

CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANO PARA EL CICLO URBANO SUSTENTABLE DEL AGUA

SÍNTESIS DE
INVESTIGACIÓN

Abril 2020
Nº 06



Centro de Desarrollo
Urbano Sustentable

CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANO PARA EL CICLO URBANO SUSTENTABLE DEL AGUA

© Centro de Desarrollo
Urbano Sustentable
CEDEUS

Autores

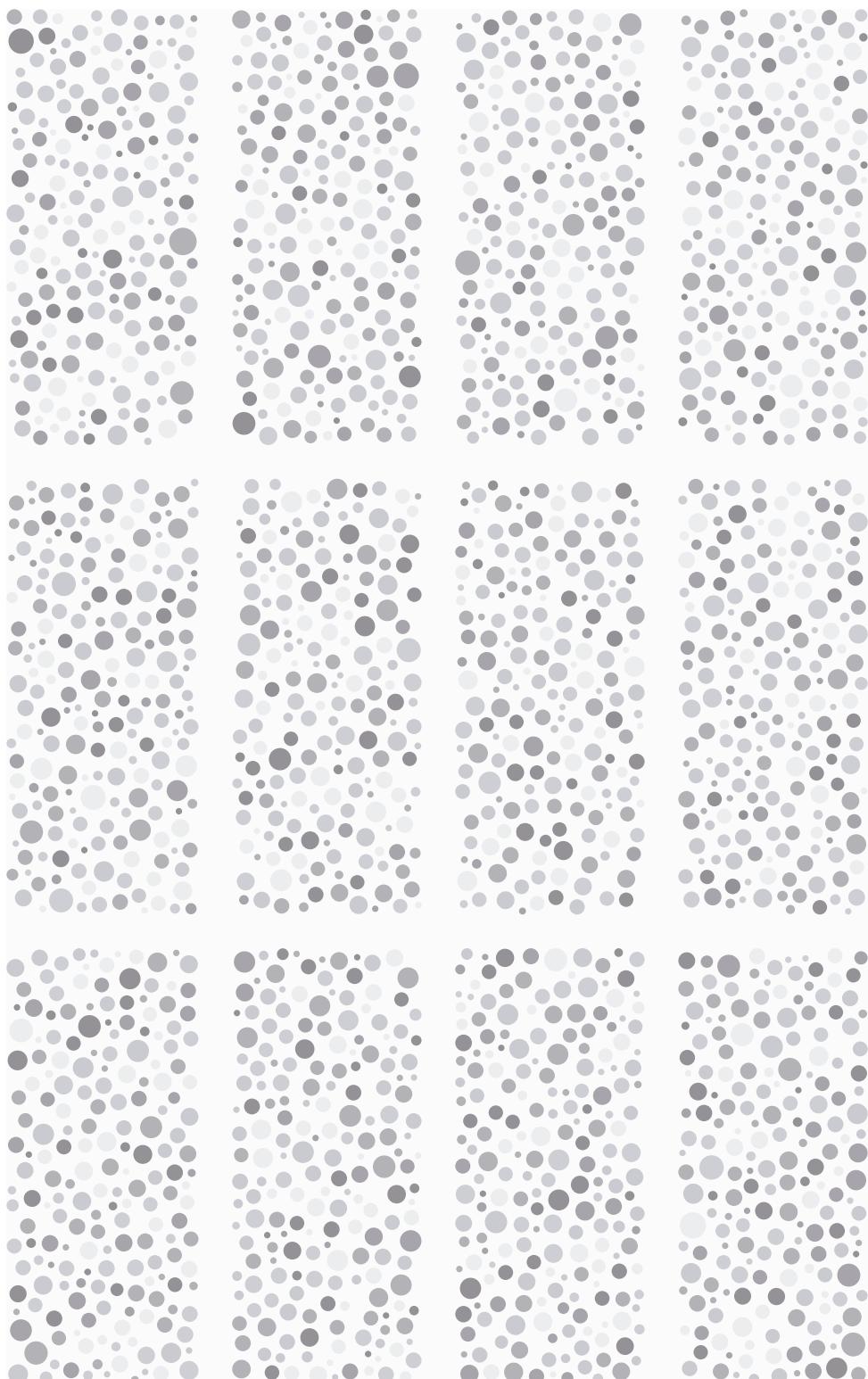
Ignacio Vargas
Javier Rivera

Cómo citar este documento:

Vargas, I., Rivera, J., (2020). *Celdas de combustible microbiano para el ciclo urbano sustentable del agua.*
Síntesis de investigación N°06. Centro de Desarrollo Urbano Sustentable, Santiago. <https://doi.org/10.7764/cedeus.si.06>



Atribución-NoComercial 4.0
Internacional (CC BY-NC 4.0)
Primera edición corregida
Abril 2020 / N°06



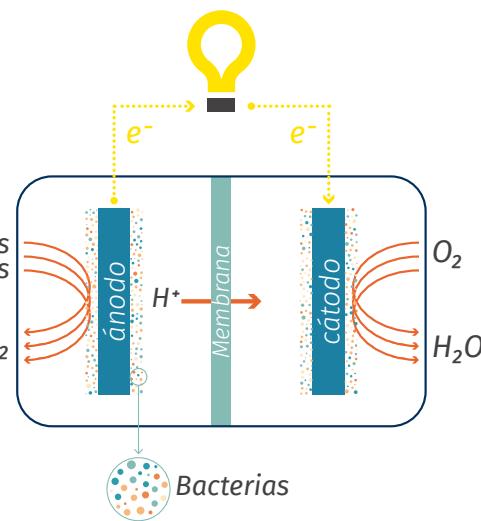


Figura 1. Esquema modelo de una celda de combustible microbiana de dos cámaras para la transformación de energía química en energía eléctrica.

Las celdas de combustible microbiano permiten simultáneamente descontaminar el agua y generar energía.

En el ámbito de la minería se pueden usar para mitigar el impacto del drenaje ácido de minas.

Como biosensores, las celdas de combustible microbiano han servido como alternativa para conocer el contenido de agua de una cubierta vegetacional.

En el tratamiento de aguas grises, la incorporación de las MFCs en humedales construidos es una valiosa alternativa que puede ser integrada en el entorno residencial.

El agua es un recurso crítico con una demanda en aumento debido al crecimiento y funcionamiento de las ciudades. Su manejo en áreas urbanas presenta grandes desafíos relacionados a su disponibilidad y calidad, así como también a las barreras biofísicas que impone la cuenca en donde se encuentra. Proveer el agua necesaria de manera constante y confiable es una tarea compleja, más aun considerando los efectos adversos del cambio climático y las crecientes tasas de urbanización en el país. Así, buscar alternativas de bajo costo y de menor consumo energético es necesario para la gestión sustentable del uso de agua en la ciudad.

En las últimas décadas distintos grupos de investigación en el mundo han permitido el desarrollo de una novedosa alternativa biotecnológica conocida como celdas de combustible microbianas, en inglés microbial fuel cells o MFCs; capaces de limpiar residuos en el agua y, al mismo tiempo, generar electricidad. Para ello, se utilizan microorganismos como catalizadores para convertir la energía química de los residuos en energía eléctrica. La energía química se encuentra en los enlaces de un compuesto orgánico o inorgánico, el cual es oxidado cediendo electrones a un electrodo. Este electrodo llamado ánodo transmitirá los electrones externamente a un segundo electrodo (cátodo), acto que genera corriente eléctrica de forma análoga al funcionamiento de las pilas con un flujo de electrones y diferentes potenciales.

Para que ocurra la generación de corriente en una MFC, se requieren ciertos elementos mínimos (Figura 1): un

ánodo y un cátodo; una o dos cámaras contenedoras de electrolitos; una reacción red-ox global que sea espontánea en las condiciones de operación de la MFC; un dador y un aceptor de electrones; una comunidad microbiana anódica con presencia de microorganismos electroquímicamente activos; y una resistencia externa.

