

El surgimiento de los bioplásticos: Un estudio de nichos tecnológicos

Bioplastics emergence: A technological niches study

Marco Aurelio Jaso Sánchez*

Departamento de Estudios Institucionales, División de Ciencias Sociales y Humanidades, Unidad Cuajimalpa, Universidad Autónoma Metropolitana.

*Avenida Vasco de Quiroga 4871, Col. Santa Fe, Cuajimalpa de Morelos, Ciudad de México, México. C.P. 05348. Tel. 5814 6500 Ext. 2406.

E-mail: marco_jaso@yahoo.com

*Autor de correspondencia

Resumen

La innovación hacia una economía sustentable no ha tenido los efectos deseados. Ante ello, desde las ciencias sociales, la Perspectiva Multinivel (MLP, por sus siglas en inglés) estudia los retos que innovaciones disruptivas enfrentan para transformar mercados consolidados. No obstante, en su enfoque global, el modelo ha sido criticado por la articulación insuficiente de conceptos en la dimensión micro. En respuesta a este llamado, el objetivo del artículo consiste en identificar los primeros nichos tecnológicos de bioplásticos para estudiar las alianzas entre agentes con la intención de penetrar el mercado, así como los elementos del contexto que las facilitaron. Mediante una investigación bibliográfica y de patentes, se identificó a los primeros inventores, empresas, marcas, aplicaciones y circunstancias del contexto que dificultaron o facilitaron el desarrollo de los nichos. Nuevas aplicaciones son señaladas. Los hallazgos proporcionaron una retroalimentación *a posteriori* entre nichos de funciones societales diferentes, lo cual condujo a proponer el concepto de *latencia tecnológica entre nichos*.

Palabras clave: Bioplásticos; nichos tecnológicos; Perspectiva Multinivel, transiciones sustentables; recursos renovables.

Abstract

Innovation oriented towards a sustainable economy has not yet achieved the desired effects. Given this concern, within social sciences, the Multilevel Perspective (MLP) studies upon the challenges that disruptive innovations face in transforming consolidated markets. Despite its global approach, the model has been criticized for its insufficient conceptual articulation at the micro dimension. In response to this criticism, the objective of this paper is to identify the first technological niches of bioplastics in order to study the alliances between agents who intended to penetrate the market, as well as the contextual elements that facilitated them. Through bibliographic and patent research, pioneer inventors, companies, brands, applications, and those external circumstances that either hindered or facilitated the development of niches were identified. New applications are pointed out. Findings revealed *ex-post* feedback between niches of different societal functions, which led to propose the concept *technological latency between niches*.

Keywords: Bioplastics; technological niches; Multilevel Perspective; sustainable transitions; renewable resources.

Recibido: 02 de septiembre de 2019

Aceptado: 24 de noviembre de 2020

Publicado: 16 de diciembre de 2020

Como citar: Jaso Sánchez, M. A. (2020). El surgimiento de los bioplásticos: Un estudio de nichos tecnológicos. *Acta Universitaria* 30, e2654. doi: <http://doi.org/10.15174/au.2020.2654>

Introducción

Los nichos tecnológicos en la Perspectiva Multinivel

El concepto de nicho tecnológico refiere a un espacio protegido en el que tecnologías alternativas, aún incipientes, son ensayadas en su camino a la madurez comercial. Este concepto, junto con el de regímenes y paisajes sociotécnicos, integran las categorías centrales que conforman el modelo de la Perspectiva Multinivel (MLP, por sus siglas en inglés) (Geels, 2001; Rip & Kemp, 1998). En años recientes, el enfoque MLP ha ganado aceptación para encausar la investigación de innovaciones disruptivas y sustentables (Smith, Voß & Grin, 2010; Weber & Rohracher, 2012). En esta investigación se propuso explorar desde el enfoque MLP el nacimiento de los bioplásticos modernos. El cambio tecnológico implicado en la búsqueda de materias primas bio-basadas para elaborar plásticos biodegradables se ha cristalizado en un conjunto de innovaciones con potencial disruptivo, en la medida en que redireccionan la fuente de materias primas del sector de combustibles fósiles al sector de la biomasa, ofreciendo la ventaja de su biodegradabilidad. Su reciente inserción en la industria está dando origen a los bioplásticos modernos (Bioplastics Council, 2016; Grigore *et al.*, 2019; OECD, 2001, 2013, 2014; Singhvi, Zinjarde & Gokhale, 2019).

Buena parte de los trabajos académicos que emplean el modelo MLP lo aplican para el estudio de funciones societales, como la provisión de energía y el transporte (van den Bergh & Bruinsma, 2008; Whitmarsh, 2012), sin que se haya puesto suficiente atención a las innovaciones disruptivas en sectores tecnológicos que impactan simultáneamente varias funciones societales. Las innovaciones disruptivas para la sustentabilidad en el sector del plástico ofrecen una singularidad que amerita estudiarse (Imbert, Ladu, Tani & Morone, 2019; Soesanto, Prihadyanti, Hartiningsih & Fizzanty, 2016; Yuan *et al.*, 2011). La ubicuidad del plástico en nuestra sociedad genera una lista prácticamente inacabable de aplicaciones que permean varias funciones, mientras que los bioplásticos comienzan a cobrar relevancia en algunas de ellas, como la salud, el empaque y el vestido; solo por nombrar algunas (Singhvi *et al.*, 2019; Thakur, Thakur & Kessler, 2017; Zhang, 2017). Por este motivo, enfocar el modelo MLP al sector del bioplástico es una oportunidad para probar su capacidad explicativa, así como para ofrecer evidencia que enriquezca la base empírica de sus conceptos.

Si bien el modelo MLP ha mostrado su utilidad para explicar transiciones de largo plazo a escala macro, algunos de sus críticos han señalado la necesidad de dotarlo de mayor operatividad en diversas escalas territoriales, en la incorporación de actores y agentes, así como en el manejo de escalas micro (Coenen, Benneworth & Truffer, 2012; Smith, Stirling & Berkhout, 2005). Este artículo propone contribuir a la agenda anterior, especialmente esclareciendo el concepto de nicho tecnológico con referentes empíricos de las empresas pioneras del sector de los bioplásticos. En particular, el objetivo del estudio es explorar las relaciones entre tres dimensiones básicas: las alianzas que permiten la maduración de las tecnologías y su penetración en los mercados, el tipo de mercado en el que se incuban los nichos tecnológicos, y los factores del contexto externo que crean ventanas de oportunidad facilitando el desarrollo del nicho.

Características de los bioplásticos

A diferencia de los plásticos convencionales basados en combustibles fósiles, los bioplásticos se definen como aquellos materiales cuyo polímero base está constituido por recursos renovables o es biodegradable, cumpliendo con todos los criterios de las normas científicamente reconocidas para su biodegradabilidad.¹

¹ Entre las normas de mayor difusión y empleo se encuentran la norma europea EN 13432 y las estadounidenses ASTM (D6400 y D6868) compostaje y biodegradación.

Los recursos renovables provienen de cualquier material biológico, en tanto que la biodegradabilidad se aplica a la degradación que resulta de la acción de microorganismos naturales (Endres & Siebert-Raths, 2011; Ong, Chee & Sudesh, 2017; Thakur *et al.*, 2017; Zhang, 2017).

Con relación a sus fuentes, los bioplásticos se han elaborado principalmente a partir de dos tipos de polímeros naturales. Por un lado, se tiene el ácido poliláctico (PLA), obtenido generalmente de la fermentación de almidón y, por otro lado, se tiene a los biopolímeros de la familia de los poli-hidroxialcanoatos (PHA) (Grigore *et al.*, 2019; Niaounakis, 2015; Singhvi *et al.*, 2019). Dentro de este último grupo, la primera biomolécula que se descubrió fue el ácido poli-hidroxitúterico (PHB), reportada en 1925. Las combinaciones de PLA con ácido poliglicólico (PGA), descubierto en 1954, fueron empleadas en la década de 1960 para explorar las primeras aplicaciones médicas (Kulkarni, 1965) y posteriormente las industriales, las cuales se estudian más adelante (Grigore *et al.*, 2019; Volova, Vinnik, Yuri, Shishatskaya, Markelova & Zaikov, 2017; Wagner, Sakiyama-Elbert, Zhang & Yaszemski, 2020).

Desde sus primeros desarrollos en el sector médico, hasta sus aplicaciones más recientes, los bioplásticos se han abierto espacio en diferentes mercados. Son un recurso bien establecido en la práctica quirúrgica y farmacológica, mientras que en la industria se abren paso gradualmente. Constituyen una alternativa en la agricultura, el sector textil, el empaque de alimentos y, particularmente, para los plásticos de un solo uso, entre otros (Chen, 2016; Grigore *et al.*, 2019, Singhvi *et al.*, 2019).

Con el propósito de proveer un marco de análisis para el estudio del surgimiento de los bioplásticos, en la sección teórica se definieron las categorías del modelo MLP, clarificando las relaciones entre el paisaje y régimen sociotécnico con los nichos tecnológicos. En la sección metodológica se construyeron definiciones operativas para estas categorías y se describió la estrategia de investigación con la cual se atendió el objetivo de la investigación. Los hallazgos sobre los nichos son documentados en la sección de resultados, agrupándolos por sector y empresa. Finalmente, en la sección de conclusiones se valoró la aplicabilidad del enfoque MLP al campo de estudio, el cual permitió derivar recomendaciones para su enriquecimiento conceptual.

El enfoque de la Perspectiva Multinivel

Investigadores sociales de Países Bajos, entre los que destacan Arie Rip, René Kemp y Frank Geels, se esforzaron por entender las transiciones socio-tecnológicas de largo plazo. En sus investigaciones estudiaron las dimensiones económicas e institucionales, así como los elementos materiales e ideológicos, logrando esquematizar los niveles macro, meso y micro alrededor del modelo MLP. A continuación, se presentan los principales rasgos del modelo (Geels, 2005; Geels & Kemp, 2007).

El paisaje sociotécnico

El paisaje sociotécnico se entiende como el escenario base sobre el cual los actores de los sistemas se desempeñan y constituye la dimensión macro (Rip & Kemp, 1998). Sus proponentes lo definen como el *ambiente externo* sobre el cual los actores del régimen y del nicho difícilmente tienen influencia directa (Geels & Schot, 2007). El paisaje sociotécnico está compuesto por elementos materiales e inmateriales cuyos cambios graduales, generalmente, solo se observan en el largo plazo (Geels & Schot, 2007; Geels, McMeekin & Pfluger, 2020). Como parte del paisaje se encuentran la ideología política, la macroeconomía, las tendencias demográficas, las visiones del mundo y los recursos naturales (Kemp, 2009). Adicionalmente, se podrían incluir otros eventos como "*shocks* exógenos" con fuerte impacto global, como las guerras internacionales; toda vez que trastocan las bases de organización económica, social y política de un amplio conjunto de países (Geels, Sovacool, Schwanen & Sorrell, 2017).

