

Mucílago de Nopal y sus diversas aplicaciones

Pamela Xiadani Rodríguez Barbosa ^a, Víctor Varela Guerrero ^a, María Fernanda Ballesteros Rivas ^a, Gonzalo Martínez Barrera ^{b*}

^a Universidad Autónoma del Estado de México, UAEM, Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable CCIQS, UAEM-UNAM, Carretera Toluca-Atlaconulco, km 14.5, C.P. 50200 Toluca, Estado de México, México.

^b Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Química, Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Materiales Avanzados (LIDMA), Km. 12 de la carretera Toluca-Atlaconulco, San Cayetano 50200, Toluca, Estado de México, México.

Fecha de recepción: 1 de mayo de 2023 - Fecha de aceptación: 28 de noviembre de 2024

Resumen

El nopal es una planta con múltiples beneficios y usos, primordialmente para la alimentación. Al nopal de la familia *Opuntia ficus-indica* se le puede extraer mucílago, el cuál es un hidrocoloide, que se utiliza en la industria biomédica, farmacéutica, alimentaria, agrícola, del tratamiento de aguas, así como de la construcción. En esta última, el mucílago se ha aplicado al concreto ya sea como hidratante, retardante del tiempo de fraguado, para tapar poros o bien como recubrimiento del acero de refuerzo para evitar la corrosión. Se han llevado a cabo modificaciones al mucílago, por ejemplo, mediante radiación gamma, con la cual es posible reticular los hidrogeles y permitir la copolimerización con polímeros sintéticos, además de mejorar la estabilidad térmica y las propiedades mecánicas. En este trabajo se presentan las propiedades y aplicaciones del mucílago de nopal en diversas áreas de conocimiento, así como los cambios estructurales producidos por la radiación gamma. Aunado a esto, se presenta el recubrimiento de superficies con compuestos elaborados con mucílago de nopal, poliestireno expandido de desecho, aceite esencial de anís y cal.

Palabras claves: Nopal, mucílago, *Opuntia ficus-indica*, concreto, radiación gamma, recubrimientos.

Cactus mucilage and its various applications

Abstract

The nopal cactus is a plant with multiple benefits and uses, mainly food. From the nopal, of the *Opuntia ficus-indica* family, mucilage can be extracted, which is a hydrocolloid used in the biomedical, pharmaceutical, food, agricultural, water treatment and construction industries. In the latter, mucilage has been applied to concrete as a wetting agent, to delay setting time, to plug pores or as a coating for reinforcing steel to prevent corrosion. Modifications of mucilage have been carried out, for example, by gamma radiation, with

*gmartinezb@uaemex.mx

which it is possible to cross-link hydrogels and allow copolymerization with synthetic polymers, in addition to improving thermal stability and mechanical properties. This work presents the properties and applications of nopal mucilage in different areas of knowledge, as well as the structural changes produced by gamma radiation. In addition, the coating of surfaces with composites made with nopal mucilage, waste expanded polystyrene, anise essential oil and lime is presented.

Keywords: Cactus, mucilage, *Opuntia ficus-indica*, concrete, gamma radiation, coatings.

Introducción

Las dos especies que más se conocen de los nopales que forman parte de la familia de las cactáceas son la *Opuntia* y la *Nopalea*. Los tallos de ambas especies son muy similares, pero la forma de las flores es distinta, las de

Opuntia asimilan a copas con pétalos pequeños y son polinizadas por insectos, mientras las de *Nopalea* son elongadas, con pistilo, estambres largos y son polinizadas por colibríes (Figura 1). Los nopales se cultivan en zonas semiáridas, ya que no requieren gran consumo de agua (SADER 2020; CONABIO 2021).



Figura 1. Flores de los géneros *Opuntia* y *Nopalea* del Nopal.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con datos de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT 2022), México es considerado el país con mayor diversidad de cactus del continente americano, además de ser el productor de nopal número uno en el mundo, con una producción de 874 mil toneladas al año. La promoción y venta a otros países se ha incrementado notablemente, esto debido a que el nopal requiere de poco riego de agua. El nopal es

un producto endémico de México, existen aproximadamente 1,400 subespecies de la Familia *Cactaceae*, de las cuales 670 viven en México, y 518 son endémicas (SADER 2020).

Las nopaleras están compuestas por los tallos, cladodios, frutas y flores. Los cladodios son tallos de estructuras planas y verdes; cuya parte exterior está formada por la clorénquima, donde se produce la

fotosíntesis, y la parte interior por un parénquima medular blanco, cuya función principal es el almacenamiento de agua (Procacci et al., 2021; Ondarza, 2016).

