

Tabla de Contenido

1	Introducción	1
1.1	Motivación	1
1.2	Objetivos	2
1.2.1	General	2
1.2.2	Específicos	2
1.3	Contenidos del informe	3
2	Revisión bibliográfica	4
2.1	El arsénico y su ocurrencia en el ambiente	4
2.1.1	Interacción del arsénico en ambientes acuáticos	5
2.1.2	Toxicidad del arsénico y su impacto en la salud humana	7
2.1.3	Procesos de remoción de arsénico del agua	8
2.2	Humedales construidos	9
2.2.1	Medios de soporte y vegetación	11
2.2.2	Evapotranspiración en humedales construidos	12
2.2.2.1	Efecto de la evapotranspiración en el tiempo de retención hidráulico	12
2.2.2.2	Estimación de la evapotranspiración	14
2.3	Humedales construidos para la remoción de arsénico	15
2.4	Caso de estudio: Río Azufre, Chile	17
2.4.1	Normativas nacionales e internacionales	18
3	Materiales y montaje experimental	20
3.1	Medios de soporte y vegetación	20
3.1.1	Zeolita clinoptilolita-mordenita	20
3.1.1.1	Granulometría	21
3.1.2	Piedra caliza guarelo	22
3.1.2.1	Granulometría	22
3.1.3	<i>Phragmites australis</i>	23
3.2	Descripción del sistema de humedales construidos y su operación	24
3.3	Agua sintética contaminada	27
3.4	Muestreo y análisis	28
3.4.1	Instrumentos y equipos	29
3.5	Medición directa y estimada de la evapotranspiración	30
4	Resultados y Discusión	32
4.1	Rendimiento general del sistema de humedales construidos	32
4.2	Remoción de metales y metaloides	33

4.2.1	Hierro	33
4.2.2	Plomo	34
4.2.3	Aluminio	35
4.2.4	Cinc	36
4.2.5	Manganeso	37
4.2.6	Boro	38
4.3	Remoción de otros contaminantes	39
4.3.1	Sulfato	39
4.3.2	Cloruro	40
4.3.3	Sodio y Potasio	41
4.3.4	Calcio y Magnesio	42
4.4	Cambios en parámetros ambientales de calidad de agua	44
4.4.1	pH	44
4.4.2	Potencial redox	46
4.4.3	Turbiedad	47
4.4.4	Conductividad eléctrica	48
4.4.5	Dureza	49
4.4.6	Alcalinidad	50
4.5	Otros cambios observados	51
4.6	Correlación entre la concentración de aluminio y pH	53
4.7	Comparación con trabajos similares	54
4.8	Medición directa y estimada de la evapotranspiración	54
4.8.1	Análisis de la evapotranspiración	57
5	Conclusiones y Recomendaciones	59
5.1	Efecto del medio de soporte en la remoción de contaminantes	59
5.2	Contribución de la vegetación en la remoción de contaminantes	60
5.3	Efecto del tiempo de operación del sistema de humedales construidos	61
5.4	Evapotranspiración en los humedales construidos	62
5.5	Recomendaciones	62
	Bibliografía	63
	Anexo	69
A	Descripción de contaminantes presentes con el As en el río Azufre	70
B	Datos en bruto sin corregir por evapotranspiración	74
C	Estimación ET_o - Método FAO Penman-Monteith	88

Índice de Figuras

2.1	Distribución mundial de las regiones contaminadas con arsénico, incluyendo la fuente de arsénico y el número de personas en riesgo de una exposición crónica (Garelick & Jones, 2008).	5
2.2	Especiación del arsenito (a) y arseniato (b) en función del pH.	6
2.3	Diagrama Eh-pH para especies acuosas de As en el sistema $As-O_2-H_2O$ a $25^\circ C$ y 1 <i>bar</i> de presión total (a) (Smedley & Kinniburgh, 2002) y en el sistema $As-S-O_2-H_2O$ a $25^\circ C$ y 1 <i>atm</i> de presión total con arsénico total 10^{-5} M y azufre total 10^{-3} M (b) (Wang & Mulligan, 2006).	6
2.4	Esquema de humedal de tipo SF (Kadlec & Wallace, 2008).	10
2.5	Esquemas de humedales de tipo HSSF (a) y de tipo VSSF (b) (Kadlec & Wallace, 2008).	10
2.6	Aumento del tiempo de retención hidráulico en un humedal construido considerando pérdidas de agua por ET.	13
2.7	Rutas de remoción del arsénico en humedales construidos (Lizama <i>et al.</i> , 2011b).	15
2.8	Río Azufre localizado en la cuenca del Río Lluta que se origina a los pies del volcán Tacora.	18
3.1	Curva granulométrica de la zeolita utilizada.	21
3.2	Curva granulométrica de la piedra caliza utilizada.	23
3.3	Esquema referencial de un humedal construido.	24
3.4	Desarrollo del sistema radicular de las plantas en un humedal construido con zeolita como medio de soporte. En los humedales con caliza el crecimiento radicular fue similar.	25
3.5	Vista de frente (a) y de lado (b) de un humedal construido utilizado.	26
3.6	Vista general de la instalación experimental.	26
4.1	Perfil de concentraciones promedio de Fe total afluente y efluentes (a) y perfil de remociones (b) según tipo de tratamiento. Las barras de error indican el valor de la concentración/remoción máxima y mínima según réplicas. LOD Fe = 0,0041 <i>mg/L</i>	33
4.2	Perfil de concentraciones promedio de Pb total afluente y efluentes (a) y perfil de remociones (b) según tipo de tratamiento. Las barras de error indican el valor de la concentración/remoción máxima y mínima según réplicas. LOD Pb = 0,018 <i>mg/L</i>	34
4.3	Perfil de concentraciones promedio de Al total afluente y efluentes (a) y perfil de remociones (b) según tipo de tratamiento. Las barras de error indican el valor de la concentración/remoción máxima y mínima según réplicas. LOD Al = 0,054 <i>mg/L</i>	35

