



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**REMOCIÓN DE ARSÉNICO Y OTROS CONTAMINANTES UTILIZANDO  
HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL:  
EFECTO DEL TIPO DE MEDIO DE SOPORTE Y LA PRESENCIA DE  
VEGETACIÓN**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL

**PABLO IGNACIO ECHEVERRÍA PARDO**

PROFESORA GUÍA:  
KATHERINE LIZAMA ALLENDE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
ANA LUCÍA PRIETO SANTA  
GERARDO AHUMADA THEODULOZ

SANTIAGO DE CHILE  
2018

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
POR: PABLO ECHEVERRÍA PARDO  
FECHA: DICIEMBRE 2018  
PROF. GUÍA: KATHERINE LIZAMA ALLENDE**

**REMOCIÓN DE ARSÉNICO Y OTROS CONTAMINANTES UTILIZANDO  
HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL:  
EFECTO DEL TIPO DE MEDIO DE SOPORTE Y LA PRESENCIA DE VEGETACIÓN**

El arsénico es un metaloide altamente tóxico que se presenta de manera natural en el medio ambiente. La presencia de As en aguas naturales genera una amenaza a la salud humana. Los tratamientos convencionales utilizados actualmente remueven el contaminante de forma rápida y efectiva, pero poco sustentable y costosa en algunos casos. Los humedales construidos constituyen una alternativa ventajosa a los sistemas de tratamiento existentes, al presentar un bajo costo operacional y energético.

El objetivo de este trabajo es cuantificar la capacidad de remoción de arsénico y otros contaminantes de un sistema de humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal. El sistema lo conformaron doce celdas que operaron de manera independiente. La mitad de dichas celdas se construyeron con piedra caliza como medio de soporte; la otra mitad con zeolita. A su vez, para cada tipo de celda la mitad se vegetó con *Phragmites australis*, una planta macrófita utilizada frecuentemente en humedales construidos. La otra mitad se mantuvo como celdas de control. El sistema de humedales funcionó en dos períodos de operación, con una concentración de As de 2 mg/L en el afluente en la primera etapa, y de 3.5 mg/L en la segunda etapa, ambas concentraciones representativas de la calidad de agua del río Azufre, ubicado en el extremo norte de Chile. El sistema estuvo operativo durante 57 semanas en total, con un caudal promedio de entrada de 19 L/día en cada celda.

Para todas las celdas la remoción de As en ambos medios de soporte fue muy efectiva (>98%, en las dos etapas), así como también ambos removieron efectivamente metales como el Fe (>97%) y Pb (>99%). La remoción de contaminantes en general fue similar en celdas vegetadas y no vegetadas. La evapotranspiración promedio medida durante todo el período de operación en las celdas fue de 3.2 mm/día, alcanzándose una media de pérdidas de agua del 27% en verano y del 13% en invierno, además se obtuvieron valores similares a los estimados mediante el método FAO Penman-Monteith, con poca influencia de la vegetación. Los principales mecanismos de remoción de As fueron la coprecipitación con hidróxidos de hierro en la caliza y la sorción al medio en el caso de la zeolita.

Resulta fácil ignorar la esclavitud, cuando uno no es esclavo.

A los trillones de animales violentados y asesinados por la especie humana,  
mis pensamientos y corazón están con ustedes.

Liberación animal, ahora.

## **Agradecimientos**

A mi ñuke, Olivia, no sé cómo agradecerle ni verbalizar todo lo que has hecho, este título es para ti. A mi lamngen Rosario, gracias por ser tan amorosa y talentosa, a mi peñi Pedro, a mi chaw Jidio, gracias por soportarme. A mi chuchu Virginia, por inspirarme, a mi lamngen Mariana y su familia, gracias por tanto cariño. A Suertudo (ex sarnoso), el perro más fabuloso y rebelde del mundo entero. Al resto de tañi reñma también les agradezco.

Gracias a todos los maestrxs que me enseñaron en la facultad, colegios y la vida. En especial a mi profesora Katherine, por guiarme y ayudarme en todo este proceso y en otros anteriores, es una tremenda ser humana y tiene un gran corazón. A la profesora Ana Lucía y al profesor Gerardo por sus correcciones y comentarios a este trabajo, muchas gracias, les admiro.

A mis amigos del colegio y de la vida, en especial al Goleo, Joaco, Mono, Jorge y Nacho gracias por su amistad incondicional. Al resto de cabros del colegio con los que sigo compartiendo, la buena onda y el cariño siempre estará, al igual que las juntas en cualquier contexto.

Agradezco a todos los cabrxs con los que compartí en la oficina este tiempo, aunque fuere poquito Catalina, Cami, Max, Óscar, Claudio, Frodo, Ángela, Javi, Juan, los Felipes, Ariel (colado) y Feña, gracias por tantas sacadas de vuelta, bienvenidas hidráulicas y demases. Sumo también a todos los hidráulicxs, civiles y beauchefianxs con los que compartí en algún momento de la carrera, gracias por la buena onda, las risas, las discusiones y las tareas jeje.

A mis amigos de civil: Lucho, Trejo, Nacho, Alo, Claudio, Coni, Felo, Hans, Katy, Daslav gracias por su cariño, compartir su amistad, viajes a la playa y chelas después de los nefastos controles.

A todas las personas con quienes compartí durante mi estadía en ñoñef, partiendo por los cabrxs de la sección 4, los sólidos, los pesebres, los simios (estupides garantizada), los cabros con los que jugué a la pelota (desde el Niupi a Osasimios), los chiquillos de TokoRiko. A lxs cabrxs de Beauchef Antiespecista, ha sido un placer compartir con ustedes este último año de universidad, sus ganas de detener la masacre animal y cambiar el mundo me inspiran, go vegan!

Al Jose por bancarme en todos los experimentos y análisis de muestras. A la Vivi y la Jaque me entretuvieron mucho con sus conversas en el laboratorio y oficina, las quiero mucho, agradezco mucho lo que compartimos. A las tías y tíos del aseo, guardias y funcionarios con los que compartí, gracias por ser tan distintos y especiales, hacen de la facultad un lugar más humano.

Agradezco al Proyecto Fondecyt 11150401, por el financiamiento. Al Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes" (CEGA) por análisis de muestras. También agradezco al Departamento de Ingeniería Mecánica por facilitar el lugar para instalar el montaje experimental.

Por último agradezco al señor Gary Alexis Medel Soto por ser un ejemplo de valor para la UC, la selección y el mundo entero. Mi avatar de u-cursos inamovible y justificadísimo.

# Tabla de Contenido

<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>: INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1	MOTIVACIÓN	1
1.2	OBJETIVOS	1
1.2.1	<i>General</i>	1
1.2.2	<i>Específicos</i>	2
1.3	ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO	2
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>3</b>
2.1	EL ARSÉNICO COMO CONTAMINANTE	3
2.1.1	<i>Arsénico y su presencia en el agua</i>	3
2.2	TRATAMIENTOS CONVENCIONALES DE REMOCIÓN DE ARSÉNICO DEL AGUA	6
2.2.1	<i>Situación nacional</i>	7
2.3	HUMEDALES CONSTRUIDOS	8
2.3.1	<i>Componentes de un humedal</i>	9
2.3.1.1	Medio de soporte	9
2.3.1.2	Vegetación	10
2.3.2	<i>Evapotranspiración en humedales construidos</i>	10
2.3.2.1	Efecto de la evapotranspiración en el tiempo de retención hidráulico	11
2.3.2.2	Estimación de la evapotranspiración	12
2.3.3	<i>Humedales construidos para tratamiento de arsénico</i>	13
2.4	CASO DE ESTUDIO: RÍO AZUFRE	15
2.5	NORMATIVA	16
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>: METODOLOGÍA DE TRABAJO</b>	<b>18</b>
3.1	MATERIALES UTILIZADOS	18
3.2	SISTEMA DE HUMEDALES	19
3.2.1	<i>Operación</i>	21

3.3	AGUA ÁCIDA SINTÉTICA .....	22
3.4	TOMA Y ANÁLISIS DE MUESTRAS .....	23
3.4.1	<i>Instrumentos y equipos utilizados en laboratorio</i> .....	24
3.5	MEDICIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	25
3.5.1	<i>Medición directa</i> .....	26
3.5.2	<i>Medición estimada</i> .....	26
<b>CAPÍTULO 4 : RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>		<b>27</b>
4.1	RENDIMIENTO GENERAL DEL SISTEMA .....	27
4.2	REMOCIÓN DE CONTAMINANTES .....	28
4.2.1	<i>Arsénico</i> .....	29
4.2.2	<i>Hierro</i> .....	30
4.2.3	<i>Boro</i> .....	31
4.2.4	<i>Aluminio</i> .....	32
4.2.5	<i>Manganeso</i> .....	33
4.2.6	<i>Zinc</i> .....	34
4.2.7	<i>Plomo</i> .....	35
4.2.8	<i>Sulfato</i> .....	36
4.2.9	<i>Otros contaminantes</i> .....	37
4.3	PARÁMETROS <i>IN SITU</i> .....	37
4.3.1	<i>pH</i> .....	38
4.3.2	<i>Potencial redox</i> .....	39
4.3.3	<i>Conductividad eléctrica</i> .....	40
4.3.4	<i>Turbiedad</i> .....	41
4.3.5	<i>Dureza</i> .....	42
4.3.6	<i>Alcalinidad</i> .....	43
4.3.7	<i>Sólidos disueltos totales</i> .....	44
4.4	FACTORES EXTERNOS .....	44

4.5	COMPARACIÓN CON TRABAJOS AFINES.....	47
4.6	ANÁLISIS DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DIRECTA Y ESTIMADA .....	48
4.7	TIEMPO DE VIDA ÚTIL.....	50
<b>CAPÍTULO 5</b>	<b>: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>53</b>
5.1	EFECTO DEL MEDIO .....	53
5.2	EFECTO DE LA VEGETACIÓN .....	54
5.3	EVAPOTRANSPIRACIÓN Y TIEMPO DE RETENCIÓN .....	54
5.4	VARIACIÓN ESTACIONAL.....	55
5.5	POTENCIAL APLICACIÓN .....	55
5.6	RECOMENDACIONES.....	56
<b>CAPÍTULO 6</b>	<b>: BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>58</b>
<b>CAPÍTULO 7</b>	<b>: ANEXOS .....</b>	<b>61</b>
	ANEXO A: ESTIMACIÓN $ET_0$ CON MÉTODO FAO PENMAN – MONTEITH.....	61
	<i>Radiación neta <math>R_n</math></i> .....	61
	<i>Flujo de calor del suelo <math>G</math></i> .....	63
	<i>Temperatura media del aire</i> .....	63
	<i>Velocidad del viento <math>u_2</math></i> .....	63
	<i>Presión de vapor de saturación <math>e_s</math></i> .....	64
	<i>Presión real de vapor <math>e_a</math></i> .....	64
	<i>Pendiente de la curva de presión de vapor <math>\Delta</math></i> .....	64
	<i>Constante psicrométrica <math>\gamma</math></i> .....	65
	ANEXO B: CURVAS GRANULOMÉTRICAS .....	66
	ANEXO C: DATOS SIN CORREGIR POR EVAPOTRANSPIRACIÓN .....	68

## Índice de Figuras Informe

Figura 2.1: Distribución mundial de regiones contaminadas con arsénico. Se muestra la fuente de As y el número de personas en riesgo a exposición crónica (Garelick & Jones, 2008). .....	4
Figura 2.2: Especiación del arsenito (izquierda) y arseniato (derecha) en función del pH (Jaque, 2017). .....	5
Figura 2.3: Diagrama Eh-pH para especies acuosas de As en el sistema As-O <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O a 25°C y 1 bar de presión (Smedley & Kinniburgh, 2002). .....	5
Figura 2.4: Variación del tiempo de retención en función del caudal evapotranspirado (Jaque, 2017). .....	12
Figura 2.5: Procesos de remoción de arsénico en humedales construidos (Lizama et al., 2011b). .....	14
Figura 2.6: Río Azufre, ubicado en la cuenca del río Lluta (Jaque, 2017). .....	15
Figura 3.1: Esquema celda de humedal construido (Jaque, 2017). .....	19
Figura 3.2: Distribución espacial de celdas en sistema de humedales, la “v” en verde indica presencia de vegetación. .....	20
Figura 3.3: Instalación experimental. Foto: Ignacio Jaque. .....	21
Figura 4.1: Perfil de concentraciones de As total afluente y efluente según tipo de tratamiento. .....	29
Figura 4.2: Perfil de concentraciones de Fe total afluente y efluente según tipo de tratamiento. .....	30
Figura 4.3: Perfil de concentraciones de B total afluente y efluente según tipo de tratamiento. .....	31
Figura 4.4: Perfil de concentraciones de Al total afluente y efluente según tipo de tratamiento. .....	32
Figura 4.5: Perfil de concentraciones de Mn total afluente y efluente según tipo de tratamiento. .....	33
Figura 4.6: Perfil de concentraciones de Zn total afluente y efluente según tipo de tratamiento. .....	34

Figura 4.7: Perfil de concentraciones de Pb total afluente y efluente según tipo de tratamiento. .....	35
Figura 4.8: Perfil de concentraciones de sulfato total afluente y efluente según tipo de tratamiento.....	36
Figura 4.9: Perfil de pH promedio del afluente y efluentes según tipo de tratamiento. ....	38
Figura 4.10: Perfil de Eh promedio del afluente y efluentes según tipo de tratamiento.....	39
Figura 4.11: Perfil de conductividad eléctrica promedio del afluente y efluentes según tipo de tratamiento.....	40
Figura 4.12: Perfil de turbiedad promedio del afluente y efluentes según tipo de tratamiento.	41
Figura 4.13: Perfil de dureza promedio del afluente y efluentes según tipo de tratamiento. ...	42
Figura 4.14: Perfil de alcalinidad promedio del afluente y efluentes según tipo de tratamiento. .....	43
Figura 4.15: Perfil de sólidos disueltos totales promedio del afluente y efluentes según tipo de tratamiento.....	44
Figura 4.16: Coloración presente en celda 3. Izquierda: Sistema con 46 días de operación. Derecha: Sistema con 150 días de operación. Fotos: Ignacio Jaque. ....	45
Figura 4.17: Coloración presente en celda 7. Un año y 2 meses de operación.....	45
Figura 4.18: Condiciones de flujo superficial en celdas CAL 08 y CAL 09, respectivamente. Octubre 2017. ....	46
Figura 4.19: Sólidos formados en la superficie de celdas con zeolita. Izquierda: Primer período de operación. Derecha: Segundo período de operación. ....	46
Figura 4.20: ET medida en humedales antes de la operación del sistema (Jaque. 2017) .....	48
Figura 4.21: ET medida en humedales durante la operación del sistema.....	49
Figura 4.22: ET medida y ETo estimada con método FAO Penman-Monteith .....	50
Figura 4.23: Volumen de agua tratado por celda.....	51
Figura 7.1: Curva granulométrica zeolita utilizada .....	66
Figura 7.2: Curva granulométrica caliza utilizada.....	67

## Índice de Tablas Informe

Tabla 2.1: Estados de oxidación del arsénico .....	3
Tabla 2.2: Lista de plantas de tratamiento que remueven arsénico en Chile (Adaptado de Hering et al., 2016).....	8
Tabla 2.3: Concentraciones promedio de especies presentes en el río Azufre. Adaptado de Guerra et al. (2016).....	16
Tabla 2.4: Tabla comparativa de criterios de calidad de agua potable. ....	17
Tabla 2.5: Tabla comparativa de criterios de calidad de agua destinada a regadío. ....	17
Tabla 3.1: Composición química de la piedra caliza guarello. Fuente: Ficha técnica piedra caliza guarello, CAP Acero. ....	18
Tabla 3.2: Composición química de zeolita utilizada. Fuente: Zeolita del Maule. ....	18
Tabla 3.3: Concentraciones objetivo, de agua potable y medidas para el agua ácida en ambos períodos de operación.....	23
Tabla 3.4: Límites de detección (LOD) por equipo.....	25
Tabla 4.1: Porcentaje de remoción promedio de cada contaminante. ....	27
Tabla 4.2: Resumen de eficiencias de remoción para iones en sistema de humedales.....	37
Tabla 4.3: Comparación con experiencias anteriores en humedales utilizados para la remoción de arsénico .....	47
Tabla 7.1: Datos celda CAL 01 en etapa 1 .....	68
Tabla 7.2: Datos celda CAL 02 en etapa 1 .....	69
Tabla 7.3: Datos celda CAL 03 en etapa 1 .....	70
Tabla 7.4: Datos celda ZEO 04 en etapa 1 .....	71
Tabla 7.5: Datos celda ZEO 05 en etapa 1 .....	72
Tabla 7.6: Datos celda ZEO 06 en etapa 1 .....	73
Tabla 7.7: Datos celda CAL 07 en etapa 1 .....	74
Tabla 7.8: Datos celda CAL 08 en etapa 1 .....	75

Tabla 7.9: Datos celda CAL 09 en etapa 1 .....	76
Tabla 7.10: Datos celda ZEO 10 en etapa 1 .....	77
Tabla 7.11: Datos celda ZEO 11 en etapa 1 .....	78
Tabla 7.12: Datos celda ZEO 12 en etapa 1 .....	79
Tabla 7.13: Datos celda CAL 01 en etapa 2 .....	80
Tabla 7.14: Datos celda CAL 02 en etapa 2 .....	81
Tabla 7.15: Datos celda CAL 03 en etapa 2 .....	82
Tabla 7.16: Datos celda ZEO 04 en etapa 2 .....	83
Tabla 7.17: Datos celda ZEO 05 en etapa 2 .....	84
Tabla 7.18: Datos celda ZEO 06 en etapa 2 .....	85
Tabla 7.19: Datos celda CAL 07 en etapa 2 .....	86
Tabla 7.20: Datos celda CAL 08 en etapa 2 .....	87
Tabla 7.21: Datos celda CAL 09 en etapa 2 .....	88
Tabla 7.22: Datos celda ZEO 10 en etapa 2 .....	89
Tabla 7.23: Datos celda ZEO 11 en etapa 2 .....	90
Tabla 7.24: Datos celda ZEO 12 en etapa 2 .....	91
Tabla 7.25: Agua ácida en etapa 1 .....	92
Tabla 7.26: Agua ácida en etapa 2 .....	93

# Capítulo 1: Introducción

## 1.1 Motivación

El agua es fundamental en la vida humana, por lo que el manejo y reutilización del recurso es inherente al desarrollo de la sociedad. Hoy en día existen diversos sistemas para el tratamiento de aguas. La mayoría corresponde a sistemas convencionales que requieren de altas cantidades de energía, personal capacitado y diversos insumos para su correcto funcionamiento. Como alternativa a ellos, se presentan los sistemas naturales, como los humedales construidos o artificiales, que son fácilmente operados y mantenidos a un bajo costo energético. Esto se debe a que los procesos de remoción son productos de la interacción entre las componentes naturales del humedal, es decir, el medio de soporte, la vegetación y los microorganismos.

El arsénico (As) es un elemento de características metaloides que se encuentra de manera natural en el medio ambiente. La exposición prolongada a fuentes de As puede generar diversos tipos de cáncer y otras enfermedades (WHO, 2010). La presencia de arsénico es un problema de nivel mundial (ver Figura 2.1), en la esfera nacional el arsénico se presenta principalmente en la zona norte, por ejemplo en el Río Azufre, ubicado en la XV Región de Arica y Parinacota. Dichas aguas presentan pH ácido y alto contenido de metales y contaminantes como arsénico, hierro, boro, plomo, aluminio, entre otros.

Los humedales construidos son sistemas de tratamiento naturales capaces de remover de las aguas contaminadas distintas sustancias como metaloides, metales, sólidos suspendidos, materia orgánica y nutrientes (Kadlec & Wallace, 2008). Varios estudios han mostrado la efectividad de humedales construidos en la remoción de arsénico de agua contaminada (Buddhawong et al., 2005; Fuentealba, 2017; Henry, 2015; Jaque, 2017; Vargas 2018). A su vez, Lizama (2013) utilizó piedra caliza y zeolita como medios de soporte, logrando elevadas eficiencias de remoción. La motivación de este trabajo es estudiar un sistema de tratamiento natural para remoción de arsénico y otros contaminantes, que sea económicamente viable para pequeñas comunidades rurales con altos niveles de arsénico en sus fuentes de agua, y que también pueda ser una alternativa complementaria a los sistemas de tratamiento convencionales.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 General

El objetivo general del trabajo título consiste en cuantificar la capacidad de remoción de arsénico y otros contaminantes en un sistema de humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial (HSSF) a escala de laboratorio, usando como medios de soporte zeolita y piedra caliza, y la planta *Phragmites australis* como vegetación.

## **1.2.2 Específicos**

1. Evaluar el funcionamiento del sistema de humedales construidos mediante el monitoreo de parámetros de calidad de agua del afluente (agua ácida) y efluente.
2. Identificar el efecto de la presencia de vegetación durante la operación del sistema.
3. Determinar el efecto del tiempo de operación del sistema en la capacidad de remoción de arsénico y otros contaminantes.
4. Estimar la vida útil del sistema a partir de estudios anteriores y los datos obtenidos en esta experiencia.

## **1.3 Organización del documento**

A continuación, se describe brevemente el contenido de los capítulos siguientes:

- i. Capítulo 1 “Introducción”: Se expone la motivación y objetivos del trabajo junto a la estructura del informe.
- ii. Capítulo 2 “Revisión bibliográfica”: Se presentan los fundamentos científicos que avalan el trabajo realizado. El capítulo presenta un carácter descriptivo al profundizar sobre el arsénico como contaminante, tratamientos de aguas, humedales construidos y el caso de estudio.
- iii. Capítulo 3 “Metodología de trabajo”: Se describe la metodología experimental del trabajo investigativo, en particular el montaje experimental, muestreo y mediciones.
- iv. Capítulo 4 “Resultados y discusión”: Se muestran los resultados más destacados de la experiencia, analizando la remoción de contaminantes, la variación de parámetros in situ y el efecto de la evapotranspiración. Se compara con trabajos anteriores.
- v. Capítulo 5 “Conclusiones y recomendaciones”: Se presentan las principales conclusiones logradas en base a los resultados. A su vez, se plantean recomendaciones para futuros trabajos atinentes.

# Capítulo 2: Revisión Bibliográfica

## 2.1 El arsénico como contaminante

El arsénico (As) es el elemento químico número 33, perteneciente al grupo 15 de la tabla periódica. Etimológicamente proviene del griego *arsenikon*, que significa potente. Posee características metaloides al presentar propiedades de elementos metálicos y no metálicos. El arsénico se encuentra de manera natural en las aguas, la corteza terrestre y la atmósfera (Henke, 2009; Carotenuto et al., 2015). Su presencia atmosférica es producto de las erupciones volcánicas, erosión producida por el viento, volatilización de suelos con contenido de arsénico y por procesos antropogénicos como las operaciones de fundición de material en hornos y la quema de combustibles fósiles (Smedley & Kinniburgh, 2002).

El arsénico se presenta en cuatro estados de oxidación, como lo muestra la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Estados de oxidación del arsénico

Nombre	Símbolos		Estado de oxidación
Gas arsina	As(-III)	$As^{-3}$	-3
Arsénico metaloide	As(0)	$As^0$	0
Arsénico trivalente	As(III)	$As^{+3}$	3
Arsénico pentavalente	As(V)	$As^{+5}$	5

El arsénico es conocido por su toxicidad, particularmente cuando la exposición ocurre por períodos prolongados de tiempo. La ingesta y exposición al arsénico está relacionada a cáncer pulmonar, al riñón, a la vejiga, a la piel y al páncreas (Lizama et al., 2011; Henke, 2009; Choong et al. 2007).

### 2.1.1 Arsénico y su presencia en el agua

La concentración de arsénico en aguas naturales varía en más de cuatro órdenes de magnitud, dependiendo de la fuente de As, la cantidad disponible y la geoquímica local (Smedley & Kinniburgh, 2002). Muchos estudios plantean que las aguas naturales contaminadas con arsénico son un problema a nivel mundial (OMS, 2011; Choong et al., 2007; Lizama et al., 2013; Carotenuto et al., 2014), razón por la cual encontrar formas de extraer el arsénico del agua resulta trascendental. Lo anterior se ilustra en la Figura 2.1 que muestra la distribución de regiones contaminadas con arsénico a nivel mundial y el número estimado de personas afectadas.

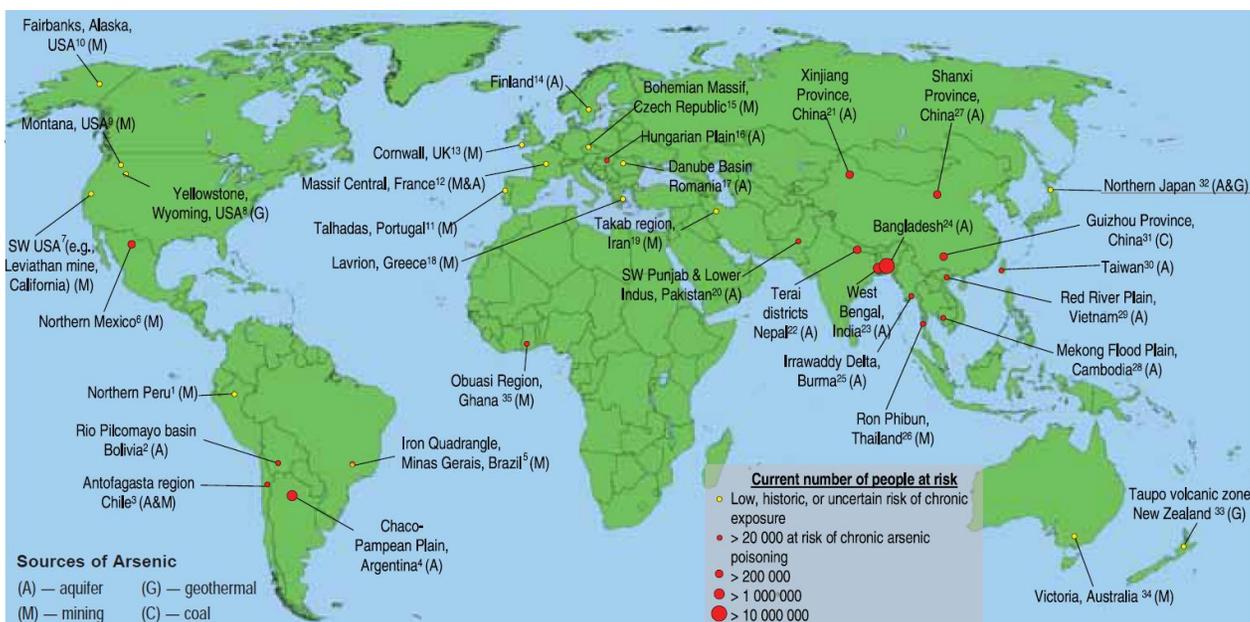
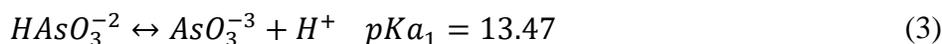
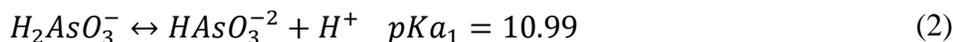
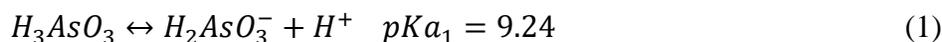


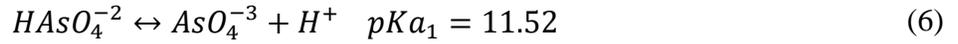
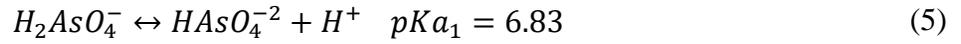
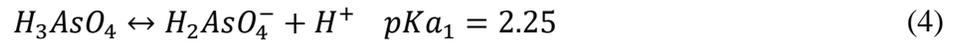
Figura 2.1: Distribución mundial de regiones contaminadas con arsénico. Se muestra la fuente de As y el número de personas en riesgo a exposición crónica (Garelick & Jones, 2008).

El pH y potencial redox (Eh) son los dos principales factores que controlan la especiación del arsénico en el agua, a su vez, la presencia de elementos como el hierro (Fe) también influye en su especiación (Lizama et al., 2013). El As se presenta en forma de arsenito ( $AsO_3^{-3}$ ) y arsenato ( $AsO_4^{-3}$ ), atribuido a As (III) y As (V), respectivamente (Lizama et al., 2011), siendo el arsenito mucho más soluble y tóxico. Bajo condiciones oxidantes y valores de pH menores a 6.9, la especie dominante es  $H_2AsO_4^-$ , pasando a  $HAsO_4^{2-}$  cuando aumenta el pH. El ácido arsénico ( $H_3AsO_4^0$ ) domina cuando el pH es bajo y se presentan condiciones fuertemente ácidas, mientras que el arseniato ( $AsO_4^{-3}$ ) se presenta bajo condiciones fuertemente alcalinas. Cuando se presentan condiciones reductoras y pH menor a 9.2, el ácido arsenioso ( $H_3AsO_3$ ) es la especie dominante, a medida que aumenta el pH se transforma en  $H_2AsO_3^-$  y  $HAsO_3^{2-}$ . Las ecuaciones 1, 2, 3, 4, 5 y 6 presentan dichos sistemas a condiciones de temperatura de 25°C y 1 bar de presión (notar que  $pK_a = -\log_{10}(K_a)$ , donde  $K_a$  es la constante de equilibrio de la reacción (Lizama et al., 2011).

Sistema arsenito:



Sistema arseniato:



De manera gráfica, la especiación del arsenito y arseniato se presenta en la Figura 2.2.

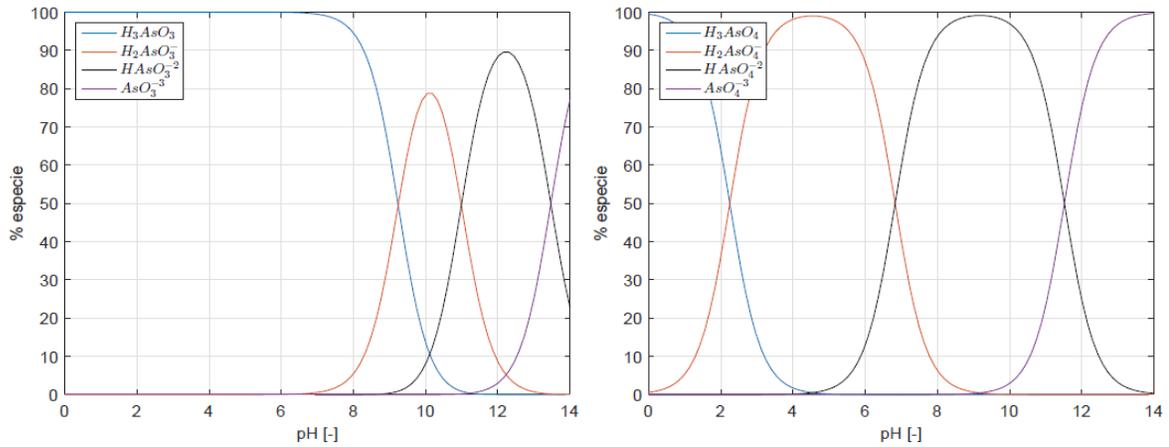


Figura 2.2: Especiación del arsenito (izquierda) y arseniato (derecha) en función del pH (Jaque, 2017).

