esta cuenca cuando alcanzan un espesor de 20 cm. Los sedimentos se remueven manualmente con un tubo de succión. Este trabajo debe realizarse en forma cuidadosa para prevenir daños en el liner impermeabilizante.

## **V. Pozo de monitoreo 2**

El pozo de monitoreo 2 está equipado con una cañería de entrada y una de salida. Existe una cañería adicional de salida para la limpieza completa de ser necesario en las operaciones de mantención.

## **VI. Filtro de tratamiento pasivo biológico anaeróbico**

El nivel de agua de este filtro debe ser siempre ajustado a 5 cm por debajo de la superficie de la capa orgánica superficial. No debe existir agua visible a nivel superficial. El instrumento para ajustar el nivel de agua de este filtro se ubica en el pozo de monitoreo 3.

El funcionamiento de las cañerías de drenaje de entrada y salida al filtro pueden controlarse a través del chequeo del nivel de agua en las cañerías ubicadas entre las cañerías de entrada y salida y comparando éste con el nivel de agua en filtro de gravilla. Ambos niveles de agua

deben ser iguales; de no estarlo esto significa problemas de funcionamiento. Las condiciones del medio líquido en este filtro de tratamiento deben ser muy bajas en oxígeno e idealmente sin oxígeno (anóxicas). Esto puede ser verificado a través de la medición de la concentración de oxígeno o los potenciales redox en el agua de salida del filtro de tratamiento anaeróbico. La concentración de oxígeno debe ser menor a  $2 \text{ mg L}^{-1}$ . Si son mayores, esto indica un mal funcionamiento del filtro.

### **VII. Pozo de monitoreo 3**

El pozo de monitoreo 3 está equipado con una cañería de entrada y salida de agua. La cañería de entrada está conectada con una válvula de salida de control para emergencia y con una cañería vertical, la que permite regular el nivel de agua en el último módulo de tratamiento. El nivel de agua debe ser ajustado a 5 cm por debajo del nivel superficial de la capa orgánica superior.

### **VIII. Operación y Monitoreo**

El sistema de tratamiento de la combinación 1 sólo requiere de chequeos regulares del funcionamiento. No se requiere supervisión permanente de la planta de tratamiento. Los costos de recursos humanos para realizar los chequeos regulares de la planta están considerados en la estimación de los costos operacionales indicados más abajo.

Se deben realizar chequeos y monitoreos regulares del funcionamiento adecuado de las distintas partes o módulos de la planta de tratamiento. Adicionalmente, se deben tomar muestras de agua en distintos puntos del proceso para su análisis, de forma de verificar que la eficiencia de la planta, en cuanto a la remoción de los contaminantes de interés, sea la esperada. Para ello, se deben determinar las concentraciones de los contaminantes a la entrada de la planta de tratamiento (usando el punto de extracción de agua de la bomba), entre la cuenca de sedimentación y el módulo de tratamiento anaeróbico (pozo de monitoreo 2) y a la salida de la planta de tratamiento (pozo de monitoreo 3).

Una vez al año se debe verificar la condición física de los módulos de la planta, en cuanto al flujo hídrico y la condición de impermeabilización del sistema completo. Para verificar el flujo hídrico del filtro de arena, se debe muestrear la arena contenida a 5 cm y 30 cm de profundidad. En el caso del filtro de tratamiento anaeróbico, se debe muestrear la gravilla a 30 cm de profundidad, en las zonas de entrada y salida del agua; en ambos casos, las muestras deben ser tomadas a una distancia no menor de 1 m desde los bordes de las cuencas. Después de muestrear, se deben eliminar los agujeros de muestreo.

Mayores detalles de la operación y de las actividades de monitoreo se describen a continuación.

#### **VIII.1 Chequeos regulares de funcionamiento**

- ✓ La superficie del filtro de arena se debe inspeccionar para verificar la acumulación de material particulado y la formación de incrustaciones, las que pueden alterar el buen

funcionamiento del filtro. De ser necesario, la superficie del filtro debe ser limpiada. Adicionalmente, debe verificarse que no exista agua en forma permanente a nivel de la superficie del filtro.

- ✓ Se deben inspeccionar las cañerías perforadas de distribución de agua dispuestas sobre el filtro de arena, para verificar la existencia de bloqueos. De existir, las cañerías deben ser limpiadas.
- ✓ El grosor (profundidad) de la capa orgánica del filtro anaeróbico debe ser medida. El nivel de agua debe ser ajustado a 5 cm por debajo del nivel superficial de la capa orgánica. Adicionalmente, debe verificarse que no exista agua en forma permanente a nivel de la superficie del filtro.
- ✓ Debe verificarse el buen funcionamiento de las cañerías de entrada y salida del filtro anaeróbico, comparando los niveles de agua de las cañerías verticales de los pozos de monitoreo 2 y 3. Ambos niveles deben ser iguales.
- ✓ Se debe verificar el adecuado funcionamiento de las válvulas, instrumentos de medición y control, y de las cañerías, además de los sellos impermeables de las conexiones. Los registros de los instrumentos de medición hídrica dispuestos a la entrada y salida de la planta de tratamiento deben ser verificados y documentados.

#### **VIII.2 Frecuencia de los monitoreos para verificar la calidad del agua**

- ✓ Meses 1 a 3, luego del inicio de operación de la planta: cada 2 semanas.
- ✓ Meses 4 a 12: cada 4 semanas.
- ✓ Mes 13 en adelante: cada 6 meses.

#### **VIII.3 Parámetros de análisis en las aguas muestreadas**

- ✓ Conductividad a 25° C, valor de pH, condición redox, concentración de oxígeno, medidas *in situ*
- ✓ Concentración de sulfatos ( $\text{SO}_4^{2+}$ ), *ex situ*
- ✓ Concentración total de As, *ex situ*
- ✓ Concentración total de B, *ex situ*
- ✓ Concentración total de Mn, *ex situ*
- ✓ Concentración total de Mo, *ex situ*
- ✓ Concentración total de cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), *ex situ*
- ✓ Color, olor, turbidez, *ex situ*
- ✓ Velocidad de flujo (caudal), *in situ*

#### **VIII.4 Intervalo de monitoreo de la calidad de los sustratos de los filtros**

- ✓ Una vez al año

#### **VIII.5 Intervalo de monitoreo de la calidad de los sustratos de los filtros**

La acumulación de residuos sólidos al interior del filtro de arena y el filtro de tratamiento anaeróbico deben ser revisados en cuanto a:

- ✓ Volumen de residuos acumulados por volumen de arena/gravilla
- ✓ Opcional: composición química de los residuos

### **IX. Documento de registro de operación**

En la planta de tratamiento de agua debe existir un libro de registro operacional. Este libro debe ser completado cada vez que un operador (supervisor) realiza inspecciones a la planta de tratamiento. El libro debe incluir:

- ✓ Nombre del trabajador (supervisor) que realizará el chequeo.
- ✓ Fecha y hora
- ✓ ¿Se realizaron cambios operacionales? Si la respuesta es sí, se debe hacer una breve descripción de los cambios realizados.
- ✓ ¿Se observaron cambios en la operación normal de la planta? Si la respuesta es sí, se debe hacer una breve descripción de los cambios operacionales observados y como fueron resueltos.
- ✓ Registros de los instrumentos de medición de aguas (caudales, niveles, etc.).

Los resultados de las revisiones regulares de funcionamiento de la planta deben ser registrados cada vez en un check list.

Los análisis de laboratorio de las muestras de aguas y sustratos deben ser registrados a través de protocolos de análisis adecuados y certificados.

El operador de la planta de tratamiento de agua debe archivar copias del libro de registro de operación de la planta, todos los listados de check list y los protocolos de análisis de las muestras, archivadas en un orden cronológico.

### **X. Estimación de los costos operacionales**

Para el bombeo de unos 40 m<sup>3</sup> de aguas claras por día a la planta de tratamiento, con una bomba de 2,8 kW, considerando una diferencia de altura de 2 m, se requiere un consumo diario de energía de 1,25 kWh. Esto se traduce en un consumo anual de 455 kWh por año, con un costo aproximado de CLP \$ 38.000. La demanda de energía de los instrumentos de medición es marginal (aproximadamente entre un 10% y 15% del consumo de la bomba).

Los monitoreos deben ser realizados a intervalos regulares (ver punto VIII.2 más arriba). Por razones de seguridad, los monitoreos regulares deben ser realizados por 2 trabajadores, los que deben estar en la planta por aproximadamente un período de 4 horas para cumplir con la inspección visual, la toma de muestras y el registro de la información. Se considera un costo de CLP \$ 4.850 por hora por trabajador. Los costos totales en recursos humanos, por monitoreo, se estiman así en CLP \$ 38.800, sin considerar los costos de viaje.

Los costos estimados de análisis de los parámetros de interés de las aguas (punto VIII.3 más arriba) ascienden a CLP \$ 27.000 por muestra. Son tres los puntos de muestreo de aguas, lo que determina un costo por monitoreo de CLP \$ 81.000.

Los costos anuales de análisis de los residuos en los sustratos de los filtros se estiman en CLP \$ 12.500 por muestra. Son 4 muestras por monitoreo, lo que determina un costo por monitoreo de CLP \$ 50.000. Este análisis se recomienda realizarlo una vez al año.

De esta forma, los costos operacionales para el primer año de operación de la planta de tratamiento y los siguientes años son los indicados en la **Tabla 32**.

Adicionalmente, podría ser necesario limpiar la superficie del filtro de arena de vez en cuando, como se indicó anteriormente. Los costos de limpieza superficial del filtro de arena no son posibles de estimar debido a que:

- ✓ No es imposible inferir la frecuencia con la cual debería ser realizada esta acción, ni la cantidad de arena que debe ser limpiada cada vez.
- ✓ Se desconoce la disponibilidad local del equipamiento/personal requerido para realizar esta acción. Podría ser necesario el transporte de la maquinaria o de la arena a otros lugares, lo que involucra costos de transporte, los que dependerán de la distancia.

También se requiere agregar de tiempo en tiempo material orgánico al filtro de tratamiento anaeróbico de la planta. Los costos de esta acción son difíciles de estimar debido a que:

- ✓ Se desconoce el material orgánico que efectivamente usaría la planta de tratamiento.
- ✓ Se desconocen los costos de los materiales potenciales y los costos de transporte de ellos a la planta, ya que dependerá de las localidades específicas donde estén disponibles.
- ✓ No es posible inferir la velocidad a la que se degradarán los materiales orgánicos localmente disponibles, bajo las condiciones de calidad de agua y climáticas específicas de la planta de tratamiento.

Para poder determinar con certeza estos costos adicionales es que se ha sugerido la construcción y operación de una planta piloto de tratamiento.

**Tabla 32.** Costos operacionales estimados para la planta de tratamiento de aguas claras según la combinación 1, basada en un filtro de arena y en el tratamiento pasivo biológico anaeróbico (planta de capacidad aproximada de 40 m<sup>3</sup>/d).

Item	Valor Unitario	Unidades	Primer año		Año 2 y posteriores	
			Cantidad	Costos totales (aproximados) CLP \$	Cantidad	Costos totales (aproximados) CLP \$
Energía	83 CLP/kWh		455	38.000	455	38.000
HHRR por monitoreo	38.800 CLP/monitoreo		15	582.000	2	78.000
Análisis laboratorio (aguas)	81.000 CLP/monitoreo		15	1.215.000	2	162.000
Análisis de laboratorio (residuos)	50.000 CLP/monitoreo		1	50.000	1	50.000
<b>Total</b>				<b>1.885.000</b>		<b>328.000</b>

### **3.2 Conceptos y costos operacionales para la Combinación 2: tratamiento pasivo biológico anaeróbico y filtro de gravilla plantado**

#### **I. Caudal y bomba**

El caudal de tratamiento para la planta de tratamiento prediseñada para la combinación 2 es de 40 m<sup>3</sup> por día. El suministro de agua tanto para el filtro anaeróbico como el filtro de gravilla plantado es por gravedad (sin uso de bomba). La velocidad de flujo del agua es regulada y medida a la entrada y la salida de la planta de tratamiento a través de instrumentos adecuados. El instrumento que mide el caudal de agua de entrada a la planta debe estar acoplado a una válvula que asegure un caudal diario de 40 m<sup>3</sup>.

#### **II. Filtro pasivo biológico anaeróbico**

Los procedimientos de operación de este filtro se describieron anteriormente (ver punto VI más arriba).

#### **III. Pozo de monitoreo 1**

El pozo de monitoreo 1 está equipado con una cañería de entrada y una de salida. La cañería de entrada está conectada a una salida de emergencia conectada a una válvula de control y a una

cañería vertical, la que permite regular el nivel de agua en el filtro anaeróbico. El nivel de agua debe ser ajustado a 5 cm por debajo de la superficie de la capa orgánica. En condiciones normales de operación, la válvula de emergencia debe estar cerrada. La apertura de esta válvula de compuerta permite vaciar completamente de agua el filtro anaeróbico de tratamiento, ubicado aguas arriba de este pozo de monitoreo.

#### **IV. Filtro de gravilla plantado**

El nivel de agua de este filtro debe estar siempre ajustado a 5 cm por debajo del nivel superficial de la gravilla, usando el equipamiento instalado en el pozo de monitoreo 2. No debe verse agua por sobre el nivel de la gravilla, ni barro o lodos sedimentados sobre la superficie del filtro de gravilla, para garantizar el crecimiento de las plantas y evitar bloqueo en el flujo del agua.

Se debe chequear el buen funcionamiento de las cañerías de entrada y salida, revisando el nivel de agua en las cañerías verticales conectadas a esas cañerías. El nivel de agua de las cañerías verticales debe ser igual al del filtro de gravilla. Si no son iguales, esto se debe a un mal funcionamiento del filtro.

Las plantas deben crecer en forma uniforme dentro del filtro, durante el período de crecimiento vegetativo de ellas. Las plantas son indicadores del estado de funcionamiento del filtro. Si se observan zonas con plantas muertas o en mala condición, esto indica áreas con mala aireación y acumulación de residuos/sólidos. Se debe realizar control de plagas de las plantas sólo en el caso que éstas existan y afecten el desarrollo normal de ellas.

Después del período estival de crecimiento de las plantas, estas se marchitan. Las raíces de las plantas permanecen vivas en el período invernal. Los microorganismos presentes en las zonas de crecimiento de las raíces de las plantas (rizósfera) se mantienen activos durante la estación más fría y siguen degradando/inmovilizando los contaminantes de interés.

No es necesario podar las partes secas aéreas de las plantas. Estas pueden permanecer en el filtro de gravilla. Están sujetas a descomposición natural.

#### **V. Pozo de monitoreo 2**

El pozo de monitoreo 2 está equipado con una cañería de entrada y una de salida. La cañería de entrada está conectada a una salida de emergencia conectada a una válvula y a una cañería vertical. La cañería vertical está equipada con un conector ajustable que permite regular el nivel de agua del filtro. El nivel de agua debe ser ajustado a 5 cm por debajo del nivel de la gravilla. Durante la operación de la planta, la válvula de emergencia debe permanecer cerrada. Al abrir la válvula, se descarga toda el agua contenida en el filtro ubicado aguas arriba.

#### **VI. Operación y Monitoreo**

El sistema de tratamiento de la combinación 2 sólo requiere de chequeos regulares del funcionamiento. No se requiere supervisión permanente de la planta de tratamiento. Los

costos de recursos humanos para realizar los chequeos regulares de la planta están considerados en la estimación de los costos operacionales indicados más abajo.

Se deben realizar chequeos y monitoreos regulares del funcionamiento adecuado de las distintas partes o módulos de la planta de tratamiento. Adicionalmente, se deben tomar muestras de agua en distintos puntos del proceso para su análisis, de forma de verificar que la eficiencia de la planta, en cuanto a la remoción de los contaminantes de interés, sea la esperada. Para ello, se deben determinar las concentraciones de los contaminantes a la entrada de la planta de tratamiento (en el punto del canal de evacuación de aguas claras desde donde se toman las aguas para la planta de tratamiento), entre la el módulo de tratamiento anaeróbico y el filtro de gravilla plantado (pozo de monitoreo 1) y a la salida de la planta de tratamiento (pozo de monitoreo 2).

Una vez al año se debe verificar la condición física de los módulos de la planta, en cuanto al flujo hídrico y la condición de impermeabilización del sistema completo. Para verificar el flujo hídrico de ambos filtros, se deben muestrear los sustratos a 30 cm de profundidad; en ambos casos, las muestras deben ser tomadas a una distancia no menor de 1 m desde los bordes de las cuencas, tanto en la zona de entrada como de salida de las aguas. Después de muestrear, se deben eliminar los agujeros de muestreo.

Mayores detalles de la operación y de las actividades de monitoreo se describen a continuación.

#### **VI.1 Chequeos regulares de funcionamiento**

- ✓ El grosor (profundidad) de la capa orgánica en el filtro anaeróbico debe ser medida. El nivel de agua debe ser ajustado a 5 cm por debajo de la superficie de la capa orgánica. Adicionalmente, debe verificarse que no exista agua en forma permanente a nivel de la superficie del filtro.
- ✓ La superficie del filtro de gravilla plantado no debe mostrar agua a nivel de la superficie. Tampoco debe mostrar barro o lodo. De ser necesario, la superficie debe ser limpiada y/o suavizada.
- ✓ El aspecto de las plantas en el filtro de gravilla plantado debe ser revisado. Deben crecer en forma uniforme y densa entre la primavera y el otoño. Durante el invierno la parte aérea de las plantas puede marchitarse; las raíces se mantienen vida todo el año y permiten el rebrote de las plantas el próximo ciclo de crecimiento.
- ✓ Debe verificarse el buen funcionamiento de las cañerías de entrada y salida del filtro anaeróbico y del filtro de gravilla plantado, comparando los niveles de agua de las cañerías verticales de los pozos de monitoreo con el del filtro de gravilla. Estos niveles deben ser iguales.
- ✓ Se debe verificar el adecuado funcionamiento de las válvulas, instrumentos de medición y control, y de las cañerías, además de los sellos impermeables de las conexiones. Los registros de los instrumentos de medición hídrica dispuestos a la entrada y salida de la planta de tratamiento deben ser verificados y documentados.

## VI.2 Frecuencia de los monitoreos para verificar la calidad del agua

- ✓ Meses 1 a 3, luego del inicio de operación de la planta: cada 2 semanas.
- ✓ Meses 4 a 12: cada 4 semanas.
- ✓ Mes 13 en adelante: cada 6 meses.

## VI.3 Parámetros de análisis en las aguas muestreadas

- ✓ Conductividad a 25° C, valor de pH, condición redox, concentración de oxígeno, medidas *in situ*
- ✓ Concentración de sulfatos ( $\text{SO}_4^{2+}$ ), *ex situ*
- ✓ Concentración total de As, *ex situ*
- ✓ Concentración total de B, *ex situ*
- ✓ Concentración total de Mn, *ex situ*
- ✓ Concentración total de Mo, *ex situ*
- ✓ Concentración total de cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), *ex situ*
- ✓ Color, olor, turbidez, *ex situ*
- ✓ Velocidad de flujo (caudal), *in situ*

## VI.4 Intervalo de monitoreo de la calidad de los sustratos de los filtros

- ✓ Una vez al año

## VI.5 Intervalo de monitoreo de la calidad de los sustratos de los filtros

La acumulación de residuos sólidos al interior del filtro de tratamiento anaeróbico y el filtro de gravilla plantado deben ser revisados en cuanto a:

- ✓ Volumen de residuos acumulados por volumen de arena/gravilla
- ✓ Opcional: composición química de los residuos

## IX. Documento de registro de operación

Los procedimientos de documentación de los registros se describieron anteriormente (ver punto IX más arriba).

## X. Estimación de los costos operacionales

No existe demanda de energía para el bombeo de agua en esta alternativa de tratamiento. La demanda de energía de los instrumentos de medición es marginal, por lo que no se consideran en la estimación de costos.

Los monitoreos deben ser realizados a intervalos regulares (ver punto VIII.2 más arriba). Por razones de seguridad, los monitoreos regulares deben ser realizados por 2 trabajadores, los que deben estar en la planta por aproximadamente un período de 4 horas para cumplir con la inspección visual, la toma de muestras y el registro de la información. Se considera un costo de

CLP \$ 4.850 por hora por trabajador. Los costos totales en recursos humanos, por monitoreo, se estiman así en CLP \$ 38.800, sin considerar los costos de viaje.

Los costos estimados de análisis de los parámetros de interés de las aguas (punto VIII.3 más arriba) ascienden a CLP \$ 27.000 por muestra. Son tres los puntos de muestreo de aguas (entrada, luego del filtro de tratamiento anaeróbico y salida), lo que determina un costo por monitoreo de CLP \$ 81.000.

Los costos anuales de análisis de los residuos en los sustratos de los filtros se estiman en CLP \$ 12.500 por muestra. Son 4 muestras por monitoreo, lo que determina un costo por monitoreo de CLP \$ 50.000. Este análisis se recomienda realizarlo una vez al año.

De esta forma, los costos operacionales para el primer año de operación de la planta de tratamiento y los siguientes años son los indicados en la **Tabla 33**.

Adicionalmente, se requiere agregar de tiempo en tiempo material orgánico al filtro de tratamiento anaeróbico de la planta. Los costos de esta acción son difíciles de estimar debido a que:

- ✓ Se desconoce el material orgánico que efectivamente usaría la planta de tratamiento.
- ✓ Se desconocen los costos de los materiales potenciales y los costos de transporte de ellos a la planta, ya que dependerá de las localidades específicas donde estén disponibles.
- ✓ No es posible inferir la velocidad a la que se degradarán los materiales orgánicos localmente disponibles, bajo las condiciones de calidad de agua y climáticas específicas de la planta de tratamiento.

Para poder determinar con certeza estos costos adicionales es que se ha sugerido la construcción y operación de una planta piloto de tratamiento.

**Tabla 33.** Costos operacionales estimados para la planta de tratamiento de aguas claras según la combinación 2, basada en un filtro de tratamiento pasivo biológico anaeróbico y un filtro de gravilla plantada (planta de capacidad aproximada de 40 m<sup>3</sup>/d).

Item	Valor Unitario	Unidades	Primer año		Año 2 y posteriores	
			Cantidad	Costos totales (aproximados) CLP \$	Cantidad	Costos totales (aproximados) CLP \$
Energía	38.800 CLP	/ monitoreo	15	582.000	2	78.000
HRRR por monitoreo	81.000 CLP	/ monitoreo	15	1.215.000	2	162.000
Análisis laboratorio (aguas)	50.000 CLP	/ monitoreo	1	50.000	1	50.000
Análisis de laboratorio (residuos)				<b>1.847.000</b>		<b>290.000</b>

#### 4. RESUMEN DE LAS ESTIMACIONES DE COSTOS PARA LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS CLARAS SELECCIONADAS

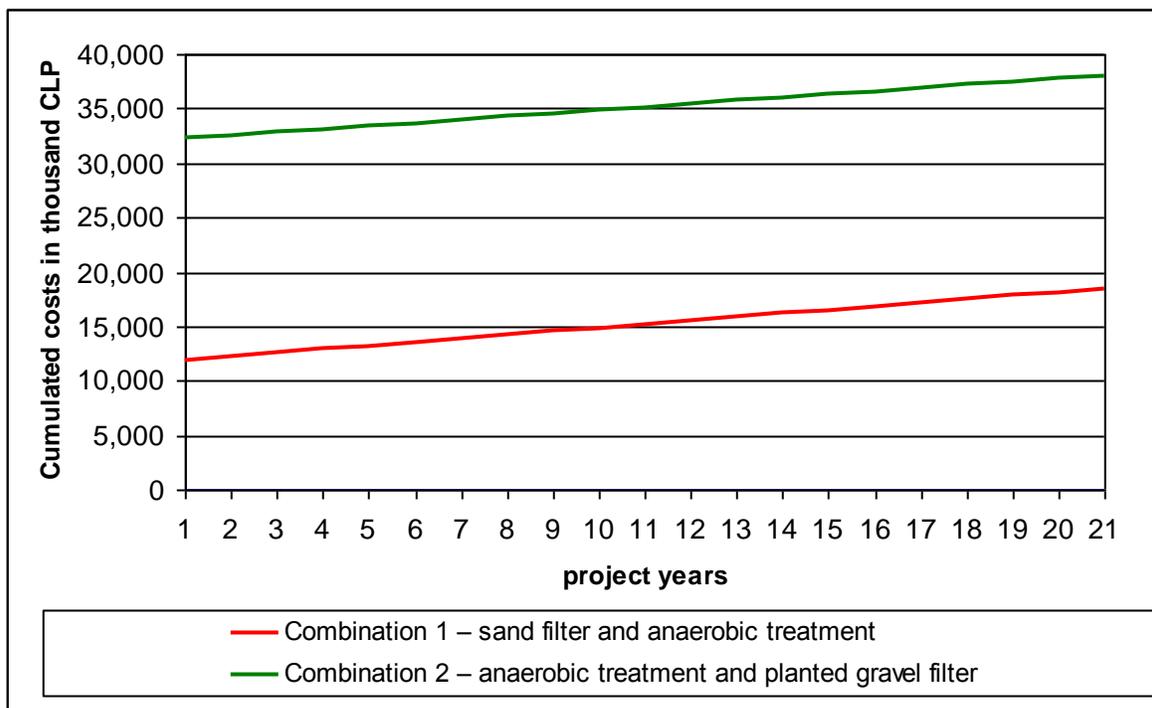
A continuación se resumen las estimaciones de costos para las dos combinaciones de tratamiento seleccionadas en el presente estudio para las aguas claras del tranque Pampa Austral, para una capacidad de tratamiento de 40 m<sup>3</sup>/día:

- ✓ Combinación 1: Filtro de arena y filtro pasivo biológico anaeróbico
  - Costos de inversión estimado CLP \$ 10.037.000
  - Costos operacionales, primer año CLP \$ 1.885.000
  - Costos operacionales, año 2 en adelante CLP \$ 328.000
  - Costos de desmantelamiento, aproximadamente entre un 10% y 25% de los costos de inversión. Este costo depende de factores que se desconocen actualmente.
  
- ✓ Combinación 2: Filtro pasivo biológico anaeróbico y filtro de gravilla plantado
  - Costos de inversión estimado CLP \$ 30.400.000
  - Costos operacionales, primer año CLP \$ 1.847.000
  - Costos operacionales, año 2 en adelante CLP \$ 290.000
  - Costos de desmantelamiento, aproximadamente entre un 10% y 25% de los costos de inversión. Este costo depende de factores que se desconocen actualmente.

En la **Tabla 34** se entrega una comparación detallada de todos los costos estimados para las dos alternativas combinadas de tratamiento seleccionadas como adecuadas para el tratamiento de las aguas claras del tranque Pampa Austral, de forma de cumplir con las metas-objetivo definidas, considerando plantas de capacidad de tratamiento diario de 40 m<sup>3</sup> (adecuada para regar 1 hectárea).

Al comparar los costos entre las dos alternativas combinadas de tratamiento, es claro que las principales diferencias están en los costos de inversión (**Tabla 34**). Los costos de inversión de la Combinación 2 son 3 veces los de los costos de inversión de la Combinación 1. Los costos operacionales son un poco mayores en la Combinación 1 que en la Combinación 2. Los costos acumulados de la Combinación 2 son siempre el triple de los de la Combinación 1 (**Figura 31**).

Sin embargo, es importante destacar que la efectividad de remoción de los contaminantes de interés del tratamiento combinado 2 es mejor que la del tratamiento combinado 1 (**Figura 13**). Adicionalmente, los impactos ambientales de la Combinación 2 son menores que los de la Combinación 1 (**Figura 13**).



**Figura 31.** Comparación de los costos acumulados (costos en CLP \$ por año) de las distintas alternativas de tratamientos combinados. Combinación 1, filtro de arena y tratamiento anaeróbico. Combinación 2, tratamiento anaeróbico y filtro de gravilla plantado.

**Tabla 34.** Comparación de todos los costos estimados para las dos alternativas combinadas de tratamiento seleccionadas como adecuadas para el tratamiento de las aguas claras del tranque Pampa Austral, de forma de cumplir con las metas-objetivo definidas. Plantas de capacidad de tratamiento diario de 40 m<sup>3</sup>.

Item	Unidad	Combinación 1 Filtro arena y Tratamiento pasivo biológico anaeróbico	Combinación 2 Tratamiento pasivo biológico anaeróbico y Filtro de gravilla plantado
Costo de inversión	CLP \$	10.037.000	30.400.000
Costos operacionales por 20 años*	CLP \$	8.117.000	5.694.700
Costo promedio anual de operación	CLP \$ por año	405.850	284.735
Depreciación (calculado linealmente para los 20 años)	CLP \$ por año	501.850	1.520.000
Mantenimiento	CLP \$	600.000 Reemplazo de la bomba captadora de agua	0 No considera equipos mayores, como bomba
Desmantelamiento	CLP \$	1.000.000 – 2.500.000	3.000.000 – 7.500.000
Costo total por 20 años (operación, depreciación, mantenimiento y desmantelamiento)	CLP \$	19.754.000 – 21.254.000	39.094.700 – 43.594.700
Volumen de agua tratada en los 20 años (40 m <sup>3</sup> día x 365,25 días por año x 20 años)	m <sup>3</sup>	292.200	292.200
Costo específicos por m <sup>3</sup> de agua tratada (incluyendo operación, depreciación, mantenimiento y desmantelamiento)	CLP \$ por m <sup>3</sup>	68 - 73	134 - 149

\*Excluyendo los costos del material orgánico adicional y la limpieza de los filtros (ej. arena).

## OBJETIVO 4: EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE ALTERNATIVAS DE CULTIVOS PARA LA COMUNA DE DIEGO DE ALMAGRO

Las actividades desarrolladas en el marco del objetivo específico 4 consistieron en la evaluación técnica y económica de alternativas de cultivos para la comuna de Diego de Almagro. Como resultado de la ejecución de las 15 actividades comprometidas en el desarrollo de este objetivo, se seleccionaron finalmente dos especies para ser cultivadas en la localidad de Diego de Almagro, cuyos requisitos de cultivo se ajustan a las características del sector: Jojoba (*Simmondsia chinensis* L.) y Maíz lluteño (*Zea mays* L. tipo amylacea). Estas dos especies seleccionadas fueron sometidas a un análisis económico, cuyos resultados son presentados en el presente informe. Adicionalmente, se han identificado otras dos especies candidatas cuyo potencial, dadas las características de su cultivo y de la localidad estudiada, merece ser estudiado mediante ensayos en el sector: Salicornia (*Salicornia bigelovii*) y caña común o caña brava (*Arundo donax*). Estas últimas especies no han sido incluidas dentro de las seleccionadas para ser cultivadas en la localidad debido a la insuficiente información que actualmente se tiene de su cultivo; sin embargo, se sugiere no descartarlas como potenciales cultivos a establecer en la localidad hasta que nueva información disponible permita definir su viabilidad en esta zona.

