

Informe final publicable de proyecto

Producción de hidrógeno y compuestos de alto valor agregado a partir de fermentación de biomasa residual y captura de CO₂

Código de proyecto ANII: MOV_CO_HV_1_2023_1_176852

Fecha de cierre de proyecto: 01/06/2025

ETCHEBEHERE ARENAS, Claudia (Responsable Técnico - Científico)

GOYCOECHEA FREIRE, Nicolás Federico (Investigador)

CASTELLÓ ANTONAZ, Elena Victoria (Investigador)

ZINOLA, Guillermo (Investigador)

BOVIO WINKLER, Patricia (Investigador)

CABEZAS DA ROSA, Angela (Investigador)

MINISTERIO DE EDUCACIÓN Y CULTURA. INSTITUTO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS "CLEMENTE ESTABLE"

(Institución Proponente) \ \ FUNDACIÓN DE APOYO AL INSTITUTO CLEMENTE ESTABLE \ \

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA. FACULTAD DE INGENIERÍA \ \

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA. INSTITUTO TECNOLÓGICO REGIONAL CENTRO SUR

Resumen del proyecto

Nuestro planeta enfrenta serios problemas ambientales, por eso es importante investigar nuevas tecnologías que nos ayuden a vivir de manera sustentable. Entre los temas más importantes están reducir las emisiones de gases que afectan el clima y aprovechar los residuos.

Cuando la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) hizo un llamado a proyectos para colaborar con científicos de Alemania en el tema del hidrógeno verde, se nos ocurrió presentar un proyecto para conectar con grupos de investigación que trabajan en dos temas nuevos que queremos incorporar: uno, usar hidrógeno verde para capturar CO₂ y reducir las emisiones; y otro, producir ácidos orgánicos de cadena media a partir de residuos.

Estas son tecnologías sostenibles llevadas a cabo por microorganismos. Una usa el hidrógeno verde para capturar CO₂ y disminuir los gases de efecto invernadero, y la otra permite obtener productos con valor a partir de residuos que normalmente se desechan.

Los grupos de investigación que participan en este proyecto pertenecen a tres instituciones uruguayas diferentes: el IIBCE, UTEC y UDELAR. Hasta ahora, hemos estudiado cómo producir biocombustibles, como hidrógeno y metano, a partir de residuos del país. Ahora, con el desarrollo del hidrógeno verde en Uruguay, queremos explorar estas nuevas tecnologías que usan hidrógeno para reducir los gases dañinos para el ambiente y crear productos con valor.

Como parte del proyecto, visitamos grupos de investigación y empresas de Alemania para conocer sus trabajos, el equipamiento que usan y cómo resuelven los problemas. Estas visitas nos ayudaron a entender cómo funcionan estas tecnologías en la vida real. También, se realizó una pasantía de investigación en Alemania y webinars con investigadores alemanes, donde estudiantes y profesionales de toda Latinoamérica aprendieron y compartieron ideas.

Gracias a este proyecto, vimos varias oportunidades para colaborar con otros grupos y seguir investigando juntos.

Ingeniería y Tecnología / Biotecnología del Medio Ambiente / Biotecnología Medioambiental / Producción de compuestos con valor agregado a partir de residuos y captura de CO₂.

Palabras clave: biohidrógeno / fermentación oscura / elongación de cadena /

Antecedentes, problema de investigación, objetivos y justificación.

Ligado a la producción de hidrógeno verde a partir de la electrólisis del agua se están estudiando procesos microbianos en los cuales es posible utilizar el H₂ verde en la captura de CO₂. En uno de los procesos el H₂ es utilizado para fijar CO₂ por microorganismos que producen acetato, que luego entran en el proceso de elongación de cadena para producir diferentes compuestos químicos. En el otro proceso es el llamado "power to gas", el H₂ es utilizado para capturar CO₂ y producir metano. Este proceso también es utilizado como forma de almacenar el hidrógeno en compuestos que también son combustibles (Dahiri et al., 2022).