1. Mucílago de Nopal

El mucílago es un compuesto sintetizado por plantas y microbios, forma un grupo heterogéneo de biopolímeros, que se componen principalmente de polisacáridos. El mucílago vegetal se encuentra en los granos, las raíces, la corteza, los tallos, las hojas de plantas superiores y las algas; las cuales se componen principalmente de carbohidratos y agua. La principal propiedad del mucílago es la capacidad de absorber agua y formar coloides y geles de

moco (conocidos como hidrocoloides). El mucílago se hincha en el agua y tiene una consistencia gelatinosa. Su función es mantener un ambiente húmedo. El mucílago de cactus es un polisacárido heterogéneo, el cual se produce por plantas cactáceas (Matsuhira et al., 2006; Singh y Bareca, 2020; Procacci et al., 2021).

La composición del mucílago se basa principalmente en macromoléculas de polisacáridos ramificados que forman redes moleculares (Figura 2), capaces de retener grandes cantidades de agua, esto las convierte en una fuente potencial de hidrocoloides naturales, muy requeridos por las industrias química y cosmética.

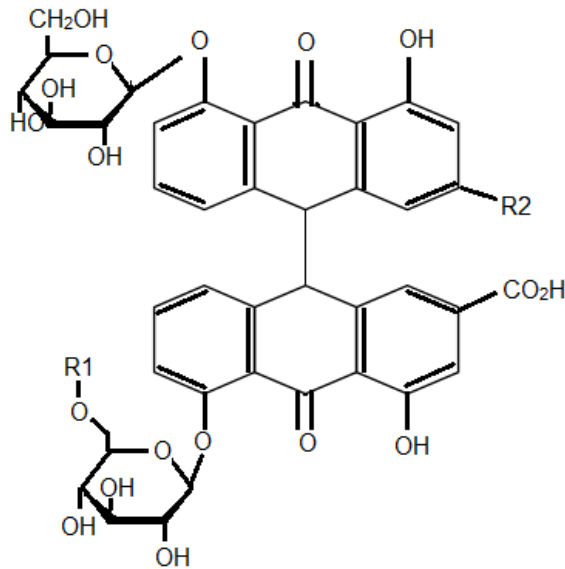


Figura 2. Estructura química del mucílago.

Fuente: Elaboración propia

El principal monosacárido presente en el mucílago es el ácido galacturónico, el cual proporciona la propiedad polielectrolita aniónica, su contenido es variado, por ejemplo, de 7-8% (González et al., 2019), de 8.0-12.7% (Sáenz et al., 2004) o de 10-50% (Caldera-Villalobos et al., 2022). Estas

variaciones de su contenido dependen de la fuente de extracción, es decir de la pulpa, la piel o la cáscara. Los otros monosacáridos presentes son arabinosa, galactosa, xilosa, ramnosa y glucosa, que tienen carácter neutro, altamente hidrófilo y soluble en agua (Sáenz et al., 2004).

Para extraer el mucílago se puede hacer uso de diversos métodos, como los de calentamiento y congelamiento con agua o ácido; así como los de extracción asistida por ultrasonido y microondas (de Andrade y Tribuzy, 2023). El método basado en agregar etanol, consiste de dos etapas, en la primera se licuan los nopales, se dejan macerar en agua destilada por 24 horas a una temperatura de 6°C, después se filtran para quitar los sólidos, finalmente se centrifuga a 4000 rpm por 5 minutos. En la segunda etapa, al líquido obtenido se le agrega el etanol en concentración 1:2.5 v/v, a temperatura de 6°C, posteriormente se agita,

se filtra para quitar los líquidos, finalmente el mucílago de nopal (los sólidos que quedan en el recipiente) se secan.

El mucílago extraído de los cladodios de *Opuntia ficus-indica* es un heteropolisacárido lineal que forma un hidrocoloide (Figura 3), con una masa molar de $3 \times 10^6 \text{ gmol}^{-1}$, que contiene L-arabinosa (24.6-42.0%), D-galactosa (21.0-40.1 %), D-xilosa (22.0-22.2 %), L-ramnosa (7.0-13.1 %) y ácido galacturónico α -D-(1→4) (8.0-12.7 %), así como insolubles (lignina y polisacáridos) y fibra soluble (azúcares neutros y ácido urónico) (Otálora et al. 2021).



Figura 3. Mucílago obtenido de los cladodios de *Opuntia ficus-indica*.

