

BIOMATERIALES PARA EL CAMBIO: MATERIALES COMPUESTOS DE FIBRAS NATURALES PARA APOYAR EL APRENDIZAJE DEL DISEÑO Y EL DESARROLLO RURAL

BIOMATERIALS FOR CHANGE: NATURAL FIBER COMPOSITES TO SUPPORT DESIGN LEARNING AND RURAL DEVELOPMENT

FABIO ANDRÉS TÉLLEZ¹, JUAN MANUEL ESPAÑA²

¹ DEPARTMENT OF APPLIED DESIGN, APPALACHIAN STATE UNIVERSITY, BOONE, NORTH CAROLINA, UNITED STATES

² ÁREA ACADÉMICA DE DISEÑO DE PRODUCTO, FACULTAD DE ARTES Y DISEÑO, UNIVERSIDAD JORGE TADEO LOZANO, BOGOTÁ, COLOMBIA

RECIBIDO: 2 DE AGOSTO DE 2022 // ACEPTADO: 1 DE DICIEMBRE DE 2022 • RECEIVED: AUGUST 2, 2022 // ACCEPTED: DECEMBER 1, 2022

UNO DE LOS PRINCIPALES DESAFÍOS AMBIENTALES DE NUESTRO TIEMPO ES LA CONTAMINACIÓN PLÁSTICA. MOTIVADOS POR ESTE DESAFÍO AMBIENTAL GLOBAL, LOS AUTORES LANZARON UN PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN PARA ESTUDIAR EL DESARROLLO Y LA APLICACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS DE FIBRAS NATURALES (NFC) COMO POSIBLES SUSTITUTOS DE LOS PLÁSTICOS ESPUMADOS. PARALELAMENTE, LOS AUTORES TAMBIÉN ESTABLECIERON UN NUEVO SEMILLERO DE INVESTIGACIÓN Y UN TALLER DE PROYECTO DE GRADO PARA INVOLUCRAR A ESTUDIANTES UNIVERSITARIOS EN ESTA INICIATIVA DE INVESTIGACIÓN. ENTRE 2018 Y 2021, LOS AUTORES DIRIGIERON UN PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN QUE EXPLORÓ EL USO DE DESECHOS DE CULTIVOS DE MAÍZ (*ZEA MAYS*) Y FIBRAS DE PLANTAS DE FIQUE (*FURCRAEA ANDINA*) PARA DESARROLLAR NUEVOS NFC Y SUS APLICACIONES, Y TRABAJARON CON ESTUDIANTES DE PREGRADO DE DISEÑO INDUSTRIAL PARA PROYECTAR POSIBLES APLICACIONES DE ESTOS MATERIALES. COMO RESULTADO DE ESTA INICIATIVA, EL EQUIPO DESARROLLÓ SEIS NUEVOS NFC Y UNA COLECCIÓN DE CERCA DE UNA DOCENA DE PRODUCTOS EN QUE SE APLICARON LOS NUEVOS MATERIALES. ESTOS PRODUCTOS ESTABAN DIRIGIDOS A LAS TRES INDUSTRIAS QUE MÁS ESPUMAS PLÁSTICAS CONSUMEN, ES DECIR, CONSTRUCCIÓN, EMPAQUES Y AUTOMOTRIZ. A NIVEL EXPERIMENTAL, ESTOS NUEVOS MATERIALES HAN MOSTRADO PROPIEDADES BENEFICIOSAS PARA ESTAS INDUSTRIAS YA QUE SON DE ALTA RESISTENCIA AL IMPACTO, BAJA CONDUCCIÓN TÉRMICA, ALTA CAPACIDAD DE AISLAMIENTO ACÚSTICO Y BAJO PESO. LOS RESULTADOS PRELIMINARES DE LAS PRUEBAS DE MATERIALES Y LA VALIDACIÓN DE MERCADO SON PROMISORIOS PARA CONTINUAR DESARROLLANDO Y AMPLIANDO LA PRODUCCIÓN DE ESTOS MATERIALES Y SUS APLICACIONES CON EL OBJETIVO FINAL DE HACER CONTRIBUCIONES SIGNIFICATIVAS AL BIENESTAR SOCIAL, AMBIENTAL Y ECONÓMICO DE LAS COMUNIDADES RURALES QUE PRODUCEN MAÍZ Y FIQUE EN COLOMBIA Y OTROS PAÍSES EN DESARROLLO.

PALABRAS CLAVE: MATERIALES COMPUESTOS DE FIBRAS NATURALES, BIOMATERIALES, BIOCOMPUESTOS, INVESTIGACIÓN DE PREGRADO, *FURCRAEA ANDINA*, *ZEA MAYS*.

ONE OF THE MAJOR ENVIRONMENTAL CHALLENGES OF OUR TIME IS PLASTIC POLLUTION. MOTIVATED BY THIS GLOBAL ENVIRONMENTAL CHALLENGE, THE AUTHORS LAUNCHED A RESEARCH PROGRAM TO INVESTIGATE THE DEVELOPMENT AND APPLICATION OF NATURAL FIBER COMPOSITES (NFCS) AS POTENTIAL SUBSTITUTES FOR FOAMED PLASTICS. IN PARALLEL, THE AUTHORS ALSO ESTABLISHED A NEW RESEARCH GROUP AND A CAPSTONE COURSE TO ENGAGE UNDERGRADUATE STUDENTS IN THIS RESEARCH INITIATIVE. BETWEEN 2018 AND 2021, THE AUTHORS LED A RESEARCH PROGRAM THAT EXPLORED THE USE OF WASTES FROM CORN CROPS (*ZEA MAYS*) AND FIBERS FROM FIQUE PLANTS (*FURCRAEA ANDINA*) FOR DEVELOPING NEW NFCS AND THEIR APPLICATIONS AND WORKED WITH UNDERGRADUATE STUDENTS IN INDUSTRIAL DESIGN TO CREATE POTENTIAL APPLICATIONS FOR THESE MATERIALS. AS RESULTS OF THIS INITIATIVE, THE TEAM DEVELOPED SIX NEW NFCS AND A COLLECTION OF NEAR A DOZEN PRODUCTS THAT APPLIED THE NEW MATERIALS. THESE PRODUCTS WERE AIMED AT THE THREE INDUSTRIES THAT CONSUME THE MOST FOAMED PLASTICS, THAT IS, CONSTRUCTION, PACKAGING, AND AUTOMOTIVE. AT AN EXPERIMENTAL LEVEL, THESE NEW MATERIALS HAVE SHOWN BENEFICIAL PROPERTIES FOR THESE INDUSTRIES SINCE THEY ARE HIGHLY RESISTANT TO IMPACT, HAVE LOW THERMAL CONDUCTION, HAVE HIGH ACOUSTIC INSULATION CAPACITY, AND ARE LOW WEIGHT. THE PRELIMINARY FINDINGS FROM MATERIAL TESTING AND MARKET VALIDATION SHOW GREAT PROMISE FOR CONTINUING DEVELOPING AND SCALING UP THE PRODUCTION OF THESE MATERIALS AND THEIR APPLICATIONS WITH THE ULTIMATE GOAL OF MAKING SIGNIFICANT CONTRIBUTIONS TO THE SOCIAL, ENVIRONMENTAL, AND ECONOMIC WELFARE OF RURAL COMMUNITIES THAT PRODUCE CORN AND FIQUE IN COLOMBIA AND OTHER DEVELOPING COUNTRIES.

KEYWORDS: NATURAL FIBER COMPOSITES, BIOMATERIALS, BIOCOMPUESTOS, UNDERGRADUATE RESEARCH, *FURCRAEA ANDINA*, *ZEA MAYS*.

BIOMATERIALES PARA EL CAMBIO:

MATERIALES COMPUESTOS DE FIBRAS NATURALES PARA APOYAR EL APRENDIZAJE DEL DISEÑO Y EL DESARROLLO RURAL

Uno de los principales desafíos ambientales de nuestro tiempo es la contaminación plástica. Cada año se filtran al medio ambiente más de 22 millones de toneladas de desechos plásticos, y se prevé que esta cantidad se duplique para 2030 (OCDE, 2022). A pesar del aumento de conciencia acerca de los problemas ambientales creados por la producción y el consumo de plástico, durante la pandemia de COVID-19, el uso de plásticos de un solo uso se incrementó a nivel mundial (Mittal et al., 2022). Una vez que los materiales plásticos se filtran al medio ambiente, tardan entre cientos y miles de años en degradarse, acumularse y convertirse en parte de la cadena trófica como microplásticos (Crawford & Quinn, 2016). Se han encontrado desechos plásticos en el fondo de la Fosa de las Marianas, el punto más profundo conocido en los océanos de la Tierra (Rhodes, 2019); se han encontrado microplásticos en el líquido amniótico y en la placenta en mujeres embarazadas (Margeta et al., 2021); y en el Océano Pacífico hay una mancha de basura flotante que equivale a tres veces el tamaño de Francia (Lebreton et al., 2018).