Los procesos de elongación de cadena (CE) son procesos microbianos por los cuales se obtienen ácidos carboxílicos de cadena media (MCC) a partir de alcoholes y ácidos orgánicos de cadena corta (Dellomonaco et al., 2011; Steinbusch et al., 2011). Los MCC son los carboxilatos con 6-8 átomos de carbono (C₆-C₈), que incluyen caproato (C₆), heptilato (C₇) y caprilato (C₈), etc. Estos compuestos, son atractivos por su alto valor comercial (2000-3000 USD/ton), su fácil extracción y su amplio espectro de aplicaciones como antimicrobianos, aditivos nutricionales, "building blocks" en procesos industriales y combustibles.

Actualmente estos compuestos se producen a partir de biomasa vegetal o por cracking de petróleo por lo que es necesario buscar formas alternativas y sustentables para producirlos (Wang et al., 2022).

Para que este proceso microbiano ocurra es necesario un compuesto donador de electrones (biomasa de diferentes composiciones y mezcla de CO₂ e H₂), un compuesto aceptor de electrones (en general ácidos carboxílicos de cadena corta) y microorganismos con la capacidad de realizar el proceso (Wang et al., 2022). Para optimizar estos procesos es necesario estudiar las combinaciones entre compuestos dadores y aceptores y utilizar microorganismos que posean estas vías metabólicas. El manejo de las variables del proceso es fundamental para seleccionar comunidades microbianas con buena eficiencia de elongación de cadena (Wang et al., 2022).

Si bien estos procesos están siendo ampliamente investigados en Europa y Asia, en nuestro país no existen antecedentes. Los grupos de investigación de Uruguay que presentan esta propuesta han trabajado en diferentes aspectos de la producción de biohidrógeno, metano y otros productos con valor agregado utilizando residuos de nuestro país, pero no hemos incursionado en estos nuevos procesos de elongación de cadena y captura de CO₂.

El objetivo de esta propuesta es adquirir formación en estos temas con grupos expertos y empresas dedicadas a la implementación para luego realizar estudios basados en la realidad de nuestro país.

El equipo que llevó adelante la propuesta está conformado por grupos de investigación con amplia experiencia en la producción de biohidrógeno y productos con valor agregado a partir de residuos (biomasa/agua residual) mediante sistemas biológicos fermentativos y sistemas bioelectroquímicos.

Las investigadoras Claudia Etchebehere y Elena Castelló cuentan con amplia experiencia en fermentación oscura para producción de hidrógeno y son parte de la Red Latinoamericana de Biohidrógeno. Los grupos de investigación de la red han colaborado en varios proyectos, en la formación de recursos humanos, y han publicado varios trabajos científicos (Carrillo Reyes et al., 2019; Castelló et al., 2020; Etchebehere et al., 2016). La red se ha mantenido activa por más de 10 años debido al interés de los grupos integrantes de mantenerla. Ambas investigadoras trabajan en la generación de biohidrógeno por fermentación oscura desde hace más de 15 años obteniendo fondos de diferentes fuentes (PDT 47/15, FSE_6437; FSE_102488, OPCW 2009). Han estudiado la producción de hidrógeno mediante fermentación oscura utilizando diversas configuraciones de reactores como reactor de flujo ascendente y manta de lodo (UASB) (Castelló et al., 2009, 2011), reactor de lecho empacado (Perna et al., 2013) y reactor continuo agitado (CSTR) (Castelló et al., 2018). El grupo demostró que es factible producir hidrógeno a partir de suero de queso (subproducto de la fabricación de queso) en todos los sistemas, aunque aún persisten algunos problemas operacionales. También se estudió el rol de las bacterias homoacetogénicas (consumidoras de H₂ y CO₂) (Fuentes et al., 2021) y se estudió también la producción de H₂ mediante la co-fermentación de suero de queso con residuos de yerba mate (Ferraz et al, 2021).