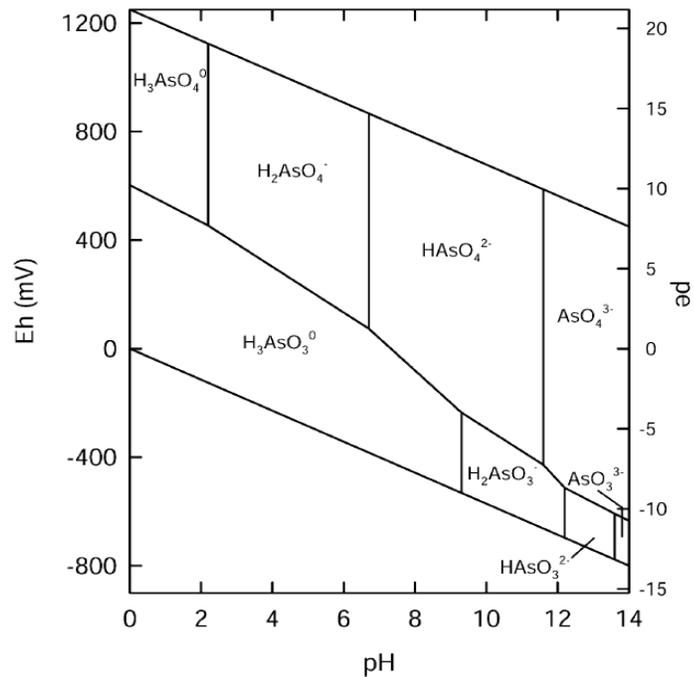


Figura 2.3: Diagrama Eh-pH para especies acuosas de As en el sistema As-O<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O a 25°C y 1 bar de presión (Smedley & Kinniburgh, 2002).

Países como Argentina, Bangladesh, Chile, China, Estados Unidos, Hungría, India, México, Vietnam, entre otros, han presentado contaminación de aguas con arsénico (Carotenuto et al., 2014; Choong et al., 2007; Smedley & Kinniburgh, 2002). Lo que acontece en Bangladesh es la intoxicación masiva más grande de la historia, se estima que de su población de 125 millones de habitantes, entre 35 y 77 millones están en riesgo de beber agua contaminada con As (Smith et al., 2000). La situación nacional también es preocupante, las cuencas del río Lluta (XV Región de Arica y Parinacota) y río Loa (II Región de Antofagasta) presentan altas concentraciones de arsénico en sus aguas (Leiva et al., 2014; Smedley & Kinniburgh, 2002). El río Azufre, tributario al río Lluta, presenta concentraciones de arsénico que llegan a valores cercanos y superiores a los 3 mg/L (DGA, 2008; Leiva et al., 2014), por otra parte en el río Loa se observan concentraciones superiores a los 2 mg/L (Smedley & Kinniburgh, 2002).

## 2.2 Tratamientos convencionales de remoción de arsénico del agua

El arsénico no puede ser destruido fácilmente, por lo que para ser removido del agua tiene que ser transformado en compuestos no solubles en combinación con elementos como el hierro (Choong et al., 2007).

Actualmente existen diversos tratamientos capaces de remover el arsénico del agua, entre ellos vale la pena mencionar coagulación y floculación, precipitación, adsorción, intercambio iónico y mecanismos de membrana como la osmosis inversa (Bissen & Frimmel, 2003; Carotenuto et al. 2014).

La remoción de As (III) resulta más difícil que la de As (V), ya que para valores de pH entre 6 y 9, el As (III) se encuentra como especie sin carga, en cambio el As(V) como especie cargada negativamente, lo cual facilita su remoción por procesos como el intercambio iónico. Por lo tanto, para tratar agua con contenido considerable de arsenito se realiza la oxidación que puede ser realizada con oxígeno, ozono, carbón activado, compuestos de hierro y manganeso, microorganismos y más (Bissen & Frimmel, 2003). La ecuación 7 muestra el sistema redox:



El potencial redox presente en la oxidación de As(III) a As(V) es menor al que presente en la oxidación de Fe (II) a Fe(III), además es sabido que la oxidación de Fe(II) se produce en presencia de aire mientras que la tasa de oxidación del As(III) es más lenta (Bissen & Frimmel, 2003).

La coagulación y floculación se encuentra dentro de las técnicas más utilizadas para la remoción de arsénico del agua (Choong et al., 2007; Carotenuto et al., 2014). Son dos procesos aparte pero generalmente se les usa en conjunto. Como coagulantes se utilizan sales de hierro y compuestos con aluminio, que desestabilizan los coloides, neutralizando las fuerzas que los separan, para así

formar partículas de mayor tamaño (*flocs*). Posteriormente y con la adición de polímeros, los flocs se fusionan en conglomerados de mayor tamaño, las cuales presentan un considerable contenido de arsénico, con el objetivo de separarlas del agua.

La adsorción es el proceso físico en el que el contaminante se adhiere al medio sorbente. Los principales medios sorbentes son compuestos de tipo férricos y carbón activado. A su vez se ha explorado la utilización de sorbentes no convencionales como zeolita, arcilla, carbón, ceniza, cáscara de arroz y cabello humano, entre otros (Choong et al., 2007).

El intercambio iónico se realiza mediante una resina que se dispone en el medio sorbente, generando el intercambio de iones entre los compuestos de arsénico y los elementos presentes en la resina. Este proceso necesita realizarse con arseniato (V), dado que el arsenito en el agua solo se presenta en compuestos neutros. Se han obtenido eficiencias de remoción superiores al 99% para resinas regeneradas con ácido clorhídrico y cloruro de sodio (Bissen & Frimmel, 2003).

La filtración con membranas es un proceso realizado gracias a la presión aplicada al agua contaminada, para hacerla pasar a través de la membrana y lograr separar al arsénico. La osmosis inversa, microfiltración y nanofiltración forman parte de estos tratamientos. Dichos procesos difieren en el tamaño de poro de la membrana, que va desde los 0.0005 a los 0.003  $\mu\text{m}$  (Carotenuto et al., 2014). Hay que mencionar que la filtración con membranas presenta un costo mayor a tratamientos similares (Choong et al., 2007).

La remoción mediante precipitación y coprecipitación se logra mediante la adición de compuestos coagulantes de aluminio y hierro, como el cloruro férrico. A su vez el arsénico puede precipitar con compuestos de manganeso, calcio y magnesio (Bissen & Frimmel, 2003).

## **2.2.1 Situación nacional**

Actualmente en Chile existen más de diez plantas aptas para remover arsénico del agua, en su mayoría con As presente en aguas subterráneas (Hering et al., 2016). En la Tabla 2.2 se presenta el detalle.

Tabla 2.2: Lista de plantas de tratamiento que remueven arsénico en Chile (Adaptado de Hering et al., 2016).

Ciudad	Compañía	Planta	Fuente del agua	Otros contaminantes	Caudal [m3/s]	As [ug/L]	Tratamiento
Arica	Aguas del Altiplano	Pago de Gómez	Subterránea	-	13000	18	Filtración en lecho adsorbente- osmosis inversa
Iquique-Alto Hospicio	Aguas del Altiplano	Santa Rosa	Subterránea	-	20700	60-80	Oxidación-filtración directa-ultrafiltración
Iquique-Alto Hospicio	Aguas del Altiplano	El Carmelo	Subterránea	-	65000	16	Oxidación-filtración directa
Pozo Almonte	Aguas del Altiplano	Pozo Almonte	Subterránea	Sulfatos	2900	16	Osmosis inversa
Calama	Aguas Antofagasta	Cerro Topáter	Superficial	Turbiedad	43000	400-450	Oxidación - coagulación-floculación sedimentación-filtración
Antofagasta	Aguas Antofagasta	Salar del Carmen	Superficial	Turbiedad	86000	400-450	Oxidación - coagulación-floculación sedimentación-filtración
Taltal	Aguas Antofagasta	Taltal	Subterránea	-	2600	60-80	Oxidación-filtración directa
Diego de Almagro	Aguas Chañar	Diego de Almagro	Superficial	Turbiedad, cloruro, SDT, sulfatos	3000	100-500	Oxidación-filtración-osmosis inversa
Santiago Oriente	Aguas Cordillera	Lo Gallo	Superficial y subterránea	Turbiedad, hierro, manganeso	56000	10-50	Oxidación - coagulación-floculación sedimentación-filtración
Santiago Oriente	Aguas Cordillera	San Antonio	Subterránea	-	43000	17-34	Oxidación-filtración-filtración en lecho adsorbente
Lampa	Aguas Manquehue	Alto Lampa	Subterránea	-	4300	20	Oxidación-filtración en lecho adsorbente
Santiago (Quilicura)	Aguas Andinas	Quilicura	Subterránea	-	8600	60	Oxidación-filtración en lecho adsorbente
Santiago (Colina)	Aguas Manquehue	Lo Pinto	Subterránea	-	10400	25	Oxidación-filtración en lecho adsorbente
Rancagua	ESSBIO	Nogales	Superficial	Turbiedad	65000	20	Oxidación-coagulación-floculación-sedimentación-filtración

La planta de tratamiento correspondiente a la zona de estudio (Pago de Gómez) utiliza osmosis inversa junto a filtración en lecho adsorbente para remover el arsénico del agua, procesos que presentan un alto costo (Bissen & Frimmel, 2003).

## 2.3 Humedales construidos

Un humedal se define como “tierra donde el nivel de agua está sobre o a nivel del suelo por un tiempo tal que el suelo está saturado y permite que crezca vegetación” (Crites et al., 2006). Otra definición es “área que se encuentra húmeda durante parte del año, o el año en su totalidad, debido a su ubicación geográfica” (Kadlec & Wallace, 2008), ambas definiciones corresponden a humedales que se originan de forma natural en el ambiente.

Por su parte un humedal construido es un sistema creado por el hombre, diseñado para acentuar características específicas de los humedales para mejorar su capacidad de tratamiento (Kadlec & Knight, 1996). Es así como los humedales construidos se utilizan en diversos lugares del mundo como sistemas de tratamiento de aguas, principalmente para remover contaminantes difíciles de eliminar por medio de los sistemas de tratamiento convencionales. La ventaja de los humedales construidos frente a otros sistemas de tratamiento de aguas es el menor costo operacional a los tratamientos convencionales y el poco uso de energético, posicionándose como una alternativa real, económica y sustentable.

Un humedal se conforma principalmente por el medio de soporte, vegetación y microorganismos. Son biorreactores complejos, ya que combinan procesos físicos, químicos y biológicos que generan la remoción de contaminantes mediante adsorción, filtración, precipitación, coprecipitación, oxidación/reducción microbiana, incorporación a la vegetación (*plant uptake*), etc (Kadlec & Wallace, 2008).

Existen diversos tipos de humedales construidos, que se distinguen por el tipo y dirección del flujo, y la clase de planta presente en estos.

En los humedales construidos de flujo superficial (SF) hay contacto entre el agua y la atmósfera. Estos suelen atraer variedad de fauna como insectos, moluscos, peces, aves, reptiles y mamíferos, producto de que sus características se asemejan mucho a un humedal natural (Kadlec and Knight, 1996).

Por su parte en los humedales de flujo subsuperficial (SSF por sus siglas en inglés) se produce un mayor contacto entre los contaminantes y el medio de soporte. Existen con flujo horizontal y vertical.

## **2.3.1 Componentes de un humedal**

### **2.3.1.1 Medio de soporte**

El medio de soporte resulta ser un componente preponderante en los humedales construidos SSF, al ser el sustrato que necesitan las plantas y microorganismos para desarrollarse. A su vez puede generar distintas condiciones ambientales, como zonas con oxígeno y en anoxia (Lizama et al., 2013). Los medios más usados en la construcción de humedales tipo SSF son grava y arena (Kadlec & Wallace, 2008). Sin embargo, otros medios de soporte han sido utilizados para la remoción de arsénico y otros contaminantes. En particular para esta investigación se estudiará la capacidad de remoción de la piedra caliza y zeolita como medios de soporte.

#### 2.3.1.1.1 Piedra Caliza

La piedra caliza es una roca sedimentaria presente naturalmente en el ambiente y compuesta principalmente por carbonato de calcio (Oates, 2008). Es una fuente económica de carbonato de calcio para la producción de cementos, siendo este su principal uso.

Lizama et al., (2011a) comprobó la alta remoción de arsénico y hierro de la piedra caliza por sobre otros medios en un sistema de humedales construidos, para un caudal de características ácidas. A su vez la piedra caliza se utiliza como tratamiento de agua preliminar con el fin de aumentar el pH del agua a tratar.

#### 2.3.1.1.2 Zeolita

La zeolita es un mineral microporoso aluminosilicato. Se presenta de manera natural en las rocas sedimentarias, pudiéndose obtener también de manera sintética (Reeve et al., 2017). Es generalmente utilizada como sorbente natural. También la zeolita presenta carga, lo que la predispone al intercambio iónico.

La zeolita ha sido utilizada como medio de soporte en diversos estudios de humedales construidos (Lizama et al., 2011a; Lizama et al., 2011b; Lizama et al., 2013), presentando altos índices de remoción de arsénico, hierro y otros contaminantes.

#### 2.3.1.2 Vegetación

La *Phragmites australis*, denominada comúnmente como carrizo o caña, es una planta macrófita de características perennes, perteneciente a la familia de las Poaceae. Generalmente crece en ambientes húmedos, como los bordes de lagunas y humedales naturales, jugando un rol fundamental en sus ecosistemas (Engloner, 2009).

Esta especie ha sido ocupada de manera exitosa en en humedales construidos, esto debido a su alta tolerancia a diversos contaminantes vinculados a drenaje ácido y metales pesados (Wang & Jia, 2009). A su vez presenta alta resistencia y adaptación a temperaturas extremas.

### 2.3.2 Evapotranspiración en humedales construidos

La evapotranspiración (ET) se constituye por dos procesos que incluyen la pérdida de agua del suelo hacia la atmósfera por evaporación directa y de la vaporización del agua contenida en las plantas por transpiración (FAO, 2006). La ET es la principal responsable de la pérdida de agua en los humedales construidos. A su vez la ET influye en parámetros como el tiempo de retención hidráulico, las concentraciones efluentes de agua tratada y la capacidad de remoción del sistema.

### 2.3.2.1 Efecto de la evapotranspiración en el tiempo de retención hidráulico

El tiempo de retención hidráulico ( $\tau$ ) es el tiempo en el cual una unidad de fluido permanece en un sistema, o cuánto se demora en salir del mismo. En humedales construidos se calcula mediante la Ecuación 8 (Kadlec & Wallace, 2008)

$$\tau = \eta \frac{V}{\frac{Q_e + Q_s}{2}} \quad (8)$$

Donde:

$\eta$ : Porosidad del medio [-]

V: Volumen del humedal [ $L^3$ ]

$Q_e$ : Caudal de entrada al humedal [ $L^3/T$ ]

$Q_s$ : Caudal de salida del humedal [ $L^3/T$ ]

Al considerar que las pérdidas de agua son producidas exclusivamente por ET:

$$Q_s = Q_e - Q_{ET} \quad (9)$$

Donde:

$Q_{ET}$ : Caudal evapotranspirado en el humedal [ $L^3/T$ ]

Luego, la Ecuación 10 que presenta el aumento del tiempo de retención producto de la evapotranspiración es:

$$\frac{\tau}{\tau_{nom}} = \frac{\frac{2\eta V}{2Q_e - Q_{ET}}}{\frac{2\eta V}{2Q_e}} \quad (10)$$

Y al escribirla de manera más simple se visualiza claramente el aumento del tiempo de retención con la pérdida de agua en las celdas:

$$\frac{\tau}{\tau_{nom}} = \frac{1}{1 - \frac{Q_{ET}}{2Q_e}} \quad (11)$$

Donde:

$Q_{ET}/Q_e$ : Razón de pérdida de agua en un humedal por ET [-]

$\tau$ : Tiempo de retención hidráulico del humedal, HRT [T]

$\tau_{nom}$ : Tiempo de retención nominal del humedal, considerando ET =0 [T]

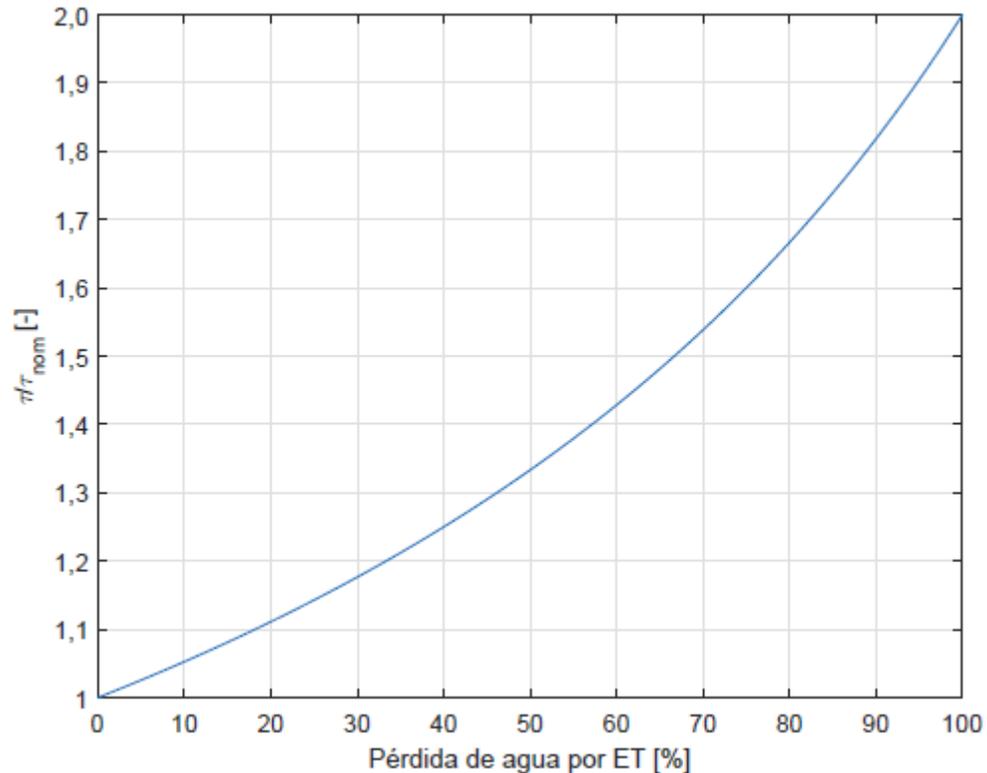


Figura 2.4: Variación del tiempo de retención en función del caudal evapotranspirado (Jaque, 2017).

La Figura 2.4 muestra como varía el tiempo de retención en cada celda, en función de las pérdidas producidas por evapotranspiración. Cuando se pierde la mitad del agua por ET, el tiempo de retención aumenta sobre el 30%.

### 2.3.2.2 Estimación de la evapotranspiración

El método más recomendado y utilizado para estimar la evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ) es el FAO Penman-Monteith, producto de su formulación basada en la física. La ET no se puede determinar de manera directa, es por ello que se calcula la evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ) que se pondera por el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ), obteniendo la ET:

$$ET = K_c \cdot ET_o \quad (12)$$

La  $ET_o$  se estima mediante parámetros físicos y meteorológicos como humedad relativa, velocidad del viento, temperatura, radiación solar, entre otros. En la práctica se consideran las estaciones meteorológicas cercanas al cultivo para estimar los datos con la mayor precisión posible. Lo anterior lo describe la ecuación 13:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_2)} \quad (13)$$

El coeficiente de cultivo integra las características que definen a un cultivo típico en condiciones normales de riego (FAO, 2006), producto de que este cálculo es utilizado para estimar demandas de agua en agricultura. A su vez, presenta valores que van variando a medida que se desarrolle la planta. La *Phragmites australis* en suelos húmedos presenta los siguientes valores:  $K_{c\ ini}=0.9$ ,  $K_{c\ med}=1.2$  y  $K_{c\ fin}=0.7$ .

Todo el proceso de cálculo y los términos de las ecuaciones expuestas en esta sección se muestran en el Anexo A: Estimación  $ET_o$  con Método FAO Penman – Monteith.

### 2.3.3 Humedales construidos para tratamiento de arsénico

Los humedales construidos son biorreactores complejos debido a las interacciones que se generan entre microorganismos, plantas y substrato. Es por ello que no se tiene certeza respecto a los mecanismos de remoción del arsénico dentro de los humedales. Por dicha razón, se han realizado estudios orientados a comprender los procesos de remoción. Existen estudios que han obtenido importantes resultados en términos de remoción de As (e.g. Budawong et al., 2005; Lizama et al, 2014).

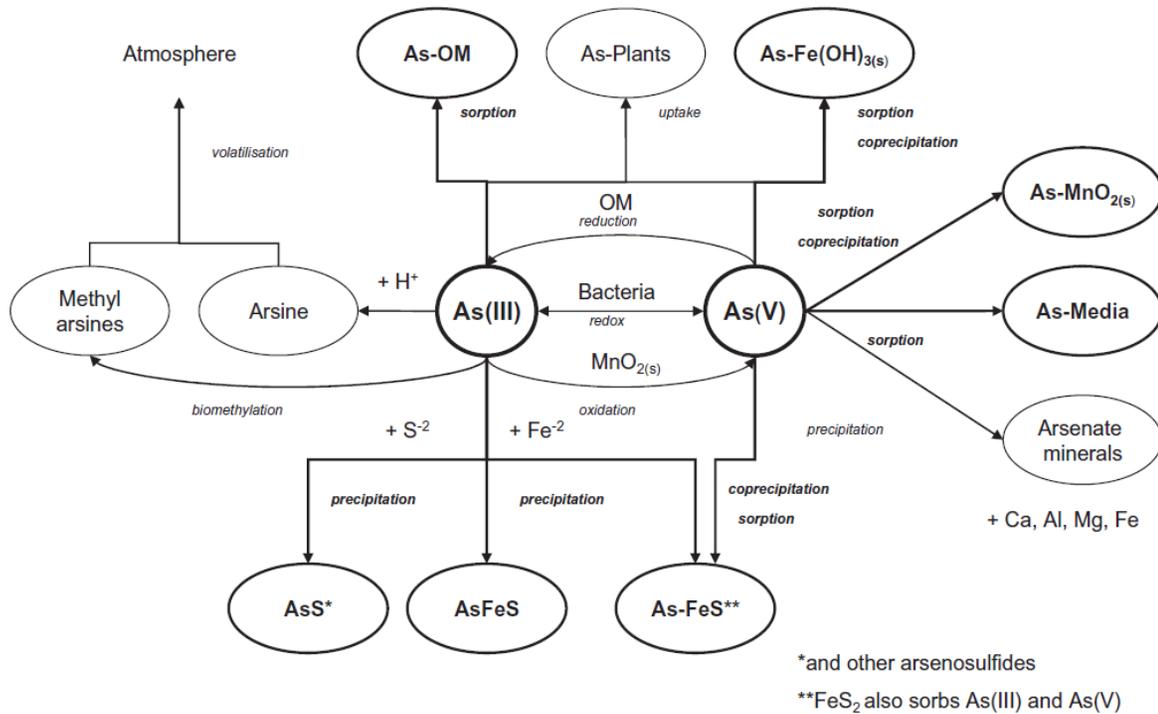


Figura 2.5: Procesos de remoción de arsénico en humedales construidos (Lizama et al., 2011b).

La Figura 2.5 muestra cómo interactúa el arsénico con los distintos elementos de un humedal construido y las rutas de remoción que puede seguir bajo las condiciones ambientales apropiadas. Los procesos de remoción más relevantes se indican en negrita, destacando fuertemente la sorción y precipitación. El arsénico cambia de estado de oxidación gracias a las reacciones redox que ocurren en el sistema. Estas son la oxidación de óxidos de manganeso, la reducción de materia orgánica y actividad bacteriana, que genera tanto oxidación como reducción (arsenito  $\leftrightarrow$  arseniato). Bajo condiciones oxidantes el arsénico precipita con óxidos de hierro como el  $Fe(OH)_{3(s)}$ , mientras que bajo condiciones reductoras y presencia de bacterias sulfato-reductoras, el As coprecipita con minerales como la pirita ( $FeS_{2(s)}$ ). Los hidróxidos de hierro y manganeso, además de la materia orgánica pueden remover arsénico por sorción. El arsénico también puede ser incorporado a las plantas (*plant uptake*), volatilizado como gas arsina y metilarsina, producto de metilización y biometilización del arsenito, respectivamente.

La grava es el medio de soporte más común utilizado para la remoción de arsénico, sin embargo presenta baja capacidad de adsorción (Buddawong et al., 2005). Lizama et al. (2014) experimentaron utilizando medios de soporte alternativos como la zeolita y caliza junto a turba de coco, obteniendo un porcentaje de remoción de arsénico superior al 99% en ambos medios. Buddawong et al. (2005) obtuvo mayores tasas de remoción en humedales de flujo subsuperficial que en humedales de flujo superficial, en su estudio que tenía grava como medio de soporte. A su vez plantea que la remoción de As está ligada a la coprecipitación con el Fe, particularmente en las zonas óxicas bajo la influencia de las raíces.

## 2.4 Caso de estudio: Río Azufre

El Norte Grande de Chile es una zona desértica, en la cual el agua es un bien tan valioso como escaso. A su vez se ha observado la presencia de aguas con un alto contenido de contaminantes en las regiones de la zona, siendo el arsénico un problema persistente en la actualidad.

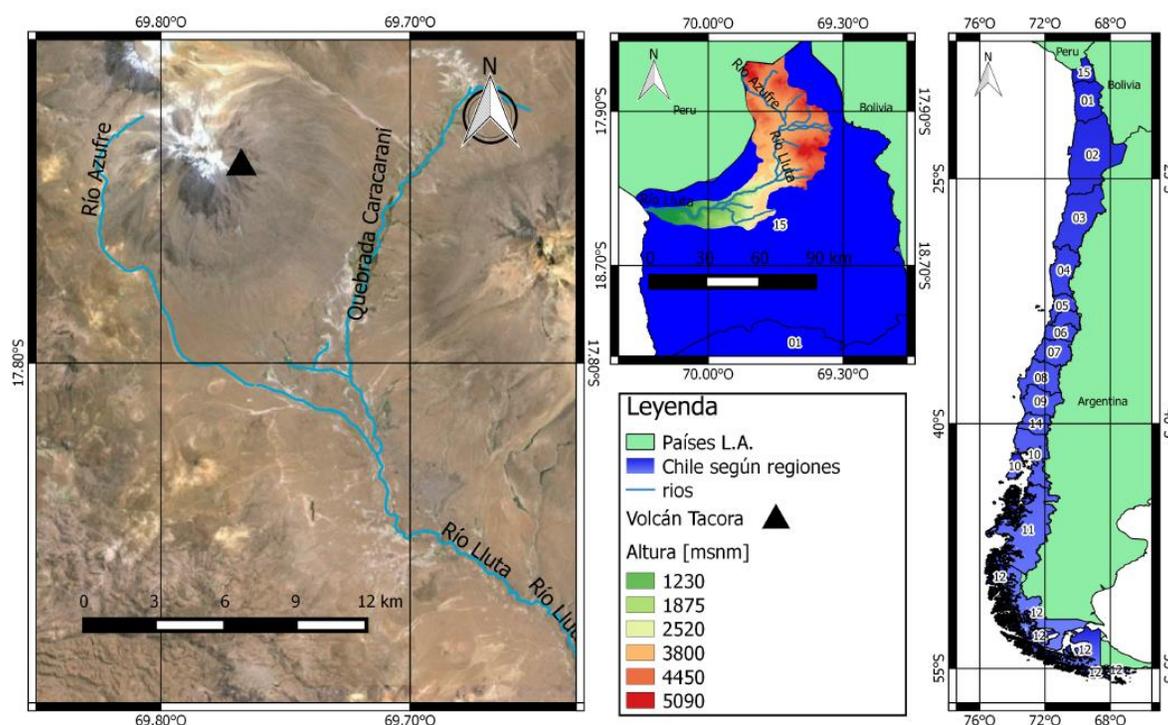


Figura 2.6: Río Azufre, ubicado en la cuenca del río Lluta (Jaque, 2017).

El río Azufre (Figura 2.6) se ubica en la parte alta (altitud promedio 4250 m.s.n.m.) de la cuenca del río Lluta, en la XV Región de Arica y Parinacota, en el límite norte de Chile. Se origina en los pies del volcán Tacora, que afecta directamente su calidad de agua (DGA, 2008) y confluye al río Caracani para pasar a llamarse río Lluta aguas abajo. Su caudal varía entre 21 y 180 L/s, teniendo un promedio anual de 89 L/s (Guerra et al., 2016). Manantiales termales con alto contenido de arsénico disuelto y drenaje ácido producto de la exposición de minerales sulfurados a la atmósfera, son los principales causantes de la mala calidad de agua del río (Leiva et al., 2014; Guerra et al., 2016), que es el forzante principal de la presencia de As en el río Lluta (DGA, 2008).

Para caracterizar la calidad de agua presente en el río Azufre se presenta la Tabla 2.3, con las concentraciones promedio de especies presentes en el río.

Tabla 2.3: Concentraciones promedio de especies presentes en el río Azufre. Adaptado de Guerra et al. (2016).

Parámetro	Concentración [mg/L]
Al Total	145.2
As Total	2
B Total	18.2
Fe Total	59.1
Zn Total	9.8
Mg <sup>+2</sup>	175
Na <sup>+</sup>	360
Ca <sup>+2</sup>	293
K <sup>+</sup>	92
Cl <sup>-</sup>	1320
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	3104

Existen varios asentamientos humanos cuya fuente de agua proviene de la cuenca del río Lluta, siendo Putre el más importante con una población de 2765 personas (INE, 2017). La importancia de brindar agua con calidad adecuada a la zona pasa tanto por el consumo de agua potable como de riego, siendo esta una de las actividades económicas más importantes de la zona, localizándose principalmente en el sector bajo del valle (DGA, 2004; DGA, 2008). Los principales cultivos son maíz, alfalfa y tomates (DGA, 2004; DGA, 2008).