Para la elaboración de este informe, las actividades involucradas en este objetivo se han agrupado conformando cinco secciones. Cada una de estas cinco secciones se enfocó en el desarrollo y estudio de un grupo de actividades comprometidas. Específicamente:

- ✓ Zonificación agroclimática (actividades 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4)
- ✓ Evaluación de la vulnerabilidad de la jojoba a las características bio-físicas del área de estudio (actividad 4.10)
- ✓ Elaboración del listado de especies candidatas (actividades 4.5,.4.6 y 4.10)
- ✓ Análisis técnico y económico de las especies seleccionadas (actividades 4.7, 4.8 y 4.9)
- ✓ Evaluaciones de calidad del aceite de jojoba producido en la localidad (actividades 4.11, 4.12, 4.13,.4.14 y 4.15)

Los resultados obtenidos en cada una de estas secciones del objetivo 4 se detallan a continuación.

### 1. ZONIFICACIÓN AGROCLIMÁTICA

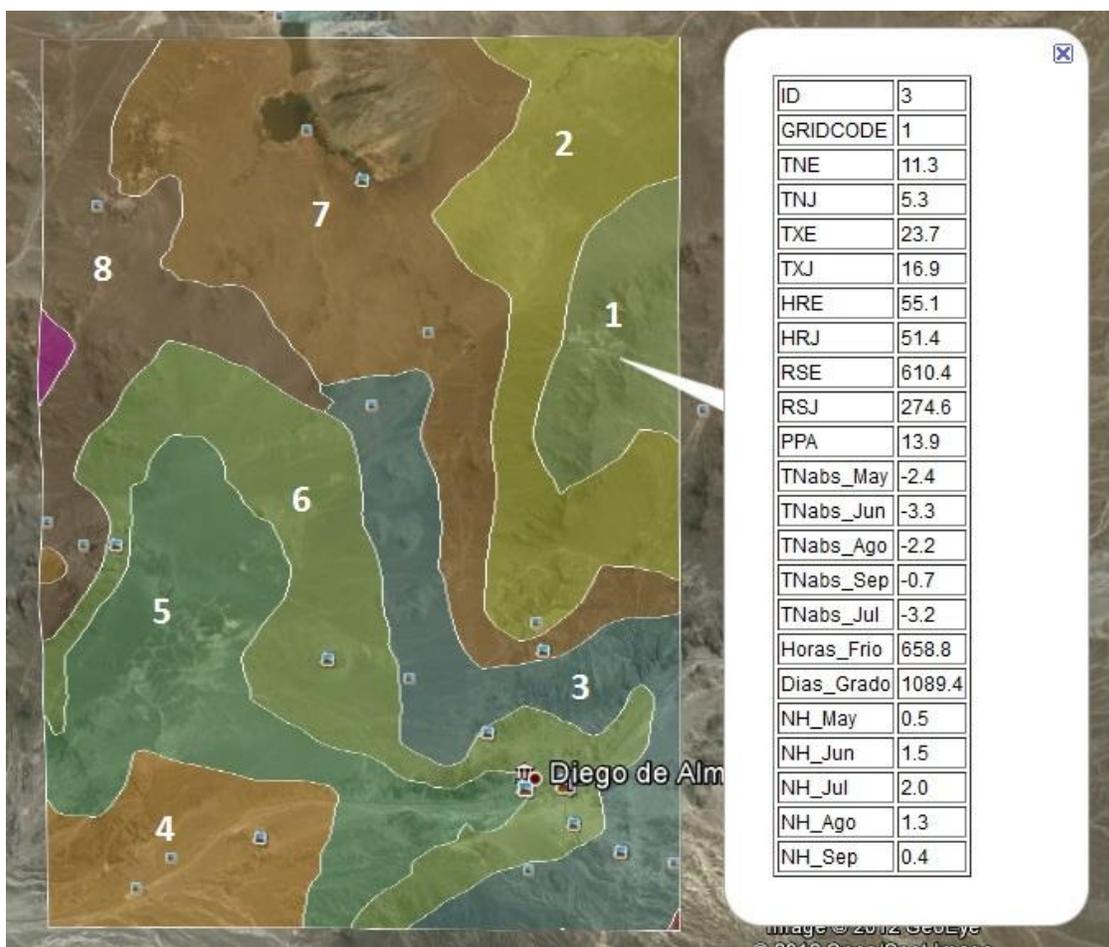
El proceso de zonificación climática del área de estudio fue llevado a cabo durante los primeros seis meses de ejecución del proyecto y concluyó con el desarrollo de una cartografía de la localidad (**Figura 32**), que incluye información de diferentes variables climáticas.

La **Figura 32** corresponde a la imagen satelital de la localidad estudiada, en la cual se pueden identificar ocho diferentes sectores o *clusters* que agrupan características climáticas comunes. Puede observarse también la forma de presentación del listado de variables consideradas para cada uno de estos sectores. En el caso de esta imagen, se presentan a modo de ejemplo los valores de cada variable, en el sector 1.

Los datos de variables climáticas que entrega esta cartografía de zonificación son:

- Temperatura máxima y mínima del mes más frío (julio).
- Temperatura máxima y mínima del mes más cálido (enero).
- Humedad relativa del mes más frío (julio) y del mes más cálido (enero).
- Radiación solar del mes más frío (julio) y del mes más cálido (enero).
- Temperatura mínima absoluta de los meses de mayo, junio, julio, agosto y septiembre.
- Acumulación de horas frío.
- Acumulación de días grado.
- Número de heladas entre los meses de mayo y septiembre.
- Precipitación media anual.

Esta cartografía, que aportó la información necesaria para la posterior elaboración del listado de especies candidatas, pudo ser obtenida luego del desarrollo de las actividades 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4.



**Figura 32.** Imagen satelital de la localidad de Diego de Almagro, donde pueden identificarse los diferentes sectores o *clusters* resultantes luego del proceso de zonificación agroclimática, además de las características detalladas del sector 1, a modo de ejemplo.

## 1.1 Proceso de desarrollo de la zonificación agroclimática

En una primera instancia fue necesario definir los límites del área de estudio, los cuales se establecieron de acuerdo a las coordenadas geográficas que se presentan en la **Tabla 35**.

**Tabla 35.** Coordenadas de los límites del área de estudio para la zonificación agroclimática.

	LATITUD	LONGITUD
Límite norte	-26,260	-70,140
	-26,260	-70,035
Límite sur	-26,406	-70,145
	-26,406	-70,038

Una vez definido el sector a estudiar, se efectuó una recopilación de información climatológica proveniente de 49 estaciones meteorológicas disponibles en la Región de Atacama, a partir de información tanto pública como privada. Esta información proviene de informes escritos de estudios anteriores realizados en la región, además de la revisión de anuarios meteorológicos de la Dirección Meteorológica de Chile (DCM) y la Dirección General de Aguas (DGA), las cuales cuentan con información histórica relevante y validada para el área de estudio. Las variables climáticas recopiladas fueron:

- ✓ Temperatura media máxima mensual (°C)
- ✓ Temperatura media mínima mensual (°C)
- ✓ Precipitación media mensual (mm)
- ✓ Humedad relativa media mensual (%)
- ✓ Nubosidad (Octas)
- ✓ Radiación Solar media mensual (Ly / mes)
- ✓ Velocidad media mensual (Nudos)
- ✓ Evaporación de bandeja media mensual (mm / mes)
- ✓ Evaporación media mensual (mm / mes)

Los datos recopilados fueron sometidos a un análisis de validación, basado en la detección y corrección de errores de las series estadísticas, de acuerdo a la consistencia entre estaciones para un mismo período de tiempo. La información fue organizada en una base de datos asociada a un archivo de ubicación de estaciones en cartografía como archivo de puntos (**Figura 33**).



**Figura 33.** Ubicación de las estaciones meteorológicas recopiladas pertenecientes a la DMC, DGA y algunas de privados.

De la información obtenida se seleccionaron las estaciones meteorológicas más representativas para el área de estudio (**Tabla 36**), a partir de las cuales se extrajo la información de los parámetros más importantes de la información climática recopilada y así poder generar una comparación con el área de estudio del proyecto en relación a la región. Para ello se utilizaron los datos de las variables Temperatura media mínima mensual (TN), Temperatura media máxima mensual (TX) y Precipitación mensual (PPM).

Los valores regionales se obtuvieron mediante el cálculo del valor promedio de la variable considerando las estaciones con información válida, mientras que los valores asociados al área de investigación se obtuvieron mediante el cálculo del valor promedio de las estaciones más cercanas al sector.

La información resultante de esta primera etapa fue sometida a un análisis y validación, para lo cual fue traspasada a formato digital en Libros de Excel, separados por meses y luego por variables, dejando una referencia de los datos geográficos de cada estación climática.

**Tabla 36.** Estaciones meteorológicas seleccionadas para representar la localidad en estudio.

ESTACION	LATITUD	LONGITUD	VARIABLE ASOCIADA
Aeródromo Chañaral	-26,316667	-70,700000	PPM/TN/TX
Diego de Almagro	-26,383333	-70,066667	PPM
Reten Llanta DMC	-26,333333	-69,800000	PPM
Potrerrillos	-26,433333	-69,483333	PPM/TN/TX
Tenencia El Salvador	-26,233333	-69,616667	PPM

La validación dice relación con que la información haya sido bien transcrita, y que, por lo tanto, no existan errores asociados a valores fuera de los rangos esperados en la región; para esto, se hizo una verificación con los datos originales.

En el caso del análisis, la primera etapa se asocia a la estadística de las estaciones antes presentada, para proseguir con el traspaso de la información al siguiente formato: en todas las estaciones, cada variable fue almacenada en un archivo tipo ASCII, con el fin de poder importar los datos climáticos tanto a *softwares* estadísticos como de sistemas de información geográfica (SIG).

Para la obtención de la climatología utilizando la información histórica de las estaciones climáticas de la región de Atacama, se llevó a cabo el proceso de espacialización de las variables de interés, es decir, se llevó las variables que se encontraban de forma discreta a variables continuas en el espacio. Dicho proceso se realizó mediante la utilización de topoclimatología, que consiste en la obtención de la distribución espacial de una variable climática (temperatura, precipitación u otra) descrita por la variación de variables topográficas y fisiográficas como altitud, latitud, longitud, pendiente, exposición, distancia al litoral y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).

De las variables antes mencionadas, latitud y longitud ya se encuentran descritas en el catastro de las estaciones meteorológicas utilizadas, mientras que las demás fueron derivadas de la manipulación de productos obtenidos por sensores remotos de diversa naturaleza alojados en distintos satélites correspondientes a variadas misiones espaciales.

Las **Figuras 33 a 38** presentan el modelo digital de las distintas variables topográficas y fisiográficas en la localidad de estudio.

La altitud es representada mediante un Modelo Digital de Elevación (MDE) que se obtuvo a través de la manipulación y corrección de imágenes satelitales descargadas del *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), presentando una resolución de 90 metros. La cartografía matricial posee la característica de que cada celda representa un valor único, en este caso, el MDE (**Figura 33**) representa a la variable altitud en unidades de metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). En la **Figura 33** se observa que dentro del área de estudio la altitud varía entre los 620 y 1350 metros sobre el nivel del mar, presentando una extensa superficie con altitud entre los 800 y 900 m.s.n.m.

La cartografía de las variables pendiente y exposición son derivadas del MDE. En el caso de la pendiente (**Figura 34**), la variable se encuentra expresada en porcentaje de inclinación (%), mientras que la exposición (**Figura 35**) es representada en grados de azimut, donde los 0° y 360° representan el norte geográfico mientras los valores restantes entre 0 y 360 grados corresponden a las diferentes direcciones geográficas en el sentido de las manecillas del reloj.

Con la misma imagen del MDE se calculó una cuarta variable: la distancia al litoral (**Figura 36**). Para realizar este cálculo se utilizó un MDE más extenso debido a que se creó una máscara que representó el área del océano con valor 1 y el resto (área de interés) con valor 0. Luego se calculó la distancia de cada pixel con valor 0 a aquel pixel con valor 1 más próximo. Esta distancia considera la esfericidad de la Tierra, por lo que su radio fue incluido en el cálculo.

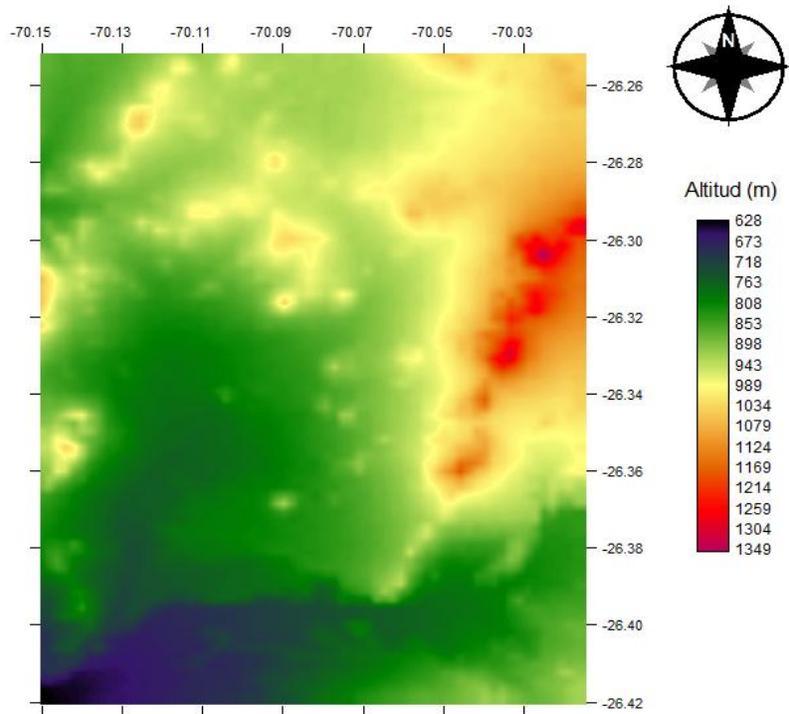
La última variable descriptora obtenida fue el NDVI, que matemáticamente se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$NDVI = \frac{\rho_{IRC} - \rho_R}{\rho_{IRC} + \rho_R}$$

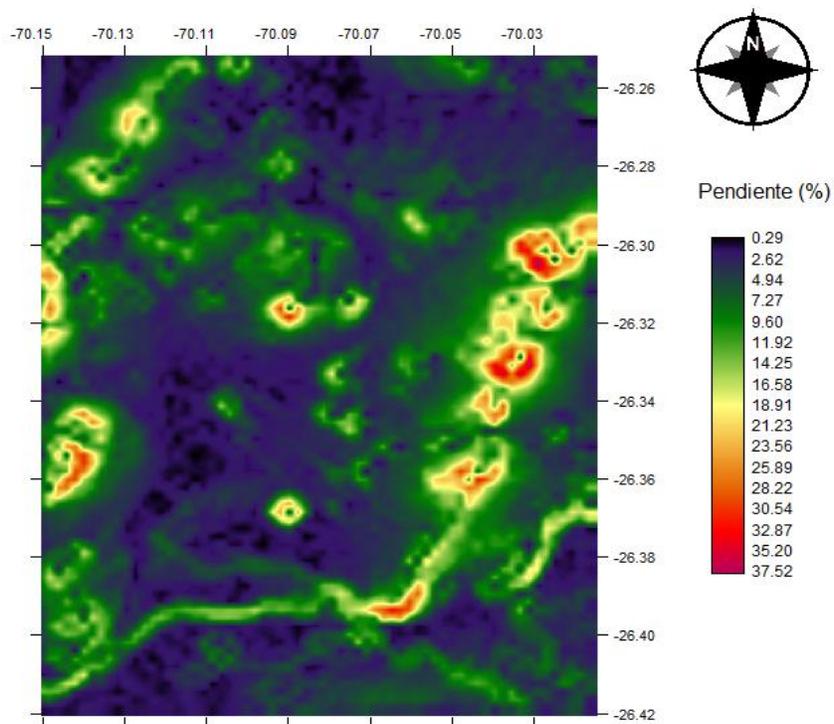
donde  $\rho_{IRC}$  corresponde a la reflectividad en la banda del infrarrojo cercano y  $\rho_R$  a la reflectancia en la banda del rojo. La reflectividad, desde el punto de vista físico corresponde a la relación entre el flujo de energía que incide sobre una superficie y la que es capaz de reflejar. Dependiendo de la naturaleza de la superficie, el valor de reflectividad variará según la banda espectral que se observe. Las bandas corresponden a segmentos determinados del espectro electromagnético con características particulares, como la banda azul, verde y roja, que corresponden al espectro visible, o la banda ultravioleta o infrarroja.

El índice entrega valores entre 0 y 1, presentando valores asociados a vegetación desde 0,5, siendo mayor el vigor o la densidad de la vegetación a medida que el índice se aproxima a 1, mientras que el suelo desnudo y otros elementos del paisaje son representados con valores inferiores a 0,5.

Las imágenes utilizadas provienen del sensor MODIS *Terra*, descargadas del Centro *Land Processes Distributed Active Archive Center* (LP DAAC), y corresponden a una composición de 16 días y resolución espacial de 250 metros, capturadas entre enero de 2001 y julio de 2010. Para la modelación sólo se requiere la obtención del comportamiento vegetacional del mes de Enero y Julio (**Figuras 37 y 38**, respectivamente), motivo por el que sólo se trabajó con la composición promedio de dichos meses.



**Figura 33.** Modelo digital de elevación del área en estudio.



**Figura 34.** Pendiente del área en estudio.

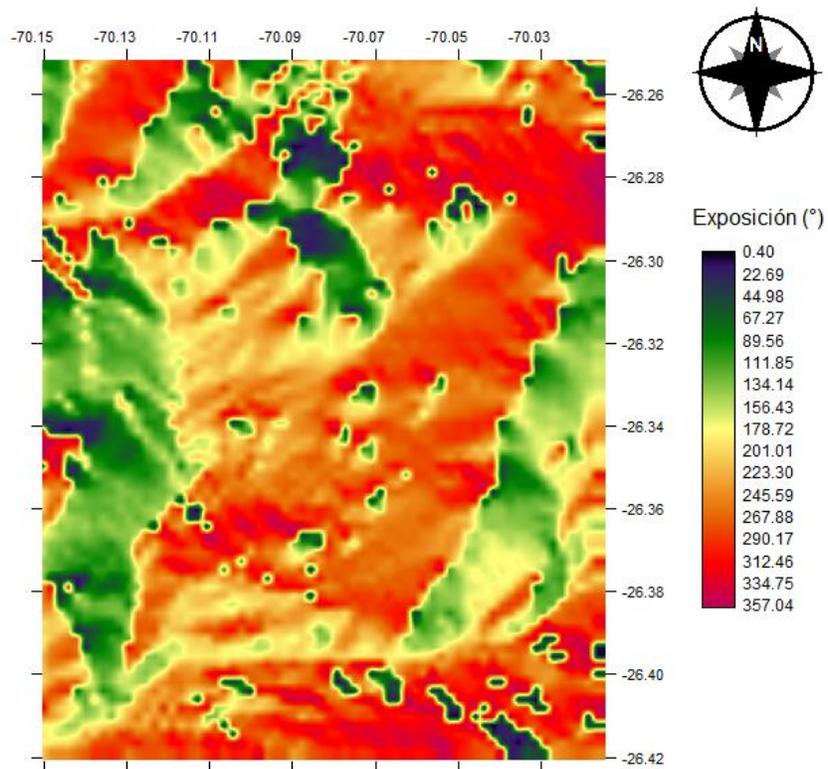


Figura 35. Exposición del área en estudio.

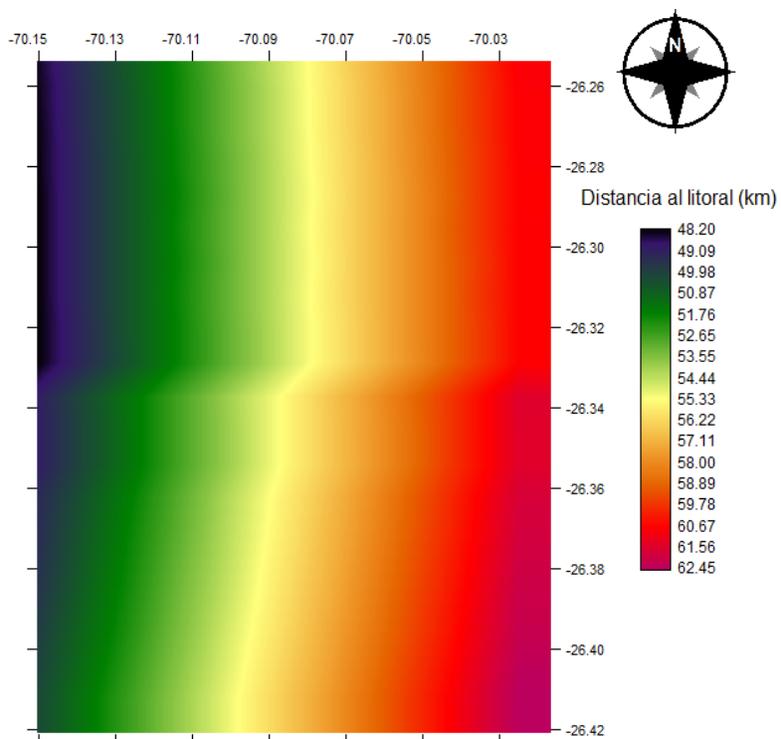


Figura 36. Distancia al litoral del área en estudio.

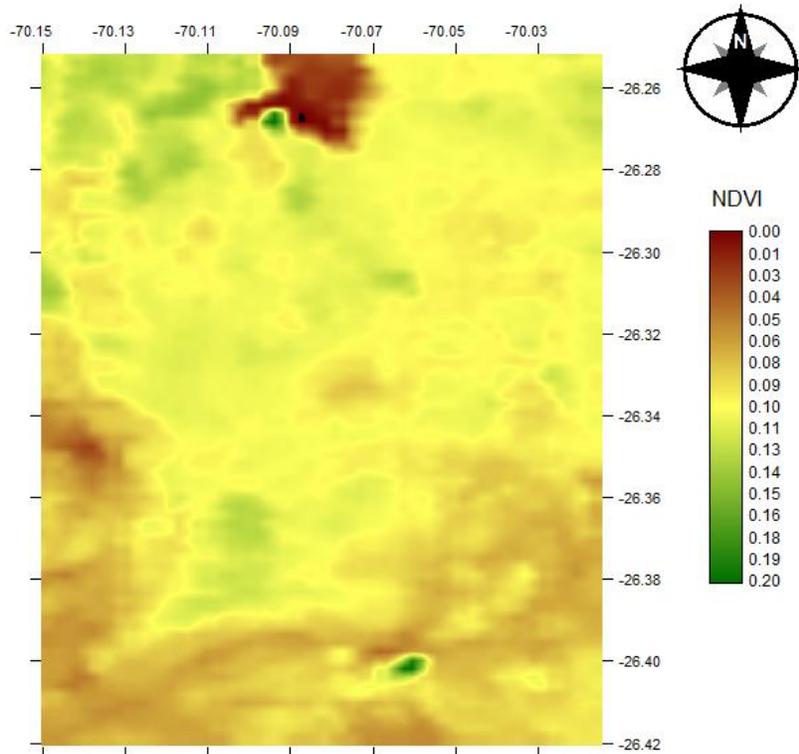


Figura 37. NDVI promedio 2001-2010 del mes de Enero.

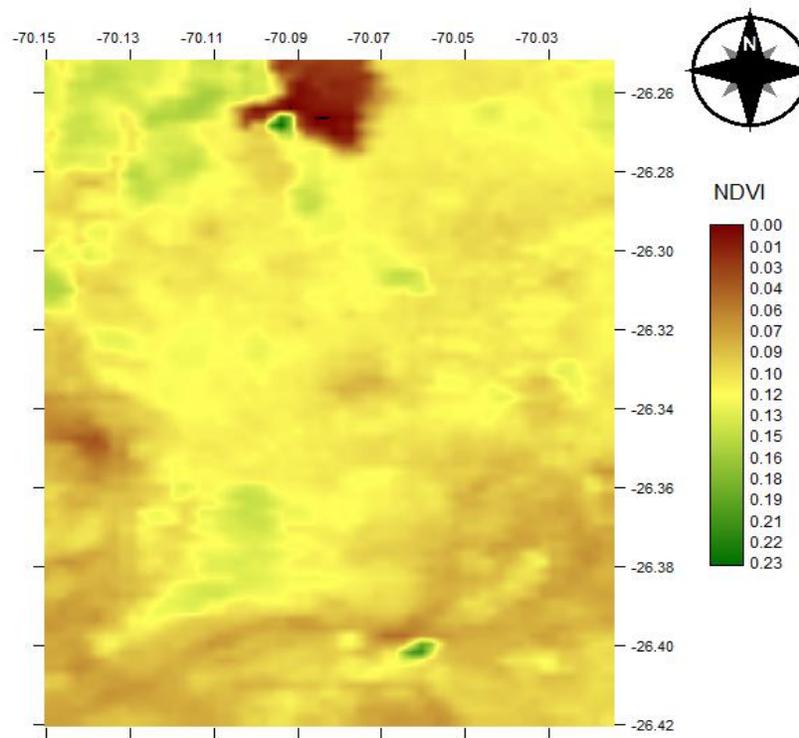


Figura 38. NDVI promedio 2001-2010 del mes de Julio.

A partir de las variables topoclimáticas detalladas, se procedió a la obtención de las variables de interés: Temperatura Máxima de Enero (TXE), Temperatura Mínima de Enero (TNE), Temperatura Máxima de Julio (TXJ), Temperatura Mínima de Julio (TNJ), Humedad Relativa de Enero (HRE), Humedad Relativa de Julio (HRJ). Para las variables Temperatura y Humedad Relativa sólo se requiere obtener mediante este procedimiento los meses que presenten los valores extremos (Enero y Julio). Esto se debe a que, para el desarrollo de la cartografía a nivel diario o semanal, se necesita conocer los valores mínimos y máximos pues estas variables son descritas por un comportamiento sinusoidal, es decir, responden a un modelamiento basado en la función seno. Al tener el valor máximo y mínimo, se puede describir el comportamiento de la variable según la localidad y día calendario.

La modelación de las distintas variables climáticas se realizó mediante la aplicación de un modelo matemático descrito por la Ecuación [1].

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{j,k,n,m=0} a_j x_{k_1}^{n_1} x_{k_2}^{n_2} \dots x_{k_n}^{n_m} + \varepsilon \quad [1]$$

donde  $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$  representa a una variable climatológica en un período de tiempo cualquiera,  $x$  es una variable descriptora, que puede ser latitud, longitud, altitud, distancia al litoral, pendiente, entre otras, y  $a_j$  son matrices de coeficientes a determinar (Qiyao *et al.*, 1991; Canessa, 2006; Fotheringham *et al.*, 2000; Fotheringham *et al.*, 2002) y  $\varepsilon$  es el error de la estimación. Con estas relaciones se calcularon matrices de datos para cada variable climatológica en formato binario (raster) y para los meses de enero y julio.

Se utilizó este formato matricial binario porque corresponde al formato del programa IDRISI® (IDRISI 32, Clark Labs, Clark University, Massachusetts, USA), y es usado para la caracterización espacial de variables continuas.

El modelo topoclimático propuesto, de acuerdo a la Ecuación [1], para la estimación de la temperatura y precipitación media mensual, consideró que la variación espacial de las variables anteriores está determinada por los factores de posición en la superficie de la tierra, esto es latitud ( $LAT$ , grados sexagesimales) y longitud ( $LON$ , grados sexagesimales), además de factores fisiográficos como altitud ( $ALT$ , m) y distancia al litoral ( $DL$ , km), según lo muestra la Ecuación [2].

$$Y = a_0 + a_1 * LAT + a_2 * LON + a_3 * ALT + a_4 * DL \quad [2]$$

donde  $Y$  representa la temperatura y precipitación media mensual estimada para cada mes, mientras que los valores  $a_0, a_1 \dots a_4$ , son matrices coeficientes de la ecuación correspondiente. Todos los modelos representados por la Ecuación [2] se sometieron a un procedimiento de regresión *stepwise* en su forma *backward* con la finalidad de encontrar los modelos reducidos de mayor significancia estadística. La bondad de ajuste de todas las regresiones topoclimáticas descritas anteriormente se calculó con una significancia estadística del 95% ( $p \leq 0,05$ ), tanto para el modelo completo como para cada uno de sus coeficientes.

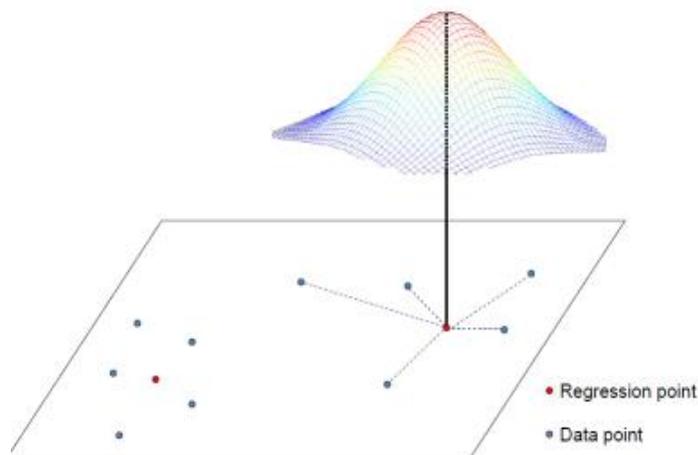
Los coeficientes y  $a_i$  son matrices de coeficientes a determinar mediante la hipótesis de que cada punto utilizado tiene un peso  $w_{ij}$  en la ecuación de regresión final. Matemáticamente podemos estimar estos coeficientes mediante la ecuación

$$a_{ij} = (X^T W_{ij} X)^{-1} X^T W_{ij} \quad [3]$$

donde  $i,j$  representa la notación matricial,  $X$  es la matriz de las variables explicativas o descriptoras, y  $w_{ij}$  es una matriz de pesos. Para calcular esta matriz de pesos suponemos que la dependencia espacial, en primera aproximación, está relacionada con la distancia a cada punto con su vecindad, lo cual puede ser interpretado como su área de influencia en la regresión final. Se asume una dependencia espacial del tipo

$$w_{ij} = e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{d_{ij}}{b} \right)^2} \quad [4]$$

donde  $d_{ij}$  es la distancia desde un punto a una referencia dentro del espacio,  $b$  es una constante relacionada con el ancho de banda considerado en la configuración del kernel para el cálculo en GRID. La métrica  $d_{ij}$  puede ser considerada como la distancia euclidiana desde el punto de referencia con su vecindad. La **Figura 39** muestra el tipo de dependencia espacial del peso entre el punto de referencia y su vecindad basado en la ecuación 4.