Motivados por este desafío ambiental global, en 2018 los autores lanzaron un programa de investigación para estudiar el desarrollo y la aplicación de materiales compuestos de fibras naturales (NFC), una categoría de biomateriales, como posibles sustitutos de los plásticos espumados. Paralelamente, los autores también establecieron un nuevo semillero de investigación y un taller de proyecto de grado en el programa de diseño industrial de la Universidad Jorge Tadeo Lozano para involucrar a los estudiantes de pregrado en esta iniciativa de investigación. El desarrollo de nuevos NFC implicó experimentar con múltiples combinaciones de fibras naturales (es decir, residuos de maíz y fibras de fique) y matrices (es decir, biopolímeros, cemento, resina de poliéster) y realizar pruebas para determinar sus propiedades y características. El desarrollo de nuevas aplicaciones potenciales para estos materiales implicó la creación de un nuevo taller de proyecto de grado y un nuevo semillero de investigación en el que los estudiantes universitarios de diseño industrial participaron en procesos de I+D para crear aplicaciones potenciales para los nuevos NFC. Este artículo presenta la experiencia de los autores en el desarrollo de nuevos NFC y sus aplicaciones en colaboración con varias cohortes de estudiantes de diseño industrial del último año de sus carreras.

ANTECEDENTES

MATERIALES COMPUESTOS DE FIBRAS NATURALES (NFC)

Los materiales compuestos se obtienen cuando dos o más materiales se combinan para crear nuevos materiales con propiedades mejoradas (Abdellaoui et al., 2015). Los compuestos generalmente están hechos de un material de refuerzo incrustado en una matriz, por ejemplo, fibra de carbono en resina de poliéster (Addington & Schodek, 2005). La combinación de materiales es una práctica que pretende maximizar las virtudes de cada material minimizando sus carencias. Un ejemplo conocido de materiales compuestos es la fibra de vidrio, una combinación de fibra de vidrio y resinas plásticas, que se ha utilizado durante décadas por su resistencia, durabilidad, versatilidad y bajo costo. Sin embargo, una vez combinados, los materiales compuestos son difíciles, si no imposibles, de separar, reciclar o reutilizar,

BIOMATERIALS FOR CHANGE:

NATURAL FIBER COMPOSITES TO SUPPORT DESIGN LEARNING AND RURAL DEVELOPMENT

One of the major environmental challenges of our time is plastic pollution. More than 22 million tons of plastic waste are leaked into the environment every year, and it is projected that this amount will increase twofold by 2030 (OECD, 2022). Despite the increased awareness of the environmental issues created by plastic production and consumption, during the COVID-19 pandemic, the use of single-use plastics increased globally (Mittal et al., 2022). Once plastic materials are leaked into the environment, they take hundreds to thousands of years to degrade, accumulating and becoming part of the trophic chain as microplastics (Crawford & Quinn, 2016). Plastic waste has been found at the bottom of the Marianas Trench, the deepest known point in Earth's oceans (Rhodes, 2019); microplastics have been found in the amniotic fluid and in the placenta in pregnant women (Margeta et al., 2021); and in the Pacific Ocean there is a floating garbage patch that is three times the size of France (Lebreton et al., 2018).

Motivated by this global environmental challenge, in 2018, the authors launched a research program to investigate the development and application of natural fiber composites (NFCs)—a category of biomaterials—as potential substitutes for foamed plastics. In parallel, the authors also established a new research group and a capstone course in the industrial design program at Universidad Jorge Tadeo Lozano to engage undergraduate students in this research initiative. The development of new NFCs implied experimenting with multiple combinations of natural fibers (i.e., corn wastes and fique fibers) and matrices (i.e., biopolymers, cement, polyester resin) and conducting tests to determine their properties and characteristics. Developing new potential applications for these materials implied creating a new studio-based course and a new research group in which undergraduate industrial design students engaged in RD&D processes to create potential applications for the new NFCs. This paper presents the authors' experience developing new NFCs and their applications in collaboration with several cohorts of last-year industrial design students.

BACKGROUND

NATURAL FIBER COMPOSITES (NFCs)

Composite materials are obtained when two or more materials are combined to create new materials with enhanced properties (Abdellaoui et al., 2015). Composites are usually made up of a reinforcing material—e.g., carbon fiber—embedded into a matrix material—e.g., polyester resin (Addington & Schodek, 2005). The combination of materials is a practice intended to maximize the virtues of each material while minimizing their deficiencies. A well-known example of composite materials is fiberglass, a combination of glass fiber and plastic resins, which has been used for decades because of its strength, durability, versatility, and low cost. However, once combined, composite materials are hard—if not impossible—to separate, recycle, or reuse, which contributes to deepening the current environmental crisis. This has motivated the development of Natural Fiber Composites (NFCs), which are a relatively new generation of materials that replace synthetic reinforcing materials with natural fibers (e.g., jute, sisal, hemp, bamboo, etc.) and, in some cases, plastic resins with natural substitutes. These materials

lo que contribuye a profundizar la crisis ambiental actual. Esto ha motivado el desarrollo de los NFC, que son una generación relativamente nueva de materiales que reemplazan los materiales de refuerzo sintéticos con fibras naturales (por ejemplo, yute, sisal, cáñamo, bambú, etc.) y, en algunos casos, resinas plásticas con sustitutos naturales. Estos materiales tienen propiedades similares a los compuestos sintéticos, con un menor impacto ambiental (Sahoo et al., 2017).

PRODUCCIÓN DE MAÍZ Y FIQUE EN COLOMBIA

En el estudio presentado en este artículo, los autores exploraron el uso de desechos de cultivos de maíz (*Zea mays*) y fibras naturales obtenidas de plantas de fique (*Furcraea andina*) para desarrollar nuevos NFC motivados por los beneficios potenciales de estos nuevos materiales a nivel ambiental, social y económico. Además, los autores identificaron una brecha en la literatura existente sobre biomateriales y NFC, que tuvieron la intención de abordar con su programa de investigación. Si bien existe abundante literatura que describe los usos de fibras de maíz y otras plantas de agave para producir biocompuestos, no existe literatura que discuta el uso combinado de fibras de maíz y fique (Zhou et al., 2015; Wang et al., 2011), ni menos aun con un enfoque de diseño. En última instancia, al desarrollar nuevos NFC, los autores intentaron crear nuevas oportunidades económicas para las comunidades rurales en Colombia y otros países en desarrollo. Estos nuevos materiales pueden ofrecer, en el futuro, una alternativa rentable a los cultivos ilícitos en zonas donde los agricultores rurales corren el riesgo de caer en prácticas económicas ilegales, además de minimizar las emisiones de CO₂ relacionadas con la producción de maíz y reducir el uso de ciertos materiales plásticos.

Los autores experimentaron con desechos de cultivos de maíz debido a los impactos ambientales y económicos de las prácticas actuales de manejo de estos desechos en Colombia y otros países de América Latina. Según Fenalce (Federación Nacional de Cultivadores de Cereales, Leguminosas y Soya), en Colombia hay más de 450.000 hectáreas sembradas de maíz, y alrededor del 60% de la biomasa de estos cultivos se quema después de la cosecha, liberando cantidades considerables de CO₂ a la atmósfera. En algunos casos, los desechos de los cultivos de maíz son reincorporados al suelo después de la cosecha, lo que puede causar serios problemas fitosanitarios para los nuevos cultivos. Adicionalmente, el precio del maíz en Colombia se ha reducido drásticamente desde la implementación de un tratado de libre comercio bilateral con los Estados Unidos en 2012, lo que ha afectado a los productores colombianos de maíz, quienes buscan nuevos mercados y productos a base de maíz con mayor valor agregado.

Asimismo, los autores experimentaron con fibras de plantas de fique debido a las dificultades económicas y sociales que enfrentan los fiqueros en Colombia. El fique, que se muestra en la Figura 1, es un tipo de agave originario de la región andina que ha sido ampliamente cultivado en Colombia y Ecuador desde tiempos prehispánicos. Según Fenalfique (Federación Nacional de Cultivadores de Fique y Artesanos de la Cabuya), el sustento de más de 70.000 familias rurales en Colombia depende del cultivo de fique, especialmente en zonas históricamente afectadas por el conflicto armado del país. Si bien estas fibras son muy versátiles, han sido reemplazadas por materiales sintéticos y actualmente se utilizan para la elaboración de sacos de café y artesanías, lo que ha afectado los ingresos de las comunidades que cultivan esta planta. Por estas razones, los cultivadores de fique necesitan nuevas aplicaciones para el fique para aumentar su demanda y mejorar sus economías locales.

have similar properties to synthetic composites, with less environmental impact (Sahoo et al., 2017).

CORN AND FIQUE PRODUCTION IN COLOMBIA

In the study presented in this paper, the authors explored the use of wastes from corn crops (*Zea mays*) and natural fibers obtained from fique plants (*Furcraea andina*) to develop new NFCs motivated by the potential benefits of these new materials at the environmental, societal, and economic levels. Also, the authors identified a gap in the existing biomaterials and NFCs literature, which they intended to address with their research program; even though there is abundant literature that describes the uses of fibers from corn and other agave plants to produce biocomposites, there is no literature that discusses the combined use of corn and fique fibers (Zhou et al., 2015; Wang et al., 2011) much less with a design focus. Ultimately, by developing new NFCs, the authors intended to create new economic opportunities for rural communities in Colombia and other developing countries. These new materials may offer, in the future, a profitable alternative to illicit crops in areas where rural farmers are at risk of falling into illegal economic practices, minimize CO₂ emissions related to corn production, and reduce the use of certain plastic materials. The authors experimented with wastes from corn crops due to the environmental and economic impacts of current management practices of these wastes in Colombia and other Latin American countries. According to Fenalce (the Colombian Association of Grain and Legumes Growers), in Colombia, there are more than 450,000 hectares planted with corn, and around 60% of the biomass from these crops is burnt after the harvest, liberating considerable amounts of CO₂ to the atmosphere. In some cases, wastes from corn crops are plowed into the soil after the harvest, which may cause serious phytosanitary problems for new crops. Additionally, the price of corn in Colombia has dropped dramatically since the implementation of a bilateral free trade agreement with the United States in 2012, which has affected Colombian corn producers, who are looking for new markets and corn-based products with higher added value.