Fuente: Elaboración propia

2. Usos del mucílago de Nopal

Dado que el mucílago es un material biocompatible, no tóxico, renovable,

biodegradable, altamente hidrofílico y modificador de la viscosidad, se ha aplicado en diferentes áreas, como las mostradas en la Figura 4.



Figura 4. Áreas de aplicación del mucílago de Nopal.

Fuente: Elaboración propia.

- *Biomédica:* En la reparación de heridas, ya que tiene propiedades de cicatrización, las cuales aceleran la regeneración dérmica (Ondarza, 2016).
- *Farmacéutica:* Se utilizan hidrogeles de mucílago y gelatina para producir materiales para cápsulas blandas (Caldera-Villalobos et al., 2022; Ondarza, 2016; Singh y Kumar, 2020).
- *Alimentaria:* Fabricación de películas comestibles plastificadas para el envasado de alimentos utilizando polioles como plastificantes. Las propiedades físicas de las películas comestibles, como la permeabilidad, la transparencia, la solubilidad y la estabilidad, dependen del cultivo seleccionado (González et al., 2019; Del-Valle et al., 2005).
- *Agrícola:* Se utiliza como coadyuvante natural para mejorar la adhesión de los plaguicidas sobre el follaje; se logran áreas foliares mejor cubiertas (Virgen, 2020).
- *Tratamiento de agua:* Flocculante ecológico que mejora el rendimiento del proceso de electrocoagulación-electroflotación, en residuos y contaminantes. También para la eliminación de contaminantes como cobre (II), arsénico (V) y petróleo crudo de aguas contaminadas (Caldera-Villalobos et al. 2022).

Mucílago de Nopal utilizado en la industria de la construcción

El concreto es el material más utilizado a nivel mundial en la industria de la construcción, sin embargo, su curado requiere de grandes cantidades de agua, de lo contrario se puede producir mucha porosidad y en consecuencia obtener valores bajos de resistencia mecánica. En la industria del concreto es muy importante cuidar el tiempo y la hidratación del mismo al momento de su preparación y secado, para lo cual se han desarrollado materiales que ayudan a tener un concreto llamado auto-consolidable. Este proceso consiste en retrasar el tiempo de curado del concreto

mediante la liberación gradual de agua con el fin de mantener la hidratación y reducir los esfuerzos de tensión superficial. Se han desarrollado aditivos que retrasan el proceso de fraguado del cemento. Los retardantes generan calor a través de las reacciones exotérmicas de hidratación, lo cual es recomendable para edificaciones localizadas en climas cálidos. Desafortunadamente, la producción de aditivos sintéticos ha ido en aumento, la cual ha fomentado la contaminación (Durán-Herrera et al., 2012). Sin embargo, es bien sabido que desde la antigüedad se han utilizado aditivos naturales de origen vegetal y animal para el control de las propiedades de fraguado y curado del concreto, es decir retener el agua y a su vez hidratar al cemento, como el caso del mucílago de Nopal (*Opuntia ficus-indica*). Los aztecas realizaban edificaciones utilizando mezclas que contenían mucílago de nopal (Hernández, 2017). El mucílago de Nopal se puede utilizar en forma líquida o en polvo. Su presencia produce mayor viscosidad en la pasta de cemento.

Se han llevado a cabo investigaciones del uso del mucílago de nopal en el concreto, por ejemplo:

I) En un estudio se encontró que, a bajas concentraciones de mucílago líquido, los valores de resistencia a la flexión y a la compresión fueron iguales o superiores; mientras que a altas concentraciones se redujeron en 7% ambas propiedades. Sin embargo, para concretos con 28 días de curado, las resistencias a la flexión y a la compresión se incrementaron 4.3% respecto al concreto sin mucílago (Aquilina et al., 2018).

II) En otro estudio se utilizó mucílago de nopal con tensión superficial de 47.64 mN/m y viscosidad de 5.0 cP. Los resultados muestran que el mucílago produjo una reacción de hidratación más

activa y rápida, alcanzando la expansión máxima a las 9 horas y logrando 1.4 veces la retracción de la mezcla. Más aun, la resistencia a la compresión, medida a los 7, 28 y 91 días de curado, se incrementó hasta un 9%, mientras que el módulo de elasticidad se mejoró hasta 1.8% a los 28 días (Durán-Herrera et al., 2012).