La Dra. Cabezas cuenta con gran experiencia en el estudio y operación de sistemas bioelectroquímicos (BES). Ha estudiado la generación de energía eléctrica a partir de suelos y sedimentos en BES durante su doctorado en Alemania así como luego de su retorno a Uruguay (ANII_FSE_10869) (de Schamphelaire 2010; Cabezas et al 2015; Buadas, 2017). También, junto con la Dra. Etchebehere, estudiaron la generación de energía eléctrica a partir de suero de queso o de efluente de la fermentación del suero de queso en celdas de combustible microbianas (ANII_FSE_032) (Wenzel et al 2017). También trabajaron en colaboración con el grupo del Dr. Puig estudiando la microbiología de BES para la conversión de CO₂ en productos valiosos (ácidos grasos volátiles) (Wenzel et al 2018). La Dra. Cabezas es una de las fundadoras de la Red Latinoamericana de Electroquímica Microbiana y es embajadora de ISMET (International Society for Microbial Electrochemistry and Technology) en América Latina.

El Dr. Cardeña realizó su doctorado investigando la producción de hidrógeno en Celdas de Electrólisis Microbianas (MECs)(Cardeña et al, 2018; Cardeña et al 2019; Cardeña et al 2020; Cardeña et al 2021). Actualmente, en el marco de una beca de posdoctorado ANII está estudiando en el laboratorio dirigido por

la Dra. Cabezas la producción de hidrógeno y metano en sistemas bioelectroquímicos a partir de residuos agroindustriales.

Metodología/Diseño del estudio

Actividad 1-Búsqueda de grupos de investigación en Alemania

Primero se realizó una búsqueda de grupos de investigación de Alemania que estuvieran trabajando en estos temas, se contactó a tres grupos de investigación de gran nivel que estuvieron dispuestos a participar del proyecto de colaboración con Uruguay.

Los grupos de investigación contactados fueron los siguientes:

-Prof. Lars Angenent, Laboratorio de Biotecnología Ambiental, Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias y Ciencias Ambientales, Universidad de Tübingen, localizado en Tübingen.

-Prof. Tito Ghering, Ruhr University Bochum, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Departamento de Gestión de agua y tecnología ambiental. Localizado en la ciudad de Ruhr.

-Profesoras Sabine Kleinsteuber del Centro Helmholtz de Investigación Medioambiental - UFZ y Heike Strauber del Centro Alemán de Investigación de la Biomasa (DBFZ), localizados en la ciudad de Leipzig.

Se contactó vía mail y reunión virtual a cada uno de estos laboratorios y se coordinó su participación en el proyecto.

Actividad 2- Reuniones para coordinar las visitas a los laboratorios

Se realizaron una serie de reuniones para coordinar las visitas, en estas reuniones se preguntó a los grupos de investigación de Alemania por contactos con empresas de valorización de residuos y captura de CO₂ para poder contactarlas.

Actividad 3- Visita a Alemania

Se organizó la visita de dos investigadoras uruguayas a las tres instituciones alemanas y a tres empresas que las propias instituciones contactaron.

Actividad 4-Participación en las Primeras Jornadas de Hidrógeno Verde de Uruguay

Se presentó el proyecto en un trabajo en forma de póster en las jornadas realizadas en Paysandú el lunes 11 y martes 12 de noviembre.

Actividad 5-Realización de webinars de formación

Se realizaron varias reuniones con los grupos de investigación de Alemania para organizar webinarios de los diferentes temas en los que están trabajando en Alemania. Se organizaron los webinarios en noviembre-diciembre del 2024.

Actividad 6-Pasantía de investigación

Se realizó una pasantía de investigación de un investigador uruguayo en el Laboratorio de de la Universidad de Tübingen. El objetivo de la pasantía fue formarse en las metodologías para operar y monitorear biorreactores de elongación de cadena y captura de CO₂.