**Figura 39.** Relación espacial para el cálculo de la matriz de pesos.

Una vez determinada la ecuación de regresión geográfica dada por la ecuación 1, se interpolan los coeficientes de la regresión a la misma resolución espacial de las variables descriptoras que están en formato matricial o GRID usando el método geoestadístico denominado kriging.

Luego de la obtención de estas cartografías, se realizó la aplicación del modelo sinusoidal para la generación de las variables a nivel diario, para posteriormente desarrollar cartografías de medias semanales. En el caso de la Temperatura, el desarrollo semanal de cartografía se realizó sobre la

Temperatura Media, por lo que se obtuvieron 52 cartografías de Temperatura media y otras 52 en el caso de la Humedad Relativa, que dada su extensión, no son presentadas en este informe.

En el caso de las cartografías asociadas a las probabilidades de lluvia, estas se han basado en cartografías de precipitación media mensual. Posteriormente fueron obtenidas las cartografías correspondientes a las variables Horas de Frio (base 7°C) acumuladas entre el período de mayo a agosto (ambos meses incluidos), Días Grado (Base 10°C) acumulados entre el período de septiembre y marzo (ambos meses incluidos), Radiación Solar promedio del mes de enero y julio (cal/cm<sup>2</sup>/día), Probabilidad promedio de ocurrencia de heladas (en otoño, invierno y verano), y Probabilidad promedio de precipitación (mensual). Todas las cartografías resultantes de la modelación se presentan, dada su extensión, adjuntas en el **Anexo 7**.

Luego de haber obtenido las cartografías matriciales digitales, se llevó a cabo la clasificación climática mediante un procedimiento denominado *K-means*. Este método consiste en establecer un cierto número de zonas que se consideren homogéneas dado ciertos criterios (*clusters*). En este caso, se consideró pertinente optar por 8 *clusters* (sectores), que se obtuvieron basados en el contraste de: Temperatura Mínima y Máxima de Enero, Temperatura Mínima y Máxima de Julio, Humedad Relativa de Enero y Julio, Radiación Solar de Enero y Julio y Precipitación media anual.

La clasificación climática se presenta en la **Figura 40**, en la cual se puede observar que la composición de la clasificación está dada por una tendencia de las categorías de cambiar a medida que se alejan del litoral.

Finalmente, para completar las categorías, se realizó una extracción de información de diversas cartografías matriciales digitales para así establecer con mayor claridad la identidad de cada una de ellas, dentro de las cuales se encuentran las siguientes variables climáticas:

- ✓ Horas de Frio con base 7°C acumuladas entre mayo y septiembre.
- ✓ Días grado base 10°C acumulados entre septiembre y mayo.
- ✓ Número de heladas entre mayo y septiembre.
- ✓ Probabilidad de precipitación (%) entre mayo y septiembre.

La **Figura 41** muestra el formato final de la clasificación, y que no es más que la misma exportada al formato "kml" del software Google Earth, en el que se pueden visualizar los atributos de la capa final obtenida. La información de cada *cluster*, con los valores de cada una de las variables para cada sector, se presenta en la **Tabla 37**.

En el **Anexo 8** se entrega junto a este informe un DVD que contiene un archivo con el *cluster* desarrollado, el cual se abre desde el software "Google Earth". Para abrirlo, se deben seguir los pasos siguientes:

- 1) Guardar el archivo del *cluster* en el computador.
- 2) Abrir "Google Earth".
- 3) Luego de abrir Google Earth - Archivo-abrir- (buscar la carpeta donde fue guardado el archivo del *cluster* y abrir).
- 4) Ir a "Lugares temporales" (izquierda) donde debe estar abierto el archivo.
- 5) Pinchar el *cluster* con el botón derecho -Propiedades-Estilo, color.
- 6) Una vez en "Estilo, Color", pinchar "compartir estilo".

7) Pinchar "aleatorio" y bajar la opacidad del relleno a 50%.

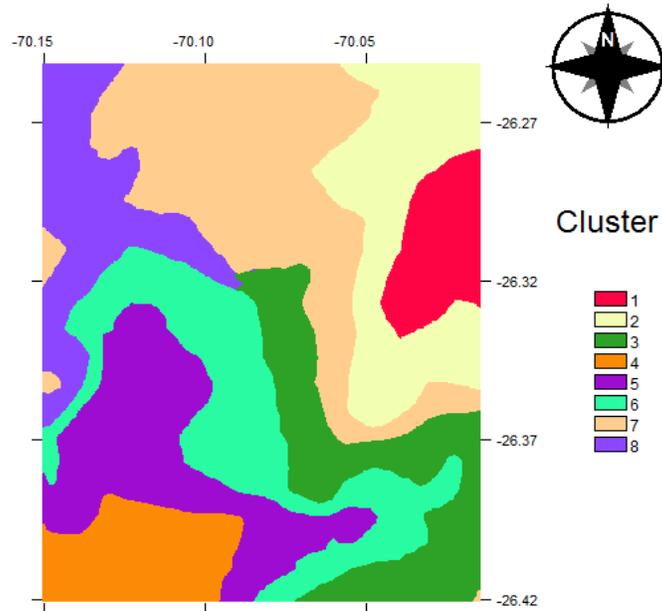


Figura 40. Clasificación climática según K-means

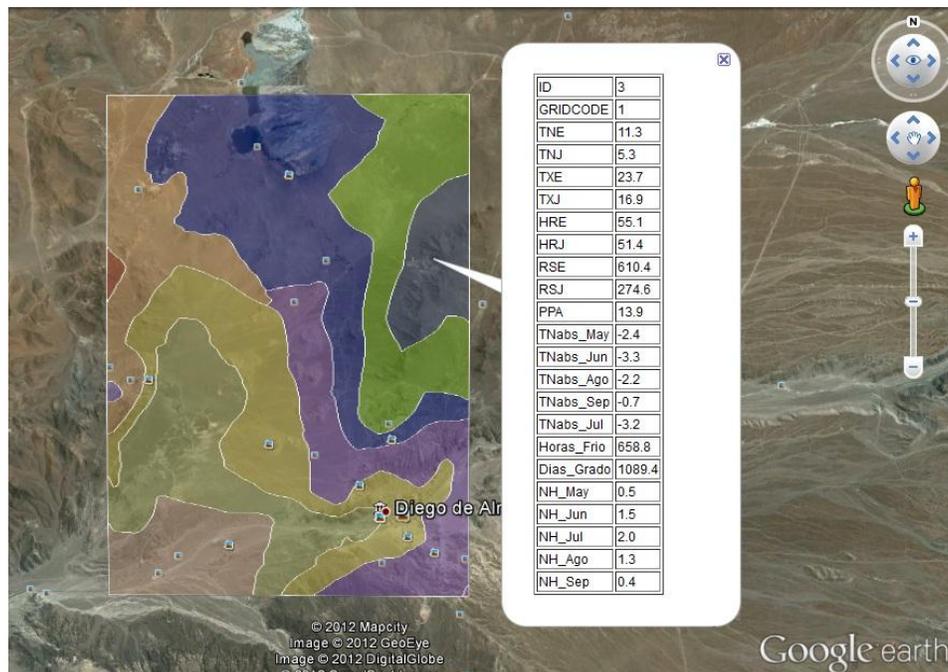


Figura 41. Clasificación climática en Google Earth, y un ejemplo de las variables climáticas en uno de los 8 sectores definidos.

Siguiendo estos pasos, el *cluster* de la zonificación agroclimática quedará visible en “Google Earth”, desde donde se podrá acceder a las características de cada sector de la zonificación posando el cursor sobre el mismo. La imagen que se observa una vez realizado lo detallado anteriormente se presenta en la **Figura 41**.

**Tabla 37.** Valores de las variables incluidas en la zonificación climática para cada sector o *cluster*.

Variable climática	Cluster							
	1	2	3	4	5	6	7	8
T° min Ene	11,3	11,7	12,3	12,9	12,6	12,4	12	12,2
T° min Jul	5,3	5,6	6,1	6,7	6,4	6,3	6	6,2
T° max Ene	23,7	24,5	25,7	26,2	25,6	25,5	24,4	24,1
T° max Jul	16,9	17,6	18,5	18,7	18,3	18,3	17,4	17,2
HR Ene	55,1	56,7	58,7	61,3	60,1	59,4	57,8	58,6
HR Jul	51,4	53,3	55,5	58,8	57,6	56,7	54,9	56,2
RS Ene	610,4	605,9	600,3	593,9	569,9	598,6	603,5	601,8
RS Jul	274,6	272,1	269,1	263,9	265,6	267	269,4	267
PP media anual	13,9	13,6	13,3	12,8	13	13,1	13,4	13,3
T° min abs May	-1,9	-1,8	-1	0	-0,4	-0,6	-1,3	-0,8
T° min abs Jun	-3,3	-2,8	-2	-1,1	-1,5	-1,7	-2,3	-1,8
T° min abs Ago	-2,2	-1,7	-1,1	-0,2	-0,6	-0,8	-1,3	-1
T° min abs Sep	-0,7	-0,1	0,7	1,6	1,2	1	0,4	0,8
T° min abs Jul	-3,2	-2,6	-2	-1,1	-1,5	-1,7	-2,2	-1,8
HF	658,8	572,6	572,6	377,3	421,7	450	508,4	467,2
DG	1089,4	1172	1270,5	1354,5	1304,1	1284,6	1200,4	1207
N° Heladas May	0,5	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1
N° Heladas Jun	1,5	1	0,6	0,3	0,4	0,5	0,7	0,6
N° Heladas Jul	2	1,4	1	0,5	0,6	0,8	1,1	0,8
N° Heladas Ago	1,3	0,9	0,5	0,2	0,4	0,4	0,6	0,5
N° Heladas Sep	0,4	0,2	0,1	0	0,1	0,1	0,1	0,1

## 2. EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DE LA JOJOBA A LAS CARACTERÍSTICAS BIO-FÍSICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

El foco de trabajo respecto al desarrollo de estas actividades consistió en realizar evaluaciones en terreno para determinar la adaptación de la jojoba a las condiciones locales. Para realizar esta evaluación se llevaron a cabo ensayos en terreno con el fin de determinar puntualmente los efectos de diferentes variables territoriales sobre la supervivencia de las plantas de jojoba.

En el marco de esta actividad se buscó aislar y determinar los factores que podían estar generando la elevada y aparentemente aleatoria mortandad de plantas, observada a partir del año 2009. Ese año, según lo informado por el señor Miguel Soto, un episodio de lluvias ocurrido el mes de julio tuvo como consecuencia una alta mortalidad de ejemplares. A partir de entonces, la población de plantas de jojoba en el predio ha continuado disminuyendo, aunque a una tasa menor, y la producción de semillas ha sufrido una importante merma.

Las circunstancias bajo las cuales se han suscitado estos hechos permiten identificar como posibles factores causantes:

- ✓ El exceso de agua acumulada en ciertos sectores, generando anegamiento de raíces y, como consecuencia de esto, muerte de las plantas debido a la alta susceptibilidad de la jojoba a la hipoxia radicular.
- ✓ El exceso de sales acumuladas en ciertos sectores de la sobrehilera debido a la dispersión de sales desde la entrehilera, generado por el desplazamiento del agua.
- ✓ La combinación de ambos factores.
- ✓ La ocurrencia de heladas.

A partir de estos antecedentes, se proyectaron ensayos y evaluaciones en terreno, a fin de identificar la causa de este hecho. Las evaluaciones realizadas para determinar la vulnerabilidad de la jojoba a las condiciones bio-físicas de la localidad de Diego de Almagro consistieron en:

1. Instalación de una estación meteorológica en el predio del Sr. Miguel Soto, para monitorear de forma permanente las variables climáticas de sector.
2. Ejecución de un ensayo en la plantación de jojoba perteneciente al Sr. Miguel Soto, ubicada en la localidad de Diego de Almagro, con el objetivo fue determinar la causa de la elevada mortandad de ejemplares ocurrida durante los últimos años y la merma en la producción.
3. Ejecución de un ensayo en el Campo Experimental Agronómico Las Cardas, perteneciente a la Universidad de Chile, ubicado en la región de Coquimbo, con el objetivo de comparar la tolerancia a la salinidad de los clones de jojoba cultivados en el predio del Sr. Miguel Soto con un clon de tolerancia media-alta a sales, desarrollado por el Centro de Estudios de Zonas Áridas de la Universidad de Chile.

## **2.1 Monitoreo de variables climáticas**

El mes de abril de 2012 fue instalada en el predio del Sr. Miguel Soto una estación meteorológica (**Figura 42**) con el fin de monitorear de manera continua y permanente las variables climáticas del sector. Esta estación meteorológica registró datos de temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento a lo largo del período transcurrido entre Abril y Septiembre de 2012.

De las variables climáticas monitoreadas, la que se ha considerado más relevante de acuerdo a los posibles factores causantes de la elevada mortandad de los ejemplares ocurrida a partir del año 2009 es la ocurrencia de heladas. Este factor, si bien fue descartado en un principio en base a los datos climáticos de años anteriores provenientes de las estaciones meteorológicas pertenecientes a CODELCO Salvador, instaladas en las cercanías del predio, debía ser evaluado también en la temporada 2012. Con el fin de confirmar o descartar la ocurrencia de heladas durante la temporada invernal del año 2012, año durante el cual se realizaron los ensayos y las evaluaciones en terreno en el sector estudiado, la temperatura fue monitoreada y evaluada durante el período de desarrollo de los ensayos en el predio.

La información entregada por la estación meteorológica instalada en predio sería de utilidad también para considerar ocurrencia de eventos que pudieran interferir en el correcto desarrollo del ensayo que se llevó a cabo en el lugar (detallado a continuación), tales como precipitaciones, heladas, etc.



**Figura 42.** Estación meteorológica instalada en el sector de la plantación experimental de Jojoba del Sr. Miguel Soto.

## **2.2 Ensayo en la plantación de jojoba del Sr. Miguel Soto**

Con el objetivo de determinar la causa de la alta mortandad de plantas ocurrida el año 2009 luego de un episodio de precipitaciones, se llevó a cabo un ensayo en la plantación de Jojoba perteneciente al Sr. Miguel Soto, de manera de poder determinar si se trataría de un problema con solución mediante el de manejo del cultivo o de un problema dado por las condiciones climáticas del sector, lo que haría inviable el cultivo de esta especie en la localidad de Diego de Almagro.

Entre los factores enumerados anteriormente como posibles causantes de la elevada mortandad de ejemplares en el predio, este ensayo evaluó los primeros tres mencionados:

- ✓ Exceso de agua acumulada en el suelo, generando anegamiento en la zona de raíces.
- ✓ Movimiento de sales desde la entrehilera hacia la sobrehilera ocasionado por las precipitaciones, generando acumulación de sales en el sector de las raíces de la planta.
- ✓ Una combinación de ambos factores (anegamiento y exceso de sales).

La presunción de que el movimiento de aguas desde la entrehilera hacia la sobrehilera generaría movimiento de sales en la misma dirección y ocasionaría la muerte de plantas por exceso de sales en la rizósfera se basa en el hecho de que los análisis de suelo realizados en el predio evidenciaron una gran diferencia en los valores de conductividad eléctrica entre la sobrehilera y la entrehilera, observándose valores de 15,75 dS/m y 99,3 dS/m, respectivamente.

Para el desarrollo de este ensayo se realizaron visitas a terreno entre los meses de febrero y septiembre del año 2012, las cuales tuvieron como objetivo definir, establecer y monitorear el ensayo, aplicar los diferentes tratamientos y realizar las mediciones correspondientes.

### **I. Metodología**

Se definieron cuatro tratamientos de acuerdo a las dos variables consideradas como probables responsables de la muerte de plantas: (i) anegamiento de raíces y (ii) exceso de salinidad en el suelo. Los tratamientos, definidos utilizando un diseño factorial, son presentados en la **Tabla 38**.

Para los tratamientos con suelo sin anegar se aplicó un riego con agua potable proveniente de un camión aljibe, simulando una lluvia de 10 mm.

En el caso de los tratamientos con suelo anegado, la altura de agua aplicada correspondió a 100 mm. Para contener el agua en la zona de la planta tratada, se construyeron camellones como un pequeño muro de contención de 15 cm alrededor de la planta, formando una taza rectangular en la cual se acumuló el agua hasta alcanzar la altura de 100 mm a aplicar.

Existiendo en la zona de la entrehilera una conductividad eléctrica de 99,3 dS/m, y de 15,75 dS/m en la sobrehilera, el exceso de sales en el suelo para los tratamientos se consiguió incluyendo parte de la entrehilera en la taza construida para acopiar el agua aplicada. Los

tratamientos sin exceso de sales, en cambio, no incluyeron la entrehilera dentro de la taza, sino únicamente el ancho de la sobrehilera.

**Tabla 38.** Tratamientos aplicados en el ensayo llevado a cabo en la plantación experimental de jojoba del señor Miguel Soto, en la localidad de Diego de Almagro.

<b>Factor</b>	<b>Anegamiento</b> (aplicación de lámina de 100 mm de agua)	<b>Simulación de lluvia</b> (aplicación de lámina de 10 mm de agua)
<b>Suelo lavado</b> (aplicación de anegamiento o simulación de lluvia exclusivamente a la sobrehilera)	T1	T4
<b>Suelo sin lavar</b> (aplicación de anegamiento o simulación de lluvia a la totalidad del marco de plantación abarcado por cada planta)	T3	T2

El agua potable se aplicó a principios del mes de julio mediante tuberías, directamente desde el camión aljibe a las tazas construidas.

Las mediciones efectuadas, tanto antes como después de la aplicación de los tratamientos, consistieron en términos generales en:

- ✓ Caracterización de las plantas previo a la aplicación de los tratamientos, mediante la determinación del diámetro de copa, altura relativa y profundidad de enraizamiento.
- ✓ Mediciones de conductividad eléctrica de suelos, tanto en la entrehilera como en la sobrehilera.
- ✓ Instalación de sensores de humedad y temperatura de suelos en la zona de las raíces de las plantas tratadas, mediante los cuales se realizaron mediciones continuas a lo largo del desarrollo del ensayo.
- ✓ Control de variables climáticas mediante una estación meteorológica instalada en el predio, la cual realizó mediciones continuas a lo largo del desarrollo del ensayo.
- ✓ Mediciones de fluorescencia de clorofilas en ciclos diarios, previos y posteriores a la aplicación de los tratamientos.
- ✓ Mediciones de potencial xilemático de las plantas.
- ✓ Evaluación de muerte de tejidos.
- ✓ Evaluación de muerte de plantas.
- ✓ Mediciones de crecimiento de brotes.

Actualmente se encuentra en curso una memoria para la obtención del título de Ingeniero Agrónomo en la Universidad de Chile en torno a este ensayo. El proyecto de memoria, aprobado por el Departamento de Producción Agrícola de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile se adjunta en el **Anexo 9**, en el cual se detallan en profundidad los objetivos, metodología y desarrollo de este ensayo.

En las **Figuras 43 a 50** se pueden observar las distintas etapas del proceso de desarrollo de este ensayo, detalladas en la metodología.

Finalmente, los datos obtenidos a lo largo del ensayo fueron sometidos a análisis estadísticos luego de las últimas mediciones realizadas durante el mes de Septiembre.



**Figura 43.** Calicata construida para determinar la profundidad de raíces.



**Figura 44.** Aplicación de agua potable mediante tuberías, desde el camión aljibe hasta las plantas tratadas.



**Figura 45.** Aplicación de agua potable mediante tuberías, desde el camión aljibe hacia las plantas tratadas.



**Figura 46.** Camellones construidos para contener el agua alrededor de las plantas.



**Figura 47.** Aplicación de agua potable mediante tuberías, desde el camión aljibe hacia las plantas tratadas.



**Figura 48.** Tratamiento de plantas anegadas con exceso de salinidad.



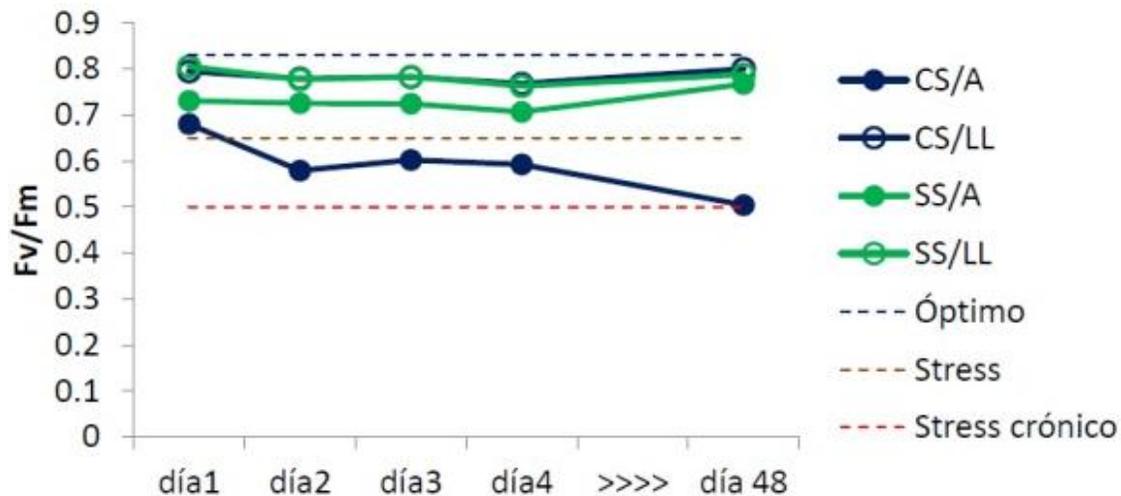
**Figura 49.** Ciclo de riego



**Figura 50.** Mediciones de fluorescencia de clorofilas.

## II. Resultados

Los resultados de este ensayo indican que el tratamiento que incluyó anegamiento y suelo con sales fue el único que generó un nivel de estrés en las plantas del cual no pudieron reponerse, derivando en la muerte de los individuos afectados. Como muestra la **Figura 51**, las mediciones de fluorescencia de clorofilas ( $F_v/F_m$ ), indicador del nivel de estrés de las plantas, el tratamiento con anegamiento y salinidad es el único que llega finalmente a un nivel de estrés crónico, mientras que los otros tratamientos generaron una disminución inicial en el valor de  $F_v/F_m$ , pero finalmente las plantas lograron reponerse, llegando a valores muy cercanos al óptimo.

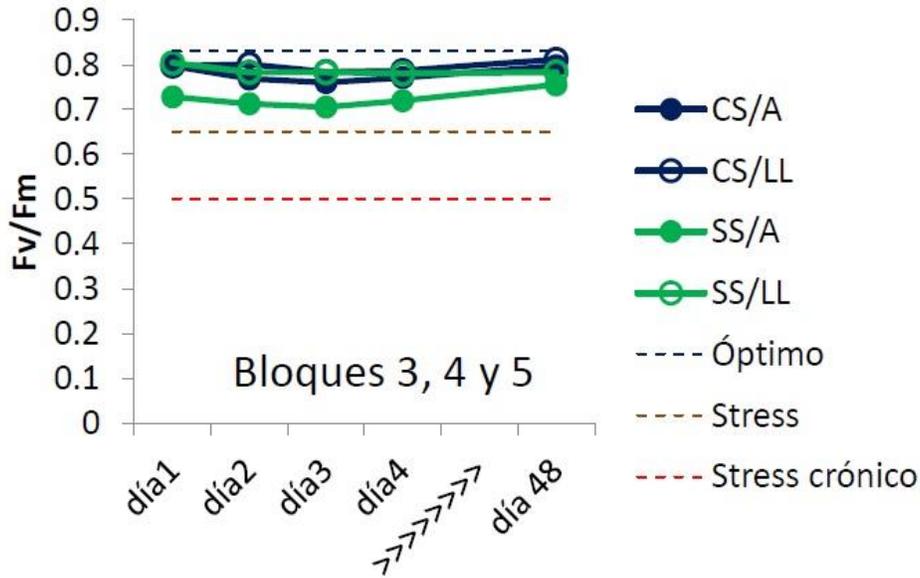


**Figura 51.** Valores de Fv/Fm para los distintos tratamientos. CS corresponde a los tratamientos con sales (suelo sin lavar), SS a los tratamientos sin sales (suelo lavado), A corresponde a plantas anegadas y LL corresponde a la aplicación de una simulación de lluvia.

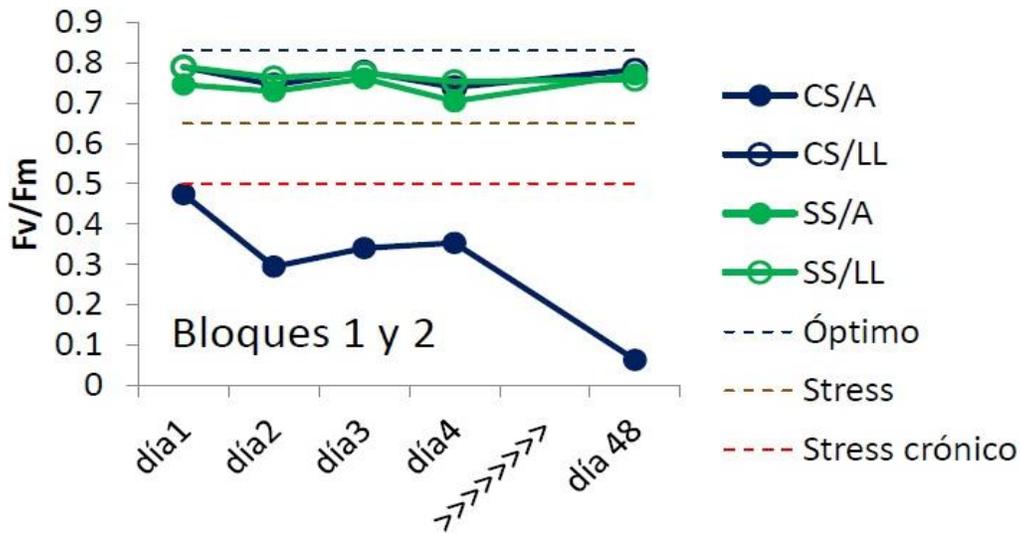
Como se detalla en la metodología de este ensayo, incluida en el proyecto de memoria desarrollado en base a este ensayo (**Anexo 9**), fueron establecidos cinco bloques, cada uno de los cuales contó con los cuatro tratamientos. Al analizar estos bloques de manera separada, se observaron diferencias en la respuesta de las plantas a los diferentes tratamientos. Como mostraba la **Figura 51**, el tratamiento con sales y anegado había mostrado tener un efecto, aunque no muy fuerte, en el estrés de las plantas. Al analizar por separado los bloques, se observan diferentes respuestas, las que, probablemente, están dadas por el tipo de suelo en el cual se encuentran.

La **Figura 52** presenta los resultados de las mediciones de fluorescencia de clorofilas para los bloques 3, 4 y 5. En esta figura no se observan diferencias importantes en el efecto de los diferentes tratamientos sobre el Fv/Fm. Sin embargo, al observar la **Figura 53**, que presenta los resultados de estas mediciones para los bloques 1 y 2, se evidencia un fuerte efecto del tratamiento CS/A (suelo con sales y anegado), y un comportamiento muy similar entre los otros tres tratamientos.

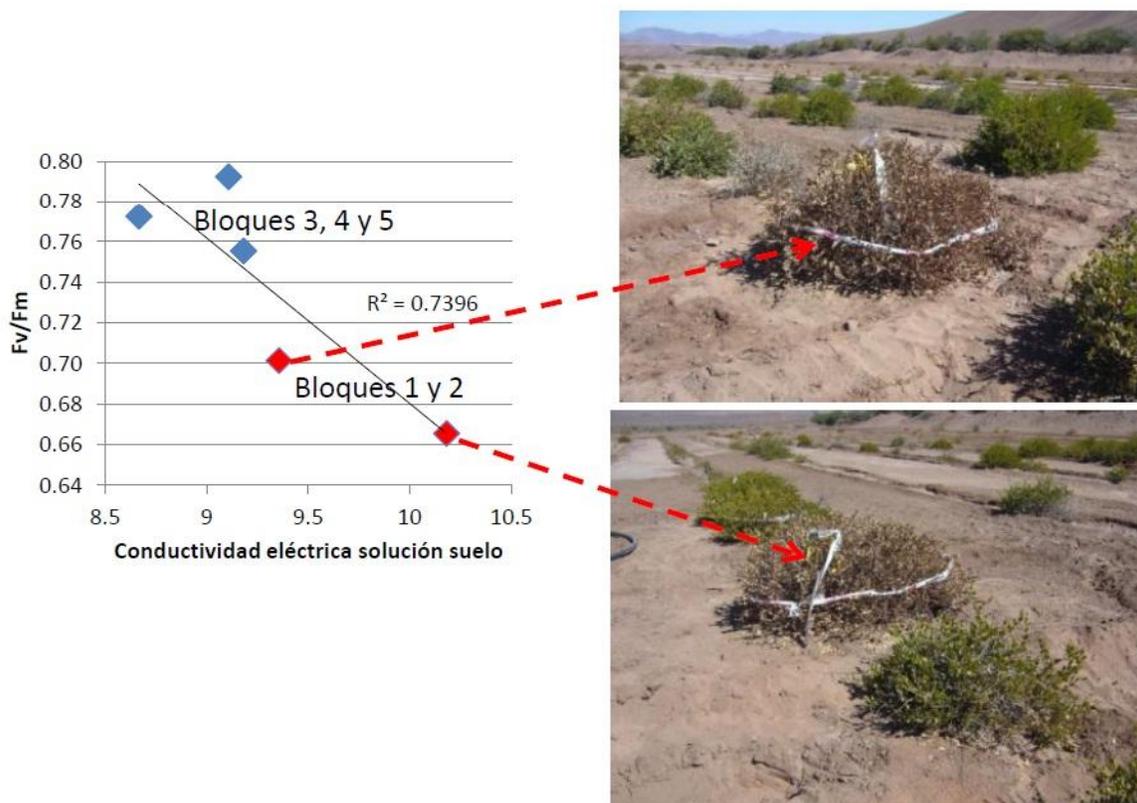
Debido a las diferencias observadas entre los bloques, se evaluó la conductividad eléctrica del suelo en los diferentes bloques, y se pudo observar una correlación negativa entre esta y el Fv/Fm. En la **Figura 54** se observa que los bloques 1 y 2, con los menores valores de Fv/Fm, son los que tienen la mayor conductividad eléctrica del suelo, con valores aproximados de 9,3 y 10,2 dS/m, respectivamente. Adicionalmente, se puede observar en las imágenes incluidas que estas dos plantas resultaron con daño severo, terminando muertas al final del ensayo.