Las MFCs transforman la energía química de los desechos orgánicos e inorgánicos de las aguas residuales municipales e industriales, y de los sustratos orgánicos de sedimentos, cubiertas vegetales o zonas bentónicas, en energía eléctrica. **Esta tecnología puede ser aplicada para la producción de energía, el desarrollo de biosensores, y en la biorremedación de aguas contaminadas.**

En el ciclo urbano del agua en las cuencas andinas de Chile se han detectado tres ámbitos claves en donde la tecnología MFCs podría ser un aporte significativo en el uso sustentable del agua y la energía (Figura 2): (A) la zona alta de la cuenca, “aguas arriba” de la ciudad, donde la actividad de la industria minera afecta y compromete la calidad de los recursos hídricos con que se abastece la ciudad; (B) dentro de la ciudad, donde el correcto y eficiente uso del recurso es clave para el desarrollo urbano sustentable; y (C) la zona “aguas abajo” de la ciudad donde se descargan las aguas residuales producidas por esta.

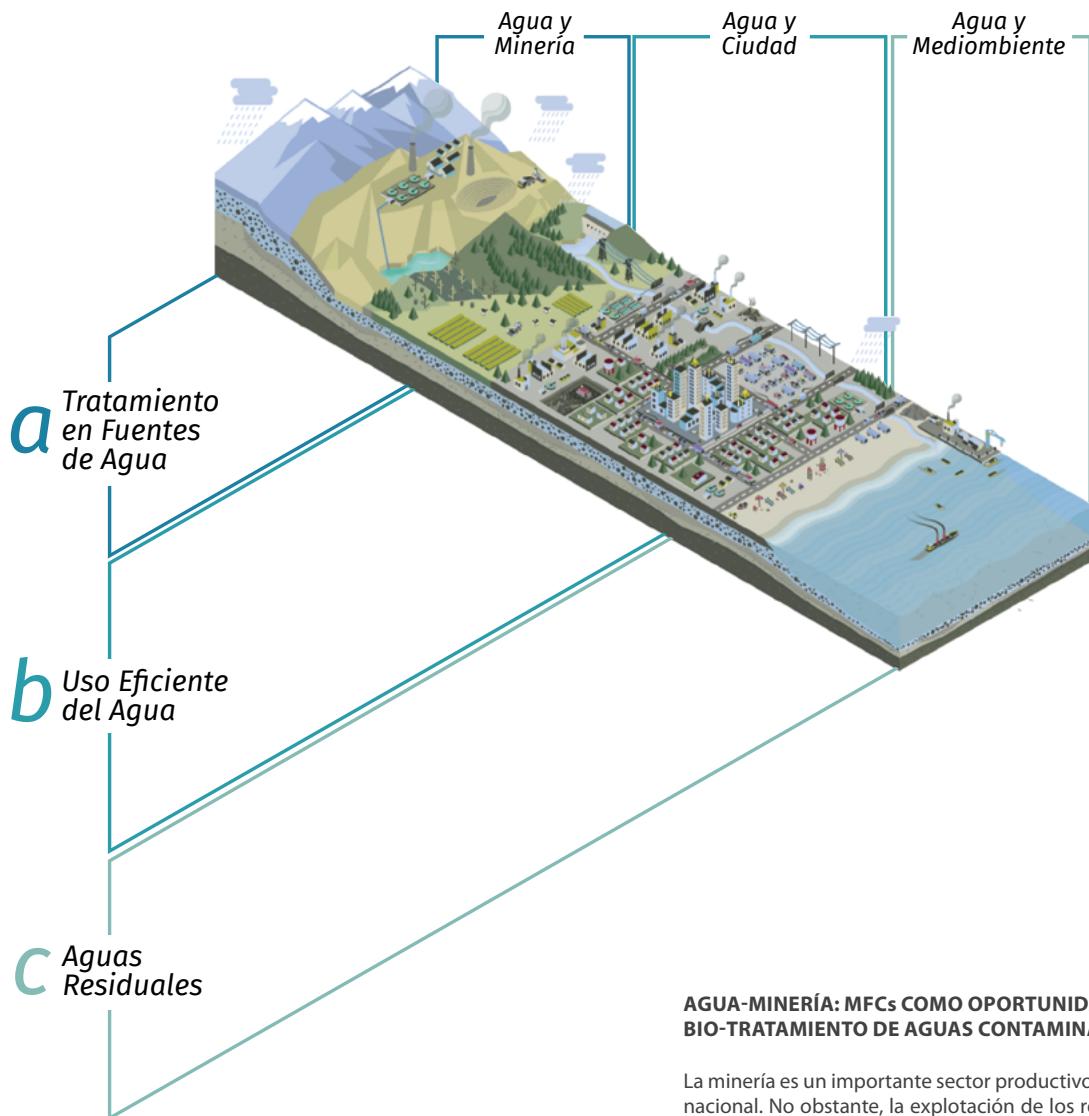


Figura 2. Esquema de oportunidades de aplicación de MFCs en el ciclo urbano de agua. La ciudad está inserta en una cuenca, cuya geomorfología y geología influyen en su asentamiento, y sumado a lo anterior, su desarrollo y operación provoca una presión sobre sus fuentes de agua, uso eficiente del agua y generación de aguas residuales. Modificado de Hachim et al. (2014).

de las cuencas cercanas a estas minas, las convierten en recursos inhabilitados para consumo humano o para su uso en la agricultura. Por ello, su contención y manejo es de gran relevancia, y se hace necesario buscar soluciones para mitigar el impacto negativo de la minería en el medioambiente.

Actualmente se han llevado a cabo estrategias de mitigación como el uso de toxinas que eliminan aquellos microorganismos involucrados en la oxidación de los minerales, evitando así la contaminación de las aguas. También se ha considerado la utilización de sistemas de contención de trampas para evitar la propagación de estas aguas (Johnson y Hallberg, 2005). Lamentablemente, la aplicación de este tipo de medidas presenta aspectos técnicos y económicos que son