

**PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN PARA JÓVENES INVESTIGADORES
DE LA CÁTEDRA DE ECONOMÍA CIRCULAR
UNIVERSIDAD DE CASTILLA-LA MANCHA
AÑO 2024**



**Universidad de
Castilla-La Mancha**



MEMORIA FINAL DE PROYECTO

Proyecto: Valorización de residuos y subproductos poliméricos y agroforestales (biomasa) para su uso en la fabricación de materiales para pavimentos deportivos

Beneficiario: Jorge Fernando García Unanue

Fecha: 08 de enero de 2025

Periodo de ejecución: 01 septiembre 2024 al 31 de diciembre de 2024

ÍNDICE

1. RESUMEN	2
2. Introducción	3
2.1. Objetivos del proyecto	3
2.2. Contexto y relevancia	4
3. Marco teórico	7
3.1. Antecedentes	7
3.2. Componentes y propiedades del césped artificial deportivo	11
3.3. Problemática medioambiental del césped artificial	13
4. Actividades realizadas	14
4.1. Revisión de aplicaciones anteriores	14
4.2. Valores de referencia de materiales	16
4.3. Formulación, extrusión y análisis de compounds biobasados	18
4.4. Fabricación de componentes	25
4.5. Análisis de rendimiento de componentes	28
4.6. Cumplimiento de los objetivos	31
4.7. Desviaciones respecto a la planificación inicial	32
4.8. Ejecución del presupuesto	33
5. Escalado y aplicaciones industriales	33
5.1. Escalado y oportunidades	33
5.2. Colaboración con el sector industrial	34
6. Impacto	35
6.1. Impacto general	35
6.2. Estrategia de Economía Circular de Castilla-La Mancha 2030	37
6.3. Divulgación	37
6.4. Nuevos proyectos	39
7. Referencias bibliográficas	39

1. RESUMEN

El césped artificial deportivo es, sin lugar a dudas, el tipo de instalación deportiva con más metros cuadrados construidos en Europa. Se estima que hay más de 16.000 campos en Europa, renovando o construyendo 4.000 campos nuevos anualmente (30 millones de metros cuadrados de plásticos puestos en circulación anualmente, 540.000 toneladas).

Actualmente, el sistema más implantado de césped artificial incluye como componentes una base elástica, moqueta con hilo fabricado en su mayor parte con plástico virgen, arena para estabilizar el suelo y una capa de granulado SBR (procedente de neumáticos fuera de uso) para aportar propiedades elásticas y funcionales. El nuevo reglamento europeo para la reducción de microplásticos indica que se debe dejar de utilizar granulado polimérico de menos de 5 mm como relleno técnico en campos de césped artificial, a partir de 2031. No obstante, el problema va más lejos, pues los reportes de expertos en la UE indican que este problema debe ser enfocado también con la reducción de plásticos en general y la reducción de las liberaciones por desgaste.

Este proyecto ha tenido como objetivo la valorización de residuos y subproductos poliméricos y agroforestales (biomasa) para su uso en la fabricación de materiales para pavimentos deportivos.

Como resultado, este proyecto ha demostrado una viabilidad inicial, tanto en fabricación como en puesta en uso (propiedades técnico-deportivas) de un compuesto biobasado, fabricado con plástico y biomasa procedente de residuos y subproductos agrícolas. Principalmente, ha destacado el uso de polietileno reciclado de baja densidad en combinación con podas de olivo y poda de guayule, procedentes de explotaciones agrícolas de Castilla-La Mancha.

Estos resultados están alineados con la Estrategia de Economía Circular 2030 de Castilla-La Mancha. El proyecto afecta de forma directa al Eje 4, “EJE DE PRODUCCION, BIENES Y SERVICIOS”, en la línea de “Cierre de ciclos productivos”. La medida vinculada a esta línea está definida como “Incorporación de materias secundarias y valorización de subproductos y residuos de la producción”.

2. Introducción

2.1. Objetivos del proyecto

Los campos deportivos de césped artificial representan la instalación deportiva con más metros cuadrados construidos y crecimiento en los últimos años. Sin embargo, suponen un reto medioambiental por la falta de recircularidad, su alto contenido en plástico virgen y la liberación de microplásticos intencionados. Por el contrario, debido a las características de sus materiales, tienen margen para la valorización de residuos y subproductos agroindustriales mediante la aplicación de metodologías que ya están en uso en otros sectores.

Por ello, el objetivo del proyecto es la valorización de residuos y subproductos poliméricos y agroforestales (biomasa) para su uso en la fabricación de materiales para pavimentos deportivos. Se desarrollará una línea de trabajo para incorporar plástico reciclado y biomasa en los composites que se utilizan para la fabricación de fibra de césped artificial y, por otro lado, la fabricación de relleno técnico para césped artificial deportivo.

Este proyecto tiene previsto avanzar en la valorización de residuos de sectores estratégicos de Castilla-La Mancha, especialmente la biomasa producida por diferentes explotaciones agrícolas como el olivo. Esta biomasa se implementará junto al aprovechamiento de otros materiales reciclados y reciclables pudiendo avanzar en alternativas sostenibles a los problemas que en la actualidad representan las instalaciones deportivas y, más concretamente, el césped artificial deportivo. Para ello, se trabajará en diversas líneas relacionados, actuando sobre diferentes residuos y diferentes tipos de pavimentos deportivos. Por tanto, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- **Reducir la carga de plástico virgen en la fibra de césped artificial deportivo mediante la introducción de restos de poda de olivo biorrefinada.** En este objetivo se actúa sobre el material con mayor problemática en cuanto a economía circular en instalaciones deportivas. La fibra en la actualidad está constituida casi en su totalidad por polietileno virgen. Por tanto, se espera reducir esta carga de plástico virgen mediante el aprovechamiento y valorización de subproductos y biomasa de sectores estratégicos en Castilla-La Mancha.
- **Sustituir plástico virgen de las fibras de césped artificial por plástico reciclado procedente de residuos agrícolas.** Sumando al objetivo anterior, se pretende aumentar el aprovechamiento de residuos plásticos para ser incorporados en los composites que se usen para la creación de fibras de césped artificial.

- **Desarrollar composites elastoméricos a partir de residuos plásticos y subproductos agroforastales, incorporando aditivos de origen orgánico, para su uso como relleno técnico de césped artificial.** Los rellenos técnicos son materiales menos complejos que las fibras. Por tanto, se utilizará una base de plástico reciclado y se incorporarán subproductos de sectores estratégicos de Castilla-La Mancha, como celulosa o caucho/latex orgánico procedente de excedentes de guayule (el guayule es proyecto de singular interés en Castilla-La Mancha, debido a la plantación de Santa Cruz de la Zarza).

2.2. Contexto y relevancia

La prestigiosa revista Science dedicaba en su sección “perspective” un reportaje sobre los microplásticos (Rochman, 2018). La investigación tradicionalmente venía estudiando la presencia de microplásticos en el océano. Sin embargo, una mayor preocupación aflora cuando se sugiere que más del 80% de esos plásticos provienen de la tierra o ríos. Desde ese momento, la comunidad científica se vuelca en analizar la procedencia de los microplásticos y, más importante, su influencia en ciclos naturales. Se ha terminado catalogando como la polución moderna, pues es persistente y cuanto más tiempo está en el medio ambiente, más difícil es su eliminación y control.

En 2020 la ECHA publica datos en su dictamen sobre microplásticos, indicando que los campos deportivos de césped artificial son el principal emisor de microplásticos agregados intencionalmente. Más recientemente, en 2023, la UE publicó el documento Acción de la UE contra los microplásticos. Este documento pone especial énfasis en indicar las fuentes de liberación de microplásticos, separando los agregados intencionalmente de los no intencionados. En este documento se determina que anualmente se liberan 42.000 toneladas de plásticos intencionados, de los cuales, según la ECHA, 16.000 serían de campos deportivos de césped artificial. No obstante, en el mismo documento, la UE estima que se liberan entre 0.7 y 1.8 millones de toneladas de microplásticos no añadidos intencionalmente, de forma anual en Europa (se debe tener en cuenta que este tipo de microplástico se genera por el desgaste de plásticos en uso y también, por el desgaste de plásticos desechados en el medio ambiente, vertederos, etc., y son los que más impacto tienen en el medio ambiente).

Con todo lo anterior en cuenta, la UE ha decidido empezar a actuar de forma más tajante con los plásticos añadidos intencionalmente. El 25 de septiembre de 2023 se publica el reglamento de la UE que regula el uso de microplásticos, “*Commission Regulation (EU) 2023/2055 of 25 September 2023 amending Annex XVII to Regulation*

(EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH) as regards synthetic polymer microparticles”.

Este reglamento restringe las micropartículas de polímeros sintéticos por sí solas o añadidas intencionadamente a las mezclas con el fin de reducir las emisiones de microplásticos. Este reglamento considera como microplásticos, de forma general, Partículas de polímero sintético de menos de 5 mm que son orgánicas, insolubles y resistentes a la degradación. Establece un periodo transitorio en el que diferentes microplásticos claramente identificados deberán dejar de ser incorporados al mercado. Entre ellos, se incluyen los “Relleno granulado para campos de césped artificial”, que entra en vigor el 17 de octubre 2031.

No obstante, esto no soluciona el problema, pues solo actúa sobre una pequeña parte de la contaminación y no tiene en cuenta directamente un enfoque de economía circular. Ya en 2019, el Scientific Advice Mechanism (SAM) de la UE, publica un reporte científico independiente sobre los problemas de la contaminación por microplásticos en el medio ambiente y la salud. En el se exponen 5 líneas de trabajo, donde solo una actúa sobre los microplásticos añadidos intencionadamente. Además, la propia ECHA en 2019 publicó otro dictamen donde también advertían de la toxicidad de determinados materiales usados en pavimentos deportivos, como es el caucho reciclado (SBR). Por tanto, el verdadero reto está en reducir la cantidad de plástico en circulación y su liberación, así como controlar el tipo de plásticos utilizados de manera que se intenten evitar aquellos con mayor riesgo toxicológico para el medio ambiente y el ser humano.

Tras diversas investigaciones y trabajos previos en el Grupo IGOID de la Universidad de Castilla-La Mancha, se ha llegado a la conclusión de que podría ser viable aplicar avances de economía circular de otros sectores que utilizan polímeros similares a los usados para fabricar césped artificial y, dentro de dichos trabajos, se pone especial foco en la aplicación de biomasa sobre plásticos reciclados. Esta posibilidad se alinea de manera directa tanto con la Estrategia de Economía Circular de Castilla-La Mancha 2030 así como con diferentes sectores de la Estrategia de Especialización Inteligente de Castilla-La Mancha (S3) y pilares de Horizonte Europa, ya que permite el aprovechamiento de subproductos de la industria agroalimentaria, clave para la región, así como el desarrollo de fabricación de materiales basados en economía circular en la región.

El proyecto afecta de forma directa al Eje 4, “EJE DE PRODUCCION, BIENES Y SERVICIOS”, en la línea de “Cierre de ciclos productivos”. La medida vinculada a

esta línea está definida como “Incorporación de materias secundarias y valorización de subproductos y residuos de la producción”. De forma más concreta y como se describe en el actual Plan de Acción, “Impulso de los procesos de valorización de subproductos y residuos de la producción para la obtención de bioproductos de alto valor añadido y/o bioenergía y biocombustibles” destacando como medida el “Impulso a la generación de productos de valor añadido y energía en los sectores estratégicos con la incorporación de subproductos, propios o de terceros, apostando por la simbiosis industrial”.

El proyecto trata la valorización de subproductos y residuos de la producción en sectores estratégicos de Castilla-La Mancha con gran potencial de desarrollo como la biomasa producida por las principales plantaciones en la región. Además, su aprovechamiento está dirigido a un sector con alto valor añadido como es el de equipamientos deportivos, dando así un aprovechamiento para la mejora de la economía circular de la industria de instalaciones deportivas. Concretamente, este proyecto trabajará inicialmente sobre el sector olivar mediante el aprovechamiento de la poda, un recurso que puede ser de alto valor pero que actualmente es difícil de tratar por la falta de alternativas industriales. Según la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha, El olivar se ha convertido en el principal cultivo de la región al haber alcanzado unas 450.000 hectáreas, la misma superficie que el viñedo, y al contar con 83.000 olivicultores. Además, trabajará sobre toras explotaciones más innovadoras como el guayule, de reciente interés singular para la región.

Esta idea produce una simbiosis industrial donde en sector primario agrícola aporta un nuevo bien de alto valor para el sector industrial para la fabricación en primer término de composites para su uso en equipamientos deportivos y en segundo término, para la propia fabricación del equipamiento. Por último, como resultado, se produce un producto que aporta un gran valor social, ya que las superficies de césped artificial deportivo son la base del sistema deportivo en prácticamente todos los municipios españoles, dando acceso a la práctica deportiva y a hábitos activos a la población joven.