**Figura 52.** Valores de Fv/Fm para los diferentes tratamientos aplicados, en los bloques 3, 4 y 5. CS: tratamientos con sales (suelo sin lavar), SS: tratamientos sin sales (suelo lavado), A: plantas anegadas y LL: simulación de lluvia.



**Figura 53.** Valores de Fv/Fm para los cuatro tratamientos aplicados, en los bloques 1 y 2. CS: tratamientos con sales (suelo sin lavar), SS: tratamientos sin sales (suelo lavado), A: plantas anegadas y LL: simulación de lluvia.



**Figura 54.** Efecto de la conductividad eléctrica del suelo sobre la relación Fv/Fm medida en las plantas correspondientes al tratamiento con suelo anegado y sin lavar (o salino), T3, de los diferentes bloques.

Con los resultados obtenidos se ha podido concluir que el tratamiento con suelos sin lavar (suelos salinos) y anegados (100 mm de agua) generó daño en los tejidos de las plantas, y que el nivel de daño que alcance está dado por el tipo de suelo.

### **2.3 Ensayo en el Campo Experimental Agronómico Las Cardas**

Se estableció un ensayo en el Campo Experimental Agronómico Las Cardas (CEALC) de la Universidad de Chile, ubicado en la Región de Coquimbo, Provincia del Elqui, con el fin de comparar la tolerancia a salinidad del clon de jojoba cultivado y propagado en el predio del señor Miguel Soto en la localidad Diego de Almagro (procedente de Argentina y cuyo nombre no ha podido ser confirmado) con un clon con una conocida tolerancia media-alta a la salinidad desarrollado en el Centro de Estudios de Zonas Áridas de la Universidad de Chile. Este ensayo buscó determinar si los clones cultivados por el señor Miguel Soto poseían una menor tolerancia a la salinidad, en cuyo caso podría proponerse la alternativa del cultivo de un clon con una mayor tolerancia, evitando de esta manera los daños que estaría generando en las plantas la alta salinidad en el suelo, originada por las aguas de riego. Esto podría, finalmente,

aportar al desarrollo de futuros cultivos de jojoba en la localidad en cuestión con una mayor tolerancia a salinidad.

Con este fin, se tomaron plantas pequeñas de vivero producidas por el Sr. Miguel Soto (del mismo clon que las que se encuentran plantadas en una mayor proporción en la plantación experimental) y se trasladaron al Campo Experimental Agronómico Las Cardas (CEALC), perteneciente a la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, ubicado en la región de Coquimbo. En este lugar se estableció el ensayo que compararía el comportamiento de ambos clones ante el riego con aguas dulces y con aguas salinas.

El ensayo fue establecido en Mayo y las mediciones fueron finalizadas el mes de Octubre. Los datos obtenidos fueron analizados durante el mes de Noviembre.

## **I. Metodología**

Para comparar la tolerancia a la salinidad de los dos clones de jojoba (**Figuras 55 y 56**), las plantas fueron regadas con agua dulce proveniente de un pozo profundo ubicado en el CEALC, y con agua con un alto contenido de sales, resultando los cuatro tratamientos siguientes:

- T1: Clon proveniente del predio de Diego de Almagro regado con agua dulce
- T2: Clon proveniente del predio de Diego de Almagro regado con agua salina
- T3: Clon 1.2.4 regado con agua dulce
- T4: Clon 1.2.4 regado con agua salina

Se establecieron cuatro bloques, cada uno de los cuales contó con cuatro repeticiones de cada tratamiento.

Para conseguir agua con alto contenido de sales se utilizó suelo proveniente de la entrehilera de la plantación de jojoba del predio del señor Miguel Soto, el cual presenta una conocida alta concentración de sales (CE de 99,3 dS/m). Una muestra de 50 kg aprox. de este suelo fue transportada a la IV Región, al lugar donde se establecería el ensayo. Previo a cada riego, agua proveniente del pozo profundo del CEALC fue pasada a través de una columna de este suelo con alta conductividad eléctrica. El agua resultante de este procedimiento fue analizada en cada oportunidad para determinar su conductividad eléctrica y de este modo confirmar que tuviera un nivel de sales superior al del agua proveniente del pozo profundo. Posteriormente, fue utilizada como agua de riego “salina”.

### **a) Material vegetal**

El clon que actualmente se propaga en el predio del señor Miguel Soto proviene de Argentina, y aunque su nombre se desconoce, según lo informado se trata de un clon tolerante a la salinidad. Se utilizaron 32 plantas pequeñas de vivero, de aproximadamente 20 cm de altura, contenidas en bolsas previo a su transplante definitivo al suelo. Estas plantas fueron trasladadas al CEALC de la Universidad de Chile para llevar a cabo el ensayo.

El clon con el que fueron comparadas estas plantas fue el llamado 1.2.4, desarrollado por el Centro de Estudios de Zonas áridas y calificado como con una tolerancia media-alta a

salinidad. Se seleccionaron 32 plantas con un tamaño similar al de las plantas llevadas desde Diego de Almagro, contenidas en las bolsas correspondientes a su contenedor previo al establecimiento en suelo.

Pese a que el Centro de Estudios de Zonas Áridas de la Universidad de Chile cuenta con clones con una tolerancia alta a salinidad (tolerancia mayor a la del clon utilizado), estos no pudieron ser utilizados para el ensayo debido a que no se contaba con suficientes ejemplares del tamaño apropiado para poder llevar a cabo de manera correcta el ensayo.

## **b) Riego**

Las plantas fueron regadas hasta capacidad de campo, luego de lo cual se determinó y registró el peso individual de cada una de ellas. Se midió el peso de cada planta de forma diaria para determinar el momento de aplicación del siguiente riego, momento en el cual se aplicó agua dulce o salina (según el tratamiento) hasta alcanzar el peso que fue registrado a capacidad de campo.

Este método de aplicación de riego se mantuvo durante un período de 4 meses, tiempo de duración del ensayo (**Figura 57**).

## **c) Evaluaciones**

En cada riego se determinó la conductividad eléctrica del agua aplicada, tanto del agua dulce como del agua salina.

Las evaluaciones de daño por toxicidad se realizaron de forma visual y se registraron las observaciones al momento de cada riego.

Dentro de las evaluaciones de daño por toxicidad se considerará el amarillamiento de hojas, caída de hojas, aborto floral y muerte de plantas

## **II. Resultados**

El ensayo fue finalizado el mes de Octubre, luego de lo cual fueron analizados los datos recopilados durante los meses de desarrollo del ensayo.

Al comparar el efecto del riego con aguas con alta concentración de sales versus el riego con agua dulce, en dos clones diferentes de jojoba (uno proveniente de la plantación de jojoba del Sr. Miguel Soto en Diego de Almagro y un clon con una conocida tolerancia media/alta a salinidad desarrollado en el Centro de Estudios de Zonas Áridas de la Universidad de Chile (clon 1.2.4), no se observaron diferencias estadísticas para las variables evaluadas.

La conductividad eléctrica promedio del agua salina utilizada para el riego se determinó en 11 dS/m. Debido a que no se observaron efectos generalizados en las plantas tratadas, se concluye que el clon proveniente de la plantación de jojoba del Sr. Miguel Soto es tolerante a la salinidad en las conductividades eléctricas medidas en el agua de riego utilizada como agua salina.



**Figura 55.** Ensayo con dos clones diferentes de plantas de jojoba establecido en el CEALC de la Universidad de Chile.



**Figura 56.** Ensayo con dos clones diferentes de plantas de jojoba establecido en el CEALC de la Universidad de Chile.



**Figura 57.** Efectos del riego con aguas salinas en plantas de jojoba.

### III. CONCLUSIONES

En base a los resultados presentados, obtenidos en los dos ensayos desarrollados, y a la información aportada por la estación meteorológica instalada en el predio del Sr. Miguel Soto se concluye que, a pesar de que la conductividad eléctrica del suelo generada por la acumulación de sales producto del riego con aguas con un alto contenido de estas está generando dificultades en el desarrollo y productividad de las plantas de jojoba cultivadas en la localidad, estos efectos pueden ser controlados.

Existen clones con una alta tolerancia a salinidad (que no pudieron ser evaluados en los ensayos por los motivos anteriormente expuestos) que permiten alcanzar un buen desarrollo y altos rendimientos en condiciones de suelos y aguas salinas, que podrían alcanzar un mejor desarrollo en la localidad.

Si se consigue disminuir la concentración de sales presente actualmente en las aguas de riego mediante la evaluación de la tratabilidad de estas, las sales se acumularían en el suelo a una tasa bastante menor a la actual, lo que permitiría al cultivo una vida productiva con una proyección mayor en el tiempo, aunque siempre menor al nivel de una plantación de jojoba en suelos con concentraciones de sales bajas.

Debido a que tanto los datos de las estaciones meteorológicas consultadas como la información arrojada por el proceso de zonificación agroclimática de la localidad de Diego de Almagro han concluido en la existencia de heladas en la zona, es importante definir el establecimiento del cultivo de esta especie en los sectores que no alcancen temperaturas menores a  $-2^{\circ}\text{C}$  y considerar el establecimiento de clones tolerantes a heladas.

### 3. ELABORACIÓN DEL LISTADO DE ESPECIES CANDIDATAS

La etapa inicial del proceso de elaboración del listado de especies candidatas fue destinada a recopilar información mediante una revisión bibliográfica profundizada en relación a:

- ✓ Salinidad en suelos
- ✓ Salinidad en aguas de riego
- ✓ Especies agrícolas adaptadas a zonas áridas
- ✓ Especies agrícolas tolerantes a salinidad
- ✓ Requerimientos edáficos y climáticos de las especies evaluadas
- ✓ Factores limitantes para el desarrollo de los cultivos evaluados

Utilizando la información recopilada a lo largo de los primeros meses de desarrollo del objetivo 4 del proyecto, se confeccionó un listado preliminar de especies candidatas para ser cultivadas en la localidad de Diego de Almagro, ubicada en la Provincia de Chañaral, Región de Atacama (**Tabla 39**). Como referencia en lo que a condiciones climáticas se refiere se utilizaron datos entregados por CODELCO provenientes de dos estaciones meteorológicas ubicadas en la localidad (PAS y PAN), mientras se esperaban los resultados de la zonificación agroclimática, que aportaría los datos que se fueron utilizados de forma definitiva en la construcción del listado de especies final, los cuales fueron obtenidos el mes de junio, con el término de la actividad 4.4 “Clasificación agroclimática”.

Una vez definido el primer listado de especies candidatas, se procedió al proceso de afinamiento de este, que consistió en el descarte de las especies que no se adecuaran a las características particulares del sector en estudio. Para esto se utilizó la información recopilada durante el primer período de desarrollo del estudio, referente a los requerimientos edáficos y climáticos de las especies señaladas en el listado, y los factores limitantes para su cultivo.

Esta información fue cotejada con las características del sector estudiado, de manera de poder determinar las especies con potencial de ser cultivadas en un sector con alto número de limitantes como lo es el sector de Diego de Almagro, tanto a nivel climático como de suelo, pero sobre todo, del agua de riego.

Los parámetros considerados para el proceso de afinamiento correspondieron a (i) las características del agua de riego, (ii) las variables climáticas y (iii) las características del suelo.

**Tabla 39.** Listado preliminar de especies candidatas para ser cultivadas en la localidad de Diego de Almagro.

<b>Especie Nombre común (nombre específico)</b>	<b>Usos</b>
Tuna ( <i>Opuntia Ficus-indica</i> [L] Mill)	Alimentación humana Forraje Industria Bioenergía
Granado ( <i>Punica granatum</i> L.)	Alimentación humana
Higuera ( <i>Ficus carica</i> L.)	Alimentación humana
Palma datilera ( <i>Phoenix dactylifera</i> L.)	Alimentación humana
Pitahaya/Pitaya: - Pitahaya ( <i>Hylocereus</i> spp; <i>Selenicereus</i> spp) - Pitaya ( <i>Stenocereus</i> spp; <i>Cereus</i> spp)	Alimentación humana
Tamarillo ( <i>Cyphomandra betaceae</i> [Cav.] Sendt.)	Alimentación humana
Tomate ( <i>Solanum Lycopersicum</i> L.) “Poncho negro”	Alimentación humana
Alfalfa ( <i>Medicago Sativa</i> L.) “Alta Sierra”	Forraje
Maíz ( <i>Zea Mays</i> L. tipo amylacea) “Lluteño”	Alimentación humana Forraje Bioenergía
Espárrago ( <i>Asparagus officinalis</i> L.)	Alimentación humana
Ajo ( <i>Allium sativum</i> L.)	Alimentación humana
Cebolla ( <i>Allium cepa</i> L.)	Alimentación humana
Quinoa ( <i>Chenopodium quinoa</i> Willd.)	Alimentación humana
Ricino ( <i>Ricinus communis</i> L.)	Industria
Jatropha ( <i>Jatropha curcas</i> L.)	Industria Bioenergía
Jojoba ( <i>Simmondsia chinensis</i> )	Industria
Chia ( <i>Salvia hispanica</i> L.)	Alimentación humana Industria
Salicornia ( <i>Salicornia bigelovii</i> )	Alimentación humana Industria Forraje
Cebada ( <i>Hordeum vulgare</i> L.)	Alimentación humana
Caña común ( <i>Arundo donax</i> L.)	Bioenergía

### 3.1 Agua de riego

El primer criterio utilizado para afinar el listado de especies presentado en la **Tabla 40** fue la calidad del agua de riego.

De acuerdo a lo acordado con el Comité Técnico del proyecto en una reunión el día 11 de abril de 2012 en Diego de Almagro, se definieron dos escenarios metas-objetivo de calidad de aguas a obtener por medio del tratamiento de las aguas claras del Tranque de relaves Pampa Austral: (i) Obtención de aguas de acuerdo al DS-90 y (ii) obtención de la misma calidad de las aguas utilizadas por CODELCO-Salvador antes de ingresar al procesamiento de minerales.

En la **Tabla 40** se observa la concentración de los diferentes elementos contenidos en las aguas claras del Tranque de relaves Pampa Austral, en el río Salado y en las aguas que ingresan a la Planta de flotación, así como también los niveles máximos permitidos según lo establecido por la NCh 1333 y el DS-90. Se encuentran destacados aquellos elementos que se encuentran por sobre lo permitido, y cuya concentración se vería disminuida con los tratamientos a evaluar en el Objetivo 2.

**Tabla 40.** Contenido de diferentes elementos en las aguas claras del Tranque de relaves Pampa Austral, en el río Salado, en las aguas que ingresan a la Planta de flotación, y la máxima concentración permitida de acuerdo a Nch 1333 y DS-90.

Parameter	D.L.**	Unit	Tellinga' clear water at canal discharge point			Salado River *		N***	Industrial water to Flotation Plant	NCh 1333 Irrigation water	DS 90 Maximum values
			Mean	SD	N****	Mean	SD				
Acetiles y grasas	10	mg/L	< 10	0	4	< 10	0,00	4	-	20	
Alcalinidad total (CaCO3)	0,2	mg/L	65,0	14,58	4	73,5	9,98	4	-	-	
Al total	0,05	mg/L	0,060	0,04	4	0,041	0,03	4	117	-	
As total	0,001	mg/L	0,234	0,05	4	0,023	0,03	4	0,14	0,1	
Bario total (Ba)	0,1	mg/L	0,190	0,14	4	0,170	0,17	4	-	4	
Berilio total (Be)	0,01	mg/L	< 0,01	0,00	4	0,023	0,02	4	< 0,1	0,1	
Boro total (B)	0,01	mg/L	8,7	1,12	4	42,3	20,60	4	7,76	0,75	
Cd total	0,01	mg/L	0,001	0,00	4	0,171	0,28	4	-	0,01	
Ca total	0,01	mg/L	849,5	288,74	4	326,3	333,00	4	163,95	-	
Cianuro total (CN-)	0,05	mg/L	0,149	0,25	4	< 0,05	0,00	4	-	0,2	
Zn total	0,01	mg/L	0,049	0,01	4	0,080	0,06	4	-	2	
Cloruros (Cl-)	5	mg/L	2879	350,42	4	45670	2067,16	4	990	200	
Co total	0,05	mg/L	< 0,05	0,00	4	< 0,05	0,00	4	-	0,05	
Cu total	0,01	mg/L	0,075	0,03	4	0,230	0,18	4	0,02	0,2	
Conductividad a 25° C	1	umhos/cm	11795	816,44	4	104625	3748,22	4	< 1500****	-	
Cromo total	0,05	mg/L	< 0,05	0,00	4	0,055	0,03	4	4110	0,1	
Hidrocarburos fijos	10	mg/L	< 10	0,00	4	< 10	0,00	4	-	-	
Fe total	0,01	mg/L	0,050	0,04	4	0,5	0,60	4	0,67	5	
Fe disuelto	0,01	mg/L	29,7	15,84	4	774	162,41	4	< 0,01	-	
Mg total	0,01	mg/L	0,253	0,12	4	0,040	0,07	4	43,8	-	
Mn total	0,001	mg/L	< 0,001	0,00	4	< 0,001	0,00	4	< 0,01	0,2	
Hg total	0,001	mg/L	1,0	0,78	4	0,067	0,09	4	0,001	0,001	
Ni total	0,05	mg/L	< 0,05	0,00	4	< 0,05	0,00	4	< 0,1	0,01	
pH a 25° C	0,1		8,3	0,17	4	7,6	0,12	4	7,98	5,5 - 9,0	
Pb total	0,05	mg/L	< 0,05	0,00	4	0,220	0,31	4	-	5	
Na total	0,01	mg/L	1679	187,99	4	26895	1776,22	4	732	-	
Sólidos disueltos	5	mg/L	8946	900,32	4	61463	36922,95	4	2410	-	
Sólidos sedimentables	0,5	mL/L	< 0,5	0,00	4	0,375	0,14	4	-	-	
Sólidos suspendidos totales	5	mg/L	8,6	4,58	4	47,6	44,78	4	11	80	
Sulfatos	10	mg/L	2883	304,91	4	2933	446,48	4	1904	250	
Sufuro total	0,2	mg/L	< 0,2	0,00	4	< 0,2	0,00	4	-	1	
Vanadio total	0,1	mg/L	< 0,1	0,00	4	< 0,1	0,00	4	-	-	

\* 'Natural' waters derived from an artificial drain built at the Federnales salty lake in the 1930's

\*\* D.L., detection limit

\*\*\* N corresponds to a 4 sampling dates during 2 years (2010 y 2011)

\*\*\*\* Maximum conductivity limit for irrigation water which might have negative effects on sensitive crops.

NCh 1333, Chilean regulation for water qualities intended for different uses (here is only considered 'irrigation water')

DS 90, Emission standards to continental and marine waters for pollutants associated to industrial liquid waters

Como puede observarse en la **Tabla 40**, los dos escenarios propuestos contemplan la obtención de aguas con una calidad inferior a lo establecido por la norma chilena de riego NCh1333, motivo por el cual, del listado inicial de especies candidatas, fueron descartadas todas las especies de consumo humano, directo e indirecto, que habían sido consideradas en una primera instancia. Esto incluyó todas las especies frutales, hortalizas, leguminosas, gramíneas, oleaginosas y

forrajeras, dejando como alternativas viables únicamente aquellos cultivos de uso industrial y bioenergético. Las especies seleccionadas luego de este primer filtro se presentan en la **Tabla 41**.

**Tabla 8.** Especies de uso industrial, pre-candidatas para ser establecidas en la localidad de Diego de Almagro.

<b>Especie</b> <b>Nombre común (nombre específico)</b>	<b>Usos</b>
Tuna ( <i>Opuntia Ficus-indica</i> [L] Mill)	Bioenergía
Maíz “Lluteño” ( <i>Zea Mays</i> L. tipo amylacea)	Bioenergía
Ricino ( <i>Ricinus communis</i> L.)	Industria
Jatropha ( <i>Jatropha curcas</i> L.)	Industria Bioenergía
Jojoba ( <i>Simmondsia chinensis</i> )	Industria
Chia ( <i>Salvia hispanica</i> L.)	Industria
Salicornia ( <i>Salicornia bigelovii</i> )	Industria
Caña común ( <i>Arundo donax</i> L.)	Bioenergía

### **3.2 Clima**

Posteriormente, este listado fue afinado de acuerdo a la información entregada por la cartografía obtenida en el proceso de zonificación climática, desarrollado durante los primeros seis meses de desarrollo de este estudio, y a los requerimientos climáticos de cada especie.

Como se ha detallado en el punto 1 del objetivo específico 4, el proceso de zonificación climática concluyó con el desarrollo de una cartografía de la localidad estudiada que identifica ocho sectores con distintas características climáticas (**Figura 32**).

Con esta clasificación fue posible determinar con mayor precisión las especies que tenían posibilidad real de adaptarse a las condiciones climáticas de la localidad y, en mayor detalle, a cuáles de los ocho sectores definidos, cuyas características climáticas en detalle se pueden observar en la tabla 4.

### 3.3 Suelo

Por último, una vez obtenidos los resultados de los análisis de suelos realizados en el sector de la plantación de jojoba del Sr. Miguel Soto y sectores aledaños, fue posible descartar del listado de especies candidatas aquellas que presentarían limitaciones con la calidad del suelo como pH, tolerancia a Boro, tolerancia a salinidad, etc.

Los análisis de suelo fueron realizados a tres muestras compuestas de suelos provenientes de distintos sectores:

- ✓ **Suelo virgen:** Suelo que no había sido cultivado ni regado anteriormente.
- ✓ **Suelo de la sobrehilera:** Suelo de la sobrehilera de la plantación de jojoba perteneciente al Sr. Miguel Soto, regado desde el año 2006 con aguas claras del Tranque de relaves Pampa Austral.
- ✓ **Suelo de la entrehilera:** Suelo de la entrehilera de la plantación de jojoba perteneciente al Sr. Miguel Soto, regado desde el año 2006 con aguas claras del Tranque de relaves Pampa Austral.

En la **Tabla 42** se presentan algunos de los resultados más relevantes al momento de filtrar el listado de especies candidatas. Los resultados completos de estos análisis, realizados por el Laboratorio de suelos y plantas del Centro de investigación minera y metalúrgica (CIMM), se presentan en el **Anexo 10**.

**Tabla 42.** Resultados de los análisis de muestras de suelo tomadas en la localidad de Diego de Almagro. **SH:** Suelo de la sobrehilera, plantación de jojoba. **EH:** Suelo de la entrehilera, plantación de jojoba. **V:** Suelo virgen (suelo que no ha sido cultivado ni regado con anterioridad).

	pH	CE (dS/m)	Sulfato (mg/L)	Cloruro (mg/L)	Na (mg/L)	B (mg/L)	CIC (meq/100)	RAS
<b>SH</b>	7,49-7,86	15,75	2160	4211,9	2648	16,4	7,6	22,1
<b>EH</b>	8,04-8,14	99,30	2114	19826	26940	28,5	10,4	107,7
<b>V</b>	8,39-8,07	5,37	1763	630	720	2,2	6,6	8,5

Para evaluar la viabilidad de las diferentes especies candidatas se consideraron los valores del “suelo virgen” como criterio de filtro, pues las otras muestras presentan un evidente efecto de la acumulación de sales y otros elementos encontrados en altas concentraciones en el agua de riego utilizada actualmente.

### **3.4 Especies candidatas**

A partir del listado de especies de uso industrial preseleccionadas y en base a las características tanto de los cultivos como de la localidad, estas fueron clasificadas en tres grupos, de acuerdo a su capacidad potencial de adaptación a la localidad estudiada: **(1)** Especies seleccionadas para ser cultivadas en la localidad de Diego de Almagro, cuyos requisitos del cultivo coinciden con las características de la localidad, **(2)** especies cuyo potencial merece ser estudiado mediante ensayos en la localidad, y **(3)** especies que han quedado excluidas debido a que las características de la localidad no se ajustan a los requerimientos para su cultivo.

A continuación se detallan las características de cada uno de estos cultivos, que los han llevado a ser parte o no de esta selección y, en determinados casos, ciertas restricciones y recomendaciones para que el cultivo pueda ser una alternativa viable en esta localidad.

### **3.5 Especies seleccionadas**

#### **I. *Zea mays* tipo *amylacea* (Maíz lluteño):**

Este maíz es cultivado en el valle de Lluta, región de Arica y Parinacota, en condiciones de alta salinidad y exceso de B tanto en suelos como en el agua de riego. Este valle se caracteriza por poseer altos contenidos de salinidad, tanto en el suelo como en el agua de riego, limitando el desarrollo de cultivos comerciales. Cuenta con condiciones particulares de suelos muy delgados y exceso de sales en el agua, especialmente sodio, cloruros y sulfatos, además de altos contenidos de Boro. Esta situación se presenta también en la localidad de Diego de Almagro. La conductividad eléctrica del agua del valle de Lluta alcanza niveles muy altos, que en muchos casos no es apta para el riego a menos que se utilice en cultivos muy tolerantes a la salinidad: El contenido de  $\text{Cl}^-$  en el agua de riego excede a la Norma Chilena (Nch) 1333-1978, ya que tiene 593,8 ppm. El contenido de B también se encuentra por sobre la norma, ya que el límite es 0,75 ppm de B. En relación al contenido de  $\text{Na}^+$ , este no es muy alto si se compara con el contenido de  $\text{Cl}^-$ , por lo tanto, es agua que sólo podría usarse para regadío en cultivos altamente tolerantes a la salinidad. Debido a los altos niveles de  $\text{Ca}^{2+}$  en el suelo del valle de Lluta, y también en el agua de riego, se agrava la situación de salinidad y exceso de B en este valle.

Por otra parte, estudios de producción de biomasa con fines energéticos desarrollados en el valle de Lluta han arrojado buenos resultados con este maíz, permitiendo la producción de bioetanol a partir de la biomasa de desecho obtenido de la “chala”, luego de la cosecha.

En virtud de todo lo anteriormente señalado, dada la similitud de condiciones edafoclimáticas y de aguas de riego entre el valle de Lluta y la localidad de Diego de Almagro, se propone el “Maíz lluteño” como un cultivo con condiciones para ser cultivado en la localidad estudiada, con el objetivo de producción de biomasa.

#### **II. *Simmondsia chinensis* (Jojoba):**

Esta especie no tolera heladas prolongadas, por lo tanto, dadas las condiciones climáticas de la localidad, se recomienda su establecimiento en los sectores determinados por la clasificación

climática en los cuales las heladas serían menos severas. Estos sectores y sus temperaturas mínimas absolutas esperadas son: Sector 4 (-1 °C), sector 5 (-1,5 °C) y sector 6 (-1,7 °C). La cartografía de la zonificación agroclimática y los diferentes sectores pueden observarse en la Figura 32.

Al no existir un sistema de drenaje ni la posibilidad de lavar los suelos, el riego prolongado con agua con altas concentraciones de sales genera una acumulación de estas en el suelo. Esto significa que las condiciones pueden ser apropiadas y tolerables para el cultivo de jojoba en los primeros años a partir del establecimiento del cultivo, pero las sales se irán acumulando hasta alcanzar niveles mayores a los tolerados por las plantas, generando en última instancia su muerte y, además, dejando ese suelo inutilizable para el cultivo de otra especie al cabo de algunos años de riego permanente. Por este motivo, sería necesario desarrollar una estrategia para evitar la acumulación de sales en el suelo.

Existen clones seleccionados de jojoba con una mayor resistencia a las heladas, como también los hay con mayor tolerancia a la salinidad. Dadas las condiciones de la localidad estudiada, se hace indispensable escoger un clon que posea ambas características para ser cultivado en el sector.

### **3.6 Especies cuyo potencial merece ser estudiado mediante ensayos**

Las especies *Arundo donax* (caña común) y *Salicornia bigelovii* (salicornia) han sido excluidas de este listado debido a la insuficiente información con la que se cuenta acerca de su cultivo. En el caso de estas dos especies, se sugiere no descartarlas como posibles cultivos a establecer en el sector estudiado, a la espera de que nueva información, que está siendo generada por investigaciones en curso, permita definir su viabilidad en esta zona.

A continuación se presenta una evaluación de cada una de estas especies en función de las características de su cultivo que podrían sugerir su adaptación a la localidad de Diego de Almagro.

#### **I. *Arundo donax* (Caña común):**

A pesar de que esta especie se prospecta como un cultivo con potencial adaptación a la localidad estudiada, no ha sido incluida en el listado de especies candidatas debido a que aún no han sido descritos los requerimientos del cultivo, tanto de temperatura como de suelo, es decir, la información con la que se cuenta es insuficiente para sugerir su cultivo. Sin embargo, se trata de una especie con una alta adaptación y capacidad de desarrollarse en condiciones adversas, motivo por el cual debiera evaluarse a futuro su potencial para ser cultivada como una especie productora de biomasa con fines energéticos en la localidad de Diego de Almagro.

Como referencia, la bibliografía consultada señala que esta especie puede encontrarse desde los lugares bajos del Himalaya, Kashmir y Nepal hasta lugares de clima templado donde presenta una buena expresión, lo cual permite presumir que esta especie podría adaptarse a las condiciones climáticas de la localidad de estudio.

Esta especie se desarrolla bien en diferentes condiciones climáticas, las que incluyen zonas con bajas temperaturas y escasas precipitaciones hasta zonas húmedas tropicales. Se ha encontrado incluso en lugares como dunas de sectores costeros, revelando su tolerancia a la salinidad.

Crece bien en distintos tipos de suelos, incluso en aquellos de mal drenaje, requiere de alta iluminación, y tiene una buena tolerancia a sales, aunque esto último recién ha comenzado a definirse.

Investigaciones en curso llevadas a cabo por la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile buscan determinar las características de este cultivo. La información resultante de estas investigaciones debiera aportar a esclarecer los requerimientos de este cultivo y evaluar su potencial adaptación a nuevos sitios.

Por todos los motivos anteriormente señalados, se sugiere evaluar esta especie como una posibilidad para ser cultivada en la localidad de Diego de Almagro.

## **II. *Salicornia bigelovii* (Salicornia):**

La salicornia es una especie anual suculenta con metabolismo C3 que se puede encontrar en estuarios costeros y se encuentra sin duda entre las plantas vasculares con mayor tolerancia a sales. Experiencias de riego con agua de mar han arrojado una buena respuesta, lo que permite asumir que en este caso la salinidad de suelos y agua de riego no sería una limitante para el cultivo.

La ocurrencia de heladas en la localidad estudiada, por otra parte, no debiera significar problemas para el buen desenvolvimiento de esta especie, debido a que este cultivo anual se siembra finales de invierno, cuando la probabilidad de heladas es mínima, y se cosecha durante el otoño, antes de la ocurrencia de las primeras heladas. Por otra parte, la bibliografía consultada señala que esta especie se ha desarrollado sin dificultades en localidades con temperaturas similares a las encontradas en la localidad de Diego de Almagro.