Sus proponentes recurrieron a la metáfora del paisaje, en parte, por ser un conjunto de elementos externos que rodean a los actores, de carácter más bien estable y que difícilmente se pueden alterar. Por otro lado, porque cuando un paisaje es mapeado topográficamente mediante curvas de nivel, se puede explicar el curso que toman los ríos, por ejemplo, como alegoría del curso que toman los paquetes tecnológicos, que serpentean acomodándose en los contornos de la orografía circundante (Sahal, 1985).

En este sentido, un paisaje caracterizado con un recurso abundante como el petróleo, genera importantes economías de escala y externas que facilitan el desarrollo de la industria de bienes finales basada en petroquímica. Simultáneamente, la abundancia de hidrocarburos dificulta el desarrollo de paquetes tecnológicos basados en otros recursos, enfrentando barreras tanto económicas como institucionales (Geels *et al.*, 2020). Estos obstáculos no implican que no se puedan generar tales alternativas, pero sí explica que su impulso requiera mucho mayor esfuerzo y que literalmente se ilustre como ir montaña cuesta arriba.

El régimen sociotécnico

Sobre el escenario base del paisaje, y en un periodo histórico determinado, se monta un régimen sociotécnico. Como categoría analítica, el régimen es la confluencia de dos corrientes académicas. Las rutinas empresariales estudiadas por la economía evolutiva y las redes de actores, estudiadas por los sociólogos de la tecnología, se articularon alrededor del concepto de régimen para explicar la estabilización de un sistema tecnológico y sus mecanismos de defensa ante alternativas tecnológicas disruptivas (Geels & Schot, 2007).

El régimen constituye la dimensión meso y comprende un conjunto de subsistemas que se autoreforzan. Los nombres para designarlos han sido ajustados a lo largo del desarrollo del modelo; sin embargo, los actores que los encarnan y la dinámica institucional que representan se han mantenido, y permiten identificar seis grandes grupos. Al régimen sociotécnico lo conforman el sistema educativo y científico, el tecnológico, el industrial, el de usuarios finales, el político y normativo, y el cultural (Geels, 2001). Cada uno de estos subsistemas está estructurado a partir de coaliciones formadas por actores hegemónicos, quienes sancionan la orientación y los parámetros del cambio (Geels *et al.*, 2016).

Conforme se estabiliza el régimen, emergen grupos de actores y organizaciones que se constituyen como autoridades normando la vida social alrededor de la tecnología en cuestión. En el ámbito tecnológico, por ejemplo, se asumen los objetivos y los medios por los cuales la innovación se lleva a cabo, favoreciendo unos y marginando otros. Complementariamente, en el ámbito educativo, los recursos humanos se forman bajo dichas premisas y los medios de comunicación moldean los correspondientes patrones culturales y preferencias (Geels & Verhees, 2011).

Durante este proceso las empresas inician procesos de imitación, ya sea por mecanismos competitivos o institucionales, dando lugar a mecanismos de isomorfismo en el sentido de DiMaggio y Powell (DiMaggio & Powell, 1983; Harper, 2014). Surgen grupos poderosos de interés que orquestan coaliciones políticas y fomentan programas públicos de apoyo. A nivel industrial se desarrollan infraestructuras complementarias, eslabonándose empresas de diversas ramas. Estas condiciones favorecen la innovación incremental y la gradual disminución de precios. Bajo estas condiciones, la introducción al mercado de tecnologías disruptivas alternas, enfrenta un ambiente poco propicio (Geels *et al.*, 2017).

Los nichos tecnológicos

A pesar de la dominancia de un paradigma tecnológico para el conjunto de la industria, se ha observado que ciertos paquetes tecnológicos alternativos han encontrado oportunidades de desarrollo, ya sea en aplicaciones muy específicas, localidades particulares, mercados idiosincráticos o con la asistencia de apoyo político (Geels *et al.*, 2017). Es dentro de esta dimensión micro, donde el modelo MLP y el estudio de las transiciones conciben el germen de las innovaciones disruptivas que eventualmente darán lugar a la transformación de los regímenes sociotécnicos.

Estos espacios de incubación fueron denominados nichos tecnológicos, con el fin de construir un concepto que transmitiese las nociones de fomento, desarrollo y protección (Geels, 2001). El estudio de estos nichos reveló que están constituidos por redes pequeñas, la mayoría de las veces inestables, que se ensamblan y desensamblan con facilidad conforme se tejen expectativas sobre el potencial de una nueva tecnología y sus prototipos ensayan su factibilidad (Geels, 2005).

En las primeras etapas de cada transición suele haber una amplia variedad de nichos, con la posibilidad de que cada uno ensaye una alternativa tecnológica distinta, sin que se revele un diseño preponderante. Conforme se avanza en la maduración de ciertas tecnologías y se estructura mejor la red social que la cobija, la variabilidad tecnológica se reduce (Schot & Geels, 2008). En este proceso, la maduración del nicho puede ser caracterizada por una serie de conceptos, entre los más importantes se encuentran: el financiamiento, el aprendizaje, la red de apoyo, las aplicaciones, así como la construcción institucional de sus mercados y sus interacciones (Smith, 2007; Smith & Raven, 2012).

Se ha propuesto que estas desviaciones del patrón dominante encuentran oportunidades de desarrollo fuera del régimen, o bien, en sus márgenes; sin embargo, se ha reconocido también el papel proactivo que actores internos llegan a jugar cuando identifican cambios importantes en su ambiente y ponen en duda las reglas vigentes del régimen. La ubicación interna o externa al régimen del nacimiento del nicho, así como el ritmo de su desarrollo ha comenzado a gestar útiles tipologías (Geels & Kemp, 2007; Schot & Geels, 2007).

Existe entonces un convencimiento de lo importante que es seguir aportando evidencia empírica sobre el origen de los nichos y el papel que juegan diversos actores en sus mecanismos de protección, fomento y desarrollo o empoderamiento. En este artículo se ofrece evidencia para contribuir a esta línea de indagación.

En este estudio se eligió, como punto de partida, concentrarse en la identificación de la red de alianzas entre científicos, tecnólogos y empresas, así como en las aplicaciones representativas de sus primeros mercados. Estudios posteriores podrán elegir casos para profundizar a nivel micro sobre la naturaleza de las redes sociales de apoyo, el financiamiento y los parámetros del aprendizaje tecnológico y social.

Por otro lado, ubicar el nacimiento de esta red dentro o fuera del régimen resulta indispensable para contribuir al desarrollo del concepto de nicho en el marco del estudio de las transiciones, toda vez que la literatura ha tendido a identificar los innovadores disruptivos fuera o en los márgenes del régimen. Adicionalmente, con el estudio de la colaboración tecnológica entre agentes en aras de su factibilidad comercial se abona al análisis desde el concepto de agencia en la dimensión micro, a la que se apela en la literatura. Para operacionalizar estas líneas de indagación se plantea en la sección siguiente una estrategia de investigación desde el punto de vista de los autores de este artículo.

Método

El periodo que se documentó comprendió desde el inicio de la investigación aplicada sobre bioplásticos hasta el momento en que los nichos tecnológicos como objeto de estudio alcanzan una estabilización como nichos de mercado. Para la mayoría de los casos, este periodo abarca de principios de la década de 1960 a finales de la década de 1990.

La investigación documental partió de la exploración bibliográfica generada con la siguiente sintaxis de búsqueda: (*"natural based" OR degradable OR absorbable OR biodegradable*) AND (*polymers OR plastics OR thermoplastics*); la cual fue instrumentada en los portales de Web of Science, Scopus y Google Scholar. Como estrategia de selección de documentos, se privilegiaron los *handbooks* y tesis de posgrado por su capacidad de compendiar amplias revisiones de la literatura, se seleccionaron 20 que contaron con el mayor número de citas.²

Durante la revisión bibliográfica, emergieron nuevos términos asociados a las fuentes de materias primas y campos de aplicación, de manera que fueron utilizados para enriquecer la búsqueda en las siguientes áreas: *"renewable biomaterials"*, *"bacterial polyesters"*, *"microbial polymers"*, *"food packaging"*, *"thermoplastic starch"*, y *"biomedical biopolymers"*, entre las más recurrentes. Se contó finalmente con una muestra de 50 documentos en donde se rastrearon datos sobre las principales empresas patentadoras, comercializadoras, investigadores y patentadores pioneros.³

Una vez capturada la información en fichas por empresa, esta fue corroborada con los artículos originales y patentes de las empresas, lo cual permitió esclarecer las redes de colaboración tecnológica. Por otro lado, la Información sobre la comercialización se complementó con reportes de mercado, páginas web de las compañías y sus comunicados de prensa.⁴

Para responder al objetivo de la investigación, y documentar elementos micro para enriquecer la teoría sobre los nichos tecnológicos, se construyeron las siguientes definiciones y se asumieron los siguientes criterios para la investigación documental. En el ámbito de las innovaciones disruptivas, entendemos por nicho tecnológico a la red de personas u organizaciones que fomentan y realizan investigación aplicada sobre un producto o proceso radicalmente diferente al modelo dominante en la industria o sector, con la intención de mejorarlo hasta alcanzar su factibilidad comercial en un segmento de su mercado. En tal proceso, se vinculan con usuarios vigentes o potenciales, con quienes aprenden y construyen expectativas sobre los alcances de la innovación, procurando la construcción de condiciones institucionales que establezcan su aceptación en segmentos cada vez más amplios del mercado.

Como alianzas entre agentes tecnológicos principales se consideran aquellas que se constituyeron a partir de los principales investigadores, patentadores y responsables de programas de investigación, incluyendo proveedores de material biológico clave, y cuyas interacciones quedaron documentadas en artículos, patentes o documentos oficiales de las organizaciones. Por otro lado, las alianzas para la comercialización se identificaron al nivel de acuerdos entre empresas, documentados por la prensa

² Los *handbooks* resultaron más proliferos que los *reviews* con relación a los antecedentes históricos de los desarrollos tecnológicos, por lo cual se privilegiaron los primeros para la investigación de los primeros desarrollos. Los *reviews*, en cambio, demostraron su utilidad para mostrar la relevancia de los nichos en el estado del arte. En la selección de los artículos se excluyeron las autocitas.

³ La búsqueda de patentes se realizó a través de los motores de búsqueda del *Derwent Innovation Index*, la *United States Patent and Trademark Office* (USPTO) y la *European Patent Office* (EPO).

