

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	Estructura de la memoria	3
2	Revisión bibliográfica	4
2.1	Humedales naturales y artificiales	4
2.2	El arsénico	5
2.2.1	El arsénico como contaminante	5
2.2.2	Química del arsénico	6
2.3	Tratamiento de aguas contaminadas con As	8
2.3.1	Tratamiento convencional	8
2.3.2	Tratamiento con humedales artificiales	9
2.4	Hidráulica de humedales artificiales	10
2.4.1	Factores que afectan la hidráulica de un HSSF	11
2.4.2	Pruebas con trazadores	13
2.4.3	Tiempo de retención hidráulico y otros parámetros	14
3	Metodología	17
3.1	Montaje experimental	17
3.1.1	Material de soporte	17
3.1.2	Sistema de humedales artificiales	21
3.2	Pruebas de trazador	24
3.2.1	Ensayos batch	24
3.2.2	Curvas de concentración	25
3.2.3	Procedimiento de las pruebas de trazador	26
3.2.4	Análisis de muestras	29
3.3	Remoción de arsénico y hierro	30
3.3.1	Caso de estudio	30
3.3.2	Preparación del agua sintética	31
3.3.3	Operación del sistema y toma de muestras	32
3.4	Cuantificación de la evapotranspiración y su efecto en las pruebas realizadas	34
4	Resultados y análisis	37
4.1	Ensayo batch	37
4.2	Pruebas de trazador	39

4.2.1	Iones principales en el agua potable	39
4.2.2	Curvas de concentración	40
4.2.3	Parámetros hidrodinámicos	42
4.2.4	Efecto de la vegetación	50
4.2.5	Efecto de la carga superficial	54
4.3	Remoción de arsénico	57
4.3.1	Medición de parámetros in situ	57
4.3.2	Remoción de As Y Fe	59
4.3.3	Cambios observados in situ	61
4.4	Mediciones y cálculo de la evapotranspiración	64
5	Conclusiones y recomendaciones	68
5.1	Medición de tiempos de retención y diferencias encontradas	68
5.2	Pruebas de remoción de arsénico y hierro	69
5.3	Efecto de la evapotranspiración	70
5.4	Comentarios y recomendaciones	70
	Bibliografía	71
	Anexo	76
	A Pruebas de trazador	77
	B Pruebas de remoción	84

Índice de Figuras

2.1	Ejemplo de un humedal de tipo HSSF (Kadlec & Wallace, 2008).	5
2.2	Principales rutas de transformación del arsénico en humedales artificiales. En negrita las que se consideran más importantes (Lizama <i>et al.</i> , 2011).	8
2.3	Esquemas de reactores ideales (τ es el tiempo de retención del reactor, definido en 2.4.3). a) Contaminante moviéndose en un reactor de flujo pistón. b) Gráfico de concentración vs tiempo en reactor de flujo pistón. c) Esquema de reactor de mezcla completa. d) Gráfico de concentración vs tiempo en reactor de mezcla completa. Adaptado de Kadlec & Wallace (2008).	10
2.4	Esquema de un flujo real. a) Vista en planta de la pluma de dispersión de una prueba de trazador generada en el programa GMS (Aquaveo). b) Arriba se ve un esquema de flujo arbitrario y abajo el gráfico de concentración vs tiempo adimensional de un reactor "real". Adaptado de Kadlec & Wallace (2008) (a) y Levenspiel (1999) (b).	11
2.5	Balance hídrico en un HSSF. <i>ET</i> corresponde a la evapotranspiración, <i>P</i> es la precipitación, <i>I</i> son las pérdidas por filtraciones, Q_i y Q_s son los caudales de entrada y salida, respectivamente. $h(x)$ es la altura del nivel freático. H_i y H_f corresponden a las alturas de agua inicial y final, respectivamente. W es el ancho del humedal y A_s su área superficial, k es la conductividad hidráulica, ε la porosidad, G_s la gravedad específica de los sólidos y γ el peso específico del material. Adaptado de Kadlec & Wallace (2008).	12
2.6	a) Evolución de la conductividad hidráulica vs el tiempo en un HSSF. b) Evolución de la porosidad vs el tiempo en un HSSF. Ambos gráficos muestran datos experimentales (McIntyre & Riha, 1991).	13
3.1	Curva granulométrica de la zeolita usada en el experimento.	19
3.2	Resultados y ajuste lineal del ensayo de conductividad hidráulica.	20
3.3	Celdas de acrílico utilizadas en los experimentos. Ambas celdas tienen las mismas dimensiones ($L = 60\text{ cm}$, $H = 20\text{ cm}$, $h = 15\text{ cm}$, $L_g = 5\text{ cm}$, $W = 20\text{ cm}$). <i>V</i> corresponde al vertedero, el cual puede ser movido hacia los lados para regular la altura de agua dentro de la celda, tiene una manguera de salida la cual llega hasta un estanque receptor.	22
3.4	Instalación Experimental. H1, H2 y H3 corresponden a humedales plantados. C1, C2 y C3 corresponden a celdas de control. EP es el estanque principal de alimentación. E1 a E6 son los estanques de almacenamiento del efluente. B es donde se encuentra protegida la bomba y el medidor multiparámetro. D es el distribuidor (de la salida de EP a las seis mangueras pequeñas que alimentan cada celda).	23
3.5	Sonda de medición de conductividad en el vertedero de salida	28
3.6	Mapa de ubicación del Río Azufre (Jaque, 2017).	30

