

Mejoramiento de la resistencia de yeso reciclado a partir de oxalato de calcio producido mediante bioprecipitación

Jhon Darwyn Jiménez R.¹

Alejandra Betancur S.²

Artículo de investigación científica y tecnológica



Fecha de recepción: 20 de noviembre 2023 ■ **Fecha de aceptación:** 15 de diciembre 2023 ■ **Fecha de publicación:** 4 de septiembre 2024

✉ Alejandra Betancur Sánchez, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Antioquia, Colombia. abetancurs@unal.edu.co

Jiménez, J. D. y Betancur, A. (2023). Mejoramiento de la resistencia de yeso reciclado a partir de oxalato de calcio producido mediante bioprecipitación. *Revista de Investigaciones Uniagraria*, 11(1), 71-81.

Resumen

El reúso y reincorporación de yeso ha sido un reto para el sector de la construcción que ha generado procesos de investigación en los últimos años, obteniendo resultados que permiten la recuperación parcial de este material; sin embargo, la resistencia mínima del yeso no ha sido la adecuada. Es por esta razón que desde el Centro para el Desarrollo del Hábitat y la Construcción se ha generado un cierre al proceso de su recuperación dentro de las actividades académicas y se propone una alternativa mejorando sus propiedades mecánicas, a partir de la biomineralización, en la que se utiliza el hongo *Aspergillus niger* como productor de oxalato de calcio bajo condiciones controladas de cultivo y con dosificaciones de yeso reciclado como fuente de calcio, en un rango de 0,06 g a 1 g. El oxalato de calcio producido fue visualizado mediante microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido, siendo posible afirmar la formación de cristales que contienen calcio, con la morfología característica de diferentes formas de oxalato de calcio reportada en otros trabajos. Además, fue posible demostrar una resistencia a falla mecánica del yeso dosificado con el oxalato de calcio de 2,1 MPa.

Palabras clave: oxalato de calcio, yeso reciclado, *Aspergillus niger*, bioprecipitación, biomineralización.

Clasificación JEL: O32.

¹ Centro para el Desarrollo del Hábitat y la Construcción, SENA, Medellín, Antioquia, Colombia.

² Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Antioquia, Colombia.

Improving the strength of recycled gypsum from calcium oxalate produced by bioprecipitation

Abstract

The reuse and reincorporation of gypsum has been a challenge for the construction sector that has generated research processes in recent years, obtaining results that allow partial recovery of this material; However, the minimum resistance of the material has not been adequate. It is for this reason that the Center for the Development of Habitat and Construction has generated a closure to the gypsum recovery process within academic activities and an alternative for gypsum recovery is proposed, improving its mechanical properties from biomineralization. , which is an alternative in which the fungus *Aspergillus Niger* participates as a producer of calcium oxalate under controlled cultivation conditions with dosages of recycled gypsum as a source of calcium in a range of 0.06 g to 1g. The calcium oxalate produced was visualized by optical microscopy and Scanning Electron Microscopy in which it was possible to affirm the formation of crystals containing calcium with the characteristic morphology of different forms of calcium oxalate reported in other works. Furthermore, it was possible to demonstrate resistance to mechanical failure of the gypsum dosed with calcium oxalate of 2.1 MPa.

Keywords: calcium oxalate, recycled plaster, *Aspergillus niger*, bioprecipitation.

JEL classification: O32.

Introducción

Actualmente, los altos índices de contaminación ambiental han llevado al desarrollo de estrategias con enfoques en economía circular y aprovechamiento de los diferentes residuos generados a nivel industrial, con el objetivo de disminuir la carga contaminante sobre los diferentes componentes ambientales. La industria de la construcción se ha caracterizado por ser una de las más contaminantes en términos de la extracción de materia prima y en la alta generación de residuos.

El uso de materiales secundarios de construcción puede cumplir con los requisitos de sostenibilidad de varias maneras: la disponibilidad prolongada de materias primas, lo que conlleva a la protección de los recursos naturales en cuanto al cuidado de los cuerpos de agua; y la reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero. Debido a las grandes cantidades de materias primas requeridas y también a los elevados volúmenes de residuos de construcción y demolición (RCD), la reutilización de residuos en esta industria es de gran importancia para la reducción de estos, impulsando la economía circular en el sector (Weimann *et al.*, 2021).