⁴ Información de mercado fue obtenida de revistas de la industria del plástico como *Plastics Today*, *Polymerdatabase*, y *Plastics Insights*; revistas especializadas en bioplásticos como *Bioplastics News*, *Bioplastics Magazine* y *Bio Based Press*; así como de los reportes especializados *Cambridge Consultants* (2018) y *Data Bridge Market Research* (DBMR, 2019). Los comunicados de prensa de las empresas disponibles en la sección de comunicación social de su página web fueron complementados con el motor de búsqueda de *pressreleasefinder.com*

especializada y comunicados oficiales de las organizaciones. Para la exploración de estas interacciones se buscó identificar el inicio de la investigación aplicada. Esta se identificó a partir de la primera solicitud de patente, o bien, cuando la empresa o alguno de los investigadores involucrados hiciera una declaración explícita y pública (tablas 1 y 2).

Los primeros mercados fueron identificados tanto como aplicaciones potenciales, en casos de investigación pre-comercial, como productos finales específicos asociados a marcas concretas, en casos de tecnologías comercializables. Las fuentes de información provienen de patentes, artículos escritos por investigadores de las empresas, páginas *web* e información publicitaria de las empresas, así como *handbooks* y portales *web* especializados de la industria del plástico.

Los elementos del contexto externo asociados al paisaje emergieron en su mayor parte tanto de la justificación que los actores principales declaraban en artículos y patentes para invertir en una tecnología diferente, así como de valoraciones de analistas y especialistas en temas energéticos y ambientales. Estos datos se complementaron con las valoraciones del autor sobre condiciones del paisaje que alentaron la demanda de estos artículos.

Resultados: el surgimiento de los primeros bioplásticos

A partir de 1920, la industria del plástico inició una trayectoria tecnológica que orientó la investigación hacia los materiales flexibles, resistentes, ligeros y durables, de manera que la rápida degradabilidad era considerada una desventaja que debería remediarse, con la excepción de algunas aplicaciones en el campo de la medicina (Joseph, George, Gopi, Kalarikkal & Thomas, 2017; Ratner, Hoffman, Schoen & Lemons, 2013).

Nichos tecnológicos de bioplásticos en la medicina

La irrupción de biopolímeros en aplicaciones quirúrgicas en la década de 1970 cristalizó una década previa de intensiva investigación en polímeros. En la década anterior, los químicos desarrollaron más de 40 polímeros sintéticos, de los cuales destacaron el ácido poliglicólico (PGA) y el ácido poliláctico (PLA) por su mayor facilidad de obtención, sus propiedades plásticas y la posibilidad de regular sus lapsos de degradación dentro del organismo (Muffly, Tizaano & Walters, 2011; Ratner *et al.*, 2013).

Entre 1965 y 1975, Ramchandra Kulkarni, investigador adscrito al *U.S. Army Medical Biomechanical Research Laboratory*, en conjunto con un grupo de médicos militares y cirujanos de diversos hospitales estadounidenses, investigó la obtención de polímeros; cuya síntesis, además de ser económicamente factible, producía materiales biocompatibles y degradables en el organismo. Entre 1965 y 1966, Kulkarni y sus colaboradores, entre quienes destacaron Frederick Leonard, Joshua Nelson y Krushna Pani, del mismo centro de investigación médica militar, se dieron a la tarea de difundir el estado del arte sobre el uso de los biopolímeros para fines médicos (Kulkarni, 1965; Kulkarni, Pani, Neuman & Leonard, 1966a; Kulkarni Pani, Neuman & Leonard, 1966b). Sus publicaciones reportaron la investigación que demostraba los métodos de obtención, biodegradabilidad, no toxicidad, aceptación y eliminación natural por el organismo. Asimismo, confirmaron las posibilidades del biopolímero para ser manufacturado de acuerdo con las técnicas comunes de procesamiento de plásticos en general (Kulkarni *et al.*, 1966b). De esta manera, el grupo evidenció ante la comunidad médica las posibilidades de este biopolímero para ser empleado exitosamente en suturas, injertos vasculares e implantes quirúrgicos, reemplazando al material denominado "catgut" derivado de tejidos animales, del cual resaltaron inconsistencias en su dureza e irritaciones en el tejido de pacientes.

Sobre la base de la investigación básica y pública reportada anteriormente, un grupo de empresas inició proyectos de investigación aplicada con miras a aprovechar este nicho de mercado. Investigación bibliográfica y de patentes permitió identificar a las empresas pioneras del desarrollo tecnológico de este tipo de suturas y también más visibles en la comunidad médica. La tabla 1 relaciona a las empresas y sus marcas, así como el lapso entre la actividad de patentamiento y su introducción al mercado. Esta sección sintetiza el caso de la marca Dexon™ de Davis & Geck Inc., por ser la empresa pionera que cultivó un nicho en este sector.

Tabla 1. Empresas innovadoras de bioplásticos pioneras en el campo médico.

| Empresa | Marca | Inicio de la I+D | Introducción al mercado |
|----------------------|----------|---|--|
| Davis & Geck, Inc. | Dexon™ | Patente solicitada (1963) Patente concedida (1967) | Ensayo pre-comercial (1968) Comercialización (1972) |
| Ethicon, Inc. | Vicril® | Patente solicitada (1970) Patente concedida (1972) | Comercialización (1972) |
| Boehringer Ingelheim | Resomer® | Patente solicitada (1986) Patente concedida (1988) | Comercialización (1986) |

Fuente: Elaboración propia con base en Google Patents y *handbooks* selectos (citados en Referencias).

La promisoría investigación básica de la década de 1960 catalizó el desarrollo experimental de varias empresas; sin embargo, el primer movimiento exitoso hacia el mercado corrió a cargo de Davis & Geck Inc., empresa estadounidense fundada en 1909 y subsidiaria de American Cyanamid desde 1930 (Devine, 2017). Edward Schmitt y Rocco Polistina, investigadores adscritos a esta empresa, solicitaron en 1963 el registro de la patente denominada *Surgical Sutures* que describía el procedimiento de obtención de *synthetic absorbable surgical suture consisting of a polyhydroxyacetic ester*, la cual se basaba en la I+D del PGA, y les fue concedida en 1967. Ello le permitió a la empresa ensayar el producto en pequeña escala en 1968, y comercializarlo en la década de 1970 bajo la marca Dexon™ (MPN, 2017; Resorba, 2019; Schmitt & Rocco, 1963).

Las primeras versiones de Dexon™, elaborado básicamente con PGA, se degradaban en un periodo de dos a cuatro semanas, lo cual limitaba su rango de aplicación a suturas de tejidos que pudieran cicatrizar en ese lapso. En los primeros años, los cirujanos mostraron cierta renuencia a reemplazar los materiales tradicionales (Brannan, Ochsner, Pond, Fuselier & Scharfenberg, 1973). Sin embargo, el acercamiento de los productores a los médicos y la constante comunicación sobre sus necesidades en la práctica de la cirugía, llevaron a los productores a desarrollar variantes del material. Para incrementar las aplicaciones del producto, se ensayó con éxito la incorporación del PLA al PGA, dado que las mayores propiedades hidrofóbicas del primero le permitirían incrementar el lapso de degradación y con ello el periodo de vida útil dentro del organismo (Fegade, 2006). La retroalimentación constante permitió diseñar productos mejorados y más específicos bajo las marcas Dexon Plus®, el cual incluyó un recubrimiento y Dexon II®, el cual disminuyó la fricción (Muffly *et al.*, 2011).

Además de hacer innecesaria una segunda intervención para retirar el bio-material, por su capacidad para reducir el desgarre de tejidos, sus primeros usos en el mercado demostraron la conveniencia del producto en aplicaciones oftálmicas, cardiovasculares y neurológicas, así como para la reconstrucción de venas y arterias e implantes (Fegade, 2006). Después de su aplicación exitosa como sutura, en años posteriores los biomateriales comenzaron a extender su utilidad en andamios, prótesis y para la liberación controlada de medicamentos (Devine, 2017).

La investigación pública disponible y la respuesta favorable del mercado incentivaron a otras empresas a desarrollar sus propias marcas, entre las primeras innovadoras en cultivar este nicho se encontraron Ethicon Inc. (subsidiaria de Johnson & Johnson), con Vicril®, que inició su comercialización en 1972 (Domenek, Courgneau & Ducruet, 2011); así como Boehringer Ingelheim, con Resomer, por mencionar algunas de las más visibles (Devine, 2017; Muffly *et al.*, 2011).

Si bien el costo inicial era relativamente alto comparado con los productos establecidos, los contratos con el ejército estadounidense, y la opinión de los cirujanos, fueron determinantes para incorporarlo como un producto necesario que las coberturas médicas debían costear como parte de la atención médica pública o privada. Las publicaciones, congresos y los órganos reguladores, como la *Food and Drug Administration* (FDA) de los Estados Unidos y la Farmacopea Europea, lo incorporaron en la normatividad de dispositivos médicos, con lo cual se facilitó la apertura global de los mercados.

Las colaboraciones tecnológicas fueron nucleadas alrededor del laboratorio militar de biomecánica y apoyadas por una red externa de médicos especializados en sutura quirúrgica, con destacadas credenciales en el gremio, quienes ensayaron, evaluaron y divulgaron los beneficios de introducir la innovación (Hardaway, 2004; Kulkarni, 1965; Kulkarni *et al.*, 1966a, 1966b). Particularmente, los estudios clínicos y las metaevaluaciones del doctor John B. Herrmann, adscrito al Centro Médico de la Universidad de Massachusetts, y sus colegas del Departamento de Ingeniería Mecánica del Instituto Politécnico de Worcester, en el mismo estado, jugaron un papel clave en la construcción de confianza alrededor de esta innovación (Hoffman, Herrmann, Lesneski & O'connor, 1970).

A continuación, se puntualizan los elementos del contexto externo que pudieron incentivar a los actores a desarrollar el nicho. Como se mencionó en los párrafos anteriores, la I+D a finales de 1960 y los inicios de la comercialización en 1970 coinciden con la intervención militar de Estados Unidos en Vietnam, la cual transcurrió entre 1959 y 1975. La cifra de militares estadounidenses fallecidos (58, 220) dio una idea de la demanda de atención quirúrgica a personal herido en combate. Para la mitad del conflicto, Hardaway hace una valoración de 17 726 soldados heridos en un año (marzo 1966 a julio 1967). Murray documenta importantes avances en la atención médica en el campo de combate, con relación al estado de atención de las emergencias durante la Segunda Guerra Mundial (1939-1945) y la Guerra de Corea (1950-1953) (Hardaway, 2004; Murray, Hinkle & Yun, 2008). Para ese entonces, la evacuación rutinaria de heridos mediante helicópteros permitía su atención en hospitales de campaña en un lapso de una a dos horas. Adicionalmente, el ejército contaba con suficientes cirujanos altamente entrenados trabajando en instalaciones con tecnología de punta para la época. Un estudio en 19 hospitales militares en 1969 reportó 133 mil admisiones, de las cuales cerca de la mitad requirieron intervención quirúrgica (Hardaway, 1999, citado por Murray *et al.*, 2008). Estas circunstancias explican el interés de los oficiales militares por el financiamiento de investigación de nuevos materiales que redujeran la necesidad de una segunda operación y el riesgo de nuevas infecciones.