Actividad 7-Escritura de proyecto en conjunto

Se realizaron una serie de reuniones virtuales para la elaboración de un proyecto de investigación conjunto con el Laboratorio de Biotecnología Ambiental, Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias y Ciencias Ambientales, Universidad de Tübingen, de Alemania.

Resultados, análisis y discusión

En las actividades 1 y 2 se pudo organizar la visita a Alemania.

Actividad 3-Visita a Alemania

Dos investigadoras de Uruguay (Dra. Angela Cabezas y Dra. Claudia Etchebehere) viajaron a Alemania y visitaron tres grupos de investigación y empresas en cuatro ciudades diferentes: Tübingen, Bochum, Leipzig y Munich. La Dra. Elena Castelló tuvo un problema de salud a último momento y no pudo viajar.

Visita 1-Universidad de Tübingen, Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias y Ciencias Ambientales, Laboratorio de Biotecnología Ambiental, Prof. Lars Angenent

Tuvimos cinco reuniones, una primera reunión de presentación con los Investigadores/as principales, luego reuniones con los estudiantes/as de Doctorado y postdocs de los diferentes grupos y finalmente una reunión con Andrés Ortiz y Lars Angenent para ver posibilidades de colaboración.

Se visitó a los laboratorios del departamento en la cual el Prof. Lars Angenent nos mostró el laboratorio de reactores y laboratorios de análisis químico y de biología molecular.

Visita 2-Ruhr University Bochum, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Departamento de Gestión de agua y tecnología ambiental, Tito Gehring y Marc Wichern

El primer día visitamos la planta de tratamiento de residuos urbanos orgánicos de Münster que tiene un biodigestor anaerobio para el tratamiento de los residuos y genera electricidad. En la tarde conversamos de los diferentes proyectos del grupo de investigación y visitamos los laboratorios de química analítica.

El segundo día visitamos la planta de tratamiento de lodos activados cerca de la universidad y el laboratorio de reactores instalado cerca de la planta (recibe efluente directo de la planta). Luego visitamos las instalaciones del laboratorio en la Universidad y tuvimos una reunión donde expusimos los temas en los que trabajamos y vimos las posibilidades de colaboración.

Visita 3-Visita a Leipzig al Centro Helmholtz de Investigación Medioambiental - UFZ, investigadora contactada: Sabine Kleinsteuber.

27/05 Visita a la planta de Biogás Gordemitz. Esta planta está diseñada para producir biogás que se inyecta a la cañería de gas natural. Se alimenta con maíz ensilado y residuos de la producción de aves (estiércol de ave), producción local.

En la tarde visitamos los laboratorios de biología molecular del Departamento y los laboratorios de Calorimetría.

28/05 En la mañana visitamos los laboratorios del Centro Alemán de Investigación de la Biomasa (DBFZ) que trabajan en colaboración con Sabine.

Nos recibió la Dra. Heike Strauber que nos mostró el laboratorio de bioreactores, también nos mostró el laboratorio el Dr. Marcell Nikolausz que trabaja con cultivos puros y análisis de comunidades microbianas. Este laboratorio tiene todo el equipamiento para hacer cultivos anaerobios utilizando diferentes gases y sustratos. El Dr. Flávio Baleeiro trabaja en la producción de carboxilatos y nos mostró el sistema en el que está investigando que consta de dos etapas un primer reactor para fijar el CO₂ en Syngas fermentation junto con la fermentación de residuos de la producción de jugo de manzana, y el segundo de chain elongation. Tienen muchos proyectos sobre producción de carboxilatos y captura de CO₂, pero también de digestión anaerobia probando diferentes sustratos y condiciones.

Además nos mostraron una planta piloto y una planta tamaño real donde hacen ensayos a escala real. En otro edificio nos mostraron un laboratorio con muchísimos reactores que operan en escala de 5 litros y más. En ese laboratorio tienen todos los reactores conectados a un equipo que mide el contenido del biogás producido en línea.