Likewise, the authors experimented with fibers from fique plants due to the economic and social difficulties facing fique farmers in Colombia. Fique, shown in Figure 1, is a type of agave native to the Andean region that has been widely cultivated in Colombia and Ecuador since pre-Hispanic times. According to Fenalfique (the Colombian Association of Fique Producers), the livelihood of more than 70,000 rural families in Colombia depends on fique cultivation, especially in areas historically affected by the country's armed conflict. Even though these fibers are very versatile, they have been replaced by synthetic materials and are currently used for making coffee sacks and handcrafts, which has affected the income of the communities that grow this plant. For these reasons, fique growers are in need of new applications for fique to increase its demand and improve their local economies.



↑
 FIG 1. Plantación de fique (izquierda), fibras de fique (centro) y artesanías de fique (derecha) (Imágenes: Autores).
 FIG 1. Fique plantation (left), fique fibers (center), and fique handcrafts (right) (Images: Authors).

INVESTIGACIÓN DE PREGRADO

La investigación de pregrado se define como una “investigación guiada o indagación creativa realizada por estudiantes de pregrado con el objetivo de hacer una contribución académica o artística al conocimiento” (Council on Undergraduate Research, 2021). Se reconoce como una práctica de alto impacto que puede promover un aprendizaje profundo y significativo, aumentar la retención de estudiantes y las tasas de graduación, mejorar la participación y el rendimiento académico de los estudiantes, y contribuir al éxito de los estudiantes de comunidades históricamente desatendidas (Kuh et al., 2013). Según Kuh, las Prácticas de Alto Impacto “nivelan el campo de juego, especialmente para estudiantes de familias de bajos ingresos y otros que históricamente han sido desatendidos” (Kuh, 2008, p. 22).

A pesar de los efectos positivos que tiene la investigación de pregrado en el éxito académico de los estudiantes marginados, se ha documentado que su participación en estas actividades es relativamente baja (Finley & McNair, 2013). Según Bangera y Brownell (2014), esta situación se debe en parte a las barreras estructurales a las que se enfrentan los estudiantes desatendidos, como la falta de conocimiento de las oportunidades de investigación existentes y los beneficios de participar en estas actividades, las dificultades percibidas para interactuar con el profesorado o barreras personales financieras y personales.

Como respuesta a estas y otras barreras, las instituciones académicas han creado programas para promover la participación de estudiantes subrepresentados en la investigación (p. ej., UMBC, 2022; The Leadership Alliance, 2022; UNC-CH, 2022). Estos programas destacan la importancia de involucrar a los estudiantes en la investigación desde las primeras etapas de su educación como una estrategia para ayudarlos a superar algunas de las barreras estructurales mencionadas anteriormente, fortalecer sus habilidades de investigación y conocimiento disciplinario, y atraerlos a carreras de investigación. Sin embargo, la mayoría de estos programas se enfocan en apoyar a los estudiantes de STEM (Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas, or sus siglas en inglés) y, por lo general, no brindan apoyo a los estudiantes de Artes y Diseño. Considerando el escaso apoyo que

UNDERGRADUATE RESEARCH

Undergraduate research is defined as a “mentored investigation or creative inquiry conducted by undergraduates that seeks to make a scholarly or artistic contribution to knowledge” (Council of Undergraduate Research, 2021). It is recognized as a High-Impact Practice that may promote deep and meaningful learning, increase student retention and graduation rates, improve student engagement and academic performance, and contribute to the success of students from historically underserved communities (Kuh et al., 2013). According to Kuh, High-Impact Practices “level the playing field, especially for students from low-income family backgrounds and others who have been historically underserved” (Kuh, 2008, p. 22).

Despite the positive effects that undergraduate research has on the academic success of underserved students, it has been reported that their participation in these activities is relatively low (Finley & McNair, 2013). According to Bangera and Brownell (2014), this situation is partially caused by structural barriers faced by underrepresented students, such as a lack of awareness of existing research opportunities and the benefits of participating in these activities, perceived difficulties in interacting with faculty, or financial and personal barriers.

As a response to these and other barriers, academic institutions have created programs to promote the engagement of underrepresented students in research (e.g., UMBC, 2022; The Leadership Alliance, 2022; UNC-CH, 2022). These programs highlight the importance of getting students involved in research from the early stages of their education as a strategy to help them overcome some of the structural barriers mentioned before, strengthen their research skills and disciplinary knowledge, and attract them to research careers. However, most of these programs focus on supporting STEM students and usually do not provide support for students in Arts and Design.

Considering the scarce support that students in these disciplines have to pursue their interests in research, and taking into consideration the enormous benefits that participating in this kind of High-Impact Practice have for undergraduate students, the authors created a new capstone course and a new research group in

tienen los estudiantes de estas disciplinas para desarrollar sus intereses en investigación, y tomando en cuenta los enormes beneficios que tiene para los estudiantes de pregrado participar en este tipo de Prácticas de Alto Impacto, los autores crearon un nuevo taller de proyecto de grado y un nuevo semillero de investigación en el programa de diseño industrial de la Universidad Jorge Tadeo Lozano, asociado a su programa de investigación en desarrollo de NFCs.

Durante el taller de proyecto de grado de un año, los estudiantes colaboraron con los autores para desarrollar nuevos materiales y, principalmente, diseñar posibles aplicaciones comerciales e industriales para estos nuevos NFC. En última instancia, este taller fortaleció las habilidades de investigación de los estudiantes, los ayudó a establecer relaciones de mentoría con los profesores de diseño, les presentó nuevas trayectorias profesionales y les brindó oportunidades para materializar y reforzar su compromiso con el medio ambiente.

INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

Entre 2018 y 2021, los autores dirigieron un programa de investigación destinado a explorar el uso de desechos de cultivos de maíz y fibras de plantas de fique para desarrollar nuevos NFC y nuevos productos que los utilizaran. A lo largo de este programa de investigación, los autores asesoraron a cinco cohortes de estudiantes universitarios en diseño industrial, quienes llevaron a cabo sus proyectos finales en concordancia con la agenda de investigación del programa. Este programa fue financiado por subvenciones internas y la inversión de una empresa privada interesada en producir y comercializar algunas de las aplicaciones desarrolladas por los investigadores. Al momento de escribir este artículo, algunos de los productos y materiales aún están en desarrollo, y la propiedad intelectual derivada de este programa de investigación está en proceso de protección. Por estas razones, el artículo omite detalles técnicos específicos que podrían poner en peligro los reclamos de propiedad intelectual.

DESARROLLO DE NUEVOS MATERIALES COMPUESTOS DE FIBRAS NATURALES

El proceso seguido por el semillero de investigación para desarrollar nuevos NFC fue el siguiente:

1. **Establecer Estado del Arte:** El proyecto comenzó estableciendo el estado del arte en NFCs y biomateriales que contienen fibras de maíz y fique y otras agaváceas. Los investigadores realizaron una revisión exhaustiva de la literatura en numerosas bases de datos científicas para identificar artículos, investigadores e instituciones relevantes que investigan y desarrollan este tipo de biomateriales. Adicionalmente, se realizó una revisión de mercado y patentes para identificar materiales y productos existentes con propiedades, componentes y características similares.
2. **Diseño de experimentos de materiales:** Los autores diseñaron y planificaron una amplia gama de experimentos para obtener una nueva familia de biocompuestos que utilizaron residuos de maíz y fibras de fique como materiales de refuerzo, y biopolímeros, cemento y resina de poliéster como matrices. El diseño de estos experimentos se basó en la revisión de la literatura y contó con el apoyo de un investigador del Departamento de Química de la universidad de los autores.

the industrial design program at Universidad Jorge Tadeo Lozano, associated with their research program on NFCs development. During the one-year capstone course, students collaborated with the authors to develop new materials and, primarily, to design potential commercial and industrial applications for these new NFCs. Ultimately, this capstone course strengthened the students' research skills, helped them build mentoring relationships with design faculty, presented them with new career paths, and provided them with opportunities to materialize and reinforce their commitment to the environment.

RESEARCH AND DEVELOPMENT

Between 2018 and 2021, the authors led a research program intended to explore the use of wastes from corn crops and fibers from fique plants for developing new NFCs and new products that utilized them. Throughout this research program, the authors mentored five cohorts of undergraduate students in industrial design, who conducted their capstone projects in alignment with the program's research agenda. This program was funded by internal grants and the investment of a private company interested in producing and commercializing some of the applications developed by the researchers. At the time of this writing, some of the products and materials are still in development, and the intellectual property derived from this research program is in the process of being protected. For these reasons, the article omits specific technical details that might jeopardize the intellectual property claims.

