

Tabla de contenido

1.	Introducción	1
1.1	Objetivos.....	2
1.1.1	Objetivo general.....	2
1.1.2	Objetivos específicos	2
1.2	Organización del informe.....	2
2.	El agua en Chile: Situación de cantidad y calidad del recurso hídrico.	4
2.1	Contexto hidrológico de Chile.....	4
2.2	Calidad del recurso en Chile.....	6
3.	Situación hídrica de la zona norte de Chile, una mirada enfocada en la agricultura para la región de Antofagasta y Coquimbo.	10
3.1	Región de Antofagasta.....	11
3.2	Región de Coquimbo.....	15
3.3	La situación del sector agrícola en la región de Antofagasta y Coquimbo.	18
4.	La relación entre los contaminantes críticos y la agricultura.....	20
4.1	El rol del suelo en la agricultura.	20
4.2	Contaminantes críticos en el agua de riego.....	23
4.2.1	Salinidad.....	23
4.2.2	Boro.....	1
4.2.3	Azufre.....	2
4.2.4	Cloruro.....	4
4.2.5	Arsénico.....	6
4.3	Procesos de tratamiento para remover los contaminantes críticos identificados. 8	
4.3.1	Procesos específicos	8
4.3.2	Desalinización	10
5	Reúso de aguas residuales como nueva fuente	15
5.1	Contexto y consideraciones para el reúso en Chile.....	15
5.2	Reúso en la región de Antofagasta y Coquimbo.....	21
5.3	Tratamiento de aguas residuales en contexto de reúso.	24
5.3.1	Procesos convencionales de tratamiento de las aguas residuales.....	25
5.3.2	Fitorremediación de aguas residuales mediante humedales construidos: Características y consideraciones.....	28
6	Propuesta integral: Sistema hidropónico utilizando aguas servidas tratadas.	34
6.1	Aplicación: Reúso de aguas servidas tratadas.....	34
6.2	Aplicación: Cultivo sin suelo.....	40

7	Conclusiones y recomendaciones.....	55
8	Bibliografía.....	58
9.	Anexos.....	68

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Demanda (Consumo HH azul) de agua según Macrozona. Elaboración propia a partir de Escenarios hídricos 2030.....	6
Tabla 2: Concentraciones máximas de elementos químicos en agua para riego. Fuente: NCh 1.333of78.....	8
Tabla 3: Clasificación de las aguas de riego según su salinidad. Fuente: NCh 1333.of78.	9
Tabla 4: Precipitación media anual en función de las Macrozonas. Fuente: DGA (2016).	10
Tabla 5: Características principales del Río Loa. Fuente: DGA (2016).....	11
Tabla 6: Caudales característicos en cuenca Río Loa. Fuente: AMPHOS & CNR, 2017.....	11
Tabla 7: Caudales característicos en cuenca Salar de Atacama. Fuente: AMPHOS & CNR, 2017.	11
Tabla 8: Resumen de demandas hídricas en miles de metros cúbicos por año, para la región de Antofagasta en función de los diferentes usos. Fuente: DGA, 2017.	12
Tabla 9: Concentraciones promedio de arsénico, boro, cloruro y sulfato, en estaciones de la cuenca del río Loa, Antofagasta. Adaptado DGA (2016)	13
Tabla 10: Concentraciones promedio de arsénico, boro, cloruro y sulfato, en estaciones de la cuenca Salar de Atacama. Adaptado DGA (2016).	13
Tabla 11: Características de los principales ríos en la región de Coquimbo. Fuente: DGA (2016)	15
Tabla 12: Resumen de demandas hídricas para la región de Coquimbo en función de los diferentes usos. Fuente: DGA, 2017.....	16
Tabla 13: Valores de parámetros de calidad para los principales ríos de la región de Coquimbo. Fuente: Pastén et al. (2018).	17
Tabla 14: Resumen de calidad de agua para los principales acuíferos de la región de Coquimbo. Adaptado de DGA (2017).....	17
Tabla 15: Resumen de calidad de agua para los principales acuíferos de la región de Coquimbo. Adaptado de DGA (2017) (continuación).	17
Tabla 16: Superficie plantada y porcentaje según tipo de cultivo para la región de Antofagasta y Coquimbo. Fuente: INE (2007).	18
Tabla 17: Superficie regada y su porcentaje con respecto al total, según tipo de sistema de riego para la región de Antofagasta y Coquimbo. Fuente: INE (2007).	19
Tabla 18: clasificación de suelos según pH, CE y PSI. Fuente: Adaptado de Courel, F. (2019)..	21
Tabla 19: Tolerancias de algunos cultivos según porcentaje de sodio intercambiable en el suelo. Fuente: García, A. (2012).	23
Tabla 20: Clasificación de los cultivos según el contenido de boro. Fuente: Irrigation Water Quality Standards and Salinity Management Strategies, 1996.....	2
Tabla 21: Concentraciones de sulfato críticas para tejidos de diferentes cultivos. Fuente: Grant, C., Hawkesford, M. (2015).	4
Tabla 22: Concentraciones críticas de aguas de riego por aspersión cloruradas sódicas para las cuales los cultivos presentan riesgo de daños foliares. Fuente: Adaptado de Irrigation water quality standards and salinity management strategies (1996).	6