## 2.5 Normativa

Existen elementos presentes en el agua que al encontrarse en elevadas concentraciones pueden comprometer la salud de las personas y animales. Esta situación puede generarse directamente por consumo de agua potable o indirectamente por consumo de alimentos producidos con agua de riego. Por estas razones se vuelve necesario regular las concentraciones máximas de ciertos elementos. Organismos como la Organización Mundial de la Salud (WHO), Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) sugieren límites a las concentraciones de contaminantes con el fin de resguardar la salud de las personas.

En Chile, como en gran parte del mundo, existe una normativa para dicho fin. Esta comprende la norma chilena NCh 409 de agua potable y la NCh 1333, norma chilena sobre requisitos de calidad del agua para diferentes usos, en los cuales se incluye el riego. La Tabla 2.4 y Tabla 2.5 presentan una comparación entre las concentraciones límite recomendadas por organismos internacionales y la normativa chilena, tanto para agua potable como para agua de riego.

Tabla 2.4: Tabla comparativa de criterios de calidad de agua potable.

Parámetro	NCh 409 [mg/L]	OMS [mg/L]	USEPA [mg/L]
Al	-	-	0.05 - 0.2
As	0.01	0.01	0.01
B	-	2.4	-
Ca	-	-	-
Fe	0.3	-	0.3
Mg	125	-	-
Mn	0.1	-	0.05
Pb	0.05	0.01	0.015
K	-	-	-
Na	-	-	-
Zn	3	-	5
Cl	400	-	250
SO <sub>4</sub>	500	-	250

Tabla 2.5: Tabla comparativa de criterios de calidad de agua destinada a riego.

Parámetro	NCh 1333 [mg/L]	FAO [mg/L]	USEPA [mg/L]
Al	5	5	5
As	0.1	0.1	0.1
B	0.75	0.7 - 3	0.75
Ca	-	-	-
Fe	5	5	5
Mg	-	-	-
Mn	0.2	0.2	0.2
Pb	5	5	5
K	-	-	-
Na	-	-	-
Zn	2	2	2
Cl	200	-	-
SO <sub>4</sub>	250	-	-

## Capítulo 3: Metodología de trabajo

En el trabajo a realizar se utilizará un sistema de 12 humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal (HSSF) en los cuales se realizarán mediciones de arsénico y otros elementos, en su caudal afluente y efluente para cuantificar la remoción de contaminantes efectuada por el sistema.

### 3.1 Materiales utilizados

Como medios de soporte se utilizó piedra caliza y zeolita, mientras que la vegetación empleada fue *Phragmites australis*.

En la Tabla 3.1 se presenta la composición química de la caliza utilizada. Esta corresponde a piedra caliza guarelo, proveniente de la isla Guarelo ubicada en la XII Región de Magallanes y la Antártica Chilena, la más austral.

Tabla 3.1: Composición química de la piedra caliza guarelo. Fuente: Ficha técnica piedra caliza guarelo, CAP Acero.

Elemento	Composición química	Porcentaje másico [%]
Carbonato de calcio	$CaCO_3$	94-98
Sílice	$SiO_2$	0.4-1.0
Fierro	$Fe_2O_3$	0.1-1.0
Óxido de magnesio	$MgO$ o $MgCO_3$	0-0.1

Por su parte el otro sustrato usado corresponde a zeolita Clinoptilolita-Mordenita, proveniente de Quinamávida, VII Región del Maule, Chile (Jaque, 2017). En la Tabla 3.2 se muestra su composición química:

Tabla 3.2: Composición química de zeolita utilizada. Fuente: Zeolita del Maule.

Elemento	Composición química	Porcentaje másico [%]
Sílice	$SiO_2$	64.19
Peróxido de titanio	$TiO_2$	0.51
Trióxido de dialuminio	$Al_2O_3$	11.65
Óxido férrico	$Fe_2O_3$	2.53
Monóxido de manganeso	$MnO$	0.03
Óxido de magnesio	$MgO$	0.66
Monóxido de calcio	$CaO$	3.42
Monóxido de sodio	$Na_2O$	0.75
Óxido potásico	$K_2O$	1.6
Anhídrido fosfórico	$P_2O_5$	0.03
-	$P_xC$	14.64

En el Anexo B: Curvas granulométricas, se adjuntan curvas granulométricas para ambos medios de soporte.

## 3.2 Sistema de humedales

Se construyeron 12 celdas HSSF, utilizando acrílico transparente para facilitar la visualización del medio de soporte, raíces de la vegetación y cualquier otro cambio. Cada celda tenía dimensiones de 1900 mm de largo, 500 mm de ancho y 500 mm de alto. A lo largo de la celda se consideraron 1300 mm para el medio de soporte, junto con una sección aquietadora de 200 mm y otra filtrante de 100 mm (compuesta de grava) tanto en la entrada como la salida de cada humedal (Ver Figura 3.1). Las celdas se encontraban sobre una estructura de acero, que presentaba un techo con el fin de evitar ingreso de agua producto de la precipitación. El sistema estaba expuesto a las condiciones naturales de viento y luz solar, sin embargo, las celdas se cubrieron con plástico negro a los costados para evitar el crecimiento de algas dentro de cada humedal.

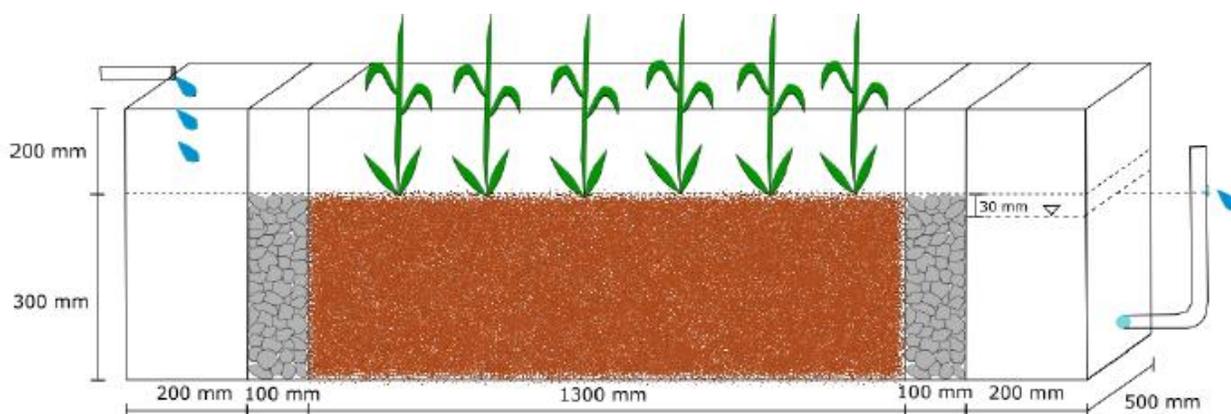


Figura 3.1: Esquema celda de humedal construido (Jaque, 2017).

Con el objetivo de analizar los efectos de la vegetación y el tipo de medio se construyeron cuatro configuraciones de humedal: Caliza vegetada (celdas 1, 2 y 3), zeolita vegetada (celdas 4, 5 y 6), caliza sin vegetación (celdas 7, 8 y 9) y zeolita sin vegetación (celdas 10, 11 y 12). Para cada configuración se construyeron tres réplicas, conformando las 12 celdas. La Figura 3.2 muestra cómo se distribuyen espacialmente las celdas, en gris se muestran las celdas de caliza y en naranja las de zeolita. Las celdas que se ubican en el costado norte presentan vegetación y se indica con la “v” en verde. Además el cilindro en celeste indica el estanque de 2000 L de capacidad donde se almacenaba el agua ácida a tratar.



Figura 3.2: Distribución espacial de celdas en sistema de humedales, la “v” en verde indica presencia de vegetación.

Los medios de soporte presentaban una altura de 300 mm (Figura 3.1), una densidad relativa de 70% y fueron previamente lavados en una malla N°60 para eliminar el material más fino (Henry, 2015). Por su parte las plantas tomaron aproximadamente 18 meses en acondicionarse al ambiente, tiempo en el cual crecieron nuevas plantas con raíces distribuidas de forma uniforme (Jaque, 2017).

El sistema de humedales se emplazó en el patio del laboratorio de procesos mecánicos perteneciente al Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile, ubicado en la ciudad de Santiago de Chile.



*Figura 3.3: Instalación experimental. Foto: Ignacio Jaque.*

### **3.2.1 Operación**

La operación del sistema se dividió en dos etapas, cuya principal diferencia radica en la concentración de arsénico en el afluente. El sistema de humedales empezó a funcionar el día 16 de agosto de 2016, con una concentración de arsénico total de 2 mg/L, funcionando así hasta el día 13 de febrero de 2017. Posteriormente el sistema se reactivó el día 4 de abril de 2017, aumentando la concentración de arsénico total a 3.5 mg/L en el agua afluente (agua ácida). El sistema estuvo operativo hasta el día 9 de noviembre de 2017.

El agua ácida sintética se almacenó en un estanque de polietileno con capacidad de 2000 L, que contaba con seis aireadores de acuario (rendimiento de 4  $L_{\text{aire}}/\text{min}$  c/u). Dicho estanque se conectaba mediante mangueras (Tygon E-Lab, de características muy resistentes a cambios de temperatura y ácidos fuertes) a una bomba peristáltica Masterflex L/S modelo 07557-00, Cole Palmer, cuya función es distribuir un caudal uniforme de 19 L/día a cada celda. En base al caudal se obtiene una carga hidráulica de 20 mm/día y un tiempo de retención hidráulico nominal de 4.5 días para humedales con piedra caliza y 6 días para humedales con zeolita ( $\eta_{\text{cal}} = 0,43[-]$ ;  $\eta_{\text{zeo}} = 0,58[-]$ ).

Para estimar la evapotranspiración en cada una de las celdas se almacenaba el agua tratada en contenedores de polipropileno con 60 L de capacidad. Posteriormente se pesaban los contenedores entre 1 a 3 veces por semana, para cuantificar el caudal efluente, y así obtener la pérdida de agua por ET (Ecuación 9).

### 3.3 Agua ácida sintética

Se preparó agua ácida sintética representativa del río Azufre (Ver sección 2.4 Caso de estudio: Río Azufre). Para ello se consideraron las concentraciones promedio de las especies de acuerdo a la Tabla 3.3, aumentando la concentración de arsénico a 3.5 mg/L, la máxima encontrada, en la sección ubicada en el extremo aguas arriba del río (Leiva et al. 2014).

Para la preparación del agua ácida contaminada, se utilizó agua potable a la que se le añadieron los siguientes reactivos:

- Sulfato de magnesio heptahidratado ( $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ )
- Cloruro de sodio ( $NaCl$ )
- Sulfato de aluminio octadecahidratado ( $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ )
- Cloruro de potasio ( $KCl$ )
- Sulfato de zinc heptahidratado ( $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ )
- Sulfato de manganeso hidratado ( $MnSO_4 \cdot H_2O$ )
- Sulfato de plomo ( $PbSO_4$ )
- Cloruro de calcio ( $CaCl_2$ )
- Cloruro de hierro ( $FeCl_3$ )
- Sulfato férrico ( $Fe_2(SO_4)_3$ )
- Ácido bórico ( $H_3BO_3$ )
- Pentóxido de diarsénico ( $As_2O_5$ )
- Ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ )

El cálculo de masa a adicionar de cada reactivo fue posible gracias al software Phreeqc v3.3.7. Este programa resuelve las ecuaciones de equilibrio (pH- redox, entre otras) con el fin de determinar la cantidad de reactivos a adicionar para obtener las concentraciones objetivo de las especies presentes en el río Azufre (ver Tabla 2.3). En la Tabla 3.3 se muestran las concentraciones objetivo, del agua potable utilizada, y del agua ácida analizada. La etapa 1 corresponde a una concentración objetivo de arsénico de 2 mg/L mientras que en la segunda etapa la concentración objetivo aumentó a 3.5 mg/L. Por último es pertinente señalar que las concentraciones de contaminantes distintos al As pueden diferir entre las dos etapas, producto del cálculo realizado por Phreeqc, esto se aclara en la Tabla 3.3).

Tabla 3.3: Concentraciones objetivo, de agua potable y medidas para el agua ácida en ambos períodos de operación

Parámetro	Unidad	Objetivo 1	Objetivo 2	Agua potable <sup>(1)</sup>	Período 1		Período 2	
					Promedio	Desv. Estándar	Promedio	Desv. Estándar
Na <sup>+</sup>	mg/L	351	359	117	356	24	-	-
K <sup>+</sup>	mg/L	70	70	3.84	67	13	-	-
Ca <sup>+2</sup>	mg/L	265	265	138	296	26	-	-
Mg <sup>+2</sup>	mg/L	125	125	14.8	129	4	-	-
Fe Total	mg/L	60	60	0.011	70	22	49	4
B Total	mg/L	4	4	0.282	7	5	4	0
Al Total	mg/L	60	60	0.005	60	4	61	4
Mn Total	mg/L	10	10	0.0001	12	1.0	10	0.2
Zn Total	mg/L	10	10	0.0035	13	1.1	11	0.3
As Total	mg/L	2	3.5	0.0011	2.53	0.9	3.7	0.1
Pb Total	mg/L	1.0	1.0	0.018	1.0	0.2	0.9	0.1
Cl <sup>-</sup>	mg/L	957	854	197	1054	62	-	-
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	mg/L	1883	2038	291	3283	991	-	-
pH	-	1.8	1.8	7.2	1.9	0.2	1.9	0.2

(1): Suministro agua potable, Aguas Andinas.

### 3.4 Toma y análisis de muestras

Las muestras de agua efluente del sistema de humedales fueron tomadas cada dos semanas, para todas las celdas y el agua ácida sintética (cada vez que se rellena el estanque). Durante el segundo período de operación del sistema, el tiempo de dos semanas cambió, tomándose muestras de manera mensual para el efluente y cada dos semanas para el agua ácida. Para cada muestra se guardaron cuatro respaldos de 30 ml aproximadamente, por si la medición reportaba valores fuera de la media: Muestra natural (NFNA), muestra no filtrada acidificada (NFAC), muestra filtrada no acidificada (FiNA) y muestra no filtrada acidificada (FiAc). Para la filtración se utilizaron filtros con membrana MCE de tamaño de poros de 0,45  $\mu\text{m}$ , mientras que para la acidificación se utilizó ácido nítrico concentrado (65%) que funciona como preservante. Para las muestras acidificadas se verificó que presentaran un  $\text{pH} < 2$ . Todas las muestras fueron refrigeradas a una temperatura cercana a los 5°C. El proceso anterior fue realizado de acuerdo a *Standards Methods; 1060C Sample Storage and Preservation* (APHA, 2005).

Los siguientes parámetros: alcalinidad, dureza, sulfato, pH, temperatura, conductividad eléctrica, potencial redox y turbiedad, fueron analizados el mismo día de la toma de muestras en el Laboratorio de Calidad de Aguas Gabriela Castillo, del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile. Por su parte, la medición de las concentraciones totales de As, Al, B, Fe, Mn, Pb, Zn (primer y segundo período) y de Mg<sup>+2</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>+2</sup>, K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> y SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> (primer período) fue realizado en el Laboratorio de Geoquímica de Fluidos perteneciente al Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA) de la Universidad de Chile.

Los parámetros relacionados a concentración fueron corregidos por la pérdida de agua mediante evapotranspiración. La corrección por ET que se aplicó fue la siguiente:

$$C_{\text{corregida}} = C \cdot \frac{Q_{\text{efluente}}}{Q_{\text{afluente}}} \quad (14)$$

$C_{\text{corregida}}$ : Concentración corregida por ET.

$C$ : Concentración entregada.

$Q_{\text{afluente}}$ : Caudal de entrada al sistema.

$Q_{\text{efluente}}$ : Caudal de salida del sistema.

Los caudales de entrada eran medidos en cada visita al montaje, por medio de aforos. Por su parte los caudales de salida se pesaban. Se obtuvieron entre 2 y 3 datos por semana para cada celda.

### 3.4.1 Instrumentos y equipos utilizados en laboratorio

A continuación se detallan los instrumentos y equipos utilizados en el Laboratorio de calidad de agua Gabriela Castillo para manejar las muestras y medir los parámetros *in situ*:

- Micropipetas Brand de 100-1000  $\mu\text{L}$  y 10-100  $\mu\text{L}$
- Pipetas aforadas Corex Num 7100-A de 2 y 10 mL
- Matraces aforados Pyrex de 50 mL y 1000 mL
- Matraz Erlenmeyer Pyrex de 250 mL
- Probetas Isolab de 50 mL
- Secadora de Material Memmert, modelo typ UFB500, Alemania.
- Meter Hanna HI 2550, utilizado para medir pH y temperatura.
- Meter Hach HQ40d, utilizado para medir pH, potencial redox y temperatura.
- Conductímetro Corning Check Mate 90, utilizado para medir conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales y temperatura.
- Turbidímetro Hach 18900, utilizado para medir turbiedad.
- Espectrofotómetro Hach DR 5000, para medir sulfato.

Además se utilizaron las metodologías descritas en el *Standard Methods; 2320B Titration Method* para determinar alcalinidad y *2340C EDTA Titrimetric Method* para la dureza (APHA, 2008).

Los equipos que se utilizan en el Laboratorio de Geoquímica de Fluidos para la detección de contaminantes son:

- Cromatógrafo iónico Thermo Scientific Dionex ICS-2100 para el análisis de los aniones  $\text{SO}_4^{-2}$  y  $\text{Cl}^-$ . Denominado IC por sus siglas en inglés.
- Espectrometría de emisión óptica con fuente de plasma de acoplamiento inductivo. ICP-OES, Perkin Elmer Precisely Optima 7300 V para el análisis de As, Fe, B, Pb, Zn, Al, Mn, Ca, Mg, K y Na. Denominado ICP-OES por sus siglas en inglés.
- Espectrofotómetro de absorción atómica con llama Perkin Elmer PinAAcle 900F, con nebulizador estándar para el análisis de Fe. Denominado F-AAS por sus siglas en inglés.
- Espectrometría de masas cuadrupolo con fuente de plasma de acoplamiento inductivo y celda de colisión, Thermo Scientific ICP-MS Q iCAP Q para el análisis de As, B, Pb, Zn, Al y Mn. Denominado ICP-MS por sus siglas en inglés.

Los dos últimos equipos solo fueron utilizados para las muestras tomadas el día 24 de julio de 2017, cambiando los límites de detección que se presentan en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Límites de detección (LOD) por equipo.

Parámetro	ICP-OES [ $\mu\text{g/L}$ ]	IC [ $\mu\text{g/L}$ ]	F-AAS [ $\mu\text{g/L}$ ]	ICP-MS [ $\mu\text{g/L}$ ]
$\text{Na}^+$	94	-	-	-
$\text{K}^+$	44	-	-	-
$\text{Ca}^{+2}$	14	-	-	-
$\text{Mg}^{+2}$	1.2	-	-	-
Fe Total	4.1	-	0.036	-
B Total	4.6	-	-	0.07
Al Total	54	-	-	0.06
Mn Total	0.9	-	-	0.004
Zn Total	4.2	-	-	0.2
As Total	36	-	-	0.02
Pb Total	18	-	-	0.002
$\text{Cl}^-$	-	30	-	-
$\text{SO}_4^{-2}$	-	30	-	-

En el análisis de resultados mostrados en el Capítulo 4 se consideraron valores iguales a la mitad del límite de detección para cada contaminante cuando las concentraciones de contaminantes no eran detectadas. Lo anterior con el objetivo de realizar un correcto análisis estadístico.

### 3.5 Medición de la evapotranspiración

La evapotranspiración se midió directamente vía pesaje, en el montaje experimental y a su vez se estimó en base a datos meteorológicos, para poder comparar los valores.

### **3.5.1 Medición directa**

La medición directa de ET se realizó de dos maneras distintas. Una para antes de que el sistema entrara en operación y otra mientras el sistema se encontraba tratando agua contaminada.

Antes del período de operación se midió la altura del agua en cada celda de manera regular, con el fin de estimar el volumen evapotranspirado gracias a las dimensiones de cada celda. Por otro lado, cuando el sistema operaba se aforaron los caudales de entrada de cada humedal (cada dos o tres días), mientras el agua tratada se recolectaba en cajas de plástico (una para cada celda) con el fin de pesarlas y así obtener un caudal de salida. Con los datos de caudales se obtenía un volumen de entrada y otro de salida para cada celda y, asumiendo que las pérdidas por filtraciones son despreciables, se obtuvo la ET como la diferencia entre el volumen de entrada y el de salida.

### **3.5.2 Medición estimada**

La estimación de la evapotranspiración se obtuvo gracias al método FAO Penman-Monteith. Para dicho método se requieren datos de la humedad relativa del aire, temperatura y velocidad del viento, que se obtuvieron de la estación meteorológica Parque O'Higgins, ubicada a poco más de un kilómetro de distancia de la instalación experimental.

El proceso de cálculo de  $ET_0$  utilizando el método de Penman-Monteith se detalla en el Anexo A: Estimación  $ET_0$  con Método FAO Penman – Monteith.

# Capítulo 4: Resultados y discusión

## 4.1 Rendimiento general del sistema

El sistema de doce humedales HSSF operó por 57 semanas de manera satisfactoria, salvo la falla de la celda ZEO 04, que la inhabilitó de operar durante el segundo período y fallas menores temporales que fueron reparadas a tiempo. En vista de los resultados del primer período de operación el muestreo realizado por CEGA fue realizado con menor frecuencia en el segundo período de operación.

El sistema de humedales presentó distintos porcentajes de remoción, dependiendo del contaminante, medio de soporte utilizado, presencia de vegetación y condiciones particulares de cada celda. A continuación se presenta el análisis general del sistema. Se señala que el período 1 comprende 26 semanas de operación, y el período 2, 31 semanas.

En la Tabla 4.1 se presentan los porcentajes de remoción alcanzados por el sistema para cada contaminante, en ambos períodos (etapas) de operación. Se promediaron los valores calculados para todas las celdas, en todos los tipos de tratamientos.

Tabla 4.1: Porcentaje de remoción promedio de cada contaminante.

Contaminante	Período 1	Período 2	Total
Fe	99.1	95.4	97.7
B	-8.3	14.1	0.0
Al	69.0	7.4	36.6
Mn	32.9	29.0	27.4
Zn	64.8	29.1	46.4
As	99.4	99.0	99.2
Pb	98.3	98.2	98.3
Mg <sup>+2</sup>	32.5	-	32.5
Na <sup>+</sup>	53.7	-	53.7
Ca <sup>+2</sup>	-215.7	-	-215.7
K <sup>+</sup>	-18.1	-	-18.1
Cl <sup>-</sup>	12.0	-	12.0
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	38.7	18.0*	38.7

(\*): Medido con espectrofotómetro Hach DR 5000.

En las primeras 25 semanas correspondientes al primer período, no se detectó As en el efluente tratado por ninguna celda, obteniendo una remoción >99%. En la segunda etapa del proyecto sí fue detectado arsénico en el agua tratada, aunque en cantidades menores a la primera etapa, manteniendo la eficiencia de remoción superior al 99%.

Otros contaminantes que presentaron una alta tasa de remoción (superior al 95%) fueron el Fe y el Pb. El Zn y Al presentaron una alta eficiencia de remoción en la primera etapa, reduciéndose notablemente en el segundo período de funcionamiento. El Mn fue removido en porcentajes similares a lo largo de toda la operación del sistema, mientras que la remoción de B en promedio fue nula.

A su vez hay contaminantes (en su mayoría iones) que solo fueron medidos en el primer período de funcionamiento, ya que el foco del análisis no eran estos contaminantes. Se muestra un nivel aceptable pero limitado de remoción para el  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Cl}^-$  y sulfato (este sí fue medido en ambas etapas, ver sección 4.2.8 Sulfato), mientras que los iones de calcio y potasio presentaron un aumento en su concentración efluente, presumiblemente por la presencia de ellos en el sustrato.

Todos los contaminantes se analizarán con detalle en la sección 4.2.

## **4.2 Remoción de contaminantes**

A continuación se presenta la remoción de metales, metaloides y otros contaminantes, en el sistema de humedales. Los límites de detección, LOD (*limits of detection* por su sigla en inglés) se adjuntan en la Tabla 3.4.

Es importante mencionar que cuando el efluente exhibe una concentración del contaminante menor al límite de detección, se consideraba un valor igual a la mitad del límite de detección en el gráfico, dado que no se puede saber el valor de dicha concentración. Lo anterior se aplica a todos los contaminantes mostrados en esta sección. A su vez en todos los gráficos se aprecia la clara separación temporal entre el primer y segundo período de operación del sistema de humedales.

## 4.2.1 Arsénico

La Figura 4.1 presenta los perfiles de concentración de entrada y salida de As total en los cuatro tipos de tratamientos aplicados.

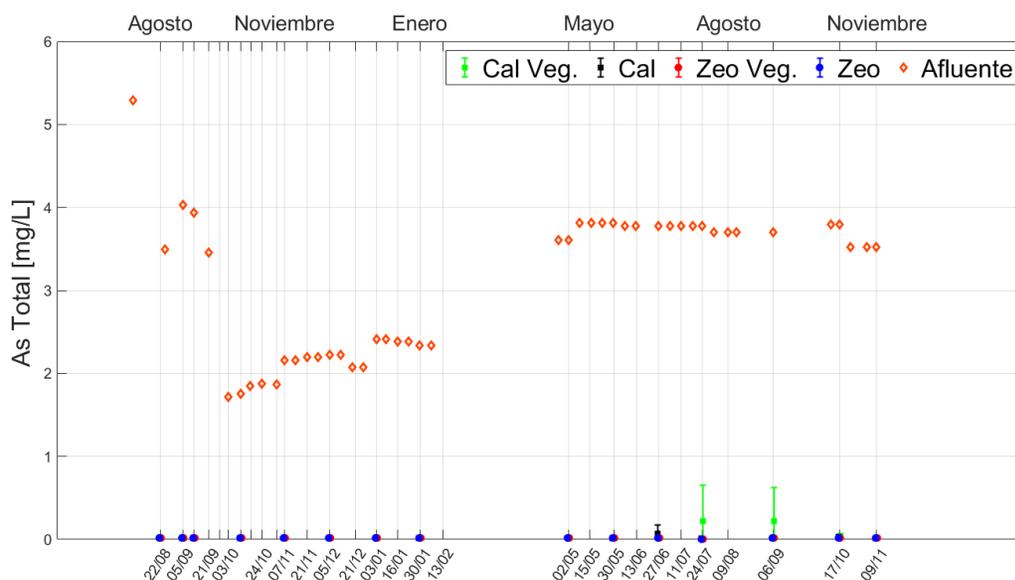


Figura 4.1: Perfil de concentraciones de As total afluente y efluente según tipo de tratamiento.

En el perfil de concentraciones no se aprecia la presencia de arsénico en concentraciones sobre el límite de detección en los muestreos realizados hasta el día 27/06 (correspondiente al segundo período) en el cual se presenció As en el efluente de la celda CAL 07 (caliza no vegetada). Posteriormente el día 24/07 se observó la presencia de arsénico en 7 de las 11 celdas operativas en ese entonces, razón atribuible en mayor parte al cambio en los instrumentos de detección de As, los que hicieron descender el límite de detección ostensiblemente. La presencia de arsénico se repitió el día 06/09 en la celda CAL 01 (caliza vegetada) y el día 17/10 en las celdas CAL 03 y CAL 09 (Caliza vegetada y no vegetada respectivamente). De los humedales con zeolita solo se observó arsénico la celda ZEO 11, el mismo día en que los límites de detección de As bajaron en dos órdenes de magnitud. Lo anterior motiva a decir que los humedales construidos con zeolita remueven de mejor manera el arsénico presente en el agua. Sin embargo las celdas CAL 01 y CAL 07 se veían visiblemente deterioradas en su funcionamiento, arrojando agua con una altísima turbiedad y presencia de arsénico en comparación a sus pares, lo que evidencia que fallaron en su capacidad de tratar agua. El deterioro se piensa que fue motivo de la alta exposición al sol a las que se vieron sometidas (especialmente ambas celdas estaban al mismo extremo, recibiendo el sol de lleno en las mañanas). De todas formas el rendimiento general del sistema fue superior al 99% en términos de remoción de arsénico.

## 4.2.2 Hierro

En la Figura 4.2 se presentan los perfiles de concentración afluente y efluente del Fe total, para todos los tratamientos usados.

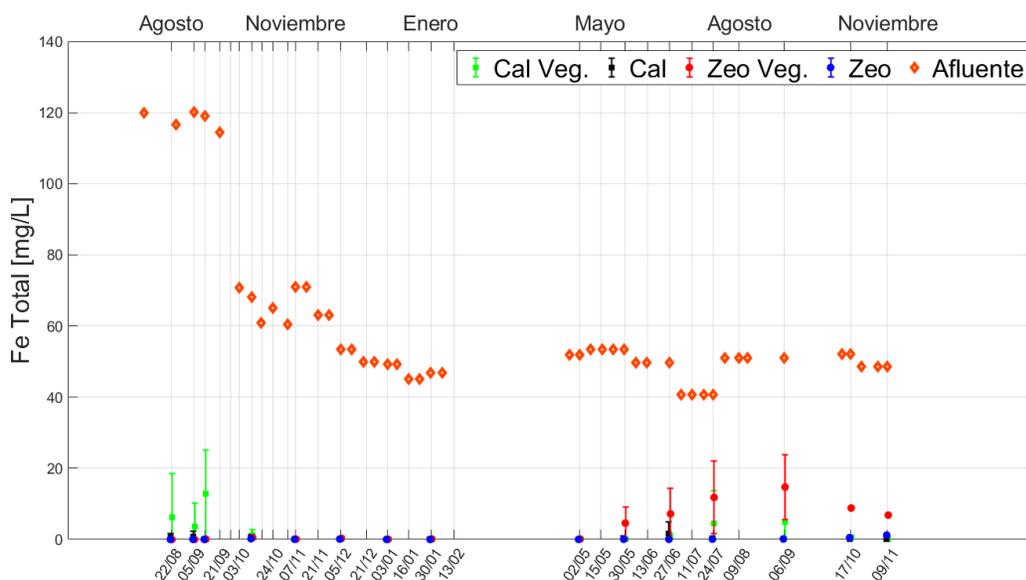


Figura 4.2: Perfil de concentraciones de Fe total afluente y efluente según tipo de tratamiento.