Por último, cabe destacar que este proyecto aprovecha una fortaleza presente en prácticamente todos los sectores analizados en la estrategia, como es la valorización, transformación o aprovechamiento de biomasa de industria agroalimentaria.

3. Marco teórico

3.1. Antecedentes

Los campos de césped artificial supusieron una revolución en el sector de las instalaciones deportivas haciendo posible la democratización y popularización de la práctica de actividad física y deportes de equipo como el fútbol, rugby o hockey, entre otros. Las ventajas de altas horas de uso y reducidos costes de mantenimiento que ofrecen las superficies deportivas de césped artificial frente a otras, las convierten en una alternativa altamente competitiva y rentable para todo tipo de entidad. Desde municipios pequeños a clubes deportivos, encuentran en estas superficies la solución adecuada para la promoción de la actividad física y deporte haciendo posible una mayor práctica deportiva y estilos de vida saludables entre la población. Así, desde el año 2000 hasta ahora se han instalado en España más de 10.000 campos de césped artificial y cada año se instalan cerca de 500 campos nuevos. El mercado europeo de césped artificial es actualmente de 45 millones de metros cuadrados al año con un crecimiento anual que oscila entre el 12 y el 15% (Casetta et al., 2019).

La gran implantación de este tipo de superficie se debe a que la evolución de los campos de césped artificial ha dado lugar a superficies conocidas como de tercera generación que, ofreciendo un gran rendimiento técnico-deportivo y biomecánico (Fuller et al., 2007; Sánchez-Sánchez et al., 2016), mejoran aspectos que afectaban al rendimiento y la seguridad de los deportistas (Brito et al., 2012). Esa evolución ha sido posible a avances en los materiales utilizados en componentes estructurales de los campos de fútbol. Existe una gran diversidad de combinaciones constructivas provocadas por los diferentes tipos de fibras y materiales de relleno, la presencia o ausencia de capa elástica, o la subbase seleccionada (Sánchez-Sánchez et al., 2014). En este sentido, otros autores también han informado que estas combinaciones estructurales influyen en el comportamiento mecánico, el desgaste y el nivel de mantenimiento requerido (Alcántara et al., 2009; Fleming, 2011). Así, la sustitución de estos materiales debe contemplar en todo momento, las propiedades del sistema final que son las que han propiciado su amplia aceptación hoy en día.

Actualmente, el césped artificial está formado por cuatro componentes principales (Figura 1):

- Moqueta con hilo de plástico cosido (fibra de césped artificial)
- Relleno de estabilización (arena de sílice)
- Relleno de rendimiento (normalmente caucho SBR de neumáticos fuera de uso)

- Opción de incluir base elástica inferior para la mejora de propiedades



Figura 1. Componentes de césped artificial deportivo de tercera generación

Las propiedades mecánicas de las superficies deportivas son relevantes para la práctica deportiva ya que afectan la interacción deportista-superficie. Nigg y Yeadon (1987) fueron algunos de los primeros investigadores en considerar las propiedades mecánicas como factor determinante a la hora de evaluar el riesgo de lesión en el deporte. Posteriormente, otros estudios revelaron que los atletas ajustan la rigidez de sus piernas al correr, saltar o aterrizar en superficies con diferentes propiedades mecánicas (Hackney, et al., 2011; Moritz & Farley, 2004), lo que resulta en cambios sutiles en los patrones cinemáticos de las extremidades inferiores, la dinámica del suelo-reacción-fuerza o las aceleraciones máximas de impacto (Bigelow et al., 2013; Dixon et al., 2000). En consecuencia, se ha informado que las propiedades de la superficie causan diferencias significativas en las respuestas físicas y fisiológicas de los atletas (Sanchez-Sanchez et al., 2014; Sassi et al., 2011).

Sin embargo, debido a su actual naturaleza constructiva, estas superficies tienen un impacto ambiental que, dada la evolución de la Legislación, las ha puesto en jaque y, de no desarrollarse alternativas, podría llegarse a su prohibición generando una situación adversa con una reducción importante en la práctica deportiva.

Por un lado, el dictamen de la ECHA (European Chemical Agency) de 2020, sobre microplásticos: “El Comité de Evaluación del Riesgo (RAC) de la ECHA adoptó su

dictamen en junio de 2020. Apoyó la propuesta a la vez que recomendó criterios más estrictos para derogar los polímeros biodegradables, así como la prohibición del uso de microplásticos como material de relleno en campos de césped artificial después de un periodo de transición de seis años”. Además, según la ECHA, el césped artificial deportivo es el principal responsable de vertido de microplásticos intencionados al medioambiente <https://echa.europa.eu/es/hot-topics/microplastics>. Esto ha dado lugar al nuevo reglamento europeo, que prohíbe el uso de microplásticos intencionados en césped artificial a partir de 2031.

Por otro lado, también se publicó el dictamen de la ECHA (European Chemical Agency) de 2019, sobre granulado de caucho: “El 20 de septiembre de 2019, el Comité de Análisis Socioeconómico (CASE) adoptó su dictamen final por mayoría simple, en apoyo de la propuesta de los Países Bajos de restringir los ocho HAP y del dictamen anterior del Comité de Evaluación del Riesgo (CER) en junio de 2019”. El dictamen propone disminuir el límite de concentración total de los ocho HAP a 20 mg/kg. El objetivo es garantizar que el riesgo de cáncer debido a la exposición a HAP se sitúe en un nivel bajo para las personas que entran en contacto (mediante la inhalación o el tacto) con el granulado y las cortezas. Entre estas personas se incluyen los jugadores de fútbol y los niños que juegan en los campos deportivos y parques infantiles, así como los empleados que instalan o mantienen las superficies.” <https://echa.europa.eu/es/hot-topics/granules-mulches-on-pitches-playgrounds>

De forma adicional, el Scientific Advice Mechanism (SAM), la Unión Europea publica un reporte científico independiente sobre los problemas de la contaminación por microplásticos en el medio ambiente y la salud (European Union, 2019). De este trabajo se puede destacar el establecimiento de 5 líneas que actuación para reducir la contaminación por microplásticos:

1. Disminuir el uso plástico.
2. Restringir el uso intencional de microplásticos.
3. Prevenir o atenuar la formación de microplásticos durante el ciclo de vida de los plásticos y los productos que contienen plástico.
4. Evite la liberación al medio ambiente lo más cerca posible de la fuente.
5. Mitigar y controlar puntos clave en las rutas desde la fuente hasta el sumidero.

Para solucionar el problema, las alternativas viables hasta el momento han dado solución únicamente parcial, pues se han limitado a eliminar los microplásticos. Por un lado, existen campos con rellenos de tamaño superior a los 5 mm, límite establecido para ser considerados microplásticos, pero que siguen poniendo gran

cantidad de plástico en circulación. Por otro lado, campos que incluyen relleno técnico orgánico, donde se están presentando diferentes soluciones como el corcho natural y fibra de coco, entre otros, pero con dificultades logísticas y de suministro, además de acarrear gastos importantes en agua para su mantenimiento. Por último, existen soluciones que no incorporan relleno técnico pero que, al cambio requieren mucha más cantidad de fibra que se fabrica casi en exclusiva de plástico virgen y que también se ve expuesta al desgaste y liberación de microplásticos no intencionados al medio ambiente.

A todo lo anterior, se suma el gran desconocimiento sobre la durabilidad y función técnica a medio y largo plazo de estas soluciones, que pueden acarrear problemas de viabilidad en el mercado, así como efectos en la demanda y seguridad de este tipo de superficies. La FIFA publica un nuevo marco normativo y de calidad de superficies deportivas en 2024, poniendo énfasis en la falta de experiencia en campos sin relleno técnico, así como en promover el uso de materiales reciclados. Además, incorpora gran cantidad de requisitos y ensayos adicionales que limitan el número de químicos y la cantidad de plásticos que se incorporan en un sistema de césped artificial.

En este sentido, la ESTC - EMEA Synthetic Turf Council, además, está desarrollando un nuevo sistema para determinar la pérdida de materiales convertidos principalmente en microplásticos no intencionados, el cual se debe ponderar por la cantidad de plástico en el sistema (Figuras 2 y 3).

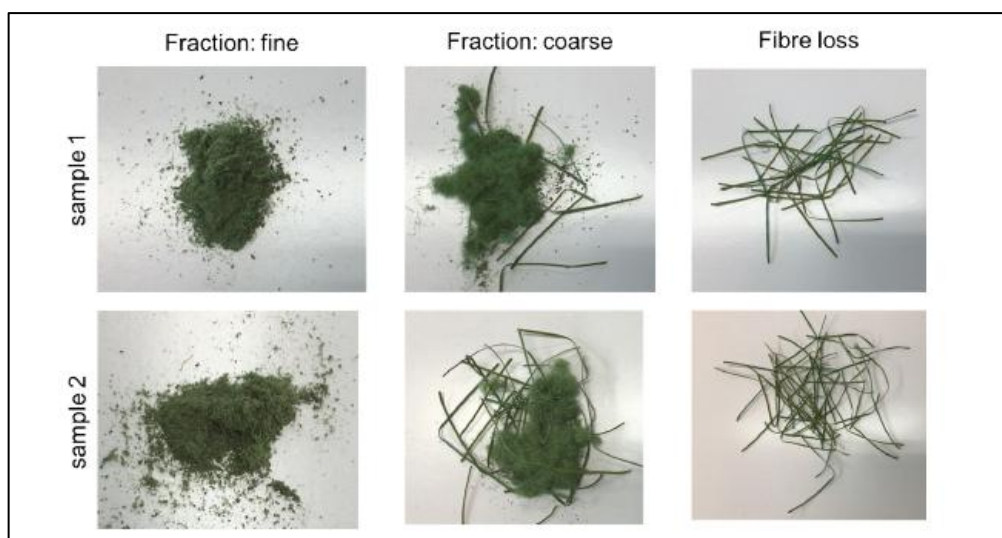


Figura 2. Ejemplo de formas en las que se libera fibra de césped artificial al medio ambiente. La fibra que se pierde por la pérdida completa, finalmente también puede degradarse en microplásticos no intencionados



Figura 3. Ejemplo de restos de fibra en un campo real, obtenida de los equipos de mantenimiento

Por todo lo anterior, **las soluciones no pueden limitarse únicamente a eliminar el granulado de SBR**. Además de la eliminación de microplásticos intencionados, acción obligatoria por reglamento europeo para campos de césped artificial a partir de octubre de 2031, el mercado debe evolucionar para mejorar la economía circular. Para ello, se debe acometer los otros 4 retos detectados por el grupo de expertos de la Unión Europea. Entre ellos, 2 están directamente relacionados con los procesos de fabricación e, inevitablemente, con la valorización de subproductos y su aplicación de césped artificial.

En primer lugar, se debe disminuir el uso plástico. Ante la imposibilidad de retirar todo el plástico del césped artificial, se debe optar por la reutilización de plásticos de otras fuentes, teniendo en cuenta además el uso de plásticos con menor impacto ambiental ante una posible liberación (otro de los efectos perjudiciales de utilizar SBR o plásticos con componentes de alta toxicología). Además, este plástico reciclado puede reducirse aún más mediante cargas de biomasa en su composición de fábrica, retirando proporcionalmente esa cantidad de plástico en circulación.

En segundo lugar, prevenir o atenuar la formación de microplásticos durante el ciclo de vida de los plásticos y los productos que contienen plástico. Para ello, además de reducir la proporción de plástico en un mismo componente, estos componentes deben de disponer de unas funciones mínimas de durabilidad al uso, que deben ser estudiadas en entornos de aplicaciones deportivas.

3.2. Componentes y propiedades del césped artificial deportivo

Los campos deportivos de césped artificial deben cumplir unos requisitos mínimos de función técnica, deportiva y seguridad. El cumplimiento de esos requisitos se

consigue en gran medida mediante el uso de materiales técnicos altamente adaptados a su función, por lo que no resulta sencillo reemplazarlos.

En la actualidad, los sistemas de césped artificial presentan grandes diferencias debido a la amplia gama de tipos de fibras, materiales de relleno, capas elásticas y diferentes perfiles de construcción de sub-bases. Estas combinaciones estructurales se diferencian en el comportamiento mecánico, la respuesta a la intensidad de uso o al nivel de mantenimiento realizado (Fleming et al., 2011), la percepción de los jugadores (Felipe et al., 2013) y la vida útil de los campos de fútbol de césped artificial (Párraga y Sánchez, 2002).

Desde un punto de vista técnico, cada uno de los componentes del césped artificial interfiere en diferentes parámetros de funcionalidad y seguridad tanto de forma individual como integrada. La arena y el caucho son determinantes directos del comportamiento mecánico del pavimento (Fleming et al., 2015; Zanetti et al., 2013). Una modificación en el tipo o morfología del relleno genera diferencias en el comportamiento de los campos de fútbol de césped artificial (Alcántara et al., 2009). En este sentido, un estudio de laboratorio realizado por Fleming et al. (2015) reveló que la densidad del caucho y su nivel de compactación provocan cambios en la absorción de impactos. Otro estudio mostró valores más moderados de resistencia a la rotación utilizando relleno de SBR en comparación con relleno termoplástico (Zanetti et al., 2013). Por otro lado, Villwock et al. (2009) afirmaron que el tipo de fibra afecta directamente la tracción rotacional de campos de césped artificial.