III) En otra investigación se analizaron los tiempos de fraguado, hidratación, y la influencia de cloruros en la microestructura y fluidez en el concreto. Se agregó una concentración de 3% de mucílago de nopal, cuyo peso molecular fue entre 1.56 y 4.3 x10⁶ g/mol. Los resultados muestran que los tiempos de fraguado de las pastas de cemento fueron 50% mayores y los valores de fluidez fueron 26% menores comparados con las mezclas sin mucílago. Debido a que el mucílago de nopal es un polímero soluble en agua, influye en la microestructura y formación de cristales producidos durante la hidratación, en este caso se produjeron cristales de etringita y de silicato hidratado de calcio. En el caso de los cloruros, la difusión de estos disminuyó un 20% a los 120 días de curado, es decir el mucílago de nopal genera mayor hidratación del cemento, lo que reduce la permeabilidad de este; ya que las moléculas del mucílago actúan como barreras de difusión (Ramírez-Arellanes et al., 2012).

IV) En una investigación llevada a cabo por Torres-Acosta y González-Calderón (2021), se fabricaron morteros con mucílago de nopal (*Opuntia ficus-indica*), los cuales se expusieron en un ambiente de CO₂ durante 14 años. Los resultados muestran valores de resistividad eléctrica saturada 100% mayor (13 kΩ·cm), cuando se reemplaza el 95% de agua por mucílago de nopal, esto implica que el inicio de la corrosión se retrasa cuando se tiene un ambiente de CO₂ y grandes cantidades de mucílago. Los morteros sin mucílago tuvieron un 29% de

espacios vacíos, pero cuando se tiene mucílago el porcentaje disminuyó hasta un 16%. Los espacios son llenados, lo cual hace que disminuya la cantidad de agua absorbida, que se evite el paso de agentes externos disueltos en soluciones como agua salada, y que se mejore la durabilidad del mortero. Por otro lado, la tasa de carbonatación disminuyó 43% y la resistencia a la compresión se incrementó en un 19% para los morteros con mucílago.

V) En concretos con diferentes contenidos de agua, se agregó mucílago de nopal para obstruir los poros y detener el transporte de agua y cloro. En este caso, el mucílago actúa como una esponja (biopolímero), que retiene cierta cantidad de agua; produciendo bloqueo en los poros del cemento. Morteros modificados con mucílago de nopal se introdujeron en cloro durante 400 días. Los

resultados muestran 43% de mejoramiento en la permeabilidad ante el cloruro, incremento de la viscosidad de 5.0 a 10.0 cP, con lo cual se logró controlar la porosidad efectiva. Finalmente, se obtuvo hasta un 15% de mejora en la resistencia a la compresión (Torres-Acosta y Díaz-Cruz, 2020; Caldera-Villalobos et al., 2022).

VI) En el concreto con varillas de acero es necesario dar protección a estas para evitar la corrosión, ya que con el paso del tiempo la presencia de cloruros hace que se vaya perdiendo la adherencia. El mucílago de nopal se ha utilizado para tal propósito, el cual retrasa el inicio de la corrosión. En un estudio, se evaluaron las propiedades electroquímicas del acero durante 270 días. Los valores del potencial de corrosión a circuito abierto se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores del potencial de corrosión a circuito abierto. Fuente: Díaz-Blanco et al (2019).

Concreto	Tiempo de curado (Días)	Potencial de corrosión a circuito abierto (mV)	Probabilidad de corrosión (% de Riesgo)
Sin mucílago	28	-90 a -50	10
Con mucílago	28	-90 a -50	10
Sin mucílago	150-180	-500	90
Con mucílago	150-180	-210 a -60	Intermedio
Sin mucílago	270	-325	90
Con mucílago	270	-220 a -75	10

El mucílago de nopal puede retrasar la aparición y propagación de la corrosión en el acero de refuerzo del concreto. Los valores de las pruebas de resistencia al ruido electroquímico y de la resistencia a la polarización lineal determinan el comportamiento electroquímico del acero de refuerzo. En el caso de la prueba de ruido

electroquímico se determina el efecto producido por la película de óxido formada, que puede evitar la corrosión. La resistencia al ruido electroquímico del acero sin mucílago, a los 150 días fue de $2 \times 10^4 \Omega \text{cm}^2$ y se incrementó a $4 \times 10^4 \Omega \text{cm}^2$ a los 270 días. Mientras que los valores del acero con mucílago fueron mayores, de $4 \times 10^5 \Omega \text{cm}^2$ a

los 150 días y de $1 \times 10^5 \Omega \text{cm}^2$ a los 270 días. En el caso de la resistencia a la polarización lineal, disminuyó luego de 150 días de exposición, sin embargo al final del período de prueba las muestras con mucílago aumentan progresivamente la resistencia (Díaz-Blanco et al., 2019).