El yeso como material de construcción ha llamado la atención, ya que ha sido ampliamente utilizado en la construcción en las últimas décadas y su consumo se ha incrementado en muchos países (German Building Material Association, 2019).

El yeso es adecuado para el reciclaje, debido a su composición química. Consiste principalmente en sulfato de calcio en forma de tres fases cristalinas con diferentes niveles de hidratación: calcio dihidratado, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (sulfato de calcio dihidrato, típicamente llamado yeso), CaSO_4 (anhidrita) y sulfato de calcio hemihidrato, $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ (bassanita). Mientras que el yeso y la anhidrita son minerales naturales, el sulfato de calcio hemihidratado se puede producir por deshidratación en el tratamiento

térmico del yeso, a un rango de temperatura entre 125 °C y 180 °C (Weimann *et al.*, 2021).

El hemihidrato y la anhidrita se pueden encontrar en varias estructuras o modificaciones cristalinas. Lo anterior, confiere a los materiales diferentes aplicaciones técnicas. La mayoría de los productos de yeso se utilizan en la industria de la construcción y si bien el yeso se puede aplicar en producción de cemento para ajustar el tiempo de fraguado, su principal área de aplicación es su uso en interiores y en elementos decorativos, o como instalación en forma de paneles o placas de yeso (Geraldo *et al.*, 2017).

Según el Decreto 4741 de 2005 y la Resolución 0472 del 28 de febrero de 2017, normas expedidas por el Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, los yesos residuales se categorizan en el espectro de residuos de construcción y demolición (RCD) y se clasifican como RCD no aprovechables en clase V de residuos especiales. En Colombia, se produjeron un total de 22 270 338 toneladas de RCD en las principales ciudades para el año 2017; sin embargo, no se hace referencia a su discriminación, en este caso para RCD con compuestos de yeso a partir de placas laminadas. Para Medellín y el área metropolitana, según cifras del Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS), en el año 2017 se generaron aproximadamente 9000 toneladas diarias de RCD, de las cuales se estima que alrededor del 1 % corresponden a derivados de productos de yeso posconsumo; para el resto del país, esta cifra es de 14 400 toneladas generadas anualmente (Sierra Tobón, 2017). Se considera que aproximadamente se produjeron 41 489 toneladas de residuos de construcción y demolición (RCD), según un informe del DANE correspondiente al año 2022 (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2023).

El yeso se define como una materia prima natural formada en ambientes sedimentarios de tipo evaporítico y se genera por la evaporación progresiva de aguas ricas en sulfatos y cloruros

propios de ambientes marinos con climas cálidos y secos. Así mismo, puede generarse por la hidratación de la anhidrita y por la acción de aguas sulfurosas que actúan sobre calizas o tobas volcánicas (Jaramillo Castro, 2020).

Aunque el porcentaje de los residuos de yeso es del 0,2 % con respecto a la composición total de los RCD (del Pozo *et al.*, 2011), la cantidad de estos residuos generados anualmente a nivel nacional se encuentra alrededor de las 65 362 toneladas.

De acuerdo con los avisos de peligro de la ficha de seguridad química (Química Comercial Andina, 2022), el yeso genera un impacto ambiental negativo en el agua, en el aire y en el suelo; además, ser un material especial presenta indicaciones de peligro que advierten que provoca lesiones oculares graves, irritación cutánea, puede irritar las vías respiratorias y, en mezcla, puede generar graves daños a especies acuáticas y terrestres.

Aspergillus niger es un hongo filamentoso hialino, saprofito, perteneciente al filo Ascomycota que se encuentra formado por hifas hialinas septadas y que puede tener reproducción sexual (con formación de ascosporas en el interior de ascas) y asexual (con formación de conidios) (Muñoz Fuérez, 2023).

El ácido oxálico es un ácido relativamente fuerte y de importancia central, debido a sus propiedades químicas, como la capacidad del anión oxalato para formar complejos de metales, lo que da como resultado la formación de complejos de oxalato metálico o la precipitación de oxalatos metálicos insolubles según el metal y las condiciones químicas. La producción de oxalato puede resultar en la movilización de metales a partir de sustratos sólidos, rocas y minerales, por acidólisis (disolución mediada por protones) y formación de complejos (disolución promovida por ligandos) o inmovilización de metales, por la formación de minerales de oxalato insolubles (Arnott, 2020).