Tabla 23: Concentraciones máximas en la solución del suelo, a partir de las cuales aparecen síntomas de toxicidad por cloruro. Fuente: Irrigation water quality standards and salinity management strategies (1996).....	6
Tabla 24: Caracterización del tipo de agua según el contenido de sal. Fuente: Fritzmann, C., Löwenberg, Wintgens, T., Melin, T., 2007.	10
Tabla 25: Consumo de energía, costos de producción e inversión para los procesos de Osmosis Inversa (OI), Destilación Multi efecto (MED), Flash multietapa (MSF) y electrodiálisis (ED). Fuente: Fraunhofer (2017); Brakemeier, D. (2015).	13
Tabla 26: Porcentaje de remoción de contaminantes para tecnologías de destilación en comparación con tecnologías de membrana. Fuente: Fraunhofer Chile, 2017	14
Tabla 27: Diferentes peligros asociados al uso de aguas residuales sin tratamiento o con tratamiento deficiente en la agricultura. Fuente: Adaptado de OMS (2006), por FAO (2017).....	18
Tabla 28: Factibilidad y consideraciones de riego para el cultivo mediante aguas tratadas. Fuente: Adaptado de FCH, 2018.	19
Tabla 29: Caudales de aguas servidas a recolectar según territorio operacional en Antofagasta. Fuente: Informe DGA (2016), realizado por ARCADIS.	21
Tabla 30: Comparación de costo, eficacia y espacio requerido de distintos sistemas de tratamientos de aguas servidas. Fuente: Libhaber, Orozco-Jaramillo (2012).	27
Tabla 31: Comparación entre tratamientos biológicos para aguas residuales. Fuente: Conagua, 2015.	27
Tabla 32: Tipos de procesos de tratamiento y los contaminantes que usualmente remueve. Fuente: Conagua, 2015.	28
Tabla 33: Procesos que participan en la fitorremediación. Fuente: Hermen, S. (2011), Greipsson, S. (2011)	29
Tabla 34: Ejemplos de tratamiento de aguas residuales municipales y domésticas, mediante humedales construidos de flujo horizontal sub-superficial. Fuente: Vymazal, J. (2009).....	31
Tabla 35: Parámetros de diseño para humedales construidos horizontales de flujo subsuperficial y superficial. Fuente: Sun, G., & Cooper, D. (2008); Kadlec, Robert & Wallace, Scott. (2008)	33
Tabla 36: Análisis comparativo entre una propuesta de reúso en el sector urbano y el rural. Elaboración propia.....	35
Tabla 37: Límites máximos de ciertos contaminantes para el DS 90 y la norma de riego NCh 1333. El estado representa si la calidad de la tabla 1 del decreto supremo 90 es más estricta que la de la norma de riego, si no lo es, necesita tratamiento. Fuente: Elaboración propia.....	36
Tabla 38:Requerimientos de tratamiento del agua en función del uso (reúso) que se le quiera dar. Fuente: Conagua, 2015.	38
Tabla 39: Características de los cuatro casos propuestos: sector, localidad, población servida, tratamiento y caudal. Fuente: Elaboración propia.	39
Tabla 40: Parametros de diseño para un humedal de flujo subsuperficial. Fuente: Elaboración propia.	40
Tabla 41: Ventajas y desventajas del cultivo hidropónico. Fuente: Zárate, M., 2014; Beltrano, J., Gimenez, D., 2015.	42
Tabla 42: Micronutrientes y macronutrientes en plantas. Fuente: Beltrano, J., Gimenez, D. (2015)	43
Tabla 43: Sales fertilizantes que comúnmente se utilizan en hidroponía. Fuente: Adaptado de Fuente: Carrasco, G., Izquierdo, J., 1996.	45
Tabla 44: Elementos y parametros de diseño para un sistema de cultivo hidropónico. Fuente: Elaboración propia.....	47
Tabla 45: Requerimientos de lechuga por sector, y cantidad de sistemas NFT necesarios para satisfacer la demanda. Fuente: Elaboración propia.	47