Visita 4-Visita a la empresa de innovación Electrochea en Múnich

Se visitó esta empresa que es una startup que se generó en una Universidad de Estados Unidos. La empresa tiene un sistema patentado para recuperar CO₂ de plantas de digestores anaerobios con la utilización de H₂ producido por electrólisis del agua con energía eólica y producir metano con alta calidad. Debido a la confidencialidad del tema no se pudieron sacar fotos de dentro del laboratorio de experimentación. Se participó en una reunión con los dos investigadores responsables de la empresa.

Actividad 4-Participación en las Primeras Jornadas de Hidrógeno Verde de Uruguay

Las Dras. Claudia Etchebere y Angela Cabezas y el Dr. Nicolás Goycochea participaron de las jornadas presentando la idea del proyecto y discutiendo con investigadores de Uruguay las diferentes alternativas

que presenta la producción de hidrógeno verde. El título del trabajo fue “Producción de hidrógeno y compuestos de alto valor agregado a partir de fermentación de biomasa residual y captura de CO₂”.

En las Jornadas se presentaron los trabajos académicos que se están llevando a cabo en Uruguay y se discutió con representantes de la sociedad y del gobierno el futuro de este tema en nuestro país.

Actividad 5-Realización de webinars de formación

Se organizaron cinco webinars de investigadores/as de Alemania para estudiantes, investigadores y profesionales de Uruguay y Latinoamérica. Los webinars fueron los siguientes:

Webinar 1, fecha 7/11/24,

Título: Tailored electrochemical systems for efficient methanogenic CO₂ reduction using wastewater-derived media. Presentado por: Ramineh Rad y Mario Corbalán, Ruhr University Bochum (Germany), Inorganic Chemistry I & Urban Water Management and Environmental Engineering.

Webinar 2: fecha 14/11/24. Título: “Chain elongation to C₈. Exploring microbiomes to produce chemical building blocks”. Presentado por Kurt Gemeinhardt, PhD candidate, Eberhard Karls Universität, Department of Geosciences, Environmental Biotechnology Group.

Webinar 3: fecha 21/11/24. Título: “Valorising CO₂ via Biomethanation - Tackling the hard-to-abate” presentado por Aaron Zipperle, PhD candidate, Eberhard Karls Universität Department of Geosciences, Environmental Biotechnology Group.

Webinar 4: fecha 28/11/24. Título: “A novel model approach for simulation of chain elongation processes including with competitive electron acceptor uptake”, presentado por Emeline Melchior, PhD candidate, Ruhr University Bochum (Germany), Urban Water Management and Environmental Engineering & Federal University of Technology of Paraná (Brazil), Civil Construction.

Webinar 5: fecha 5/12/24. Título: “Carboxylate platform – green carboxylates from anaerobic fermentations with microbiomes”, presentado por Dr. Heike Sträuber, Department Mikrobielle Biotechnologie / Microbial Biotechnology, Helmholtz Centre for Environmental Research GmbH - UFZ.

Participaron entre 20 y 40 estudiantes y profesionales en cada webinar de Uruguay, Brasil, Chile, México y Alemania.

Actividad 6-Pasantía de investigación

La pasantía la realizó el Dr. Nicolás Goycoechea del 24/02/2025 al 24/04/2025 en el Laboratorio de la Universidad de Tübingen bajo la dirección del Dr. Andres Ortiz y el Prof. Lars Angenent. El objetivo de la pasantía fue formarse en las metodologías para operar y monitorear biorreactores de elongación de cadena y captura de CO₂.

Proceso estudiado

En la estadía se operó un reactor de elongación de cadena en una fase y dos fases. El sistema consistía en un reactor alimentado con efluente de industria de remolacha azucarera. El objetivo final del sistema era obtener compuestos de cadena media, principalmente C₆. El sistema contaba con extracción externa para estos compuestos, sistema de interés para el aislamiento de los productos como posterior purificación (Xu et al., 2018). El sistema de dos fases constaba de un primer reactor CSTR con el objetivo de producir compuestos de cadena corta que sirvan de precursores para el segundo reactor de elongación de cadena el cual fue un AFR.