Como se muestra en la figura, durante el principio del primer período, los humedales con caliza presentaron una remoción baja durante los primeros muestreos (se presume producto de la estabilización del sistema), para luego obtener una remoción >98%. Mientras que durante el mismo período los humedales con zeolita presentaron una tasa de remoción no inferior al 99%. En el segundo período el desgaste natural del sistema contribuyó a obtener concentraciones mayores a los 15 mg/L en los muestreos de 27/06, 24/07 y 06/09, pertenecientes a celdas vegetadas de caliza y zeolita. En términos generales los humedales vegetados presentaron una eficiencia de remoción no mayor al 97% mientras que en los humedales no vegetados la remoción fue superior al 99%. Los valores anteriores no son concluyentes respecto al rol de la vegetación, dado lo cercano de los valores. Sin embargo, en el segundo período se puede apreciar una diferencia en el porcentaje de remoción entre las celdas de zeolita (>99%) y las celdas de zeolita vegetadas (>82%). Finalmente, no se distinguió una gran diferencia en la remoción promedio entre los humedales con distintos medios de soporte.

## 4.2.3 Boro

La Figura 4.3 presenta los perfiles de concentración de entrada y salida de B total en los cuatro tipos de tratamientos aplicados.

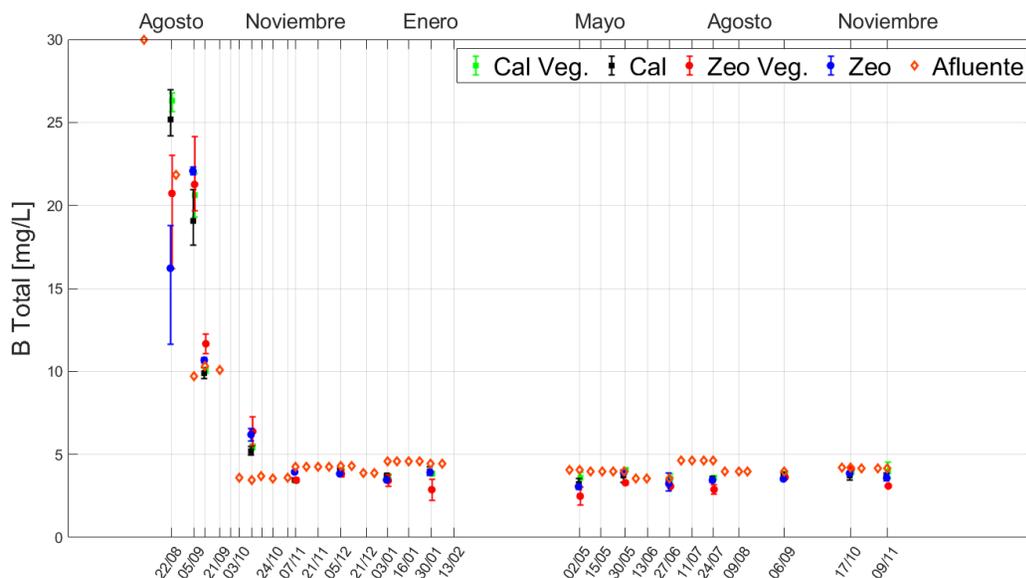


Figura 4.3: Perfil de concentraciones de B total afluente y efluente según tipo de tratamiento.

En la primera etapa, en particular los días 05/09 y 11/10, se observa un efluente con mayor presencia de boro que el agua a tratar, obteniendo en promedio una adición de boro al efluente. Se destaca que la concentración de entrada de boro varió de  $\approx 30$  a  $\approx 10$  mg/L, para posteriormente bajar de  $\approx 10$  a  $\approx 4$  mg/L (como se aprecia en la Figura 4.3). Durante el segundo período se obtuvo un mejor tratamiento de boro. En la imagen anterior se aprecia que la mayoría de las muestras presentan concentraciones de B menores al efluente. El sistema en general alcanza una remoción cercana al 14%. En resumen la remoción total promedio de boro fue nula. La configuración que presenta un mayor nivel de remoción corresponde a la zeolita no vegetada (celdas ZEO 10, ZEO11 y ZEO12) con un valor  $>5\%$ . El resto de configuraciones presentan un contenido de boro más elevado en el caudal de salida que en el efluente.

## 4.2.4 Aluminio

En la Figura 4.4 se presentan los perfiles de concentración afluente y efluente del Al total según los cuatro tipos de tratamiento.

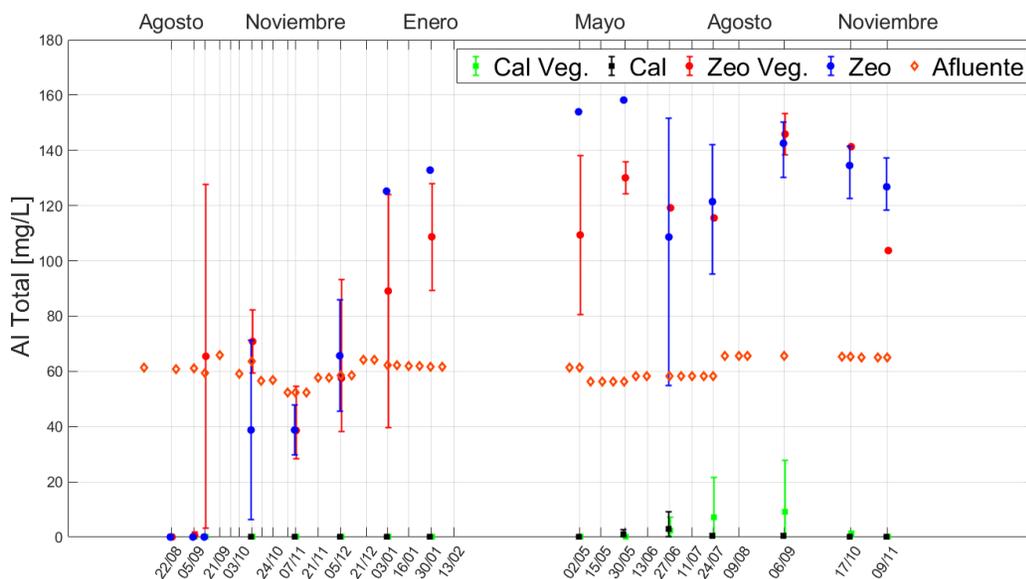


Figura 4.4: Perfil de concentraciones de Al total afluente y efluente según tipo de tratamiento.

Las concentraciones de salida difieren mucho dependiendo del tipo de sustrato que compone el humedal. Para las celdas con caliza no se detectó aluminio hasta el muestreo del día 30/01 en la primera etapa, aunque se mantuvieron en un nivel bajísimo hasta el 27/06 en la segunda etapa, en la cual empezó a aparecer frecuentemente en los efluentes de celdas con caliza presumiblemente por el tiempo de operación. En las celdas de caliza vegetada la remoción fue >97%, mientras que en las no vegetadas fue >99% en promedio. Por otro lado, las celdas compuestas por zeolita no presentan remoción de Al, por el contrario, añaden aluminio al agua tratada. Lo anterior se explica porque el aluminio es uno de los componentes principales de la zeolita (Tabla 3.2) pudiendo este, en el contacto con el agua disolverse y aumentar la concentración.

## 4.2.5 Manganeso

En la Figura 4.5 se presentan los perfiles de concentración afluente y efluente del Mn total según los cuatro tipos de tratamiento.

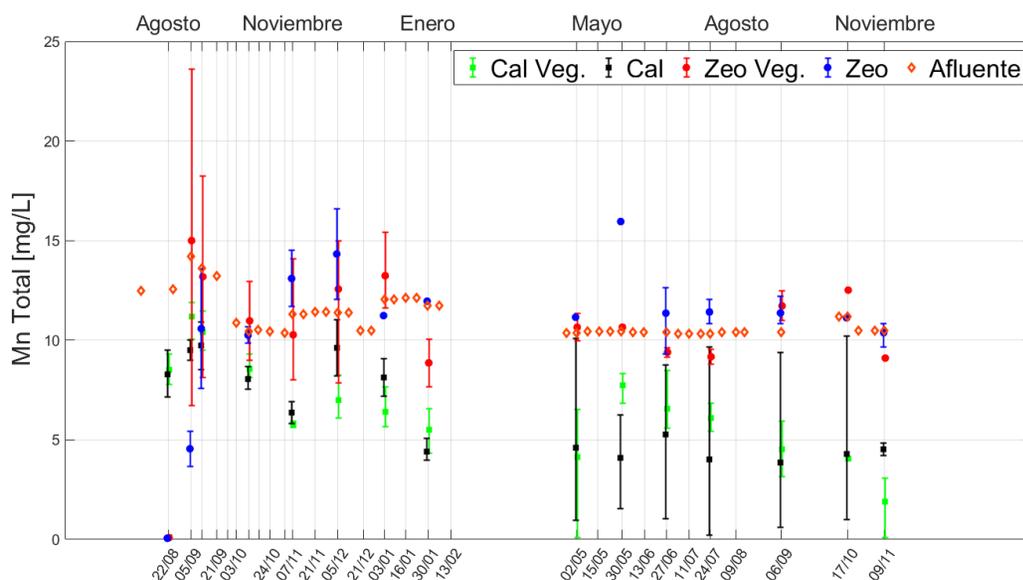


Figura 4.5: Perfil de concentraciones de Mn total afluente y efluente según tipo de tratamiento.

En términos generales el sistema presentó una remoción superior al 27% de Mn total. En los humedales con caliza se presentó una remoción promedio  $>45\%$  mientras que en las celdas con zeolita la remoción promedio fue inferior al 10%. La poca efectividad de los tratamientos con zeolita radica en la presencia de Mn en dicho mineral como se muestra en la Tabla 3.2. Se aprecia en la Figura 4.5 una baja considerable en la concentración del metal en los efluentes, para cada tipo de tratamiento. Lo anterior contrasta con lo expuesto por Jaque (2017), que planteaba que el Mn era retenido durante las primeras semanas de operación para ser liberado posteriormente al efluente. En el segundo período, una vez operado regularmente el sistema, se obtuvo un aumento en la tasa de remoción para humedales con caliza y una baja o nula remoción para humedales con zeolita.

## 4.2.6 Zinc

En la Figura 4.6 se presentan los perfiles de concentración de entrada y salida del Zn total según los cuatro tipos de tratamiento.

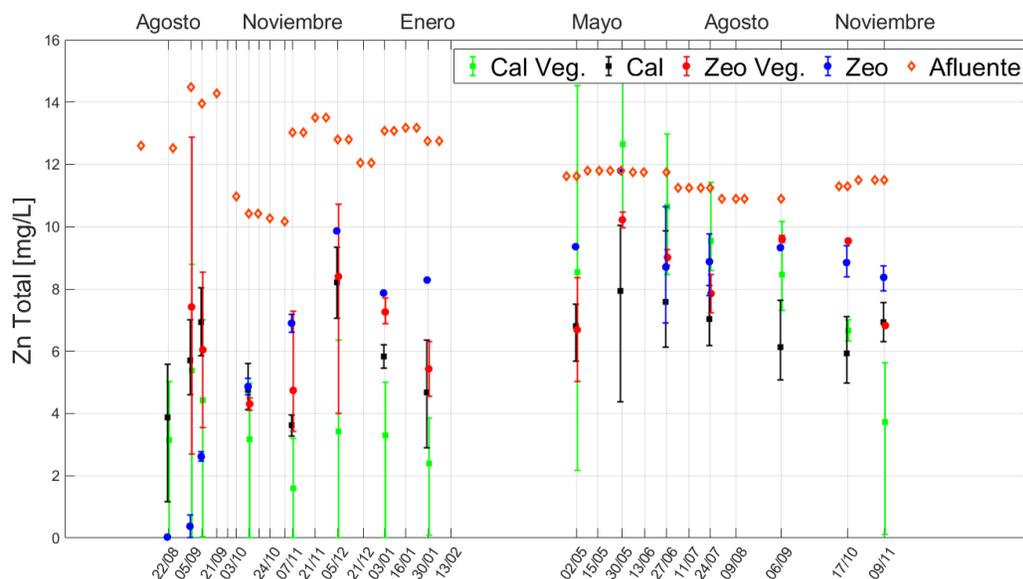


Figura 4.6: Perfil de concentraciones de Zn total afluente y efluente según tipo de tratamiento.

En la primera etapa la remoción porcentual de zinc fue superior al 64%, para el sistema en su totalidad, llegando a disminuir en más de la mitad para el segundo período, donde presenta un valor cercano a 29%, lo que habla del deterioro del sistema en general, luego de más de seis meses de operación. Las celdas caliza vegetada y zeolita vegetada presentaron las tasas de remoción más altas en el primer período (superiores a 73%), siendo las más deficientes en el segundo (sin sobrepasar el 26% de remoción). Para el tratamiento con caliza vegetada se aprecia una clara tendencia a disminuir las concentraciones efluentes a partir del 30/05, en el segundo período de operación. A su vez, en dicho período este tipo de humedales es el único que le adiciona Zinc al agua tratada, los días 02/05, 30/05 y 24/07. La remoción general del sistema alcanza valores superiores al 46%.

## 4.2.7 Plomo

La Figura 4.7 presenta los perfiles de concentración de entrada y salida de Pb total en los cuatro tipos de tratamientos aplicados.

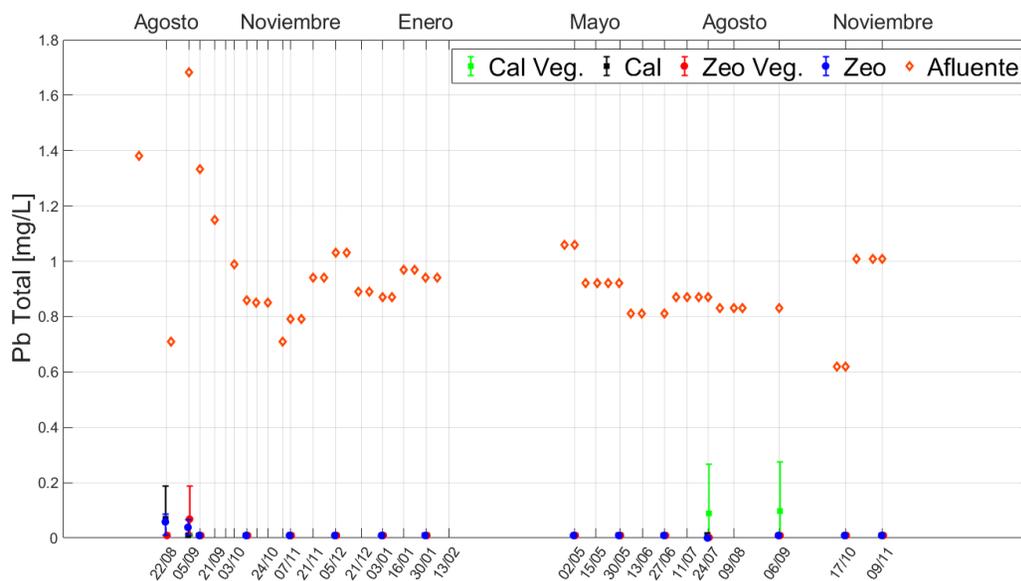


Figura 4.7: Perfil de concentraciones de Pb total afluente y efluente según tipo de tratamiento.

En la Figura 4.7 se aprecia que durante los días 22/08 y 05/09 de 2016 fue detectado plomo en humedales de caliza sin vegetar y zeolita vegetada, respectivamente. Lo anterior puede deberse a que el sistema no se encontraba operando de manera estable. Durante el segundo período se observa en los muestreos correspondientes al 24/07 y 06/09 una alta presencia de plomo en los humedales vegetados de caliza. Lo anterior no puede atribuirse al tipo de medio ni a la presencia de vegetación, dado que fue solo una celda (CAL 01) la que presentó remociones no superiores al 70%, mientras que el resto de humedales con la misma configuración, se mantuvo removiendo cerca del 99% del contaminante. El sistema en general presentó una eficiencia de remoción superior al 98% en ambos períodos de operación.

## 4.2.8 Sulfato

La Figura 4.8 presenta los perfiles de concentración de entrada y salida de sulfato en los cuatro tipos de tratamientos aplicados.

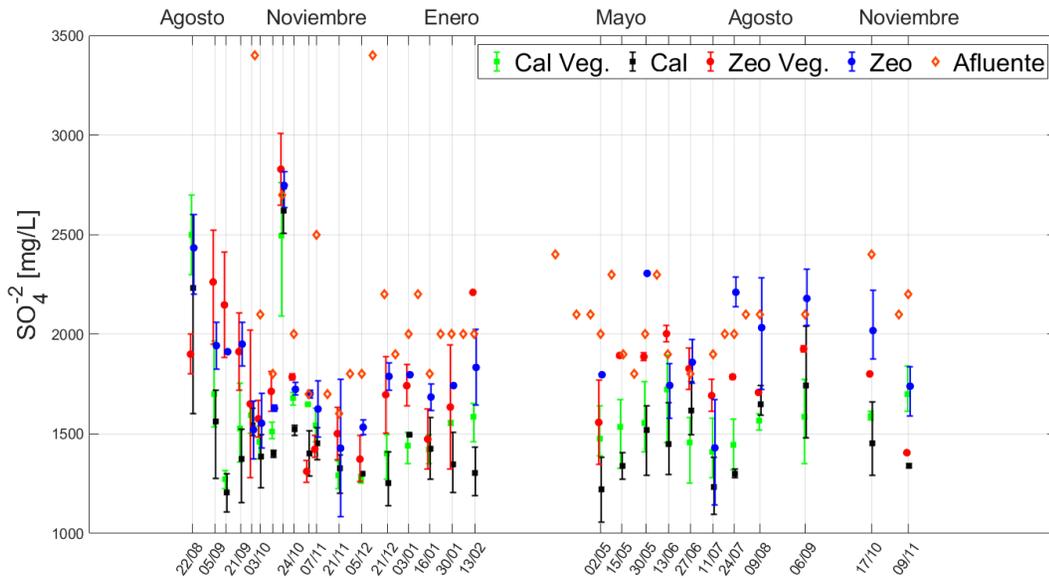


Figura 4.8: Perfil de concentraciones de sulfato total afluente y efluente según tipo de tratamiento.

En la figura se observa una efectiva remoción de sulfato, en particular en los tratamientos con caliza. Durante el primer período de operación se alcanzó una remoción  $>32\%$  en los humedales de caliza, mientras que en los humedales de zeolita la remoción fue  $<24\%$ . En la segunda etapa de operación la remoción promedio disminuyó ostensiblemente en los humedales de zeolita  $<9\%$ , mientras que en las celdas con caliza presentaron eficiencias de remoción cercanas al 30%. El día 17/10 en el primer período se observa una singularidad en todos los tratamientos atribuible a un posible error de medición. Para calcular los porcentajes de remoción se utilizaron datos de sulfato medidos por el CEGA, para los primeros cuatro muestreos en agua ácida, específicamente.

## 4.2.9 Otros contaminantes

Se presenta el análisis de los siguientes elementos, todos corresponden a iones: sodio, potasio, calcio, magnesio y cloruro. Estos contaminantes fueron analizados solo en cuatro muestreos, 22/08, 05/09, 12/09 y 11/10 de 2016, correspondientes al primer período de operación. La Tabla 4.2 presenta un resumen de los porcentajes de remoción logrados en dicho lapso de tiempo.

Tabla 4.2: Resumen de eficiencias de remoción para iones en sistema de humedales

Promedio <sup>(1)</sup>	Contaminante				
	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Cl <sup>-</sup>
Caliza	4.3	15.2	-219.0	-3.7	9.3
Zeolita	59.5	91.7	-213.5	-31.8	12.8
Total	31.9	53.5	-216.2	-17.8	11.0

(1): Incluye celdas vegetadas y no vegetadas.

El Na<sup>+</sup> y el K<sup>+</sup> presentaron remociones bajas en humedales construidos con piedra caliza, superando apenas el 15%, mientras que en sus análogos de zeolita las remociones fueron cercanas al 60% para el sodio y superiores al 90% para el potasio. Lo anterior generado porque en la zeolita se produce intercambio catiónico, razón por la cual es un medio de soporte adecuado para la remoción de iones.

Por su parte los iones Ca<sup>+2</sup> y Mg<sup>+2</sup> no presentaron remoción, sino que aumentaron su concentración en el caudal efluente. En el caso del calcio, se obtuvieron concentraciones dos a cuatro veces mayores al caudal afluente (Jaque, 2017), asociado a la presencia de carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>), que es el componente principal de la caliza, mientras que en la zeolita el calcio está presente como monóxido de calcio (CaO). El magnesio presenta una mayor presencia en los efluentes de humedales con zeolita, asociado al intercambio catiónico que allí ocurre. Ambos contaminantes tienden a disminuir su concentración en el tiempo.

El cloruro muestra una remoción levemente mayor en humedales con zeolita, en comparación a las celdas con caliza, siendo en ambos casos muy bajos porcentajes de remoción.

Al ser iones, una buena manera de ver su presencia en el agua es mediante el valor de la conductividad eléctrica, análisis que se realizará en la sección 4.3.3.

## 4.3 Parámetros *in situ*

En esta sección se presentan los parámetros de calidad de agua medidos durante la operación del sistema. Los parámetros fueron corregidos por la evapotranspiración, a excepción del potencial redox y la turbiedad, que no son afectados. En todas las figuras de la sección 4.3 las barras de error indican el valor máximo, mínimo y promedio, según el tipo de tratamiento.

### 4.3.1 pH

La Figura 4.9 muestra cómo ha variado el pH afluente y efluentes para cada uno de los tratamientos a los que se sometió el agua ácida.

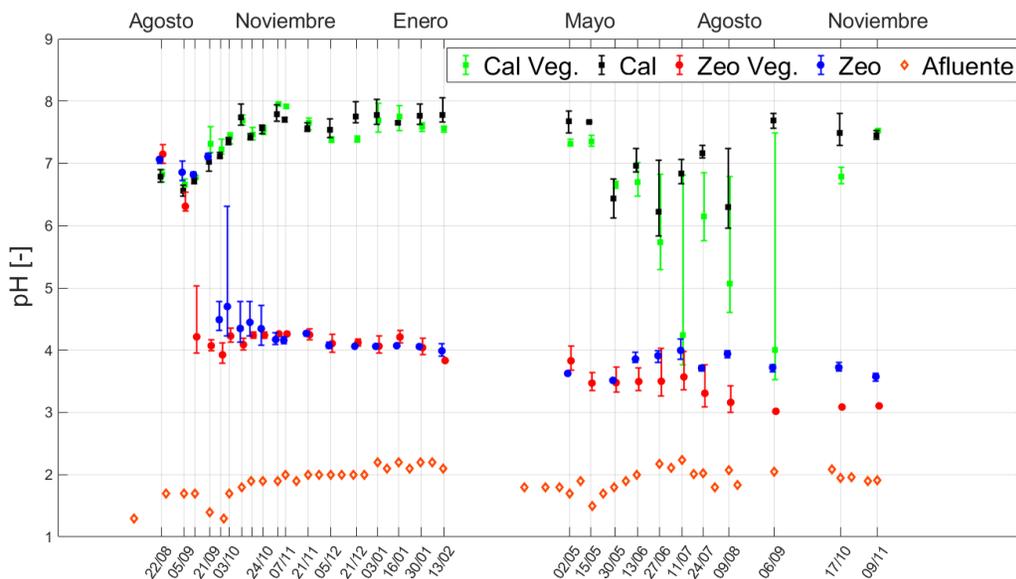


Figura 4.9: Perfil de pH promedio del afluente y efluentes según tipo de tratamiento.

En el perfil anterior se observa como la caliza neutraliza de mejor manera el agua contaminada, obteniendo en dichos humedales un valor de  $\text{pH} \approx 7.4$  para el primer período, mientras que en el segundo el valor promedio es cercano a 7.2. La caliza neutraliza el afluente producto de su alto contenido de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), sobre el 90% como lo indica la Tabla 3.1, lo que genera la siguiente reacción.



Los carbonatos liberados al agua son capaces de captar los protones libres ( $\text{H}^+$ ) del efluente, elevando el pH hacia valores neutros. Lo anterior también explica el aumento en la concentración de elementos como el  $\text{Ca}^{+2}$ .

Por su parte la zeolita entrega un caudal efluente más bien ácido, en la primera etapa el pH fue  $\approx 4.8$  mientras que en la segunda fue  $\approx 4.4$ . La baja capacidad de la zeolita de aumentar el pH se debe a que capta protones solo mediante adsorción al medio y la posible formación de ácido sílico ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ,  $\text{p}K_{a1} = 9.84$  a  $25^\circ\text{C}$ ), tal como lo plantea Jaque (2017).

En promedio, las celdas vegetadas entregan pHs más bajos que sus equivalentes no vegetadas, no obstante, la vegetación no resultó determinante producto que las diferencias no superaban el 5% del valor medido. En el primer período se observa un desfase de dos semanas entre los efluentes ácidos de las celdas con zeolita (desde el 12/09) y las celdas con zeolita vegetada (28/09),

presumiblemente provocada por la presencia de *Phragmites australis*. Durante el segundo período se observa una mayor dispersión en los datos, provocada por la falla de ciertas celdas en particular, a partir del día 27/06 empiezan a fallar visiblemente los humedales CAL 01 y CAL 07, arrojando valores de pH menores a 6, manteniéndose esa tendencia, como se puede ver en el perfil. La baja generalizada del pH en el segundo período, junto con las fallas puntuales son atribuibles al extenso tiempo de operación que llevaba el sistema en ese entonces, lo cual desgasta el funcionamiento general.

### 4.3.2 Potencial redox

La Figura 4.10 muestra la evolución en el tiempo del potencial redox en afluente y efluentes para los cuatro tipos de tratamiento.

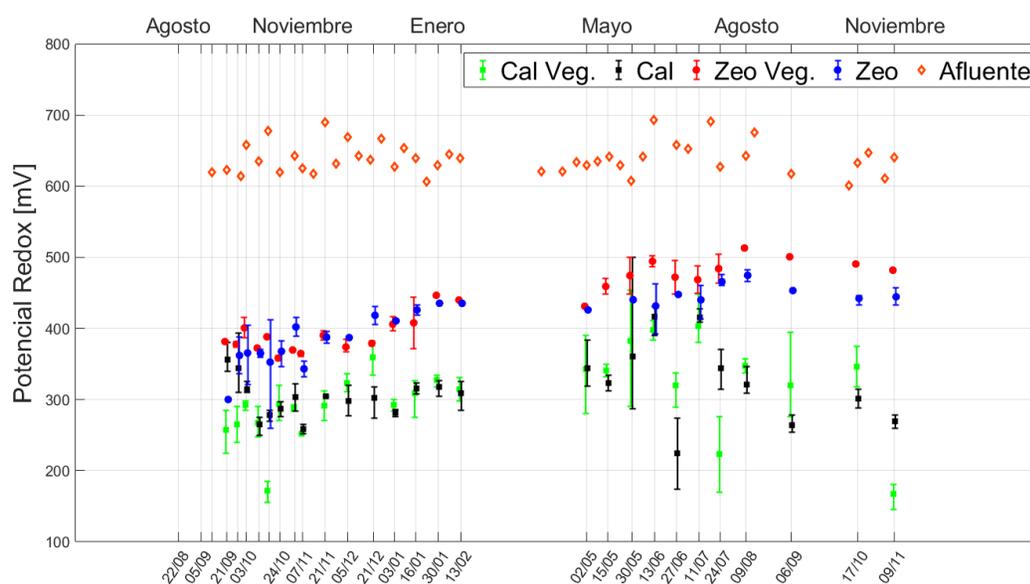


Figura 4.10: Perfil de Eh promedio del afluente y efluentes según tipo de tratamiento.

La figura deja en evidencia que los cuatro tipos de tratamiento disminuyeron el Eh del agua ácida. El rendimiento general del sistema presenta una disminución desde  $\approx 650$  mV a  $\approx 360$  mV, en promedio, a su vez los valores positivos indican la presencia de ambientes oxidantes, siendo la zeolita la que genera el ambiente más oxidante, al presentar valores mayores. Durante el primer período, el día 17/10, se presenta una singularidad atribuible a un posible error en la medición (Jaque, 2017), mientras que en el segundo período se presenta una mayor dispersión en los datos, producida por el desgaste del sistema. Durante la segunda etapa de operación se aumenta en promedio el valor del Eh para los cuatro tratamientos, a pesar de que ciertas notorias mermas los días 27/06, 24/07 y 09/11, todas en humedales que presentan caliza como sustrato. En resumen, para el primer período la caliza presentó valores de Eh  $\approx 290$  mV y la zeolita  $\approx 380$  mV, mientras que en el segundo período los valores promedio fueron  $\approx 325$  mV para las celdas con caliza y  $\approx 460$  mV para las que contenían zeolita.

### 4.3.3 Conductividad eléctrica

La Figura 4.11 muestra la evolución en el tiempo de la conductividad eléctrica en afluente y efluentes para los cuatro tipos de tratamiento.

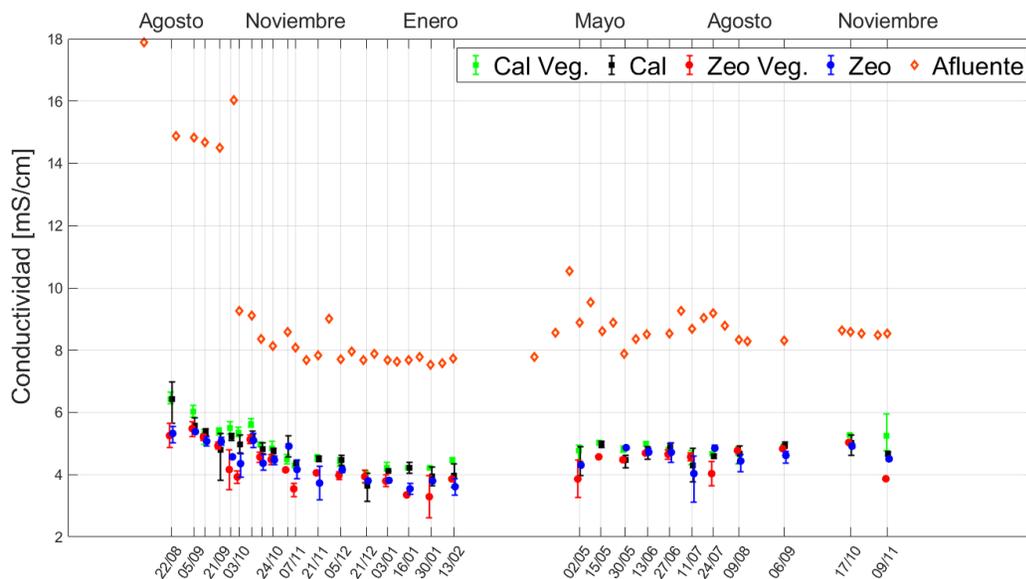


Figura 4.11: Perfil de conductividad eléctrica promedio del afluente y efluentes según tipo de tratamiento.