No obstante lo anterior, la información es escasa y la literatura consultada no ha aportado en forma precisa los requerimientos del cultivo tales como temperaturas óptimas para su germinación y crecimiento, temperaturas máximas y mínimas toleradas, y requerimientos edáficos. Es por esto que, con la información de la que actualmente se dispone en relación a este cultivo, no es posible determinar con certeza que las condiciones de la localidad de Diego de Almagro permitirían el óptimo desarrollo del cultivo, pese a que existen experiencias con el cultivo de esta especie en localidades con características similares que podrían sugerir su potencial adaptación a esta zona.

Por este motivo, pese a que se trata de una especie que se adecúa a zonas desérticas y riegos salinos, no es posible, a la fecha, definir si las condiciones de la localidad estudiada serían beneficiosas para su crecimiento y producción.

Actualmente se encuentran en desarrollo estudios llevados a cabo por la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile en asociación con la Universidad de California que

permitirán contar con mayores antecedentes en lo referente a su cultivo. Con esta información se podrá tener una mayor claridad acerca de la adaptación de la salicornia a la localidad de Diego de Almagro.

Debido a lo anterior, la especie no ha sido incluida en el listado de especies candidatas, aunque se sugiere mantenerla como una posibilidad hasta que la información respecto a sus requerimientos edáficos y climáticos haya salido a la luz.

### **3.7 Especies excluidas**

Del listado de especies preseleccionadas (**Tabla 39**), luego de haber sido filtrado de acuerdo a lo detallado previamente, fueron descartadas las especies *Jatropha curcas* (Jatropha), *Ricinus communis* (Higuerilla), *Opuntia ficus-indica* (Tuna) y *Salvia hispanica* (Chia), debido a que las condiciones edáficas y climáticas de la localidad de Diego de Almagro no se adecúan a los requerimientos para su cultivo.

Las características de estos cultivos, que los han llevado a quedar fuera del listado de especies candidatas, son detalladas a continuación.

#### **I. *Jatropha curcas* (Jatropha):**

En lo que al suelo respecta, la revisión bibliográfica realizada indica que su rango de pH óptimo en suelos es de 5,5 a 7,5, viéndose limitado su crecimiento con valores de pH mayores a 8,5. Esto sitúa el suelo de la localidad estudiada, en el cual los valores arrojados por el análisis de suelo fluctúan entre 7,49 y 8,39, justo en el límite de pH tolerado por esta especie.

Pese a su conocida adaptación a diferentes condiciones ambientales, esta especie tiene una muy baja tolerancia a las heladas por lo que, en las condiciones climáticas de la zona de estudio, tendría severas restricciones.

Dada la ocurrencia de heladas en la localidad estudiada, con temperaturas de hasta -3.3 °C según la caracterización agroclimática realizada durante los primeros meses de este estudio, y las condiciones de pH alcalino observadas en las muestras de suelo tomadas en el sector, esta especie ha sido excluida del listado de especies potencialmente cultivables en la localidad de Diego de Almagro.

No obstante lo anterior, la clasificación climática ha determinado que los sectores 4, 5 y 6 (**Figura 32**) presentan condiciones menos restrictivas respecto a las heladas, estableciéndose que la temperatura mínima absoluta alcanzaría valores de -1,1 °C, -1,5 °C y -1,7 °C, respectivamente. En base a la bibliografía consultada, siendo la *Jatropha* una especie que se caracteriza por tener una alta capacidad de adaptación a condiciones adversas, esto podría permitir la posibilidad de desarrollar clones con una mayor tolerancia a las bajas temperaturas, que pudieran desarrollarse en el sector estudiado.

## **II. *Opuntia ficus-indica* (Tuna):**

Esta especie tiene una tolerancia media-baja a salinidad en los suelos. Considerando que los valores de conductividad eléctrica (CE) encontrados en el suelo de la localidad estudiadas son mayores a 5 dS/m en suelos vírgenes (es decir, que no han sido previamente cultivados y/o regados), la tuna ha sido eliminada del listado de especies candidatas.

## **III. *Ricinus communis* (Higuerilla o Ricino):**

En lo referente a los requerimientos edáficos del cultivo, la bibliografía revisada señala que el pH óptimo para el desarrollo de esta especie debe encontrarse entre 6 y 7, no tolerando suelos alcalinos. Al respecto, los análisis de suelo realizados en el transcurso de este estudio han arrojado valores de pH que fluctúan entre 7,49 y 8,39, valores que escapan al rango recomendado y se inscriben en el rango de intolerancia del cultivo, motivo por el cual esta especie ha sido descartada como candidata a ser cultivada en la localidad de Diego de Almagro.

Por otra parte, la literatura consultada indica que esta especie no tolera heladas. Considerando que en todos los sectores definidos por la clasificación climática existe probabilidad de heladas que alcanzan valores iguales o inferiores a  $-1,1^{\circ}\text{C}$ , se descarta la posibilidad de que esta especie pueda desarrollarse en la localidad estudiada.

## **IV. *Salvia hispanica* (Chia):**

A pesar de que sobre el cultivo de esta especie aún existe escasa información, se ha investigado que esta planta anual de primavera verano no tolera heladas en ninguna etapa de su desarrollo. Debido a que la clasificación climática ha determinado que no existen sectores en la localidad estudiada que estén libres de heladas, esta especie ha sido descartada del listado de especies candidatas a ser establecidas en la localidad de Diego de Almagro.

## **3.8 Conclusiones**

En base a esta información, y según lo señalado anteriormente, se ha concluido que las especies *Zea mays* tipo amylacea (Maíz Lluteño) y *Simmondsia chinensis* (Jojoba) son las únicas especies evaluadas que cumplen con los requisitos de para ser cultivadas en la localidad de Diego de Almagro.

Dada la insuficiente información con la que se cuenta hasta el momento, se concluye que las especies *Arundo donax* (Caña común) y *Salicornia bigelovii* (Salicornia) tienen un potencial que merece ser estudiado mediante ensayos en la localidad. Respecto a estas dos últimas especies, investigaciones que actualmente están siendo llevadas a cabo tanto por la Universidad de Atacama como por la Universidad de Chile en asociación con la Universidad de California aportarán en un futuro antecedentes de estos cultivos, que permitirán determinar con mayor certeza su viabilidad en la localidad de Diego de Almagro.

Finalmente, se debe tener en consideración que es posible establecer cultivos forestales, no incluidos en este listado, pero que no deben descartarse como una posibilidad productiva,

como madera para combustible o materiales de construcción, además de una alternativa como generación de áreas verdes.

## **4. ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DE LAS ESPECIES SELECCIONADAS**

### **4.1 Introducción**

Las poblaciones agrícolas que habitan frágiles ecosistemas en zonas áridas y semiáridas de nuestro país, se encuentran en una situación socioeconómica de autosubsistencia. La diversificación agrícola por medio del cultivo de especies tolerantes a la salinidad como es el caso del maíz Lluteño y de la Jojoba, también resistente a la sequía, permitiría la productividad de suelos marginales y su incorporación a la actividad económica de la zona.

Dado que el maíz Lluteño posee un potencial para la generación de biocombustibles y del cultivo de la Jojoba es posible obtener una semilla que es materia prima para la elaboración de aceite altamente demandado por la industria cosmética, pequeños y medianos agricultores contarían con una alternativa productiva sustentable, capaz de mitigar el avance de la desertificación, mediante la utilización de aguas residuales de la industria minera.

### **4.2 Metodología**

Con el objetivo de evaluar la rentabilidad económica de los cultivos seleccionados en el capítulo anterior para ser cultivados en la localidad de Diego de Almagro, se procedió de acuerdo a la metodología detallada a continuación.

En una primera etapa se llevó a cabo una búsqueda, recopilación y análisis de información de los cultivos candidatos (Jojoba y maíz Lluteño) en cuanto a sus características generales, fisiológicas, manejo de cultivo y antecedentes de mercado en base a su objetivo productivo.

Las fuentes de información para esta búsqueda fueron revistas científicas, publicaciones chilenas y extranjeras, simposios, boletines de carácter técnico, comunicación con productores de Jojoba y comercializadores de sus productos, datos obtenidos desde la División de Estadísticas de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAOSTAT), Base de datos privada del Sistema de Estadísticas Chilenas de Thomson Reuters, Ministerio de Energía, entre otros.

Para los cultivos se elaboraron flujos de proyectos puros, que no contemplan financiamiento externo, con un horizonte productivo a diez años capaces de reflejar los requerimientos de insumos, recursos humanos y maquinaria en cada etapa de su manejo en el campo. Para el caso del cultivo de la Jojoba, este plazo de producción fue considerado en base a que las

condiciones de salinidad del suelo y del agua de riego son capaces de reducir tanto los rendimientos esperados como la vida productiva de la plantación. Respecto del cultivo de Maíz Lluteño, inicialmente se elaboró un estado de resultado de los costos e ingresos asociados a su cultivo para luego formular el flujo de caja, en cuyo período de producción se ha considerado la rotación de su cultivo en los terrenos para evitar disminuciones de rendimiento a causa de la salinidad del agua de riego y además su vida útil desde un punto de vista comercial en caso de surgir en el tiempo otra alternativa más rentable.

Análisis del flujo de caja mediante los siguientes indicadores financieros:

- ✓ VAN: Valor actual neto, es el valor actual que poseen todos los ingresos y egresos actuales y futuros que genera un proyecto de inversión. En el análisis se considera que la mejor alternativa para el capital es un interés del 12% anual, denominada tasa de descuento.
- ✓ TIR: Tasa Interna de Retorno, corresponde a la rentabilidad generada por la inversión.
- ✓ PRC: Período de Recuperación del Capital (Pay Back), corresponde al número de períodos necesarios para que los fondos generados permitan cancelar totalmente la inversión y los costos anuales realizados hasta ese periodo.
- ✓ Análisis de Sensibilidad: De acuerdo a los supuestos críticos, permitiendo simular escenarios posibles en la realidad presente y futura, estos fueron agrupados en insumos, energía, mano de obra, valor del dólar y valor de venta respecto del valor referencial utilizado en cada flujo.

#### **4.3 Antecedentes del cultivo de Jojoba (*Simmondsia chinensis* L. Schneider)**

La Jojoba es una especie perenne, nativa del desierto de Sonora en México y Estados Unidos. Se caracteriza por ser resistente a la sequía, salinidad y las altas temperaturas de zonas áridas y semiáridas. Permite mitigar el avance de la desertificación, aumentar la rentabilidad del agua, diversificar la producción agrícola de zonas marginales y, según Acevedo (1983) es capaz de tener un balance de carbono positivo aun en condiciones de severa sequía.

Hace algunos años se le estudiaba por ser un sustituto del aceite de ballena, especie protegida desde 1972. Sin embargo, hoy en día su atractivo radica en la cera líquida que es posible extraer desde su semilla, la que no contiene ácidos grasos como otros aceites vegetales. De acuerdo a la estructura química, el aceite de jojoba no es realmente un aceite sino una mezcla única de esteres de cera líquida (Aguilera, 1983), altamente estable, inodora, resistente a la rancidez y a la oxidación (Masson, 1983), posee muy pocas impurezas sin la necesidad de refinar.

Masson (1983) señala que la cera de jojoba es única entre las materias grasas de origen vegetal, cuyas propiedades la hacen muy atractiva y de uso industrial versátil, de amplia aplicación como por ejemplo en la cosmética, farmacológica, lubricantes y aditivos, procesamiento de cueros y prolongar la postcosecha de frutas, entre otras. Presenta precios

altamente competitivos y una creciente demanda en mercados nacionales e internacionales, situación que de acuerdo a Paneque *et al.* (2011) actualmente limita la utilización de este aceite para la producción de biodiesel.

De acuerdo a Botti *et al.* (1997a), si la semilla es cosechada y almacenada verde puede ser perjudicial para la calidad y producción final del aceite, ya que oscurece el color e interfiere con la filtración. Es por esto que al ser su fruto una cápsula dehiscente, que se abre en la madurez, se debe esperar a que el fruto maduro adquiera un color café oscuro y libere la semilla al suelo desde donde ésta debe ser cosechada, con una humedad promedio de 10 a 15%. De esta forma se obtiene la ventaja de poder usar la cáscara de su semilla como mejorador de la fertilidad del suelo tras procesos de descomposición.

Para aumentar la eficiencia de cosecha y disminuir los costos de mano de obra es factible realizar una cosecha mecanizada, mediante una máquina cosechadora que aspire la semilla desde el suelo en conjunto a agentes externos, los que deben ser eliminados para comenzar el proceso de elaboración del aceite. Para procesar la semilla se requiere un nivel de 3-4% de humedad (Miller *et al.*, 1979; Wisniak, 1987, citados por Botti *et al.*, 1997a) para lo que se debe recurrir a máquinas secadoras con flujos de aire caliente (Botti *et al.*, 1997a). Ya que las semillas no maduran al mismo tiempo, es necesario realizar la cosecha más de una vez durante el periodo de madurez de los frutos (National Research Council, 1985). En la literatura se menciona ampliamente la alta durabilidad de la semilla sin alterar la calidad del aceite a extraer, lo que según Botti *et al.* (2001) facilita su comercialización y permite al productor estar en mejor posición para negociar precios.

La calidad del aceite es muy variada ya que depende principalmente de la calidad de la semilla, una apropiada extracción y, por supuesto de, los métodos utilizados en el procesamiento (Whittaker, 1996, citado por Botti *et al.*, 1997a). La extracción del aceite se realiza principalmente por métodos mecánicos de presión o químicos, añadiendo solventes orgánicos en el proceso. Los rendimientos de extracción son variables, aunque en general se menciona un valor promedio de 50% de contenido de aceite respecto al peso de la semilla, Sánchez (1983) señala que por métodos mecánicos de extracción es posible obtener entre un 66 a 80% de rendimiento de aceite, en contraste al rendimiento señalado por (Torrealba, 1983) que fluctúa entre 40 y 42%, tales valores estarían sujetos a los equipos utilizados y a los pretratamientos a los que se ha sometido la semilla, con un remanente de 10% de aceite residual en la torta (Sánchez, 1983). Al utilizar solventes durante el proceso, este rendimiento aumenta puesto que permite obtener el aceite residual que permanece en la torta después del prensado, logrando obtener entre un 3 a 8% del aceite residual (Botti *et al.*, 1997a).

De acuerdo a Sánchez (1983) el aprovechamiento del afrecho de jojoba como sub-producto para ser usado como material alimenticio en animales es limitado, debido a la baja calidad de proteínas, baja palatabilidad y requerimiento de métodos para su detoxificación.

Debido a que las antiguas plantaciones provenían de semillas y por ser una planta dioica, es decir que las flores macho y hembras se encuentran en distintos pies, la alta variabilidad de producción y oferta de semilla, en conjunto al escaso conocimiento de cultivo que entonces se tenía condujo al fracaso de su cultivo en la década de los '70 en Chile y el mundo. Dada la importancia de la cera líquida de jojoba en la industria y los requerimientos mínimos para su desarrollo, sin ser afectado mayormente por la presencia de plagas y enfermedades, varios

países han implementado programas para su cultivo, domesticación e industrialización, entre ellos Israel, Estados Unidos, Australia, Sudán, Brasil y México, y Chile. Esto ha contribuido un mayor conocimiento en cuanto a su manejo productivo y orientado a las plantaciones comerciales de jojoba en base a la selección de clones de alta producción, entre sus ventajas se puede considerar; posibilidad de distinguir plantas macho y hembra, mayor rendimiento de semilla, mayor fructificación, y mayor resistencia a sequía y salinidad, y por tanto menor variabilidad de oferta de semilla, entre otros.

Entre las características en la selección de clones se encuentran por ejemplo, plantas femeninas una alta producción, hábito erecto, semilla fácilmente dehiscente, mayor resistencia a heladas, genotipos masculinos de gran producción de polen y adaptación a condiciones de salinidad, entre otras (Botti *et al.*, 1997b; Botti *et al.*, 1998; Botti *et al.*, 2000 y Botti *et al.*, 2001).

El estudio realizado por Botti *et al.*, (1998) permitió la selección de clones de jojoba altamente productivos y tolerantes a condiciones de elevada salinidad en agua de riego y suelo, con una producción esperada mayor a 2,5 kg de semilla/planta a la madurez. De acuerdo a Botti *et al.* (2001) se recomienda plantar mínimo 3 clones distintos para que la plantación sea más adaptable a variaciones de los factores bióticos y abióticos.

Otra ventaja de las plantaciones en base a la selección de clones es una rápida recuperación de la inversión inicial con distintas densidades de plantación (Botti *et al.*, 2001). Se obtiene la ventaja de empezar a producir semillas desde el segundo año pero económicamente viable a partir del tercer año a diferentes densidades de plantación (Botti *et al.*, 1997b; Botti *et al.*, 2000; Botti *et al.*, 2001), en contraste a las plantaciones de semilla que comienzan a producir desde el sexto año y estabilización del rendimiento entre 2,5 a 4,5 Kg/planta al octavo y/o noveno año (Botti *et al.*, 2011).

## I. Antecedentes de mercado

De acuerdo al *International Jojoba Export Council*<sup>1</sup> actualmente la Jojoba es cultivada en Australia, Argentina, Chile, Perú, Egipto, Israel, México y Estados Unidos, también se han reportado plantaciones en Sudáfrica e India.

### I.1 Principales productores

Argentina no cuenta con información actualizada respecto de la superficie cultivada con Jojoba, el último dato publicado por el gobierno indica que a la temporada 2007-2008 existían 3.683 hectáreas<sup>2</sup>. En el año 2007, Estados Unidos contaba con 1.210 hectáreas distribuidas entre el estado de Arizona y California, con 698 y 512 hectáreas, respectivamente (USDA, 2009). Sin embargo se ha mencionado que Argentina cuenta con 7.000 há, Estados Unidos con 2.000 há, Israel con 700 há, Australia con 500 há y Perú con 300 há, otros productores de menor superficie serían México, Egipto e India<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> < [www.ijec.net](http://www.ijec.net) > Consultado el 15 de Octubre de 2012.

<sup>2</sup> Sistema Integrado de Información Agropecuaria, SIIA. República de la Argentina. Disponible en: <<http://www.sii.gov.ar/index.php/series-por-tema/agricultura>> Consultado el 23 de Octubre 2012.

<sup>3</sup> Portal Made in Argentina, Disponible en: <<http://www.made-inargentina.com/eng/food/oils/related%20topics/world%20production%20jojoba%20oil.htm>> Leído el 18 de Septiembre 2012.

## I.2 Exportación mundial del aceite de Jojoba

Las exportaciones de aceite de Jojoba han sufrido variaciones importantes en las últimas dos décadas. Durante los '90 en general se vieron incrementadas desde 622 toneladas en el año 1991 a 1.370 toneladas el año 2001. Conforme aumentó la oferta, el precio promedio del kilo neto de aceite fue disminuyendo hasta 1997 cuando comenzó a aumentar nuevamente, muy posiblemente por un incremento en la demanda generada por los nuevos usos que se han ido dando al aceite (DECOFRUT, 2003).

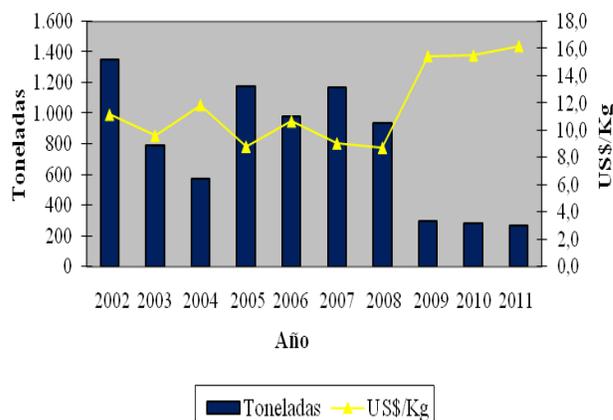
Sin embargo, desde el año 2001 en adelante, las exportaciones de aceite de jojoba han sufrido altibajos importantes, reflejo del nivel productivo mundial, lo que ha provocado cambios en el precio promedio del aceite. Entre el 2001 y 2007 los precios se mantuvieron relativamente estables pero con variaciones entre los 8,71 y 11,14 US\$/Kg. A partir del 2008 el precio aumentó fuertemente, ligado a la constricción de las exportaciones, alcanzando su mayor valor en el año 2010 con 16,17 US\$/Kg neto de aceite (Cuadro 1).

De acuerdo a DECOFRUT (2003) a pesar de que existen plantaciones en los dos hemisferios y por tanto es posible una oferta a lo largo del año, los volúmenes producidos son muy irregulares entre una temporada y otra, principalmente debido a la alta variabilidad productiva de la mayoría de las plantaciones, las que provienen de semilla y no de plantaciones clonales. Esto explicaría las fluctuaciones en los volúmenes exportados en el **Tabla 43** y explicaría, además, los cambios en la participación de los países en cuanto a la exportación de aceite hasta el año 2007.

**Tabla 43.** Exportación Mundial de aceite de Jojoba.

Año	Miles US\$	Ton	US\$/Kg
2001	15.050	1.351	11,14
2002	7.614	793	9,60
2003	6.804	574	11,85
2004	10.375	1.178	8,81
2005	10.495	985	10,65
2006	10.584	1.171	9,04
2007	8.155	936	8,71
2008	4.586	297	15,44
2009	4.333	280	15,48
2010	4.317	267	16,17

Fuente: FAOSTAT, 2012.



A partir de los datos obtenidos desde FAOSTAT (2012) fue posible conocer la dinámica de participación de los países productivos de Jojoba a través de los últimos años, los que se detallan a continuación.

Argentina dejó de abastecer los mercados mundiales desde el año 2002 y de acuerdo al *International Jojoba Export Council* entre los años 2009 y 2010 fuertes heladas afectaron sus cultivos lo que disminuyó fuertemente el nivel de sus cosechas.

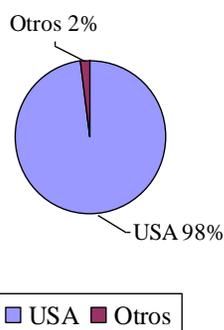
México entre los años 2001 y 2004 fue disminuyendo su participación notablemente, de acuerdo a Alcaraz *et al.* (2011). Esto puede deberse a la heterogeneidad productiva de plantaciones provenientes de semilla que hay en ese país, sumado a la baja conservación de la especie a causa de la expansión urbana, además del escaso desarrollo de las plantas por una baja pluviometría y por ser fuente de alimentación animal. Por estas razones la orientación de la investigación mexicana está enfocada en el cultivo e industrialización de la jojoba silvestre definiendo áreas con potencial para su cultivo en condiciones de secano.

El caso de Israel ha sido muy fluctuante, llegando a dominar el escenario entre el 2006 y 2007. Por otra parte, Alemania y los Países Bajos demostraron volúmenes crecientes hasta los años 2006 y 2005, respectivamente.

DECOFRUT (2003) pronosticó el reemplazo de las plantaciones de Jojoba en Estados Unidos por otros cultivos más rentables, dando mayor cabida a países como Perú y Chile con condiciones climáticas óptimas, disponibilidad de clones seleccionados y un menor costo de mano de obra. Sin embargo, Estados Unidos es el único país durante la pasada década que ha estado presente cada año con un nivel más bien estable, y desde el 2008 se convirtió en el principal y prácticamente el único exportador mundial de aceite de jojoba de acuerdo a los datos disponibles hasta el año 2010 de FAOSTAT (2012), presentados en la **Tabla 44**.

**Tabla 44.** Principales países exportadores de aceite de Jojoba, 2010.

País	Ton
USA	262
Otros	5
Total	267



Fuente: FAOSTAT, 2012.

### 1.3 Importación mundial del aceite de Jojoba

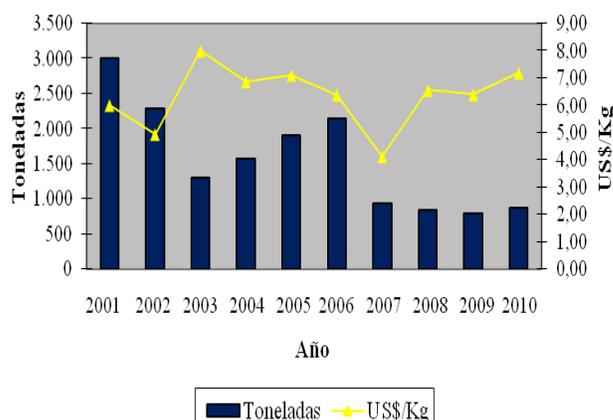
En cuanto a la importación mundial de aceite de Jojoba de acuerdo a datos de FAOSTAT (2012) entre los años 2000 a 2010, se ha comportado de forma segmentada (**Tabla 44**). En los primeros años los niveles disminuyeron desde 3.000 hasta 1.300 toneladas, luego aumentaron a 2.150 toneladas en el año 2006 sin recuperar el nivel de los años anteriores en

la década de los '90. A partir del año 2007 el nivel disminuyó y se ha mantenido entre 789 y 933 toneladas de aceite.

A pesar de las interesantes características del aceite de Jojoba para la industria cosmética, la crisis económica mundial que comenzó a fines del 2007 fue probablemente la causa de la reducción de las importaciones en el mundo en conjunto a la oferta variable de las plantaciones. Desde el año 2003 Alemania era el principal importador de aceite de Jojoba hasta el 2006, Francia también participaba aunque en menor medida. Luego, a partir del año 2007, estos países no figuran en los datos de FAOSTAT (2012) y Estados Unidos comenzó a ser el principal importador de aceite de Jojoba, con Algeria en el segundo lugar (**Tabla 45**).

**Tabla 44.** Importación Mundial de aceite de Jojoba.

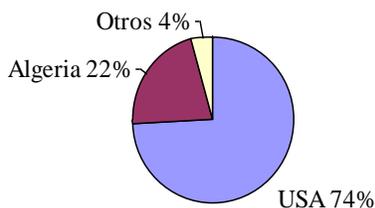
Año	Miles US\$	Ton	US\$/Kg
2001	18.030	3.009	5,99
2002	11.241	2.283	4,92
2003	10.458	1.309	7,99
2004	10.835	1.580	6,86
2005	13.499	1.902	7,10
2006	13.717	2.154	6,37
2007	3.839	933	4,11
2008	5.522	843	6,55
2009	5.034	789	6,38
2010	6.242	869	7,18



Fuente: FAOSTAT, 2012.

**Tabla 45.** Principales países importadores de aceite de Jojoba, 2010.

País	Ton
USA	643
Algeria	189
Otros	37
Total	869



Fuente: FAOSTAT, 2012.

#### I.4 Mercado Chileno

De acuerdo al ODEPA y CIREN (2011) la producción en Chile se concentra en las regiones de Atacama (120,1 hectáreas) y Coquimbo (78,3 hectáreas). En la tercera región la superficie cultivada se incrementó en un 422% respecto al 2005, siendo la comuna de Diego de Almagro el principal productor regional con una participación del 59,38% con 71,31 hectáreas al 2011.

#### I.5 Importaciones Nacionales

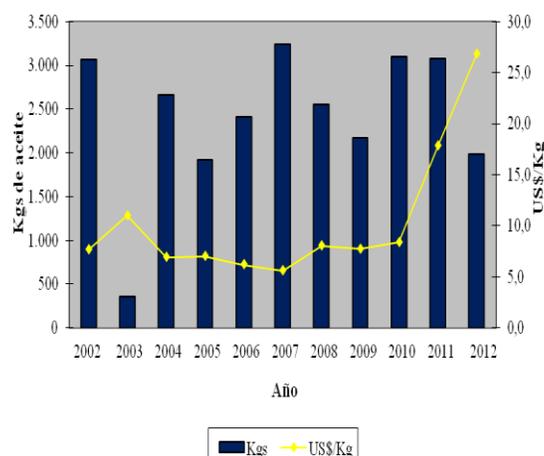
En la década de los '90 la producción nacional era muy pequeña y no daba abasto a la demanda, por lo que era necesario importar para suplir el consumo por aceite de Jojoba. Desde el año 2000 en adelante, la demanda por aceite de jojoba en nuestro país se ha acrecentado de manera importante y sostenida, por lo que ha sido necesario importar grandes volúmenes desde el extranjero (**Tabla 46**), principalmente desde Alemania, en los últimos años.

A pesar que hoy en día la disponibilidad de aceite de jojoba en nuestro país es mayor que hace diez años atrás, aún no es capaz de sustentar al mercado interno.

Los avances de los últimos años en cuanto a este cultivo han fomentado una creciente producción que hoy en día es comercializado tanto en el mercado interno como en el extranjero, exportando principalmente de acuerdo a datos obtenidos desde el Sistema de Exportaciones Chilenas (2012) hacia la Unión Europea (Alemania, Francia, España, Suiza y Holanda), Japón, Estados Unidos y Nueva Zelanda, entre otros países.

**Tabla 46.** Importaciones nacionales de aceite de Jojoba

Año	Kg	US\$ FOB	US\$/Kg
2002	3.060	23.555	7,7
2003	360	3.961	11,0
2004	2.664	18.527	7,0
2005	1.924	13.562	7,0
2006	2.407	15.006	6,2
2007	3.240	18.266	5,6
2008	2.550	20.596	8,1
2009	2.166	16.781	7,7
2010	3.093	25.992	8,4
2011	3.075	54.970	17,9
2012	1.987	53.376	26,9



Fuente: Sistema de Estadísticas Chilenas, 2012.

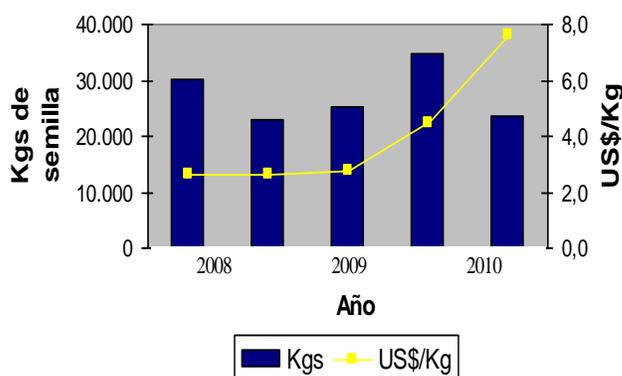
## I.6 Exportaciones Nacionales

Las exportaciones de semilla de Jojoba comenzaron en el año 2008 con un precio estable de 2,6-2,7 US\$/Kg y envíos entre 22.800 y 32.200, aproximadamente, hasta el año 2010. Mientras que a partir del 2011 los precios obtenidos han aumentado considerablemente desde los 4,5 a 7,6 US\$/Kg de semilla en el presente año. Las importaciones de semilla han sido prácticamente nulas a excepción del año 2005 en el que ingresaron 13,5 Kg al país (**Tabla 47**).