DEVELOPING NEW NATURAL FIBER COMPOSITES

The process followed by the research group to develop new NFCs was as follows:

1. **Establish State of the Art:** The project started by establishing the state of the art in NFCs and biomaterials containing fibers from corn and fique and other agave plants. The researchers conducted a thorough literature review in numerous scientific databases to identify relevant articles, researchers, and institutions investigating and developing this kind of biomaterials. Additionally, a market and patent review was conducted to identify existing materials and products with similar properties, components, and characteristics.
2. **Design Materials Experiments:** The authors designed and planned a broad range of experiments to obtain a new family of biocomposites that used corn waste and fique fibers as reinforcing materials, and biopolymers, cement, and polyester resin as matrices. The design of these experiments was based on the literature review and had the support of a researcher from the Department of Chemistry at the authors' university.
3. **Conduct Materials Experiments:** The research group conducted more than 500 experiments in the lab, where the following variables were adjusted to obtain the new materials: proportions of fiber and matrices, fiber length, corn waste granulometry, processing temperature, processing time, mold materials, and mold release agents. A sample of the materials obtained can be seen in Figure 2.

3. **Experimentación con materiales:** el grupo de investigación realizó más de 500 experimentos en el laboratorio, donde se ajustaron las siguientes variables para obtener los nuevos materiales: proporciones de fibra y matrices, longitud de fibra, granulometría de residuos de maíz, temperatura de procesamiento, tiempo de procesamiento, materiales de molde y agentes de desmolde. Una muestra de los materiales obtenidos se puede ver en la figura 2.
4. **Realización de pruebas de materiales:** se seleccionó un subconjunto de formulaciones de materiales prometedoras obtenidas en la fase de experimentación para realizar más pruebas a fin de determinar sus propiedades, características, comportamiento e impacto ambiental. Estos materiales prometedores se sometieron a pruebas mecánicas, pruebas de propiedades térmicas y acústicas y pruebas de resistencia a la corrosión y al deterioro biológico. Basándose en los resultados, los investigadores seleccionaron seis formulaciones que se comportaron bien en las pruebas, fueron fáciles de replicar y escalar, y ofrecieron una amplia gama de propiedades para múltiples aplicaciones potenciales.
5. **Documentar, estandarizar y comunicar el proceso:** El proceso de experimentación se documentó minuciosamente para replicarlo y escalarlo en el futuro. Una vez que se identificaron los seis nuevos materiales, se estandarizó su proceso de producción (por ejemplo, proporciones de materiales, temperaturas, tiempos de procesamiento, etc.). Estos procedimientos se sintetizaron visualmente en un conjunto de carteles diseñados para comunicar el proceso de producción a las múltiples cohortes de estudiantes universitarios que participaron en el equipo de investigación.
4. **Conduct Materials Testing:** A subset of promising material formulations obtained in the experimentation phase was selected for further testing to determine their properties, characteristics, behavior, and environmental impact. These promising materials were subjected to mechanical testing, testing for thermal and acoustic properties, and testing for resistance to corrosion and biological deterioration. Based on the results of these tests, the researchers selected six formulations that performed well in the tests, were easy to replicate and scale, and offered a wide range of properties for multiple potential applications.
5. **Document, Standardize, and Communicate the Process:** The experimentation process was documented thoroughly in order to be replicated and scaled in the future. Once the six new materials were identified, their production process was standardized (e.g., materials proportions, temperatures, processing times, etc.). These procedures were visually synthesized in a set of posters designed to communicate the production process to the multiple cohorts of undergraduate students who participated in the research team.



FIG 2. Estudiantes de pregrado realizando experimentos con materiales (izquierda) y muestras de materiales obtenidos por el equipo de investigación (derecha).

FIG 2. Undergraduate students conducting material experiments (left), and samples of materials obtained by the research team (right).

DISEÑO DE NUEVAS APLICACIONES NFC

La metodología utilizada por el semillero de investigación para diseñar nuevas aplicaciones para las NFC se basó en el modelo de diseño Doble Diamante propuesto por el Design Council de Reino Unido (2007), como se puede observar en la figura 3. El proceso seguido por los estudiantes de pregrado durante la experiencia final de un año se describe a continuación:

- 1. Investigación:** los estudiantes conocieron el cuerpo de trabajo creado por el semillero de investigación y tuvieron la oportunidad de explorar y experimentar con los diferentes materiales creados por los investigadores para inspirar su proyecto final. Con base en esta experiencia, los estudiantes seleccionaron el tipo de material a utilizar en su proyecto y la categoría de producto a desarrollar a lo largo de su proyecto final. La investigación específica para el proyecto final de los estudiantes comenzó con la identificación de una necesidad o una oportunidad para ser abordada o resuelta a través de un nuevo producto. Esta exploración permitió a los estudiantes ampliar su comprensión del problema, las personas y el contexto, y empatizar con los usuarios potenciales y las partes interesadas. En esta fase, los estudiantes utilizaron métodos como observaciones, entrevistas, grupos focales, investigación etnográfica, revisión de literatura e investigación de mercado.
- 2. Hallazgos:** los estudiantes identificaron los problemas, necesidades u oportunidades específicos para abordar con su producto. Esto se logró organizando, sintetizando y priorizando la información recopilada en la fase anterior. Hasta este momento, los estudiantes del semillero de investigación colaboraron y compartieron información valiosa para sus proyectos. Una vez que identificaron los problemas específicos o las oportunidades para intervenir, su trabajo se volvió individual. Sin embargo, es importante mencionar que a lo largo de la experiencia final, todos los estudiantes trabajaron en estrecha colaboración y construyeron fuertes lazos como equipo de investigación. Para generar *insights*, los estudiantes utilizaron métodos como mapas de viaje del usuario, mapas de empatía, diagramas de afinidad y crearon perfiles persona.
- 3. Ideación:** esta fase comenzó al final del primer semestre del taller de proyecto de grado. Los estudiantes generaron cientos de ideas de productos para abordar los problemas u oportunidades identificados en la fase anterior. El único requisito para estas ideas de nuevos productos era el uso de los NFC desarrollados por el grupo; sin embargo, en algunos casos, los estudiantes decidieron explorar diferentes biomateriales (por ejemplo, micelio, algodón, aserrín), lo que implicó que dividieran su tiempo entre experimentar con estos materiales y diseñar sus productos. Además, las ideas propuestas en esta fase debían estar informadas e inspiradas por sus investigaciones previas y por una comprensión empática del problema, las personas y el contexto. En esta etapa, las ideas no fueron evaluadas ni juzgadas, y los estudiantes utilizaron métodos como bocetos, lluvia de ideas y SCAMPER.

DESIGNING NEW NFCS APPLICATIONS

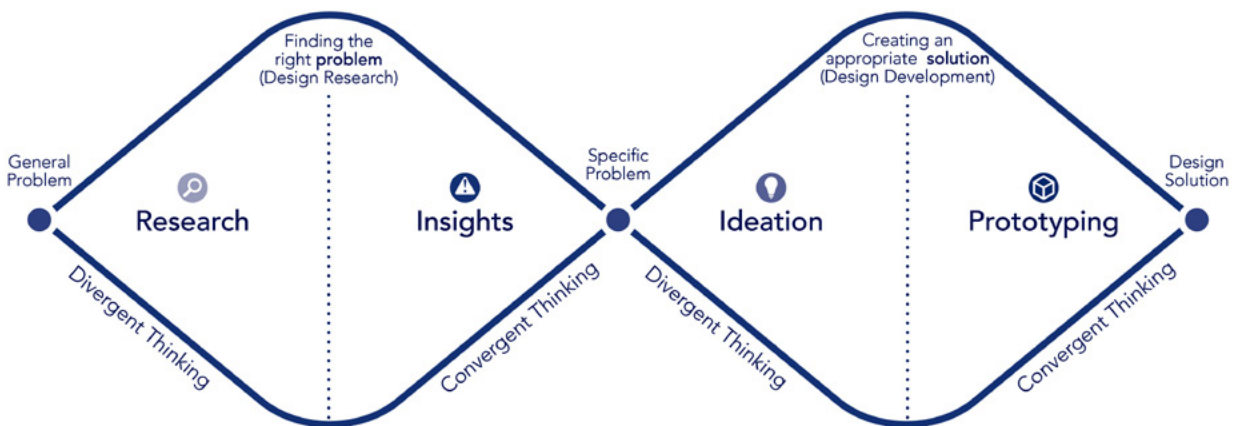
The methodology used by the research group to design new applications for the NFCs was based on the Double Diamond Model of Design proposed by the British Design Council (2007), as seen in Figure 3. The process followed by the undergraduate students during the one-year capstone experience is described below:

- 1. Research:** Students were introduced to the body of work created by the research group and had the opportunity to explore and experiment with the different materials created by the researchers to inspire their capstone project. Based on this experience, students selected the type of material to use in their project and the category of product to develop throughout their capstone project. Specific research for the students' capstone project started with identifying a need or an opportunity to be addressed or solved through a new product. This exploration allowed students to expand their understanding of the problem, people, and context, and empathize with potential users and stakeholders. In this phase, students used methods such as observations, interviews, focus groups, ethnographic research, literature reviews, and market research.
- 2. Insights:** Students identified the specific problems, needs, or opportunities to address with their product. This was achieved by organizing, synthesizing, and prioritizing the information collected in the previous phase. Until this point, students in the research group collaborated and shared valuable information for their projects. Once students identified the specific problems or opportunities to intervene, their work became more individualistic. However, it is important to mention that throughout the capstone experience, all students worked closely together and built strong ties as a research team. In this phase, students used methods such as user journey maps, empathy maps, affinity diagrams, and personas.
- 3. Ideation:** This phase started at the end of the first semester of the year-long capstone experience. In this phase, students generated hundreds of product ideas to address the problems or opportunities identified in the previous phase. The only requirement for these new product ideas was the use of the NFCs developed by the group; however, in some cases, students decided to explore different biomaterials (e.g., mycelium, cotton, sawdust), which implied that they divided their time between experimenting with these materials and designing their products. Also, the ideas proposed in this phase had to be informed and inspired by their previous research and by an empathic understanding of the problem, people, and context. In this stage, ideas were not evaluated or judged, and students used methods such as sketching, brainstorming, and SCAMPER.