Además, el comportamiento mecánico de la superficie de juego puede verse alterado por factores extrínsecos. El deterioro derivado del uso altera las propiedades mecánicas, lo que afecta la funcionalidad y seguridad de la superficie del césped artificial. Asimismo, las condiciones climáticas, el mantenimiento y las horas de uso pueden acelerar el deterioro de la fibra y el relleno de la superficie deportiva. Estudios previos han demostrado que el uso intensivo durante siete años disminuye en un 10% la absorción de impactos de la superficie (Sánchez-Sánchez et al., 2018). Por otro lado, estudios centrados en la influencia de las condiciones ambientales en el comportamiento mecánico del césped artificial han demostrado que la temperatura altera las propiedades mecánicas de la superficie (Charalambous et al., 2016). La magnitud de estas alteraciones varía según los componentes estructurales del césped artificial (Petras et al., 2014).

En lo que se refiere a las prestaciones deportivas y de seguridad de las personas deportistas, el relleno, la base elástica y la fibra son responsables de la interacción entre la superficie y el deportistas, determinando aspectos relacionados con el

rendimiento y la seguridad como la amortiguación de impactos, la resistencia a los cambios de movimiento o tracción rotacional, la abrasión de la piel en deslizamientos, etc. Por su parte, la fibra y en menor medida el relleno, influyen en la interacción pelota-superficie determinando el rendimiento al determinar la rodadura y el bote del balón. Estas pruebas se miden mediante ensayos biomecánicos con métodos estandarizados a nivel internacional.

3.3. Problemática medioambiental del césped artificial

Teniendo en cuenta la evidencia reciente, en cuanto al impacto medioambiental, Zuccaro et al. (2023) encontraron PFAS (Per- and polyfluoroalkyl substances, sustancias extraordinariamente persistentes en el medio ambiente y en nuestros cuerpos) en fibra y crumb rubber (SBR) en césped artificial. Bø et al. (2024), en su revisión, sugieren que hay evidencia suficiente para determinar que las emisiones de los campos deportivos de césped artificial provocan un impacto medioambiental por emisión de microplásticos y metales pesados. Gomes, et al. (2021), sugieren la existencia de PAHs en el relleno de caucho (que pueden tener impacto en la salud humana). Haan et al. (2023) encontraron una existencia significativa de residuos de fibra de césped artificial sobre la totalidad de residuos plásticos en aguas costeras del mediterráneo. peligrosas. Por último, Massey et al. (2020), determinaron que los rellenos actuales en césped artificial incorporan sustancias peligrosas en mayor o menor medida, pero sugieren que el SBR es el más perjudicial.

Dentro de ese complejo escenario, a fin de hacer posible la evolución de este tipo de superficies, organismos reguladores como el CEN/ TC 217, FIFA o World Rugby, han desarrollado procedimientos estandarizados para medir las prestaciones de los materiales, componentes y el sistema completo de césped artificial. Estos procedimientos han permitido el testeo de alternativas, algunas de las cuales han llegado al mercado sin acabar de alcanzar las exigencias requeridas, siendo necesario seguir avanzando en el desarrollo de materiales circulares no plásticos. Además, otros organismos reguladores han incorporado nuevas limitaciones en los materiales que pueden ser utilizados para fabricar componentes de césped artificial, como por ejemplo la nueva actualización de 2024 del programa de calidad de FIFA, que limita el uso de materiales y además añade ensayos de carácter toxicológico o cantidad de emisiones.

4. Actividades realizadas

4.1. Revisión de aplicaciones anteriores

Hoy en día no existen alternativas viables en el mercado. La industria y el mundo académico, han encontrado una prometedora alternativa en los compuestos en base a una matriz de plástico reciclado con materiales biobasados. Estos materiales se plantean dando resultados prometedores postulándose como una alternativa realista en diferentes aplicaciones (proyectos LIFET4C y Compolive). Son varias las investigaciones que muestran las bondades de los compuestos biobasados, que aprovechan la matriz polimérica virgen o reciclada, incorporando biomasa vegetal (compuesta principalmente por celulosa (30–60%), hemicelulosa (14–40%) y lignina (7–20%), Anwar Z y al. (2014)) obtenida a partir del aprovechamiento de residuos y subproductos agrícolas, para ser utilizada como relleno o refuerzo, o como aditivo. Estos compuestos poliméricos de base biológica ofrecen mejoras significativas en comparación con las materias primas convencionales empleadas en la fabricación de materiales, tales como, alta rigidez, ligereza, sostenibilidad y eficiencia de recursos.

Binshan Mu et al. (2018) estudiaron el uso de partículas de biomasa, incluyendo madera dura (álamo), madera blanda (pino), cultivos (paja de trigo) y bambú, como refuerzos en la preparación de compuestos a base de polietileno de alta densidad (HDPE) y agentes de acoplamiento para mejorar la compatibilidad interfacial. Se centraron en la evaluación de los efectos de las especies de biomasa sobre las propiedades mecánicas concluyendo que las partículas de álamo, con un alto contenido de celulosa, mostraron mejores propiedades de tracción, flexión y resistencia a la fluencia cuando se incorporaron en la matriz de HDPE. Zwawi M. (2021), en su revisión, se centró en diversas fibras de origen natural, como fibras de hojas, fibras de caña, fibras de semillas y fibras de madera como cargas de refuerzo y abordó la estructura, morfología y modificaciones de las fibras, propiedades mecánicas, materiales de matriz degradable, aplicaciones y limitaciones de estos biocompuestos.

Así, el uso de residuos lignocelulósicos como materias primas para aplicaciones de base biológica ha ido en aumento. Deshmukh G. S. (2022) debido a sus atractivas propiedades mecánicas, bajo costo de producción y alto contenido en celulosa realizó una revisión sobre los compuestos reforzados con fibras de cáñamo, y analizó su procesado para fabricar compuestos basados en termoplásticos y biopolímeros. Agnese A. et al (2023) se centraron en evaluar residuos de biomasa agrícola (tallos de trébol dulce, trigo sin gluten y colza) como refuerzos en compuestos de polipropileno y polietileno reciclados. Los resultados mostraron que

la adición de fibras aumentó la rigidez y resistencia mecánica, especialmente en pruebas de flexión con trigo sin gluten, concluyendo que estos residuos eran un refuerzo viable para matrices poliméricas recicladas. Estudios actuales como el de Nikolaos P. et al. (2024) se centran en el uso del residuo generado durante la producción del aceite de oliva, como es el hueso de aceituna, el cual, lo utilizan como relleno para polietileno de alta densidad reciclado (rHDPE), evaluando su potencial como aditivo natural en compuestos poliméricos. Los resultados mostraron un aumento en el módulo elástico y una fuerte actividad antioxidante en compuestos con un 10% de hueso de aceituna, lo que los hace adecuados para aplicaciones en el sector del plástico. Sobre este mismo sector, José Antonio Rodríguez-Liébana et al. (2024) también se centran en la fuente más importante de residuo de biomasa de la cuenca mediterránea como es la poda de olivo y en un método pionero de extracción y purificación de celulosa de este residuo agrícola, concluyendo que este producto obtenido es comparable a una celulosa comercial con características similares, derivado de fuentes no residuales, pudiendo ser utilizado en procesos de producción de productos plásticos para diversas aplicaciones.

Aunque las investigaciones anteriores sugieren la posibilidad de incluir biomasa para conseguir plásticos biobasados, no existe ninguna evidencia previa del porcentaje de plástico que se puede reducir para mantener la durabilidad y los requisitos técnicos que demanda una superficie de césped artificial. La complejidad de desarrollar materiales alternativos deriva no sólo de las exigencias del uso deportivo en exterior del producto final. Es necesario tener en cuenta que la granza desarrollada debe además transformarse en los componentes finales.

- Las bases elásticas se obtienen por termoconformado y deben mantener una resistencia al desgaste tanto por tracción horizontal como vertical, así como propiedades de drenaje y durabilidad al uso. Eso sin olvidar las propiedades biomecánicas que a nivel técnico se le demandan.
- El relleno técnico se obtiene por extrusión y debe tener una estabilidad, respuesta al agua y unas propiedades técnicas en consonancia con el sistema de césped artificial.
- Por último, la fibra resulta de un proceso de extrusión altamente complejo sumando diferentes operaciones que determinan sus propiedades de resistencia a la tracción y el mantenimiento de unas dimensiones estables tras un desgaste por uso o ambiental.

Así, el reto en el desarrollo de estas alternativas consiste en establecer materiales viables con el menor contenido posible de plástico que permitan fabricar césped artificial que cumpla con los requisitos establecidos.

4.2. Valores de referencia de materiales

Los materiales más utilizados frecuentemente en los componentes de césped artificial son el polietileno, polipropileno y EPDM. Por tanto, se desarrollaron ensayos para obtener valores de referencia básicos, tanto en estado base como con diferentes aditivos, de materiales actualmente utilizados. De forma adicional, se realizaron también formulaciones y ensayos para obtener valores de referencia y comparativos de materiales reciclados de mercado. Gracias a este proceso, además de disponer de valores de referencia clasificados se pudo desarrollar un estudio comparativo para poder escoger los materiales poliméricos como base para los biobasados.

Se han realizado 63 formulaciones en total, tomando como referencia: polietileno de baja densidad (en adelante LDPE), LDPE reciclado blended, polietileno de alta densidad (en adelante HDPE), HDPE reciclado blended, polipropileno (en adelante PP) reciclado, PP+EPDM reciclado y LDPE de procedencia única de residuos agrícolas.

Como base LDPE, se encontró un resultado con mucho potencial en el Alfaten 200. El LDPE virgen dispone de un índice de fluidez de 1.17 a 1.61 en función de los aditivos aplicados, así como un punto de fusión de 110 °C aproximadamente. El LDPE reciclado blended, procedentes de diversas fuentes de suministros, disminuye su índice de fluidez a 0.26 y aumenta el punto de fusión a 132 °C, lo que dificulta su manejo en procesos de fabricación y mezcla con biomasa, al requerir mayores temperaturas y al disponer de menor fluidez en la fabricación. Sin embargo, el Alfaten 200 tiene un índice de fluidez superior, cercano a 0.50 y un punto de fusión con dos picos de 111 °C y 118°C aproximadamente. Este material, aunque por supuesto no iguala al material virgen, tiene unas prestaciones mucho mejores que el otro material de referencia. En la Figura 4 y la Tabla 1, se muestra la comparativa completa entre LDPE virgen y Alfaten 200.

En cuanto al HDPE los puntos de fusión se mantienen en el reciclado, aumentando además el índice de fluidez. Esto tendrá un importante impacto en el proceso de fabricación de fibra, donde este elemento es determinante. En la Figura 5 se muestra la comparativa de ambos sistemas. Por último, el PP reciclado permitiría aumentar la fluidez o ajustar las propiedades mecánicas de este tipo de materiales.