El oxalato de calcio es el oxalato más abundante y en los organismos vivos y el medio ambiente, las formas principales son el monohidrato (whewellita) y el dihidrato (weddelita). El monohidrato generalmente exhibe cristales monoclínicos (un prisma rectangular con un paralelogramo como base) y el dihidrato, cristales tetragonales (prisma rectangular con una base cuadrada), aunque puede haber una amplia variedad de otras formas cristalinas, incluyendo agujas, discos bicóncavos, mancuernas y forma de flor de clavel (Arnott, 2020).

Una forma cristalina clásica del dihidrato es la bipirámide de ocho caras, que a menudo se ve en medios sólidos de crecimiento de hongos. El monohidrato es la forma menos soluble, pero la solubilidad del oxalato de calcio aumenta a valores de pH por debajo de 5 (Gadd *et al.*, 2014).

La biomineralización es el proceso de formación de minerales a partir de organismos vivos, cuyos productos son materiales complejos que pueden contener tanto minerales como componentes orgánicos. Muchos microorganismos exhiben la capacidad de precipitar minerales como carbonatos, fosfatos, sulfuros, óxidos y oxalatos. El proceso de biomineralización generalmente se agrupa en mineralización biológicamente controlada y mineralización biológicamente inducida (Li, Csetenyi y Gadd, 2014). En esta última se modifica el microambiente local del microorganismo, creando condiciones adecuadas para la precipitación extracelular de fases minerales.

La biosíntesis de ácido oxálico y la formación de oxalatos, especialmente los de calcio, es una propiedad que se encuentra en una gran variedad de hongos simbióticos y de vida libre. El oxalato de calcio se puede asociar con hifas, así como con cuerpos fructíferos y sistemas de micorrizas en el suelo, biomasa vegetal en descomposición y rocas (Gadd *et al.*, 2014).

En *Aspergillus niger*, la biosíntesis del ácido oxálico se produce exclusivamente por conversión de oxaloacetato (que surge de la acción del piruvato carboxilasa sobre el piruvato producido por la glucólisis) en oxalato y acetato por un oxalacetato acetilhidrolasa citoplasmática, dependiente de Mn^{2+} , con una producción óptima en el rango de pH de 5 a 8 (Ruijter, van de Vondervoort y Visser, 1999).

A. niger es un productor de ácido oxálico muy eficiente, lo que puede ilustrarse con los hallazgos de Van de Merbel *et al.* (1994), quienes reportaron una producción de 13 g de ácido oxálico por litro a partir de 20 g de azúcar por litro en 45 h.

En el presente estudio se buscó suministrarle, al microorganismo *A. niger*, yeso reciclado en el medio de cultivo como fuente de calcio, para propiciar la producción de oxalato de calcio y con este compuesto aumentar la resistencia del material recuperado, proveniente del Taller de Acabados y Pintura del Centro para el Desarrollo del Hábitat y la Construcción del sena.

Metodología

Microorganismo de estudio

Se empleó una muestra de *A. niger* caracterizada por la institución universitaria

Colegio Mayor de Antioquia, a la cual se le realizó identificación molecular. Las secuencias de consenso fueron comparadas con las secuencias disponibles en la base de datos del GenBank usando nucleótide BLAST para determinar la identidad de los aislamientos, dando como resultado un porcentaje de identidad del 99 % para el género *Aspergillus*.

Cultivo microbiológico

Inicialmente se activó el hongo *Aspergillus niger* en medio de un cultivo PDA, la cepa fue facilitada por una de las tecnoacademias del SENA. Posteriormente, se realizó un diseño experimental para cultivar el hongo en medio de cultivo líquido B4, el cual contenía glucosa y extracto de levadura dosificado con yeso reciclado en proporciones de 1, 0,5 y 0,25 gramos para el yeso blanco y 0,6, 0,25 y 0,125 para el yeso rosado. En la tabla 1 se presenta un diseño experimental, donde la diferencia entre ambos es que el rosado contiene pintura.

Para todas las dosificaciones de yeso se hicieron duplicados y se tuvo como control negativo, el medio de cultivo con el hongo sin yeso. La temperatura de incubación fue de 30 °C y el tiempo fue de dos semanas.

Tabla 1. Diseño experimental

Cantidad de reactivos usados en el diseño experimental del proceso de biomineralización (g) en 180 ml de medio de cultivo	
Yeso rosado	1, 0,5, 0,25
Yeso blanco	0,6, 0,25, 0,125
Glucosa	0,9
Levadura	0,72

Fuente: elaboración propia.