4. Modificación del mucílago de Nopal mediante radiación gamma

La radiación gamma es una herramienta que se utiliza para modificar las propiedades fisicoquímicas de los polímeros. Se han modificado y funcionalizado polímeros naturales como los polisacáridos, mediante los procesos de a) reticulación, b) despolimerización y c) copolimerización por injerto. Este último, puede modificar el carácter hidrófilo o hidrófobo de los polímeros, puede utilizarse en la preparación de hidrogeles, injertando monómeros acrílicos o vinílicos en los polisacáridos (Caldera-Villalobos et al., 2022).

Los rayos gamma pueden actuar como un método de conservación de alimentos. En el nopal ayudan a conservarlo por más tiempo, a controlar la maduración, mantener su valor nutricional, no producir cambios sensoriales, destruir microorganismos y no producir residuos tóxicos.

En un estudio realizado por Pérez (2001), se irradiaron nopales (*Opuntia ficus-indica*), con rayos gamma provenientes de una fuente de Cobalto 60, a dosis de hasta 10 kGy a una razón de dosis de 3.7 kGy/h, en una atmósfera de Nitrógeno. Los resultados no muestran cambios significativos en las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas. Las mejores condiciones de preservación de los nopales se lograron a 4°C y dosis de radiación de 2 kGy.

En otro estudio, semillas de nopal fueron expuestas a la radiación gamma, con la finalidad de inducir la mutagénesis y beneficiar los procesos de germinación. Se aplicaron dosis de hasta 200 Gy. Se obtuvo una tasa de germinación máxima del 70% a una dosis de 50 Gy, la cual fue disminuyendo conforme se incrementó la dosis, llegando a 37% a una dosis de 200 Gy (Boujghagh et al., 2015).

La modificación de las propiedades de los mucílagos se ha llevado a cabo mediante funcionalización química, copolimerización y radiación gamma. En un estudio, el mucílago de nopal (100 mg), se expuso a la radiación gamma en presencia de ácido acrílico (PAA), con el objetivo de formar hidrogeles de mucílago con PAA.

100 mg de mucílago se disolvieron con 1 mL de agua desionizada en un tubo de vidrio. Se burbujó en atmósfera de Argón. Posteriormente, los tubos se cerraron herméticamente y se expusieron a radiación gamma a dosis de 2 a 12 kGy, a una razón de dosis de 8 kGy/h. En un irradiador semi-industrial Gamma Beam 651 PT (Nordion International), equipado con fuente de radiación gamma de Cobalto 60. Las dosis de radiación recibidas por las muestras se midieron con un dosímetro Fricke. Después de la irradiación, el mucílago se precipitó con acetona y se secó a 60°C.

Los resultados muestran que el grado de descarboxilación del mucílago es proporcional a la dosis de radiación aplicada. La reacción de descarboxilación se produce en los residuos de ácido galacturónico del mucílago. Reacción que produce la disminución del número de grupos de ácido carboxílico. No obstante, el mucílago se reticuló con dosis de radiación de 2 a 6 kGy. Se obtuvo hasta un 734% en el hinchamiento de los hidrogeles en mucílago irradiado a dosis de 2 kGy, sin

embargo, a mayores dosis de radiación, de hasta 20 kGy, el porcentaje de hinchamiento disminuyó notablemente. Un mayor grado de entrecruzamiento y hinchamiento produjo mayor estabilidad térmica (Caldera-Villalobos et al., 2022).

En general, los especímenes (muestras) se colocan a una distancia de 60 cm y una altura de 40 cm con respecto a la posición del rack de 18 lápices de Cobalto 60, como se muestra en la Figura 5.