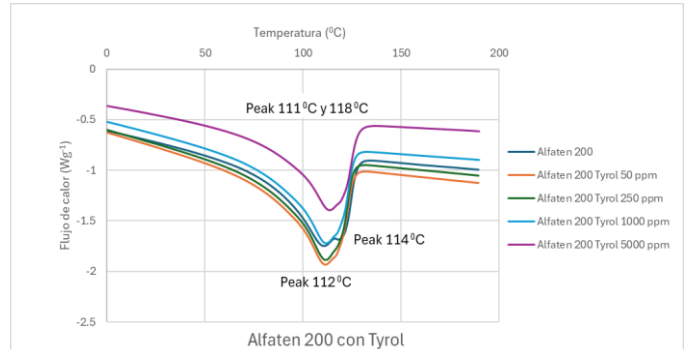
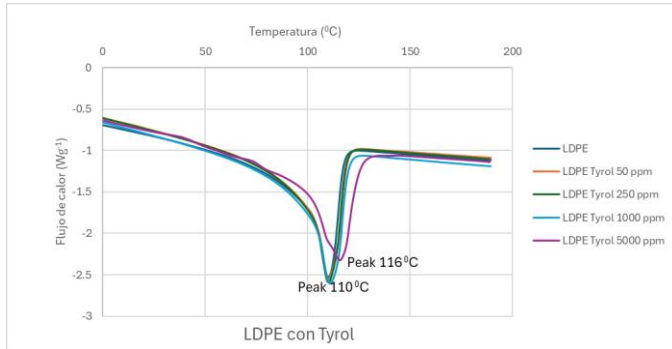
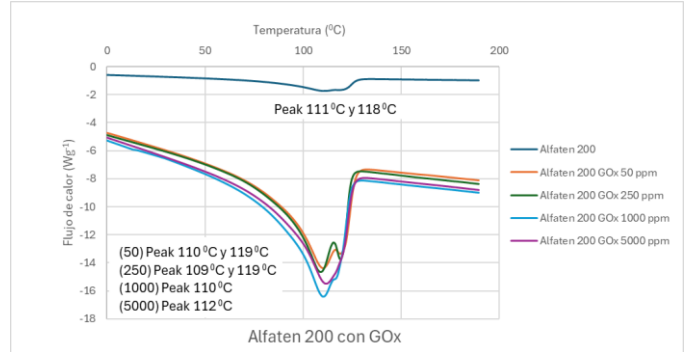
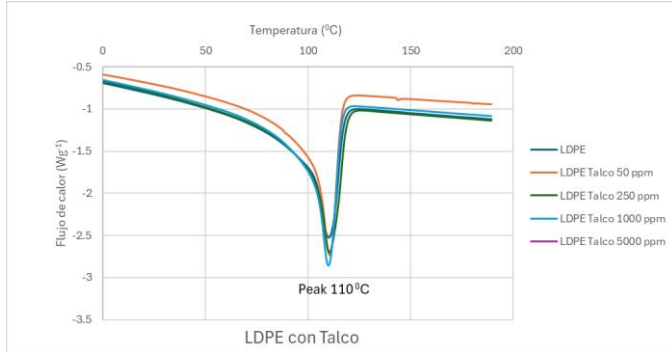
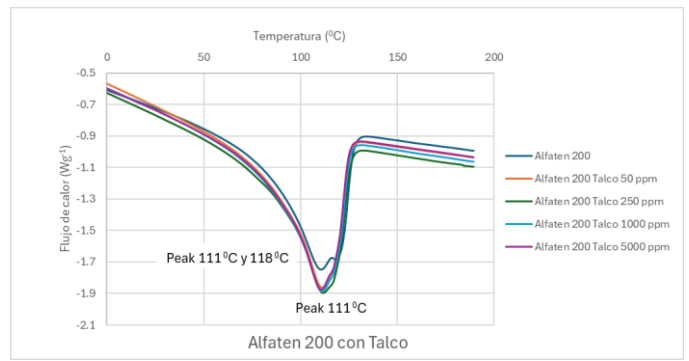
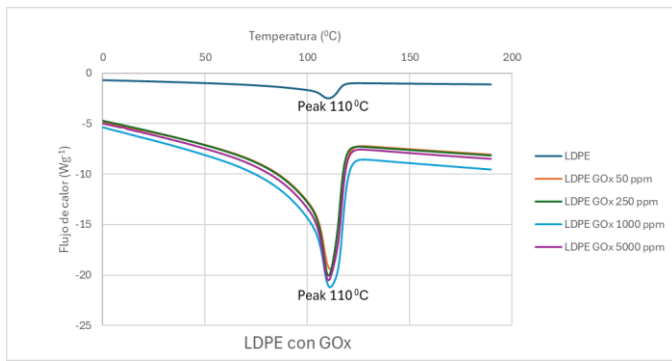


Figura 4. Comparativa DSC LDPE virgen y Alfaten 200

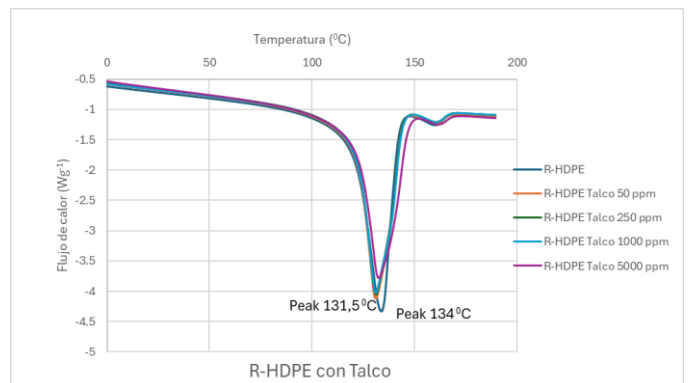
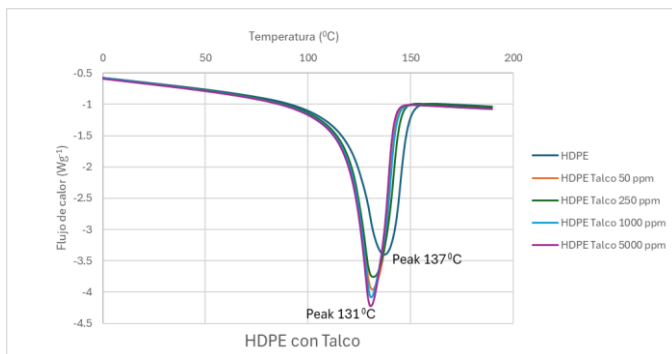


Figura 5. Comparativa DSC HDPE virgen y HDPE reciclado

Tabla 1. Comparativa general LDPE virgen y Alfaten 200

	IF	DSC	
Polímero	IF(g/10 min)	Tm (°C)	Cristalinidad(%)
Alfaten 200	0,49	109,7-117,1	44,00
Alfaten 200 GOx 50 ppm	0,42	110-117	45,20
Alfaten 200 GOx 250 ppm	0,49	110-116,9	43,80
Alfaten 200 GOx 1000 ppm	0,41	111,30	45,40
Alfaten 200 GOx 5000 ppm	0,40	110-116	43,70
Alfaten 200 Talco 50 ppm	0,35	111-116,5	42,90
Alfaten 200 Talco 250 ppm	0,39	111,7-116,6	43,00
Alfaten 200 Talco 1000 ppm	0,49	111-116	43,20
Alfaten 200 Talco 5000 ppm	0,44	111-116	43,70
Alfaten 200 Tyrol 50 ppm	0,50	111-116,7	44,00
Alfaten 200 Tyrol 250 ppm	0,40	111,30	43,80
Alfaten 200 Tyrol 1000 ppm	0,47	111-115,9	43,20
Alfaten 200 Tyrol 5000 ppm	0,40	110,6-116	43,80
	IF	DSC	
Polímero	IF(g/10 min)	Tm (°C)	Cristalinidad(%)
LDPE	1,54	110,00	38,60
LDPE GOx 50 ppm	1,44	110,80	46,70
LDPE GOx 250 ppm	1,27	110,00	48,20
LDPE GOx 1000 ppm	1,30	111,00	49,30
LDPE GOx 5000 ppm	1,40	110,00	48,40
LDPE Talco 50 ppm	1,28	131,5-160	66,80
LDPE Talco 250 ppm	1,24	131,5-160	67,40
LDPE Talco 1000 ppm	1,43	131,8-160	66,90
LDPE Talco 5000 ppm	1,17	131,6-160	68,50
LDPE Tyrol 50 ppm	1,20	111,00	49,10
LDPE Tyrol 250 ppm	1,60	110,00	49,00
LDPE Tyrol 1000 ppm	1,50	111,00	49,80
LDPE Tyrol 5000 ppm	1,61	116,00	48,30

4.3. Formulación, extrusión y análisis de compounds biobasados

En base a la fase anterior, se utilizó el Alfaten 200 con base de polímero reciclado para unir con biomasa en proceso de extrusión. En este proyecto, como primera aproximación, el proceso se fundamentó en el mayor aprovechamiento posible de la biomasa, por ello, esta se utilizó de forma directa tras un procesado mecánico de molido. Como biomasa se optó por poda de olivo y poda de guayule, en ambos casos de plantaciones de Castilla-La Mancha, utilizadas como filler a porcentajes de 10% y 20%. Antes de comenzar el proceso de extrusión controlado, se realizaron diversas pruebas con biomasa en diferentes granulometrías. El granulado ideal para las pruebas fue de 0,064 mm a 0,200 mm. Granulados inferiores tendían a colmatar

y apelmazarse (además de arriesgar una combustión prematura tanto en extrusión como en análisis térmico). Granulometrías superiores dificultaban la adhesión al polímero.

Compounds biobasados al 10%

El siguiente esquema muestra el procedimiento seguido (Figura 6).

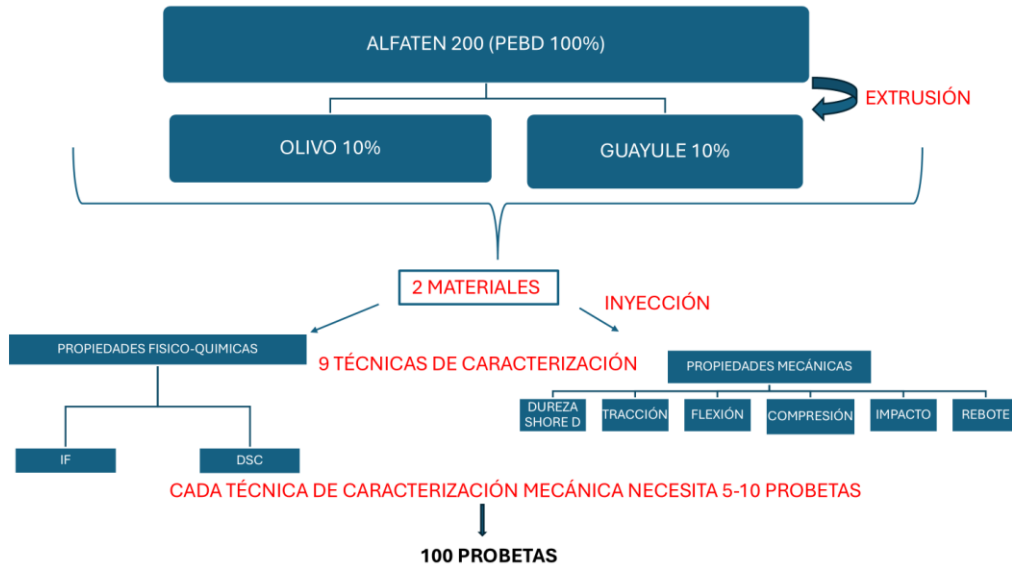


Figura 6. Proceso para extrusión y análisis de compuestos biobasados

Tabla 2. Resultados de caracterización de composites de biomasa al 10%

PROPIEDAD	NORMA	ALFATEN 200	ALFATEN 200 + OLIVO 10%	ALFATEN 200 + GUAYULE 10%
Índice fluidez	1133-1:2023	0,49	0,53	0,64
Dureza shore D	ISO 48-4:2018	45	46	45
Temperatura fusión (°C)	11357-3:2023	109,7-117,1	110,4-117,9	110,4-116,9
Cristalinidad (%)		43,8	42,3	42,2
Esfuerzo De Rotura (MPa)	527-1:2020 527-2:2012	11,5	9,0	11,2
deformación en el punto de rotura (%)		240	105	147,9
Módulo De elasticidad (MPa)		130	180	240,0

Resistencia A La Flexión (MPa)	178:2020	6,6	9,5	6,8
Modulo De Flexión (MPa)		163,9	256,7	189,5
Resistencia Impacto (kJ/m ²)	179-2:2021	53,7 (N)	25,7 (P)	27,2 (P)
Resistencia A La compresión (MPa)	604:2003	5,7	6,1	5,3
Modulo De compresión (MPa)		56,4	62,4	51,0
Resilencia por rebote (%)	8307:2019	34,6	30,1	33,3

Se observa que el índice de fluidez mejora cuando añade biomasa al 10 % respecto al ALFATEN 200 de partida, y es mayor en el composite con Guayule lo que influirá, en ambos casos, en la etapa de procesado.

En cuanto a las propiedades térmicas no se observan diferencias notables en cuando se añade biomasa, olivo o guayule respecto al ALFATEN 200 de partida, obteniendo cristalinidades ligeramente algo menores que el ALFATEN 200 de partida, lo que se traduce en datos de dureza similares en todas las muestras estudiadas.

El comportamiento de las propiedades mecánicas va a depender de la matriz polimérica, de las propiedades de la biomasa y de la interacción interfacial. Según esto, en cuanto a las propiedades mecánicas se observa que, en primer lugar, ambos composites formados a partir de biomasa presentan mejores resultados en el caso de las propiedades de tracción respecto al ALFATEN 200 de partida. Se observa un módulo de Young o elasticidad mucho mayor para el composite formado por Guayule, duplicando casi el valor obtenido con el ALFATEN 200 de partida. Sin embargo, óptimos resultados son obtenidos también en el caso del composite con Olivo. En cuanto a las propiedades en flexión se observan mejores resultados en ambos composites de biomasa respecto al ALFATEN 200 de partida como era de esperar, siendo mayores con olivo debido a que no se genera tanto defecto de cadena. Cuando se estudian propiedades de impacto se observa una disminución significativa de la resistencia al impacto de ambos composites con biomasa respecto al polímero de partida. Esto puede ser explicado atendiendo a la movilidad limitada de la cadena causada por la adición de fibras, así como al desarrollo de regiones

interfaciales débiles debido a la incompatibilidad intrínseca entre la matriz polimérica y la fibra de biomasa. Las regiones de interfaz débiles, de manera similar a los aglomerados, contribuyen a la propagación de grietas. Además, la formación intensa de grietas también puede atribuirse a una longitud de fibra insuficiente y a una mayor cantidad de extremos de fibras que limitan la transferencia eficiente de tensión desde la matriz a las fibras. Un efecto similar, podría ser observado en las propiedades en compresión para el composite formado a partir de guayule, el cual, presenta valores inferiores al polímero de partida. En cuanto al composite con olivo, presenta resultados esperados.