Visualización de los cristales de oxalato de calcio

Para verificar la presencia del oxalato de calcio se sometió el cultivo a inactivación y calcinación, para luego inspeccionar mediante microscopía óptica en un aumento de 10X y 40X y, por microscopía electrónica de barrido, la presencia de los cristales.

Construcción de los prototipos y falla mecánica

El medio de cultivo sirvió como reemplazo del agua para construir los morteros, con el yeso recuperado del taller de acabados y pintura, con el objetivo de someter dichos morteros a falla mecánica y observar el comportamiento de la resistencia en el material.

En los morteros, el control o referente para la resistencia consistió en yeso recuperado con agua en proporción 2:1, material-agua. En el caso de los morteros dosificados con los cristales de oxalato de calcio se mantiene esta proporción 2:1, material-medio de cultivo previamente esterilizado en autoclave a 121 °C durante 20 minutos.

Cabe aclarar que el yeso recuperado es triturado y molido, y posteriormente es sometido a tratamiento térmico, el cual consiste en poner el material en horno a 170 °C durante seis horas antes de producir los morteros.

En la elaboración de los morteros se mezcla el material, ya sea con agua (para el control) o con los medios de cultivo inactivos (tratamientos de oxalato de calcio) y se deja en los moldes durante 24 horas. Pasado este tiempo se someten a curado en aire durante 24 horas y luego se someten a falla mecánica, según Norma Técnica Colombiana NTC 220:2017 “Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm o 50,8 mm de lado” en condiciones ambientales de 24,6 °C y 65 % de humedad relativa.

Resultados

Cultivo microbiológico

A continuación, se presenta la imagen del hongo *A. niger* (figuras 1 y 2) y los medios de cultivo que se emplearon en esta investigación.

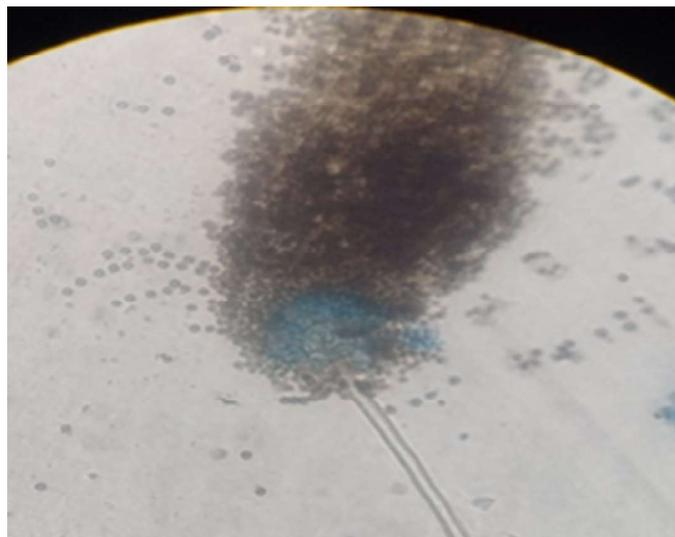


Figura 1. *Aspergillus niger*, 40X

Fuente: elaboración propia.



Figura 2. Medios de cultivo líquido

Fuente: elaboración propia.

Visualización de los cristales de oxalato de calcio

de calcio, tanto por microscopía electrónica como por microscopía óptica.

En las figuras 3 y 4 es posible observar la presencia geométrica de los cristales de oxalato

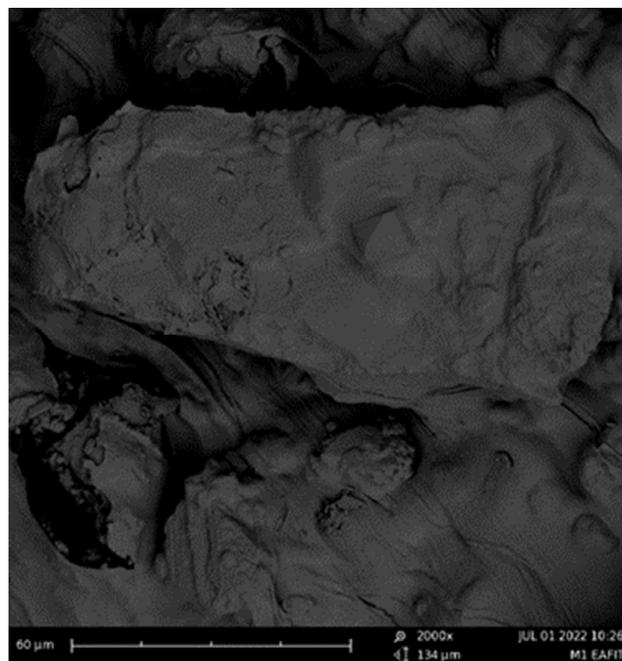


Figura 3. Microscopía sem (microscopio electrónico de barrido)

Fuente: elaboración propia.