Tabla 46: Caudales y volúmenes característicos necesarios para implementar los sistemas de cultivos NFT en los cuatro casos. Fuente: Elaboración propia.	48
Tabla 47: Costos de sistemas NFT con y sin PTAS, para los 4 casos. Fuente: Elaboración propia.	48
Tabla 48: Regla general para el riego con respecto al amanecer y al atardecer.	51
Tabla 49: Requerimientos de tomates por sector, y cantidad de sistemas de fertirriego requeridos para satisfacer la demanda. Fuente: Elaboración propia.	52
Tabla 50: Caudales y volúmenes característicos necesarios para implementar los sistemas de cultivos mediante fertirriego en los cuatro casos. Fuente: Elaboración propia.	53
Tabla 51: Costos de sistemas NFT con y sin PTAS, para los 4 casos. Fuente: Elaboración propia.	53
Tabla 52: Costos y caudales totales para sistemas NFT y fertirriego para las cuatro localidades. Se incluye porcentaje utilizado con respecto a la oferta de aguas servidas tratadas. Fuente: Elaboración propia.	54
Tabla 53 Producción total de diseño de lechuga y de tomate. Rendimiento por metro cuadrado cultivado sin planta de tratamiento. Fuente: Elaboración propia.	54

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Efectos del cambio climático en Chile. Fuente: FCH, 2018.	5
Ilustración 2: Oferta referencial para aguas superficiales y subterráneas. Escenarios Hídricos 2030, basado en Vargas, 2017.	6
Ilustración 3: Distribución de Macrozonas en Chile. Fuente: Adaptado de MOP (2017).	7
Ilustración 4: Mapa físico de la región de Antofagasta y sus acuíferos. Fuente: BCN (2007), DGA (s.f.)	12
Ilustración 5: Mapa resumen de calidad de las fuentes de la región de Antofagasta. Fuente: DGA, 2016.	14
Ilustración 6: Mapa físico de la región de Coquimbo y sus acuíferos. Fuente: BCN (2007), DGA (s.f.)	15
Ilustración 7: Efectos osmóticos en una planta de apio debido a un incremento en la conductividad eléctrica de 0 a 12 mS/cm. Fotografía: L. Francois. Fuente: Grattan, S. 2018.	24
Ilustración 8: Producción relativa de un cultivo en función del a salinidad promedio en las raíces, el área bajo la curva define la tolerancia o sensibilidad a la salinidad. Fuente: Grattan, S. 2018.	25
Ilustración 9: Tolerancia de los cultivos a la salinidad, medida a partir de la conductividad eléctrica del agua de riego, según sus rendimientos. También se muestra la tolerancia para el boro. Fuente: Grattan, S. (2018).	26
Ilustración 10: Especiaciones del arsénico según potencial redox y pH, a 25°C y 1 bar de presión. Fuente: Rangel et al. (2015)	7
Ilustración 11: Barreras múltiples para reducir riesgo en riego mediante reúso de aguas residuales. Fuente: FAO, 2017.	16
Ilustración 12: Emisarios submarinos a nivel nacional. Fuente: FCH, 2018.	17
Ilustración 13: Visión holística del Desarrollo de Capacidades Institucionales. Fuente: FAO, 2017.	20
Ilustración 14: Representación gráfica de un proceso convencional de lodos activados. Fuente: Adaptado de Ramalho, 1996, por TECSPAR en Manual de tecnologías sostenibles en el tratamiento de aguas.	26
Ilustración 15: Esquema de reactor UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket). Fuente: TECSPAR en Manual de tecnologías sostenibles en el tratamiento de aguas.	26

Ilustración 16: Humedal de flujo superficial (arriba) y sub-superficial (abajo). Fuente: Vidal, G., Jarpa, M., Plaza, C., Belmonte, M., Mariangel L. (s.f.)	29
Ilustración 17: Multi-banda 3CP para el sistema NGS, (Arriba izquierda), Forraje Verde Hidropónico (Arriba derecha); Sistema hidropónico Nutrient Film Technique en invernadero (Abajo izquierda). Sistema hidropónico de Raíz Flotante (Abajo derecha). Fuente: NGS New Growing system (2020), Groho (2020), Agriculturers (2015), PortalFrutícola (2019).....	41
Ilustración 18: Concentración de nutrientes en solución nutritiva según varios autores. Fuente: Carrasco, G., Izquierdo, J., 1996.	44
Ilustración 19: Esquema referencial de sistema NFT. Fuente: Elaboración propia.	49
Ilustración 20: Esquema del sistema de fertirriego en sustrato. Considera 6 sectores con 11 mangueras cada uno. Cada manguera posee 16 goteros que riegan tomates mediante un microtubo y una estaca. Fuente: Elaboración propia.....	53
Ilustración 21: Esquema de la primera sección del sistema de fertirriego en sustrato. Considera 2 sectores con 11 mangueras cada uno. Cada manguera posee 16 goteros que riegan tomates mediante un microtubo y una estaca. Fuente: Elaboración propia.	54

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Distribución de costos para la operación de una planta de OI. Fuente: Adaptado de UNAP (2017).....	12
Gráfico 2: OPEX para tecnologías convencionales de desalinización. Fuente: Brakemeier, D., 2015, en Evaluación económica entre osmosis inversa y desalinización solar térmica, a partir de datos de GWI 2010.	13