desfavorables. Entre sus limitaciones están sus altos costos de operación y mantenimiento, así como también la formación de compuestos indeseados que deben ser removidos. Tomando en cuenta estas desventajas, la incorporación de nuevas tecnologías capaces de mejorar la sustentabilidad en el nexo agua-minería es fundamental para asegurar un recurso de calidad hacia las ciudades.

Las MFCs son una alternativa emergente que se podría integrar en el tratamiento del DAM. Dentro de CEDEUS se ha estudiado su potencial aplicación como agente neutralizador de pH, llevada a cabo por la comunidad de microorganismos presentes dentro de los reactores MFCs. El trabajo desarrollado por Leiva et al. (2016) y Leiva-Aravena et al. (2019) permitió demostrar, a través de una prueba de concepto experimental (Figura 3a), como dicha actividad microbiana podría ser utilizada para aumentar la alcalinidad del sistema, aumentando el pH del agua tratada y la precipitación de metales disueltos; reduciendo así su concentración en las aguas contaminadas. De acuerdo a Leiva et al. (2018), se ha alcanzado una remoción de ~80% del metaloide arsénico y del metal hierro y, simultáneamente, se logró una neutralización del pH de ~3.7 a ~7.2 al utilizar las MFCs en aguas ácidas, lo que vislumbra el uso de esta tecnología como alternativa de biorremediación energéticamente sostenible.

AGUA-MINERÍA: MFCs COMO OPORTUNIDAD DE BIO-TRATAMIENTO DE AGUAS CONTAMINADAS

La minería es un importante sector productivo a nivel nacional. No obstante, la explotación de los recursos minerales en la Cordillera de los Andes puede resultar en impactos negativos en el medioambiente, entre los que se encuentran el Drenaje Ácido de Minas (DAM) que puede provenir de minas en operación o abandonadas y/o de trampas de relaves. El DAM se caracteriza por la generación de aguas con bajo pH y altas concentraciones de iones metálicos (hierro y aluminio) y no metálicos (sulfato). Este proceso que genera aguas ácidas, ricas en sulfatos y metales pesados, es provocado por la oxidación de minerales expuestos al oxígeno y al agua (Levings et al., 2005). La presencia de estos compuestos en las napas subterráneas o en las aguas superficiales