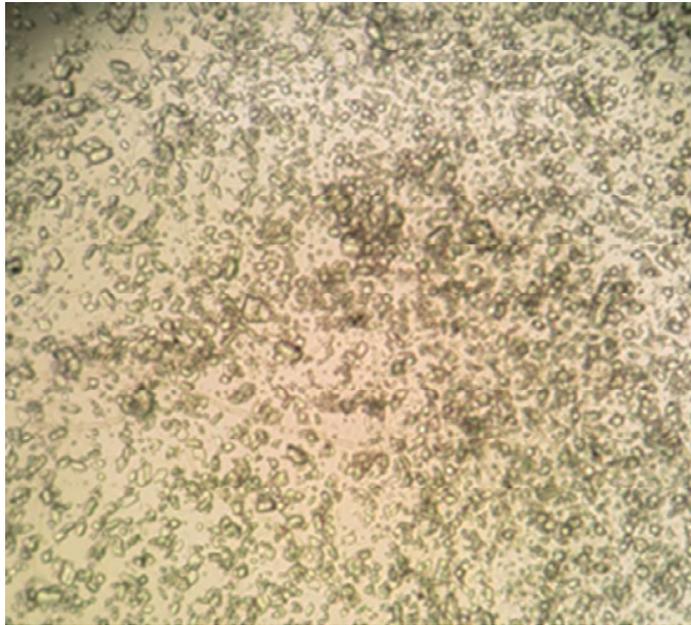


Figura 4. Cristales de oxalato de calcio en microscopio óptico 40X
Fuente: elaboración propia.

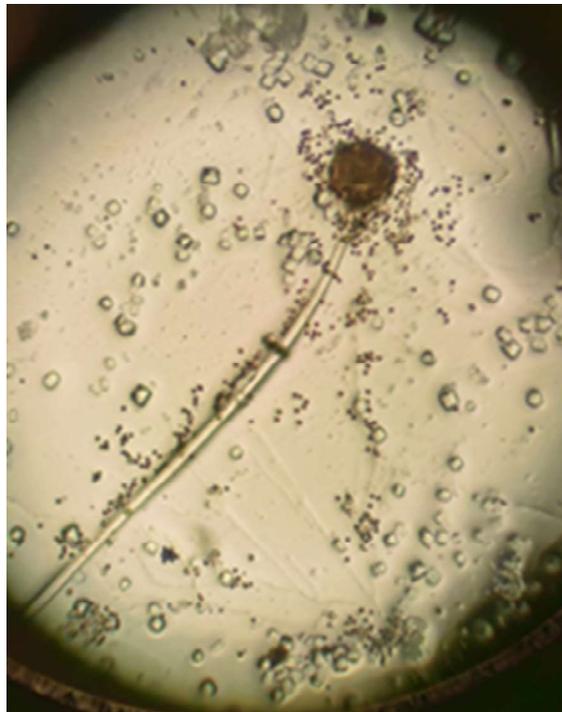


Figura 5. Hifa del hongo con cristales de oxalato de calcio
Fuente: elaboración propia.

Construcción de los prototipos y falla mecánica

Una vez fueron construidos los prototipos y de acuerdo con las proporciones de yeso reciclado

y agua o medio de cultivo inactivo, se encontró un aumento de la resistencia a falla mecánica en aquellos morteros que fueron dosificados con el oxalato de calcio.



Figura 6. Prototipos de yeso reciclado dosificados con cristales de oxalato de calcio

Fuente: elaboración propia.



Figura 7. Falla mecánica

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

Fue posible obtener oxalato de calcio en los cultivos de *Aspergillus niger* dosificados con el yeso recuperado como fuente de calcio.

Los prototipos generados con la dosificación del oxalato de calcio produjeron una resistencia de 2,1 MPa.

Es importante purificar y cuantificar el material para garantizar un proceso estandarizado en la recuperación del yeso.