La conductividad eléctrica presenta una relación inversamente proporcional con la calidad del agua, ya que evidencia los iones presentes en la solución. En términos generales la Figura 4.11 muestra una clara disminución de la conductividad para los cuatro tipos de tratamientos. Además los valores de la conductividad en efluentes de celdas con caliza son superiores a las celdas con zeolita, en la mayoría de los muestreos. Se puede observar una tendencia a disminuir la conductividad en el tiempo durante la primera etapa de operación, aumentando esta una vez retomada la operación en el muestreo del 02/05 de 2017, en la segunda etapa. La conductividad eléctrica promedio fue de 4.61 mS/cm durante la primera etapa y alcanza 4.68 mS/cm en el segundo período, constatando un aumento en el valor que produce una merma en la calidad del agua tratada.

### 4.3.4 Turbiedad

La Figura 4.12 muestra la evolución en el tiempo de la turbiedad en afluente y efluentes para los cuatro tipos de tratamiento.

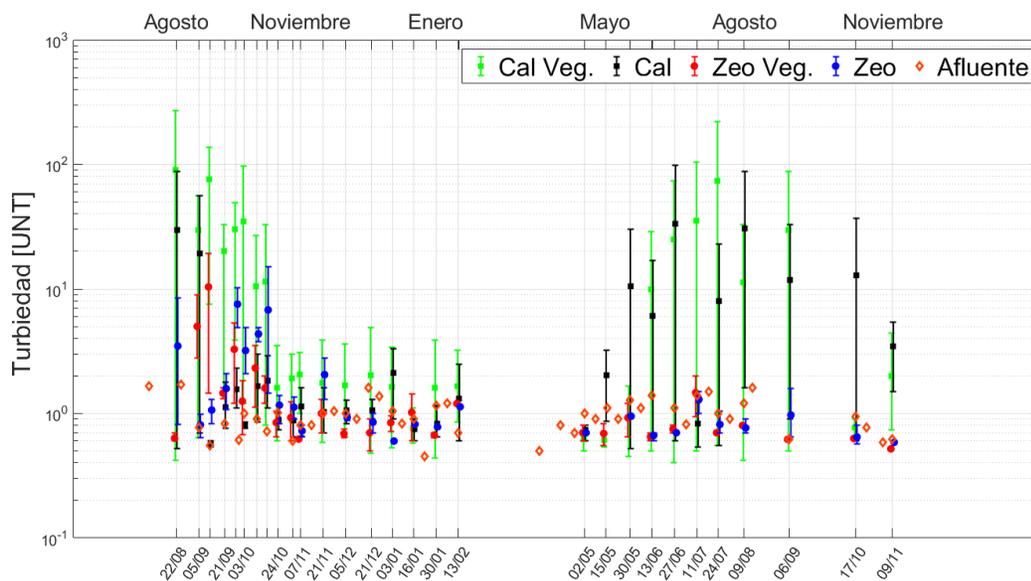


Figura 4.12: Perfil de turbiedad promedio del afluente y efluentes según tipo de tratamiento.

En general los caudales efluentes presentaron valores de turbiedad superiores al agua ácida. En el perfil se muestra que el sistema presentó altos niveles de turbiedad al principio de la operación, siendo esta más intensa en las celdas con caliza, alcanzando valores superiores a los 200 UNT. Lo anterior se atribuye al material fino que persiste en los medios de soporte, posterior al lavado realizado. A partir del día 24/10 en el primer período y hasta el primer muestreo del segundo período (02/05) se presentaron valores de turbiedad menores a las 2 UNT. En el segundo período se presentaron altísimos niveles de turbiedad en las celdas con caliza obteniendo un promedio  $\approx 15$  UNT, el cual contrasta con las celdas de zeolita, que no superaron el valor de 1 UNT en promedio. Al momento de operar el sistema se observó que la turbiedad del primer período presentaba un color anaranjado, siendo presumiblemente óxidos de hierro (Jaque, 2017), mientras que en el segundo período la turbiedad era más bien blanca/grisácea, por lo que puede atribuirse a la presencia de compuestos con calcita en humedales de caliza.

### 4.3.5 Dureza

La Figura 4.13 muestra la evolución en el tiempo de la dureza en afluente y efluentes para los cuatro tipos de tratamiento.

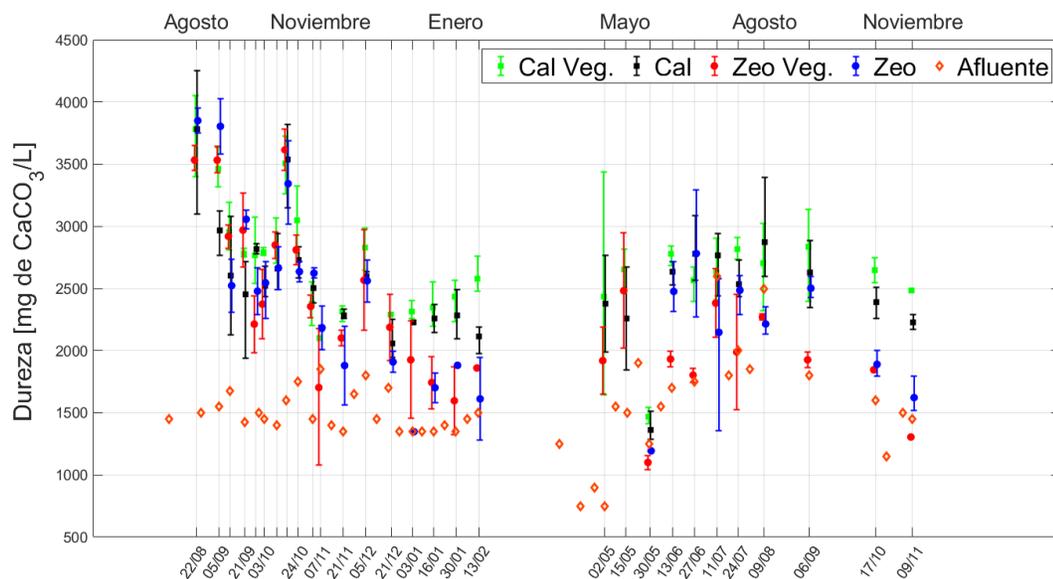


Figura 4.13: Perfil de dureza promedio del afluente y efluentes según tipo de tratamiento.

En la Figura 4.13 se aprecia que todos los tratamientos (salvo contadas excepciones) presentan una dureza superior al afluente (dureza afluente  $\approx 1500$  mg de  $CaCO_3/L$ ), alcanzando valores promedio de  $\approx 2600$  mg de  $CaCO_3/L$  para el primer período, y de  $\approx 2300$  mg de  $CaCO_3/L$ , en el segundo período de operación. La alta dureza se complementa con la presencia de iones como  $Ca^{+2}$  y  $Mg^{+2}$  en los efluentes, los cuales son disueltos desde los medios de soporte. La disminución de la dureza durante la segunda etapa de operación va de la mano con la disminución de la liberación de iones al agua, producto de que cada vez queda una menor cantidad en los sustratos.

### 4.3.6 Alcalinidad

La Figura 4.14 muestra la evolución en el tiempo de la alcalinidad en afluente y efluentes para los cuatro tipos de tratamiento. La alcalinidad total solo es válida para compuestos con un  $\text{pH} > 4.7$ , de lo contrario se denomina acidez. Lo anterior lleva a no presentar datos de este parámetro para el afluente.

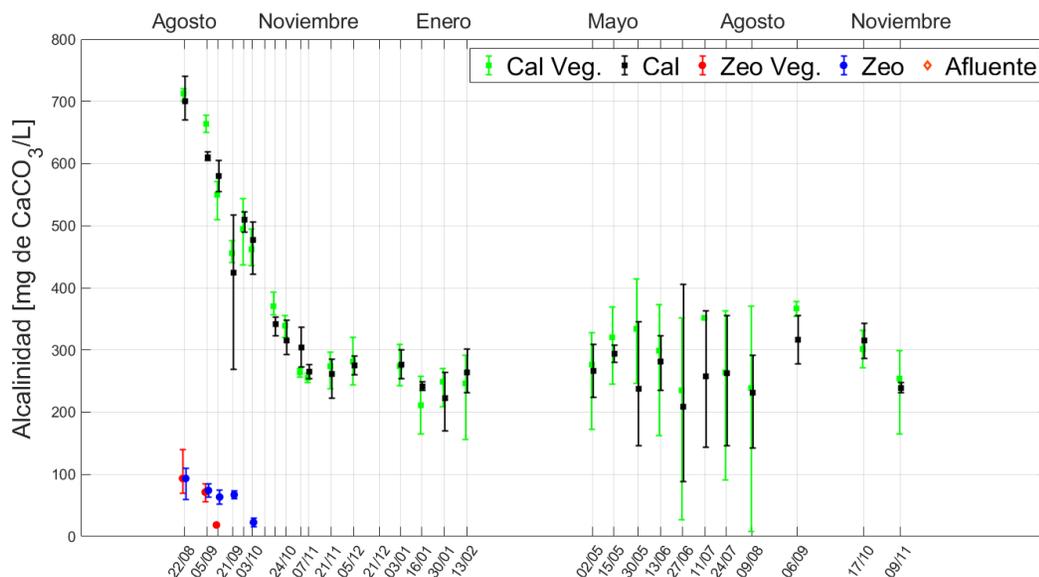


Figura 4.14: Perfil de alcalinidad promedio del afluente y efluentes según tipo de tratamiento.

La alcalinidad en promedio de los efluentes fue  $\approx 300$  mg de  $\text{CaCO}_3/\text{L}$ , para todo tipo de celdas. Las celdas de caliza son las que en general, presentan alcalinidad, obteniéndose para ellas un promedio de  $\approx 390$  mg de  $\text{CaCO}_3/\text{L}$  para el primer período, disminuyendo hasta  $\approx 270$  mg de  $\text{CaCO}_3/\text{L}$  en el segundo período. La baja en la alcalinidad se explica por el agotamiento de las bases conjugadas en solución, especialmente el carbonato ( $\text{CaCO}_3$ ) y bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), presentes en ambos medios, que imposibilitan la captación de electrones. A su vez, las bajas ostensibles en los valores que se aprecian en muestreos del período 27/06, 11/07, 24/07 y 09/08 se justifican por las bajas en el  $\text{pH}$  que presentaron las celdas con caliza durante el mismo período.

### 4.3.7 Sólidos disueltos totales

La Figura 4.15 muestra la evolución en el tiempo de la concentración de sólidos disueltos totales (SDT) en afluente y efluentes para los cuatro tipos de tratamiento.

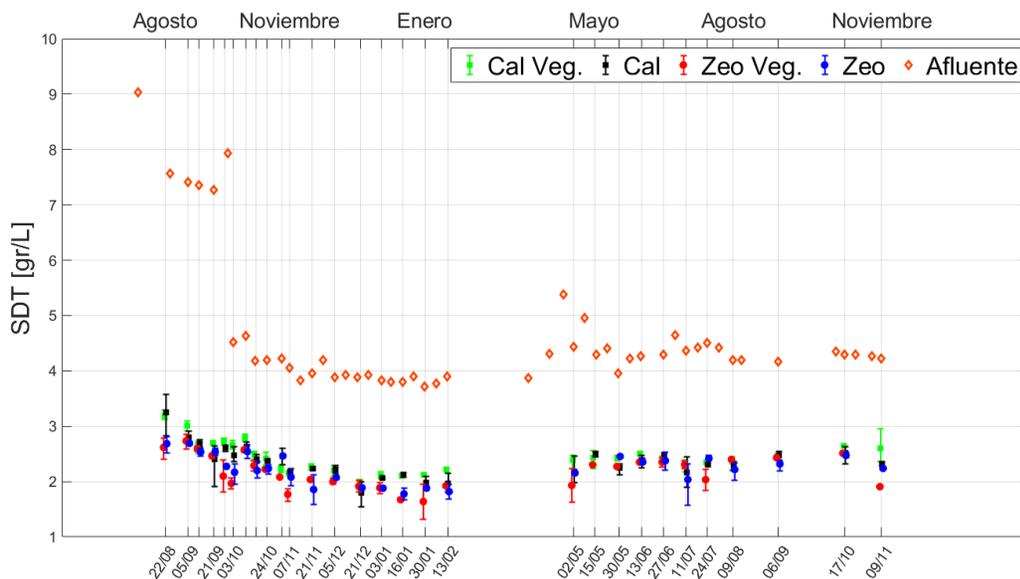


Figura 4.15: Perfil de sólidos disueltos totales promedio del afluente y efluentes según tipo de tratamiento.

En la figura se observa una alta densidad de SDT en la puesta en marcha del sistema, presumiblemente por la alta presencia de material fino en los medios de soporte. A medida que avanzan las semanas durante la primera etapa se observa una clara tendencia a disminuir la concentración en todos los tratamientos. Posteriormente una vez reactivado el sistema, se observa un alza del 9% en promedio, de la concentración de SDT, valores que se mantienen hasta el día 09/11. Ponderando ambas etapas de operación la concentración promedio de sólidos disueltos totales fue superior a los 2300 mg/L, de acuerdo a la norma NCh1333 califica como “agua que puede ser usada para plantas tolerantes en suelos permeables con métodos de manejo cuidadosos”.

## 4.4 Factores externos

Durante ambos períodos de operación del sistema fue posible detectar cambios visuales en algunas celdas del sistema. En los tratamientos con caliza se observaron coloraciones anaranjadas, que delatan la presencia de hidróxidos de hierro, distinguibles en las vistas longitudinales (Figura 4.16), como en la vista de planta de las celdas.



*Figura 4.16: Coloración presente en celda 3. Izquierda: Sistema con 46 días de operación. Derecha: Sistema con 150 días de operación. Fotos: Ignacio Jaque.*

En la Figura 4.17 (foto de octubre de 2017) se muestra cómo la coloración abarcó el total del largo del humedal CAL 07, colorando la zona de filtración de grava y el aquietador, lo que se piensa influyó en los valores de turbiedad.



*Figura 4.17: Coloración presente en celda 7. Un año y 2 meses de operación.*

Otro cambio observable fue la presencia de agua en la superficie del sustrato (Figura 4.18), teóricamente esto no debiera ocurrir en un humedal de flujo subsuperficial, pero se estima que su impacto en el tratamiento es despreciable, dadas las condiciones oxidantes presentes durante todo el tratamiento.



*Figura 4.18: Condiciones de flujo superficial en celdas CAL 08 y CAL 09, respectivamente. Octubre 2017.*

También se observó el crecimiento de sólidos (presumiblemente hongos, por las condiciones de humedad presentes), en las celdas con zeolita (Figura 4.19).



*Figura 4.19: Sólidos formados en la superficie de celdas con zeolita. Izquierda: Primer período de operación. Derecha: Segundo período de operación.*

## 4.5 Comparación con trabajos afines

La Tabla 4.3 presenta una comparación en parámetros de diseño, tiempo de operación y resultados entre 10 experiencias distintas, incluyendo la presente, que utilizaron zeolita como medio de soporte y fueron vegetados con *Phragmites australis*.

Tabla 4.3: Comparación con experiencias anteriores en humedales utilizados para la remoción de arsénico

Parámetro	Unidad	Lizama (2014)	Henry (2015)	Jaque (2017)	Fuentealba (2017)	Fuentealba (2017)	Fuentealba (2017)	Vargas (2018)	Vargas (2018)	Vargas (2018)	Echeverría (2018)
As inicial	mg/L	2.3	3	2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	<b>3.5</b>
Fe inicial	mg/L	97	100	60	51	51	51	51	51	51	<b>60</b>
Largo medio	mm	435	350	1300	500	500	500	500	500	500	<b>1300</b>
Ancho	mm	200	150	500	200	200	200	200	200	200	<b>500</b>
Profundidad	mm	600	120	280	150	150	150	150	150	150	<b>280</b>
Carga superficial	mm/d	30	9.6	20	20	50	80	20	100	200	<b>20</b>
Caudal diario	L/d	3.6	0.5	19	2.4	6	9.6	2.4	12	24	<b>19</b>
HRT zeo	días	8.4	7.3	5.6	3.6	1.5	0.9	3.6	3.6	0.7	<b>0.4</b>
Remoción	%	>99.8	>98.9	>98.2	>99.8	>99.8	>99.9	>99.9	>99.9	>97.5	<b>&gt;97.8</b>
Tiempo de operación	semanas	22	8	16	4	4	4	16	16	16	<b>57</b>

El presente trabajo contiene el montaje experimental que ha funcionado por la mayor cantidad de tiempo (57 semanas de operación), la mayor concentración de arsénico (3.5 mg/L) y el tamaño más grande de humedales construidos en escala experimental, por lo que es muy destacable el alto porcentaje de remoción obtenido.

Al compararlo con la experiencia de Jaque (2017), realizada en el mismo montaje y cuya diferencia radica en la concentración inicial de arsénico y el tiempo de operación, se obtuvo un porcentaje de remoción similar, lo que indica la capacidad de remoción de As que presenta la zeolita en el tiempo. Del mismo modo esto ocurre con la caliza, al presentarse también eficiencias superiores al 97%.

## 4.6 Análisis de la evapotranspiración directa y estimada

La evapotranspiración de las celdas fue medida antes y durante la operación del sistema. La Figura 4.20, presenta la ET obtenida antes del período de la operación del sistema, entre los meses de mayo y julio.

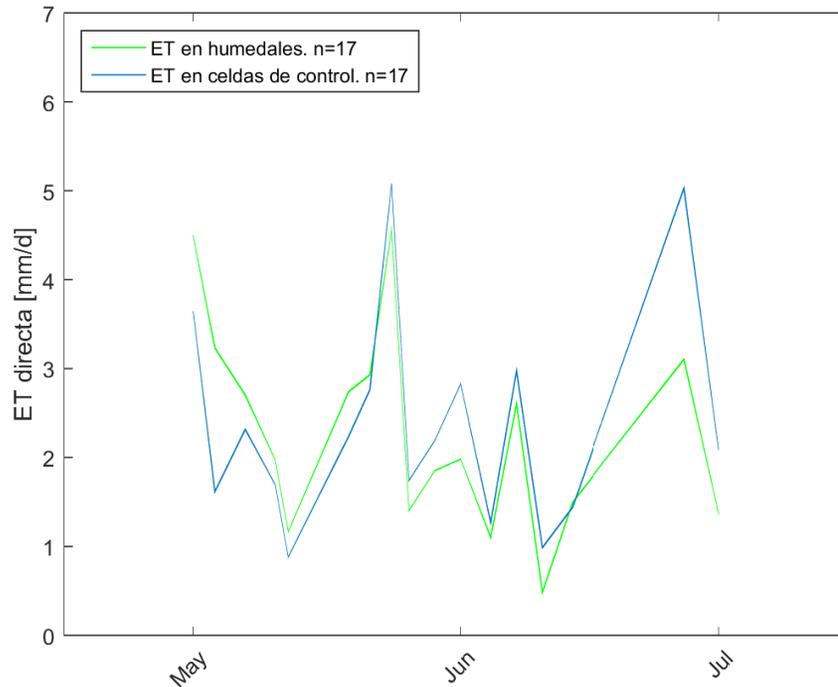


Figura 4.20: ET medida en humedales antes de la operación del sistema (Jaque. 2017)

Por su parte la Figura 4.21 presenta la ET medida durante el período de operación del sistema, es decir desde septiembre del año 2016 hasta noviembre del 2017.

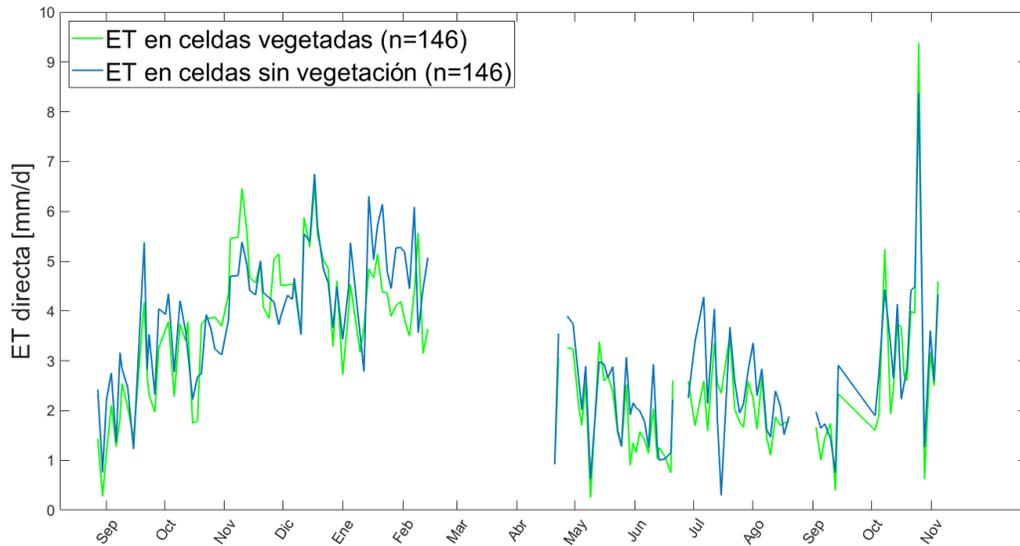


Figura 4.21: ET medida en humedales durante la operación del sistema

Para ambas figuras las celdas se dividieron entre vegetadas (color verde) y no vegetadas (color azul), con el objetivo de evaluar la influencia de la vegetación en la ET. Tanto en el periodo anterior y simultáneo a la operación del sistema no se observó una gran diferencia entre los valores de celdas vegetadas y de control, por lo que el coeficiente de cultivo para el método propuesto por FAO se aproxima a  $K_{Phrag} \approx 1$ , menor al valor propuesto  $K_{Phrag} \approx 1.2$  (FAO, 2006). Durante los meses de verano la ET promedio fue cercana al 27%, mientras que en invierno el valor promedio de la ET alcanzó un 13%. El promedio diario de ET medida durante la operación del sistema fue de 3.2 mm/día.

En la Figura 4.22 se observa que la ET medida no difirió mucho a la estimación realizada con el método FAO Penman-Monteith. Sin embargo, se observa que en los meses de invierno la estimación presentó valores inferiores a los medidos en el terreno.

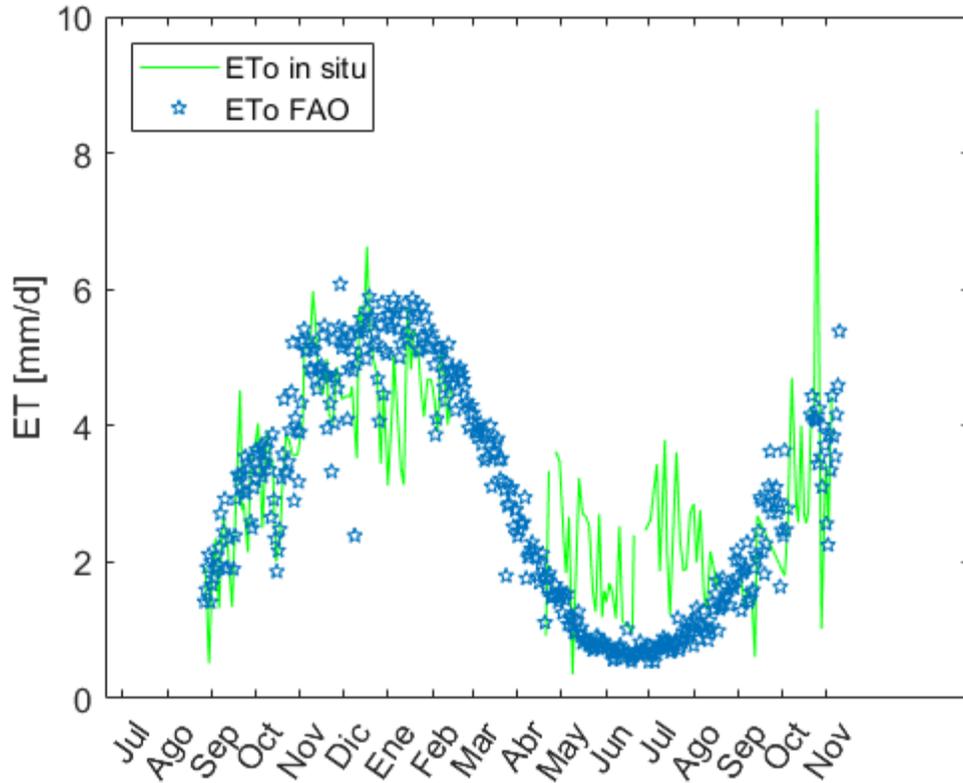


Figura 4.22: ET medida y ETo estimada con método FAO Penman-Monteith

Analizando los datos se puede observar que casi no existe diferencia entre los valores de ET de las distintas celdas, independiente del tipo de sustrato que presenten o de la presencia o ausencia de vegetación. Por lo anterior los valores de ET obtenidos se consideran como la ET real del sistema de humedales.

## 4.7 Tiempo de vida útil

El sistema estuvo en operación durante 57 semanas, sumándose a estas las 7 semanas de pausa entre los dos períodos de operación. La vida útil de cada celda puede diferir, producto de que cada celda entregó un volumen efluente distinto, como se muestra en la Figura 4.23. Lo anterior fue provocado mayoritariamente por las fallas físicas del acrílico, que hacían necesario interrumpir la operación para vaciar los humedales y reparar las filtraciones. La cantidad de agua tratada no es menor a los 3900 litros en las celdas regulares, dado que la celda ZEO 04 (zeolita vegetada) solo funcionó durante el primer período, la celda ZEO 11 (zeolita) solo funcionó durante el segundo período y la celda ZEO 12 (zeolita) presentó numerosas fallas, todas fallas estructurales para las tres celdas afectadas. La siguiente figura muestra el detalle:

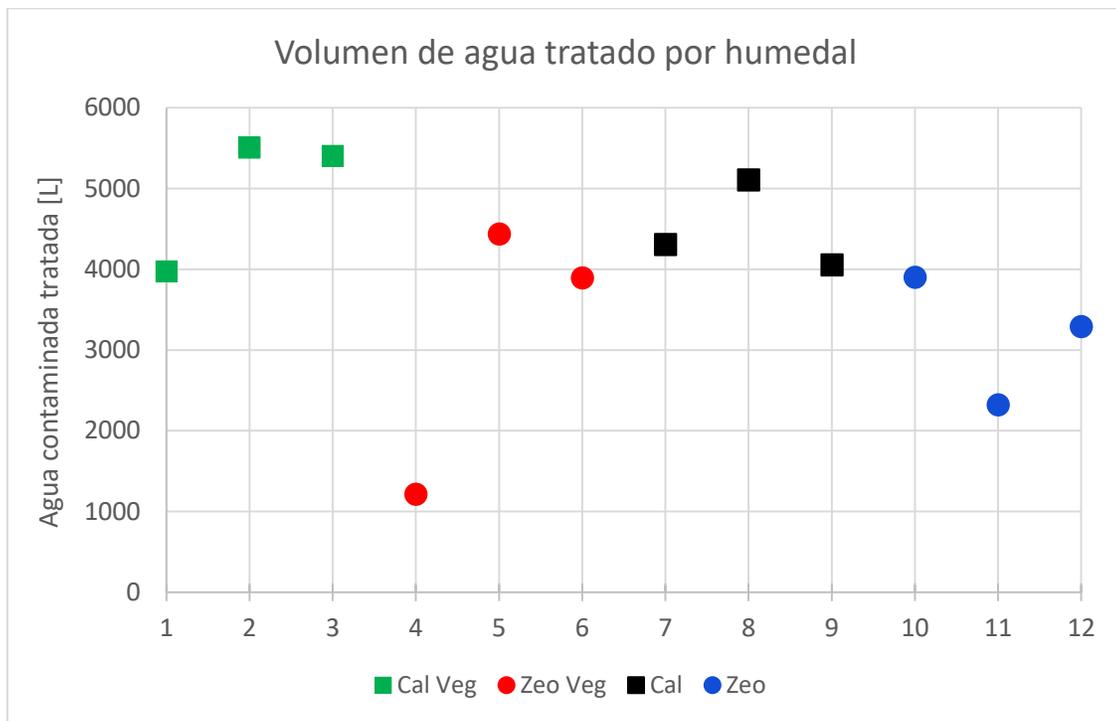


Figura 4.23: Volumen de agua tratado por celda

Las concentraciones de contaminantes y parámetros in situ en los efluentes son información determinante al momento de estimar la vida útil del sistema de tratamiento. El criterio a comparar es la NCh 1333, que mide la calidad de aguas destinadas a regadío.

La presencia de contaminantes como el boro y el manganeso en los caudales efluentes excede los límites de la norma en el 80% del total de muestras, mientras que el Zn en el 70% de los casos. Por su parte los iones como el sodio, cloruro, calcio, potasio y magnesio fueron cuantificados solo las primeras 7 semanas de operación, sobrepasando ampliamente los valores límites de la normativa, en el caso de estar indicados, mientras que el sulfato sobrepasó la normativa en todos los muestreos. Por lo anteriormente expuesto, la estimación de la vida útil no será determinada por el análisis de dichos contaminantes.

El hierro y el aluminio presentaron valores dispares dependiendo del tipo de tratamiento (Ver sección 4.2). El Fe cumplió a cabalidad las restricciones de la normativa para celdas no vegetadas, mientras que para celdas vegetadas falla, en general durante los últimos muestreos, a partir del día 27 de junio en algunas celdas y 24 de julio en otras (con 38 y 42 semanas de operación, respectivamente). Por su parte el Al solo presenta 4 muestras fuera de la norma, tres para un mismo humedal (CAL 01) y otra en CAL 07, originándose las fallas el día 27/06, a las 38 semanas de operación).

La remoción de plomo permitió cumplir los requerimientos de la NCh 1333 durante la totalidad de la operación, mientras que el arsénico solo sobrepasó la concentración límite en 3 muestras, dos en el humedal CAL 01 (24/07 y 06/09) y una en el humedal CAL 07 (27/06).

Por último reiterar lo expuesto en la sección de pH, que a diferencia de las celdas con zeolita, las celdas con caliza entregan efluentes con pH neutral y que se inserta en los valores establecidos por la normativa (entre 5.5 - 9), a excepción de 4 muestras, todas correspondientes al humedal CAL 01, a partir del día 27/04.

Celdas y fechas se repiten en lo anteriormente expuesto. El día 27/06 el humedal CAL 07 (caliza no vegetada) presentó sus valores más elevados de hierro, aluminio y arsénico (los dos últimos sobre la norma) y su pH mínimo. Por su parte la celda CAL 01 presentó valores fuera de la norma el día 27/06 para aluminio y pH, mientras que el 24/07 para arsénico y hierro.