4. **Creación de prototipos:** los estudiantes materializaron, probaron y refinaron sus ideas de productos a través de varias iteraciones, hasta que su solución de diseño fue satisfactoria. Abordaron la creación de cada modelo y prototipo como un “experimento” destinado a probar aspectos específicos de sus productos (por ejemplo, estética, funcionalidad, ergonomía, resistencia mecánica, etc.). Además, en esta fase, los alumnos experimentaron con los nuevos NFC, aprendieron a prepararlos, los aplicaron en sus modelos y prototipos y propusieron variaciones a la formulación original. Finalmente, probaron sus ideas de productos en contextos reales, con usuarios reales y partes interesadas para recopilar sus impresiones y comentarios. En esta fase, los estudiantes utilizaron métodos de creación de prototipos, como bocetos, representaciones digitales, modelos funcionales, modelos de apariencia y prototipos experimentales.

4. **Prototyping:** Students materialized, tested, and refined their product ideas through several iterations, until their design solution was developed at satisfaction. Students approached the creation of each model and prototype as an “experiment” intended to test specific aspects of their products (e.g., aesthetic, functionality, ergonomics, mechanic resistance, etc.). Additionally, in this phase, students experimented with the new NFCs, learned how to prepare them, applied them in their models and prototypes, and proposed variations to the original formulation. Finally, students tested their product ideas in real contexts and with real users and stakeholders to collect their impressions and feedback. In this phase, students used prototyping methods such as sketch models, digital rendering, operational models, appearance models, and experimental prototypes.

MODELO DE DISEÑO DOBLE DIAMANTE
DOUBLE DIAMOND MODEL OF DESIGN



Source: British Design Council (adaptation)

FIG 3. Adaptación del autor del Double Diamond Model of Design propuesto por el Design Council de Reino Unido (2007).
FIG 3. Author's adaptation of the Double Diamond Model of Design proposed by the British Design Council (2007).

RESULTADOS

Como resultado de los procesos descritos en la sección anterior, el equipo de investigación desarrolló una familia de seis nuevos biocompuestos y los estudiantes crearon una colección de una docena de productos y aplicaciones comerciales utilizando estos nuevos materiales. Estos resultados se describen en las siguientes páginas.

RESULTS

As results of the processes described in the previous section, the research team developed a family of six new biocomposites, and the students created a collection of a dozen products and commercial applications using these new materials. These results are described in the following pages.

NUEVOS MATERIALES COMPUESTOS DE FIBRAS NATURALES

El proceso de experimentación con residuos de cultivos de maíz y fibras de fique combinados con diferentes matrices, resultó en seis nuevos y distintos materiales biocompuestos (figura 4). Para desarrollar estos materiales reforzados, el punto de partida fue utilizar material vegetal procesado de diversas maneras. Esto permitió a los investigadores determinar de qué manera el tamaño de partícula, el tipo de separación o el proceso mecánico afectaban las propiedades, las características y el comportamiento del nuevo material. Asimismo, las formulaciones de los polímeros utilizados como matrices variaron en composición y proporción. Durante la fase de experimentación de materiales, los investigadores realizaron más de 500 variaciones de la composición de los materiales, lo que les permitió refinar sus procesos de formulación y producción. Los seis materiales desarrollados por los investigadores se presentan a continuación.

NEW NATURAL FIBER COMPOSITES

The experimentation process with wastes from corn crops and fique fibers combined with different matrices, resulted in six new and distinct biocomposite materials (Figure 4). To develop these reinforced materials, the starting point was using plant material processed in different ways. This allowed the researchers to determine how the particle size, separation type, or mechanical process affected the properties, characteristics, and behavior of the new material. Likewise, the formulations of the polymers used as matrices varied in composition and proportion. During the materials experimentation phase, the researchers made more than 500 variations of the materials' composition, which allowed them to refine their formulation and production processes. The six materials developed by the researchers are presented as follows.

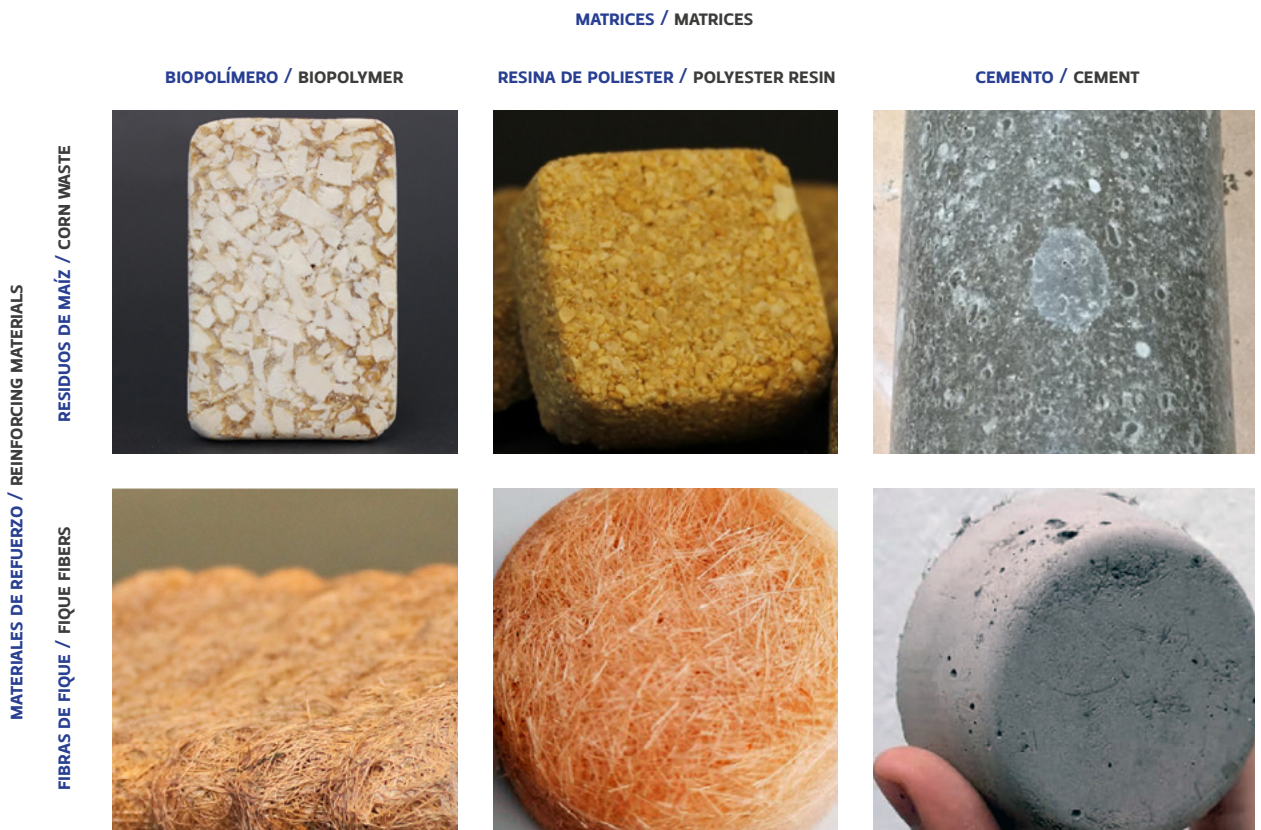


FIG 4. Muestras de nuevos NFC desarrollados por los investigadores utilizando residuos de maíz y fibras de fique como materiales de refuerzo.

FIG 4. Samples of new NFCs developed by the researchers using corn waste and fique fibers as reinforcing materials.