Se observa que el oxalato de calcio otorga resistencia al yeso recuperado, en el caso del yeso blanco recuperado sin añadirle oxalato, presenta una resistencia es de 0,380 MPa, mientras que el yeso recuperado con solución con oxalato de calcio al 1 % tiene una resistencia de 2,1 MPa.

Agradecimientos

Agradecemos al Centro para el Desarrollo del Hábitat y la Construcción del Servicio Nacional de Aprendizaje (sena) y a Dallany Urrego, por facilitarnos la cepa *Aspergillus niger* y apoyarnos en el desarrollo de los experimentos. También damos las gracias a las aprendices Karen Vanesa Higueta Aguirre y Stefania Ramírez Mejía de la Tecnología en Prevención y Control Ambiental por hacer parte del proyecto.

Referencias

Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2023). *Guía regional con los procesos técnicos y jurídicos para el manejo integral de Residuos de Construcción y Demolición*. <https://www.metropol.gov.co/ambiental/residuos-solidos/Documents/Cartilla%20Residuos%20de%20Construcci%c3%b3n%20y%20Demolici%c3%b3n%202023.pdf>

Arnott, H. J. (2020). Calcium oxalate in fungi. En S. Khan (Ed.). *Calcium oxalate in biological systems* (pp. 73-111). CRC Press.

Gadd, G. M., Bahri-Esfahani, J., Li, Q., Rhee, Y. J., Wei, Z., Fomina, M. y Liang, X. (2014). Oxalate production by fungi: significance in geomycology, biodeterioration and bioremediation. *Fungal Biology Reviews*, 28(2-3), 36-55. <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2014.05.001>

Geraldo, R. H., Pinheiro, S. M., Silva, J. S., Andrade, H. M., Dweck, J., Gonçalves, J. P. y Camarini, G. (2017). Gypsum plaster waste recycling: A potential environmental and industrial solution. *Journal of Cleaner Production*, 164, 288-300. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.188>

German Building Material Association. (2019). *The Demand for Primary and Secondary Raw Materials in the Mineral and Building Materials Industry in Germany up to 2035*. BBS. https://ensqm.weebly.com/uploads/9/0/8/4/90847714/germanyreport_englishversion.pdf

Jaramillo Castro, R. D. (2020). *Reciclaje del yeso natural a partir de la producción de placas de yeso laminado* [disertación doctoral, Universidad Nacional de Colombia, Colombia].

Li, Q., Csetenyi, L. y Gadd, G. M. (2014). Biomineralization of metal carbonates by *Neurospora crassa*. *Environmental Science & Technology*, 48(24), 14409-14416.

Morán del Pozo, J. M., Valdés, A. J., Aguado, P. J., Guerra, M. I., & Medina, C. (2011). Estado actual de la gestión de residuos de construcción y demolición: limitaciones. *Informes de la Construcción*, 63(521), 89-95. <https://doi.org/10.3989/ic.09.038>

Muñoz Fuérez, S. E. (2023). *Obtención de ácido cítrico a partir de residuos de la*

agroindustria (Bagazo de Caña) por acción del microorganismo Aspergillus Níger [tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte, Ecuador].

Química Comercial Andina. (2022). *Ficha de datos de seguridad*. QCA.

Ruijter, G. J., van de Vondervoort, P. J. y Visser, J. (1999). Oxalic acid production by *Aspergillus niger*: an oxalate-non-producing mutant produces citric acid at pH 5 and in the presence of manganese. *Microbiology*, 145(9), 2569-2576. <https://doi.org/10.1099/00221287-145-9-2569>

Sierra Tobón, D. C. (2017). *Estudio de prefactibilidad para el montaje de una planta de aprovechamiento de placas de yeso*

o drywall en el área metropolitana [Trabajo de posgrado para especialidad, Institución Universitaria Esumer, Colombia]. <http://repositorio.esumer.edu.co/handle/ESUMER/884>.

van de Merbel, N. C., Ruijter, G. J., Lingeman, H., Brinkman, U. A. y Visser, J. (1994). An automated monitoring system using on-line ultrafiltration and column liquid chromatography for *Aspergillus niger* fermentations. *Applied microbiology and biotechnology*, 41, 658-663. <https://doi.org/10.1007/BF00167281>

Weimann, K., Adam, C., Buchert, M. y Sutter, J. (2021). Environmental evaluation of gypsum plasterboard recycling. *Minerals*, 11(2), 1-13.