Por otro lado, se apreció la puesta en marcha de sistemas de fermentación gaseosa inyectados con CO₂. Siendo un potencial proceso para la captura de carbono y producción de precursores como acetato, además de ser un proceso en vías a tecnologías power to vitamins y power to protein (Mishra et al., 2018, Schmitz et al., 2024).

Por lo tanto, durante la estadía se aprendió cómo operar estos reactores a escala de banco además de las complicaciones operativas y complejidades del sistema que se pueden tener. Siendo un recurso valioso para la puesta en marcha de nuevos sistemas a nivel país ya sea a escala piloto o de laboratorio.

Lecciones aprendidas para el seguimiento de los reactores estudiados

Se comprendió y aprendió los análisis típicos para el seguimiento de sistemas de elongación de cadena, los cuales tienen involucrado la producción de hidrógeno y metano dependiendo de las condiciones de operación y estabilidad del sistema. El seguimiento típico para realizar consistió en la caracterización de la fase gaseosa mediante cromatografía de gases, cuantificando las concentraciones de H₂, CH₄ y CO₂. Por otro lado, la fase acuosa consistió en un seguimiento mediante la cuantificación de AGV, entre ellos los compuestos de interés C₆ y C₈. Pero también cuantificación mediante HPLC para los azúcares más representativos del efluente además de ácido láctico, uno de los potenciales productos del sistema.

Se comprendió los sistemas necesarios para la extracción de los compuestos de interés los cuales consisten en metodologías que usan membranas, además de diferencias de presión.

Se concluye del tiempo de experimentación con el sistema de dos fases la necesidad de una optimización en torno al pH de la primera fase encargada de la producción de compuestos de cadena corta. Al realizar pruebas con diferentes condiciones de pH para la primera fase se aprecian resultados diversos en la producción de compuestos de cadena corta como de cadena media en el segundo reactor.

Por otro lado, en base a las conversaciones con los investigadores asignados a los proyectos de elongación de cadena y experimentación realizada en el laboratorio, se comprende la necesidad de entender la afectación de la temperatura en el proceso de elongación de cadena. Por este motivo, se realizó una evaluación teórica de cuánto debería aumentar la producción del producto de interés C₆ para poder pagar el aumento de la temperatura del sistema. Se estudió teóricamente un caso sin integración energética y con integración energética. Las temperaturas evaluadas teóricamente abarcan valores entre 30 °C a 60 °C (en principio razonables para el sistema biológico).

Actividad 7-Escritura de proyecto en conjunto

Durante los intercambios con los grupos de investigación de Alemania se visualizaron diferentes líneas de trabajo para realizar en conjunto. En particular durante la pasantía en el laboratorio del Dr. Angenent en la Universidad de Tübingen se logró desarrollar una propuesta de trabajo en conjunto en sistemas bioelectroquímicos y la producción de ácidos orgánicos de cadena media a partir de residuos.

Finalmente, luego de varios intercambios en reuniones virtuales, se elaboró una propuesta en conjunto cuyo título fue: "BioH₂+: Plataforma biotecnológica impulsada por hidrógeno verde para la valorización de residuos y emisiones gaseosas (PHV_X_2024_1_184687)" que fue presentada al llamado "Proyectos de Investigación en Hidrógeno verde" de ANII. El proyecto fue muy bien evaluado pero no fue financiado.

Conclusiones y recomendaciones

En el marco de este proyecto, se logró establecer vínculos de cooperación con grupos de investigación de alto nivel que trabajan en áreas relacionadas con el hidrógeno verde. La visita a los laboratorios y a las empresas de innovación fue fundamental para adquirir un conocimiento directo sobre las investigaciones en curso, el equipamiento utilizado y las estrategias para resolver los desafíos asociados a la implementación de estas tecnologías.

Asimismo, se consolidó la formación de recursos humanos en Uruguay en estas nuevas metodologías, lo que permitió la presentación de proyectos de investigación en estos ámbitos y la creación de dos proyectos de maestría, uno en el IIBCE y otro en UTEC.