- **Biopolímero + Residuos de Maíz:** Este material fue refinado a través de varios ciclos de experimentación enfocados en los procesos de separación de residuos, lo que permitió obtener tres tipos diferentes de formulación. El primer material obtenido se caracterizó por ser muy ligero y absorbente, con una textura suave pero rugosa. La segunda formulación permitió generar superficies uniformes, resistentes, rígidas y livianas con una textura suave y uniforme. El último biomaterial permitía un punto intermedio entre los dos anteriores. Todos los biomateriales reforzados con residuos de maíz pueden formarse mediante diversos procesos con calidades plásticas aptas para el termoformado, permiten el uso de moldes complejos y pueden laminarse. El material acabado puede ser transformado físicamente (tallado, lijado, cortado) y permite varios acabados durante el conformado o posterior aplicación. Un análisis preliminar muestra que este material tiene excelentes cualidades de aislamiento térmico y acústico, por lo que puede ser utilizado para aplicaciones de construcción y automotrices.
- **Biopolímero + Fibras de Fique:** Este material fue creado a partir de derivados del fique. El biomaterial resultante tiene excelentes cualidades de resistencia al impacto; es ligero, poroso y ligeramente áspero al tacto. El grosor se puede graduar fácilmente y mantiene propiedades de resistencia significativas incluso en presentaciones delgadas. El estado y transformación de la fibra previa a su combinación con las matrices fueron determinantes para lograr la calidad requerida, lo que implicó un importante esfuerzo de ajuste y refinamiento.
- **Resina de Poliéster + Residuos de Maíz:** El uso de resinas a base de petróleo reforzadas con fibras vegetales reemplaza el uso de otros materiales de alta toxicidad o manejo ambiental complejo, como la fibra de vidrio. El uso de residuos de maíz permitió reducir la cantidad de resina utilizada en comparación con la utilizada para la fibra de vidrio. El residuo de maíz mostró una óptima capacidad de absorción, lo que favoreció su adhesión a la matriz y produjo un biomaterial altamente homogéneo. Adicionalmente, durante un análisis preliminar se determinó que este material tiene excelentes propiedades para el aislamiento térmico y acústico.
- **Resina de Poliéster + Fibras de Fique:** Este material a base de fique requirió más experimentación que los otros materiales debido a la dificultad de lograr una distribución homogénea de fibras. Sin embargo, una vez que se logró un proceso estable, el material resultante fue muy resistente al impacto y liviano, lo que lo convierte en un excelente candidato para aplicaciones estructurales exigentes.
- **Cemento + Residuos de Maíz:** En la experimentación con cemento y residuos de maíz, el objetivo principal fue obtener un compuesto mucho más liviano que el concreto convencional y al mismo tiempo reducir el uso de cemento sin afectar su resistencia. Como resultado, el NFC obtenido es entre un 30 y un 40% más ligero que el hormigón normal, se puede texturizar y pigmentar fácilmente y es adecuado para aplicaciones no estructurales. Además, al igual que los otros NFC desarrollados por los investigadores durante un
- **Biopolymer + Corn Waste:** This material was refined through several cycles of experimentation focused on the waste separation processes, which allowed to obtain three different types of formulation. The first material obtained was characterized by a high lightness and a strong absorption capacity, with a smooth but rough texture. The second formulation allowed the generation of uniform, resistant, rigid and light surfaces with a smooth and uniform texture. The last biomaterial allowed an intermediate point between the two previous ones. All the biomaterials reinforced with corn waste can be formed using various processes with plastic qualities suitable for thermoforming, allow the use of complex molds, and can be laminated. The finished material can be physically transformed (carving, sanding, cutting) and allows various finishes during forming or subsequent application. A preliminary analysis shows that this material has excellent thermal and acoustic insulation qualities, for which it can be used for construction and automotive applications.
- **Biopolymer + Fique Fibers:** This material was created using fique byproducts. The resulting biomaterial has excellent impact resistance qualities; it is light, porous, and slightly rough to the touch. The thickness can be easily graduated and maintains significant strength properties even in thin presentations. The presentation and transformation of the fiber prior to its combination with the matrices were decisive to achieve the required quality, which implied an important effort of adjustment and refinement.
- **Polyester Resin + Corn Waste:** The use of petroleum-based resins reinforced with vegetable fibers replaces the use of other materials of high toxicity or complex environmental management, such as fiberglass. The use of corn waste allowed to reduce the amount of resin used in comparison to that used for fiberglass; the corn waste showed an optimal absorption capacity, which was favorable for its adhesion to the matrix and produced a highly homogenous biomaterial. Additionally, it was determined in a preliminary analysis that this material has excellent properties for thermal and acoustic insulation.
- **Polyester Resin + Fique Fibers:** This fique-based material required more experimentation than the other materials due to the difficulty of achieving a homogeneous fiber distribution. However, once a stable process was achieved, the resulting material was very resistant to impact and lightweight, which makes it an excellent candidate for demanding structural applications.
- **Cement + Corn Waste:** In the experimentation with cement and corn waste, the main goal was to obtain a composite much lighter than conventional concrete while reducing the use of cement without affecting its resistance. As a result, the NFC obtained is 30 to 40% lighter than regular concrete, can be textured and pigmented easily, and is suitable for non-structural applications. Furthermore, similar to the other NFCs developed by the researchers, it was determined in a preliminary analysis that this material is an excellent acoustic and thermal insulator.

análisis preliminar, se determinó que este material tiene excelentes propiedades para el aislamiento térmico y acústico.

- **Cemento + Fibras de Fique:** Este material combinó fibras de fique y cemento, dando como resultado un concreto liviano. Si bien este material no es tan liviano como el obtenido con los residuos de maíz, la disposición de las fibras de fique fortaleció el cemento y produjo un NFC con mejor resistencia a diversos esfuerzos físicos que el concreto común. El principal desafío para producir este material fue obtener una distribución homogénea de fibras dentro de la mezcla. Desafortunadamente, este desafío no se superó por completo, por lo que es necesario continuar con el proceso experimental para garantizar una distribución adecuada de las fibras y una mezcla homogénea, manteniendo las excelentes cualidades mecánicas del material.

NUEVAS APLICACIONES NFC

Las aplicaciones creadas por los estudiantes para los nuevos materiales descritos anteriormente, se pueden clasificar en tres grupos: (1) aplicaciones para la industria de la construcción, (2) aplicaciones para embalaje y (3) otras aplicaciones, incluida la automotriz. Estas industrias son las mayores consumidoras de espumas plásticas, una industria de \$ 110 mil millones de dólares estadounidenses, que pueden sustituirse parcialmente por los nuevos NFC desarrollados por el equipo de investigación.

APLICACIONES EN LA CONSTRUCCIÓN

La industria de la construcción es una potencial beneficiaria de los nuevos NFC dadas las propiedades de estos materiales, las necesidades de este sector y la diversidad de aplicaciones requeridas. Todos los materiales obtenidos mostraron importantes cualidades de aislamiento térmico y acústico útiles para la construcción, especialmente aquellos que contienen desechos de maíz. Además, los materiales reforzados con fibras de fique ganaron resistencia a la vez que disminuyeron el peso, lo que los hace interesantes para crear aplicaciones en el sector de la construcción. Como se puede ver en la figura 5, los estudiantes aprovecharon las propiedades estéticas y mecánicas de los nuevos NFC para crear formas orgánicas complejas, aplicar múltiples acabados y texturas y crear productos livianos aplicables en la industria de la construcción.

- **Cement + Fique Fibers:** This material combined fique fibers and cement, resulting in lightweight concrete. Even though this material is not as light as the one obtained with corn waste, the arrangement of the fique fibers strengthened the cement and produced an NFC with better resistance to various physical stresses than regular concrete. The main challenge to producing this material was obtaining a homogeneous fiber distribution inside the mixture. Unfortunately, this challenge was not completely overcome, so it is necessary to continue the experimental process to ensure adequate fiber distribution and homogenous mixing while keeping the material's outstanding mechanical qualities.

NEW NFCS APPLICATIONS

The applications created by the students for the new materials described before, can be classified in three groups: (1) applications for the construction industry, (2) applications for packaging, and (3) other applications including automotive. These industries are the largest consumers of plastic foams—a \$110 Billion U.S. dollar industry—which can be partially substituted by the new NFCs developed by the research team.

CONSTRUCTION APPLICATIONS

The construction industry is a potential beneficiary of the new NFCs given the properties of these materials, the needs of this sector, and the diversity of applications required. All the materials obtained showed phenomenal thermal and acoustic insulation qualities useful for construction, especially those that implemented corn waste. Furthermore, the materials reinforced with fique fibers gained resistance while decreasing weight, which makes them interesting for creating applications in the construction sector. As can be seen in Figure 5, the students took advantage of the aesthetic and mechanical properties of the new NFCs to create complex organic shapes, apply multiple finishes and textures, and create lightweight products applicable in the construction industry.



PANEL ACÚSTICO PARA USO COMERCIAL
Resina de Poliéster + Residuos de Maíz
Diseñador: A. Gallego

ACOUSTIC PANEL FOR COMMERCIAL USE
Polyester Resin + Corn Waste
Designer: A. Gallego



MÓDULO PARA ESTRUCTURAS TEMPORALES
Cemento + Residuos de Maíz
Diseñador: J. Rojas

MODULE FOR TEMPORARY STRUCTURES
Cement + Corn Waste
Designer: J. Rojas



PANEL DECORATIVO PARA INTERIORES BIOFÍLICOS
Biopolímero + Residuos de Maíz
Diseñador: D. Fiquitiva

DECORATIVE PANEL FOR BIOPHILIC SPACES
Biopolymer + Corn Waste
Designer: D. Fiquitiva



FIG 5. Ejemplos de aplicaciones de construcción diseñadas por los alumnos utilizando los nuevos NFC.

FIG 5. Examples of construction applications designed by the students using the new NFCs.

APLICACIONES DE EMBALAJE

Los empaques es uno de los campos más prometedores para los biocompuestos desarrollados en este programa de investigación. Teniendo en cuenta las propiedades similares entre los materiales obtenidos a partir de residuos de maíz y los plásticos espumados (por ejemplo, espuma de poliestireno), es posible imaginar que este NFC puede convertirse en un sustituto viable para ciertos plásticos espumados de un solo uso. Adicionalmente, los biopolímeros reforzados con fique son aptos para la protección de productos delicados considerando las propiedades mecánicas de este NFC. Por ejemplo, los dispositivos digitales pueden protegerse con el embalaje de este material, como lo demostró G. Cuéllar en su proyecto final (figura 6, primera imagen). El campo del embalaje demanda cada vez más materiales respetuosos con el medio ambiente sin sacrificar cualidades en la protección de su contenido. Asimismo, los nuevos NFC pueden utilizarse para proteger otros productos delicados como la artesanía (proyecto de L. Mora) y la alta cosmética (proyecto de I. Lesmes).