4.4	Perfil de concentraciones promedio de Zn total afluente y efluentes (a) y perfil de remociones (b) según tipo de tratamiento. Las barras de error indican el valor de la concentración/remoción máxima y mínima según réplicas. LOD Zn = 0,0042 mg/L.	36
4.5	Perfil de concentraciones promedio de Mn total afluente y efluentes (a) y perfil de remociones (b) según tipo de tratamiento. Las barras de error indican el valor de la concentración/remoción máxima y mínima según réplicas. LOD Mn = 0,009 mg/L.	37
4.6	Perfil de concentraciones promedio de B total afluente y efluentes (a) y perfil de remociones (b) según tipo de tratamiento. Las barras de error indican el valor de la concentración/remoción máxima y mínima según réplicas. LOD B = 0,0046 mg/L.	38
4.7	Perfil de concentraciones promedio de SO ₄ ⁻² afluente y efluentes (a) y perfil de remociones (b) según tipo de tratamiento. Las barras de error indican el valor de la concentración/remoción máxima y mínima según réplicas. LOD SO ₄ ⁻² = 0,03 mg/L.	39
4.8	Perfil de concentraciones promedio de Cl ⁻ afluente y efluentes (a) y perfil de remociones (b) según tipo de tratamiento. Las barras de error indican el valor de la concentración/remoción máxima y mínima según réplicas. LOD Cl ⁻ = 0,03 mg/L.	40
4.9	Perfil de concentraciones promedio de Na ⁺ afluente y efluentes (a) y perfil de remociones (b) según tipo de tratamiento. Las barras de error indican el valor de la concentración/remoción máxima y mínima según réplicas. LOD Na ⁺ = 0,094 mg/L.	41
4.10	Perfil de concentraciones promedio de K ⁺ afluente y efluentes (a) y perfil de remociones (b) según tipo de tratamiento. Las barras de error indican el valor de la concentración/remoción máxima y mínima según réplicas. LOD K ⁺ = 0,044 mg/L.	41
4.11	Perfil de concentraciones promedio de Ca ⁺² afluente y efluentes (a) y perfil de remociones (b) según tipo de tratamiento. Las barras de error indican el valor de la concentración/remoción máxima y mínima según réplicas. LOD Ca ⁺² = 0,014 mg/L.	42
4.12	Perfil de concentraciones promedio de Mg ⁺² afluente y efluentes (a) y perfil de remociones (b) según tipo de tratamiento. Las barras de error indican el valor de la concentración/remoción máxima y mínima según réplicas. LOD Mg ⁺² = 0,0012 mg/L.	43
4.13	Perfil de pH promedio del afluente y efluentes según tipo de tratamiento. Las barras de error indican el valor máximo y mínimo según réplicas.	44
4.14	Perfil de Eh promedio del afluente y efluentes según tipo de tratamiento. Las barras de error indican el valor máximo y mínimo según réplicas.	46
4.15	Perfil de la turbiedad promedio del afluente y efluentes según tipo de tratamiento. Las barras de error indican el valor máximo y mínimo según réplicas.	47

4.16	Perfil de la conductividad promedio del afluente y efluentes según tipo de tratamiento. Las barras de error indican el valor máximo y mínimo según réplicas.	48
4.17	Perfil de la dureza promedio del afluente y efluentes según tipo de tratamiento. Las barras de error indican el valor máximo y mínimo según réplicas.	49
4.18	Perfil de la alcalinidad promedio del afluente y efluentes según tipo de tratamiento. Las barras de error indican el valor máximo y mínimo según réplicas.	50
4.19	Coloración que avanza en dirección del flujo en el tiempo. La imagen de la izquierda (a) muestra el avance de la coloración luego de 46 días de operación del sistema, mientras que la imagen de la derecha (b) muestra la coloración luego de 150 días de operación del sistema.	51
4.20	Hidróxidos de Fe formados en la zeolita. La imagen de la izquierda (a) muestra los sólidos formados en una celda de control, mientras que la imagen de la derecha (b) corresponde a un humedal.	52
4.21	Sólidos formados en la superficie de una celda de control con caliza (a) y en un humedal con zeolita (b).	52
4.22	Relación entre el pH y la concentración de Al según tipo de tratamiento. . .	53
4.23	ET medida en humedales y celdas de control antes del periodo de operación del sistema (a) y ET medida en humedales y celdas de control durante la operación del sistema (b).	55
4.24	Mediciones de ET en el sistema de humedales construidos durante todo el periodo de estudio.	56
4.25	ET medida y ET_o estimada con el método FAO Penman-Monteith.	57