En el caso del aceite de Jojoba, los envíos comenzaron tímidamente en el año 2001, con sólo 10 Kg de aceite. Esta situación continuó hasta el 2006, cuando se exportaron 6.543 Kg de aceite, principalmente a Japón y Suiza. Desde ahí en adelante las exportaciones se abrieron camino hasta el presente año, con una severa disminución en el 2008. Si bien el año 2011 no mantuvo un nivel de exportación con la tendencia al alza que se esperaba, el aumento en el precio promedio obtenido fue una buena noticia (**Tabla 48**). A pesar de la crisis económica mundial, el aceite de Jojoba chileno ha logrado internalizarse en el mercado extranjero, con precios crecientes y muy atractivos, como por ejemplo para el presente año a finales de Octubre presenta un valor promedio de US\$ 30,3 el kilo de aceite de Jojoba.

**Tabla 47.** Exportaciones nacionales de semilla de Jojoba

Año	Kg	US\$ FOB	US\$/Kg
2008	30.210	78.976	2,6
2009	22.794	59.264	2,6
2010	25.290	69.066	2,7
2011	34.740	155.723	4,5
2012	23.505	178.742	7,6



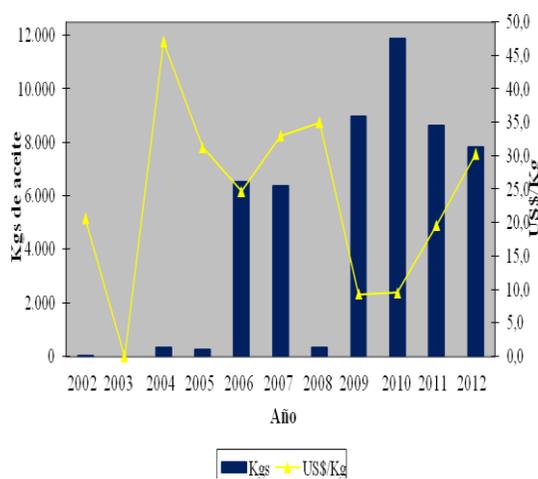
Fuente: Sistema de Estadísticas Chilenas, 2012.

Como se ha comentado, el creciente interés por las facultades principalmente cosméticas del aceite de Jojoba ha potenciado su comercialización en nuestro país y en el mundo. A pesar de que la producción nacional ha aumentado, hoy en día existe una demanda insatisfecha, haciendo necesario importar grandes volúmenes desde el extranjero. Por otra parte, los interesantes precios obtenidos en los últimos años en la exportación del aceite, en conjunto a la amplia variedad de tratados de libre comercio con los que cuenta Chile, se proyecta un futuro promisorio con claras buenas perspectivas para el cultivo de la Jojoba, tanto para la producción de semilla como de su aceite.

Es de esperar que las exportaciones nacionales vayan en aumento a medida que la situación económica mundial se normalice y que las plantaciones sean más productivas y estables a través de los años, lo cual es muy probable debido a que en el país se cuenta con clones seleccionados disponibles, mayor conocimiento del manejo agronómico y, además, en los últimos años se ha producido una expansión importante del cultivo de la Jojoba.

**Tabla 48.** Exportaciones nacionales de aceite de Jojoba.

Año	US\$ FOB	Kg	US\$/Kg
2002	103	5	20,6
2003	0	0	0,0
2004	16.061	341	47,1
2005	8.152	260	31,3
2006	161.478	6.543	24,7
2007	210.358	6.374	33,0
2008	11.793	337	35,0
2009	83.764	8.960	9,3
2010	113.546	11.896	9,5
2011	169.292	8.612	19,7
2012	237.073	7.836	30,3



Fuente: Sistema de Estadísticas Chilenas, 2012.

## II. Manejo productivo

Los requerimientos agroclimáticos de esta especie limitan su cultivo a escasas zonas del mundo. En la literatura se le ha caracterizado por ser de fácil manejo y económico, incluso a pequeña escala; no requiere de labores intensas, no es exigente en calidad de suelos y es poco afectado por plagas y enfermedades. Entre otras de sus ventajas se ha mencionado la baja perecibilidad de su semilla, permitiendo su almacenaje y manejo del periodo de cosecha.

### II.1 Requerimientos Agroclimáticos

Las poblaciones más grandes y con mejor crecimiento están en zonas con precipitaciones de 250 mm a 380 mm anuales y libres de heladas, puesto que una helada severa y prolongada puede producir la muerte de una plantación completa si esta es nueva, y de los brotes tiernos y flores en una plantación adulta, lo cual se traduciría en una pérdida de la producción anual (Yermanos, 1979). Yermanos (1979) señala también que el cultivo de la Jojoba requiere de disponibilidad de agua durante fines de invierno y primavera, sin competir con cultivos tradicionales por el recurso hídrico. Debido a que las flores aparecen en verano, un riego a mediados de verano en años excesivamente secos podría asegurar una buena floración y por tanto un buen rendimiento de semilla.

La Jojoba prefiere climas secos, de baja humedad relativa. El viento favorece la polinización de las flores siempre que no sea seco y cálido, condición que no ocurre en nuestro país. Se considera una distancia segura entre 50-60 metros desde el macho, aunque puede alcanzar distancias de 1 km (López, 1987, citado por Botti *et al.*, 2011). Está bien adaptada a las altas fluctuaciones de temperatura que varían de 30° C a 40° C. Pueden tolerar heladas de hasta -9° C y altas temperaturas de hasta 50° C (Yermanos, 1979).

Crece en una diversidad de suelos, profundos de buen drenaje y aireación de texturas livianas preferentemente derivados de material granítico, generalmente de pH neutros a alcalinos, entre 5 y 8 (Yermanos, 1979) y rico en fósforo, en suelo desértico, preferentemente con buen drenaje y aireado puesto que es fuertemente afectado por anegamientos del suelo.

## II.2 Plantación

En suelos arables basta con una aradura y rastraje, para luego establecer las plantas en hoyos de 30 x 30 x 30 cm, con riego adecuado al momento de la plantación (Botti *et al.*, 2001). La preparación de suelos radica, entre otras razones, en lograr un óptimo crecimiento radical de la primera temporada, que debiera llegar a lo menos a un radio de 50 cm (Cruz, 1996).

De acuerdo a Botti *et al.* (2001) los puntos clave de esta etapa son contar con clones seleccionados tolerantes a la salinidad y de buen rendimiento de semilla, realizar la plantación desde inicios a fines de primavera y así asegurar periodos libres de heladas y temperaturas adecuadas para lograr un buen desarrollo vegetativo, establecer el cultivo en orientación perpendicular a la dirección del viento para que la polinización sea adecuada con una proporción de 10% de plantas machos de muy larga floración, distribuidos en forma homogénea entre las plantas hembra, o bien una hilera de machos cada 15 de hembras, utilizando tres clones diferentes para aumentar la adaptabilidad del cultivo ante diferentes factores bióticos y abióticos. Dadas las similitudes de salinidad en suelo y agua del terreno con el estudio de Botti *et al.* (1998) es posible recomendar los clones 4.15.63, Mirov, 1.8.10, y 4.11.32 por su alta productividad y floración tardía (Botti *et al.*, 2001).

## II.3 Riego

La Jojoba, a pesar de ser una especie de bajo requerimiento hídrico, de sistema radical capaz de alcanzar napas subsuperficiales y poco demandante, requiere del aseguramiento de un buen suministro hídrico durante el crecimiento vegetativo previo a la floración y durante el crecimiento de los frutos.

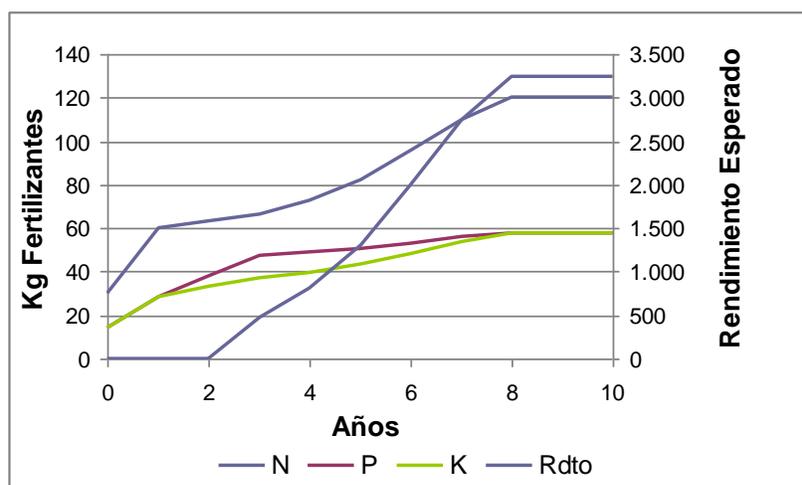
Cruz (1996) señala que el volumen de agua requerido por año para una densidad de 1.250 pl/há varía entre los 725 y 2.400 m<sup>3</sup>/há durante los tres primeros años para luego establecer el requerimiento hídrico desde el cuarto año en adelante en 3.450 m<sup>3</sup>/ha, lo que equivaldría aproximadamente a un tercio de lo que requieren otros cultivos. Se debe considerar que los clones seleccionados en Chile son más tolerantes al déficit hídrico que los clones extranjeros (Botti *et al.*, 2001).

Al ser el sector estudiado una zona en que el agua no es limitante pero sí lo es la salinidad, el riego gravitacional por surcos representa la mejor alternativa. Entre los motivos se puede mencionar el menor costo de inversión y de mantención asociado. Su principal desventaja es su menor eficiencia, estimada en un 50%. De esta manera durante los meses de verano sería necesario regar cada diez días y una vez al mes en invierno, en caso de que no ocurran precipitaciones.

## II.4 Fertilización

El programa de fertilización del cultivo debe ser realizado en base a la fertilidad natural del suelo y tasa de extracción de nutrientes, que variará en las plantas en función de la edad y rendimiento. Lovenstein (1985), citado por Osman y AboHassan (1998), estimó que aplicaciones de 58, 11 y 22 kg/há de N, P, K son necesarios para una producción de 3 Ton semillas/ha. Por su parte, Nelson y Watson (2001) proponen 60 kg N/há para plantaciones jóvenes y 120 Kg/ha para plantaciones adultas. Botti *et al.* (2001) menciona la recomendación de la Dra. Benzioni, quien postula dosis de 100 ppm de nitrógeno, 48 ppm de fósforo y 48 ppm de potasio. En la **Tabla 49** se presentan las dosificaciones de fertilizantes de acuerdo al rendimiento esperado.

**Tabla 49.** Requerimientos de fertilización de acuerdo al rendimiento esperado a través de los años.



Fuente: Elaboración propia en base a Benzioni en Botti (2001), Lovenstein (1985) citado por Osman y AboHassan (1998) y, Nelson y Watson (2001).

## II.5 Poda

Según Botti *et al.* (2001), en el extranjero se realizan podas mecanizadas en plantaciones adultas para dar forma de seto mediante un corte vertical, que estimularía la brotación. Sin embargo para este análisis no fue considerado, ya que al no realizar poda, se podría de esta forma disminuir la pérdida de agua a través de la evaporación desde el suelo al no quedar expuesto a la radiación solar.

## II.6 Malezas

Tomando en consideración la salinidad del suelo en la localidad, es poco probable el desarrollo de malezas, por lo que su control no ha sido considerado para este análisis económico.

## II.7 Plagas y Enfermedades

De acuerdo a Botti *et al.* (2001) a pesar de haberse encontrado presencia de plagas en el cultivo de la Jojoba, las plantaciones chilenas no han requerido de aplicaciones de productos para su control. Menciona además que, en general, las plagas no han generado pérdidas económicas. Por otra parte, señala que el clima de las zonas de cultivo de la Jojoba en Chile y el riego adecuado sin anegar el suelo son condiciones que no favorecerían al desarrollo de hongos que pudieran afectar a las plantaciones. Por estas razones no se ha considerado la aplicación de agroquímicos para el control de plagas y enfermedades.

## III. Análisis económico

Estudios de rentabilidad del cultivo de la jojoba con clones seleccionados de alto rendimiento de semilla en el país han demostrado que podría ser una excelente alternativa de producción para las zonas áridas y semiáridas (Cruz, 1996; Botti *et al.*, 2001).

### III.1 Supuestos del Análisis

En base al cultivo de la jojoba en un huerto de 1 hectárea (há) se elaboró un análisis de rentabilidad a 10 años, a pesar de que el cultivo posee una longevidad de 25 años, debido a que, bajo las condiciones de salinidad de Diego de Almagro, es esperable que su vida útil y rendimientos sean menores en comparación a una zona sin esta limitación.

Se consideró un marco de plantación de 4 x 2 m y una densidad 1.250 plantas con un 10% de plantas polinizantes no productivas. En el ejemplo se consideró una curva de rendimiento obtenida a partir de los datos productivos de clones resistentes a salinidad y altamente productivos (Botti *et al.*, 2001), con una estabilización del nivel productivo a partir del octavo año y un rendimiento de 3,25 Ton/ha a la madurez, lo que equivaldría a 2,8 Kg/planta (Tabla 49).

Debido a que el precio de comercialización tanto de las semillas como del aceite depende mayoritariamente del mercado externo, se consideró lo siguiente:

El precio promedio de exportación de semillas de jojoba desde el año 2008 al presente es de US\$4 FOB, sin embargo debido a que los precios han tenido un aumento pronunciado en los últimos dos años, se consideró un nivel de precio de US\$ 6,00/kg semilla.

El precio promedio de las exportaciones nacionales de aceite de Jojoba desde el año 2004 a la fecha es de US\$27,4 FOB. Este período ha sido considerado por marcar el inicio de las exportaciones con un volumen significativo. Dado el comportamiento errático de los precios

durante el período evaluado, para este análisis se consideró el precio promedio de los años 2011 y 2012, de US\$25/kg de aceite.

**Tabla 49.** Rendimientos esperados.

Año	Rendimiento Kg/Ha
0	0
1	0
2	0
3	475
4	815
5	1.300
6	2.000
7	2.750
8	3.250
9	3.250
10	3.250

Fuente: Elaboración propia en base a Botti *et al.* (1998) y Botti *et al.* (2001).

Los precios de los fertilizantes fueron obtenidos de las ediciones de los meses de Septiembre a Noviembre de la Revista del Campo de El Mercurio y los costos de maquinaria fueron obtenidos a partir de cotizaciones con la empresa Samac. Estos costos se presentan de forma anual en el **Anexo 11 (Figura B1)**.

El precio de los combustibles fue calculado a partir de:

$$PM = PI + SIPCO + IVA + IE$$

Donde:

- PM: Precio a los distribuidores mayoristas.
- PI: Precio de Paridad de Importación en Concón.
- SIPCO: Sistema de Protección ante Variaciones Internacionales de los Combustibles (Ley 20.505)
- IVA: Impuesto al Valor Agregado (19%). De acuerdo al SII, en el caso del diesel, este impuesto puede ser recuperado.
- IE: Impuesto específico a los combustibles (6 UTM/m<sup>3</sup> para gasolinas y 2,5 para UTM/m<sup>3</sup> diesel, Ley 18.502).

El PI fue obtenido de la tabla de precios de paridad publicados semanalmente, entre el 5 de Enero y el 15 de Noviembre de 2012 en el sitio web de la Empresa Nacional de Petróleo (ENAP). Dado que el SIPCO lo que busca es evitar las alzas transitorias y amortiguar las permanentes sin llegar a transformarse en un subsidio<sup>4</sup>, para efectos de estos cálculos no ha sido considerado. El valor de la UTM considerado fue el registrado como valor medio desde Enero al 15 de noviembre de 2012 de acuerdo al Banco Central, de \$39.570.

Las depreciaciones fueron obtenidas a partir del Sistema de Impuestos Internos (S.I.I.)<sup>5</sup>

En cuanto a las remuneraciones, se consideró un trabajador estable para llevar a cabo las labores agrícolas que se requieran, de acuerdo al precio medio en la Comuna de Diego de Almagro para la Agricultura al mes de Julio de 2012 de acuerdo al Sistema de Información Laboral (SIL)<sup>6</sup>, del Ministerio del Trabajo. También se consideró un administrador. Para estimar estos sueldos en base a una hectárea se consideró que serían capaces de trabajar al menos 50 hectáreas, dada la baja complejidad del manejo del cultivo. Estos se presentan en el **Anexo 11 (Figura B2)**. El cálculo de la mano de obra para la jornada hombre fue a partir de la remuneración promedio de \$700.232 menos un 20%, considerando 22 días hábiles al mes de trabajo, por lo tanto se avaluó en \$25.500 por jornada. Esta última se presenta en el **Anexo 11 (Figura B2)**.

Para el periodo de cosecha que se extiende entre los meses de junio y julio se consideró la contratación de mano de obra temporal orientada a las mujeres de la zona.

- El 80% de la cosecha será cosechado mediante una máquina aspiradora<sup>7</sup>, capaz de recolectar 80 kg/h estimados considerando el tiempo de descarga y consumo de 3 litros de gasolina de 93 octanos por hora.
- Se estimó que un 20% de la producción sería cosechado de manera manual.
- El almacenamiento de las semillas sería en doble malla limonera de 15 kg.
- Se consideró pagar el kilogramo de semilla cosechada en \$45 y \$140 el kilogramo de forma mecánica y manual, respectivamente.

Se consideró la compra de una camioneta a diesel considerando un rendimiento promedio de 10 km/l y un carro de arrastre. La capacidad total de arrastre considerada fue de 1.800 kg.

El transporte de las plantas desde su compra en USEP, ubicado en Las Cardas, IV Región, y el transporte de las semillas hacia Vallenar donde se encontraría un intermediario que actuaría como comercializador, ha sido estimado en base al punto anterior.

El intermediario elaboraría el aceite con un rendimiento de extracción de aceite de 40%, bajo un costo de 1 kg de semilla por cada kg de aceite procesado más un 8% de comisión por su exportación. Este último porcentaje también sería aplicado a la comercialización de la semilla hacia el extranjero. Todos los porcentajes están en base al precio final de exportación. Esto se ha determinado teniendo en consideración que no se contara con el conocimiento, las herramientas y la experiencia de exportar.

<sup>4</sup> [http://www.bcn.cl/carpeta\\_temas\\_profundidad/sipco-sepco-fepp-feppo](http://www.bcn.cl/carpeta_temas_profundidad/sipco-sepco-fepp-feppo)

<sup>5</sup> [http://www.sii.cl/pagina/valores/bienes/tabla\\_vida\\_enero.htm](http://www.sii.cl/pagina/valores/bienes/tabla_vida_enero.htm)

<sup>6</sup> [http://www.sil.gob.cl/InterHtml.Asp?NameHtml=S09\\_C3202\\_201206\\_pto.asp](http://www.sil.gob.cl/InterHtml.Asp?NameHtml=S09_C3202_201206_pto.asp)

<sup>7</sup> [www.cosechemos.com](http://www.cosechemos.com)

El valor del terreno fue obtenido desde el “Proyecto de Inversión Agroindustrial para el cultivo de la Jojoba en la comuna de Diego de Almagro” de SMC Ltda del año 2004, cuyo valor fue calculado en base a una hectárea y U.F. del mes de Julio, cuando se presentó ese proyecto, el cual fue luego proyectado al valor de U.F. del mes de Julio 2012, de acuerdo al Banco Central.

Se consideraron los costos operativos medios anuales para las combinaciones 1 y 2 de las plantas de tratamientos de aguas propuestas por BioPlanta en el Informe de Consolidación del mes de Diciembre.

Finalmente, el tipo de cambio utilizado fue el valor medio del dólar registrado desde Enero del año 2011 al mes de Noviembre de 2012, de acuerdo al Banco Central, a un valor de \$486.

### III.2 Resultados del Análisis Económico

Los resultados del análisis del proyecto puro del cultivo de la Jojoba para la producción de semillas y aceite en la Comuna de Diego de Almagro en base a una hectárea y horizonte de 10 años, demuestran que al incluir los costos de operación de una planta de tratamientos estas oportunidades de negocio son rentables, pero con un alto riesgo asociado en el caso en que la producción se orienta a semillas, mientras que si se busca elaborar un producto de valor agregado como el aceite de jojoba el negocio es más estable ante variaciones de factores como valor de venta y precio del dólar, principalmente.

El detalle del flujo de proyecto puro para el cultivo de jojoba con producción destinada a semilla se presenta en el **Anexo 11 (Figura B3)**, aquel que contempla la incorporación de la combinación 1 para tratamiento de aguas, se presenta en el **Anexo 11 (Figura B4)** y al utilizar la combinación 2 para tratamiento de aguas se presenta en el **Anexo 11 (Figura B5)**.

Para el caso de la producción de semillas, sin tratamiento de aguas, la evaluación proyecta un requerimiento de capital de trabajo de \$914.610 y rentabilidad de 14% en términos de la tasa interna de retorno (TIR), con \$1.624.167 por hectárea de acuerdo al valor actualizado neto (VAN), descontado al 12%, y periodo de recuperación del capital de inversión al séptimo año (**Anexo 11, Figura B6**), presentándose como una alternativa rentable. Mientras que, al incorporar el costo medio de operación anual de la combinación 1 de planta de tratamiento de aguas la rentabilidad disminuye a un 11% en términos de la tasa interna de retorno (TIR) y de -\$577.643 por hectárea según el valor actualizado neto (VAN), descontado al 12%, recuperando totalmente la inversión al octavo año (**Anexo 11, Figura B7**), sin embargo de acuerdo a los valores de TIR y VAN el proyecto no es rentable. Por otra parte, al considerar los costos operativos medios anuales de la combinación 2 de planta de tratamiento de aguas, la evaluación proyecta una rentabilidad favorable de 12% en términos de la tasa interna de retorno (TIR) y de \$79.428 por hectárea según el valor actualizado neto (VAN), descontado al 12%, recuperando totalmente la inversión al octavo año (**Anexo 11, Figura B8**), por lo que el

proyecto es rentable pero en un muy bajo nivel, altamente riesgosa al fracaso. Vale mencionar que esta tasa de descuento ha sido utilizada por estudios económicos anteriores del cultivo de la Jojoba en Chile.

Los análisis de sensibilidad fueron realizados en base a las alternativas de producción de semillas sin tratamiento de aguas y con la combinación 2 de tratamientos de aguas, que se presentan en el **Anexo 11 (Figuras B6 y B7)**.

Para el caso de la producción de semillas sin contemplar costos operacionales de la incorporación una planta de tratamiento de aguas, los resultados demuestran que ante variaciones en los parámetros que lo determinan; precio de venta, valor del dólar, remuneración a la mano de obra, precio de los insumos y costo de la energía, es posible observar que la rentabilidad de este cultivo en la Comuna de Diego de Almagro, bajo esta estructura de costos, es más sensible al precio de venta y variación en el valor del dólar, en comparación a los otros factores. Ya que, si el precio de venta o el dólar disminuyeran a US\$5,4/Kg y \$433, respectivamente, el proyecto deja de ser rentable. Básicamente porque los ingresos son moderados al esperar un nivel productivo bastante menor de aquel posible a obtener en una zona sin limitantes, por ejemplo, de salinidad. Mientras que aumentos en el costo de la mano de obra, insumos y de energía utilizada afectarían en menor medida la rentabilidad, sin considerarse factores importantes de riesgo (**Anexo 11, Figura B9**).

En cuanto al análisis de sensibilidad del flujo de proyecto puro para la producción de semillas e incluyendo los costos operacionales de la combinación 2 de planta de tratamiento de aguas, el proyecto es altamente sensible a variaciones en el precio de venta, ya que la sensibilidad del TIR y del VAN demuestran que el negocio deja de ser rentable si el precio de venta disminuye a US\$5,9/kg de semilla a un precio estable del dólar y en caso que el precio del dólar disminuyera a \$483. Otro factor relevante sería el aumento del costo de la mano de obra, un aumento de un 3% por sobre los valores de referencia provocarían el fracaso del proyecto. Mientras que aumentos en el costo de los insumos y de la energía utilizada afectarían en menor medida la rentabilidad, con un 10% y 40% por sobre los valores de referencia (**Anexo 11, Figura B10**). En base a estos resultados es posible mencionar que el cultivo de Jojoba con producción de semillas, incluyendo los costos operacionales de la combinación 2 de planta de tratamiento de aguas, es un proyecto altamente sensible con un elevado riesgo de fracaso.

El detalle del flujo de proyecto puro para el cultivo de jojoba con producción destinada a aceite se presenta en el **Anexo 11 (Figura B11)**, además se consideraron los costos operacionales medios anuales para la combinación 1 y 2 de planta de tratamiento de aguas, las que se presentan en el **Anexo 11 (Figuras B12 y B13)**.

Si el cultivo de Jojoba se destinara a la elaboración de un producto de valor agregado como el aceite de Jojoba, la rentabilidad del proyecto aumenta a pesar de la adición de otros costos asociados. El mayor precio de venta del aceite amortiza esto y mejora la rentabilidad del

proyecto, en 22% de TIR y \$8.890.844 de VAN, con tasa de descuento al 12%, permitiendo recuperar el capital de inversión al sexto año (**Anexo 11, Figura B14**). Al incluir los costos operacionales medios anuales para la combinación 1 de planta de tratamiento de aguas el proyecto también es rentable pero en menor medida, ya que resulta en 20% de TIR y \$6.795.313 de VAN, recuperando el capital de inversión al séptimo año (**Anexo 11, Figura B15**). Una situación intermedia representa el proyecto al considerar los costos de operación de la combinación 2 de tratamiento de aguas, con 20% de TIR y \$7.420.687 de VAN, permitiendo recuperar el capital de inversión al séptimo año (**Anexo 11, Figura B16**).

Los análisis de sensibilidad fueron realizados en base a las dos opciones más rentables, es decir, a partir de la producción de aceite sin contemplar los costos operaciones de una planta de tratamiento de aguas y aquella que considera los costos operacionales medios anuales de la combinación 2 de planta de tratamiento de aguas.

En cuanto a la producción de aceite, sin considerar tratamiento de las aguas, el negocio permite tolerar una disminución en el precio de venta superior a los US\$16,7/Kg de aceite y disminución del valor del dólar superior a \$243, puntos en los cuales el negocio no resulta rentable. El proyecto permite, en este caso, tolerar una fuerte disminución del precio del dólar dado que a pesar de disminuir los ingresos, existen costos asociados a esta moneda que permiten disminuir los costos totales, así el flujo soporta esta fuerte caída. Respecto de los factores costos de mano de obra, insumos y energía, éstos provocan el fracaso del proyecto si estos aumentan en 4,5; 5,8 y 10,25 veces por sobre los valores de referencia (**Anexo 11, Figura B17**).

Al incluir los costos operacionales de la combinación 2 de planta de tratamiento de aguas el proyecto es capaz de soportar una caída en el precio de venta, a un precio de dólar estable, superior a US\$18/Kg de aceite. Al precio actual de venta el negocio no sería factible económicamente si el dólar disminuyera a \$283. Además, es capaz de soportar un aumento menor a 4,5 veces el costo de la mano de obra, sin dejar de ser rentable. Variaciones en el precio de insumos y de energía son menos relevantes, causando el fracaso del proyecto si estos aumentaran 5,8 y 36 veces, respectivamente (**Anexo 11, Figura B18**).

El creciente interés de la industria cosmética hacia el aceite de Jojoba en conjunto a los resultados expuestos, presentan al cultivo de Jojoba con objetivo productivo de aceite como una alternativa rentable y atractiva desde el punto de vista económico para la Comuna de Diego de Almagro, aunque con cierto riesgo asociado, principalmente a la disminución del precio de venta al considerar la incorporación de la combinación 2 de planta de tratamiento de aguas.

#### **4.4 Antecedentes del cultivo del Maíz Lluteño (*Zea mays* L. var. *amylacea* Sturtevant).**

Especie gramínea anual perteneciente a la familia Poaceae, el maíz es y ha sido un cereal de vital importancia para las culturas americanas. De acuerdo a Manzur (2011) se habría originado hace siete mil años a.C. en Mesoamérica, extendiéndose desde allí al resto del continente, hacia Norteamérica y hacia el resto de América, entre ellos a Chile.

El maíz Lluteño, es una variedad de maíz dulce y de acuerdo a Manzur (2011) posiblemente corresponde a la raza limeño, la mazorca mide 15 cms y es de color amarillo. De acuerdo a esto se distribuye en la XV y I Región entre los 200 y 1.200 metros sobre el nivel del mar. Recibe el nombre “Lluteño” por ser típico del Valle de Lluta en la región de Arica y Parinacota, zona en la que es posible obtener hasta dos cosechas al año (Torres y Avecedo, 2008). Su producción se orienta, principalmente, a grano fresco o choclo, para consumo familiar y venta en mercados locales.

Para Bastías (2008), el cultivo de variedades locales seleccionadas a lo largo de muchas generaciones constituye un recurso fitogenético de importancia dado que constituyen un patrimonio mundial, cuyos recursos genéticos poseen la clave para asegurar la seguridad alimentaria o bien para incrementar el rendimiento en zonas geográficas marginales, puesto que su diversidad genética les permite una mayor capacidad de adaptación.

El maíz Lluteño ha sido caracterizado por tolerar altos niveles de sales, como NaCl y boro, que para otras plantas resultan tóxicos. Los mecanismos fisiológicos y, sobre todo, moleculares que participan en la tolerancia de este cultivar son aún muy poco conocidos (Ortíz *et al.*, 2011).

El etanol corresponde al alcohol etílico producido a partir de la fermentación de los azúcares o almidones presentes en algunos cultivos, como por ejemplo el maíz. De acuerdo a Vilajuana (1981) citado por García (2008), sus principales usos son en bebidas alcohólicas, como solvente químico e industrial, en la industria cosmética, como agente desinfectante, como aditivo en combustibles de motores de combustión interna y como combustible puro en motores, siendo estos dos últimos usos los de mayor interés mundial.

La adaptación que presenta el maíz Lluteño a una alta salinidad y contenido de boro, tanto en el agua de riego como en el suelo, condiciones comunes en las zonas áridas y semiáridas del norte de nuestro país, permite su desarrollo y productividad. De acuerdo a Bastías *et al.* (2011) este tipo de maíz podría permitir habilitar grandes extensiones de terreno marginales que con otros cultivos sería imposible, generando nuevos empleos en las zonas rurales y la revitalización de tierras marginales, además de producir bioenergía en suelos marginales sin competir en superficie cultivable con cultivos destinados a la alimentación humana, por tanto presenta ventajas sociales, económicas y medioambientales.