Fuera del conflicto, en los mismos años, el incremento de las cirugías en territorio estadounidense ha sido documentado por Rutkow y Zuidema, quienes recuperan las estadísticas del *National Centre for Health Statistics* entre 1966 y 1978, con el fin de documentar que la tasa de operaciones se elevó en un 26% (Rutkow & Zuidema, 1981).

Los elementos anteriores caracterizan la creciente demanda por nuevos materiales y un contexto propicio en el nivel del paisaje tecnológico, para que actores clave del régimen fomentaran innovaciones radicales para la sustitución de materiales mediante el fomento del nicho de suturas absorbibles por el organismo. En la actualidad, la investigación de bioplásticos en el campo médico continúa progresando con relación al incremento de sus propiedades antimicrobianas, la absorción y liberación controlada de

medicamentos y su combinación con diversas fibras naturales (Joseph *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2019; Wagner *et al.*, 2020).⁵

Nichos tecnológicos de bioplásticos en la industria

Mediante la revisión de antologías que han compilado el estado del arte en biopolímeros, complementadas con reportes de mercado (Devine, 2017; Ebnesajjad, 2013; Platt, 2006; Vijayendran, 2010), se logró identificar a las empresas innovadoras pioneras que trataron de introducir bioplásticos en el mercado. En la tabla 2 se presentan únicamente aquellas empresas responsables de cultivar los primeros nichos, hayan sido exitosos o no, con la finalidad de revelar los momentos clave en los que se intentó la comercialización de la I+D de los primeros bioplásticos.

Tabla 2. Empresas innovadoras de bioplásticos pioneras en la industria.

| Empresa | Marca | Fecha de Inicio de I+D | Fecha de introducción al mercado |
|---------------------------|--------------|---|----------------------------------|
| Dupont / Ecochem / Ecopol | Sorona® | Técnica ROP (1932) | 2000 |
| W.R. Grace & Co. | N.D. | Patente solicitada: 1960 Patente concedida: 1962 | 1960 |
| ICI Ltd. | Biopol™ | Co-polimerización PHB y PHB (V) (1975) Evaluación pre-comercial (1980) | 1982 |
| Cargill, Inc. | NatureWorks™ | Proyecto de I+D (1989) | |
| Warner -Lambert | Novon™ | Patente solicitada (1984) | 1990 |
| Novamont | Mater-Bi® | Proyecto de I+D (1990) | 1992 |
| P&G | Nodax® | Patente concedida (1994) | 2004 |

Fuente: Elaboración propia con base en Google Patents y *handbooks* selectos (citados en Referencias).

El caso de DuPont

La empresa estadounidense DuPont se fundó en 1802 y tiene presencia global. Sus competencias en esta área tienen antecedentes en 1927 con la apertura de su centro de investigación experimental en Wilmington, Delaware, liderado por Wallace Carothers. DuPont demostró el método de polimerización de ácido láctico conocido como *Ring-Opening Polymerization* (ROP) para la producción de cadenas de PLA suficientemente largas como para visualizar su aplicación industrial en 1932, así como las técnicas de purificación logradas en 1954 (Gandini & Belgacem, 2008; Avérous, 2008; Ebnesajjad, 2013).

A pesar de haber sentado estas bases, la empresa no impulsó realmente la investigación comercial de bioplásticos, sino hasta seis décadas después, cuando en los años de 1990 revitalizó programas conjuntos de investigación. En 1991 estableció una alianza con la empresa Conagra para fundar la *joint venture* Ecochem (DuPont, 1992; Kumar, Prakash & Datta, 2011). Conagra era una empresa dedicada a la fabricación de empaques para alimentos y había establecido a su vez una red de investigación con la Universidad de Wisconsin. Ecochem desarrolló tecnologías tratando de eficientar el proceso y disminuir los costos; inclusive, en 1995 se asoció con Chronopol (fundada en 1991 y subsidiaria de ACX Technologies) para formar una nueva *joint venture* denominada Ecopol (Said & Chiellini, 1999). Al no lograrse las mejoras en el desempeño de los materiales ni el abatimiento de los costos, las alianzas y los negocios cesaron hacia mediados de la década.

⁵ La investigación de los nichos contemporáneos bajo el enfoque MLP escapa al objetivo de esta investigación y podría constituir una promisoriosa línea de investigación.

Sin embargo, una de las alianzas que sí trascendió fue su asociación con Genecor International Inc. en el 2000, con quien logró la modificación genética de la bacteria *Escherichia coli*, introduciendo genes de levaduras y otros microorganismos, metabolizando la glucosa del maíz con mayores rendimientos de glicerol. Esta alianza fue complementada a través de una asociación con Tate & Lyle Plc., empresa de la cual aprovecharon su experiencia en la fermentación de productos agrícolas. Con ellos produjeron 1,3-propanediol (PDO), en un proceso más eficiente y así obtuvieron poly(trimetil tereftalato) o PTT (DuPont, 2019). Su aprendizaje en esta y otras tecnologías le permitió finalmente lanzar al mercado la marca Sorona® en el año 2000, motivo por el cual ganaron el premio de *Presidential Green Chemistry Award* en 2003 (DuPont, 2003; EPA, 2003). Esta alianza cristalizó en la *joint venture* Dupont Tate & Lyle Bioproductos que actualmente elabora y comercializa exitosamente las marcas Susterra® y Zemea® (Duponttateandlyle, 2018).

Los polímeros de Sorona® se orientaron en un principio hacia los textiles y prendas de vestir, alfombras e interiores de automóviles, los cuales constituyen segmentos de mercado en donde la competencia vía volumen y precios bajos no es tan exigente (DuPont, 2003:1). Conforme Dupont progresó en los métodos para obtener sus biopolímeros a menor costo, mayor resistencia y durabilidad para atender otros mercados como el de empaque, lanzó su nueva marca Biomax®, la cual contenía en sus primeras versiones hasta un 37% de materias primas renovables (Niaounakis, 2015). Con esta marca pudo atender el mercado que requería empaque de comida y bebida caliente, por ejemplo (Sin, Rahmat & Rahman, 2013). En sus esfuerzos por disminuir costos, Dupont y otras empresas combinaron biopolímeros de costosa producción con mezclas de almidón, esto le permitió también modificar las características de los productos y hacerlos más versátiles. En esta línea de materiales la empresa sacó al mercado la marca Elvanol® (Rudnik, 2013). Estas marcas se siguen comercializando.

El caso de W. R. Grace

Si bien la investigación pionera de DuPont en el área de biopolímeros ameritaba comenzar el recuento histórico con dicha empresa, el primer intento de comercializar un bioplástico es atribuido a W. R. Grace Co. Se trata de una empresa estadounidense fundada en 1854; sin embargo, sus competencias tecnológicas en la química se establecieron con la compra de *Dewey & Almy Chemical Company* y de *Davison Chemical Company* en 1954 (Clayton, 1985; The Ships List, 2019).

En 1958 inauguró su centro de investigación y desarrollo en Maryland. Su investigación en polímeros le permitió desarrollar una película plástica flexible y transparente para envolver y proteger carne bajo la marca Cryovac® en 1960, con lo cual la empresa se introdujo en la innovación de polímeros de especialidad. En 1959, James Noel Baptist se incorporó a la división de investigación de la empresa, trayendo consigo la experiencia adquirida en su estancia posdoctoral en la Universidad de Michigan (Lenz & Marchessault, 2005). En dicha universidad, junto con Robert Gholson, y bajo la dirección de Minor Coon (experto en química enzimática), trabajaron en la biosíntesis bacteriana de PHB. Entre 1960 y 1963, Baptist y Werber estuvieron ensayando la producción de PHB a partir de *pseudomonas* y piridina. Descubrieron que el PHB es un polímero estereoregular que se derrite a una temperatura muy similar a la del polipropileno, lo cual les sugirió que podría ser capaz de competir como alternativa a los plásticos derivados de petróleo con la ventaja de su biodegradabilidad. Su vinculación con el doctor Hayward, reconocido bacteriólogo del *Colonial Microbiological Research Institute*, en Trinidad y Tobago, les permitió obtener cepas de la bacteria *Rhizobium*. Los investigadores de este centro habían reportado en 1958 que dicha bacteria podría aportar hasta un 58% de su peso seco en PHB (Forsyth, Hayward & Roberts, 1958; Hardaway, Forsyth & Roberts, 1959). W. R. Grace registró su propiedad intelectual en tres patentes, y lanzó al mercado pequeñas muestras para evaluación como plástico moldeable y para suturas quirúrgicas entre finales de la

década de 1950 y principios de la de 1960. (Baptist, 1962a; Baptist, 1962b; Baptist & Werber, 1963; Baptist & Ziegler, 1965).

En contra de las optimistas expectativas de W. R. Grace, sus productos satisficieron solo parcialmente al mercado; la empresa no logró solventar algunas deficiencias técnicas, entre las que se encontraban bajos volúmenes de PHB obtenido de la bacteria, altos costos de extracción y presencia de impurezas. Debido a lo poco desarrollado del mercado y a la inmadurez de la tecnología, la empresa decidió clausurar el proyecto en 1962 (Rivero *et al.*, 2017). No obstante el abandono del proyecto por esta empresa, Baptist y Werber publicaron en 1964 los resultados de su investigación en un artículo que trascendió el ámbito de los bacteriólogos para alcanzar a la más amplia comunidad de investigadores en polímeros (Werber & Baptist, 1964).

El caso de Imperial Chemical Industries (ICI)

Imperial Chemical Industries Ltd. (ICI) se fundó en Inglaterra en 1926, fue la empresa química más grande del Reino Unido hasta antes de su adquisición por AkzoNobel en el 2008 (AkzoNobel, 2008).

ICI se interesó en la elaboración de polímeros basados en fuentes renovables en la década de 1970, cuando se comenzaron a conocer mejor las enzimas involucradas en la producción de PHA por vía bacteriana, lo cual mejoraba los métodos de extracción y procesamiento de resinas plásticas. Otros desarrollos que alentaron a ICI a incursionar en la investigación de biopolímeros fue el descubrimiento de que las deficiencias del PHB como plástico podían ser corregidas. Se había descubierto que el PHB ganaba versatilidad (diferentes rangos de flexibilidad y resistencia) si se le combinaba con monómeros recientemente descubiertos obtenidos de las bacterias, como el hidroxivalerato (HV) (Burns, 2007).