Las perspectivas en este ámbito de aplicación son múltiples, no solo por el descubrimiento de microorganismos electroquímicamente activos capaces de habitar en ambientes afectados por DAM (Rojas et al., 2017; Anguita et al., 2018), sino además por su participación en la química del hierro (Zamorano, 2017) y arsénico (Anguita et al., 2018). Esta es un área de desarrollo biotecnológico de alto impacto para el futuro. **Los desafíos hoy están enfocados en el desarrollo de biorreactores que utilicen estas nuevas capacidades biológicas para el tratamiento de fuentes de aguas contaminadas.**



Figura 3. Distintas configuraciones de sistemas MFCs. (a) Reactor utilizado como prueba de concepto a escala de laboratorio (b) Biosensores para el monitoreo del contenido de agua de cubiertas vegetacionales (c) Reactor que integra el uso de humedales construidos y MFCs para el tratamiento de aguas grises.

AGUA-CIUDAD: MFCs COMO TECNOLOGÍA PARA EL USO EFICIENTE DEL AGUA

En los últimos años, ha crecido el número de edificios que cuentan con cubiertas vegetales, comúnmente conocidos como "techos verdes". Implementar techos verdes tiene beneficios como la mitigación de inundaciones, regulación de la temperatura en la ciudad, el aislamiento térmico y sonoro, la creación de nuevos hábitats, el aumento de la biodiversidad y la purificación de la calidad del aire (Frese, 2016).

En áreas de clima árido y semiárido, como en las condiciones actuales y futuras en la zona centro-norte de Chile, la construcción y mantención de techos verdes debe considerar estrategias para el uso eficiente del agua utilizada para riego en temporadas de sequía. En el mercado existen sensores que registran el contenido de humedad del suelo o sustrato utilizado, permitiendo un control inteligente y sustentable del agua adicionada para el riego. Sin embargo, su implementación en el contexto residencial y comercial en las ciudades del centro-norte chileno se ve comprometida por el costo que estos dispositivos; entre US\$400 y US\$1800.

En este contexto, CEDEUS ha trabajado en el desarrollo de sensores basados en la tecnología MFC como una oportunidad para el manejo eficiente del agua. En los estudios realizados por Tapia et al. (2017) y (2018) se utilizaron distintos tipos de Sedum, planta comúnmente escogida para cubiertas de vegetación en regiones semiáridas, ya que se caracterizan por su bajo requerimiento hídrico y resistencia a la sequía. Con estas plantas se construyeron

reactores PMFCs (en inglés Plant Microbial Fuel Cells) bajo condiciones no saturadas de contenido de agua, como se muestra en la Figura 3b.

Las PMFCs son sistemas bioelectroquímicos que utilizan los exudados de las raíces de la planta para transformar su energía química en energía eléctrica y pueden ser desarrolladas en sitios como humedales y cubiertas vegetales. Por lo tanto, Sedum emerge como un interesante candidato para ser usado en una PMFC. Como resultado de este trabajo no solo se logró encontrar una directa relación entre la corriente eléctrica generada y el contenido de humedad de la cubierta, sino que además se logró determinar que la incorporación de estos reactores en cubiertas no afecta negativamente la microbiota del sustrato. El descubrimiento de los fundamentos biológicos y físicos que sustentan esta aplicación, junto con el diseño e implementación en condiciones de operación reales, hacen de esta tecnología una atractiva alternativa para optimizar la cantidad de agua usada en la mantención de estas áreas verdes. La posibilidad de usar la tecnología MFC como biosensores es una prometedora aplicación para el futuro en espacios naturales construidos.

AGUA-MEDIOAMBIENTE: MFCs COMO ALTERNATIVA SUSTENTABLE PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS URBANOS

Un importante requerimiento energético de las ciudades viene del funcionamiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales. Según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, en ese país el transporte y tratamiento del agua ocupa cerca del 3% de la

energía generada (Logan y Rabaey, 2012). Es importante entonces desarrollar tecnologías que permitan reducir este gasto energético y económico.