PACKAGING APPLICATIONS

Packaging is one of the most promising fields for the biocomposites developed in this research program. Considering the similar properties between the materials obtained from corn waste and foamed plastics (e.g., Styrofoam), it is possible to imagine that this NFC can become a viable substitute for certain one-use foamed plastics. Additionally, the biopolymers reinforced with fique are suitable for protecting delicate products considering the mechanical properties of this NFC. For instance, digital devices can be protected using the packaging made of this material, as was demonstrated by G. Cuellar in her capstone project (Figure 6, first image). The packaging field increasingly demands more environmentally friendly materials without sacrificing qualities in protecting its contents. Likewise, the new NFCs can be used to protect other delicate products such as handcrafts (project by L. Mora) and high-end cosmetics (project by I. Lesmes).



EMBALAJE PARA PRODUCTOS ELECTRÓNICOS.

Biopolímero + Fibra de Fique
Diseñador: G. Cuéllar

PACKAGING FOR ELECTRONIC PRODUCTS

Biopolymer + Fique Fiber
Designer: G. Cuellar



SISTEMA DE EMBALAJE PARA ARTESANÍAS.

Micelio + Residuos de Maíz
Diseñador: L. Mora

PACKAGING SYSTEM FOR HANDCRAFT

Mycelium + Corn Waste
Designer: L. Mora



ENVASES PARA COSMÉTICOS

Biopolímero + Fibra de Fique
Diseñador: I. Lesmes

PACKAGING FOR COSMETICS

Biopolymer + Fique Fiber
Designer: I. Lesmes



FIG 6. Ejemplos de aplicaciones de empaque diseñadas por los estudiantes utilizando los nuevos NFC y otros materiales (por ejemplo, micelio).

FIG 6. Examples of packaging applications designed by the students using the new nfc's and other materials (i.e., mycelium).

OTRAS APLICACIONES (INCLUIDA LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ)

En las últimas décadas, la industria automotriz ha ido implementando fibras vegetales para reducir el peso de los vehículos y mejorar su eficiencia de combustible. Dentro de los materiales obtenidos, los que incorporan resinas de poliéster tienen un importante potencial en este campo de aplicación ya que estos materiales son ligeros y resistentes. Sin embargo, las estrictas regulaciones de este sector implican que estos materiales deben pasar por extensas pruebas para ser aceptados y adoptados en esta industria. A. Tafur creó una aplicación en esta industria, quien exploró los nuevos NFC en piezas de motocicletas (figura 7, última imagen). Adicionalmente, la industria del mueble puede verse beneficiada de los nuevos materiales aplicados a colecciones funcionales de mobiliario como las diseñadas por K. De La Hoz y V. Rodríguez. En ambos casos, los nuevos NFC se utilizaron para crear muebles livianos, resistentes, adaptables y flexibles para las nuevas condiciones de vida impuestas por la pandemia de COVID-19 y el trabajo remoto.

OTHER APPLICATIONS (INCLUDING AUTOMOTIVE)

In the last decades, the automotive industry has been implementing vegetable fibers to reduce the weight of vehicles and improve their fuel efficiency. Within the materials obtained, those incorporating polyester resins have significant potential in this field of application since these materials are lightweight and resistant. However, the strict regulations of this sector imply that these materials must go through extensive tests to be accepted and adopted in this industry. An application in this industry was created by A. Tafur, who explored the new NFCs in motorcycle parts (Figure 7, last image). Additionally, the furniture industry can be beneficiary of the new materials applied to new functional collections of furniture such as the ones designed by K. De La Hoz and V. Rodríguez. In both cases, the new NFCs were used to create pieces of furniture that are lightweight, resistant, adaptable, and flexible for the new living conditions imposed by the COVID-19 pandemic and remote work.



MUEBLES PARA OFICINA EN CASA

Cemento + Resina Poliéster + Fibra Fique
Diseñador: K. de la Hoz

HOME OFFICE FURNITURE

Cement + Polyester Resin + Fique
Designer: K. De la Hoz



MESA PLEGABLE

Biopolímero + Aserrín
Diseñador: V. Rodríguez

FOLDABLE TABLE

Biopolymer + Sawdust
Designer: V. Rodríguez



CARENADOS DE MOTOCICLETA

Resina Poliéster + Fibra Fique
Diseñador: A. Tafur

MOTORCYCLE FAIRINGS

Polyester Resin + Fique Fiber
Designer: A. Tafur



FIG 7. Ejemplos de otras aplicaciones diseñadas por los estudiantes utilizando los nuevos NFC y otros materiales (por ejemplo, aserrín).

FIG 7. Examples of other applications designed by the students using the new NFCs and other materials (i.e., sawdust).

CONCLUSIONES

El programa de investigación descrito en este artículo permitió al equipo de investigación obtener una familia de seis nuevos compuestos de fibras naturales que utilizaron residuos de maíz y fibras de fique, y diseñar una colección de productos para diversas industrias como embalaje, construcción y automotriz.

A nivel experimental, estos nuevos materiales han mostrado propiedades beneficiosas para estas industrias ya que son de alta resistencia al impacto, baja conducción térmica, alta capacidad de aislamiento acústico y bajo peso. Además, la creación de nuevos productos y aplicaciones comerciales desde una perspectiva de diseño industrial también ayudó a validar la viabilidad, factibilidad y conveniencia de los nuevos materiales en las industrias mencionadas anteriormente. El diseño de nuevos productos, la creación de prototipos funcionales, y su validación con usuarios potenciales y partes interesadas de estos productos fortalecieron el caso para continuar desarrollando y ampliando la producción de estos nuevos NFC.

Involucrar a los estudiantes de pregrado en los procesos de investigación es fundamental en la formación de nuevos investigadores. La interacción abierta y colaborativa con el equipo de investigación de los autores, les permitió a los estudiantes tener acceso al conocimiento creado en los espacios de investigación. De esta forma, utilizaron el conocimiento y ampliaron el alcance del proyecto a través de su exploración creativa de nuevos productos.

El desarrollo de nuevos biomateriales a partir de una disciplina creativa como el diseño industrial es un esfuerzo altamente interdisciplinario y transdisciplinario que integra el conocimiento científico con enfoques creativos para la resolución de problemas. En este tipo de iniciativa, un enfoque de IDD (Investigación, Diseño y Desarrollo) no solo es deseable sino necesario para crear soluciones innovadoras que sean viables, factibles y deseables. Adicionalmente, se fortaleció la viabilidad comercial y la factibilidad tecnológica de los materiales y aplicaciones diseñados en este proyecto integrando las cadenas productivas del fique y el maíz y considerando las necesidades de los agricultores y productores. Fortalecer los procesos de desarrollo tecnológico aplicados al sector agropecuario, como la creación de nuevos biomateriales a partir de residuos de cultivos y fibras de fique para crear nuevos biomateriales, no solo es beneficioso para generar nuevo conocimiento. Este tipo de iniciativa de investigación también representa una oportunidad para que las instituciones académicas contribuyan a las comunidades rurales de los países en desarrollo, donde existe una necesidad urgente de intervenciones que amplíen las oportunidades comerciales para los agricultores, además de reducir el volumen de desechos de cultivos y los problemas ambientales asociados.

Para estudios futuros, los autores identificaron la necesidad de evaluar el impacto de los nuevos NFC en el medio ambiente y las condiciones sociales y económicas de los productores de maíz y fique en Colombia. Asimismo, identificaron la necesidad de realizar pruebas más robustas y rigurosas a los materiales para determinar con mayor precisión sus características y comportamiento. La obtención de estos datos ayudará a fortalecer el caso de estos materiales para recaudar

CONCLUSIONS

The research program described in this paper allowed the research team to obtain a family of six new Natural Fiber Composites that used corn waste and fique fibers, and the design of a collection of products for diverse industries such as packaging, construction, and automotive. At an experimental level, these new materials have shown beneficial properties for these industries since they are highly resistant to impact, have low thermal conduction, high acoustic insulation capacity, and are low weight. Additionally, the creation of new products and commercial applications from an industrial design perspective also helped validate the viability, feasibility, and desirability of the new materials in the industries mentioned above. The design of new products and the creation of functional prototypes, and their validation with potential users and stakeholders of these products strengthened the case for continuing to develop and scale up the production of these new NFCs.

Engaging undergraduate students in research processes is fundamental in forming new researchers. For the authors' research team, having an open and collaborative interaction with students allowed them to have access to knowledge created in the research spaces, which they used and expanded through their creative exploration of new products.

The development of new biomaterials from a creative discipline such as industrial design is a highly inter and transdisciplinary effort that integrates scientific knowledge with creative approaches to problem-solving. In this kind of initiative, an RDD approach—Research, Design & Development—is not just desirable but necessary for creating innovative solutions that are viable, feasible, and desirable. Additionally, the commercial viability and technological feasibility of the materials and applications designed in this project were strengthened by integrating the productive chains of fique and corn and by considering the needs of farmers and producers. Strengthening technological development processes applied to the agricultural sector—such as creating new biomaterials from crop waste and fique fibers to obtain new biomaterials—is not only beneficial to creating new knowledge. This type of research initiative also represents an opportunity for academic institutions to contribute to rural communities in developing countries where there is an urgent need for interventions that expand the commercial opportunities for farmers while reducing the volume of crops waste and associated environmental problems.