El amplio conocimiento del manejo del cultivo del maíz en conjunto a los altos rendimientos que se obtienen en nuestro país, en conjunto a su mayor balance energético y rendimiento de etanol en comparación a otros cereales como el trigo y el arroz (Ortega-Blu *et al.*, 2011), y alta acumulación de biomasa en la estructura vegetal del maíz Lluteño (Bastías *et al.*, 2011), lo presentan como una alternativa interesante para la generación de biocombustibles.

De acuerdo a Bastías *et al.* (2011), el rastrojo (biomasa aérea residual tras la cosecha) generalmente no es utilizado y en cambio es incinerado, desaprovechando su potencial para forraje, materia orgánica o biocombustibles. Mc Aloon *et al.* (2000) señalan que este residuo de cosecha posee un alto contenido de carbohidratos, capaz de proveer de beneficios económicos a la comunidad agrícola. Bastías *et al.* (2011) determinaron en base a la producción de materia seca de 7,1 Ton/há y contenido de etanol de 360,75 litros/tonelada de materia seca., estos valores pueden ser considerados como promisorios puesto que no incluyen la mazorca en sus cálculos, en una zona cuyas condiciones de salinidad no permitirían el desarrollo de la mayoría de las especies cultivables. Sin embargo, su remoción desde el suelo favorece procesos de erosión.

Se ha estimado también la producción de bioetanol a partir de la mazorca, de acuerdo a Bastías *et al.* (2011) es posible producir 406,93 litros de etanol/tonelada de materia seca. En este mismo sentido, Ortega-Blu *et al.* (2010) mencionan que una tonelada de maíz es capaz de producir como máximo 460 Litros de etanol y de manera conservadora 400 litros, a través del proceso de molienda seca en plantas procesadoras modernas.

Según Bastías *et al.* (2011) es fundamental a la hora de proyectar la producción de biomasa de maíz Lluteño con fines bioenergéticos aumentar la densidad de plantación lo que podría lograrse al aumentar desde 40.000 plantas/há (densidad utilizada comúnmente para el maíz Lluteño) a 83.333 plantas/há, como se hace en el caso de maíz para ensilaje. En este sentido, Fuentes *et al.*, (2009) ha estimado un rendimiento de materia seca del orden de 20 a 27 Ton/ha, con lo que se obtendrían mayores volúmenes de biomasa y con ello el aumento de la producción de bioetanol.

Sin embargo, como se ha mencionado entre los factores que limitan la productividad de los cultivos se encuentra la salinidad, tanto en agua como en el suelo. Dentro de la clasificación del maíz, según su tolerancia a la salinidad, éste es un cultivo sensible, siendo severamente afectado incluso a bajas concentraciones de sal (Mass *et al.*, 1983, citado por Bastías *et al.*, 2011). De acuerdo a datos de Ayers y Westcot (1985) un nivel de salinidad de 1,7 dS/m en el agua de riego puede provocar una disminución del 10% del rendimiento potencial.

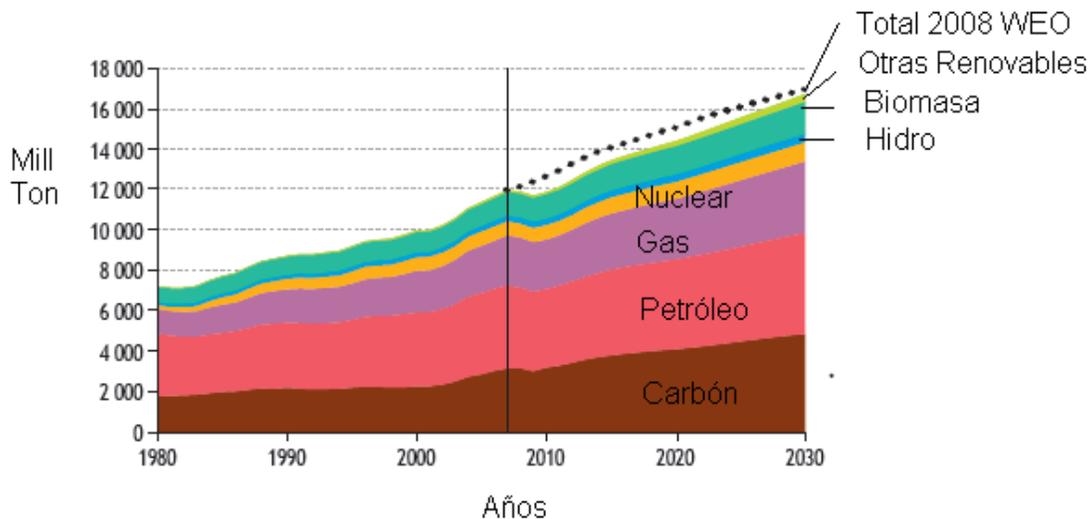
Los niveles de salinidad en el Valle de Lluta de acuerdo a Bastías *et al.*, (2011) de 2,7 y 5.5 dS/m en agua de riego y suelo, son similares a los niveles presentes en la Comuna de Diego de Almagro. De acuerdo a los rendimientos propuestos por (Fuentes *et al.*, 2009), es posible esperar bajo esta densidad de siembra lograr un rendimiento de 22,5 ton de Materia Seca, lo que de acuerdo a los porcentajes de repartición de biomasa en maíz (0,46% para mazorcas y 0,54% para rastrojos o residuos de cosecha), considerando un 20% de humedad en mazorca y 10% de humedad en rastrojo, se obtendría 12,42 toneladas de rendimiento de mazorca y 13,37 toneladas de rastrojo.

## I. Antecedentes de mercado

### I.1 Mercado Mundial

El desarrollo económico mundial ha estado fuertemente ligado al uso de combustibles fósiles, principalmente desde el siglo XVIII. La alta volatilidad en los precios del petróleo ha repercutido significativamente en el crecimiento económico de muchas naciones generando inestabilidad, en especial aquellos países en desarrollo importadores de petróleo (FAO, 2008).

Los combustibles de origen fósil han sido la principal fuente energética mundial de los últimos cuarenta años, principalmente el petróleo. De acuerdo a FAO (2008), se calcula que en el año 2030 el consumo de petróleo habrá aumentado en 42%, dado el carácter limitado de los combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón), en conjunto al riesgo asociado a la alta dependencia de ellos y el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero con el consecuente calentamiento global, ha propiciado el interés mundial por el desarrollo de fuentes energéticas no convencionales, como es posible observar en la **Figura 58**.



**Figura 58.** Demanda mundial de energía primaria.

Fuente: International Energy Agency, World Energy Outlook 2009.

Este cuadro representa una estimación a futuro de la dinámica de demanda de energía primaria en un escenario referencial, el cual asume que los gobiernos no realizarían cambios en sus medidas y políticas energéticas. Provee por tanto, una base de cómo los mercados energéticos globales evolucionarían si no se modificaran las tendencias actuales.

De acuerdo a IEA (2009), en el periodo proyectado el carbón presentaría el mayor incremento en su demanda, seguido por el gas y el petróleo. La demanda por petróleo aumentará desde 85 millones de barriles diarios en 2008 a 105 millones de barriles/día al año 2030, este aumento se debería principalmente por el aumento de la demanda en países no pertenecientes a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE). El aumento de la

demanda por petróleo en el mundo estaría principalmente dado por el sector del transporte, en 97% (IEA, 2009).

Los biocombustibles han sido señalados como una fuente energética alternativa, de menor impacto ambiental. De acuerdo a Serna *et al.* (2011) el bioetanol representa más del 90% del total de los biocombustibles que se utilizan actualmente en el mundo. Al ser producido mayoritariamente a partir de fuentes para la alimentación humana y/o animal, es decir de primera generación, su elaboración ha contribuido al alza en el precio de los alimentos y favorecido la incertidumbre mundial acerca de la escasez de alimentos en el futuro.

Según GRFA (2012) la producción de etanol mundial creció en un 1% respecto de 2011, con 85,2 billones de litros. Es esperable que Estados Unidos continúe siendo el principal productor y consumidor mundial de etanol (OECD-FAO, 2011), seguido por Brasil, en base a maíz y caña de azúcar, respectivamente.

Los vaivenes del precio mundial del etanol entre los años 2010 y 2011 estuvieron dados por la disminución de la producción de Brasil debido al aumento de precio de la caña de azúcar y al estancamiento en el suministro de etanol por parte de Estados Unidos, en conjunto a una menor producción de etanol de los países en desarrollo (OECD-FAO, 2011 y OECD-FAO, 2012).

Durante el 2012, los precios fueron decayendo hasta US\$1,9/galón a inicios de Julio, mientras que en el segundo semestre los precios se han normalizado para alcanzar en el mes de Octubre los US\$2,4/galón<sup>8</sup>, por sobre el precio promedio de US\$2,1/galón entre los años 2005-2012 en el mercado norteamericano<sup>9</sup>.

Mc Aloon *et al.* (2000) estimaron el costo de producción a partir de granos de maíz en US\$0,88/galón, mientras que aquel producido a partir de material lignocelulósico en US\$1,5/galón. Años más tarde, las estimaciones de Zhou *et al.* (2007) no variaron mayormente, con valores de US\$1/galón y entre US\$1,35-1,62/galón para el etanol de primera y segunda generación, respectivamente. Ambos estudios mencionan la importancia de la obtención de co-productos para aumentar la rentabilidad en la elaboración de bioetanol.

De acuerdo a OECD-FAO (2012), a pesar de una pequeña caída en los precios en 2012, se espera que después de 2013 los precios se mantengan constantes y que a futuro Estados Unidos y Brasil continuarán siendo los mayores proveedores de etanol con una producción esperada de 63,9 y 50,3 billones de litros al año 2020, y la producción mundial ascienda a 154,9 billones de litros, alcanzando los US\$66,4/hectolitro (OECD-FAO, 2011). Mientras tanto, la participación de Chile en este escenario sería absolutamente marginal (OECD-FAO, 2011).

De acuerdo a Perlack y Stokes (2011) citados por Edwards y Doran-Peterson (2012), el gobierno estadounidense se ha propuesto que para el año 2030 el 30% del combustible utilizado en transporte sea producido a partir de fuentes renovables. Esto no sería posible utilizando sólo etanol en base a maíz de grano, razón por la cual en el mundo se están estudiando alternativas productivas de etanol de segunda generación, a partir de diversas fuentes como por ejemplo

---

<sup>8</sup> <<http://www.nasdaq.com/markets/ethanol.aspx>>

<sup>9</sup> <[www.tradingeconomics.com/commodity/ethanol](http://www.tradingeconomics.com/commodity/ethanol)>

desde biomasa rica en pectinas obtenida de los residuos de la industria de jugos (Zhou *et al.*, 2007; Edwards y Doran-Peterson, 2012). De acuerdo a OECD-FAO (2011), la tecnología para producir biocombustibles de segunda generación aún se encuentra en etapa de investigación y desarrollo, sin ser producido a mayor escala. Además proyecta que su desarrollo se expanda tardíamente, alcanzando los 4,3 billones de toneladas al año 2020.

## I.2 Mercado Nacional

De acuerdo a Traub (2011), la evolución del Producto Interno Bruto (PIB) en las últimas décadas ha estado asociada a un significativo crecimiento del consumo energético con una alta dependencia de combustibles importados, de acuerdo a CNE (2011), con un 74,5% de la energía consumida en el año 2011, sin la presencia de algún biocombustible dentro de esta cifra. En cuanto a los combustibles derivados del petróleo, estos son principalmente consumidos por el sector de Transporte, y de la Industria y Minería, con 58,9% y 26,3%, respectivamente (CNE, 2011).

Según Arriaza (2011), en nuestro país actualmente existen normativas que fomentan la participación de biocombustibles en la matriz energética nacional. Como por ejemplo, la Ley Nº 20.257 de fomento a las Energías Renovables No Convencionales (ERNC), tales como la energía solar, eólica, mareomotriz y biocombustibles, entre otras, creando una demanda forzada y de crecimiento continuo para lograr una participación de un 10% de ERNC en el sistema eléctrico nacional al año 2024. También se autorizaron mezclas de 5% de etanol y gasolina, además de definir que los biocombustibles estén exentos del impuesto específico de los combustibles tradicionales.

Muñoz-Lagos *et al.* (2010) señalan que la producción de etanol de primera generación en base a maíz representaría una buena opción de biocombustibles para Chile con el objetivo de diversificar la matriz energética pero que esto generaría una fuerte dependencia de las importaciones tanto de grano como de biocombustibles. Duffey (2011) afirma que Chile en su condición de importador neto de granos y por carecer de ventajas comparativas en la producción de materias primas de primera generación, ha optado por el desarrollo de un programa de biocombustibles enfocado en aquellos de segunda generación.

A esto se le suma el hecho de las políticas agrarias buscan convertir a Chile en una “potencia alimentaria”, por lo que existe escasa disponibilidad de terrenos agrícolas para producción de bioenergía que no desplace la orientación de los cultivos al mercado alimenticio.

Se ha mencionado que el alto costo de los insumos, como el nitrógeno y el ácido sulfúrico, disminuye el rendimiento energético del proceso en conjunto a un negativo efecto ambiental. Estos factores hacen que hoy en día su producción en Chile aún se encuentre en etapa de investigación, sin producción a escala comercial (García, 2008; Ortega-Blu *et al.*, 2010 y Traub, 2011).

En el país se están desarrollando programas de investigación y desarrollo para la producción de biocombustibles de segunda generación (en base a celulosa y algas), fomentado por el Ministerio de Energía junto a INNOVA CORFO, y consorcios como BIOCORMSA y BIOENERCEL,

además del Programa Domeyko de la Universidad de Chile, para desarrollar a futuro una industria de biocombustibles de segunda generación en el país.

Los estudios elaborados por García (2008) y Acosta-Espejo *et al.* (2010), ambos bajo un escenario de sustitución de 5% de bioetanol con gasolinas, situarían a las plantas elaboradoras de bioetanol de primera generación en Angostura (VI Región), Talca (VII Región) y Ñuble (VIII Región), debido a que de esta manera se minimizarían los costos involucrados desde los mayores centros productivos de maíz hasta la distribución de los biocombustibles hacia los centros de consumo más importantes (Acosta-Espejo *et al.*, 2010).

Desde el año 2010 la producción ha aumentado desde 1,26 millones de toneladas a una proyección de 1,4 millones de toneladas para 2012, como también el rendimiento desde 120 a 126,7 qq/ha (Muñoz, 2012a). El rendimiento promedio nacional de la temporada 2011/2012 fue de 12,67 Ton/ha y 139.268 hectáreas, de acuerdo a Muñoz (2012b).

El precio nacional del maíz en el mercado interno está relacionado principalmente con factores como que la producción interna no es capaz de sustentar la demanda de consumo, lo que hace necesario importar volúmenes desde el extranjero. El consumo aparente de maíz también ha aumentado en el periodo 2010-2012, desde 1,86 a 2,2 millones de toneladas. En este sentido las importaciones se han incrementado para suplir esta demanda, las cuales en el año 2012 provienen principalmente desde Argentina y Paraguay en 81,5% y 16,6%, respectivamente (Muñoz, 2012a y Muñoz, 2012b). El *stock* mundial sin duda genera un fuerte efecto sobre los precios internacionales lo que repercute en el valor del maíz en el mercado nacional.

Dado el fuerte aumento en el precio del maíz en el mercado interno entre los años 2011 y 2012, y que además se prevé que continuarán altos puesto que de acuerdo a Muñoz (2012a) se proyecta un volumen de producción mundial de maíz por debajo del consumo para la temporada 2012/2013 lo que mantendría en alto a los precios internacionales.

## **II. Manejo productivo**

El período de siembra a cosecha del maíz Lluteño se extiende desde Septiembre a Marzo. A continuación se presentan factores y recomendaciones de manejo determinantes para maximizar los rendimientos de su cultivo.

### **II.1 Requerimientos Agroclimáticos**

Los requerimientos hídricos de siembra a madurez fluctúan entre 500 y 800 mm por hectárea, dependiendo de la variedad y del clima. Este cultivo se adapta a una amplia variedad de suelos, sin embargo prefiere aquellos de textura franca y profundidad de 50 cm, libre de compactaciones para que el perfil de suelo permita un óptimo desarrollo de raíces, de manera de lograr una adecuada disponibilidad de agua y uso eficiente de los nutrientes (Fundación Chile, 2011).

## II.2 Preparación del suelo

Mediante arado y rastraje es posible lograr un buen mullimiento del suelo y así facilitar la germinación de las semillas, logrando disminuir pérdidas económicas asociadas a una menor población de plantas y una consecuente reducción del rendimiento. Por otra parte, al remover el suelo mediante labranza tradicional se destruyen los agregados naturales del suelo quedando particulados y expuestos a los agentes erosivos (Acevedo, 2003). Sin embargo, las características climáticas de las zonas áridas dificultarían la rápida degradación de los residuos de cosecha para realizar sistemas de labranza de conservación, por lo que estos debieran ser tratados durante un tiempo previo a su incorporación al suelo.

## II.3 Siembra

Los altos costos asociados a la contratación de mano de obra en particular en esta zona, enfatiza la importancia de la mecanización de labores como una alternativa para hacer frente a esta problemática, por medio del uso de una máquina sembradora neumática monograno. De acuerdo a Faiguenbaum (2003), lo ideal es sembrar en una fecha temprana cuando el suelo alcanza una temperatura aproximadamente de 11° C a 5 cm de profundidad. Además se requiere de humedad adecuada en el suelo, para lo que se debe regar de acuerdo a la textura del suelo unos días previos, de manera de asegurar una rápida y uniforme germinación de la semilla. En suelos francos, la profundidad de siembra debe ser de aproximadamente 5 cm; en suelos más arcillosos debe profundizarse hasta unos 8 cm.

Como se mencionó anteriormente, para disponer de una mayor cantidad de biomasa para biocombustibles, sería recomendable realizar el cultivo con una densidad de 83.333 plantas/há utilizando un marco de plantación de cuatro semillas por golpe a 65 cm sobre la hilera y 80 cm entre surcos (Fuentes *et al.*, 2009), quedando finalmente 67.000 plantas/há aproximadamente<sup>10</sup>, lo que se traduce prácticamente en un 25% de pérdidas. Esto debido a que, si el promedio de germinación de semillas de maíz híbrido es de aproximadamente un 95%, es de esperar que este promedio en el caso de maíz Lluteño sea mayor, superando el nivel máximo de riesgo señalado por Fundación Chile (2011).

El peso promedio de 100 semillas de maíz Lluteño es de 55 gramos, por lo tanto serían necesarios 45,83 kg. Para efectos de la compra de semilla se consideró 46 kg.

## II.4 Riego

El período más sensible al déficit hídrico es el periodo de floración, ya que en dicho período debe favorecerse una eficaz polinización, una óptima fecundación de los granos y un buen crecimiento inicial de estos (Fundación Chile, 2011). El maíz Lluteño, en su zona de cultivo, requiere alrededor de 9.000 m<sup>3</sup>/ha durante el periodo de siembra a cosecha<sup>11</sup>.

---

<sup>10</sup> Comunicación personal Sr. Ing. Agr. Héctor Subiabre, Inia-Ururi.

<sup>11</sup> Comunicación personal Sr. Ing. Agr. Jaime Otárola, ex investigador de Inia-Ururi.

## II.5 Fertilización

Previo a la siembra es necesario realizar un análisis de suelo para determinar la fertilidad natural de este. Aplicaciones de 200-69-90 (N-P-K) han sido sugeridas para 83.333 plantas/hectárea, parcializando  $\frac{1}{2}$  N a la siembra +  $\frac{1}{2}$  N a los 50 cm de altura (Fuentes *et al.*, 2009) a través de un abonador-cultivador, con un riego inmediato a continuación de la aplicación (Faiguenbaum, 2003). A diferencia del nitrógeno, el fósforo es un elemento prácticamente inmóvil en el suelo, por lo que debe ser localizado cerca de las raíces y por debajo del punto en que se origina el sistema radicular. Por este motivo, según Faiguenbaum (1996), es recomendable ubicarlo entre 7 y 10 cm al lado de las semillas y a 5 cm por debajo de ellas. El fertilizante potásico, considerando su poca movilidad en el suelo, también debe ser incorporado con la máquina sembradora, o bien mediante un trompo e incorporarlo con el último rastraje.

## II.6 Malezas

El período transcurrido durante los primeros 50 días posteriores a la emergencia es considerado un periodo crítico de la emergencia, en el cual el cultivo debe estar libre de malezas (Fundación Chile, 2011). Tomando en consideración la salinidad del suelo de la zona, su desarrollo es poco probable, por lo que no ha sido considerado su control para este análisis económico.

## II.7 Control de plagas y enfermedades

La aparición de gusanos del suelo (cortadores y barrenadores) es un problema común en el cultivo del maíz, en este sentido aplicaciones preventivas de insecticidas al suelo disminuyen las pérdidas asociadas. Este ataque se ve favorecido por la preexistencia de residuos de cosecha en el potrero previo a la siembra, cuando el maíz es cultivado en ciertas rotaciones, o cuando se practica monocultivo de maíz y preexistencia de malezas (Faiguenbaum, 1996). Las condiciones climáticas y de salinidad del lugar de estudio, en conjunto al escaso desarrollo agrícola difícilmente favorecerían el desarrollo de plagas del suelo y de hongos que pudiesen atacar al cultivo, razón por la cual su control no ha sido contemplado.

## III. Análisis económico

Los altos rendimientos obtenidos en nuestro país en el cultivo del maíz y los altos precios con los que se han comercializado los granos en los últimos dos años, en conjunto con el futuro auspicioso de los precios para la próxima temporada, podrían hacer pensar que su cultivo puede ser rentable en todo el territorio nacional, sin embargo esto no puede ser indicado sin la elaboración previa de una simulación de costos de acuerdo a las características de cada lugar y requerimientos de la variedad de maíz a sembrar, entre otros factores.

### III.1 Supuestos del Análisis

Dado que en nuestro país los biocombustibles aún no forman parte de la matriz energética y que su estado actual involucra a varios programas de investigación y desarrollo, el presente estudio no ha contemplado la factibilidad económica de la construcción de una planta de

etanol. La lejanía de la Comuna de Diego de Almagro hacia las posibles plantas procesadoras de bioetanol propuestas por García (2008) y Acosta-Espejo *et al.* (2010), y dado que el desarrollo de biocombustibles en nuestro país, como se mencionó anteriormente, se encuentra en etapa de investigación, el cultivo de Maíz Lluteño como alternativa productiva en la zona sólo sería viable bajo la premisa de implementarse una planta procesadora en su cercanía, retirando el insumo (grano) desde el huerto. De lo contrario, no existiría un canal de comercialización rentable.

Se ha contemplado una siembra con densidad de 83.333 semillas/hectárea y fertilización de 200-69-90 (N-P-K), parcializando  $\frac{1}{2}$  N a la siembra +  $\frac{1}{2}$  N a los 50 cm de altura, de acuerdo a Fuentes *et al.* (2009), con un periodo de desarrollo desde Septiembre a Marzo.

Debido a la similitud existente entre la salinidad de agua de riego y de suelo presente en el Valle de Lluta de acuerdo a Bastías *et al.* (2011) y los niveles en la Comuna de Diego de Almagro, y también a los rendimientos propuestos por Fuentes *et al.* (2009), es posible obtener, bajo esta densidad de siembra, un rendimiento de 22,5 ton de materia seca. Esto se traduciría, de acuerdo a los porcentajes de repartición de biomasa (0,46% para mazorcas y 0,54% para rastrojos o residuos de cosecha) y considerando un 20% de humedad en mazorca y 10% de humedad en rastrojo, en 12,42 toneladas de rendimiento de mazorca y 13,37 toneladas de rastrojo.

Para este análisis no fue considerado el residuo de cosecha, a pesar de su potencial para la producción de bioetanol, puesto que su extracción desde el campo favorece procesos de erosión, en especial en suelos empobrecidos, como el común de los suelos de las zonas áridas y semi áridas, favoreciendo entonces el avance de la desertificación en la zona. Además, la elaboración de bioetanol a partir de mazorca y material lignocelulósico (rastrojo) requiere de procesos diferentes de elaboración.

En base al cultivo del maíz Lluteño se elaboró un estado de resultados en base a una hectárea (**Anexo 11, Figura B19**), el cual se utilizó como base para la confección de un flujo de proyecto puro con horizonte a diez años, para así considerar su vida útil desde un punto de vista comercial con posible rotación de cultivo, en caso de que no se desarrollara en la zona una planta elaboradora de bioetanol, por lo anteriormente descrito.

Los precios de los fertilizantes fueron obtenidos desde las ediciones entre los meses de Septiembre a Noviembre de la Revista del Campo de El Mercurio y los costos de maquinaria fueron obtenidos desde cotizaciones con la empresa Samac. Estos costos se presentan de forma anual en el **Anexo 11 (Figura B19)**.

El cálculo de la mano de obra para la jornada hombre se realizó a partir de la remuneración promedio en la actividad de la Agricultura en la Comuna de Diego de Almagro, de acuerdo al Sistema de Información Laboral (SIL)<sup>12</sup> del Ministerio del Trabajo, de \$700.232 menos un 20%,

---

<sup>12</sup> [http://www.sil.gob.cl/InterHtml.Asp?NameHtml=S09\\_C3202\\_201206\\_pto.asp](http://www.sil.gob.cl/InterHtml.Asp?NameHtml=S09_C3202_201206_pto.asp)

considerando 22 días hábiles al mes de trabajo, por lo tanto se avaluó en \$25.500 por jornada. Esto último se presenta en el **Anexo 11 (Figura B20)**. El sueldo para un administrador, considerando que sería capaz de manejar un predio de 100 hectáreas, se presenta el **Anexo 11 (Figura B20)**.

Se consideró el valor medio de los precios promedios nacionales del maíz entre los años 2011 y 2012: 292,9 y 280,23 US\$/Ton, respectivamente, el cual corresponde a 286,6 US\$/Ton (Muñoz, 2012a), para la estimación de los ingresos en el flujo de caja. Sin embargo, considerando que en este caso el maíz Lluteño en la Comuna de Diego de Almagro, al ser regado con aguas claras tratadas del tranque de relaves, sería incapaz de competir a nivel nacional, ya que no sería posible su consumo tanto por humanos y/o animal, se estimó a partir del flujo de caja un valor base a partir del cual el negocio sería rentable y otros valores porcentuales respecto del valor comercial del maíz referencial para este estudio (US\$286/Ton). A estos se les realizó análisis de sensibilidad de acuerdo a los factores críticos, con el fin de analizar posibles precios de comercialización y su sensibilidad ante diferentes escenarios de cambio frente al precio del dólar, costo de insumos y de mano de obra, sin considerar el consumo de energía, ya que los combustibles serían proporcionados por el servicio de arriendo de maquinaria para la preparación del suelo.

Debido a la disponibilidad de agua de riego, se consideró riego gravitacional por surcos. Se valoró el terreno como arriendo, para así representar el posible uso alternativo del suelo.

La tasa de cambio utilizada fue de \$486, como se mencionó anteriormente. La tasa de descuento utilizada fue de un 12% para comparar su rentabilidad con la obtenida por el cultivo de la Jojoba.

Se ha considerado una rotación en el uso del suelo para el cultivo del Maíz Lluteño para así evitar disminuciones del rendimiento a causa de la salinidad a lo largo del tiempo, de esta manera no se realizaría un monocultivo.

Cabe mencionar que en este flujo no ha sido incluido el capital de operación puesto que se trata de un cultivo anual en el que todos los costos operativos son realizados año a año.

### **III. 3 Resultados del Análisis Económico**

El resultado del flujo de proyecto puro para el cultivo del maíz Lluteño en base al precio medio comercial del maíz en el país entre los años 2011 y 2012, en un horizonte de diez años y en base a una superficie de 1 hectárea, se presenta como una alternativa rentable, dada la tolerancia a la salinidad y los buenos rendimientos esperados, con una tasa interna de retorno (TIR) de 73% y un VAN de \$1.322.451, y capaz de recuperar el capital al segundo año (**Anexo 11, Figura B21**).

El análisis de sensibilidad según variaciones en el precio de venta demuestra que el fracaso del proyecto estaría dado si el precio disminuyera a US\$239/Ton y su punto de equilibrio sería a partir de US\$239,1/Ton, siendo el escenario más favorable posible el de US\$286,6/Ton (**Anexo 11, Figura B22**).

El precio de venta de US\$286,6/Ton es, lógicamente, el más favorable respecto a los otros escenarios analizados. En comparación a los otros factores, es más sensible ante una disminución del valor del dólar: con una disminución de 17% del valor del dólar a \$405 el proyecto pierde su rentabilidad. En cambio, muestra una sensibilidad secundaria al costo de los insumos, soportando un aumento de ellos hasta un 55%. Frente al costo de la mano de obra, el negocio deja de ser rentable ante un aumento de 71% de ella. En general, al presentar un mayor valor de venta, percibe mayores ingresos que le permiten amortizar de mejor manera variaciones en estos factores (**Anexo 11, Figuras B22 y B23**).

Los otros tres precios de venta cotejados, respecto de US\$286,6/Ton, corresponden al 90%, 87,5% y 85%. Es decir, se evaluaron precios de venta de US\$257,9/Ton, US\$252,1/Ton y US\$243,6/Ton (**Anexo 11, Figura B22**).

A medida que disminuye el precio de venta, aumenta la sensibilidad ante los factores críticos, manteniéndose el orden de mayor sensibilidad ante variaciones en el precio del dólar al afectar negativamente los ingresos, luego los insumos y finalmente la mano de obra.

A un valor de venta de US\$257,9/Ton, sólo es capaz de soportar una disminución de 7,5% del valor del dólar. Luego, a un precio de venta de US\$252,1/Ton cuando disminuye en un 5,35% el valor de la moneda americana, el cultivo ya no es rentable y, finalmente, a US\$243/Ton con una reducción de 2,06% del precio del dólar ocurre el fracaso del proyecto (**Anexo 11, Figuras B24, B25 y B26**).

El aumento de precio de los insumos y mano de obra de 22% y 28%, respectivamente, resultan en el fracaso para el precio de venta de US\$257,9/Ton (**Anexo 11, Figura B24**), luego al vender a US\$252,1/Ton este proyecto fracasaría si aumentan en 15% y 20% (**Anexo 11, Figura B25**), respectivamente y finalmente, aumentos de 6% y 7%, respectivamente, para el precio de venta de US\$243,6/Ton (**Anexo 11, Figura B26**).

Como ejercicio adicional se añadieron por separado los costos de operación medios anuales para el tratamiento de aguas, combinación 1 y 2, de acuerdo a lo estimado por BioPlanta presentado en el Informe de Consolidación del mes de Diciembre. Bajo este escenario el cultivo del Maíz Lluteño sólo sería rentable si el valor del maíz fuera comercializado a partir de US\$315/Ton con un VAN de \$7.953 (tasa al 12% de descuento), TIR de 12% y siendo capaz de recuperar el capital de inversión al séptimo año, y desde los US\$294/Ton con un VAN de \$10.283, descontado a una tasa de 12%, TIR de 13% y capaz de recuperar el capital de inversión al séptimo año, respectivamente.