Sobre estas bases, en 1975 ICI mostró un proceso de copolimerización aleatoria con PHB y PHB(V), que le confería ventajas y que lo hacían un producto intermedio entre el PP y PVC con mayores expectativas comerciales. En 1979, ICI logró un acuerdo para obtener varias cepas de la bacteria *Alcaligenes eutrophus* por parte de Hans Schlegel, quien trabajaba en el Instituto de Microbiología de la Georg-August Universidad de Göttingen, en Alemania. Las cepas habían demostrado tener rendimientos importantes de PHB (Lenz & Marchessault, 2005). En 1973, este investigador había logrado aislar y caracterizar en esta bacteria las enzimas específicas que catalizan las reacciones para la síntesis del ácido 3-hydroxybutírico, el monómero del PHB (Chodak, 2008).

Confundiendo en sus métodos de extracción y co-polimerización mejorados a partir de *Alcaligenes eutrophus*,⁶ ICI anunció en 1982 un ambicioso programa para el desarrollo de un nuevo tipo de poliéster termoplástico. Esta resina sería totalmente biodegradable y podría ser moldeada en una amplia variedad de productos de consumo, incluyendo plásticos, películas y fibras (Anderson & Dawes, 1990). Se anunció que el nombre comercial de esta resina sería Biopol™ y que la co-polimerización consistía en monómeros dispuestos al azar de P(3HB-co-3HV) (Lenz & Marchessault, 2005).

La alianza entre ICI y la empresa alemana Wella AG le permitió a esta última fabricar la primera botella de champú "Sanara" de Wella™, se podía biodegradar en nueve meses y se comercializó ampliamente a partir de 1991 (Yee & Foster, 2015). A pesar de que el costo del PHB era 30 veces más elevado que el del polipropileno convencional basado en petróleo, fue bien recibida en Alemania, Reino Unido y Norteamérica. Mejoras en la tecnología, en términos de mayor rendimiento bacteriano, y aumentos en la

⁶ Estos métodos mostraron rendimientos de hasta 90% del peso seco de la bacteria (Holmes, Wright, Alderson & Senior, 1982; Powell, Collinson & Richardson, 1983)

escala de producción lograron disminuciones importantes de precio: entre 1990 y 1992, el precio del biopolímero bajó de 9 a 4 USD por libra (Rivero *et al.*, 2017). En los Estados Unidos, los lectores de *Popular Science magazine* lo votaron como uno de los grandes logros científicos de los 1990 (Emsley, 2010).

De acuerdo con la estructura de costos de principios de los años 1990, la sostenibilidad financiera del Biopol™ en el largo plazo dependía de que volúmenes crecientes de producción fueran distribuidos entre un mayor número de segmentos comerciales, más allá de las botellas de champú y algunos empaques de cosméticos vendidos exitosamente en Italia y Japón. Por lo anterior, ICI se esforzó en abrir un amplio abanico de aplicaciones, desde la agricultura y el empaque hasta los cosméticos y productos para el cuidado personal (Chanda, 2017). Paul Holmes, uno de los investigadores principales de ICI, difundió el horizonte del desarrollo comercial del producto (Holmes, 1985; Lenz & Marchessault, 2005).

Cabe preguntarse sobre los factores que explicaron la penetración de un champú y cosméticos con empaques notablemente más caros. En este sentido, Steger & Meima (1998) identificaron que los consumidores de países desarrollados se habían vuelto "más críticos": el 75% preferían cosméticos sin experimentación animal, 40% elegirían cosméticos naturales y cerca del 66% se inclinarían por productos amigables con el medio ambiente. En este contexto, Wella fue una de las empresas que identificó una ventana de oportunidad en los envases biodegradables para la marca Sanara (Steger & Meima, 1988). Estos mercados, sin embargo, quedan normalmente acotados a segmentos específicos de las clases medias y ampliarlos suele requerir fuertes medidas regulatorias y políticas de fomento.

En 1993, ICI decidió integrar sus unidades de negocios basadas en ciencias de la vida bajo una sola división denominada Zeneca, que operaría como una nueva empresa. De esa manera ICI se salió del mercado de los bioproductos. Zeneca asumió la responsabilidad del desarrollo del Biopol hasta 1996 (Volova *et al.*, 2017), cuando en el contexto de una fuerte reorganización del negocio y de su insatisfacción con el lento desarrollo del mercado decidió transferir los derechos de marca y propiedad intelectual a la empresa estadounidense Monsanto, quien, al no alcanzar sus metas, transfirió la propiedad intelectual a Metabolix en el 2001 (Khandal, Pollet & Avérous, 2015).

El caso de Cargill

Cargill es una empresa estadounidense fundada en 1865, reconocida por ser uno de los gigantes de la agroindustria. El desarrollo tecnológico del PLA en Cargill está íntimamente ligado al impulso del bioquímico Patrick Gruber, quien se unió a la empresa en 1988. A partir de 1989, Gruber consiguió que Cargill subsidiara un pequeño proyecto de investigación que tenía como objetivo incrementar el valor agregado del almidón de maíz. Gruber se propuso generar biotecnología que permitiese aprovechar productos agrícolas para generar plásticos sustentables. A partir de entonces, su equipo se fijó la meta de generar procesos de extracción de PLA más económicos que los de Dupont (encarecidos por el uso de solventes), a partir de glucosa de maíz. A lo largo de la década de 1990, su equipo acumuló una considerable experiencia en el bioprocesamiento de materiales renovables. En 1992 iniciaron la producción experimental en una planta piloto en Blair, Nebraska, y a partir de 1994 incrementaron su experiencia sumando la producción de mayores volúmenes de ácido láctico en su planta de Savage, Minnesota; donde producían este precursor de PLA, con la cual alcanzaban a manufacturar 8 millones de libras por año (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico [OCDE], 2001).

No obstante, sus progresos técnicos, los directivos de Cargill estaban conscientes de los retos que productores anteriores habían tenido para abrir camino a sus innovaciones en mercados masivos convencionales. Si bien Cargill era una gran empresa, su experticia se concentraba en los sectores de

distribución de alimentos, no así en el de plásticos, motivo por el cual investigaron posibles socios que les ayudaran a penetrar en este nuevo mercado (Anderson & O'Brien, 2009).

Encontrar una empresa química interesada en producir plástico a partir de fuentes renovables no era nada sencillo por dos razones. Por un lado, las empresas establecidas contaban con eslabones hacia atrás en el sector de la refinación del petróleo, materia prima que se intentaba reemplazar; y por otro lado, la trayectoria tecnológica del sector había cultivado un escepticismo con respecto a las materias primas renovables. Finalmente, después de un exhaustivo proceso de búsqueda, eligieron en 1995 a la empresa Dow Chemical, en virtud de su amplia experiencia en la producción y venta de plásticos convencionales en mercados diversos. Dow Chemical mostró además un interés incipiente en esta alternativa dado que no tenía conflicto de interés, ya que no era productora de PET sintético, una de las resinas que el PLA de Cargill aspiraba a reemplazar. Después de evaluar y conducir conjuntamente proyectos de investigación por año y medio, ambas empresas decidieron establecer una *joint venture* a la que denominaron Cargill Down Polymers LLC en 1997 (Anderson & O'Brien, 2009; Auras, Lim, Selke & Tsuji, 2010).

La resina desarrollada conjuntamente comenzó a comercializarse a finales de 1990 bajo el nombre de NatureWorks™ PLA, enfocada al sector de los plásticos moldeables y como un sustituto adecuado del PET, dado que su introducción en los procesos de fabricación prácticamente no requería modificaciones. Una variante del producto se enfocó al mercado de las fibras textiles y fue comercializada bajo el nombre de Ingeo™ a partir del 2002 (Anderson & O'Brien, 2009). No obstante que sus precios se encontraban en promedio un 40% más elevados que los plásticos convencionales, encontraron nichos de mercado muy convenientes en el sector de empaque de alimentos orgánicos, así como en el de ropa deportiva, tanto al interior de los Estados Unidos como en el extranjero, particularmente en Japón (Butschli, 2003). Hacia 2004 y 2005, se generó una burbuja de grandes expectativas con respecto a una pronta disminución de costos y una adecuada recepción del mercado. Esto llevó a una prematura adopción de las resinas por algunas empresas que la abandonaron entre el 2005 y el 2011, año a partir del cual NatureWorks recupera gradualmente sus ventas. A pesar de ese declive, en el 2009 la empresa logró comercializar el PLA en 100 marcas importantes en aproximadamente 20 aplicaciones diferentes (Plunkett, 2011).

Diferencias en su equipo directivo con relación al modelo de negocio, y niveles de producción por debajo de la capacidad instalada, llevaron a que Dow Chemical se retirara de la alianza en el 2005, dejando los proyectos de NatureWorks en manos de Cargill (Anderson & O'Brien, 2009; Dow, 2006).

Desarrollo de nuevos nichos industriales

La consolidación de los nichos tecnológicos y de mercado a cargo de las empresas, alianzas y productos estudiados ha contribuido al desarrollo de un sector industrial más maduro. Esto se evidencia particularmente en los segmentos de la agricultura (con aplicaciones de películas para retención de suelos), en los plásticos de un solo uso (bolsas y botellas), así como en la industria de alimentos (artículos para su envoltura y transporte). En estos segmentos, la biodegradabilidad de los contenedores ha sido una característica demandada por los mercados (Chinthapalli *et al.*, 2019).

Las metas de desempeño técnico se reorientaron de la degradabilidad a la resistencia y a la optimización de procesos, con lo cual se comienza a caracterizar la tercera generación de bioplásticos (Endres & Siebert-Raths, 2011). La búsqueda de nuevas fuentes de materia prima se diversifica hacia los organismos acuáticos (Olatunji, 2020). En las últimas dos décadas, un contexto de política pública y regulatorio más propicio ha fomentado la investigación para encontrar nuevas aplicaciones en mercados más desarrollados, como el de cosméticos, prendas de vestir, automotriz y electrónica, entre otros. Se trata de sectores con cadenas de distribución más integradas, orientadas a segmentos de mercado en donde no

se compite vía precio, sino a través de la marca y el desempeño (Ahmed, Kanchi & Kumar, 2019; Olatunji, 2020; Thielen, 2014).

Discusión: Análisis de alianzas, mercados y contextos

Los tipos de alianzas

En la investigación realizada se descubrió que las condiciones institucionales del sector biomédico y las del plástico industrial implicaron la construcción de alianzas tecnológicas bajo diferentes formatos organizacionales e institucionales.

En el caso de la sutura biodegradable, su rápida inserción se vio favorecida por redes de colaboración preestablecidas entre el centro de investigación militar y su red de hospitales, así como entre las redes profesionales de los cirujanos, que apoyaron el desarrollo de nuevos estándares y normas dentro de un sistema institucional de salud que no requirió reestructuración, sino ajustes en su normatividad.