Finalmente, se llevaron a cabo ensayos de resiliencia al rebote para obtener información sobre el comportamiento elástico del polímero. Se observan valores similares al del ALFATEN 200 de partida, aunque algo ligeramente menores para los composites con biomasa.

Compounds biobasados con olivo al 10% con 0,1% de aditivo

A continuación, se muestra el proceso llevado a cabo para el aditivado (Figura 7).

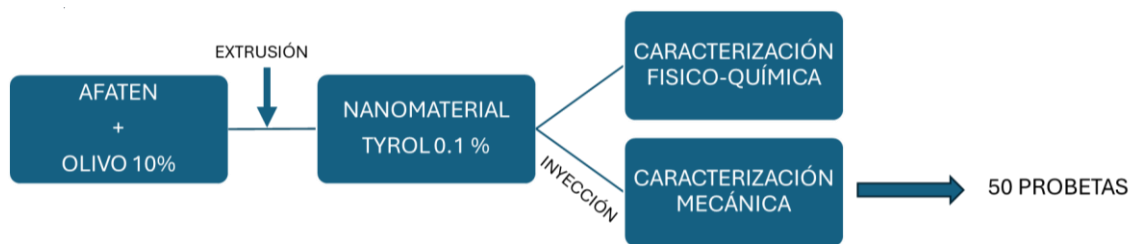


Figura 7. Proceso para extrusión y análisis de compuestos biobasados con aditivos

Tabla 3. Resultados de caracterización de composites de olivo al 10% con 0,1 % de aditivo

PROPIEDAD	NORMA	ALFATEN 200	ALFATEN 200 + TYROL 0,1 %	ALFATEN 200 + OLIVO 10%	ALFATEN 200 + OLIVO 10% + TYROL 0,1%
Índice fluidez	1133-1:2023	0,49	0,47	0,53	0,63
Dureza shore D	ISO 48-4:2018	45	45,5	46	47,5
Temperatura fusión (°C)	11357-3:2023	109,7-117,1	111-115,9	110,4-117,9	110,0-118,9
Cristalinidad (%)		43,8	43,2	42,3	41,8

Esfuerzo De Rotura (MPa)	527-1:2020 527-2:2012	11,5	12,0	9,0	10,0
deformación en el punto de rotura (%)		240	342,8	105	100
Módulo De elasticidad (MPa)		130	136,6	180	220
Resistencia A La Flexión (MPa)	178:2020	6,6	8,0	9,5	9,9
Modulo De Flexión (MPa)		163,9	222	256,7	260,3
Resistencia Impacto (kJ/m ²)	179-2:2021	53,7 (N)	61,7 (N)	25,7 (P)	48,2 (P)
Resistencia A La compresión (MPa)	604:2003	5,7	4,6	6,1	6,8
Modulo De compresión (MPa)		56,4	45,1	62,4	70,2
Resilencia por rebote (%)	8307:2019	34,6	33,9	30,1	28,7

En general, la presencia de oxido de grafeno comercial mejoran las propiedades respecto al ALFATEN 200 de partida con TYROL y para el composite con olivo debido a que mejoran la dispersión dentro de la matriz polimérica. Se observan mejoras en tracción, flexión y compresión. Es de destacar como en presencia de TYROL la resistencia al impacto mejora, acercándose a valores del ALFATEN 200 de partida. Esto es debido a que el TYROL favorece la cohesión interfacial dentro de la matriz. Por el contrario, los resultados de relisencia al rebote siguen siendo menores que el del composite con olivo y el del ALFATEN 200 de partida.

Compounds biobasados con guayule al 10% con 0,1% de aditivo

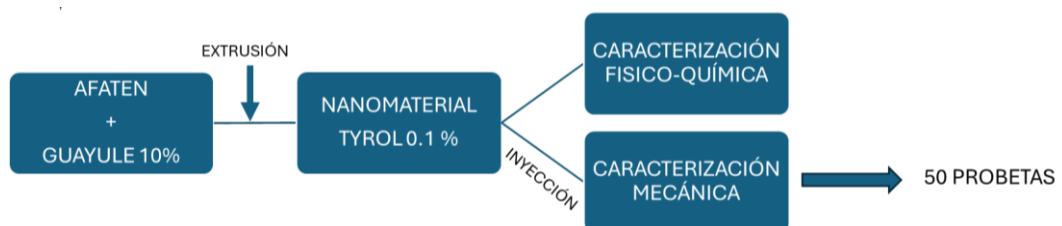


Figura 8. Proceso para extrusión y análisis de compuestos biobasados con aditivos

Tabla 4. Resultados de caracterización de composites de guayule al 10% con 0,1 % aditivo

PROPIEDAD	NORMA UNE-EN-ISO	ALFATEN 200	ALFATEN 200 + TYROL 0,1 %	ALFATEN 200 + GUAYULE 10%	ALFATEN 200 + GUAYULE 10% +TYROL 0,1 %
Índice fluidez	1133-1:2023	0,49	0,47	0,64	0,57
Dureza shore D	ISO 48-4:2018	45	45,5	45	48,2
Temperatura fusion (°C)	11357-3:2023	109,7-117,1	111-115,9	110,4-116,9	110,9-119,9
Cristalinidad (%)		43,8	43,2	42,2	42,5
Esfuerzo De Rotura (MPa)	527-1:2020 527-2:2012	11,5	12,0	11,0	9,5
deformación en el punto de rotura (%)		240	342,8	145	115
Módulo De elasticidad (MPa)		130	136,6	240	215
Resistencia A La Flexión (MPa)	178:2020	6,6	8,0	6,8	9,7
Modulo De Flexión (MPa)		163,9	222	189,5	212
Resistencia Impacto (kJ/m ²)	179-2:2021	53,7 (N)	61,7 (N)	27,2 (P)	34,1 (P)
Resistencia A La compresión (MPa)	604:2003	5,7	4,6	5,3	6,6
Modulo De compresión (MPa)		56,4	45,1	51,0	65,5
Resilencia por rebote (%)	8307:2019	34,6	33,9	33,3	25,7

Es de destacar que la presencia de TYROL no favorece la mejora de propiedades en la misma manera que en el caso del olivo. En este caso, se obtienen valores intermedios entre los obtenidos con ALFATEN 200 TYROL y ALFATEN 200 +Guayule. Además, mejora en este caso también la resistencia al impacto respecto al composite con guayule y también la resistencia a la compresión. Por el contrario, como pasaba también con el olivo con TYROL la resilencia sigue siendo menor que la del composite con guayule y que el ALFATEN 200 de partida.

Compounds biobasados al 20%

El siguiente esquema muestra el procedimiento seguido (Figura 9).

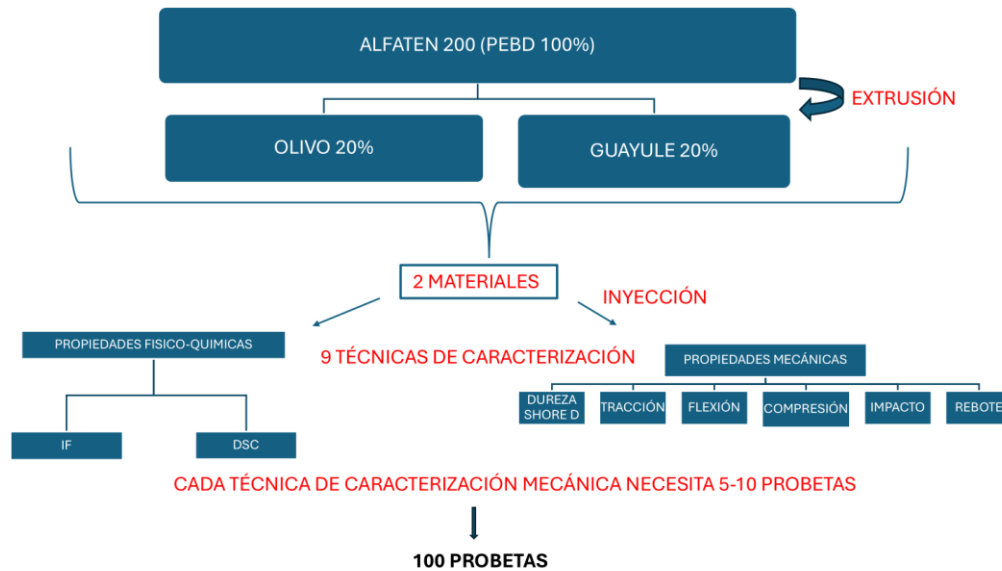


Figura 9. Proceso para extrusión y análisis de compounds biobasados

Tabla 5. Resultados de caracterización de composites de biomasa al 20%

PROPIEDAD	NORMA UNE-EN-ISO	ALFATEN 200	ALFATEN 200 + OLIVO 10%	ALFATEN 200 + GUAYULE 10%	ALFATEN 200 + OLIVO 20%	ALFATEN 200 + GUAYULE 20%
Índice fluidez	1133-1:2023	0,49	0,53	0,64	0,63	0,63
Dureza shore D	ISO 48-4:2018	45	46	45	48	48
Temperatura fusion (°C)	11357-3:2023	109,7-117,1	110,4-117,9	110,4-116,9	112,4-121,4	111,1-120,1
Cristalinidad (%)		43,8	42,3	42,2	37,4	38,1
Esfuerzo De Rotura (MPa)	527-1:2020 527-2:2012	11,5	9,3	11,2	8,0	8,1
deformación en el punto de rotura (%)		240	109,9	147,9	49	90
Módulo De elasticidad (MPa)		130	195,6	240,0	281	252
Resistencia A La Flexión (MPa)	178:2020	6,6	9,5	6,8	10,9	9,1

Modulo De Flexión (MPa)		163,9	256,7	189,5	260,1	251,6
Resistencia Impacto (kJ/m ²)	179-2:2021	53,7 (N)	25,7 (P)	27,2 (P)	16 (C)	15,4 (C)
Resistencia A La compresión (MPa)	604:2003	5,7	6,1	5,3	8,2	6,7
Modulo De compresión (MPa)		56,4	62,4	51,0	94,4	61,0
Resilencia por rebote (%)	8307:2019	34,6	30,1	33,3	26,8	27,6

El aumento de proporción de biomasa incorporado a la mezcla disminuye la cristalinidad, favoreciendo la formación de cristales menos perfectos. Esto es debido a una mayor proporción de agregados de biomasa dentro de la matriz polimérica. Se observan mejores valores de módulo de elasticidad debido al aumento de proporción de la fibra debido a las propiedades mecánicas rígidas del relleno, pero conllevan a una disminución en la deformación en la rotura, por lo que rompen antes con esfuerzos de rotura menores a la rotura por lo que se traduce en materiales más rígidos (dureza shore D mayores). Se observa una tendencia similar en los resultados obtenidos en los ensayos de flexión y compresión. Por el contrario, como se explicó anteriormente, disminuye la resistencia al impacto debido a que los aglomerados de fibras que conllevan a la formación de grietas, y por tanto, a la rotura completas de la probeta. Por último, la resilencia sigue la tendencia de los composites con biomasa al 10%.

4.4. Fabricación de componentes

La fabricación de componentes es un elemento clave en la viabilidad de cualquier material o compound en forma de pellet o granulado. En un proceso industrial, este material se suministra en sacas para que puedan ser directamente aportados en un nuevo proceso de extrusión con dosificadores y/o en un proceso de inyección.

En primer lugar, se han obtenido compounds en formato pellet a través de un proceso de extrusión con extrusora de doble husillo, realizados en la Planta Piloto de Investigación de Superficies Deportivas de la UCLM. El polvo de biomasa ha sido obtenido gracias a la colaboración con grupos de investigación de la UCLM en Almadén (Olivo) y en Albacete (Guayule), así como con la participación de la Biorrefinería de I+D+i Clamber (vinculada al Instituto Regional de Investigación y Desarrollo Agroalimentario y Forestal de Castilla-La Mancha).

En la figura 11 se muestran imágenes de los pellets obtenidos con material reciclado sin biomasa, así como el mismo material con biomasa al 10% y 20%.



Figura 11. Imagen de compunds en formato pellet

De forma adicional, estos componentes han sido sometidos a diferentes procesos de inyección tanto mediante inyectora como mediante termconformado (Figuras 12 y 13).