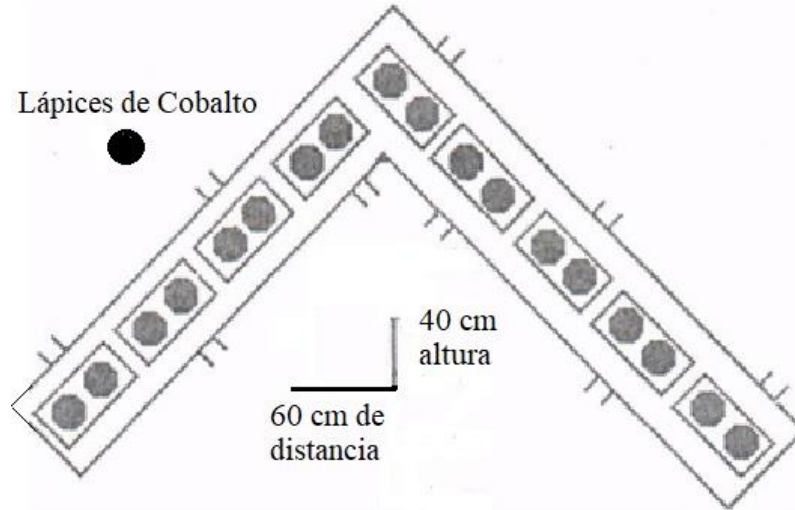


Figura 5. Esquema de la posición de las fuentes de ^{60}Co en el irradiador.

En otro estudio, mezclas de mucílago de nopal, ácido acrílico y monómeros de 4-vinilpiridina, fueron irradiadas siguiendo el proceso de copolimerización de injerto, con el objetivo de mejorar la capacidad de adsorción de tintes textiles en aguas residuales. Cabe mencionar, que los tintes catiónicos como el azul de metileno, el verde malaquita y el rojo de metilo, tienen carga positiva y se utilizan comúnmente en la industria textil para teñir fibras de origen animal, como la lana y la seda. Las mezclas se irradiaron a dosis de hasta 24 kGy a una tasa de dosis de 8 kGy/h, en una atmósfera inerte. Los resultados muestran que los porcentajes de eliminación oscilan entre 60% y 90% dependiendo del tipo de tinte presente. La mayor adsorción se logró con la dosis de radiación de 12 kGy. Los adsorbentes generados tienen un carácter ácido debido a la presencia de grupos

carboxílicos en su superficie (Caldera-Villalobos et al., 2021).

5. Mucílago de Nopal modificado utilizado como recubrimiento de superficies

El mucílago de nopal utilizado como recubrimiento, ayuda a incrementar la adhesión superficial, la impermeabilidad, y sobre todo contar con una superficie amigable con el ambiente, ya que el mucílago no libera contaminantes al ambiente.

Dado que México es el productor número uno a nivel mundial de Nopal, con 874 mil toneladas por año, se ha venido utilizando como recubrimiento de superficies (SEMARNAT, 2022). El mucílago de nopal se ha mezclado con diferentes materiales para producir recubrimientos, por ejemplo,

con el Poliestireno Expandido de desecho, el cual por naturaleza es muy contaminante y requiere de mucho tiempo para degradarse en el ambiente, cerca de 500 años, en comparación con sus tiempos de vida útil.

En un estudio se mezclaron mucílago de nopal, Poliestireno Expandido de desecho,

aceite de anís esencial y cal, para producir recubrimientos para superficies de madera, con la finalidad de incrementar la impermeabilidad y darle una mejor estética a la superficie, como se muestra en la figura 6.

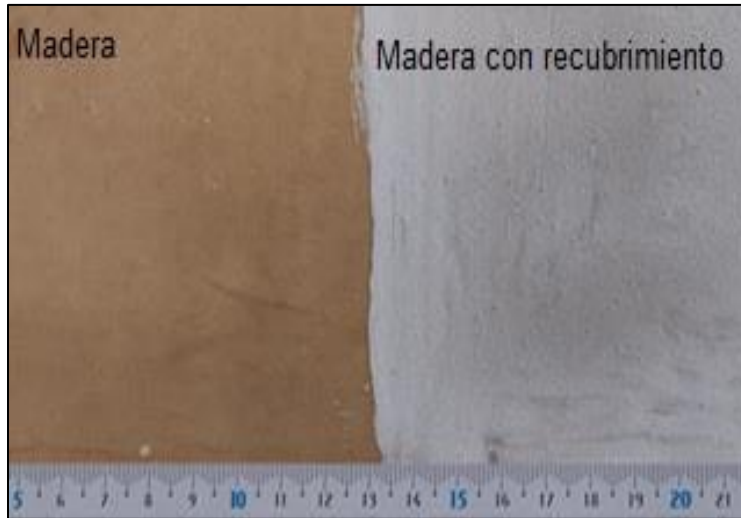


Figura 6. Recubrimiento sobre madera, producido con mucílago de Nopal, Poliestireno Expandido reciclado, aceite de anís esencial y cal. Fuente: Elaboración propia.