Actualmente Chile cuenta con una cobertura casi completa en el tratamiento de las aguas residuales urbanas (SISS, 2016) cuyo principal objetivo es la remoción de materia orgánica. Sin embargo, el estudio realizado por CEDEUS (Escobar, 2017) muestra que existen aún dos importantes desafíos para nuestro país:

i) En la actualidad un 11,6 % del agua residual que producen las ciudades se maneja a través de emisarios submarinos (SISS, 2016), sistemas que no tiene tratamiento secundario para la remoción de carga orgánica, aprovechando la capacidad de dilución de contaminantes del océano. Es necesario modernizar dichos sistemas con tecnologías que reduzcan el impacto en el ambiente marino y al mismo tiempo no representen costos de operación elevados para la población usuaria del agua potable.

ii) El segundo desafío es mejorar la eficiencia energética de las pequeñas plantas de tratamiento a lo largo del país. El estudio de Escobar (2017) muestra que sistemas de tratamiento de pequeña escala, es decir de menos de 2 millones de m³ de agua residual tratada al año, basados principalmente en tecnologías de lodos activados y lagunas aireadas, **presentan índices de eficiencia energética que duplican los estándares internacionales.**

De acuerdo a la realidad nacional, las MFCs podrían actuar como complemento en el tratamiento de aguas servidas y la producción de energía eléctrica. Su integración permitiría reducir los costos de tratar esta agua y los gastos energéticos asociados. Es interesante destacar que, en las últimas dos décadas, la energía

obtenida por un sistema de MFC ha aumentado en cerca de seis órdenes de magnitud (Logan, 2009). En sus inicios, estos sistemas alcanzaban densidades de potencia menores a 1mW/m² y en la actualidad, se han obtenido valores cercanos a 7 W/m², rendimiento alcanzado por investigadores de la Universidad del Estado de Oregon (Fan et al., 2008). A esta escala de producción de energía, se estima que un electrodo de un área de 1m² permitiría encender una ampolleta LED equivalente a una ampolleta incandescente de 50 watts.

CEDEUS ha avanzado en el desarrollo de tecnologías MFCs para el tratamiento de aguas residuales. Ejemplos de esto son el trabajo desarrollado por Vargas et al. (2013) que permitió determinar aspectos relevantes de la distribución de las comunidades microbianas en reactores a escala de laboratorio y el trabajo desarrollado por Araneda et al. (2018) en la construcción de un humedal construido acoplado a una MFCs como alternativa sustentable de tratamiento de aguas grises generadas en las viviendas (Figura 3c).

Este último trabajo exploró el potencial de integrar las MFCs a los humedales construidos, tecnología de bajos costos de operación y con múltiples beneficios de integración con el entorno residencial y natural. Como resultado del trabajo a nivel de reactores piloto se observó que la incorporación de la tecnología MFCs no afecta negativamente el desempeño de los humedales en la remoción de materia orgánica, permitiendo además obtener energía eléctrica de los residuos orgánicos de las aguas grises.

Los humedales construidos utilizados en esta experiencia fueron capaces de depurar las aguas grises a un bajo costo y de forma amigable con el medioambiente, alcanzándose un nivel de tratamiento que permite reutilizar este tipo de aguas para el riego de áreas verdes residenciales.

CONCLUSIONES

- Las MFCs son una alternativa sustentable que podría tener un impacto positivo en el manejo del recurso hídrico en la ciudad, y a su vez, permitiría valorizar parte de la inmensa cantidad de residuos que la ciudad genera a diario.

- El desarrollo de MFCs y el descubrimiento y caracterización de nuevos microorganismos electroquímicamente activos son un aporte para la búsqueda de soluciones de tratamiento de aguas residuales mineras.

- El desarrollo de bio-sensores basados en MFCs permite ayudar a mejorar la sustentabilidad urbana en relación al uso del agua en áreas verdes urbanas.

- En el ámbito de la reutilización de aguas a nivel residencial, las MFCs acoplados a humedales construidos permiten recuperar energía eléctrica y al mismo tiempo proporcionar un tratamiento efectivo de aguas grises.