El cultivo del maíz Lluteño en la Comuna de Diego de Almagro representa una alternativa económica muy incierta, en base a los resultados descritos en los diferentes escenarios propuestos anteriormente, puesto que actualmente la generación de biocombustibles en Chile, en particular del bioetanol, aún se encuentra en etapa de investigación y desarrollo.

Más aún, no sería rentable económicamente al considerar solamente los costos operativos de las posibles plantas de tratamientos de aguas propuestas por BioPlanta, puesto que los precios de equilibrio señalados anteriormente se encuentran por sobre el precio medio anual obtenido por el maíz en el mercado interno entre los años 2011 y 2012 de acuerdo a Muñoz (2012a) e incluso al considerar que todos los escenarios evaluados se encuentran por sobre el precio de maíz calculado por García (2008) de US\$230/Ton para comenzar a generar retornos positivos en el flujo de caja de una planta elaboradora de maíz en nuestro país.

## **5. EVALUACIONES DE CALIDAD DEL ACEITE DE JOJOBA PRODUCIDO EN LA LOCALIDAD**

Para el cumplimiento de este objetivo específico, se tomó una muestra de semillas de jojoba del predio del Sr. Miguel Soto, en la localidad de Diego de Almagro. Estas semillas fueron limpiadas y enviadas a extracción de aceite, para finalmente someter el aceite extraído a un análisis de contenido de metales.

Dado que la plantación de jojoba del predio no se encuentra recibiendo ningún tipo de manejo agrícola con excepción del riego y, por lo tanto, no ha sido cosechada desde hace algunos años, se recolectó de ejemplares aún productivos las semillas que aún se encontraran en las plantas, así como también fueron colectadas algunas semillas encontradas en el suelo, provenientes de la producción de esta temporada. Dada la situación actual del predio, con una alta proporción de individuos muertos y escasa producción de los que siguen vivos, sólo se consiguió coleccionar una pequeña muestra de semillas, provenientes de diferentes individuos.

Las muestras fueron tomadas en una visita a Diego de Almagro en el mes de Abril y fueron conservadas en un lugar seco y a la sombra para evitar daños a la espera de ser enviadas para extracción de aceite, la cual se llevó a cabo en Agosto.

De la muestra de 760 g de semillas limpias de jojoba colectadas en el predio del Sr. Miguel Soto, en Diego de Almagro, se obtuvo una muestra de aproximadamente 200 ml de aceite de jojoba.

El proceso de extracción fue realizado por la empresa Carmín del Elqui S.A., previa limpieza a fondo de la prensa utilizada, con el fin de evitar contaminación de la muestra. El aceite extraído y la muestra testigo fueron enviados al Laboratorio de Suelos y Plantas del Centro de Investigación Minera y Metalúrgica (CIMM) para ser analizados.

Los análisis de calidad se basaron en la evaluación del contenido de aquellos metales encontrados en concentraciones elevadas en el agua de riego utilizada actualmente en el predio, proveniente

directamente del Tranque de relaves Pampa Austral. Los metales evaluados fueron: Boro (B), Arsénico (As), Molibdeno (Mo) y Manganeso (Mn).

Los resultados obtenidos fueron comparados con una muestra de aceite de jojoba “testigo” que se envió a analizar junto con la muestra proveniente de Diego de Almagro, correspondiente a aceite de jojoba comercializado con fines cosméticos por la empresa Carmín del Elqui S.A., proveniente de un predio ubicado en la Región de Coquimbo cuyas aguas de riego cumplen con la calidad exigida por la Nch1333. Los resultados de estos análisis se presentan en la **Tabla 50**.

**Tabla 50.** Concentraciones de B, As, Mo y Mn encontradas en las dos muestras de aceite de jojoba analizadas.

Muestra	Procedencia	Riego	B (mg/L)	As (mg/L)	Mo (mg/L)	Mn (mg/L)
1	Diego de Almagro	Aguas claras tranque de relaves	0,07	<0,025	<0,025	<0,025
2	Valle de Elqui	Agua de calidad de riego	0,02	<0,025	<0,025	<0,025

Los resultados obtenidos indican que el contenido de As, Mo y Mn se encuentran bajo el nivel de detección, lo cual quiere decir que el aceite no ha sido contaminado por la presencia en concentraciones elevadas de estos elementos en el agua de riego. Sólo se observan diferencias entre la muestra tomada en Diego de Almagro y la muestra testigo en el contenido de Boro (B), que en el caso de la muestra evaluada alcanza una concentración de 0,07 mg/L, versus la concentración observada en la muestra testigo, de 0,02 mg/L.

Es importante señalar que parte de las semillas tomadas como muestra para la extracción de aceite y posterior análisis fueron tomadas desde el suelo, debido a la escasa disponibilidad de estas en las plantas de jojoba. Esto puede llevar a suponer que las semillas colectadas pudieron haber sido contaminadas directamente por las aguas de riego, por contacto directo entre la semilla, el suelo y el agua de riego.

En el **Anexo 12** se presenta el listado de sustancias que no deben ser parte de la composición de productos cosméticos, es decir, los ingredientes prohibidos por la Comunidad Europea. En este listado, la única sustancia mencionada que contiene Boro en su composición es N,N-Dimethylanilinium tetrakis(pentafluorophenyl)borate.

Como complemento, el **Anexo 13** presenta los ingredientes cosméticos de uso o concentración limitados. En este listado se pueden encontrar algunos compuestos que contienen Boro, sin embargo, las concentraciones máximas aceptadas en el producto

final en todos los casos son mayores a las encontradas en los análisis del aceite de jojoba proveniente de Diego de Almagro.

Finalmente, se presenta el **Anexo 14**, el cual contiene el listado de ingredientes permitidos en productos cosméticos. En este listado se puede observar la presencia de varios productos que tienen Boro en su composición, entre los cuales se puede encontrar Ácido Bórico, Borato de Potasio, Borato de Sodio y Borato de Zinc, entre otros.

La información de los ingredientes permitidos, prohibidos y de uso limitado en cosméticos se encuentra disponible en la página web del Instituto de Salud Pública de Chile, [www.ispch.cl](http://www.ispch.cl).

Pese a que, con excepción del Boro, los resultados obtenidos de estos análisis no han manifestado una contaminación del aceite de jojoba por efecto de las aguas claras del Tranque de relaves Pampa Austral, utilizadas como agua de riego para el cultivo de las plantas de jojoba, sería recomendable evaluar la bioacumulación de estos elementos en los diferentes órganos de las plantas, con el fin de determinar hasta qué nivel las diferentes estructuras se encuentran libres de contaminación por estos elementos.

## OBJETIVO 5: DIFUSIÓN

Las actividades de difusión realizadas en el marco del presente estudio se describen a continuación.

### 1. LANZAMIENTO

El 12 de Abril se realizó el lanzamiento oficial de los proyectos del Fondo de Innovación a la Competitividad (FIC) 2011-2012, del Gobierno Regional Atacama. En esa oportunidad se realizó el lanzamiento oficial del presente proyecto. Esta actividad fue organizada por el Gobierno de la región de Atacama.

La Directora del proyecto, Dra. Rosanna Ginocchio, realizó una presentación oral del proyecto y, adicionalmente, se montó un stand con información adicional del proyecto (**Figura 59**), donde participaron Valentina Vesely del CEZA – Universidad de Chile y Rosanna Ginocchio del CIMM.



**Figura 59.** Stand de difusión del proyecto instalado durante el lanzamiento oficial de los proyectos FIC Atacama 2011-2012, organizado por el Gobierno Regional de Atacama.

### 2. ACCIONES DE DIFUSIÓN

#### 2.1 Díptico del proyecto

Se diseñó un díptico para apoyar la difusión general del proyecto, el que se adjunta en el **Anexo 16**.

## **2.2 Artículo de difusión general**

Se generó un artículo de difusión general del proyecto, el que fue publicado en el Boletín Minero de la Sociedad Nacional de Minería (SONAMI). Este artículo se adjunta en el **Anexo 17**.

## **2.3 Notas de prensa en canal local**

Durante la visita a terreno realizada por el equipo de trabajo del proyecto a comienzos del mes de Febrero, periodistas del canal de televisión de Diego de Almagro (Sonia y Eduardo) realizaron una entrevista en terreno a dos de los miembros del equipo de trabajo del proyecto (Drs. Nicolás Frank y Rosanna Ginocchio) y al Sr. Rodrigo Varela, Presidente de la Asociación Gremial de Agricultores Valle Nuevo, sobre el proyecto y sus implicancias. Esta entrevista fue mostrada el día 2 de Febrero en el canal de televisión local (Diego de Almagro).

Durante la reunión realizada con el Comité Técnico del proyecto el día 11 de Diciembre 2012, un periodista del canal de televisión de Diego de Almagro (Eduardo) realizó una entrevista a la directora del proyecto, Dra. Rosanna Ginocchio, al Sr. Miguel Soto (hijo), miembro de la Asociación Gremial de Agricultores Valle Nuevo, y a la Sra. Angélica Osorio, SEREMI de Agricultura de la Región de Atacama, sobre el proyecto, los resultados y sus implicancias. Esta entrevista fue mostrada en el canal de televisión local (Diego de Almagro).

## **3. REUNIONES DE TRABAJO CON EL COMITÉ TÉCNICO DEL PROYECTO**

### **3.1 Visita inicial a terreno por parte del equipo de trabajo del proyecto**

Entre el Lunes 30 de Enero y el Viernes 3 de Febrero se realizó una visita a terreno por parte de miembros de todo el equipo de trabajo del proyecto, a zonas pertinentes de la Comuna de Diego de Almagro, Región de Atacama, y a una zona experimental en la Región de Antofagasta (División Chuqucamata de CODELCO).

Los profesionales involucrados en esta visita a terreno fueron los siguientes:

Institución	Nombre	Rol en el proyecto
CIMM	Rosanna Ginocchio	Directora del Proyecto
CEZA* – Universidad de Chile (co-desarrolladora nacional)	Nicolás Frank	Investigador Experto Asociado
	Valentina Veseley	Profesional Asociado
BioPlanta GmbH (co-desarrolladora Alemana)	Anja Hebner	Investigadora Experta Asociada
Universidad de Santiago de Chile	Claudia Ortiz	Experta invitada

\* Centro de Estudios de Zonas Áridas

Los objetivos de esta visita a terreno fueron:

- Conocer *in situ* el tranque de relaves Pampa Austral, el canal de evacuación de aguas claras y los puntos de entrega de las aguas claras a terceros, para su uso en riego de cultivos experimentales de jojoba y olivos. Esta visita fue coordinada con el Sr. Yermolay Peralta, Ingeniero de estudios del Departamento de Medio Ambiente, Gerencia de Sustentabilidad y Asuntos Externos de la División El Salvador de CODELCO. Día de visita, Martes 31 de Enero, durante la mañana.
- Conocer *in situ* las plantaciones experimentales de jojoba y olivos que han estado siendo regadas con aguas claras de relaves desde el año 2009/2010. Estas visitas se coordinaron con el Sr. Yermolay Peralta de CODELCO Salvador y con los Sres. Sr. Rodrigo Varela, Presidente de la Asociación Gremial Valle Nuevo, y el Sr. Miguel Soto de la empresa desarrollo Agrícola del Desierto. Día de visita, martes 31 de Enero.
- Visitar una zona experimental de tratamiento de aguas claras de relaves en la División Chuquicamata de CODELCO, Región de Antofagasta, por medio de la tecnología de humedales artificiales, en el marco de un proyecto CORFO liderado por la Universidad de Santiago de Chile (Directora de Proyecto, Dra. Claudia Ortiz) y apoyado por la empresa Alemana BioPlanta, uno de los co-ejecutores del presente proyecto. Esta experiencia es única en su tipo en el país, por lo que nos entregó antecedentes relevantes para el proyecto. Días de visita, 2 y 3 de Febrero.
- Recabar mayores antecedentes del sitio de interés del proyecto y se aclararon dudas sobre distintos aspectos relevantes al proyecto.

### **3.2 Reuniones de trabajo y discusión con el Comité Técnico del proyecto**

#### **I. Marzo 2012**

El 11 de Marzo 2011 se realizó una reunión de trabajo con representantes del Comité Técnico del proyecto (**Figura 60**). Esta reunión se realizó en la ciudad de Diego de Almagro. Los asistentes a esta actividad se indican en el **Anexo 18**; la expositora de los resultados fue la Dra. Rosanna Ginocchio del CIMM. El objetivo de esta reunión fue informar sobre los avances del proyecto (objetivos específicos 1 y 4), definir las meta-objetivo de calidad de aguas post-tratamiento de las aguas claras de relave del Tranque Pampa Austral y recabar información relevante por parte de los representantes.

#### **II. Octubre 2012**

El día miércoles 24 de Octubre de 2012, se realizó una reunión de avance de resultados con el Comité Técnico del proyecto (**Figura 61**). Esta reunión se realizó en la ciudad de Diego de Almagro. Los asistentes a esta actividad se indican en el **Anexo 18**; los expositores de los resultados fueron el Dr. Nicolás Frank y Valentina Vesely del Centro de Estudios de Zonas Áridas (CEZA) de la Universidad de Chile, quienes presentaron los avances para el objetivo específico 4 del proyecto, y la Dra. Rosanna Ginocchio del CIMM, quien presentó los avances para los objetivos 1, 2 y 5 del proyecto.

Esta reunión permitió dar a conocer y discutir los resultados obtenidos hasta el mes de Septiembre y verificar si algunas decisiones técnicas tomadas por los ejecutores del proyecto eran adecuadas para los miembros del Comité Técnico. El generar consenso entre las partes fue fundamental para seguir avanzando en forma adecuada con las actividades restantes comprometidas en el proyecto, como las del objetivo específico 3 y algunas del objetivo específico 4.



**Figura 60.** Reunión de los ejecutores del proyecto con miembros del Comité Técnico en la Biblioteca Pública de la ciudad de Diego de Almagro.



**Figura 61.** Reunión de los ejecutores del proyecto con miembros del Comité Técnico en la Biblioteca Pública de la ciudad de Diego de Almagro.

### III. Diciembre 2012

El día martes 11 de Diciembre de 2012, se realizó la última reunión de avance de resultados con el Comité Técnico del proyecto (**Figura 62**). Esta reunión se realizó en la ciudad de Diego de Almagro. Los asistentes a esta actividad se indican en el **Anexo 18**; los expositores de los resultados fueron el Dr. Nicolás Frank y Valentina Vesely del Centro de Estudios de Zonas Áridas (CEZA) de la Universidad de Chile, quienes presentaron los avances para el objetivo específico 4 del proyecto, el Dr. André Gerth, Gerente General de BioPlanta, quien presentó los avances de los objetivos específicos 2 y 3, y la Dra. Rosanna Ginocchio del CIMM, quien presentó los avances para el objetivo 1 del proyecto, las conclusiones generales y proyecciones del proyecto.



**Figura 62.** Reunión de los ejecutores del proyecto (izquierda) con miembros del Comité Técnico y del Gobierno Región de Atacama (derecha) en la Biblioteca Pública de la ciudad de Diego de Almagro.

### 4. TALLER DE TRANSFERENCIA

Durante la visita realizada el 11-12 de Diciembre a Diego de Almagro, se realizó la transferencia de los resultados del proyecto a miembros de la Asociación Gremial de Agricultores Valle Nuevo y de la empresa desarrollo Agrícola del Desierto, ambos de Diego de Almagro.

Durante esta actividad se explicaron con mayor detalle las alternativas seleccionadas de tratamiento de las aguas claras del tranque Pampa Austral, los cultivos potenciales para la zona (considerando la restricción de uso para consumo humano y animal de los productos) y se discutieron las proyecciones a futuro de los resultados del presente proyecto.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las principales conclusiones obtenidas a partir del presente estudio y algunas recomendaciones relevantes de considerar al término del mismo se detallan a continuación.

### 1. CONCLUSIONES

#### 1.1 Características de las aguas claras del tranque Pampa Austral y metas-objetivo de tratamiento

Las aguas naturales usadas por la Planta de concentración de minerales sulfurados de cobre por flotación de la División Salvador de CODELCO, consideradas como la calidad de agua basal o background de la zona de estudio, poseen altos contenidos de cloruros ( $990 \text{ mg L}^{-1}$ ), sulfatos ( $1.904 \text{ mg L}^{-1}$ ) y algunos elementos traza (e.j. Boro  $11 \text{ mg L}^{-1}$ ), además de alta conductividad ( $4.110 \text{ umhos cm}^{-1}$ ), debido a que derivan, en parte, de sales andinos. La calidad química de estas aguas naturales limitaría el tipo de cultivos que podrían ser regadas con ellas y expondría a los suelos a procesos de salinización, si es que fueran usadas para riego agrícola.

El proceso de concentración de minerales sulfurados de cobre por flotación de la División Salvador de CODELCO agrega nuevos compuestos y elementos químicos a las aguas naturales, determinando incrementos en los valores de Molibdeno, Manganeseo, Arsénico, sulfatos, cloruros y conductividad, los que se evidencian en la calidad química de las aguas claras del tranque de relaves Pampa Austral.

Las regulaciones nacionales vigentes impiden que las aguas claras del tranque Pampa Austral puedan ser descargadas a cursos superficiales de agua, si es que no son previamente tratadas para alcanzar la calidad de las aguas originales (entrantes a la Planta de Flotación). Como las aguas claras no están siendo tratadas, estas han sido utilizadas en procesos mineros por parte de terceros (Minera Trinidad) y para el riego experimental de cultivos que no son de consumo humano o utilizados para forraje de animales (principalmente Jojoba), según lo autorizado en la Resolución de Calificación Ambiental (RCA N° 016 del 24 de Enero del 2011) de la División Salvador, obtenida para el proyecto *Modificación Ampliación Tranque Pampa Austral, IV Etapa*.

En base a lo establecido en las regulaciones relacionadas con la descarga de aguas industriales (DS 90), en las normas chilenas relacionadas con las aguas para distintos usos, incluido el riego (NCh 1.333) y a lo discutido en el Comité Técnico del presente proyecto, se definieron dos escenarios meta-objetivo de calidad de las aguas claras para su tratamiento, las que permitan cumplir con las regulaciones vigentes y con el tipo de cultivos que se desea desarrollar en la zona.

- ✓ Escenario 1: Las aguas claras descargadas deben cumplir con los valores máximos establecidos en el DS 90 para cursos de aguas superficiales, independientemente de los valores de los elementos/compuestos en las aguas naturales en el punto de captación. En este escenario, los elementos/compuestos presentes en las aguas claras de relave que necesitan ser tratados y los valores máximos aceptables a los que se debe llegar, son los siguientes: Boro (reducir desde promedio de  $8,7 \text{ mg L}^{-1}$  a  $0,75 \text{ mg L}^{-1}$ ), cloruros (reducir desde promedio de  $2.879 \text{ mg L}^{-1}$  a  $400 \text{ mg L}^{-1}$ ) y sulfatos (reducir desde promedio de  $2.883 \text{ mg L}^{-1}$  a  $1.000 \text{ mg L}^{-1}$ ).

- ✓ Escenario 2: Las aguas claras descargadas deben asimilarse a la calidad de las aguas 'naturales'; en este caso se considera a estas aguas como a las entrantes a la Planta de Flotación de CODELCO-Salvador. En este escenario, los elementos/compuestos presentes en las aguas claras de relave que necesitan ser tratados y los valores máximos aceptables a los que se debe llegar, son los siguientes: Boro (reducir desde promedio de 8,7 mg L<sup>-1</sup> a 7,76 mg L<sup>-1</sup>), cloruros (reducir desde promedio de 2.879 mg L<sup>-1</sup> a 990 mg L<sup>-1</sup>), sulfato (reducir desde promedio de 2.883 mg L<sup>-1</sup> a 1.904 mg L<sup>-1</sup>), Arsénico (reducir desde promedio de 0,234 mg L<sup>-1</sup> a 0,14mg L<sup>-1</sup>), Manganeseo (reducir desde promedio de 0,253 mg L<sup>-1</sup> a < 0,01 mg L<sup>-1</sup>), Molibdeno (reducir desde promedio de 1,0 mg L<sup>-1</sup> a < 0,01 mg L<sup>-1</sup>) y conductividad (reducir desde promedio de 11.795 umhos cm<sup>-1</sup> a 4.110 umhos cm L<sup>-1</sup>).

## 1.2 Tecnologías de tratamiento para las aguas claras del Tranque Pampa Austral

Existen diversas alternativas de tratamiento para las aguas claras del tranque Pampa Austral. Sin embargo las tecnologías basadas en el tratamiento pasivo tienen mejores relaciones costo-efectividad, menores impactos ambientales y son más simples de operar y manipular que los tratamientos activos. Las nueve tecnologías de tratamiento pasivo pre-seleccionadas (sedimentación, filtro de arena, enclamiento, tratamiento pasivo biológico anaeróbico, filtro de gravilla plantado, aireación, precipitación con filtro de hierro y sales de hierro, precipitación con peróxido de hidrógeno e intercambio iónico con zeolita) permitirían la remoción de la mayoría de los contaminantes presentes en las aguas clara del Tranque Pampa Austral a los niveles de la meta-objetivo definidas. Sin embargo, ninguna de ellas sería capaz de remover, por sí sola, todos los compuestos/elementos de interés desde las aguas claras del Tranque Pampa Austral.

El tratamiento combinado de las aguas claras, por medio de la combinación de dos tecnologías de tratamiento usadas en forma secuencial, permitiría mejorar el rendimiento en la remoción de los contaminantes y cumplir las meta-objetivo definidas. Estas combinaciones de tecnologías tendrían bajos costos de inversión y de tratamiento, además de bajos impactos ambientales. De las combinaciones posibles, las dos más adecuadas son:

- ✓ Combinación 1: filtro de arena y filtro pasivo biológico anaeróbico.
- ✓ Combinación 2: filtro pasivo biológico anaeróbico y filtro de gravilla plantado.

Ambas combinaciones de tratamiento se clasifican como tecnologías pasivas de tratamiento, porque no requieren de supervisión, control y mantención permanente, tienen bajos requerimientos de energía, no requieren fungibles y son simples de operar. Tienen un amplio rango de aplicaciones y pueden ser fácilmente adaptadas, tanto en forma como en tamaño, a las condiciones específicas de sitio.

Los costos estimados de tratamiento de las aguas claras a los valores meta-objetivo definidos (incluyendo operación, depreciación, mantención y desmantelamiento) ascienden a 70 CLP \$/m<sup>3</sup> para la combinación 1 y a 140 CLP \$/m<sup>3</sup> para la combinación 2. Aunque los costos del tratamiento combinado 2 son el doble del tratamiento combinado 1, su eficiencia en la remoción de los contaminantes de interés es mayor; adicionalmente los impactos ambientales potenciales de la combinación 2 son menores a los de la combinación 1.

### 1.3 Cultivos técnica y económicamente viables para la comuna de Diego de Almagro

Teniendo en cuenta la restricción del uso de aguas tratadas del tranque de relaves Pampa Austral exclusivamente para productos agrícolas que no sean destinados al consumo humano ni animal, según lo autorizado en la Resolución de Calificación Ambiental (RCA N° 016 del 24 de Enero del 2011) de la División Salvador, obtenida para el proyecto *Modificación Ampliación Tranque Pampa Austral, IV Etapa*, las opciones de cultivos técnicamente viables se restringen en forma importante.

Los análisis de suelo y la caracterización climática (datos existentes y zonificación agroclimática realizada por el presente estudio, respectivamente) permiten concluir que los cultivos técnicamente viables son:

- ✓ Jojoba (*Simmondsia chinensis*) con fines cosméticos (en el caso que se pueda incluir dicho uso en la RCA del proyecto de modificación de la IV etapa del tranque Pampa Austral).
- ✓ Maíz Lluteño (*Zea mays* L. tipo amylacea) con fines energéticos.
- ✓ Caña brava (*Arundo donax*) con fines energéticos.
- ✓ Salicornia (*Salicornia bigelovii*) con fines energéticos.

El análisis económico de la Jojoba (producción de semillas y producción de aceite) y el maíz Lluteño, sin incluir los costos de mantención de las dos combinaciones de tratamiento de agua seleccionadas en el presente estudio, arrojan indicadores (VAN y TIR) positivos. Los mayores VAN se alcanzarían con la producción de aceite de Jojoba y las mayores TIR con la producción de maíz Lluteño.

Al incluir los costos de mantención de la planta de tratamiento de aguas, el cultivo de Jojoba para la producción de semillas no es rentable bajo la combinación 1 de tratamiento y genera un VAN positivo pero muy bajo para la combinación 2. Para el caso de la producción de aceite de Jojoba, el negocio se hace rentable para ambas combinaciones de tratamiento de agua. Al incluir los costos de tratamientos de agua para el cultivo del maíz Lluteño el negocio no es rentable para los precios de venta actuales de maíz para consumo humano.

El cultivo de la caña brava y la salicornia con fines energéticos se encuentra recién en etapa de investigación a nivel nacional e internacional por lo que su cultivo está sujeto al desarrollo de y validación técnica de dichos cultivos en el futuro.

### 1.4 Viabilidad técnica de la Jojoba

En base a la información climática recopilada y a la zonificación agroclimática realizada se descarta que la extensa mortandad de plantas de Jojoba existentes en el sector de Diego de Almagro haya sido causada por heladas. La zonificación agroclimática indica sectores adecuados para el cultivo de la Jojoba (con muy baja probabilidad de incidencia de heladas; heladas muy leves).

Los resultados del ensayo de salinidad y anegamiento realizados en el presente estudio demuestran que la mortandad de plantas de jojoba puede atribuirse a un efecto del desplazamiento de las sales de la entre hilera hacia la sobre hilera por la incidencia de lluvias. Este efecto se ve aumentado en sectores de mal drenaje, en los que se produce anegamiento.

Los clones de Jojoba actualmente cultivados en Diego de Almagro presentan un nivel de tolerancia a la salinidad comparable con clones seleccionados por su tolerancia a la salinidad en la Universidad de Chile.

Los análisis del aceite de Jojoba extraído de semillas cosechadas en el sector de Diego de Almagro y regadas con aguas no tratadas del tranque Pampa Austral arrojaron niveles no detectables de Arsénico, Manganeso y Molibdeno. Los niveles de Boro superaron por un factor de 2,5 los niveles obtenidos en un aceite de Jojoba proveniente del valle de Elqui, regado con agua de riego no salina. El análisis cosmético del aceite indica que los niveles de Boro medidos en el aceite de Jojoba de Diego de Almagro no son incompatibles con su uso con fines cosméticos, según las normas de la Comunidad Económica Europea.

Debido a que el estudio realizado para analizar la viabilidad técnica del cultivo de Jojoba se realizó en una plantación regada con aguas del tranque Pampa Austral que no han sido sometidas a tratamiento, es esperable que los daños por salinidad y los contenidos de Boro en el aceite disminuyan si las plantas se riegan con aguas tratadas.

## 2. RECOMENDACIONES

Se recomienda la construcción de una planta piloto de tratamiento de aguas claras del Tranque Pampa Austral, usando la combinación 2 de tratamiento, en las cercanías a una de las áreas de cultivos experimentales de Jojoba existentes en la localidad de Diego de Almagro, para poder dimensionar el tamaño de planta requerido y ajustar su funcionamiento. Adicionalmente, la instalación de una planta piloto en el área permitirá realizar una mejor estimación de los costos.

Específicamente, los objetivos de construir una planta piloto en el área de interés son los siguientes:

- ✓ Validar y mejorar la eficiencia de la tecnología de tratamiento según las condiciones sitio-específicas.
- ✓ Validar y mejorar la estabilidad de la eficiencia de tratamiento en base a un período semestral y anual de funcionamiento continuo.
- ✓ Determinar cuán a menudo y en qué grado debe ser rellenada la capa orgánica superior del filtro pasivo biológico anaeróbico.
- ✓ Determinar si se generan residuos en el filtro de arena y en que magnitud, además de determinar si estos residuos deben ser removidos luego de algunos años de funcionamiento de la planta, para evitar malfuncionamiento de este filtro.
- ✓ Determinar cambios en la composición química de la arena y gravilla usados en los filtros durante la operación de la planta y concluir sobre las medidas que serán necesarias para el desmantelamiento y los costos totales de una planta de tratamiento de tamaño real

Los resultados obtenidos a partir de la construcción y operación de una planta piloto en el área de interés del presente estudio, permitirán elaborar un diseño ingenieril detallado para plantas de tratamiento de escala real, con una planificación adecuada de costos e instrucciones de operación

específicas para el sitio. De esta forma, se asegura que se construirá y operará una planta de tratamiento confiable y eficiente.

La única alternativa rentable de producción agrícola para la localidad de Diego de Almagro sería la producción de aceite de Jojoba con fines cosméticos. Para viabilizar dicha alternativa se recomienda lo siguiente:

- ✓ Incluir el uso cosmético en la RCA del proyecto de modificación de la IV etapa del tranque Pampa Austral.
- ✓ Plantar la Jojoba en sectores que presenten menor riesgo de heladas según la zonificación agroclimática desarrollada.
- ✓ Plantar en sectores de adecuado drenaje.
- ✓ Utilizar riego por surcos y realizar riegos de lavado de sales periódicamente.
- ✓ Utilizar clones de alta tolerancia a la salinidad.
- ✓ Alternar los sectores de plantación (plantación por etapas en distintos sectores).
- ✓ Validar, a escala piloto, mediante el establecimiento de Jojoba (siguiendo las recomendaciones anteriores), regadas con las aguas tratadas por la planta piloto.

Se debe considerar que la rentabilidad de la producción de aceite de Jojoba es positiva pero moderada y se ve fuertemente afectada por el valor del dólar, la mano de obra y el precio de venta. Al respecto, cabe resaltar que: (i) el valor de dólar ha mostrado una clara tendencia a la baja, (ii) el precio de la mano de obra ha mostrado una tendencia al alza y (iii) el precio del aceite de Jojoba, si bien se encuentra al alza, ha presentado una alta variabilidad histórica.

Realizar ensayos con caña brava y salicornia (esta última con la colaboración de la Universidad de Atacama que actualmente ejecuta un proyecto FIC-FNDR sobre este cultivo en la Región de Atacama) con el fin de evaluar la adaptación, crecimiento y rendimiento de las especies en la localidad de Diego de Almagro y bajo riego con las aguas tratadas por la planta piloto.

Evaluar el flujo real de agua tratada de la planta de tratamiento piloto, ya que un mayor flujo real puede incrementar la rentabilidad de los cultivos estudiados mientras un menor flujo puede hacer que todas las alternativas dejen de ser rentables.