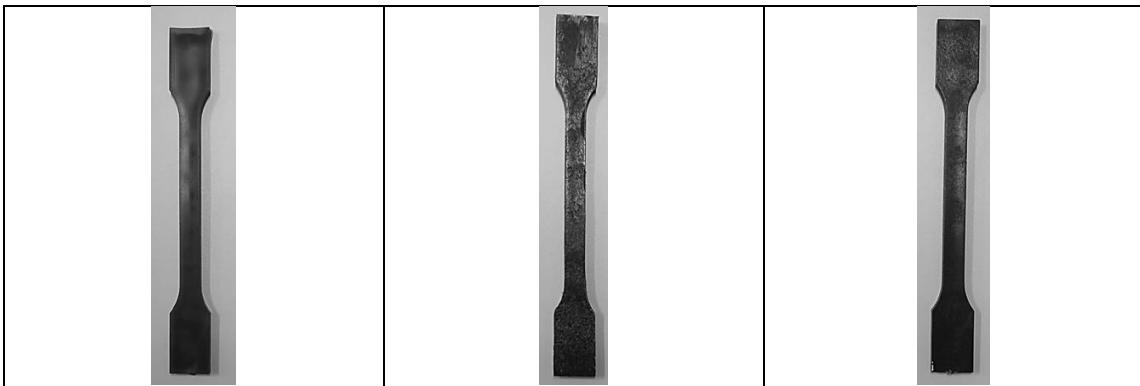


Figura 12. Imágenes de probetas de ensayo mediante inyección



Figura 13. Imágenes de probetas de ensayo mediante termoconformado

En cuanto a la fabricación de componentes, en este proyecto se ha contado con la colaboración de GWC (Green World Compounding), con la que se mantiene una colaboración a largo plazo. Esta entidad aporta el material base reciclado (alfaten) y además colabora en el proceso de fabricación de los componentes mediante procesos de extrusión avanzados y a escala industrial.

Para el momento de finalización de este proyecto, se ha comprobado la viabilidad de la fabricación de relleno granular a partir de compounds biobasados. Este tipo de componente permite la creación tanto de relleno técnico como la posibilidad de ligarlo para obtener un pavimento continuo con aplicaciones de bases elásticas de césped artificial u otro tipo de aplicaciones que requieran de bases amortiguadores de impacto para deporte u ocio. Se ha determinado que la granulometría más adecuada para que se pueda integrar en sistemas de césped artificial, teniendo en cuenta la nueva normativa europea es de 5-6.3 mm (Figura 14).



Figura 14. Muestra de granulado de LDPE reciclado y granulometría base para relleno técnico

En cuanto a su adhesión, se han conseguido fabricar losetas con granulometrías de 20 a 60 mm (Figura 15).



Figura 15. Ejemplos de losetas fabricadas con material base LDPE reciclado de residuos agrícolas

Por último, en cuanto a la fibra de césped artificial se ha conseguido avanzar en un componente que incluye una parte de material virgen y otra parte de material reciclado. Hasta el momento, se ha podido avanzar en los ensayos de envejecimiento artificial, ya que estos se extienden hasta 8 meses según la normativa para entornos cálidos con alta radiación solar. No obstante, los resultados previos sobre el material base arrojan valores muy prometedores, pues al ser plástico de residuos agrícolas, procedentes en su mayor parte de plástico de invernadero, incluyen protectores UV que ayudan a superar este tipo de desgaste. En el momento que se completen estos ensayos sobre el material fabricado, se podrán completar los ensayos de rendimiento de la fibra.

4.5. Análisis de rendimiento de componentes

A diferencia de otras aplicaciones de mercado, los componentes constructivos del césped artificial deportivo deben incorporar unas prestaciones de rendimiento técnico-deportivo para que puedan ser viables. Como se ha comentado en el marco teórico, un sistema de césped artificial está compuesto por varios componentes y, en conjunto, deben presentar unas propiedades mecánicas y biomecánicas que aporten funcionalidad y seguridad a la superficie deportiva. Estas propiedades se consiguen en último momento con la interacción de todos los componentes que se incluyen en el sistema, pero muchos de ellos también deben presentar propiedades de forma individual para que se consideren ser mínimamente viables.

Además, dichas propiedades, tanto de cada componente de forma individual como del sistema completo, deben ser mantenidas durante la vida útil del producto, por lo que deben ser sometidos a diferentes desgastes simulados en laboratorio.

Estas propiedades son definidas a través de los organismos reguladores deportivos (federaciones internacionales normalmente, como FIFA o World Rugby), a través de manuales de calidad que incluyen tanto requisitos como técnicas de ensayo. Además, también existen normas de requisitos de diferentes compites de normalización europeos (como el CEN), así como otros métodos actualmente en desarrollo por organizaciones vinculadas al césped artificial deportivo.

Para este proyecto, se ha procedido al análisis de los sistemas aglomerados mediante las pruebas básicas de rendimiento técnico-deportivo (funcionalidad y seguridad de la superficie). Gracias a la unión de las partículas es posible estimar su efecto de forma aislada al sistema si fueran a ser utilizadas como relleno técnico. Además, el propio resultado también puede ser utilizado como finalista en caso de que el componente fuera a ser utilizado como capa protectora (base elástica o shockpad). Las pruebas de fabricación se realizaron sobre el material base con el

fin de extrapolar los resultados para decidir la fabricación con las diferentes aplicaciones de biomasa. Al no diferir las propiedades físico-químicas y mecánicas de los materiales en pellet tras el proceso de extrusión (únicamente aumentando ligeramente la fluidez), es posible replicar el proceso de fabricación con los compuestos biobasados al 10%.

A continuación, se muestran los ensayos realizados en cada una de las pruebas de fabricación:

Determinación de la absorción de impactos (FIFA Test Method 04. FIFA Quality Programme for Football Turf, Test Manual I – Test Methods. October 2015 edition | v3.4 01.02.2022)

Es la capacidad de la superficie para absorber los impactos producidos por las acciones de los jugadores sobre el pavimento. Una superficie dura tiene un riesgo potencial de producir lesiones, mientras que una superficie inusualmente blanda aumentará la fatiga del jugador. Se mide en porcentaje de absorción. Se deja caer una masa determinada desde una altura conocida, utilizándose un muelle de rigidez controlada para simular el efecto amortiguador de las articulaciones de tobillo o rodilla. El resultado se expresa en porcentaje y se denominará AI.

Determinación de la deformación vertical (FIFA Test Method 05. FIFA Quality Programme for Football Turf, Test Manual I – Test Methods. October 2015 edition | v3.4 01.02.2022)

Una superficie que se deforma excesivamente reduce la estabilidad del pavimento y como consecuencia el jugador reducirá su tiempo de paso y por tanto su velocidad. La deformación de un campo se mide por su capacidad para ceder ante un impacto. Una ausencia o escasez de deformación indicaría una superficie dura y peligrosa. El resultado se expresa en mm y se denominará DV.

Determinación de la energía de restitución (FIFA Test Method 06. FIFA Quality Programme for Football Turf, Test Manual I – Test Methods. October 2015 edition | v3.4 01.02.2022)

Es una propiedad derivada de las anteriores, obtenida con el mismo equipo. Estima la energía que devuelve la superficie ante el impacto. De momento, es una variable informativa en la mayoría de las normativas, sin requisitos de rendimiento. El resultado se expresa en porcentaje y se denominará ER.

Determinación del Criterio de lesión en la cabeza (HIC) y la Altura de caída crítica (CFH) (UNE-EN 17435:2022)

Es una propiedad relacionada con el riesgo de lesión craneal por caída. La gravedad de la lesión derivada de un impacto en la cabeza se puede cuantificar en términos de criterio de lesiones en la cabeza (HIC, *Head Injury Criterion*) y se ha seleccionado el nivel HIC = 1 000 como el límite superior. Por tanto, el resultado de este ensayo muestra la altura en la que se consigue un valor de 1000 HIC, expresada como Altura de Caída Crítica (ACC).

Debido al tamaño de las muestras fabricadas, los ensayos de AI, DV y ER se realizaron en 4 puntos en cada muestra. El método HIC (para evaluar la ACC) se realizó en un único punto de ensayo (Figura 16).

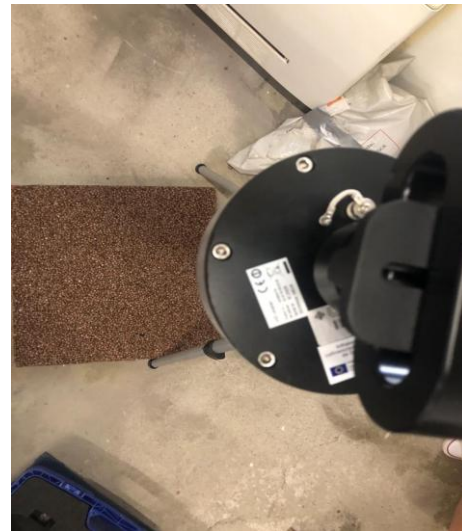


Figura 16. Ejemplo de toma de datos. La absorción de impactos, deformación vertical y energía de restitución se evalúan mediante el atleta artificial avanzado (AAA). La altura de caída crítica se evalúa mediante el Head Injury Criterion (HIC).

Todos los ensayos fueron realizados en la Planta Piloto de Investigación en Superficies Deportivas de la UCLM. En la siguiente figura se muestran los resultados (Figura 17). Como referencia, los requisitos para capas protectoras de impactos, capas elásticas o shockpads, teniendo en cuenta la UNE-EN 15330-4:2023 así como su adaptación a los diferentes programas de calidad, deberían ser de más de 20% de absorción de impactos. Además, en un sistema completo se especifica una altura de caída crítica de 1,3 m para rugby y 0,6 m para fútbol.

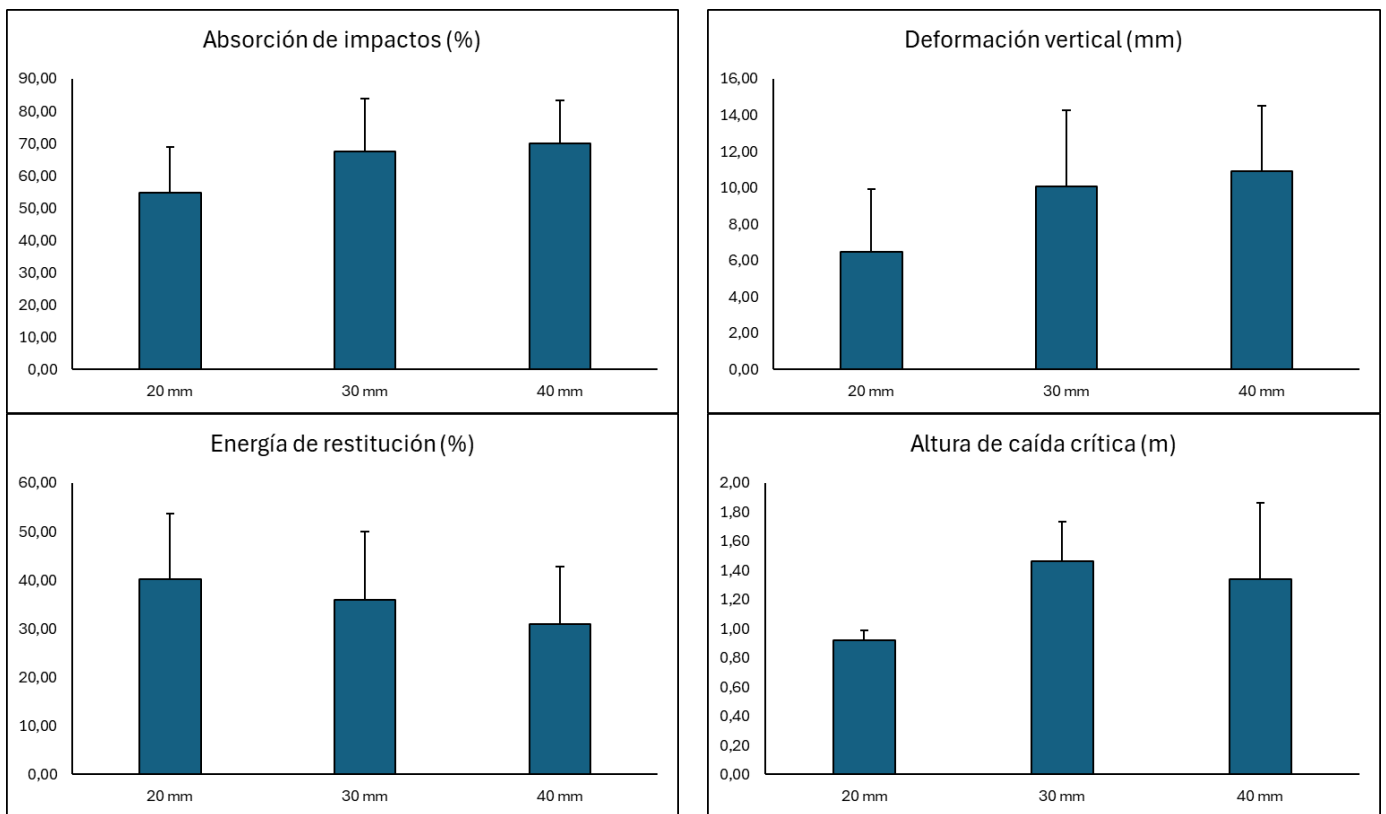


Figura 17. Resultados de rendimiento en los materiales fabricados conglomerados en diferentes espesores

Los resultados son altamente prometedores, al obtener valores muy elevados en absorción de impacto y una altura de caída crítica prácticamente suficiente para proveer de funcionalidad a todo el sistema de césped artificial.