El sector de los plásticos industriales reveló una dinámica diferente. Comenzó confirmando el surgimiento de múltiples paquetes tecnológicos sin que se estableciera una tecnología dominante. Estos paquetes fueron impulsados por redes de empresas e investigadores, que se agruparon y desagruparon conforme las expectativas de un mercado promisorio auguraban financiar la investigación para disminuir los costos de producción en el mediano plazo. Redes inestables se observaron tanto en Dupont como en ICI y Cargill. Las expectativas de mercados potenciales fueron rebatidas por un proceso de aprendizaje tecnológico más lento de lo esperado y por consumidores orientados en la búsqueda de precios bajos acostumbrados a las propiedades del plástico convencional.

De esta manera, el éxito de las empresas que incursionaron en los plásticos industriales dependió en buena medida del aprendizaje vicario sobre los nichos fallidos, y también de las lecciones sobre la importancia de no solo construir alianzas tecnológicas o *joint ventures* con empresas con fuertes competencias biotecnológicas que llevaran al desarrollo de cepas bacterianas incorporadas en paquetes más eficientes, sino para identificar como socios a empresas establecidas que dominaran el mercado del plástico tradicional. Sin que esto último garantizara su éxito en el mediano plazo.

El tipo de mercado

Los primeros nichos tecnológicos se gestaron alrededor de dos tipos de aplicaciones diferentes, una de ellas relacionada con la función societal de la intervención quirúrgica, y la otra con las funciones de la producción de materiales para empaque y embalaje, fibras textiles y plásticos de un solo uso para mercados masivos. En el caso de las aplicaciones médicas de suturas absorbibles basadas en biopolímeros, los agentes que impulsaron la sustitución de materiales pudieron hacer frente a las inercias del régimen sociotécnico con relativa facilidad y en un plazo breve. No pasaron más de cinco años entre los ensayos pre-comerciales y la introducción exitosa de la primera marca en los quirófanos. La I+D desarrollada por subsidiarias de empresas establecidas (American Cyanamid, Johnson & Johnson y Boehringer Ingelheim) y un contexto altamente regulado y fuertemente estructurado en el que estaban claras las expectativas de los materiales por parte de sus usuarios, contribuyó a una rápida inserción del nicho tecnológico en el mercado. Este nicho tecnológico y eventual nicho de mercado incubó lecciones tecnológicas importantes que serían capitalizadas años más tarde en el sector de plásticos industriales de consumo masivo.

El florecimiento del nicho tecnológico biomédico alentó a otras empresas establecidas a incursionar en la elaboración de resinas biodegradables para el sector más amplio de plásticos industriales. Los primeros intentos, como el de W. R. Grace a principios de 1960, con tecnologías insuficientemente maduras y sin una estrategia clara de penetración de mercado con una aplicación específica, llevó al fracaso del emprendimiento y su pronto abandono. Sin embargo, la difusión de la experiencia técnica a través de la publicación del artículo de Baptist y Werber de 1964 iluminó el camino para que otras empresas con una estrategia de mercado y tecnológica más clara pudieran incursionar primero en sectores de mercado que soportaron un notable sobreprecio, entre ellos el sector de productos para el cuidado personal y alimentos orgánicos, aprovechado por ICI con su marca Biopol™. En sintonía con este tipo de estrategia, Dupont y Cargill esperaron la maduración de condiciones institucionales y tecnológicas para el lanzamiento de su marca Sorona® y NatureWorks™. La primera se enfocó inicialmente al sector de prendas de vestir e interiores de automóviles, mientras que la segunda se concentró en los primeros años en el empaque de alimentos orgánicos y ropa deportiva. De esta manera, el sobreprecio fue cobijado por el valor agregado de marcas reconocidas que comercializaron los productos finales.

Los contextos externos

Los contextos externos que forman parte del paisaje tecnológico estuvieron compuestos por factores de largo plazo, así como por coyunturas específicas. Estas últimas se ejemplifican con la fuerte demanda de material quirúrgico subsidiada por el sistema de atención médica del ejército de Estados Unidos, lo cual permitió la introducción de bioplásticos al mercado por primera vez. Los factores de largo plazo se pueden descomponer en dos categorías: la primera se relaciona con la disponibilidad de materias primas, particularmente en función del precio del petróleo; y la segunda se relaciona con el surgimiento de nuevas políticas y regulaciones, organizaciones, hábitos y concepciones que tratan de reorientar el mercado hacia prácticas menos contaminantes y más sustentables.

El surgimiento de los primeros bioplásticos, costosos y con tecnología que aún presentaba una brecha de desempeño, coincidió con dos fuertes crisis en la oferta de petróleo (1973 y 1979), mismas que sacudieron las creencias del sector sobre su creciente disponibilidad y predictibilidad de precio. Una nueva crisis en 1990 confirmó este escenario de incertidumbre. A partir de esos hechos, los principales consumidores de hidrocarburos se interesaron en la exploración de fuentes de materias primas alternativas, toda vez que a la volatilidad del precio se sumó su gradual agotamiento y mayor dificultad de extracción. Bajo estas circunstancias, ejecutivos y líderes de opinión justificaron su incursión en el desarrollo de biomateriales, entre ellos los bioplásticos. Sin embargo, las primeras alternativas que comenzaron a ser investigadas resultaron costosas y poco competitivas, con excepción de aquellas derivadas del maíz cultivado en los Estados Unidos, país en donde su política agrícola (subsidio, desarrollo tecnológico, extensión, etc.) a lo largo de décadas ha favorecido fuertemente la disminución de sus costos de producción de cereales. Este ha sido otro de los elementos del contexto de largo plazo que favoreció los bioplásticos basados en PLA a partir de maíz.

La segunda categoría se relaciona con los factores institucionales alrededor del cuidado de la salud y el medio ambiente. En este ámbito, la conciencia desarrollada por las clases medias a partir de la década de 1970 y más popularizada en la década de 1980 con relación a la toxicidad de los productos sintéticos y su preferencia por los productos orgánicos, incentivó el desarrollo de pequeños nichos de mercado en esos años. Sin embargo, el tamaño de esos mercados resultó muy acotado para financiar más I+D e incentivar precios competitivos vía economías de escala. Esta ruta solo fue favorecida de manera muy gradual conforme los Estados de las principales economías comenzaron a incentivar el desarrollo de innovaciones sustentables a través de premios, programas de financiamiento y apoyo para el desarrollo de estándares de fabricación y certificaciones. En paralelo, las investigaciones sobre la contaminación de mares y suelos por

plásticos, y su gradual difusión en medios de comunicación, ha incentivado el cambio de preferencias en grupos crecientes de productores y consumidores.

Conclusiones

La investigación realizada propuso explorar las relaciones entre las alianzas, los mercados y el contexto que explican la gestación de los primeros nichos tecnológicos de los bioplásticos modernos. Se eligió enfocarse en el estudio de empresas y agentes con la intención de enriquecer la dimensión micro del modelo MLP a la que apela la literatura. Los hallazgos encontrados se revisaron y se discutió a la luz de dos preguntas: ¿Qué tan versátil es el modelo MLP para explicar el desarrollo de los bioplásticos, imbricado en varias funciones societales? ¿De qué manera se enriquece la base conceptual del modelo?

Alcances y áreas de oportunidad del modelo MLP

Aplicabilidad de conceptos en la dimensión micro. Los conceptos de nicho tecnológico, régimen y paisaje sociotécnico resultaron funcionales para construir definiciones operativas y analizar la dimensión micro, meso y macro, relacionadas con la gestación de nichos y sus intentos de penetración del mercado a través de alianzas que trataban de aprovechar cambios en el contexto. El fomento, desarrollo tecnológico y protección vía financiamiento corporativo de los nichos pudo ser mejor entendido a través de los programas de investigación e iniciativas de agentes específicos (investigadores líderes, redes profesionales específicas y empresas concretas). Por ejemplo, la red de investigación y desarrollo nucleada alrededor del centro de investigación médico militar en los Estados Unidos, así como la experiencia del emprendimiento fallido impulsado por investigadores de W. R. Grace proporcionaron evidencia empírica de nichos que, no obstante su fracaso en su intento de penetrar el mercado, derivaron en lecciones específicas que beneficiaron el aprendizaje del sector.

Estructuración institucional del régimen. El hecho de encontrar menores resistencias a la introducción de tecnologías radicales en el área biomédica que en el área industrial conduce a reflexionar sobre los impactos cruzados entre el conocimiento base de una innovación radical en una función societal, que puede eventualmente retroalimentar el desarrollo tecnológico disruptivo en otra función societal con trayectorias tecnológicas diferentes. De aquí se pueden generar hipótesis y nuevas líneas de investigación para la comunidad que desarrolla el MLP, en la medida en que la mayor parte de la investigación empírica ha focalizado la transformación de trayectorias tecnológicas particulares en funciones societales específicas, principalmente alrededor de energía y transporte.

La facilidad relativa con que los nuevos materiales se incorporaron en el campo médico, y particularmente el quirúrgico, puede ser explicada por la existencia de un grupo de actores (cirujanos) con demandas claras y específicas sobre los materiales que facilitarían su trabajo. Estos actores a su vez forman parte de un campo organizacional fuertemente estructurado alrededor de asociaciones gremiales, empresas proveedoras vinculantes y organismos reguladores con capacidad de afinar la normatividad y hacer eficiente la ordenación y construcción de mercados.

Un caso muy distinto se encontró en otras funciones societales (empaques y embalaje, industria textil y del vestido, plástico de un solo uso), cuyas trayectorias tecnológicas habían instituido expectativas favorables sobre los plásticos basados en petróleo y su durabilidad. No obstante, la presión gradual en favor de la introducción de materias primas renovables y la sustentabilidad, la insipiente de políticas de apoyo claramente enfocadas, incentivos divergentes (reciclado *versus* biodegradabilidad), normas y certificaciones incipientes, así como usuarios finales heterogéneos y dispersos dificultaron la construcción

de sinergias para estructurar los mercados de manera que financiaran el sobreprecio en las primeras etapas del desarrollo de las tecnologías.⁷

En estos sectores, en donde los cambios estructurales y culturales del paisaje tecnológico han sido graduales y lentos (agotamiento del petróleo y conciencia ambiental), han cobrado relevancia los *shocks* coyunturales.

Hallazgos para el desarrollo de la base conceptual del enfoque MLP

Los plásticos biodegradables fueron cultivados primero en nichos en el campo biomédico e introducidos al mercado con mayor facilidad que en los sectores donde las resinas plásticas son un *commodity* de consumo masivo. Se encontró un lapso de aproximadamente una década entre los intentos de inserción en uno y otro caso. Los autores de este estudio proponen introducir el concepto de *latencia tecnológica entre nichos* de trayectorias tecnológicas independientes para caracterizar este fenómeno y distinguirlo del concepto de latencia tecnológica de nichos al interior de una sola trayectoria tecnológica.