El sistema de humedales fue diseñado con el fin de remover arsénico, por lo que la aparición de este elemento en el efluente es la que limita la vida útil del sistema. El As solo se observa en dos celdas CAL 01 a las 42 semanas de operación y CAL 07 a las 38 semanas de operación, lo cual sería el tiempo de vida útil de la celda.

Otra manera de estimar la vida útil es en base a la masa de As, producto de que el tiempo en semanas de vida útil depende mucho de las concentraciones iniciales, carga hidráulica, dimensiones y otros factores físicos del sistema de humedales. Excluyendo los humedales 4, 11 y 12, el promedio por humedal es de 9.5 g de arsénicos removidos. Calculando de manera conservadora con las dimensiones de las celdas y solo para los sustratos utilizados, sería conveniente cambiar el sustrato cuando 8 gramos de arsénico afluente hayan circulado por 0,2 metros cúbicos de sustrato. La vida útil en este caso se estima en 11 meses de operación (48 semanas), con los respectivos cambios en la concentración inicial de contaminantes.

# Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones

## 5.1 Efecto del medio

Ambos medios de soporte actuaron eficazmente en la remoción de contaminantes. La caliza removió de manera efectiva arsénico, hierro, plomo y aluminio, en ambos períodos de operación, superando el 98% de remoción total media durante el tiempo de operación. Coincidentemente con Jaque (2017) se cree que la principal vía de remoción del arsénico fue la coprecipitación junto a hidróxidos de hierro, por la coloración anaranjada visible a lo largo de todo el medio y las condiciones relativamente neutras de pH (promedio 7.2 en celdas con caliza) que facilitan el proceso. Durante el segundo período se encontraron en promedio mayores concentraciones de todos los contaminantes en el efluente a las del primer período a excepción de sulfato, manganeso y boro, cuyas tasas de remoción aumentaron, por lo que el rendimiento de la caliza se resiente con el tiempo.

La zeolita resultó efectiva en la remoción de arsénico, hierro y plomo, con eficiencias superiores al 97%. Se piensa que las vías de remoción de arsénico en el medio fueron mediante intercambio iónico entre el medio y el Fe (al estar el As retenido en compuestos de Fe), la coprecipitación con hidróxidos de hierro y sorción al medio de soporte. La baja capacidad de la zeolita para aumentar el pH genera un efluente con agua ácida, promediando un pH 4.4 durante toda la operación del sistema.

La remoción de boro se logró durante el segundo período de operación en ambos sustratos, con una eficiencia superior al 14% en dicha etapa. También el manganeso aumentó su eficiencia de remoción en la segunda etapa de operación, promediando 45% en caliza y un 9.6% en zeolita. El zinc presentó porcentajes de remoción de 50% para la piedra caliza y de 42.5% para la zeolita en el tiempo total de operación.

Otro aspecto a destacar es que contaminantes como el As y el Pb en la caliza disminuyen su remoción media en el segundo período mientras que en las celdas con zeolita ocurre todo lo contrario. Los valores promedio están influenciados fuertemente por los humedales que “fallan” (CAL 01 y CAL 07 de acuerdo a lo expuesto en la sección 4.7), por lo que se piensa que la zeolita es un medio de soporte más durable en el tiempo en la remoción de arsénico, sin embargo resulta necesario evaluar con mayor rigurosidad esa información, para ver si la totalidad de celdas de caliza falla antes que las unidades de zeolita. Las celdas homólogas a CAL 01 y CAL 07 no presentaron fallas, por lo que la aparición de As no se atribuye a la caliza, sino que se piensa que dichos humedales y su medio de soporte pudieron verse afectados por la mayor cantidad de horas de sol que tuvieron que soportar, al estar ubicados en el extremo oriente del montaje.

## 5.2 Efecto de la vegetación

Las celdas vegetadas presentaron leves diferencias respecto a sus pares no vegetadas. La remoción de elementos metálicos (a excepción del Zn) fue ligeramente mayor en las celdas de prueba, en rangos entre el 0.1-8%. En particular la remoción de Fe en las configuraciones no vegetadas superó el 99% y no sobrepasó en ninguna muestra los límites impuestos por la NCh1333 (Tabla 2.5), mientras que las celdas vegetadas presentan un 95% de remoción total.

Para el As, Al, Mn y Pb, la remoción en ambos medios de soporte fue mayor en las celdas no vegetadas a lo largo de todo el período de operación. Contrario a lo que sugiere Jaque (2018) que plantea que la vegetación aumenta la eficiencia de remoción del Pb, esto no perduró y se revirtió en el segundo período de operación, gatillado por las altas concentraciones encontradas en el humedal CAL 01, que influye fuertemente en el cálculo del promedio de las celdas vegetadas. En promedio, el tratamiento vegetado de zinc en caliza es el único que se vislumbra mejor que la celda de caliza sin vegetación, sin embargo disminuyó notablemente su eficiencia remoción, pasando de 73% en la primera etapa a 27% en la segunda.

Otro estudio (Fuentealba, 2017) plantea que la presencia de vegetación disminuye el tiempo de retención del humedal, facilitando el paso de agua a través del medio, por lo que esa puede ser una de las razones del menor rendimiento de las celdas vegetadas en comparación a sus homólogas de prueba, al estar los contaminantes inmersos menos tiempo en el sistema de tratamiento.

Mencionar también la excelente adaptación de la planta *Phragmites australis* al sistema de humedales, ya que se logró constatar que los vegetales toleraron las altas concentraciones de contaminantes y no perecieron durante el invierno, al observarse un reverdecimiento en sus hojas durante la primavera de 2017.

## 5.3 Evapotranspiración y tiempo de retención

La evapotranspiración promedio durante la operación del sistema fue de 3.2 mm/día, esta influye alterando el tiempo de retención (ver Figura 2.4) y provocando que el caudal efluente sea menor al afluente, lo que deriva en mayores concentraciones de contaminantes en el agua de salida. Se reitera que para el presente trabajo el análisis de contaminantes y parámetros vinculados a concentraciones (Capítulo 4) fue realizado con los valores corregidos por ET.

La evapotranspiración estimada con el método de Penmann-Monteith presenta una buena aproximación al compararla con la ET medida en terreno en casi todos los meses, sin embargo el cálculo difiere y entrega valores menores en cerca de 1 mm/día a los medidos durante los meses de invierno. Otro factor a considerar es el nulo aporte de la vegetación, producto que en las mediciones las celdas vegetadas presentan valores de ET similares a las celdas no vegetadas, por lo que el coeficiente de cultivo no es relevante en la estimación del método FAO, se infiere que es producto de la baja densidad de vegetación y a que la fórmula fue pensada para aplicarse en extensas zonas de pasto (FAO, 2006).

A su vez la ET influye en el tiempo de retención hidráulico, aumentando en cerca de 9 horas para celdas con caliza y 12 horas para celdas con zeolita el tiempo de retención, es decir, el tiempo que el caudal está en contacto con el medio de soporte. Esto no es relevante en el proceso de remoción de As, producto que las experiencias anteriores mostraron altos porcentajes de remoción con tiempos de retención menores (ver sección 4.5).

## 5.4 Variación estacional

Se observaron porcentajes de remoción de elementos menores durante los meses de invierno, al compararlos con el resto de los meses, para todos los contaminantes analizados, a excepción del boro y manganeso. Durante las dos etapas se tuvieron distintas condiciones y números de datos, analizando meses cálidos para la primera etapa (octubre-marzo) contando con 11 muestreos, meses fríos (mayo-septiembre) con 9 muestreos en la segunda etapa y 2 muestreos adicionales para meses cálidos casi al final de la operación. Los metales y metaloides analizados presentan una mayor remoción durante los dos últimos muestreos analizados en primavera que en invierno. El pH también presenta una notoria variación estacional, muy distinta en ambos medios. La caliza presenta una menor capacidad de aumentar el pH del agua ácida en invierno, promediando valores de 6.8 en comparación a los 7.5 obtenidos en meses cálidos. Por su parte la zeolita presenta una capacidad menor de aumentar el pH del agua afluyente en invierno, pero continua siendo decreciente su capacidad al llegar nuevamente la primavera, por lo tanto esa merma no se debe a la variación estacional, sino que al extendido uso del sistema.

La vegetación presenta un cambio en su apariencia en invierno, al cambiar de tonalidad verde a una coloración amarilla por la falta de clorofila. De todas maneras, las plantas se adaptaron de buena manera, soportando la variación de las condiciones meteorológicas y reverdeciendo una vez volvieron los meses cálidos. Además las bajas temperaturas merman el aumento de biomasa y crecimiento raíces en la *Phragmites australis* (Engloner, 2009) provocando una menor actividad de las plantas durante los meses fríos lo que pudo haber aportado a las bajas de rendimiento de los humedales en invierno.

## 5.5 Potencial aplicación

Para el diseño de humedales construidos se consideran principalmente parámetros como la calidad del agua a tratar, el caudal a tratar y las concentraciones objetivo (Kadlec & Wallace, 2008). Actualmente no existe una guía oficial que explique cómo debe diseñarse un humedal dedicado exclusivamente a la remoción de arsénico (Lizama et al., 2011b), y las experiencias realizadas, en las que se incluye este trabajo, se realizaron en humedales a escala de laboratorio.

El volumen promedio que trató cada celda fue cercano a los 4000 litros en 57 semanas, lo que resulta en cerca de 10 litros de agua por día, número marginal comparado a las cantidades de agua que se utilizan en agricultura y consumo humano (se utilizan aproximadamente 200 L/día por

habitante en la ciudad de Santiago). En razón de lo expuesto, al escalar un humedal a un tamaño mayor es necesario considerar este aspecto.

La experiencia demostró que el acrílico con el que se limitaban las celdas presentó diferentes fallas en las uniones, dando origen a numerosas filtraciones. En una potencial aplicación se recomienda manejar las filtraciones mediante geomembranas impermeables, omitiendo el uso de acrílico para la construcción de celdas, producto de las dimensiones que presentará un humedal funcional a las demandas de agua actuales.

Hay que considerar las limitaciones espaciales que puede presentar el futuro emplazamiento de un sistema de humedales. El espacio puede restringirse debido a la topografía del lugar, la presencia de comunidades, zonas protegidas y propiedades privadas.

Los medios de soporte funcionaron de buena manera en la remoción de contaminantes, la caliza con los metales y la zeolita con iones, en general, además de sus altas tasas de remoción de arsénico. Sería conveniente someter al afluente a un tratamiento en serie a través de medios de soporte, con el objetivo de remover el mayor número de contaminantes y elevar el pH del agua hacia valores neutrales, que es lo que realiza la piedra caliza. A su vez, si se piensa utilizar el agua para riego resulta fundamental remover contaminantes como el Zn, B, Cl, Na y sulfato cuyos valores exceden los límites de la normativa, por lo que incluir otro sistema de tratamiento adicional es trascendental.

Las variables meteorológicas como la ET, temperatura y precipitaciones también resultan preponderantes. El montaje contaba con un techo para evitar ingresos de agua producto de las precipitaciones, esto se recomienda en zonas donde la precipitación media anual sea considerable (por ejemplo el sur de Chile, zonas tropicales, etc), ya que la lluvia de intensidad y duración moderada no genera problemas y aporta más agua al sistema, compensando la evapotranspiración y entregando agua de mejor calidad, en general, que la fuente de abastecimiento del humedal. Por otra parte la evapotranspiración puede ser un problema en zonas extremas donde se pierda un porcentaje considerable del agua tratada, generando también que presente mayores concentraciones de contaminantes. Lo anterior se intensifica en zonas donde la velocidad del viento y altitud sean muy elevadas.

## **5.6 Recomendaciones**

El acrílico presenta numerosas fallas de filtración en las uniones, lo cual genera problemas al tener que vaciar el humedal para poder repararlo, por lo que se recomienda el uso de una forma no cuadrada de las celdas, como tambores de plástico. Además se sugiere considerar en el diseño algún sistema que facilite el reemplazo de grava, que acumulaba el material fino del medio de soporte lo que podría mejorar la vida útil del sistema. En la misma línea se vuelve menester generar un mecanismo que facilite el reemplazo total de la caliza y zeolita que hayan cumplido la cantidad de arsénico sugerida para su reemplazo (ver sección 4.7).

La vegetación influyó muy poco en términos de porcentaje de remoción y evapotranspiración, por lo que se recomienda experimentar con otro tipo de plantas para la remoción de metales y As. Se puede probar el uso de *Holcus lanatus* y *cytitus striatus*, por su capacidad bioacumuladora (Vargas, 2018), también se recomienda vegetar con *Typha latifolia*, para estimular la formación de *iron plaque* que ayuda a sorber el As (Blute, 2004).

Para una próxima puesta en marcha resultaría interesante observar cómo se comporta el sistema funcionando durante un período continuo de tiempo, producto de que el presente trabajo presentó 7 semanas de inactividad, lo que pudo haber disminuido su capacidad de remoción, al estar el sistema expuesto a las condiciones meteorológicas y sin cuidar, lo que puede generar fallas en las uniones. En humedales de mayor tamaño se recomienda utilizar canaletas y pendientes que hagan escurrir el agua gravitacionalmente, para así evitar el costo y posibles fallas que puedan generar sistemas de bombeo.

Para llevar el sistema a una escala mayor sería conveniente realizar una experiencia “intermedia” que presente un tamaño de humedales y caudal afluyente mayores a los presentes en este trabajo, para ver si la eficiencia de remoción varía. Por ejemplo se sugiere una aplicación a escala domiciliaria y comunal en proyectos como invernaderos y huertos de mediana magnitud o en proyectos de agua potable rural que presenta menores demandas de agua. Se recomienda el uso de geomembranas para impermeabilizar la zona del humedal construido.

Las unidades que “fallaron” y presentaron efluentes con presencia de arsénico son las celdas CAL 01 y CAL 07, ambas expuestas al extremo oriente del montaje. Por lo anterior estuvieron más expuestas a la radiación solar, lo que pudo haber provocado la merma en su capacidad de tratamiento al erosionar el medio, producto de que sus celdas homólogas no presentaron un comportamiento similar. Se recomienda en un futuro montaje cubrir de mejor manera a las celdas o dejarlas a todas bajo las mismas condiciones, para realizar una mantención periódica a todo el sistema.

El sistema de humedales presenta una altísima remoción de arsénico (superior al 99%) lo cual posibilita la opción de mezclar agua sin tratar, junto con agua de salida del sistema de humedales, para conseguir un mayor volumen de agua con concentraciones menores a los límites de la normativa, tal como se hace en los tratamientos convencionales.

Por último es necesario realizar un reemplazo periódico a los medios de soporte, dado que estos acumulan arsénico con el paso del tiempo, un parámetro a tener en cuenta son los valores señalados en la sección 4.7.

## Capítulo 6: Bibliografía

APHA-AWWA-WEF (2005). Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association, Washington, DC, 2<sup>a</sup> ed.

Arroyo, P., Ansola, G. & de Miera, L.E.S. (2013). Effects of substrate, vegetation and flow on arsenic and zinc removal efficiency and microbial diversity in constructed wetlands. *Ecological engineering* 51, 95-103.

ATSDR (2007). Resumen de Salud Pública: Arsénico CAS: 7440-38-2. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, División de Toxicología y Medicina Ambiental.

Bissen, M. & Frimmel, F. H. (2003). Arsenic- a review. Part ii: oxidation of arsenic and its removal in water treatment. *Acta hydrochimica et hydrobiologica* 31(2), 97-107.

Blute N., Brabander D., Hemond H., Sutton S., Newville M., & Rivers M. (2004). Arsenic sequestration by ferric iron plaque on cattail roots. *Environmental Science & Technology* 38, 6074-6077.

Buddhawong, S., Kuschik, P., Mattusch, J., Wiessner, A. & Stottmeister, U. (2005). Removal of arsenic and zinc using different laboratory model wetland systems, *Engineering in Life Sciences* 5(3), 247-252.

Carotenuto, M., Lofrano, G. & Sharma, S. K. (2014) Arsenic contamination: An overview. *Heavy Metals In Water: Presence, Removal and Safety*, 86.

Choong, T. S., Chuah, T., Robiah, Y., Koay, F. G. & Azni, I. (2007). Arsenic toxicity, health hazards and removal techniques from water: an overview. *Desalination* 217(1), 139-166.

Crites, R. W., Middlebrooks, E. J. & Reed, S. C. (2006). *Natural wastewater treatment systems*. CRC Press.

DGA (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del Río Lluta. Ministerio de Obras Públicas, Santiago, Chile.

DGA (2008). Evaluación preliminar de alternativas de mitigación de contaminantes en el río Lluta a partir de una caracterización de las fuentes de contaminación. Ministerio de Obras Públicas & DICTUC S.A., Santiago, Chile.

Engloner, A. (2009). Structure, growth dynamics and biomass of reed (*Phragmites australis*) – A review. *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants* 204(2009). 331-346

FAO (2006). Evapotranspiración de cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos, vol 56. Food & Agriculture Organization.

Fuentealba, J. (2017). Efecto de la vegetación y la carga superficial en la distribución de tiempos de retención de humedales artificiales para la remoción de arsénico. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile.

Guerra, P., González, C., Escauriza, C., Pizarro, G. & Pastén, P. (2016). Incomplete mixing in the fate and transport of arsenic at a river affected by acid drainage. *Water, Air & Soil Pollution* 227(3), 1-20.

Henke, K. (2009) *Arsenic: environmental chemistry, health threats and waste treatment*. John Wiley & Sons.

Henry, D. (2015). Remoción de arsénico de agua contaminada utilizando zeolita y piedra caliza: Evaluación experimental de la capacidad de remoción y su potencial aplicación como medios de soporte en humedales artificiales. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile.

Hering, J., Katsoyiannis, I., Ahumada, G., Berg, M., Hug, S. (2016). Arsenic removal from drinking water: Experiences with technologies and constraints in practice. *Journal of Environmental Engineering*, Volume 143. American Society of Civil Engineers.

Jaque, I. (2017). Cuantificación de la capacidad de remoción de arsénico y otros contaminantes utilizando humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile.

Kadlec, R. & Knight, R. (1996). *Treatment wetlands*. Crc. Boca Raton, FL.

Kadlec, R. & Wallace, S. (2008). *Treatment wetlands*, 2nd. Edition. Boca Raton. CRC Press.

Leiva, E. D., dP Rámila, C., Vargas, I. T., Escauriza, C. R., Bonilla, C.A., Pizarro, G. E., Regan, J. M. & Pastén, P. A. (2014). Natural attenuation process via microbial oxidation of arsenic in a high andean watershed. *Science of the Total Environment* 466, 490-502.

Lizama, K. (2013). *Subsurface flow constructed wetlands for the removal of arsenic and metals from contaminated water*. Ph.D. thesis, Department of Civil Engineering, Monash University.

Lizama, K., Fletcher, T. & Sun, G. (2011a). Enhancing the removal of arsenic, boron and heavy metals in subsurface flow constructed wetlands using different supporting media. *Water Science and Technology* 63(11), 2612-2618.

Lizama, K., Fletcher, T. & Sun G. (2011b). Removal processes for arsenic in constructed wetlands. *Chemosphere* 84(8), 1032-1043.

Lizama, K., Fletcher, T. & Sun G. (2012). The effect of substrate media on the removal of arsenic, boron and iron from an acidic wastewater in planted column reactors. *Chemical Engineering Journal* 179, 119-130.

Lizama, K., McCarthy, D. & Fletcher, T. (2014). The influence of media type on removal of arsenic, iron and boron from acidic wastewater in horizontal flow wetland microcosms planted with phragmites australis. *Chemical Engineering Journal* 246, 217-228.

Smedley, P. & Kinniburgh, D. (2002). A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural waters. *Applied geochemistry* 17(5), 517-568.

Smith, A., Lingas, E., Rahman, M. (2000). Contamination of drinking-water by arsenic in Bangladesh: A public health emergency. *Scientific electronic library online*.

Vargas, M. (2018). Humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal: Efecto de la carga superficial y la presencia de vegetación en la remoción de arsénico y hierro y en la determinación del tiempo de retención hidráulico real. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile.

Wang H. & Jia, Y. (2009). Bioaccumulation of heavy metals by *Phragmites australis* cultivated in synthesized substrates. *Journal of Environmental Sciences* 21 1409–1414.

WHO (2010). Exposure to arsenic: A major public health concern.

WHO (2011). Guidelines for drinking-water quality. World Health Organization, 4 ed.

# Capítulo 7: Anexos

## Anexo A: Estimación $ET_o$ con Método FAO Penman – Monteith

La siguiente ecuación presenta la ecuación principal del método FAO Penman-Monteith para calcular la  $ET_o$ .

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_2)} \quad (7.1)$$

$ET_o$ : Evapotranspiración de referencia [mm/d]

$R_n$ : Radiación neta en la superficie del cultivo [MJ/m<sup>2</sup>d].

$G$ : Flujo de calor del suelo [MJ/m<sup>2</sup>d]

$T$ : Temperatura media del aire [°C]

$U_2$ : Velocidad del viento a 2 m de altura [m/s]

$E_s$ : Presión de vapor de saturación [kPa]

$E_a$ : Presión real de vapor [kPa]

$\Delta$ : Pendiente de la curva de presión de vapor [kPa/°C]

$\gamma$ : Constante psicrométrica [kPa/°C]

### Radiación neta $R_n$

La ecuación para calcular la radiación neta es:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (7.2)$$

$R_{ns}$ : Radiación solar neta de onda corta [MJ/m<sup>2</sup>d]

$R_{nl}$ : Radiación solar neta de onda larga [MJ/m<sup>2</sup>d]

La radiación neta de onda corta se calcula:

$$R_{ns} = k_{R_s} \sqrt{T_{max} - T_{min}} R_a \quad (7.3)$$

Donde,

$k_{R_s}$ : Coeficiente de ajuste. Equivale a 0,16 [-] en localidades donde las masas de aire no están influenciadas fuertemente por un cuerpo de agua como en Santiago.

$T_{max}$ : Temperatura máxima absoluta durante el periodo de 24 horas [K]

$T_{min}$ : Temperatura mínima absoluta durante el periodo de 24 horas [K]

$R_a$ : Radiación extraterrestre [MJ/m<sup>2</sup>d]

La radiación extraterrestre se calcula:

$$R_a = \frac{24 \cdot 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega] \quad (7.4)$$

Donde,

$G_{sc}$ : Constante solar, equivale a 0,082 [MJ/m<sup>2</sup>min]

$\varphi$ : Latitud [rad].  $\varphi = -33.4^\circ$  en Santiago de Chile.

$d_r$ : Distancia relativa inversa Tierra-Sol [-]

$$d_r = 1 + 0.033 \cos \frac{2\pi}{365} J \quad (7.5)$$

$\omega_s$ : Ángulo de radiación a la puesta de sol [rad]

$$\omega_s = \cos^{-1}[-\tan \varphi \tan \delta] \quad (7.6)$$

$\delta$ : Declinación solar [rad]

$$\delta = 0.409 \sin \left( \frac{2\pi}{365} J - 1.39 \right) \quad (7.7)$$

Donde,

J: Número del día en el año entre 1 y 365 (1 de enero-31 de diciembre)

Por su parte la radiación de onda larga se calcula:

$$R_{nl} = \sigma \left[ \frac{T_{max}^4 - T_{min}^4}{2} \right] (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left( 1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \quad (7.8)$$

Donde,

$\sigma$ : Constante de Stefan-Boltzmann ( $4.903 \cdot 10^{-9}$  [MJ/K<sup>4</sup>m<sup>2</sup>d])

$R_{so}$ : Radiación de un día despejado [MJ/m<sup>2</sup>d]

$$R_{so} = (0.75 + 2 \cdot 10^{-5}z)R_a \quad (7.9)$$

Con,

Z: Elevación sobre el nivel del mar [m]. (En Santiago z= 570 m)

## Flujo de calor del suelo G

La magnitud del flujo de calor del suelo es despreciable, dado que el cálculo de ET<sub>o</sub> se realiza a nivel diario.

$$G_{diario} \approx 0 \quad (7.10)$$

## Temperatura media del aire

La temperatura media del aire es estimada así:

$$T_{media} = \frac{T_{max} - T_{min}}{2} \quad (7.11)$$

## Velocidad del viento u<sub>2</sub>

La estación meteorológica Parque O'Higgins mide la velocidad del viento a una altura de 10 m. Para ajustar los datos a una altura de 2 m de la superficie, que es lo que exige el método FAO, se utiliza la siguiente relación:

$$u_2 = u_z \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)} \quad (7.12)$$

$u_z$ : Velocidad del viento a z metros sobre la superficie [m/s]

z: Altura de medición sobre la superficie [m]

### **Presión de vapor de saturación $e_s$**

$$e^o(T) = 0.6108 \exp \left[ \frac{17.27T}{T + 237.3} \right] \quad (7.13)$$

T: Temperatura del aire [°C]

Entonces, la presión media de saturación de vapor para un día se calcula:

$$e_s = \frac{e^o(T_{max}) + e^o(T_{min})}{2} \quad (7.14)$$

### **Presión real de vapor $e_a$**

La presión real de vapor deriva de la medición de humedad relativa según:

$$e_a = \frac{e^o(T_{min}) \frac{HR_{max}}{100} + e^o(T_{max}) \frac{HR_{min}}{100}}{2} \quad (7.15)$$

$e^o(T_{max})$ : Presión de saturación de vapor a la temperatura máxima diaria.

$e^o(T_{min})$ : Presión de saturación de vapor a la temperatura mínima diaria.

$HR_{max}$ : Humedad relativa máxima [%]

$HR_{min}$ : Humedad relativa mínima [%]

### **Pendiente de la curva de presión de vapor $\Delta$**

$$\Delta = \frac{4098 \left[ 0.6108 \exp \left( \frac{17.27T}{T + 237.3} \right) \right]}{(T + 237.3)^2} \quad (7.16)$$

T: Temperatura del aire [°C]

## Constante psicrométrica $\gamma$

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} \quad (7.17)$$

$c_p$ : Calor específico del aire a presión constante.  $c_p=1.013*10^{-3}$  [MJ/kg°C]

P: Presión atmosférica [kPa]

$\varepsilon$ : Cociente del peso molecular de vapor de agua (aire seco =0.622[-])

$\lambda$ : Calor latente de vaporización.  $\lambda = 2.45$  [MJ/kg]

## Anexo B: Curvas granulométricas

Se adjuntan las curvas granulométricas de la piedra caliza y zeolita utilizadas en el montaje experimental. El análisis por tamizado fue efectuado en el Laboratorio de Sólidos y Medios Particulados de la Universidad de Chile. Para ambos medios se utilizaron tres muestras que fueron pasadas desde el tamiz N°4 hasta el N°100 (Jaque, 2017), obteniendo las curvas que se presentan a continuación.

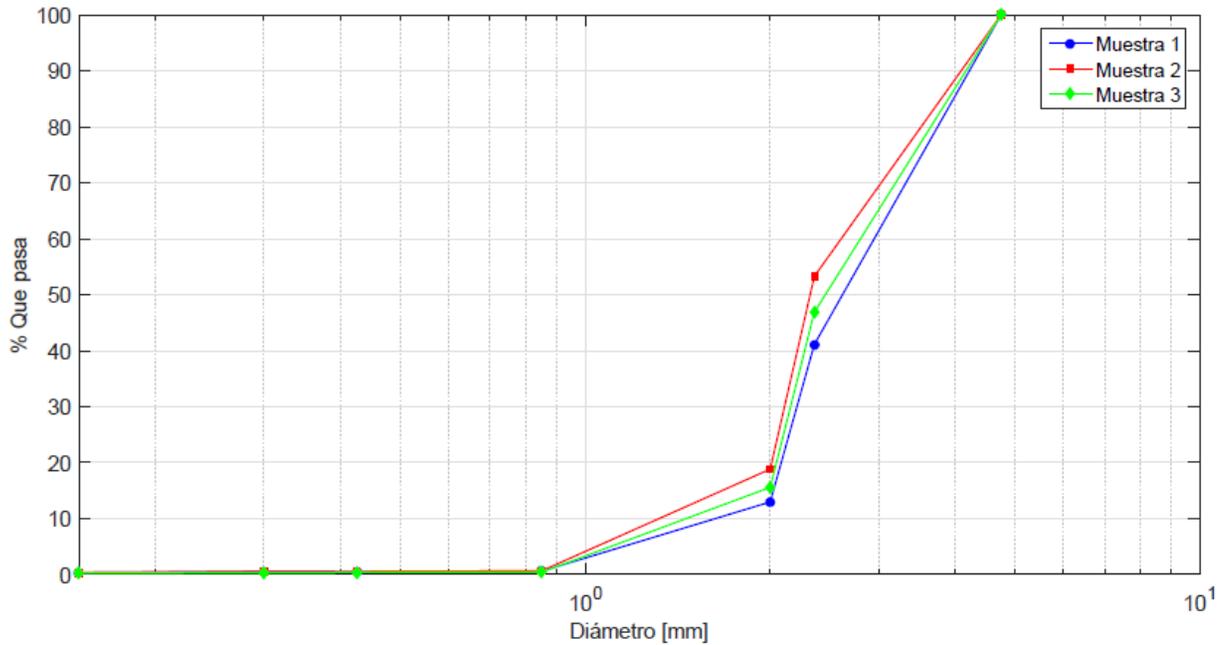


Figura 7.1: Curva granulométrica zeolita utilizada

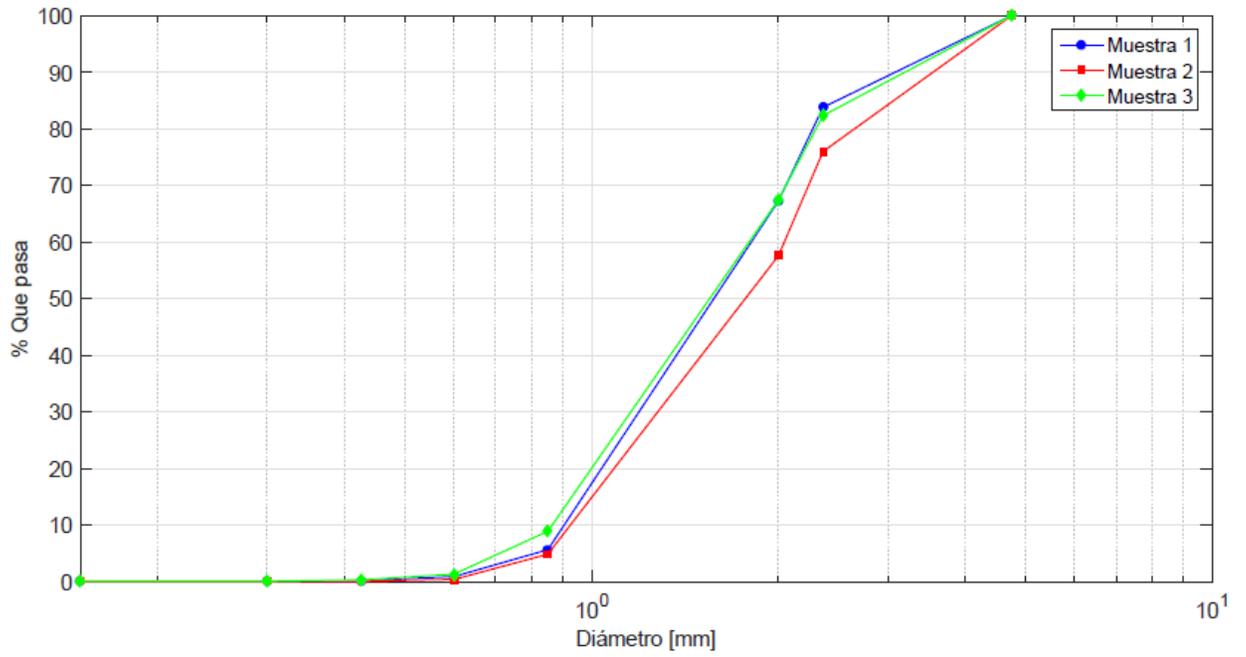


Figura 7.2: Curva granulométrica caliza utilizada

Los coeficientes de uniformidad son  $Cu=2.1$  para la caliza y  $Cu=1.9$  para la zeolita, considerándose ambos uniformes.