4.6. Cumplimiento de los objetivos

El objetivo principal de este proyecto es la valorización de residuos y subproductos poliméricos y agroforestales (biomasa) para su uso en la fabricación de materiales para pavimentos deportivos. En este sentido, el objetivo principal ha sido alcanzado ya que se ha podido encontrar un material de base reciclado procedente de residuos agrícolas, además de determinar formulaciones con porcentajes de biomasa del 10% y 20%, procedentes de subproductos de recursos estratégicos de la región de Castilla-La Mancha, manteniendo propiedades en el material producido para su posterior transformación en componentes de pavimentos deportivos.

El potencial obtenido puede ser considerado como alto, ya que se ha conseguido obtener materiales biobasadas con una base reciclada, porcentajes altos de biomasa y, además, un uso de biomasa muy eficiente al ser utilizada simplemente tras procesado mecánico, pudiendo dar un mayor aprovechamiento al material.

Además, las funciones deportivas evaluadas inicialmente presentan un rendimiento alto.

En cuanto a los objetivos específicos:

- Reducir la carga de plástico virgen en la fibra de césped artificial deportivo mediante la introducción de restos de poda de olivo biorrefinada. Se ha conseguido el objetivo al poder integrar biomasa procedente de poda de olivo en los materiales de referencia.
- Sustituir plástico virgen de las fibras de césped artificial por plástico reciclado procedente de residuos agrícolas. Se ha podido sustituir parte del plástico virgen por plástico reciclado manteniendo las propiedades.
- Desarrollar composites elastoméricos a partir de residuos plásticos y subproductos agroforestales, incorporando aditivos de origen orgánico, para su uso como relleno técnico de césped artificial. Se ha logrado extruir compunds biobasados viables para la fabricación de elastómeros con altas propiedades tanto para granulado técnico como para pavimento continuo en capas absorbedores de impactos.

4.7. Desviaciones respecto a la planificación inicial

Fase 1. Identificación y análisis de residuos agroforestales (biomasa) para su incorporación en los composites

Esta fase ha sido llevada a cabo con normalidad y siguiendo lo planificado. No obstante, debido a diferentes orígenes de los materiales reciclados, se han utilizado 7 materiales de referencia, en lugar de 5.

Fase 2. Extrusión de los composites y análisis inicial

Esta fase ha sido llevada a cabo de forma completa y obteniendo más resultados de los esperados inicialmente. Se han obtenido más de 20 formulaciones de materiales reciclados con aditivos, de los cuales 8 materiales, 6 de ellos biobasados, presentan propiedades aceptables.

Fase 3. Extrusión y análisis final

Esta fase ha tenido que ser adaptada para poder asegurar una viabilidad y escalabilidad de los resultados.

En la propuesta de proyecto, se esperaba poder analizar 4 a 5 materiales repartidos entre fibra y rellenos. En el caso de la fibra, no fue posible llegar a la fabricación ya que se ha tenido que incorporar un análisis que se extiende a 8 meses, para asegurar el mantenimiento de las propiedades ante la exposición UVA. En el caso de los rellenos, se ha optado por analizar el componente base de plástico reciclado en

diferentes formas de fabricación. Los hallazgos encontrados en la fase 2 demuestran la viabilidad de fabricación con compunds biobasados. Por tanto, la limitación no es tanto la fabricación, sino el cumplimiento de requisitos técnicos del material base. Teniendo eso en cuenta y, para poder cumplir plazos y asegurar el cumplimiento de los objetivos, se realizaron todas las pruebas de fabricación sobre el material base, ya que ahorra la preparación de biomasa a una escala mayor, que era lo que limitaba en tiempo por tener que acomodarse a los periodos de poda.

No obstante, se ha detectado una nueva aplicación en pavimentos deportivos de gran potencial, que ha sido incorporada en el proyecto a mayores, como es el uso de los productos biobasados en pavimentos continuos, capas protectoras de impactos (capas elásticas o shock-pad). Esto supone un gran avance y un hallazgo importante alineado con los objetivos del proyecyo.

4.8. Ejecución del presupuesto

La ayuda concedida fue de 6.000 €. El presupuesto se ejecuto en las partidas consideradas en la solicitud. A continuación, se detallan los gastos ejecutados:

CONCEPTO	IMPORTE
Tamices para ajustar granulometria de la biomasa	154,00 €
Materiales de laboratorio para manejo de muestras	466,53 €
Plásticos y materiales para extrusión	1.400,00 €
Asistencia a jornada técnica ESTC para desarrollar workshop	1.078,88 €
Subcontratación de fabricación de termoconformado	1.080,00 €
Consumibles laboratorio (agua destilada y crisoles DSC)	1.819,48 €
TOTAL	5.998,89 €

5. Escalado y aplicaciones industriales

5.1. Escalado y oportunidades

Este proyecto presenta grandes oportunidades para su escalado y explotación en la región de Castilla-La Mancha.

En primer lugar, la disponibilidad de poda, principalmente de olivo, está asegurada en diversos puntos de la región, lo que aporta varias alternativas logísticas. Además, desde el punto de vista medioambiental, puede impactar en zonas con más problemáticas en la reutilización del subproducto.

En segundo lugar, este proyecto está alineado con la línea de investigación principal del Grupo IGOID en colaboración con la spin-off IGOID-SPORTEC. Gracias a los

resultados obtenidos se podrá continuar con proyectos que requieren de disponer de una tecnología previa avanzada (investigación aplicada y desarrollo industrial).

El siguiente paso será optimizar los compounds controlando el proceso y costes de fabricación, así como transformar los materiales en pavimentos deportivos a escala relevante, que puedan ser evaluados tanto a nivel de laboratorio como con pruebas con usuarios reales.

Por tanto, se dispone de todos los elementos necesarios para una proyección de estos resultados a soluciones reales de mercado que puedan impactar en la estrategia de economía circular de la región:

- Disponibilidad de subproductos viables para la producción de compounds biobasados.
- Cadenas de suministros de todos los materiales de base.
- Tecnologías de fabricación funcionales.
- Acceso a recursos para su desarrollo industrial mediante la colaboración de la UCLM, empresas innovadoras para la explotación y empresas y entidades de apoyo a la I+D+i en el sector.
- Demanda de productos basados en economía circular ante la problemática medioambiental de las alternativas actuales de mercado.

5.2. Colaboración con el sector industrial

Esta línea de trabajo aúna a diferentes entidades la región, optimizando recursos para impactar en diferentes objetivos de la estrategia de economía circular. En primer lugar, desde el Grupo IGOID de la Universidad de Castilla-La Mancha se han establecido colaboraciones con otros grupos de trabajo de la región, aprovechando avances de conocimiento en productos biobasados en otros sectores. En segundo lugar, se colabora estrechamente con la Biorrefinería de I+D+i Clamber, para poder realizar pruebas a escala industrial mediante diferentes tipos de procesado de la biomasa. Por último, la explotación y escalado de estos resultados podrá ser llevado a cabo en colaboración con la spin-off IGOID-SPORTEC, pudiendo realizar pruebas a escala relevante y gestionar procesos de fabricación para la puesta en el mercado, explotando los conocimientos alcanzados. IGOID-SPORTEC cuenta con los sellos de PYME Innovadora y EIBT (Empresa Innovadora de Baste Tecnológica), demostrando su capacidad de innovación, así como el acceso a incentivos para facilitar la continuación de este proyecto.

6. Impacto

6.1. Impacto general

Impacto social. Los resultados de este proyecto aportan conocimiento para que la práctica de la actividad física y el deporte no se vea afectada por las restricciones que se implantarán a corto y medio plazo en los campos deportivos de césped artificial. Además, se espera que mejore la percepción y aceptación social de estas instalaciones deportivas, al implantar criterios de optimización en el uso de recursos, bajo impacto ambiental y sanitario y economía circular y el uso de materiales biobasados sostenibles. Por otra parte, la valorización de residuos agroforestales puede contribuir a añadir vías de desarrollo socioeconómico a las zonas rurales permitiendo así, generar sinergias entre universidad, sector primario rural, e industria de la transformación.

Impacto ambiental. Los resultados pueden repercutir en un impacto directo en la lucha contra la liberación de microplásticos intencionados y no intencionados, referidos en la publicación de la Unión Europea “*EU action against microplastics, 2023*” y que incluye al césped artificial deportivo como principal emisor de microplásticos intencionados (estimación de 16.000 toneladas anuales). Por tanto, las actuaciones que fomenten su control y disminución de la carga de material, plástico tendrán un impacto proporcional, o incluso exponencial, en el medioambiente. Este informe se desarrolla como resultado de diferentes proyectos internacionales de recopilación e identificación de microplásticos, así como en la publicación de la UE “*Environmental and Health Risks of Microplastic Pollution, 2019*”. Además, de forma directa también afecta sectores clave en la economía circular y la reducción en el uso de plásticos, debido a la reutilización de plásticos reciclados de origen agroalimentario. Esta preocupación y sector estratégico en este sentido se evidencia en el report final de la UE, de 2021, “*Conventional and Biodegradable Plastics in Agriculture*”, donde pone de manifiesto el tipo de plásticos y el impacto en el medio ambiente. Si se reduce un 15% el plástico de todos los terrenos de juego, se eliminarían 2.400 toneladas/ año de microplásticos.

El proyecto presentado aborda de forma directa la valorización de subproductos y residuos de la producción en sectores estratégicos de Castilla-La Mancha con gran potencial de desarrollo como la biomasa producida por las principales plantaciones en la región. Además, su aprovechamiento está dirigido a un sector con alto valor añadido como es el de equipamientos deportivos, dando así un aprovechamiento para la mejora de la economía circular de la industria de instalaciones deportivas. Concretamente, este proyecto trabajará inicialmente sobre el sector olivar mediante el aprovechamiento de la poda, un recurso que puede ser de alto valor

pero que actualmente es difícil de tratar por la falta de alternativas industriales. Según la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha, El olivar se ha convertido en el principal cultivo de la región al haber alcanzado unas 450.000 hectáreas, la misma superficie que el viñedo, y al contar con 83.000 olivicultores. Además, trabajará sobre otras explotaciones más innovadoras como el pistacho o el guayule, de reciente interés singular para la región.

Esta idea produce una simbiosis industrial donde en sector primario agrícola aporta un nuevo bien de alto valor para el sector industrial para la fabricación en primer término de compounds para su uso en equipamientos deportivos y, en segundo término, para la propia fabricación del equipamiento. Por último, como resultado, se produce un producto que aporta un gran valor social, ya que las superficies de césped artificial deportivo son la base del sistema deportivo en prácticamente todos los municipios españoles, dando acceso a la práctica deportiva y a hábitos activos a la población joven.

Por último, cabe destacar que este proyecto aprovecha una fortaleza presente en prácticamente todos los sectores analizados en la estrategia, como es la valorización, transformación o aprovechamiento de biomasa de industria agroalimentaria.

Impacto económico. Con estos resultados se pueden alcanzar prototipos validados en laboratorio de sistemas de césped artificial (TRL6) bajos en plástico (10-15% menos), lo que supondría un gran avance en este sector. La evolución de estas soluciones hacia el mercado y su escalado puede tener un gran impacto económico al plantear una alternativa no existente actualmente en el mercado. Un mercado que enfrenta prohibiciones.

El impacto económico de este proyecto será muy directo en el mercado del césped artificial mediante la sustitución de materiales que han sido prohibidos y sustitución de materiales menos circulares. La posibilidad altamente innovadora de diseñar componentes de acuerdo con las propiedades y costes establecidos permitirá disponer de una variedad de productos para ofrecer a los fabricantes e instaladores de césped con poca competencia. El tamaño de este mercado se puede deducir del hecho de que se construyen 400 campos al año, con un coste medio de 150.000,00 € por superficie. Por tanto, se podría estimar un mercado anual de más 60 millones de euros anuales directos solo en España, de los cuales el 50% proceden de los componentes tratados en este estudio. Pero, además, el conocimiento y el modelo desarrollado se pueden aplicar fácilmente en el desarrollo y fabricación de otros productos deportivos y de sectores de alto nivel, lo que abre más oportunidades de

impacto económico a medio plazo. La industria del césped artificial construye y renueva millones de metros cuadrados de superficie anualmente. Los resultados de este proyecto pueden aportar soluciones escalables para que los fabricantes puedan sustituir los plásticos tradicionales utilizados en la fabricación bases elásticas, rellenos técnicos e hilo de césped artificial.