Índice de Tablas

2.1	Estados de oxidación del As	4
2.2	Concentraciones promedio de las especies químicas más importantes que se encuentran presente en el río Azufre. Adaptado de Guerra <i>et al.</i> (2016)	17
2.3	Cuadro comparativo de criterios de calidad de agua potable	19
2.4	Cuadro comparativo de criterios de calidad de agua para riego	19
3.1	Composición química de la zeolita utilizada. Fuente: Ficha Técnica Zeolita Clinoptilolita-Mordenita, Zeolita del Maule	21
3.2	Composición química de la caliza utilizada. Fuente: Ficha Técnica Piedra Caliza Guarello, Empresa CAP de acero.	22
3.3	Concentraciones objetivo, del agua potable y resultantes.	27
3.4	Límites de detección (LOD) según equipo: Espectrometría de Emisión Óptica (ICP-OES) y Cromatógrafo Iónico (CI)	30
4.1	Matriz de correlación entre el pH y concentración de Al	53
4.2	Tabla comparativa de experiencias previas que utilizaron humedales construidos para la remoción de As desde agua ácida.	54
B.1	Datos en bruto de primera réplica de humedal con caliza como medio de soporte	75
B.2	Datos en bruto de segunda réplica de humedal con caliza como medio de soporte	76
B.3	Datos en bruto de tercera réplica de humedal con caliza como medio de soporte	77
B.4	Datos en bruto de primera réplica de humedal con zeolita como medio de soporte	78
B.5	Datos en bruto de segunda réplica de humedal con zeolita como medio de soporte	79
B.6	Datos en bruto de tercera réplica de humedal con zeolita como medio de soporte	80
B.7	Datos en bruto de primera réplica de celda de control con caliza como medio de soporte	81
B.8	Datos en bruto de segunda réplica de celda de control con caliza como medio de soporte	82
B.9	Datos en bruto de tercera réplica de celda de control con caliza como medio de soporte	83
B.10	Datos en bruto de primera réplica de celda de control con zeolita como medio de soporte	84
B.11	Datos en bruto de segunda réplica de celda de control con zeolita como medio de soporte	85
B.12	Datos en bruto de tercera réplica de celda de control con zeolita como medio de soporte	86
B.13	Datos en bruto del agua ácida afluente al sistema	87

Lista de abreviaciones

Al: Aluminio.

As: Arsénico.

ASTM: Sociedad americana para pruebas y materiales. Sigla por su nombre en inglés: *American Society for Testing and Materials*.

B: Boro.

Ca: Calcio.

CEGA: Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes.

CI: Cromatógrafo Iónico.

Cl: Cloruro.

Eh: Potencial Redox.

ET: Evapotranspiración.

ET_o: Evapotranspiración de referencia.

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Sigla por su nombre en inglés: *Food and Agriculture Organization*.

Fe: Hierro.

FiNA: Muestra filtrada y no acidificada.

FiAc: Muestra filtrada y acidificada.

HSSF: de flujo subsuperficial horizontal. Sigla por su nombre en inglés: *Horizontal subsurface flow*.

IBC: Contenedor de granel intermedio. Sigla por su nombre en inglés: *Intermediate bulk container*.

ICP-OES: Espectrometría de Emisión Óptica.

K: Potasio.

K_c : Coeficiente de cultivo.

LOD: Límite de detección. Sigla por su nombre en inglés: *Limit of detection*.

MCE: Ésteres mixtos de celulosa. Sigla por su nombre en inglés: *Mixed Cellulose Esters*.

Mg: Magnesio.

Mn: Manganeseo.

Na: Sodio.

NFAc: Muestra no filtrada y acidificada.

Pb: Plomo.

SF: de flujo superficial. Sigla por su nombre en inglés: *Surface flow*.

SSF: de flujo subsuperficial. Sigla por su nombre en inglés: *Subsurface flow*.

SO₄: Sulfato.

UNT: Unidad nefelométrica de turbidez.

USEPA: Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. Sigla por su nombre en inglés: *United States Environmental Protection Agency*.

VSSF: de flujo subsuperficial vertical. Sigla por su nombre en inglés: *Vertical subsurface flow*.

WHO: Organización Mundial de la Salud. Sigla por su nombre en inglés: *World Health Organization*.

Zn: Zinc.

η : Porosidad.

τ : Tiempo de retención hidráulico.