4.1	Evolución de los parámetros in situ medidos	37
4.2	Evolución de las concentraciones de los iones analizados	38
4.3	Distribución de la conductividad eléctrica, por ión analizado, en el agua potable. La conductividad total de la muestra es de $1579 \mu S/cm$	39
4.4	Curva de concentración en agua destilada.	40
4.5	Curva de concentración en agua potable.	41
4.6	Determinación del factor de conductividad del bromuro. Se concluye que $f_{br} = 0.89$	41
4.7	Medición de EC en una celda de control, en la cual se hace pasar constantemente agua potable del estanque principal, a un caudal de $6 ml/min$	42
4.8	Prueba con $q=20$ [mm/día] en el humedal 3. (a) Mediciones de conductividad eléctrica. (b) Transformación a concentración y conductividad de bromuro de la señal suavizada. (c) Curva de masa acumulada.	43
4.9	Prueba con $q=20$ [mm/día] en la celda 1. (a) Mediciones de conductividad eléctrica. (b) Transformación a concentración y conductividad de bromuro de la señal suavizada. (c) Curva de masa acumulada.	44
4.10	Prueba con $q=50$ [mm/día] en el humedal 3. (a) Mediciones de conductividad eléctrica. (b) Transformación a concentración y conductividad de bromuro de la señal suavizada. (c) Curva de masa acumulada.	45
4.11	Prueba con $q=50$ [mm/día] en la celda 1. (a) Mediciones de conductividad eléctrica. (b) Transformación a concentración y conductividad de bromuro de la señal suavizada. (c) Curva de masa acumulada.	46
4.12	Prueba con $q=80$ [mm/día] en el humedal 3. (a) Mediciones de conductividad eléctrica. (b) Transformación a concentración y conductividad de bromuro de la señal suavizada. (c) Curva de masa acumulada.	47
4.13	Prueba con $q=80$ [mm/día] en la celda 1. (a) Mediciones de conductividad eléctrica. (b) Transformación a concentración y conductividad de bromuro de la señal suavizada. (c) Curva de masa acumulada.	48
4.14	Experiencia con carga superficial $q=20$ [mm/día]. (a) Curvas de <i>breakthrough</i> . (b) Curvas de masa acumulada	50
4.15	Experiencia con carga superficial $q=50$ [mm/día]. (a) Curvas de <i>breakthrough</i> . (b) Curvas de masa acumulada	51
4.16	Experiencia con carga superficial $q=80$ [mm/día]. (a) Curvas de <i>breakthrough</i> . (b) Curvas de masa acumulada	52
4.17	Experiencias en humedales con vegetación. (a) Curvas de <i>breakthrough</i> . (b) Curvas de masa acumulada	54
4.18	Experiencias en celdas sin vegetación. (a) Curvas de <i>breakthrough</i> . (b) Curvas de masa acumulada	55
4.19	Parámetros in situ en pruebas con agua ácida.	57
4.20	Mediciones de concentración de (a) Sulfato y (b) Dureza en pruebas con agua ácida.	58
4.21	Formación de precipitados de tono amarillo.	61