Para ser utilizado como recubrimiento, el Poliestireno Expandido de desecho debe degradarse con diferentes solventes y liberar el gas pentano que contiene. Se ha degradado con aceite de Anís, el cual contiene compuestos como el terpeno. La degradación hace disminuir el volumen notablemente, dando lugar a un líquido viscoso, el cual puede ser mezclado con otros materiales y producir recubrimientos. Los solventes ecológicos, como el aceite de Anís, provienen de fuentes naturales, son amigables con el medio ambiente ya que no liberan contaminantes, además de tener un olor agradable (Gil-Jasso et al., 2019).

Conclusiones

El mucílago de nopal es una gran alternativa para ser usado en muchas áreas de interés industrial, esto debido a su accesibilidad y fácil extracción. Uno de sus principales usos es en la industria de la construcción, como aditivo retardante del fraguado en el concreto, como inhibidor de la corrosión en el acero de refuerzo del concreto, como rellador de poros en el concreto para impedir el paso de contaminantes que puedan afectar la durabilidad del concreto, así como en ambientes altamente agresivos de zonas costeras con mucha humedad y salinidad. Es posible modificar las propiedades fisicoquímicas del mucílago de nopal mediante radiación gamma, y

producir materiales compuestos amigables con el medio ambiente, por ejemplo, como recubrimientos. Sumando a todos estos beneficios, es sabido que el nopal es una planta que requiere de pocos cuidados y que puede ser cultivada en zonas con poca agua, lo que la hace ideal para ser utilizada ampliamente en diversas aplicaciones.

Reconocimiento

Al CONAHCYT por la beca otorgada a uno de los autores (P.X. Rodríguez Barbosa), con número de CVU 1149715, para la realización de estudios de posgrado.

Referencias

Aquilina, A., Borg, R., & Buhagiar, J. (2018). The application of natural organic additives in concrete: *Opuntia ficus-indica*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 442: 1-9.

[10.1088/1757-899X/442/1/012016](https://doi.org/10.1088/1757-899X/442/1/012016)

Boujghagh, M., Bouharroud, R., & Mouhib, M. (2015). Germination of Cactus (*Opuntia ficus-indica*) seeds irradiated with various doses of radiations mutagenic treatment, VIII International Congress on Cactus Pear and Cochineal (1067): 75-78.

<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2015.1067.9>

Caldera-Villalobos, M., Herrera-González, A., & Carreon-Castro, M. (2021). Improving the adsorption capacity of *Opuntia ficus-indica* fruit peels by graft-copolymerization using gamma radiation, Radiation Physics and Chemistry 189: 1-8.

<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109653>

Caldera-Villalobos, M., Álvarez-Venicio, V., Arenas-Sáenz, M., Leal-Acevedo B., Carreón-Castro M.P. (2022). Radiochemical transformation of mucilage extracted from *Opuntia ficus-indica* using gamma radiation, Applied Radiation and Isotopes 19: 110430.

<https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2022.110430>

CONABIO (2021). Nopales, diversidad biológica.

<https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/alimentos/nopales>

de Andrade, É., & Tribuzy, A. (2023). Bioprospecting and potential of cactus mucilages: A bibliometric review. Food Chemistry 401: 1-18.

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134121>

Del-Valle, V., Hernández-Muñoz, P., Guarda, A., & Galotto, M. J. (2005). Development of a cactus-mucilage edible coating (*Opuntia ficus-indica*) and its application to extend strawberry (*Fragaria ananassa*) shelf-life, Food Chemistry 91: 751–756.

[10.1016/j.foodchem.2004.07.002](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.07.002)

Díaz-Blanco, Y., Menchaca-Campos, C., & Rocabruno-Valdés, C. (2019). Influence of a Natural Additive (Nopal Mucilage) on the electrochemical properties of concrete reinforcing steel. Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción 9(3): 260-276.

<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i3.429>

Durán-Herrera, A., De-León, R., Juárez, C., & Valdez, P. (2012). Mucílago de nopal como reductor de retracción en concreto auto-consolidable. Anais do 54^o Congresso Brasileiro do Concreto - CBC2012 – 54CBC, 54: 1-18.

http://www.ibracon.org.br/eventos/54cbc/i_silamcaa/art-alejandro_silamcaa.pdf

Gil-Jasso, N., Segura-González, M., Soriano-Giles, G., Neri-Hipolito, J., López, N., Mas-Hernández, E., Barrera-Díaz, C., Varela-Guerrero, V., & Ballesteros-Rivas, M. (2019). Dissolution and recovery of waste expanded polystyrene using alternative essential oils, *Fuel* 239: 611-616.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.055>

González, D., Luna, B., Martínez-Ávila, G., Rodríguez, H., Avendaño, V., & Rojas, R. (2019). Formulation and characterization of edible films based on organic mucilage from Mexican *Opuntia ficus-indica*. *Coatings* 9(8): 506.