Al igual que en la biología, se emplea latencia para denominar al lapso que separa un estímulo, no siempre evidente, de una respuesta patente. En esta materia, la latencia entre nichos tecnológicos pretende dar cuenta de la retroalimentación y aprendizaje entre nichos que pertenecen a trayectorias y funciones sociales diferentes y que impactan favorablemente la penetración de tecnologías radicales o disruptivas en otros regímenes, cuando los cambios en el paisaje abren ventanas de oportunidad en subsistemas del régimen sociotécnico.

Una vez asumida esta hipótesis, se abren líneas de investigación para identificar, a nivel micro, agentes que vinculen la información y aprendizaje de ambos nichos el nivel de estructuración institucional de ambos regímenes y los cambios en el paisaje que alteran las apuestas tecnológicas. Entre las ventajas prácticas de este análisis se encuentra el que, una vez identificados estos puentes entre nichos, se podrían afinar las políticas para impulsar nichos multiplicadores y desarrollar los agentes y actores que contribuyan a vincularlos en aras de generalizar su potencial.

Reconocimientos

El autor agradece a la Mtra. Yennely Eloísa Goycochea Pineda por la asesoría técnica y las enriquecedoras discusiones que llevaron a la concepción de esta investigación, así como a la Mtra. Karen Lizbeth López Orozco por su invaluable apoyo en el sustento documental.

Conflictos de interés

El autor declara que no tiene conflicto de interés.

⁷ Fue hasta 1992 cuando la Comisión Federal de Comercio de los Estados Unidos publicó por primera vez las Guides for the use of environmental marketing claims, generalmente conocidas como "Green guides", las cuales contribuyeron a dar certidumbre al mercado con respecto a los atributos de biodegradabilidad (Federal Trade Commission [FTC], 1992).

Referencias

- Ahmed, S., Kanchi, S., & Kumar, G. (2019). *Handbook of biopolymers. Advances and multifaceted applications*. Singapore: Jenny Stanford Publishing. <https://www.jennystanford.com/9789814800174/handbook-of-biopolymers/>
- AkzoNobel. (2008). *Akzo nobel completes ICI acquisition*. AkzoNobel. <https://www.akzonobel.com/en/for-media/media-releases-and-features/akzo-nobel-completes-ici-acquisition>
- Anderson, A., & O'Brien, K. (2009). *Natureworks: Green chemistry's contribution to biotechnology innovation, commercialization, and strategic positioning*. Washington, DC: American Chemical Society - Green Chemistry Institute. <https://www.acs.org/content/dam/acsorg/greenchemistry/industriainnovation/NatureWorks-business-case-study.pdf>
- Anderson, A. J., & Dawes, E. A. (1990). Occurrence, metabolism, metabolic role, and industrial uses of bacterial polyhydroxyalkanoates. *Microbiology Reviews*, 54(4), 450-472. <https://mbr.asm.org/content/54/4/450.short>
- Auras, R., Lim, L., Selke, S., & Tsuji, H. (Eds.). (2010). *Poly (lactic acid): Synthesis, Structures, Properties, Processing, and Applications*. New Jersey: John Wiley & Sons. doi. <https://doi.org/10.1002/9780470649848>
- Avérous, L. (2008). Polylactid acid: Synthesis, properties and applications. En M. N. Belgacem & A. Gandini (Eds.), *Monomers, polymers and composites from renewable resources* (pp. 433-450). London: Elsevier. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-045316-3.X0001-4>
- Baptist, J. N. (1962a). *Process for preparing poly-beta-hydroxy-butyric acid*. US Patent No. 3036959. Washington, DC: United States Patent Office. <https://patentimages.storage.googleapis.com/8d/73/10/5f6eada3a58dcd/US3036959.pdf>
- Baptist, J. N. (1962b). *Process for preparing poly-beta-hydroxy-butyric acid*. US Patent No. 3044942. Washington, DC: United States Patent Office. <https://patentimages.storage.googleapis.com/db/b4/c9/d0779b42a21df2/US3044942.pdf>
- Baptist, J. N., & Werber, F. X. (1963). *Molded product containing poly-beta-hydroxybutyric acid and method of making*. US Patent No. 3107172. Washington, DC: United States Patent Office. <https://patentimages.storage.googleapis.com/54/35/ac/0f4108dedbc034/US3107172.pdf>
- Baptist, J. N., & Ziegler, J. B. (1965). *Method of making absorbable surgical sutures from poly beta hydroxy acids*. US Patent No. 3225766. Washington, DC: United States Patent Office. <https://patentimages.storage.googleapis.com/ea/02/0b/8214e21a415feb/US3225766.pdf>
- Bioplastics Council (BC). (2016). *Bioplastics simplified: Attributes of biobased and biodegradable plastics*. The Society of the Plastic Industry. https://www.plasticsindustry.org/sites/default/files/Bioplastics%20Simplified_0.pdf
- Brannan, W., Ochsner, M. G., Pond, H. S., Fuselier, H. A., & Scharfenberg, J. C. (1973). Laboratory and clinical experience with polyglycolic acid suture in urogenital surgery. *The Journal of Urology*, 110(5), 571-573. doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-5347\(17\)60283-0](https://doi.org/10.1016/S0022-5347(17)60283-0)
- Burns, K. L. (2007). *An exploration of biochemistry including biotechnology, structural characterization, drug design, and chromatographic analyses* (Tesis doctoral). Georgia Institute of Technology, Georgia, Estados Unidos. <https://smartech.gatech.edu/handle/1853/29593>
- Butschli, J. (30 de junio de 2003). *Wild Oats debuts 'corn-tainers'*. Packaging World. <https://www.packworld.com/article/food/dairy/wild-oats-debuts-corn-tainers>
- Cambridge Consultants. (2018). *Polyhydroxyalkanoates: Plastic the way nature intended?*. https://www.cambridgeconsultants.com/sites/default/files/uploaded-pdfs/PHA%20-%20plastic%20the%20way%20nature%20intended_1.pdf
- Chanda, M. (2017). *Plastics technology handbook*. Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/9781315155876>
- Chen, Y. Y., Geever, L. M., Killion, J. A., Lyons, J. G., Higginbotham, C. L., & Devine, D. M. (2016). Review of Multifarious Applications of Poly (Lactic Acid). *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 55(10), 1057-1075. doi:10.1080/03602559.2015.1132465

- Chinthapalli, R., Skoczinski, P., Carus, M., Baltus, W., de Guzman, D., Káb, H., Raschka, A., & Ravenstijn, J. (2019). Bio-based building blocks and polymers Global capacities and trends 2018–2023. Nova Institut GmbH. <http://www.bio-based.eu/reports/purchase?pid=139>
- Chodak, I. (2008). Polyhydroxyalkanoates: Origin, properties and applications. En M. N. Belgacem & A. Gandini (Eds.), *Monomers, polymers and composites from renewable resources* (pp. 451-478). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-045316-3.X0001-4>
- Clayton, L. A. (1985). *Grace: W.R. Grace & Co., the formative years, 1850-1930*. Jameson Books. <https://www.abebooks.com/first-edition/Grace-W-R-Formative-Years-1850-1930/18269257844/bd>
- Coenen, L., Benneworth, P., & Truffer, B. (2012). Toward a spatial perspective on sustainability transitions. *Research Policy*, 41(6), 968-979. doi: <https://doi.org/10.1016/j.respol.2012.02.014>
- Data Bridge Market Research (DBMR). (2019). *Global Polyhydroxyalkanoate (PHA) Market-Industry Trends and Forecast to 2027*. Data Bridge Market Research. <https://databridgemarketresearch.com/reports/global-polyhydroxyalkanoate-pha-market/>
- Devine, D. M. (Ed.). (2017). *Bioresorbable polymers and their biomedical applications*. Smithers Rapra. <https://www.waterstones.com/book/bioresorbable-polymers-and-their-biomedical-applications/declan-m-devine/9781911088080>
- DiMaggio, P. J., & Powell, W. W. (1983). The iron cage revisited: Institutional isomorphism and collective rationality in organizational fields. *American Sociological Review*, 48(2), 147-160. doi: <https://doi.org/10.2307/2095101>
- Domenek, S., Courgneau, C., & Ducruet, V. (2011). Characteristics and applications of Poly(lactide). En S. Kalia & L. Avérous (Eds.), *Biopolymers: Biomedical and environmental applications* (pp. 183-224). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118164792>
- DuPont (1992). Natural In, Natural Out. Ecochem -a joint venture of DuPont and ConAgra Inc.- will produce high-value natural lactic acid from renewable resources such as cheese whey. *DuPont Magazine*, 86(4), 18-19. <https://digital.hagley.org/islandora/object/islandora%3A2003673/datastream/PDF/download>
- DuPont. (24 de junio de 2003). *DuPont receives U.S. EPA's Presidential Green Chemistry Award for New Innovation* (Press release). https://eurekaalert.org/pub_releases/2003-06/d-dru062303.php
- DuPont. (2019). *The Sorona Story*. Sonora. <http://sorona.com/our-story/>
- DuPont Tate and Lyle Bioproducts. (2018). *Our story -DuPont and Tate & Lyle Bio Products*. https://api.duponttateandlyle.com/our_story
- Ebnesajjad, S. (Ed.). (2013). *Handbook of biopolymers and biodegradable plastics: Properties, processing and applications*. Elsevier. doi: <https://doi.org/10.1016/C2011-0-07342-8>
- Emsley, J. (2010). *A Healthy, Wealthy, Sustainable World*. Royal Society of Chemistry. http://www.johnemsley.com/books/healthy_wealthy_sustainable.html
- Endres, H. J., & Siebert-Raths, A. (2011). *Engineering biopolymers: Markets, Manufacturing, Properties and Applications*. Hanser. <https://www.abebooks.com/servlet/BookDetailsPL?bi=30295061976>
- Environmental Protection Agency (EPA). (2003). *Presidential Green Chemistry Challenge: 2003 Greener Reaction Conditions Award: Microbial Production of 1,3-Propanediol*. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/greenchemistry/presidential-green-chemistry-challenge-2003-greener-reaction-conditions-award>
- Federal Trade Commission (FTC). (1992). *Guides for the use of environmental marketing claims (57 FR 36363)*. <http://www.ftc.gov/bcp/grnrule/guides980427.htm>
- Fegade, S. L. (16 de marzo de 2006). *Biodegradable polymers in medical applications*. Plastemart. http://www.plastemart.com/upload/Literature/paper_swapnil.asp
- Forsyth, W. G. C., Hayward, A. C., & Roberts, J. B. (1958). The occurrence of poly-B-hydroxybutyric acid in aerobic Gram-negative bacteria. *Nature Lond*, 182, 800-801. doi: <https://doi.org/10.1038/182800a0>
- Gandini, A., & Belgacem, M. (2008). The state of the art. En M. N. Belgacem & A. Gandini (Eds.), *Monomers, polymers and composites from renewable resources* (pp. 1-16). Elsevier. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-045316-3.X0001-4>