PARA LEER MÁS

Anguita J, Vera M, Vargas IT (2018): *The Electrochemically Active Arsenic Oxidising Bacterium *Ancyllobacter* sp. TS-1.* Chemelectrochem 2018, 3, 3633-3638.

Araneda I, Tapia NF, Lizama Allende K, Vargas IT (2018): *Constructed Wetland-Microbial Fuel Cells for Sustainable Greywater Treatment.* Water, 10, 940.

Escobar F (2017): *Eficiencia Energética en Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas de Chile. Memoria de Ingeniero.* Escuela de Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile.

Fan YZ, Sharbrough E, Liu H (2008): *Quantification of the Internal Resistance Distribution of Microbial Fuel Cells.* Environmental Science & Technology, 42(21), 8101-8107.

Frese Z, (2016): *Green Roofs: Analyzing the Potential for Mitigating the Effects of Urbanization.* (Tesis de Pre-graduado. Sacramento State University, Sacramento).

Hachim M, Pastén P, Vega, A (2017): *La crisis de los residuos: una crisis del diseño.* Revista Diseña (7).

Johnson B, Hallberg K (2005): *Acid Mine Drainage Remediation Options: A Review.* Science of the Total Environment. 338, 3-14.

Leiva E, Leiva-Aravena E, Vargas I, (2016): *Acid Water Neutralization Using Microbial Fuel Cell: An Alternative for Acid Mine Drainage Treatment.* Water, 8(11), 536.

Leiva E, Leiva-Aravena E, Rodríguez C, Serrano J, Vargas IT (2018): *Arsenic removal mediated by acidic pH neutralization and iron precipitation in microbial fuel cells.* Science of the Total Environment, 645, 471-481.

Leiva-Aravena E, Leiva E, Zamorano V, Rojas C, Regan JM, Vargas IT (2019): *Organotrophic acid-tolerant microorganisms enriched from an acid mine drainage affected environment as inoculum for microbial fuel cells.* Science of the Total Environment, 678, 639-646.

Levings CD, Varela DE, Mehlenbacher NM, Barry KL, Piercy GE, Guo M, Harrison PJ (2005): *Effect of an acid mine drainage effluent on phytoplankton biomass and primary production at britannia beach, howe sound, British Columbia.* Mar. Pollut. Bull. 50, 1585-1594.

Logan BE, (2009): *Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells.* Nature Reviews Microbiology, 7(5), 375-381.

Logan BE, Rabaey K (2012): *Conversion of Wastes into Bioelectricity and Chemicals by Using Microbial Electrochemical Technologies.* Science, 337(6095), 686-690.

Rojas C, Bruns MA, Vargas IT, Regan J (2017): *Electrochemically Active Microorganisms from an Acid Mine Drainage-Affected Site Promote Cathode Oxidation in Microbial Fuel Cells.* Bioelectrochemistry, 118, 139-146.

Superintendencia de Servicios Sanitarios (2016): *Tratamiento de Aguas Servidas.* Disponible en: <http://www.siss.gob.cl>

Tapia N, Rojas C, Bonilla C, Vargas IT (2018): *A New Method for Sensing Soil Water Content in Green Roofs Using Plant Microbial Fuel Cells.* Sensors, 18(1), 71.

Tapia N, Rojas C, Bonilla C, Vargas IT (2017): *Evaluation of Sedum as Driver for Plant Microbial Fuel Cells in a Semi-arid Green Roof Ecosystem.* Ecological Engineering. 108, 203-210.

Vargas I, Albert I, Regan J (2013): *Physical Distribution of Bacterial Communities on Volumetric and Planar Anodes in Single-Chamber Air-Cathode Microbial Fuel Cells.* Biotechnol. Bioeng, 110, 3059-3062.

Zamorano, V (2017): *Aislamiento y Caracterización de un Nuevo Microorganismo Reductor de Hierro Exoelectrogénico.* Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile.



Centro de Desarrollo
Urbano Sustentable

www.cedeus.cl
comunicaciones@cedeus.cl