<http://dx.doi.org/10.3390/coatings9080506>

Hernández, C. (2017). Compositional, thermal and microstructural characterization of the Nopal (*Opuntia ficus-indica*), for addition in commercial cement mixtures. *Journal of Physics: Conference Series* (935): 1-6.

[10.1088/1742-6596/935/1/012045](https://doi.org/10.1088/1742-6596/935/1/012045)

Matsuhira, B., Lillo, L., Sáenz, C., Urzúa, C., & Zárate, O. (2006). Chemical characterization of the mucilage from fruits of *Opuntia ficus-indica*, *Carbohydrate Polymers* 63: 263-269.

[10.1016/j.carbpol.2005.08.062](https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2005.08.062)

Ondarza, M. (2016). Cactus Mucilages: Nutritional, health benefits and clinical trials. *Journal of Medical and Biological Science Research* 2 (6): 87-103.

<http://pearlresearchjournals.org/journals/jmbsr/index.html>

Otálora, M., Wilches-Torres, A., & Gómez-Castaño, J. (2021). Extraction and physicochemical characterization of dried powder mucilage from *Opuntia ficus-indica* cladodes and Aloe Vera leaves: A Comparative Study, *Polymers* 13 (1689): 1-13.

<https://doi.org/10.3390/polym13111689>

Pérez, M. (2001). Cambios fisicoquímicos y microbiológicos en nopal (*Opuntia spp.*) irradiado con rayos gamma de cobalto 60. Ciudad de México, México: Universidad Nacional Autónoma de México.

https://repositorio.unam.mx/contenidos/cambios-fisicoquimicos-y-microbiologicos-en-nopal-opuntia-spp-irradiado-con-rayos-gamma-de-cobalto-60-414331?c=B21xE0&d=false&q=*&i=1&v=1&t=search_0&as=0

Procacci, S., Bojórquez-Quintal, E., Platamone, G., Maccioni, O., Vecchio, V., Morreale, V., & Bacchetta, L. (2021). *Opuntia ficus-indica* pruning waste recycling: Recovery and characterization of mucilage from cladodes, *Natural Resources* 12: 91-107.

[10.4236/nr.2021.124008](https://doi.org/10.4236/nr.2021.124008)

Ramírez-Arellanes, S., Cano-Barrita, P., Julián-Caballero, F., & Gómez-Yáñez, C. (2012). Propiedades de durabilidad en hormigón y análisis microestructural en pastas de cemento con adición de mucílago de nopal como aditivo natural, *Materiales de Construcción* 62(307): 327-341. [10.3989/mc.2012.00211](https://doi.org/10.3989/mc.2012.00211)

SADER (2020). Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. El nopal, parte de la riqueza del campo mexicano.

<https://www.gob.mx/agricultura/12rticulos/el-nopal-parte-de-la-riqueza-del-campo-mexicano>

Sáenz, C., Sepúlveda, E., & Matsuhira, B. (2004). *Opuntia spp.* mucilage's: a functional component with industrial perspectives. *Journal of Arid Environments* 57: 275-290.

[10.1016/S0140-1963\(03\)00106-X](https://doi.org/10.1016/S0140-1963(03)00106-X)

SEMARNAT (2022). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Día Nacional del Nopal 2022.

<https://www.gob.mx/semarnat/es/articulos/dia-nacional-del-nopal-2022>

Singh, R., & Bareca, D. (2020). Analysis of gums and mucilages. *Recent Advances in Natural Products Analysis* 1: 663-676.

<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816455-6.00021-4>

Singh, B., & Kumar, A. (2020). Exploration of arabinogalactan of gum polysaccharide potential in hydrogel formation and controlled drug delivery applications, *International Journal of Biological Macromolecules* 147: 482-492.

<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.01.087>

Torres-Acosta, A., & Díaz-Cruz, A. (2020). Concrete durability enhancement from nopal (*Opuntia ficus-indica*) additions, *Construction and Building Materials* 243: 1-9.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118170>

Torres-Acosta, A., & González-Calderón, P. (2021). Mortar with *Opuntia ficus-indica* mucilage additions exposed to CO-2 laden environment, *ACI Materials Journal* 118 (5): 75-82.

[10.14359/51732796](https://doi.org/10.14359/51732796)

Virgen, C. (2020). Repositorio Institucional Universidad Autónoma de Querétaro.

<https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/1791>