# Anexo C: Datos sin corregir por evapotranspiración

Tabla 7.1: Datos celda CAL 01 en etapa 1

Muestreo	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18	
Fecha muestreo	22-8-16	5-9-16	12-9-16	21-9-16	28-9-16	3-10-16	11-10-16	17-10-16	24-10-16	2-11-16	7-11-16	21-11-16	5-12-16	21-12-16	3-1-17	16-1-17	30-1-17	13-2-17	
Parámetro	Unidad																		
Na	mg/L	363.7	390.4	354.1															
K	mg/L	61.25	69.64	71.28															
Ca	mg/L	1014	1117	1077.5															
Mg	mg/L	140	151.8	156.67															
Fe	mg/L	<	0.046	0.59			0.42						<		<		<	0.0041	
B	mg/L	26.46	21.36	12.61			6.89						5.33		5.12				
Al	mg/L	<	<	<			<						<		<				
Mn	mg/L	7.786	11.104	11.94			10.53						8.45		8.08				
Zn	mg/L	4.422	8.108	7.81			5.81						5.4		6.61				
As	mg/L	<	<	<			<						<		<		<	<	<
Pb	mg/L	<	<	<			<						<		<		<	<	<
Cl	mg/L	1063					1276						<		<		<	<	<
SO4	mg/L	2080					2076												
pH	-	6.7	6.7	6.7	7.5	7.1	7.5	7.3	7.5				7.4	7.2	7.7	7.4	7.4	7.4	7.4
T	°C	17.8	18.2	16.6	23.5	23.4	22.6	20.9	20.9				23.5	26.4	24.3	27.4	27.4	27.4	23
Eh	mV				261.1	290	298	174.2	320.3				31.2	380	293.2	326.5	333.9	331	331
Conduc	mS	6.37	6.46	6.26	6.71	6.59	7.11	5.95	6.01				6.16	5.22	5.66	5.62	5.7	5.8	5.8
SDT	g/L	3.12	3.22	3.15	3.32	3.21	3.38	3.52	2.88				3.06	2.6	2.79	2.76	2.89	2.87	2.87
Turbiedad	UNT	0.42	0.64	7.5	1.52	3.9	0.9	0.8	0.7				0.8	0.76	0.94	0.6	0.47	0.93	0.93
Alcalinidad	mg CaCO3/L	720	640	640	551	580	420	400	400				380	340	330	220	280	200	200
Dureza	mg CaCO3/L	3900	3800	3600	3450	3550	3950	4150	4150				3100	3200	3075	3050	3000	3525	3525
Sulfato*	mg/L	2700	1700	1600	1800	1900	1800	2100	2100				1700	1800	2000	2000	2100	2100	2100

\*Medido con espectrofotómetro  
<: Menor al límite de detección

Tabla 7.2: Datos celda CAL 02 en etapa 1

Muestreo	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18	
Fecha muestreo	22-8-16	5-9-16	12-9-16	21-9-16	28-9-16	3-10-16	11-10-16	17-10-16	24-10-16	2-11-16	7-11-16	21-11-16	5-12-16	21-12-16	3-1-17	16-1-17	30-1-17	13-2-17	
Parámetro	Unidad																		
Na	mg/L	368.07	382.9	330.75															
K	mg/L	64.49	71.43	69.72															
Ca	mg/L	808	1201	1124.5															
Mg	mg/L	144.5	151.42	153.57															
Fe	mg/L	18.622	10.79	28.62			3.28				0.16		0.3		0.41		0.22		
B	mg/L	26.8	21.96	11.33			6.31				4.58		5.49		4.72		4.8		
Al	mg/L	< 0.054	<	<			<				<		<		<		< 0.054		
Mn	mg/L	9.322	12.678	13.084			9.74				7.68		8.84		7.53		7.32		
Zn	mg/L	<	<	0.042			<				0.01		<		<		0.1		
As	mg/L	<	<	<			<				<		<		<		< 0.036		
Pb	mg/L	<	<	<			<				<		<		<		< 0.018		
Cl	mg/L	976	1064																
SO4	mg/L	1926	2222																
pH	-	6.9	6.6	6.7	7.1	7.4	7.7	7.4	7.4	7.8	7.8	7.6	7.3	7.2	7.6	7.8	7.4	7.5	
T	°C	16.9	18.2	17.4	23.7	23.4	22.3	22.3	20.6	23.7	25.5	23.3	22.9	25.8	24.9	27.1	24.7	24.7	
Eh	mV				225	240	285	155	271	283.3	251.8	270.1	311.6	365	283.8	275.4	329.3	297.9	
Conduc	mS	6.65	6.64	6.22	6.21	6.24	6.52	6.67	5.84	6.2	5.98	5.78	6.03	5.71	5.51	5.64	5.42	5.41	
SDT	g/L	3.29	3.3	3.12	3.15	3.09	3.27	3.33	2.88	3.06	2.98	2.9	3.03	2.86	2.79	2.87	2.72	2.64	
Turbiedad	UNT	270	56	137	33	37	27	33	35	3	3.1	3.9	3.6	4.9	3.4	1.1	3.9	3.2	
Dureza	mg CaCO3/L	720	710	650	519	615	97	470	410	360	360	370	370	3250	360	345	350	3000	
Alcalinidad	mg CaCO3/L	3400	3875	3650	3250	2875	3300	3900	3500	3400	2900	2925	3500	3050	3050	2950	3300	3000	
Sulfato*	mg/L	2300	2100	1400	1600	1700	1800	2500	1900	2200	2000	1700	1700	1800	1800	1900	2000	2000	

\*Medido con espectrofotómetro

<: Menor al límite de detección

Tabla 7.3: Datos celda CAL 03 en etapa 1

Muestreo	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18		
Fecha muestreo	22-8-16	5-9-16	12-9-16	21-9-16	28-9-16	3-10-16	11-10-16	17-10-16	24-10-16	2-11-16	7-11-16	21-11-16	5-12-16	21-12-16	3-1-17	16-1-17	30-1-17	13-2-17		
Parámetro	Unidad																			
Na	mg/L	367.7	378.92	337.72																
K	mg/L	58.7	67.37	69.05																
Ca	mg/L	1056.5	1109.5	1079																
Mg	mg/L	141.2	149.57	152.42																
Fe	mg/L	0.03	1.038	14.914		0.69														
B	mg/L	25.64	23.32	11.62		6.84														
Al	mg/L	<	<	<		<														
Mn	mg/L	8.518	12.408	11.716		11.38														
Zn	mg/L	5.02	9.348	7.992		6.08														
As	mg/L	<	<	<		<														
Pb	mg/L	<	<	<		<														
Cl	mg/L	<	<	<		<														
SO4	mg/L		2064	1799																
pH	-	6.9	6.6	6.7		7.4	7.6	7.5	7.5	7.8	7.7	7.6	7.3	7.3	7.4	7.8	7.5	7.5		
T	°C	17.6	18.2	16.9		21.5	22.5	20.8	20.8	23.1	25.5	22.9	22.8	25.8	25	25.3	26.2	24.5		
Eh	mV	285	267	290		285	288.7	185	288.7	292.9	251.8	292.3	321.9	333.9	300.1	323.5	318.2	314.9		
Conduc	mS	6.28	6.39	6.21		6.54	6.47	6.78	7.07	6.61	6.51	6.13	5.7	5.68	5.54	5.65	5.48	5.41		
SDT	g/L	3.19	3.21	3.11		3.22	3.25	3.48	2.97	3.28	3.27	3.05	2.85	2.84	2.74	2.81	2.72	2.73		
Turbiedad	UNT	0.94	33	83		3.7	3.7	0.8	0.6	0.85	1	0.59	0.65	0.48	0.53	0.58	0.44	0.85		
Dureza	mg CaCO3/L	700	720	650		560	3300	4450	3425	3350	380	380	410	3200	390	3400	350	3075		
Alcalinidad	mg CaCO3/L	4050	3525	3200		3425	3300	4450	3425	3350	3200	3125	3650	3200	3025	3400	350	3075		
Sulfato*	mg/L	2500	1700	1500		1800	1900	3300	2100	2500	2500	1700	1600	2000	1900	1800	2000	1800		

\*Medido con espectrofotómetro

<: Menor al límite de detección

Tabla 7.4: Datos celda ZEO 04 en etapa 1

Muestreo	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18		
Fecha muestreo	22-8-16	5-9-16	12-9-16	21-9-16	28-9-16	3-10-16	11-10-16	17-10-16	24-10-16	2-11-16	7-11-16	21-11-16	5-12-16	21-12-16	3-1-17	16-1-17	30-1-17	13-2-17		
Parámetro	Unidad																			
Na	mg/L	116.97	229.825	268.55																
K	mg/L	4.266	8.848	9.194																
Ca	mg/L	1102.5	889	964.5																
Mg	mg/L	158.37	216.575	176.5																
Fe	mg/L	<	<	0.176																
B	mg/L	23.04	25.84	12.37																
Al	mg/L	<	1.884	142.32																
Mn	mg/L	0.02	25.29	20.35																
Zn	mg/L	<	13.798	9.53																
As	mg/L	<	<	<																
Pb	mg/L	<	0.2	<																
Cl	mg/L	<	1021	<																
SO4	mg/L	<	2755	<																
pH	-	7.3	6.2	3.9	3.9	3.7														
T	°C	17.3	18.4	18.7	23.3	22.7														
Eh	mV				380	374.1														
Conduc	mS	5.65	6.09	5.92	5.94	5.95														
SDT	g/L	2.79	3.06	2.94	2.99	2.96														
Turbiedad	UNT	0.7	9	1.46	1.31	5.35														
Dureza	mg CaCO3/L	3650	3900	3150	3300	3025														
Alcalinidad	mg CaCO3/L	2000	2700	2100	2600	2500														
Sulfato*	mg/L	2000	2700	2100	2600	2500														

\*Medido con espectrofotómetro

<: Menor al límite de detección

Tabla 7.5: Datos celda ZEO 05 en etapa 1

Muestreo	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18		
Fecha muestreo	22-8-16	5-9-16	12-9-16	21-9-16	28-9-16	3-10-16	11-10-16	17-10-16	24-10-16	2-11-16	7-11-16	21-11-16	5-12-16	21-12-16	3-1-17	16-1-17	30-1-17	13-2-17		
Parámetro	Unidad																			
Na	mg/L	81.6	101.14				196.5													
K	mg/L	2.796	3.43				5.66													
Ca	mg/L	964.5	1012				884													
Mg	mg/L	195.2	218.8				183													
Fe	mg/L	<	<				0.71				0.07		1		0.03					0.07
B	mg/L	22.9	21.5				6.82				5.08		5.04		4.45					4.43
Al	mg/L	<	<				73.44				50.59		56.64		149.32					175.66
Mn	mg/L	0.024	15.786				11.14				13.43		20.8		38.27					15.05
Zn	mg/L	<	7.196				5.09				5.27		14.87		10.36					8.94
As	mg/L	<	<				<				<		<		<					<0.036
Pb	mg/L	<	<				<				<		<		<					<0.018
Cl	mg/L	985	1038				1143													
SO4	mg/L	2307	2732				2339													
pH	-	7.2	6.2				4.1				4.1		4		3.9					3.9
T	°C	17.4	17.5				22.1				24.7		22.9		24.6					26.3
Eh	mV						386.5				366.6		369.1		404.1					444.3
Conduc	mS	5.25	5.96				6.18				5.72		5.34		5.21					5.14
SDT	g/L	2.66	2.97				3.14				2.88		2.7		2.57					2.6
Turbiedad	UNT	0.6	3.2				3.5				0.6		0.64		0.96					0.64
Dureza	mg CaCO3/L	3500	3800				3400				3350		3000		3000					2600
Dureza Sulfato*	mg/L	1800	2100				2400				2300		1900		2500					2600

\*Medido con espectrofotómetro

<: Menor al límite de detección

Tabla 7.6: Datos celda ZEO 06 en etapa 1

Muestra	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18	
Fecha muestreo	22-8-16	5-9-16	12-9-16	21-9-16	28-9-16	3-10-16	11-10-16	17-10-16	24-10-16	2-11-16	7-11-16	21-11-16	5-12-16	21-12-16	3-1-17	16-1-17	30-1-17	13-2-17	
Parámetro	Unidad																		
Na	mg/L	53.69	73.83	110.05			243												
K	mg/L	2.483	3.208	5.938			7.72												
Ca	mg/L	1194	1115.5	986			883												
Mg	mg/L	153.8	190.96	177.95			211												
Fe	mg/L	<	<	<			0.63				0.08		0.32		0.1		0.27		
B	mg/L	16.22	21.26	13.2			9.21				5.97		5.57		4.79		4.68		
Al	mg/L	<	<	3.488			104.5				48.91		137.78		174.22		171.08		
Mn	mg/L	0.218	7.266	8.758			16.44				24.25		21.9		16.31		13.45		
Zn	mg/L	<	2.918	3.818			5.72				12.57		15.45		9.68		8.44		
As	mg/L	<	<	<			<				<		<		<		<0.036		
Pb	mg/L	<	<	<			<				<		<		<		<0.018		
Cl	mg/L	<	1011	1001			<				<		<		<		<		
SO4	mg/L	<	2398	1939			<				<		<		<		<		
pH	-	7	6.5	5	4.1	3.9	3.9	4.2	4.1	4.1	4	4	3.8	3.9	3.8		3.8	3.7	
T	°C	17.7	17.8	19.3	23.7	22.4	21.5	22.2	20.2	22.8	24.9	22.8	22.6	24.7	24	24	25.8	19.3	
Eh	mV				383	381.4	415	370	361.5	370.3	360.4	383.6	367.7	375.9	417	448.9	440	440	
Conduc	mS	4.86	5.63	5.51	5.86	5.77	6.28	6.69	5.48	6.21	6.24	6.05	5.89	6.13	5.31	5.3	5.3	5.24	
SDT	g/L	2.4	2.79	2.75	2.92	2.96	3.14	3.31	2.74	3.16	3.11	3.03	2.92	2.99	2.66	2.61	2.61	2.61	
Turbiedad	UNT	0.6	2.8	19.3	1.6	1.2	0.68	2	0.65	0.6	0.65	0.7	0.75	0.9	0.85	0.7	1.2	1.2	
Dureza	mg CaCO3/L	70	60	20	3800	3530	3750	4300	3575	3425	3200	3000	3200	2850	2050	2500	2525	2525	
Sulfato*	mg/L	1900	2500	2600	2000	2100	2300	3300	2200	1900	2400	2400	2200	2800	2600	2600	2600	3000	

\*Medido con espectrofotómetro

<: Menor al límite de detección

Tabla 7.7: Datos celda CAL 07 en etapa 1

Muestreo	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18	
Fecha muestreo	22-8-16	5-9-16	12-9-16	21-9-16	28-9-16	3-10-16	11-10-16	17-10-16	24-10-16	2-11-16	7-11-16	21-11-16	5-12-16	21-12-16	3-1-17	16-1-17	30-1-17	13-2-17	
Parámetro	Unidad																		
Na	mg/L	366.05	405.5																
K	mg/L	57.84	73.3																
Ca	mg/L	3427	1133																
Mg	mg/L	1407	158.85																
Fe	mg/L	1.718	2.71			1.07												<0.0041	
B	mg/L	24.46	21.72			7.74												6.03	
Al	mg/L	<	<			<												0.25	
Mn	mg/L	7.17	10.446				11.08											5.97	
Zn	mg/L	1.16	6.435				5.83											7.26	
As	mg/L	<	<				<											<0.036	
Pb	mg/L	<	<				<											<0.018	
Cl	mg/L		1116				1320												
SO4	mg/L		2090				2082												
pH	-	6.7	6.5	7	7	7.2	7.8	7.4	7.5			7.5						7.6	
T	°C	17.2	18.1	23.2	22.7	22.1	22.9	20.7	20.7			23.1						25.8	
Eh	mV			380	327	310	275	270	275.8			303.6						326.6	
Conduc	mS	6.972	6.5	5.6	6.51	6.9	7.24	6.06	5.96			6.4						317.5	
SDT	g/L	3.572	3.27	2.81	3.26	3.46	3.68	3.01	3.04			3.22						5.86	
Turbiedad	UNT	88	56	1.79	1.3	0.79	3	1.1	1.17			0.8						2.89	
Dureza	mg CaCO3/L	670	720	395	601	620	3	420	380			320						380	
Dureza	mg CaCO3/L	4000	3500	2850	3450	3575	3600	4400	3350			3250						3400	
Sulfato*	mg/L	2500	2000	1700	2000	2100	2000	3300	2000			2000						2000	

\*Medido con espectrofotómetro

<: Menor al límite de detección

Tabla 7.8: Datos celda CAL 08 en etapa 1

Muestreo	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18		
Fecha muestreo	22-8-16	5-9-16	12-9-16	21-9-16	28-9-16	3-10-16	11-10-16	17-10-16	24-10-16	2-11-16	7-11-16	21-11-16	5-12-16	21-12-16	3-1-17	16-1-17	30-1-17	13-2-17		
Parámetro	Unidad																			
Na	mg/L	370.6	376.32	344.9																
K	mg/L	63.67	70.455	72.14																
Ca	mg/L	1087.5	1179	1108																
Mg	mg/L	147.3	151	157.25																
Fe	mg/L	<	<	<			0.67													
B	mg/L	26.96	19.764	11.02			6.55													
Al	mg/L	<	<	<			<													
Mn	mg/L	9.506	10.722	9.846			9.64													
Zn	mg/L	5.576	7.852	6.742			5.75													
As	mg/L	<	<	<			<													
Pb	mg/L	0.188	<	<			<													
Cl	mg/L	1006	1085	<			<													
SO4	mg/L	2782	2194	<			<													
pH	-	6.8	6.6	6.7	6.8	7.1	7.2	7.3	7.5	7.8	7.5	7.4	7.3	7.5	7.5	7.5	7.5	7.6		
T	°C	17.7	16.9	17.7	22.6	22.4	21.6	22.1	20	22.3	25	23.2	22.8	25.4	25	26.6	25.7	24.3		
Eh	mV				350	310	325	270	280	283.7	265	304	319.5	318	285.6	308.3	323	325.4		
Conduc	mS	6.67	6.53	6.32	6.23	6.36	6.68	6.88	5.85	5.91	6.39	5.99	5.63	5.74	5.54	5.85	5.61	5.47		
SDT	g/L	3.37	3.26	3.17	3.12	3.17	3.33	3.46	2.94	2.95	3.22	3.14	2.82	2.84	2.76	2.88	2.77	2.7		
Turbiedad	UNT	0.52	0.7	0.6	0.82	1.1	0.76	1.1	1.5	0.74	1.1	1.62	1.6	0.9	0.91	0.9	0.68	0.83		
Dureza	mg CaCO3/L	740	680	640	575	619	640	430	380	380	370	360	380	3200	340	390	350	380		
Alcalinidad	mg CaCO3/L	4250	3500	3550	3200	3325	3400	4650	3425	3325	3150	3050	3350	3200	3000	3150	3300	2750		
Sulfato*	mg/L	2600	1900	1500	1800	1800	1900	3200	1900	1800	2000	1800	1700	2000	2000	2100	2000	1800		

\*Medido con espectrofotómetro

<: Menor al límite de detección

Tabla 7.9: Datos celda CAL 09 en etapa 1

Muestreo	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18
Fecha muestreo	22-8-16	5-9-16	12-9-16	21-9-16	28-9-16	3-10-16	11-10-16	17-10-16	24-10-16	2-11-16	7-11-16	21-11-16	5-12-16	21-12-16	3-1-17	16-1-17	30-1-17	13-2-17
Parámetro	Unidad	Unidad	Unidad	Unidad	Unidad	Unidad	Unidad	Unidad	Unidad	Unidad	Unidad	Unidad	Unidad	Unidad	Unidad	Unidad	Unidad	Unidad
Na	mg/L	353.9	385.3	350.42														
K	mg/L	52.73	70.05	73.89														
Ca	mg/L	1079	1040.5	1032														
Mg	mg/L	126.1	150.12	156.17														
Fe	mg/L	<	<	<			1.41											
B	mg/L	24.18	24.58	12.01			6.45				4.79		5.44		4.87			<0.0041
Al	mg/L	<	<	<			<				<		<		<			
Mn	mg/L	8.202	11.75	12.801			11.33				9.51		14.47		12.1			
Zn	mg/L	4.922	5.41	9.445			7.3				5.43		12.23		8.28			
As	mg/L	<	0.007	<			<				<		<		<			
Pb	mg/L	<	<	<			<				<		<		<			
Cl	mg/L		1077	1131														
SO4	mg/L		1865	1661														
pH	-	6.9	6.4	6.6	7	7.3	7.5	7.3	7.4	7.6	7.6	7.4	7.6	7.8	7.9		7.8	7.9
T	°C	17.4	17	18.7	21.6	22.1	22.3	22.3	19.5	22	24.8	22.8	22.4	24.9	24.9		25.7	24
Eh	mV				340	394	310	250	285	322.7	252	306.2	276.9	273.8	276.5		304.6	285
Conduc	mS	5.65	6.26	6.18	6.26	6.14	6.68	5.77	5.86	6.25	6.11	5.89	6.06	5.91	5.48		5.13	5.12
SDT	g/L	2.82	3.13	3.08	3.11	3.07	3.2	3.37	2.88	3.09	3.03	2.94	3	2.89	2.75		2.59	2.58
Turbiedad	UNT	1.02	0.9	0.54	0.76	2.3	0.85	0.85	0.78	0.65	0.66	0.7	0.83	1.3	3.3		1.15	2.5
Alcalinidad	mg CaCO3/L	690	710	710	610	630	660	400	420	400	380	380	340	400	400		240	330
Dureza	mg CaCO3/L	3100	3250	2500	3200	3450	3250	3900	3425	3125	3025	3000	3100	3100	2950		2950	2825
Sulfato*	mg/L	1600	1500	1300	1700	1800	1800	3100	1800	1800	2100	1600	1700	1900	2000		1700	1700

\*Medido con espectrofotómetro  
< Menor al límite de detección

Tabla 7.10: Datos celda ZEO 10 en etapa 1

Muestreo	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18	
Fecha muestreo	22-8-16	5-9-16	12-9-16	21-9-16	28-9-16	3-10-16	11-10-16	17-10-16	24-10-16	2-11-16	7-11-16	21-11-16	5-12-16	21-12-16	3-1-17	16-1-17	30-1-17	13-2-17	
Parámetro	Unidad																		
Na	mg/L	184.07	247.4	280.82			277.1												
K	mg/L	5.888	8.306	7.602			8.08												
Ca	mg/L	1219	1167.5	1089			939												
Mg	mg/L	148.9	163.17	176.35			201												
Fe	mg/L	<	<	<			0.22				0.03		0.12		<		<0.0041		
B	mg/L	18.8	24.44	12.43			7.09				5.07		5.07		5.01		5.62		
Al	mg/L	<	<	<			7.78				38.74		114.86		181.22		190.62		
Mn	mg/L	0.012	5.956	8.682			12.98				15.22		16.13		16.26		17.16		
Zn	mg/L	<	0.8	2.824			6.23				8.61		15.23		11.89		11.89		
As	mg/L	<	<	<			<				<		<		<		<0.0396		
Pb	mg/L	0.08	<	<			<				<		<		<		<0.018		
Cl	mg/L		1033				1212												
SO4	mg/L		2524				2343												
pH	-	7.1	7	6.8	7.1	6.1	4.7	4.7	4.4	4.2	4.1	4.1	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.7	
T	°C	18.5	17	17.4	21.6	21.3	22.2	19.3	19.3	21.6	24.2	22.8	22.6	24.8	24.6	25.9	25.5	20.3	
Eh	mV				300	370	360	260	382.3	415.7	332.4	396	386.5	431	410.6	432.7	435.4	437.3	
Conduc	mS	5.55	5.86	6	5.92	5.2	6.49	5.6	5.5	5.81	5.82	5.78	5.43	5.61	5.52	5.51	5.45	6.13	
SDT	g/L	2.81	2.91	2.99	2.97	2.59	3.24	2.85	2.77	2.92	2.92	2.88	2.73	2.8	2.72	2.79	2.7	3.08	
Turbiedad	UNT	0.82	0.98	1.3	2.1	2.6	4.9	15.1	1.4	1.35	0.8	1.3	0.88	0.7	0.6	0.8	0.78	1.1	
Dureza	mg CaCO3/L	110	70	60	70	40				307.5	307.5	297.5	3200	2650	1950	2350	2700	3075	
Alcalinidad	mg CaCO3/L	3750	3925	2650	3400	3000	3450	4450	3225	2000	2300	2400	2000	2500	2600	2600	2500	3200	
Sulfato*	mg/L	2600	2000	2200	2100	1900	2000	3400	2100	2000	2300	2400	2000	2500	2600	2600	2500	3200	

\*Medido con espectrofotómetro

<: Menor al límite de detección

Tabla 7.11: Datos celda ZEO 11 en etapa 1

Muestreo	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18	
Fecha muestreo	22-8-16	5-9-16	12-9-16	21-9-16	28-9-16	3-10-16	11-10-16	17-10-16	24-10-16	2-11-16	7-11-16	21-11-16	5-12-16	21-12-16	3-1-17	16-1-17	30-1-17	13-2-17	
Parámetro	Unidad																		
Na	mg/L	102.6																	
K	mg/L	3.774																	
Ca	mg/L	966.5																	
Mg	mg/L	175.4																	
Fe	mg/L	<																	
B	mg/L	11.65																	
Al	mg/L	<																	
Mn	mg/L	0.156																	
Zn	mg/L	0.084																	
As	mg/L	<																	
Pb	mg/L	0.086																	
Cl	mg/L	734																	
SO4	mg/L	2679																	
pH	-	7																	
T	°C	18.4			4.7	6.2		4.4	4.6										
Eh	mV	336.6		21.4	21			412	19.5										
Conduc	mS	5.01		336.6	321.5			5.35	346.1										
SDT	g/L	2.52		2.7	2.88			2.67	2.78										
Turbiedad	UNT	8.5		4.9	4.9			3.8	1.27										
Dureza	mg CaCO3/L	60		20	20			4300	3525										
Sulfato*	mg/L	2200		2000	2000			3600	2200										

\*Medido con espectrofotómetro

<: Menor al límite de detección

Tabla 7.12: Datos celda ZEO 12 en etapa 1

Muestra	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18	
Fecha muestreo	22-8-16	5-9-16	12-9-16	21-9-16	28-9-16	3-10-16	11-10-16	17-10-16	24-10-16	2-11-16	7-11-16	21-11-16	5-12-16	21-12-16	3-1-17	16-1-17	30-1-17	13-2-17	
Parámetro	Unidad																		
Na	mg/L	81.04	71.72	99.7			197.3												
K	mg/L	3.306	3.386	5.106			6.32												
Ca	mg/L	1195.5	1167.5	1257			894												
Mg	mg/L	205.1	206.57	219.9			217												
Fe	mg/L	<	0.064	<			0.3				0.12		0.11						
B	mg/L	18.192	23.32	12.7			8.95				6.45		5.2						
Al	mg/L	<	<	<			97				77.28		60.75						
Mn	mg/L	0.01	3.914	16.4			13.42				23.47		22.19						
Zn	mg/L	<	0.02	3.348			6.28				11.63		13.15						
As	mg/L	<	<	<			<				<		<						
Pb	mg/L	<	0.072	<			<				<		<						
Cl	mg/L		1042	1069															
SO4	mg/L		2674	2417															
pH	-	7.1	6.7	6.7	7	4.2	4	4.1	4	4	3.9	4	4	3.9		3.9			3.9
T	°C	18.6	17.8	18.4	21	21.6	22.4	19.5	19.5	21.4	24	23.1	22.3	24.4		25.5			22.6
Eh	mV				300.3	387.5	370	386	375	388.6	354.1	379.3	387.7	405.8		419.2			433.2
Conduc	mS	5.41	5.78	5.93	5.76	6.06	6.31	5.73	5.49	6.03	6.25	6.48	5.67	5.44		5.01			5.3
SDT	g/L	2.72	2.91	2.97	2.88	3.01	3.13	2.88	2.75	3.02	3.11	3.22	2.82	2.69		2.48			2.67
Turbiedad	UNT	1.12	0.64	0.88	1.07	10.2	3.8	1.45	0.83	0.9	0.65	2.8	0.98	1		0.84			1.16
Alcalinidad	mg CaCO3/L	110	90	90	85	3000	3400	4000	3050	3250	3250	3175	3650	2900		2700			2025
Dureza	mg CaCO3/L	3950	4300	3300	3650	3600	3400	4000	3500	2100	2400	2200	2100	2700		2400			2600
Sulfato*	mg/L	2500	2200	2300	2400	1800	2300	3500	2100	2100	2400	2200	2100	2700		2400			2600