Finalmente, se presentó un proyecto conjunto con la Universidad de Tübingen, el cual, aunque no fue seleccionado, sentó las bases para futuras postulaciones en otros llamados de financiamiento. Este proceso ha contribuido significativamente al fortalecimiento de capacidades y a la consolidación de redes de colaboración internacionales en el campo del hidrógeno verde.

Productos derivados del proyecto

Tipo de producto	Título	Autores	Identificadores	URI en repositorio de Silo	Estado
Tesis de maestría	Elongación de cadena: una nueva tecnología para obtener compuestos con valor agregado a partir de residuos	Matías Regina, Claudia Etchebehere	POS_NAC_2024_1_183511		En proceso

Referencias bibliográficas

Buadas, M. (2017). Tesis

Cabezas, et al. (2015) doi:10.1111/1758-2229.12277.

Carden?a, et al. (2018). doi:10.1002/jctb.5443.

Carden?a, et al. (2019). doi:10.1016/B978-0-444-64203-5.00007-1.

Carden?a, et al. (2020). doi:10.1016/j.bioelechem.2020.107479.

Carden?a, et al. (2021). doi:10.1016/j.biortech.2020.124182.

Carrillo Reyes et al., 2019. doi: D016/j.ijhydene.2019.08.124.

Castello?, et al. (2009). doi:10.1016/j.ijhydene.2009.05.060.

Castello?, et al. (2018). doi:10.1016/j.ijhydene.2017.12.104.

Castello?, et al. (2020). doi:10.1016/j.rser.2019.109602.

De Schampheleire, L., (2010) DOI: 10.1128/AEM.02432-09

Dellomonaco, C., Clomburg, J.M., Miller, E.N., Gonzalez, R., 2011. Engineered reversal of the ?- oxidation cycle for the synthesis of fuels and chemicals. Nature 76 (7360), 355–359

Diharu et al., (2022). Doi: 10.1016/j.est.2022.105861

Etchebehere, C., (2016). doi:10.1007/s00253-016-7325-y.

Ferraz, A.D.N., (2021). doi:10.1016/j.indcrop.2021.113897.

Fuentes, L., (2021) doi:10.1007/s00253-021-11656-6.

Mishra, A., Ntihuga, J. N., Molitor, B., & Angenent, L. T. (2020). Power-to-Protein: Carbon Fixation with Renewable Electric Power to Feed the World. Joule, 4 (6), 1142–1147. <https://doi.org/10.1016/J.JOULE.2020.04.008>

Perna, V., et al. (2013). doi:10.1016/j.ijhydene.2012.10.022.

Rawat, S., et al (2023) doi:10.1007/s12155-023-10598-3.

Steinbusch, K.J., Hamelers, H.V., Plugge, C.M., Buisman, C.J., 2011. Biological formation of caproate and

caprylate from acetate: fuel and chemical production from low grade biomass. *Energy Environ. Sci.* 4 (1), 216–22 .

Wang et al., (2022).doi:10.1016/j.biotechadv.2021.107882 Wenzel, J., et al. (2017). doi:10.1007/s00449-017-1746-6.

Wenzel, J., et al. (2018). doi:10.3389/fenrg.2018.00015.

Xu, J., Hao, J., Guzman, J. J. L., Spirito, C. M., Harroff, L. A., & Angenent, L. T. (2018). Temperature-Phased Conversion of Acid Whey Waste Into Medium-Chain Carboxylic Acids via Lactic Acid: No External e-Donor. *Joule*, 2(2), 280–295. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.11.008>

Wenzel J, Fuentes L, Cabezas A, Etchebehere C. 2017. Microbial fuel cell coupled to biohydrogen reactor: a feasible technology to increases energy yield from cheese whey. *Bioprocess and Biosystems Engineering*. 40(6):807-819.

Licenciamiento

Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional. (CC BY-NC)