A efectos de cuantificar el impacto en detalle, si en España se construyen una media de 400 campos al año, una simple reducción del 10% en la cantidad de materiales plásticos derivados del petróleo utilizados en su fabricación supondría una reducción total de 4.000 toneladas anuales de este tipo de materiales, tanto en su fabricación como en su posible emisión al medio ambiente. Esto se transforma directamente en un impacto económico de materiales alternativos y sustitutivos por ese porcentaje de cambio, que se trasladan también a su fabricación.

6.2. Estrategia de Economía Circular de Castilla-La Mancha 2030

Los resultados de este proyecto están alineados con la Estrategia de Economía Circular 2030 de Castilla-La Mancha. El proyecto afecta de forma directa al Eje 4, “EJE DE PRODUCCION, BIENES Y SERVICIOS”, en la línea de “Cierre de ciclos productivos”. La medida vinculada a esta línea está definida como “Incorporación de materias secundarias y valorización de subproductos y residuos de la producción”. De forma más concreta y como se describe en el actual Plan de Acción, “Impulso de los procesos de valorización de subproductos y residuos de la producción para la obtención de bioproductos de alto valor añadido y/o bioenergía y biocombustibles” destacando como medida el “Impulso a la generación de productos de valor añadido y energía en los sectores estratégicos con la incorporación de subproductos, propios o de terceros, apostando por la simbiosis industrial”. En este proyecto se ha demostrado la aplicabilidad y valorización de subproductos agroalimentarios de la región en combinación con procesos de fabricación de componentes de césped artificial deportivo con principios de economía circular. Esta técnica no solo se alinea con objetivos de la estrategia, sino que además aporta soluciones ante un marco regulador del sector que va a limitar el uso de materiales actuales.

6.3. Divulgación

Durante la ejecución del proyecto, los resultados preliminares han sido discutidos en una jornada técnica internacional de la ESTC (EMEA Synthetic Turf Council). En la figura 18 se presenta el panel de ponentes del evento, centrado en la sostenibilidad del césped artificial en el nuevo escenario sobre las restricciones de microplásticos. En concreto, la ponencia realizada por el beneficiario fue sobre resultados pilotos de la cantidad de fibra que se pierde en forma de microplásticos

no intencionados, extrapolando la cantidad de plástico y las estrategias actuales para su reducción.

HOME SPONSORS PROGRAMME **SPEAKERS** HOTEL INFORMATION FEES & MEETING INFO TABLE-TOPS LOGIN

ESTC TECHNICAL DAY

Building a Sustainable Future

14 - 15 October 2024 | Brussels, Belgium

Alastair Cox
Technical Director
ESTC

Jorge Garcia-Unanue
Professor & Project Coordinator, IGDD Group
University of Castilla-La Mancha

Gert-Jan Kieft
Manager
Wro UK Sport

Emily Even
Sustainability Advisor
City of Amsterdam

Adnan Zeb-Khan
Carpet Recycling UK Project Manager
Carpet Recycling UK

Wilko Zuidema
Project leader requirements and certification
RDC MEP

Malgorzata Golebiewska
Team Leader Environmental Footprint & Green Claims, and Environment
European Commission

Stefan Diderich
Director General/CEO
ESTC

Alexandru Bobeica
Sew Director Central and Eastern Europe
EWC Handelbank GmbH

Christoph Katz
Senior Advisor and Member of the Board/Chair
EWC

Eric O'Donnell
ESTC Knowledge Pillar Leader
Sports Labs

Marisa Vieira
Principal Consultant
Pro Recyclability

Colin Young
Chair of the Yammar Task Force
TheCrate Group

Wouter van Kootwijk
Sustainability Consultant
Promotions

Figura 18. Evento divulgativo y ponentes participantes

6.4. Nuevos proyectos

En la actualidad, el beneficiario de este proyecto forma parte de dos propuestas de redes de investigación oficiales, que actualmente están siendo evaluadas. Por tanto, los resultados de este proyecto serán expuestos e incluidos en los grupos de trabajo de dichas redes.

Por un lado, la solicitud de la red a la Agencia Estatal de Investigación de “Red de investigación en alternativas circulares a los materiales utilizados actualmente para la fabricación de superficies y equipamiento Deportivo”, en la que participan expertos de las siguientes universidades: Universidad de Castilla-La Mancha, Universidad de Jaén, Universidad de Sevilla, Universidad de Granada, Universidad Autónoma de Madrid, Universidad Europea de Madrid, Universidad de Valencia y la Fundación Universitaria San Antonio de Cartagena.

En segundo lugar, la COST action, a nivel de UE, OC-2024-1-27149 " Non Plastic circular materials for increasing circularity of sports surfaces". En esta propuesta están incluidos más de 30 especialistas de hasta 20 países tanto de la unión europea como de fuera de ella, incluyendo universidad, empresas, centros tecnológicos y cluster o asociaciones.

Gracias a estos grupos de trabajo se podrán aportar ideas y formar consorcios para poder presentar proyectos a nivel internacional, a programas como LIFE u Horizonte Europa.

7. Referencias bibliográficas

- Ābele, A., Merijs-Meri, R., Žiganova, M., Iesalniece, Z., & Bochkov, I. (2023). Effect of agricultural biomass residues on the properties of recycled polypropylene/polyethylene composites. *Polymers*, 15(12), 2672.
- Alcántara, E., Gámez, J., Rosa, D., & Sanchis, M. (2009). Analysis of the influence of rubber infill morphology on the mechanical performance of artificial turf surfaces for soccer. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 223(1), 1-9
- Anwar, Z., Gulfranz, M., & Irshad, M. (2014). Agro-industrial lignocellulosic biomass a key to unlock the future bio-energy: a brief review. *Journal of radiation research and applied sciences*, 7(2), 163-173.
- Bigelow, E. M., Elvin, N. G., Elvin, A. A., & Arnoczky, S. P. (2013). Peak impact accelerations during track and treadmill running. *Journal of Applied Biomechanics*, 29(5), 639-644.

- Bø, S. M., Bohne, R. A., & Lohne, J. (2024). Environmental impacts of artificial turf: a scoping review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-12.
- Brito, J., Krustup, P., Rebelo, A. (2012). The influence of the playing surface on the exercise intensity of small-sided recreational soccer games, *Hum Mov Sci*. 31(4), 946-956.
- Casetta, M., Paturel, A., Duquesne, S., Janus, L., Talon, O., Martin, N., ... & De Clercq, G. (2019). Contribution of infill materials to the fire behavior of artificial turf. In *AUTEX 2019, 19th World Textile Conference on Textiles at the Crossroads*. Autex.
- Charalambous, L., Wilkau, H., Potthast, W., Irwin, G. (2016). The effects of artificial surface temperature on mechanical properties and player kinematics during landing and acceleration, *J Spor Health Sci*. 5(3), 355-360.
- De Haan, W. P., Quintana, R., Vilas, C., Cózar, A., Canals, M., Uviedo, O., & Sanchez-Vidal, A. (2023). The dark side of artificial greening: Plastic turfs as widespread pollutants of aquatic environments. *Environmental Pollution*, 334, 122094.
- Deshmukh, G. S. (2022). Advancement in hemp fibre polymer composites: a comprehensive review. *Journal of Polymer Engineering*, 42(7), 575-598.
- Dixon, S. J., Collop, A. C., & Batt, M. E. (2000). Surface effects on ground reaction forces and lower extremity kinematics in running. *Medicine Science of Sports Exercise*, 32(11), 1919-1926.
- Dixon, S. J., Fleming, P., James, I., & Carré, M. (Eds.). (2015). *The Science and Engineering of Sport Surfaces*. London: Routledge.
- Fleming, P. (2011). Artificial turf systems for sport surfaces: current knowledge and research needs. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 225(2), 43-56.
- Fleming, P., Forrester, S.E., McLaren, N.J. (2015). Understanding the effects of decompaction maintenance on the infill state and play performance of third-generation artificial turf pitches, *Proc Inst Mech Eng Part P-J Sport Eng Technol*. 229(3), 169-182.
- Fuller, C.W., Dick, R.W., Corlette, J., Schmalz, R. (2007). Comparison of the incidence, nature and cause of injuries sustained on turf and new generation artificial turf by male and female football players, Part 1: match injuries. *Br J Sport Med*, 41, 20-26.
- Gomes, F. O., Rocha, M. R., Alves, A., & Ratola, N. (2021). A review of potentially harmful chemicals in crumb rubber used in synthetic football pitches. *Journal of hazardous materials*, 409, 124998.
- Hackney, J., Brummel, S., Jungblut, K., & Edge, C. (2011). The effect of sprung (suspended) floors on leg stiffness during grand jete landings in ballet. *Journal Dance and Medicine Science*, 15(3), 128-133.

- Kole, P. J., Van Belleghem, F. G., Stoorvogel, J. J., Ragas, A. M., & Löhr, A. J. (2023). Tyre granulate on the loose; How much escapes the turf? A systematic literature review. *Science of the Total Environment*, 166221.
- Massey, R., Pollard, L., Jacobs, M., Onasch, J., & Harari, H. (2020). Artificial turf infill: a comparative assessment of chemical contents. *NEW SOLUTIONS: A Journal of Environmental and Occupational Health Policy*, 30(1), 10-26.
- Moritz, C. T., & Farley, C. T. (2004). Passive dynamics change leg mechanics for an unexpected surface during human hopping. *Journal of Applied Physiology* (1985), 97(4), 1313-1322.
- Mu, B., Wang, H., Hao, X., & Wang, Q. (2018). Morphology, mechanical properties and dimensional stability of biomass particles/high density polyethylene composites: Effect of species and composition. *Polymers*, 10(3), 308.
- Nigg, B. M., & Yeadon, M. R. (1987). Biomechanical aspects of playing surfaces. *Journal of Sports Sciences*, 5(2), 117-145.
- Pardalis, N., Xanthopoulou, E., Zamboulis, A., & Bikiaris, D. N. (2024). Olive stone as a filler for recycled high-density polyethylene: A promising valorization of solid wastes from olive oil industry. *Sustainable Chemistry for the Environment*, 6, 100090.
- Párraga, J.A., Sánchez, A. (2002). Costs comparative study of maintenance and economic profitability, social and sports between natural and artificial turf football in the university field, *Rev Mot.* 8, 21-46
- Petrass, I., Twomey, D., Harvey, J. (2014). Understanding how the components of a synthetic turf system contribute to increased surface temperature, *Proced Eng.* 4, 943-948.
- Rodríguez-Liévana, J. A., Robles-Solano, E., Jurado-Contreras, S., Morillas-Gutiérrez, F., Moya, A. J., Mateo, S., ... & La Rubia, M. D. (2024). Production and characterization of cellulose acetate using olive tree pruning biomass as feedstock. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*.
- Sánchez-Sánchez, J., Felipe, J. L., Burillo, P., del Corral, J., & Gallardo, L. (2014). Effect of the structural components of support on the loss of mechanical properties of football fields of artificial turf. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 228(3), 155-164.
- Sánchez-Sánchez, J., García-Unanue, J., Felipe, J. L., Jiménez-Reyes, P., Viejo-Romero, D., Gómez-López, M., ... & Gallardo, L. (2016). Physical and physiological responses of amateur football players on third-generation artificial turf systems during simulated game situations. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(11), 3165-3177.
- Sánchez-Sánchez, J., García-Unanue, J., Gallardo, A. M., Gallardo, L., Hexaire, P., & Felipe, J. L. (2018). Effect of structural components, mechanical wear and

environmental conditions on the player–surface interaction on artificial turf football pitches. *Materials & Design*, 140, 172-178.

- Sánchez-Sánchez, J., García-Unanue, J., Jiménez-Reyes, P., Gallardo, A., Burillo, P., Felipe, J. L., & Gallardo, L. (2014). Influence of the mechanical properties of third-generation artificial turf systems on soccer players' physiological and physical performance and their perceptions. *PloS one*, 9(10), e111368.
- Sassi, A., Stefanescu, A., Menaspa, P., Bosio, A., Riggio, M., & Rampinini, E. (2011). The cost of running on natural turf and artificial turf surfaces. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(3), 606-611.
- Villwock, M.R., Meyer, E.G., Powell, J.W., Fouty, A.J., Haut, R.C. (2009). Football playing surface and shoe design affect rotational traction, *Am J Sports Med.* 37(3), 518-525
- Zanetti, E.M., Bignardi, C., Franceschini, G., Audenino, A.L. (2013). Amateur football pitches: Mechanical properties of the natural ground and of different artificial turf infills and their biomechanical implications, *J Sports Sci.* 3(7), 767-778.
- Zuccaro, P., Licato, J., Davidson, E. A., Thompson, D. C., & Vasiliou, V. (2023). Assessing extraction-analysis methodology to detect fluorotelomer alcohols (FTOH), a class of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFAS), in artificial turf fibers and crumb rubber infill. *Case studies in chemical and environmental engineering*, 7, 100280.
- Zwawi, M. (2021). A review on natural fiber bio-composites, surface modifications and applications. *molecules*, 26(2), 404.