\*Medido con espectrofotómetro

< Menor al límite de detección

Tabla 7.13: Datos celda CAL 01 en etapa 2

Muestreo	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09	M10	M11
Fecha muestreo	2-5-17	15-5-17	30-5-17	13-6-17	27-6-17	11-7-17	24-7-17	9-8-17	6-9-17	17-10-17	9-11-17
Parámetro	Unidad										
Na	mg/L										
K	mg/L										
Ca	mg/L										
Mg	mg/L										
Fe	mg/L	<0,0041		<0,0041	1.8		16.46		16.4		0.057
B	mg/L	3.72		4.49	4.23		4.43		4.33		5.8
Al	mg/L	0.16		<0,054	7.84		26.11		31.3		0.082
Mn	mg/L	0.14		9.13	9.41		8.25		6.68		0.12
Zn	mg/L	2.66		11.33	11.65		10.4		8.88		0.15
As	mg/L	<0,036		<0,036	<0,036		0.79		0.71		<0,086
Pb	mg/L	<0,018		<0,018	<0,018		0.32		0.31		<0,018
Cl	mg/L										
SO4	mg/L										
pH	-	7.2		6.49	6.97		5.68		4.53		7.45
T	°C	13.1		20.3	19.4		16.3		18.6		26.7
Eh	mV	389.8		290.1	411.1		169.2		338		145.2
Conduc	mS	5.45		5.38	5.46		5.62		5.15		7.58
SDT	g/L	2.72		2.71	2.74		2.82		2.62		3.76
Turbiedad	UNT	0.7		0.45	29		105		88		4.4
Alcalinidad	mg CaCO3/L	210		280	180		110		10		210
Dureza	mg CaCO3/L	2700		1750	3150		2900		2700		3150
Sulfato*	mg/L	1700		2000	2100		1900		2000		2100

\*Medido con espectrofotómetro  
 <- Menor al límite de detección

Tabla 7.14: Datos celda CAL 02 en etapa 2

Muestra	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09	M10	M11
Fecha muestreo	2-5-17	15-5-17	30-5-17	13-6-17	27-6-17	11-7-17	24-7-17	9-8-17	6-9-17	17-10-17	9-11-17
Parámetro	Unidad										
Na	mg/L										
K	mg/L										
Ca	mg/L										
Mg	mg/L										
Fe	mg/L	<0,0041	<0,0041		<0,0041		<0,036		<0,004	0,072	0,184
B	mg/L	4,8	4,62		4,06		4,2		4,2	4,4	4,78
Al	mg/L	0,42	<0,054		<0,054		0,015		<0,054	0,011	0,058
Mn	mg/L	7,93	7,77		6,42		6,56		4,92	4,66	3,08
Zn	mg/L	17,69	17,57		14,77		13,84		11,2	7,25	6,79
As	mg/L	<0,036	<0,036		<0,036		0,0023		<0,036	<0,036	<0,036
Pb	mg/L	<0,018	<0,018		<0,018		<0,0002		<0,018	<0,018	<0,018
Cl	mg/L										
SO4	mg/L										
pH	-	7,2	6,62	6,72	6,5	6,7	6,47	6,62	6,67	6,62	7,41
T	°C	13,3	20,3	18,7	18,4	19	17,4	19,2	20	20	27,3
Eh	mV	281	349,9	453,7	383,9	380,5	226,5	287,3	287,3	317,4	176,9
Conduc	mS	6	5,76	5,36	5,49	5,53	5,62	5,51	5,47	6,07	6,32
SDT	g/L	3,01	2,89	2,69	2,75	2,8	2,82	2,75	2,75	3,05	3,1
Turbiedad	UNT	0,65	0,6	1,66	0,5	0,6	0,55	0,5	0,8	0,65	0,87
Alcalinidad	mg CaCO3/L	400	390	390	400	410	410	380	390	380	370
Dureza	mg CaCO3/L	2000	3000	1600	3100	3000	3400	3400	3450	3150	3100
Sulfato*	mg/L	2000	1500	1600	2000	1800	1600	1800	1800	1800	2300

\*Medido con espectrofotómetro  
 <; Menor al límite de detección

Tabla 7.15: Datos celda CAL 03 en etapa 2

Muestra	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09	M10	M11
Fecha muestreo	2-5-17	15-5-17	30-5-17	13-6-17	27-6-17	11-7-17	24-7-17	9-8-17	6-9-17	17-10-17	9-11-17
Parámetro	Unidad										
Na	mg/L										
K	mg/L										
Ca	mg/L										
Mg	mg/L										
Fe	mg/L	<0,0041		<0,0041			<0,036		<0,004	1,42	<0,004
B	mg/L	4,62	4,7	4,7	3,84	4,34	4,34	4,32	4,32	4,71	4,64
Al	mg/L	0,2		<0,054	<0,054	0,011	0,011		<0,054	2,49	<0,054
Mn	mg/L	7,11	9,44	9,44	6,67	7,11	7,11	3,5	3,5	4,76	4,02
Zn	mg/L	10,86	14,2	14,2	10,15	10,18	10,18	8,11	8,11	8,27	7,34
As	mg/L	<0,036		<0,036			0,0022		<0,086	0,085	<0,086
Pb	mg/L	<0,018		<0,018			<0,0002		<0,018	<0,018	<0,018
Cl	mg/L										
SO4	mg/L										
pH	-	7,3	7,4	6,66	6,43	6,75	6,77	6,73	7,44	6,86	7,41
T	°C	13,8	20,3		18,5	19,1	18			20,3	27,7
Eh	mV	358,6	332,3	405,4	397,8	337,2	275,9	357,1	276,6	374,6	180,4
Conduc	mS	6,04	5,67	5,59	5,55	5,57	5,58	5,47	5,45	6,21	6,21
SDT	g/L	3,03	2,84	2,81	2,8	2,79	2,82	2,75	2,75	3,11	3,07
Turbiedad	UNT	0,5	0,54	0,63	0,5	0,4	0,8	0,42	0,5	0,9	0,74
Alcalinidad	mg CaCO3/L	400	420	470	410	390	430	420	420	320	390
Dureza	mg CaCO3/L	4200	3200	1650	2950	3200	3450	3150	3300	3000	3250
Sulfato*	mg/L	1700	1900	1700	1600	1500	1700	1800	1500	1900	2100

\*Medido con espectrofotómetro  
 <- Menor al límite de detección

Tabla 7.16: Datos celda ZEO 04 en etapa 2

Muestra	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09	M10	M11
Fecha muestreo	2-5-17	15-5-17	30-5-17	13-6-17	27-6-17	11-7-17	24-7-17	9-8-17	6-9-17	17-10-17	9-11-17
Parámetro	Unidad										
Na	mg/L										
K	mg/L										
Ca	mg/L										
Mg	mg/L										
Fe	mg/L										
B	mg/L										
Al	mg/L										
Mn	mg/L										
Zn	mg/L										
As	mg/L										
Pb	mg/L										
Cl	mg/L										
SO4	mg/L										
pH	-										
T	°C										
Eh	mV										
Conduc	mS										
SDT	g/L										
Turbiedad	UNT										
Alcalinidad	mg CaCO3/L										
Dureza	mg CaCO3/L										
Sulfato*	mg/L										

\*Medido con espectrofotómetro \*Medido con espectrofotómetro  
 <- Menor al límite de detección \*Medido con espectrofotómetro  
 <- Menor al límite de detección

Tabla 7.17: Datos celda ZEO 05 en etapa 2

Muestra	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09	M10	M11
Fecha muestreo	2-5-17	15-5-17	30-5-17	13-6-17	27-6-17	11-7-17	24-7-17	9-8-17	6-9-17	17-10-17	9-11-17
Parámetro	Unidad										
Na	mg/L										
K	mg/L										
Ca	mg/L										
Mg	mg/L										
Fe	mg/L	<0,0041			0.1		2.19		6.08	9.8	10.2
B	mg/L	2.89	3.76		3.29		3.67		3.93	4.61	4.63
Al	mg/L	119.88	149.6		131.66		162		166	157	155
Mn	mg/L	14.82	11.83		10.1		12.41		13.5	13.9	13.6
Zn	mg/L	7.46	11.54		9.66		10.21		10.5	10.6	10.2
As	mg/L	<0,036	<0,036		<0,036		<0,0012		<0,036	<0,036	<0,036
Pb	mg/L	<0,018	<0,018		<0,018		0.0056		<0,018	<0,018	<0,018
Cl	mg/L										
SO4	mg/L										
pH	-	3.9	3.6		3.68		3.62		2.98	3.04	2.93
T	°C	13	20.3		18		20.1		19.3	20.5	26.7
Eh	mV	432.4	447.9		487.1		463.8		513	490.6	481.8
Conduc	mS	4.84	5.01		4.96		5.13		5.27	5.59	5.78
SDT	g/L	2.42	2.52		2.49		2.6		2.65	2.79	2.85
Turbiedad	UNT	0.8	0.55		0.6		0.7		0.62	0.63	0.52
Alcalinidad	mg CaCO3/L										
Dureza	mg CaCO3/L	2450	3250		2000		2150		2150	2050	1950
Sulfato*	mg/L	2000	2100		2100		2500		2100	2000	2100

\*Medido con espectrofotómetro  
 <- Menor al límite de detección

Tabla 7.18: Datos celda ZEO 06 en etapa 2

Muestra	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09	M10	M11
Fecha muestreo	2-5-17	15-5-17	30-5-17	13-6-17	27-6-17	11-7-17	24-7-17	9-8-17	6-9-17	17-10-17	9-11-17
Parámetro	Unidad										
Na	mg/L										
K	mg/L										
Ca	mg/L										
Mg	mg/L										
Fe	mg/L	0.25	10.26		15.55		26.98		26.2		
B	mg/L	3.59	3.57		3.44		3.88		3.96		
Al	mg/L	163.9	139.8		129.44		142		152		
Mn	mg/L	13.45	11.88		10.48		11.66		12.06		
Zn	mg/L	9.92	11.21		10.08		10.35		10.44		
As	mg/L	<0,036	<0,036		<0,036		<0,0012		<0,036		
Pb	mg/L	<0,018	<0,018		<0,018		<0,0002		<0,018		
Cl	mg/L										
SO4	mg/L										
pH	-	3.6	3.27		3.32		3		2.98		
T	°C	13	20.3		18		19				
Eh	mV	429.8	470.1		501.7		504.2		500.7		
Conduc	mS	5.3	5.1		5.23		5.41		5.27		
SDT	g/L	2.65	2.58		2.56		2.72		2.65		
Turbiedad	UNT	0.6	0.83		0.7		0.7		0.8		
Alcalinidad	mg CaCO3/L										
Dureza	mg CaCO3/L	2600	2250		1900		3000		2050		
Sulfato*	mg/L	2100	2100		2100		2200		2100		

\*Medido con espectrofotómetro \*Medido con espectrofotómetro  
 <- Menor al límite de detección <- Menor al límite de detección

Tabla 7.19: Datos celda CAL 07 en etapa 2

Muestreo	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09	M10	M11
Fecha muestreo	2-5-17	15-5-17	30-5-17	13-6-17	27-6-17	11-7-17	24-7-17	9-8-17	6-9-17	17-10-17	9-11-17
Parámetro	Unidad										
Na	mg/L										
K	mg/L										
Ca	mg/L										
Mg	mg/L										
Fe	mg/L	0.05	1.18	1.18	5.57	0.92	0.92	0.66	0.66	<0.004	<0.004
B	mg/L	4.61	4.51	4.51	3.91	4.48	4.48	4.52	4.52	4.82	5.13
Al	mg/L	0.31	2.99	2.99	10.37	1.6	1.6	1.52	1.52	<0.054	0.13
Mn	mg/L	4.5	5.26	5.26	6.78	2.68	2.68	1.82	1.82	2.31	5.99
Zn	mg/L	9.12	11.72	11.72	11.15	8.48	8.48	6.54	6.54	6.94	9
As	mg/L	<0.036	<0.036	<0.036	0.2	0.027	0.027	<0.036	<0.036	<0.036	<0.036
Pb	mg/L	<0.018	<0.018	<0.018	<0.018	0.022	0.022	<0.018	<0.018	<0.018	<0.018
Cl	mg/L										
SO4	mg/L										
pH	-	7.6	7.6	6.67	7.18	6.55	7.05	5.88	7.5	7.14	7.24
T	°C				18.4	19.4		20		20.7	25
Eh	mV	328.1	311.8	499.8	390	409.1	346.7	346.3	258	314.1	278.5
Conduc	mS	6.37	5.75	5.39	5.61	5.5	5.82	5.88	5.72	6.44	6.57
SDT	g/L	3.18	2.88	2.7	2.83	2.77	2.92	2.72	2.88	3.23	3.26
Turbiedad	UNT	0.8	3.2	30	17	99	23	88	33	37	1.5
Alcalinidad	mg CaCO3/L	360	330	260	330	350	360	170	320	400	330
Dureza	mg CaCO3/L	3200	3150	1500	3050	3200	3050	3100	3050	3150	3100
Sulfato*	mg/L	1700	1500	1900	1900	1600	1600	1900	1700	1800	1900

\*Medido con espectrofotómetro  
 <- Menor al límite de detección

CAL07

Tabla 7.20: Datos celda CAL 08 en etapa 2

Muestra	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09	M10	M11
Fecha muestreo	2-5-17	15-5-17	30-5-17	13-6-17	27-6-17	11-7-17	24-7-17	9-8-17	6-9-17	17-10-17	9-11-17
Parámetro											
Na	mg/L										
K	mg/L										
Ca	mg/L										
Mg	mg/L										
Fe	mg/L	<0,0041	<0,0041		<0,0041		<0,036		<0,004	<0,004	0,051
B	mg/L	4,38	4,72		3,71		4,15		4,29	4,67	5,19
Al	mg/L	0,16	<0,054		<0,054		0,029		0,37	<0,054	0,12
Mn	mg/L	1,18	1,78		1,2		0,26		0,67	1,19	6,43
Zn	mg/L	8,91	10,85		6,96		7,49		5,71	6,83	10,1
As	mg/L	<0,036	<0,036		<0,036		0,0031		<0,036	<0,036	<0,036
Pb	mg/L	<0,018	<0,018		<0,018		<0,0002		<0,018	<0,018	<0,018
Cl	mg/L										
SO4	mg/L										
pH	-	7,4	6,69	6,8	6,52	6,8	7	6,4	7,67	7,44	7,4
T	°C	13,1		17,9	19,4		20,6	19,4		21	24,9
Eh	mV	383,8	286,8	430,5	224,6	409,5	370,3	309	254,6	302,1	260
Conduc	mS	6,03	5,29	5,54	5,67	5,6	5,58	5,42	5,69	6,28	6,34
SDT	g/L	3,02	2,9	2,67	2,78	2,85	2,8	2,71	2,87	3,14	3,14
Turbiedad	UNT	0,8	0,86	0,52	0,7	0,8	0,6	1,6	1,33	0,85	5,4
Alcalinidad	mg CaCO3/L	380	350	400	370	460	430	300	400	380	330
Dureza	mg CaCO3/L	3400	2100	1750	2900	3500	2950	3900	3250	2900	3050
Sulfato*	mg/L	1700	1600	1900	1600	2000	1600	2000	2300	2000	1800

\*Medido con espectrofotómetro \*Medido con espectrofotómetro  
 <: Menor al límite de detección

Tabla 7.21: Datos celda CAL 09 en etapa 2

Muestreo	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09	M10	M11
Fecha muestreo	2-5-17	15-5-17	30-5-17	13-6-17	27-6-17	11-7-17	24-7-17	9-8-17	6-9-17	17-10-17	9-11-17
Parámetro											
Unidad											
Na	mg/L										
K	mg/L										
Ca	mg/L										
Mg	mg/L										
Fe	mg/L	<0,0041	<0,0041			<0,0041	<0,036		<0,004	<0,004	
B	mg/L	4.51	3.84		3.55		4.4		4.24	4.48	
Al	mg/L	0.19	<0,054		<0,054		<0,004		<0,054	<0,054	
Mn	mg/L	14.04	7.26		9.96		11.87		11	11.6	
Zn	mg/L	10.47	5.09		7.68		9.95		8.93	8.09	
As	mg/L	<0,036	<0,036		<0,036		0.0074		<0,036	0.06	
Pb	mg/L	<0,018	<0,018		<0,018		<0,0002		<0,018	<0,018	
Cl	mg/L										
SO4	mg/L										
pH	-	7.7	6.06		7	6.9	7.2	7.14	7.74	7.75	
T	°C	13.4		19.6	20		20	19.6		20.6	
Eh	mV	319	294	430.5	273.4	428	314.7	309	278.5	288.4	
Conduc	mS	5.85	4.9	5.54	5.42	5.51	5.55	5.42	5.55	5.98	
SDT	g/L	2.92	2.47	2.78	2.74	2.77	2.8	2.71	2.79	2.99	
Turbiedad	UNT	0.6	1.02	0.6	0.6	0.54	0.55	1.6	0.9	0.6	
Alcalinidad	mg CaCO3/L		170	290	150	210	180	360	370	390	
Dureza	mg CaCO3/L		1500	3350	3050	4250	3350	3250	2750	2850	
Sulfato*	mg/L	1700	1500	1600	1700	1600	1600	2000	2000	1600	

\*Medido con espectrofotómetro

<: Menor al límite de detección

Tabla 7.22: Datos celda ZEO 10 en etapa 2

Muestra	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09	M10	M11
Fecha muestreo	2-5-17	15-5-17	30-5-17	13-6-17	27-6-17	11-7-17	24-7-17	9-8-17	6-9-17	17-10-17	9-11-17
Parámetro	Unidad										
Na	mg/L										
K	mg/L										
Ca	mg/L										
Mg	mg/L										
Fe	mg/L	0.01	0.05	0.05	<0.0041		<0.036		0.14	0.78	1.98
B	mg/L	4.09	4.74	4.74	3.34		3.76		4.02	4.87	5.28
Al	mg/L	205.65	192.14	192.14	141.92		149		173	171	190
Mn	mg/L	14.9	19.38	19.38	11.08		11.93		13	13.5	14.7
Zn	mg/L	12.5	14.33	14.33	10.18		10.26		11	11.5	12.1
As	mg/L	<0.036	<0.036	<0.036	<0.036		<0.0012		<0.086	<0.036	<0.086
Pb	mg/L	<0.018	<0.018	<0.018	<0.018		<0.0002		<0.018	<0.018	<0.018
Cl	mg/L										
SO4	mg/L										
pH	-	3.5	3.43	3.43	3.74		3.64		3.68	3.72	3.49
T	°C	13.6						20.1		21.3	24.4
Eh	mV	426	440.3	440.3	440.4		475.3		454	433.1	443.2
Conduc	mS	5.75	5.91	5.91	5.44		5.05		5.12	6.03	6.25
SDT	g/L	2.88	2.98	2.98	2.71		2.49		2.58	3.01	3.1
Turbiedad	UNT	0.7	0.95	0.95	0.7		1.05		0.68	0.8	0.58
Alcalinidad	mg CaCO3/L										
Dureza	mg CaCO3/L		1450	1450	2700		2400		2850	2200	2150
Sulfato*	mg/L	2400	2800	2800	2100		2400		2400	2400	2200

\*Medido con espectrofotómetro \*Medido con espectrofotómetro  
 <- Menor al límite de detección \*Menor al límite de detección

Tabla 7.23: Datos celda ZEO 11 en etapa 2

Muestreo	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09	M10	M11	
Fecha muestreo	2-5-17	15-5-17	30-5-17	13-6-17	27-6-17	11-7-17	24-7-17	9-8-17	6-9-17	17-10-17	9-11-17	
Parámetro	Unidad											
Na	mg/L											
K	mg/L											
Ca	mg/L											
Mg	mg/L											
Fe	mg/L				0.08		0.16		0.18	0.54	1.62	
B	mg/L				3.47		3.87		4.05	4.19	4.28	
Al	mg/L				62.66		107.7		144	138	142	
Mn	mg/L				13.81		13.64		13.5	12.6	13	
Zn	mg/L				7.87		8.82		10.3	9.43	10.1	
As	mg/L				<0,036		0,0049		<0,086	<0,036	<0,086	
Pb	mg/L				<0,018		<0,0002		<0,018	<0,018	<0,018	
Cl	mg/L											
SO4	mg/L											
pH	-				3.91		3.68		3.61	3.61	3.42	
T	°C				16.6			19.3		21	23.7	
Eh	mV				392.1		460.8		455.3	446.7	433.3	
Conduc	mS				5.3		5.6		5.26	5.61	5.47	
SDT	g/L				2.64		2.81		2.63	2.85	2.72	
Turbiedad	UNT				0.6		0.7		0.7	0.65	0.59	
Alcalinidad	mg CaCO3/L											
Dureza	mg CaCO3/L				3100		2950		2700	2250	2150	
Sulfato*	mg/L				1800		2500		2400	2500	2200	

\*Medido con espectrofotómetro \*Medido con espectrofotómetro  
 <- Menor al límite de detección \*Menor al límite de detección

Tabla 7.24: Datos celda ZEO 12 en etapa 2

Muestra	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09	M10	M11	
Fecha muestreo	2-5-17	15-5-17	30-5-17	13-6-17	27-6-17	11-7-17	24-7-17	9-8-17	6-9-17	17-10-17	9-11-17	
Parámetro	Unidad											
Na	mg/L											
K	mg/L											
Ca	mg/L											
Mg	mg/L											
Fe	mg/L				0.04		0.13		0.13	0.37	1.12	
B	mg/L				4.32		3.9		3.91	4.57	4.35	
Al	mg/L				168.92		148.8		168	166	160	
Mn	mg/L				14.09		12.68		12.1	13.1	12.4	
Zn	mg/L				11.87		10.6		10.4	10.3	10.2	
As	mg/L				<0.036		<0.0012		<0.036	<0.036	<0.036	
Pb	mg/L				<0.018		<0.0002		<0.018	<0.018	<0.018	
Cl	mg/L											
SO4	mg/L											
pH	-				3.74		3.68		3.72	3.64	3.5	
T	°C				15.7		19.8		19.8	21.2	23.4	
Eh	mV				462.2		460.8		450.4	446.7	456.9	
Conduc	mS				5.77		5.6		5.3	5.68	5.7	
SDT	g/L				2.88		2.81		2.72	2.85	2.83	
Turbiedad	UNT				0.7		0.7		0.7	0.57	0.59	
Alcalinidad	mg CaCO3/L											
Dureza	mg CaCO3/L				2850		3000		2900	2200	1950	
Sulfato*	mg/L				2200		2500		2600	2200	2300	

\*Medido con espectrofotómetro  
 <: Menor al límite de detección

Tabla 7.25: Agua ácida en etapa I

Muestra	AA01	AA02	AA03	AA04	AA05	AA06	AA07	AA08	AA09	AA10	AA11	AA12	AA13	AA14	AA15	AA16	AA17	AA18	AA19	AA20	AA21	AA22	AA23	AA24	AA25	AA26
Fecha muestreo	5-8-16	25-8-16	5-9-16	12-9-16	24-9-16	30-9-16	3-10-16	11-10-16	17-10-16	24-10-16	2-11-16	7-11-16	14-11-16	21-11-16	28-11-16	5-12-16	12-12-16	19-12-16	26-12-16	3-1-17	9-1-17	16-1-17	23-1-17	30-1-17	6-2-17	13-2-17
Parámetro	5-ago.																									
Unidad																										
Na	378	382.7	321.3	365.8	388.5		394.8	341																		
K	72.8	72.24	72.39	71.37	72.4		70.45	37.84																		
Ca	305	286.5	326.8	324.6	288.1		271	256.7																		
Mg	131	130.5	132.6	130.9	131.6		123	124.4																		
Fe	120	116.7	120.2	119.1	114.5		70.8	68.07	61	66.05	60.43	70.98	70.98	63.08	53.33	53.33	49.97	49.97	49.97	49.16	49.16	45.04	45.04	46.75	46.75	
B	30	21.84	9.726	10.332	10.09		3.58	3.45	3.67	3.54	3.62	4.25	4.25	4.27	4.27	4.28	3.86	3.86	3.86	4.58	4.58	4.58	4.58	4.43	4.43	
Al	61.5	60.94	61.2	59.49	66.01		59	63.52	56.55	56.85	52.2	52.3	52.3	57.77	57.77	58.6	58.6	64.25	64.25	62.11	62.11	62.05	62.05	61.75	61.75	
Mn	12.5	12.54	14.21	13.61	13.23		10.86	10.43	10.54	10.44	10.37	11.29	11.29	11.41	11.41	11.4	10.49	10.49	10.49	12.06	12.06	12.11	12.11	11.74	11.74	
Zn	12.6	12.516	14.474	13.962	14.29		10.98	10.43	10.41	10.26	10.18	13.02	13.02	13.5	13.5	12.81	12.81	12.04	12.04	13.08	13.08	13.19	13.19	12.74	12.74	
As	5.29	3.492	4.026	3.94	3.46		1.72	1.75	1.85	1.88	1.87	2.16	2.16	2.2	2.2	2.22	2.22	2.07	2.07	2.41	2.41	2.38	2.38	2.34	2.34	
Pb	1.38	0.71	1.682	1.334	1.15		0.99	0.86	0.85	0.85	0.71	0.79	0.79	0.94	0.94	1.03	1.03	0.89	0.89	0.87	0.87	0.97	0.97	0.94	0.94	
Cl	1124	1101	1101	1082	1074		983	984																		
SO4	5081	3679	3411	3175	3294		2213	2128																		
pH	1.3	1.7	1.7	1.7	1.4		1.7	1.8	1.9	1.9	1.9	2	1.9	2	2	2	2	2	2	2.2	2.1	2.2	2.1	2.2	2.2	2.1
T	15.4	20.2	19.6	19.8	21.8		21.5	22.8	19.9	19.9	21.9	23.6	22.5	22.9	23.7	22.7	22.7	19.9	20.4	24.4	24.4	25.3	19.1	25.8	26	14.6
Eh	mV						635.2	635.2	678	619.6	642.9	655.5	617.8	660.2	631.2	668.5	642.6	637.5	666.3	636.9	653	639.5	606.7	629.5	645.1	639.2
Conduc	ms	17.88	14.89	14.83	14.67	14.51	16.04	9.26	8.35	8.13	8.38	8.09	7.68	7.83	9	7.71	7.95	7.67	7.89	7.67	7.63	7.69	7.78	7.52	7.59	7.72
SOT	g/L	9.03	7.57	7.41	7.35	7.27	7.94	4.52	4.18	4.2	4.23	4.05	3.83	3.95	4.19	3.88	3.93	3.88	3.93	3.83	3.8	3.8	3.9	3.72	3.77	3.9
Turbiedad	UNT	1.66	1.7	0.77	0.55	0.83	0.61	1	0.9	0.72	1.02	0.6	0.8	1	1.05	1	0.9	1.6	1.38	1.05	0.83	0.9	0.45	1.15	1.2	0.7
Alcalinidad	mg CaCO3/L																									
Dureza	mg CaCO3/L	1450	1500	1550	1675	1425	1450	1400	1600	1750	1450	1850	1400	1350	1650	1800	1450	1700	1350	1350	1350	1350	1400	1350	1450	1500
Sulfato*	mg/L					3400	2100	1800	2700	2000	1700	2500	1700	1600	1800	1800	3400	2200	1900	2000	2000	1800	2000	2000	2000	2000

\*Medido con espectrofotómetro

Tabla 7.26: Agua ácida en etapa 2

Muestreo	AA 01	AA 02	AA 03	AA 04	AA 05	AA 06	AA 07	AA 08	AA 09	AA 10	AA 11	AA 12	AA 13	AA 14	AA 15	AA 16	AA 17	AA 18	AA 19	AA 20	AA 21	AA 22	AA 23	AA 24	
Fecha muestreo	4-4-17	17-4-17	26-4-17	2-5-17	9-5-17	16-5-17	23-5-17	30-5-17	6-6-17	13-6-17	21-6-17	4-7-17	11-7-17	18-7-17	24-7-17	31-7-17	9-8-17	14-8-17	6-9-17	12-10-17	17-10-17	24-10-17	31-11-17	9-11-17	
Parámetro	Unidad																								
Na	mg/L																								
K	mg/L																								
Ca	mg/L																								
Mg	mg/L																								
Fe	mg/L			51.94	51.94	53.4	53.4	49.68	49.68	49.68	49.68	40.68	40.68	40.68	40.68	51	51	51	51	51	52.2	48.7	48.7	48.7	
B	mg/L			4.06	4.06	3.98	3.98	3.98	3.54	3.54	3.54	4.63	4.63	4.63	4.63	3.98	3.98	3.98	3.98	3.98	4.23	4.14	4.14	4.14	
Al	mg/L			61.37	61.37	56.28	56.28	56.28	58.23	58.23	58.23	58.37	58.37	58.37	58.37	65.7	65.7	65.7	65.7	65.7	65.4	65.4	65.1	65.1	
Mn	mg/L			10.36	10.36	10.46	10.46	10.46	10.4	10.4	10.4	10.33	10.33	10.33	10.33	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	11.2	10.5	10.5	10.5	
Zn	mg/L			11.63	11.63	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.3	11.5	11.5	11.5	
As	mg/L			3.61	3.61	3.81	3.81	3.81	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.79	3.52	3.52	3.52	
Pb	mg/L			1.06	1.06	0.92	0.92	0.92	0.81	0.81	0.81	0.87	0.87	0.87	0.87	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.62	1.01	1.01	1.01	
Cl	mg/L																								
SO4	mg/L																								
pH	-	1.8	1.8	1.8	1.7	1.9	1.5	1.7	1.8	1.9	2	2.17	2.11	2.24	2.01	2.02	1.8	2.07	1.84	2.05	2.08	1.95	1.96	1.9	
T	°C	21.1	19.2	17.1	19.7	17.9						19.7	20.6	17.4	19.6		19.8				17.4	21	20.9	21.5	
Et	mV	620.1	620.4	633.5	629.3	635	641.7	629.3	642	693.5	698.4	652.8	765.3	691.9	636.9	750.4	642.8	675	617.4	601.2	633.2	647.3	610.2	640	
Conduc	mS	7.79	8.57	10.55	8.88	9.53	8.61	8.88	7.87	8.35	8.5	8.53	9.25	8.69	9.03	9.18	8.79	8.24	8.29	8.3	8.63	8.59	8.53	8.49	
SDT	g/L	3.87	4.31	5.38	4.43	4.96	4.29	4.4	3.96	4.22	4.27	4.65	4.36	4.42	4.5	4.42	4.2	4.19	4.17	4.35	4.29	4.29	4.27	4.23	
Turbiedad	UNT	0.5	0.8	0.7	1	0.9	1.1	0.9	1.17	1.1	1.4	1.1	0.82	1.4	1.5	1	0.9	1.2	1.6	0.62		0.95	0.77	0.62	
Alcalinidad	mg CaCO3/L																								
Dureza	mg CaCO3/L	1250	750	900	750	1550	1500	1500	1250	1500	1700	1750	2600	1800	2000	1850	2500			1800		1600	1500	1450	
Sulfato*	mg/L	2400	2100	2100	2000	2300	1900	1800	2000	1900	1800	1900	1900	2000	2000	2100	2100			2100		2400	2100	2200	

\*Medido con espectrofotómetro