For future work, the authors identified the need to assess the impact of the new NFCs on the environment and the social and economic conditions of corn and fique producers in Colombia. Likewise, the authors identified the need to conduct more robust and rigorous tests on the materials to determine their characteristics and behavior with more precision. Determining these impacts and these characteristics will help to strengthen the case for these materials in order to raise additional funds for the project and move it to a higher Technology Readiness Level (TRL).

fondos adicionales para el proyecto y moverlo a un mayor nivel de madurez tecnológica o *Technology Readiness Level* (TRL). Finalmente, este programa de investigación demostró la importancia que tiene para la academia generar valor y apoyar el desarrollo de las comunidades rurales en los países en desarrollo desde las disciplinas tradicionales, y sobre todo desde campos creativos como el diseño industrial. Al participar en este tipo de iniciativas de investigación, los campos creativos realizan contribuciones significativas al bienestar social, ambiental y económico de las comunidades rurales y, por ende, a la sociedad en general.

Finally, this research program demonstrated the importance for academia of generating value and supporting the development of rural communities in developing countries, not just from traditional disciplines, but also from creative fields such as industrial design. By participating in this kind of research initiatives, creative fields make significant contributions to the social, environmental, and economic welfare of rural communities and, as a consequence, to society in general.

REFERENCIAS / REFERENCES

- Abdellaoui, H., Bensalah, H., Echaabi, J., Bouhfid, R., & Qaiss, A. (2015). Fabrication, characterization and modelling of laminated composites based on woven jute fibres reinforced epoxy resin. *Materials and Design*, 68, 104–113. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.11.059>
- Addington, M., & Schodek, D. (2005). *Smart Materials and New Technologies for the Architecture and Design Professions*. Architectural Press.
- Bangera, G., & Brownell, S. E. (2014). Course-based undergraduate research experiences can make scientific research more inclusive. *CBE Life Sciences Education*, 13(4), 602–606 <https://doi.org/10.1187/cbe.14-06-0099>
- Council on Undergraduate Research (2021). *Council on Undergraduate Research Issues Updated Definition of Undergraduate Research*. Council of Undergraduate Research. https://www.cur.org/council_on_undergraduate_research_issues_updated_definition_of_undergraduate_research/
- Crawford, C. B., & Quinn, B. (2016). *Microplastic Pollutants*. Elsevier Limited.
- Design Council. (2007, January 20). *11 Lessons: A Study of the Design Process*. <https://www.designcouncil.org.uk/our-work/skills-learning/resources/11-lessons-managing-design-global-brands/>
- Finley, A., & McNair, T. (2013). *Assessing Underserved Students' Engagement in High-Impact Practices*. Association of American Colleges and Universities.
- Kuh, G. D. (2008). *High-impact educational practices: what they are, who has access to them, and why they matter*. Association of American Colleges and Universities.
- Kuh, G. D., O'Donnell, K., & Reed, S. (2013). *Ensuring Quality and Taking High-Impact Practices to Scale*. Association of American Colleges and Universities.
- Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F., Sainte-Rose, B., Aitken, J., Marthouse, R., Hajbane, S., Cunsolo, S., Schwarz, A., Levivier, A., Noble, K., Debeljak, P., Maral, H., Schoeneich-Argent, R., Brambini, R., & Reisser, J. (2018). Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. *Scientific Reports*, 1–15. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w>
- Margeta, A., Šabalja, D., & Đorđević, M. (2021). The presence and danger of microplastics in the oceans. *Scientific Journal of Maritime Research*, 35(2), 224–230. <https://doi.org/10.31217/p.35.2.4>
- Mittal, M., Mittal, D., & Aggarwal, N. K. (2022). Plastic accumulation during COVID-19: call for another pandemic; bioplastic a step towards this challenge? *Environmental Science and Pollution Research*, 29(8), 11039–11053. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17792-w>
- OECD. (2022). *Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/de747aef-en>
- Rhodes, C. J. (2019). Solving the plastic problem: From cradle to grave, to reincarnation. *Science Progress*, 102(3), 218–248. <https://doi.org/10.1177/0036850419867204>
- Sahoo, P., Das, S. K., & Acharya, S. K. (2017). Tribological aspects of natural fiber composites. In P. J. Davim (Ed.), *Green Composites* (pp. 33–68). De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783110435788-003>
- The Leadership Alliance (2022). *What We Do. The Leadership Alliance*. <https://theleadershipalliance.org/what-we-do>
- University of Maryland Baltimore County (2022). *About the Meyerhoff Scholars Program*. UMBC. <https://meyerhoff.umbc.edu/>
- University of North Carolina at Chapel Hill (2022). *About CSS. Chancellor's Science Scholars Program*. College of Arts and Sciences, UNC Chapel Hill. <https://chancellorsscience scholars.unc.edu/about/>
- Wang, Y., Tong, B., Hou, S., Li, M., & Shen, C. (2011). Transcrystallization behavior at the poly(lactic acid)/sisal fibre biocomposite interface. *Composites Part A*, 42(1), 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.10.006>
- Zhou, Y., Fan, M., Chen, L., & Zhuang, J. (2015). Lignocellulosic fibre mediated rubber composites: An overview. *Composites Part B: Engineering*, 76, 180–191. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.02.028>

FABIO ANDRÉS TÉLLEZ

tellezfa@appstate.edu
DEPARTAMENTO DE DISEÑO APLICADO,
APPALACHIAN STATE UNIVERSITY, BOONE, NORTH
CAROLINA, UNITED STATES

<https://orcid.org/0000-0002-2094-3722>

FABIO ANDRÉS TÉLLEZ ES PROFESOR ASISTENTE EN EL DEPARTAMENTO DE DISEÑO APLICADO DE LA APPALACHIAN STATE UNIVERSITY, DONDE COORDINA Y ENSEÑA FUNDAMENTOS DEL DISEÑO. SU INVESTIGACIÓN SE ENCUENTRA EN LA INTERSECCIÓN DEL DISEÑO Y EL APRENDIZAJE, EXPLORANDO TEMAS COMO LA DIVERSIDAD EN LA EDUCACIÓN DEL DISEÑO, EL DESARROLLO DE LA EMPATÍA EN EL DISEÑO O EL PENSAMIENTO DE DISEÑO COMO ESTRATEGIA DE RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS. EL DR. TÉLLEZ ES ORIGINARIO DE COLOMBIA Y TIENE UN PHD EN DISEÑO DE NC STATE UNIVERSITY.

FABIO ANDRES TELLEZ IS AN ASSISTANT PROFESSOR IN THE DEPARTMENT OF APPLIED DESIGN AT APPALACHIAN STATE UNIVERSITY, WHERE HE COORDINATES AND TEACHES DESIGN FOUNDATIONS. HIS RESEARCH LIES IN THE INTERSECTION OF DESIGN AND LEARNING, EXPLORING TOPICS SUCH AS DIVERSITY IN DESIGN EDUCATION, EMPATHY DEVELOPMENT IN DESIGN, OR DESIGN THINKING AS A PROBLEM-SOLVING STRATEGY. DR. TELLEZ IS ORIGINALLY FROM COLOMBIA AND HOLDS A PH.D. IN DESIGN FROM NORTH CAROLINA STATE UNIVERSITY.

JUAN MANUEL ESPAÑA

juan.espana@utadeo.edu.co
ÁREA ACADÉMICA DE DISEÑO DE PRODUCTO, FACULTAD
DE ARTES Y DISEÑO, UNIVERSIDAD JORGE TADEO
LOZANO, BOGOTÁ, COLOMBIA

JUAN MANUEL ESPAÑA ES EL DIRECTOR DEL ÁREA ACADÉMICA DE DISEÑO DE PRODUCTO DE LA UNIVERSIDAD JORGE TADEO LOZANO. TIENE AMPLIA EXPERIENCIA EN DESARROLLO TECNOLÓGICO APLICADO A ENTORNOS RURALES Y TRABAJO CON COMUNIDADES ARTESANALES Y RURALES. SU EXPERIENCIA EN INVESTIGACIÓN SE CENTRA EN EL DESARROLLO DE FIBRAS NATURALES Y NUEVOS BIOMATERIALES. DESDE 2011 ES PROFESOR ASOCIADO DEL PROGRAMA DE DISEÑO INDUSTRIAL, ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN DEL DISEÑO Y MAESTRÍA EN GESTIÓN DEL DISEÑO.

JUAN MANUEL ESPAÑA IS THE DIRECTOR OF THE ACADEMIC AREA OF PRODUCT DESIGN AT UNIVERSIDAD JORGE TADEO LOZANO. HE HAS EXTENSIVE EXPERIENCE IN TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT APPLIED TO RURAL ENVIRONMENTS AND WORKING WITH ARTISAN AND RURAL COMMUNITIES. HIS RESEARCH EXPERTISE IS FOCUSED ON NATURAL FIBRES AND NEW BIOMATERIALS DEVELOPMENT. SINCE 2011, HE HAS BEEN AN ASSOCIATE PROFESSOR IN THE INDUSTRIAL DESIGN PROGRAM, SPECIALIZATION IN DESIGN MANAGEMENT, AND MASTER IN DESIGN MANAGEMENT.