4.22	Formación de precipitados blancos. a) Zona intermedia del humedal vista en planta. b) Grava	62
4.23	Formación de minerales rojizos. a) Zona de entrada del humedal. b) Grava .	63
4.24	Mediciones directas de E y ET en la instalación experimental. (1) Con vegetación. (2) Sin vegetación	64
4.25	Cálculo de E y ET con datos meteorológicos, según los diferentes métodos. .	65
4.26	Comparación entre valores medidos y calculados.	65
4.27	Sensibilidad de los tiempos de retención a cambios en la ET	66
A.1	Determinación del factor de corrección de la relación entre conductividad y concentración del bromuro.	77
A.2	Caudales medidos e interpolación lineal usada. Experiencia 1	78
A.3	Caudales medidos e interpolación lineal usada. Experiencia 2	78
A.4	Caudales medidos e interpolación lineal usada. Experiencia 3	79
A.5	Caudales medidos e interpolación lineal usada. Experiencia 4	79
A.6	Caudales medidos e interpolación lineal usada. Experiencia 5	80
A.7	Caudales medidos e interpolación lineal usada. Experiencia 6	80
A.8	Mediciones de concentración de cationes e interpolación lineal usada. Experiencia 1	81
A.9	Mediciones de concentración de cationes e interpolación lineal usada. Experiencia 2	81
A.10	Mediciones de concentración de cationes e interpolación lineal usada. Experiencia 3	82
A.11	Mediciones de concentración de cationes e interpolación lineal usada. Experiencia 4	82
A.12	Mediciones de concentración de cationes e interpolación lineal usada. Experiencia 5	83
A.13	Mediciones de concentración de cationes e interpolación lineal usada. Experiencia 6	83
B.1	Parámetros in situ en pruebas con agua ácida.	84
B.2	Mediciones de concentración de (a) Sulfato y (b) Dureza en pruebas con agua ácida.	85
B.3	Caudales medidos de forma continuada desde el inicio de la prueba. Celdas con carga 20	86
B.4	Caudales medidos de forma continuada desde el inicio de la prueba. Celdas con carga 50	86
B.5	Caudales medidos de forma continuada desde el inicio de la prueba. Celdas con carga 80	87

Índice de Tablas

3.1	Características principales de la zeolita empleada. Fuente: Zeolitas del Maule	17
3.2	Composición química aproximada de la zeolita empleada. Fuente: Zeolitas del Maule	18
3.3	Normas consideradas para la determinación de las propiedades del material de soporte.	18
3.4	Parámetros geotécnicos de la zeolita determinados mediante ensayos de laboratorio	20
3.5	Factores de conductividad a 25 °C de especies comúnmente encontradas en el agua (Standard methods, 2005).	25
3.6	Caudales y tiempos de medición aproximados en las pruebas de trazador, según su carga superficial.	27
3.7	Límites de detección instrumental. Fuente: CEGA	29
3.8	Principales parámetros de calidad del agua del Río Azufre. Se muestran los valores promedio de mediciones efectuadas entre los años 2007 y 2012 (concentraciones objetivo). Adaptado de Guerra <i>et al.</i> (2016)	31
3.9	Concentraciones de especies relevantes en el agua potable de referencia a emplear como matriz y cantidad de reactivos a agregar para alcanzar las concentraciones y pH objetivos (resultados del programa PHREEQC)	32
3.10	Cargas superficiales y tiempo de muestreo ¹ en pruebas de remoción.	33
4.1	Resumen de resultados obtenidos en las pruebas de trazador	49
4.2	Caption for LOF	52
4.3	Caption for LOF	55
4.4	Concentraciones de As disuelto de las muestras recolectadas en las celdas con carga superficial q=20 mm/d	59
4.5	Concentraciones de Fe disuelto de las muestras recolectadas en las celdas con carga superficial q=20 mm/d	59
4.6	Concentraciones de As disuelto de las muestras recolectadas en las celdas con carga superficial q=50 mm/d	59
4.7	Concentraciones de Fe disuelto de las muestras recolectadas en las celdas con carga superficial q=50 mm/d	60
4.8	Concentraciones de As disuelto de las muestras recolectadas en las celdas con carga superficial q=80 mm/d	60
4.9	Concentraciones de Fe disuelto de las muestras recolectadas en las celdas con carga superficial q=80 mm/d	60
B.1	Concentraciones de As disuelto sin corregir de las muestras recolectadas en los humedales con carga q=20 mm/d	87

B.2	Concentraciones de Fe disuelto sin corregir de las muestras recolectadas en los humedales con carga $q=20$ mm/d	87
B.3	Concentraciones de As disuelto sin corregir de las muestras recolectadas en los humedales con carga $q=50$ mm/d	88
B.4	Concentraciones de Fe disuelto sin corregir de las muestras recolectadas en los humedales con carga $q=50$ mm/d	88
B.5	Concentraciones de As disuelto sin corregir de las muestras recolectadas en los humedales con carga $q=80$ mm/d	88
B.6	Concentraciones de Fe disuelto sin corregir de las muestras recolectadas en los humedales con carga $q=80$ mm/d	88