- Geels, F. W., & Kemp, R. (2007). Dynamics in socio-technical systems: Typology of change processes and contrasting case studies. *Technology in Society*, 29(4), 441-455. doi: <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2007.08.009>
- Geels, F. W. (12-15 de junio de 2001). *Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: A multi-level perspective and a case-study* [Paper]. Nelson and Winter Conference, Organizado por DRUID, Aalborg, Dinamarca. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.153.5270&rep=rep1&type=pdf>
- Geels, F. W. (2005). Technological Transitions and System Innovations. A Co-Evolutionary and Socio-Technical Analysis. Edward Elgar. doi: <https://doi.org/10.4337/9781845424596>
- Geels, F. W., & Verhees, B. (2011). Cultural legitimacy and framing struggles in innovation journeys: A cultural-performative perspective and a case study of Dutch nuclear energy (1945-1986). *Technological Forecasting & Social Change*, 78(6), 910-930. doi: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2010.12.004>
- Geels, F. W., Kern, F., Fuchs, G., Hinderer, N., Kungl, G., Mylan, J., Neukirch, M., & Wassermann, S. (2016). The enactment of socio-technical transition pathways: A reformulated typology and a comparative multi-level analysis of the German and UK low-carbon electricity transitions (1990-2014). *Research Policy*, 45(4), 896-913. doi: <https://doi.org/10.1016/j.respol.2016.01.015>
- Geels, F. W., Sovacool, B. K., Schwanen, T., & Sorrell, S. (2017). The socio-technical dynamics of low-carbon transitions. *Joule*, 1(3), 463-479. doi: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.09.018>
- Geels, F. W., & Schot, J. (2007). Typology of sociotechnical transition pathways. *Research Policy*, 36(3), 399-417. doi: <https://doi.org/10.1016/j.respol.2007.01.003>
- Geels, F. W., McMeekin, A., & Pfluger, B. (2020). Socio-technical scenarios as a methodological tool to explore social and political feasibility in low-carbon transitions: Bridging computer models and the multi-level perspective in UK electricity generation (2010-2050). *Technological Forecasting and Social Change*, 151. doi: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.04.001>
- Grigore, M. E., Grigorescu, R. M., Iancu, L., Rodica-Mariana, I., Zaharia, C., & Andrei, E. R. (2019). Methods of synthesis, properties and biomedical applications of polyhydroxyalkanoates: A review. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 30(9), 695-712. doi: doi.org/10.1080/09205063.2019.1605866
- Hardaway, R. M. (1999). 200 years of military surgery. *Injury*, 30(6), 387-397. doi: [https://doi.org/10.1016/S0020-1383\(99\)00115-1](https://doi.org/10.1016/S0020-1383(99)00115-1)
- Hardaway, R. M. (2004). Wound shock: A history of its study and treatment by military surgeons. *Military Medicine*, 169(4), 265-269. doi: <https://doi.org/10.7205/MILMED.169.4.265>
- Harper, G. D. (2014). *The role of Business Model Innovation: In transitioning ULEVs to Market* (Tesis doctoral). Universidad de Cardiff. <https://core.ac.uk/download/pdf/42521458.pdf>
- Hayward, A. C., Forsyth, W. G. C., & Roberts, J. B. (1959). Synthesis and breakdown of Poly-B-Hydroxybutyric Acid by bacteria. *Journal of General Microbiology*, 20, 510-518. doi: <https://doi.org/10.1099/00221287-20-3-510>
- Hoffman, A. H., Herrmann, J. B., Lesneski, D. V., & O'connor, J. L. (1977). The handling characteristics of surgical sutures. En M. Cannon (Ed.) (1977), *Proceedings of the Fifth New England Bioengineering Conference* (pp. 21-25). Pergamon Press. doi: <https://doi.org/10.1016/C2013-0-02909-X>
- Holmes, P. A. (1985). Applications of PHB - a microbially produced biodegradable thermoplastic. *Physics in Technology*, 16(1), 32-36. doi: <https://doi.org/10.1088/0305-4624/16/1/305>
- Holmes, P. A., Wright, L. F., Alderson, B., & Senior, P. J. (1982). *A process for the extraction of poly-3-hydroxy-butyric acid from microbial cells*. European Patent No. EP0015123A1. Munich. European Patent Office. <https://patentimages.storage.googleapis.com/4d/68/b0/ef3bd1590af616/EP0015123A1.pdf>
- Imbert, E., Ladu, L., Tani, A., & Morone, P. (2019). The transition towards a bio-based economy: A comparative study based on social network analysis. *Journal of Environmental Management*, 230, 255-265. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.09.068>
- Joseph, B., George, A., Gopi, S., Kalarikkal, N., & Thomas, S. (2017). Polymer sutures for simultaneous wound healing and drug delivery - A review. *International Journal of Pharmaceutics*, 524(1-2), 454-466. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2017.03.041>
- Kemp, R. (2009). Eco-Innovations and transitions. *Economia delle Fonti di Energia e dell'ambiente*. 1, 103-124. doi:10.3280/EFE2009-001007

- Khandal, D., Pollet, E., & Avérous, L. (2015). Polyhydroxyalkanoate-based Multiphase Materials. En R. Ipsita & P. M. Visakh (Eds.), *Polyhydroxyalkanoate (PHA) Based Blends, Composites and Nanocomposites* (pp.119-140). Royal Society of Chemistry. doi: <https://doi.org/10.1039/9781782622314>
- Kulkarni, R. K. (1965). Brief review of biomechanical degradation of polymers. *Polymer Engineering and Science*, 5(4), 227-230. doi: <https://doi.org/10.1002/pen.760050404>
- Kulkarni, R. K., Pani, K. C., Neuman, C., & Leonard, F. (1966b). Polylactic acid for surgical implants. *Archives of Surgery*, 93(5), 839-843. doi: <https://doi.org/10.1001/archsurg.1966.01330050143023>
- Kulkarni, R. K., Pani, K. C., Neuman, C., & Leonard, F. (1966a). *Polylactic acid for surgical implants 4 reported*. Technical Report 6608, Project: 3A013001A9-1C. U.S. Army Medical Biomechanical Research Laboratory, Walter Reed Army Medical Center, Washington, DC. <https://pdfs.semanticscholar.org/b4a4/8ea29980fdbddd438003b4ff1336126f1552.pdf>
- Kumar, S., Prakash, N., & Datta, D. (2011). Biopolymers based on carboxylic acids derived from renewable resources. En S. Kalia & L. Avérous (Eds.), *Biopolymers: Biomedical and environmental applications* (pp. 169-182). John Wiley & Sons. doi: <https://doi.org/10.1002/9781118164792.pubnote>
- Lenz, R. W., & Marchessault, R. H. (2005). Bacterial polyesters: Biosynthesis, Biodegradable Plastics and Biotechnology. *Biomacromolecules*, 6(1), 1-8. doi: <https://doi.org/10.1021/bm049700c>
- Liu, S., Wu, G., Zhang, X., Yu, J., Liu, M., Zhang, Y., Wang, P., Yin, X., Zhang, J., Li, F., & Zhang, M. (2019). Preparation and properties of poly (lactic acid) (PLA) suture loaded with PLA microspheres enclosed drugs (PM-Ds). *Journal of the Textile Institute*, 110(11), 1596-1605. doi: <https://doi.org/10.1080/00405000.2019.1610999>
- Medical Plastics News (MPN). (18 de mayo de 2017). *Soak it up: Examining bioabsorbable polymers in healthcare*. Medical Plastics News. <https://www.medicalplasticsnews.com/api/content/22fe47c4-3bdb-11e7-88cc-0aea2a882f79/>
- Muffly, T. M., Tizaano, A. P., & Walters, M. D. (2011). The history and evolution of sutures in pelvic surgery. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 104(3), 107-112. doi: <https://doi.org/10.1258/jrsm.2010.100243>
- Murray, C. K., Hinkle, M. K., & Yun, H. C. (2008). History of infections associated with combated-related injuries. *Journal of Trauma and Acute Care Surgery*, 64(3), 221-231. doi: <https://doi.org/10.1097/TA.0b013e318163c40b>
- Niaounakis, M. (2015). *Biopolymers: Applications and trends*. Elsevier. doi: <https://doi.org/10.1016/C2014-0-00936-7>
- Olatunji, O. (2020). Aquatic biopolymers. Understanding their industrial significance and environmental implications. Springer. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-34709-3>
- Ong, S. Y., Chee, J. Y., & Sudesh, K. (2017). Degradation of Polyhydroxyalkanoate (PHA): A review. *Journal of Siberian Federal University. Biology*, 10(2), 211-225. doi: <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0024>
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE). (2001). *The application of biotechnology to industrial sustainability*. OCDE Publishing. doi: <https://dx.doi.org/10.1787/9789264195639-en>
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE). (2013). *Policies for bioplastics in the context of a bioeconomy*. OECD Publishing. doi: <http://dx.doi.org/10.1787/5k3xpf9rrw6d-en>
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE). (2014). *Biobased chemicals and bioplastics: Finding the right policy balance*. OECD Publishing. doi: <https://doi.org/10.1787/5jxwwfjx0djf-en>
- Platt, D. K. (2006). *Biodegradable polymers*. Smithers Rapra. <https://epdf.pub/biodegradable-polymers-market-report.html>
- Plunkett, J. W. (2011). *Plunkett's chemicals, coatings & plastics industry almanac 2009*. Plunkett Research. <https://plunkettresearchonline.com/Login.aspx?ReturnUrl=%2f>
- Powell, K. A., Collinson, B. A., & Richardson, K. R. (1983). Microbiological process for the production of poly (beta-hydroxybutyric acid) and micro-organisms for use therein. European Patent No. EP0015669A2. Munich. European Patent Office. <https://patentimages.storage.googleapis.com/f1/28/be/26210daeb85674/EP0015669A2.pdf>

- Ratner, B. D., Hoffman, A. S., Schoen, F. J., & Lemons, J. E. (Eds.). (2013). *Biomaterials science: An introduction to materials in medicine* (3rd Ed.). Academic Press. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-087780-8.00148-0>
- Resorba. (2019). *Suture Manual*. https://www.resorba.com/downloads/row/P1326_2019-01_Suture-Manual_EN.pdf
- Rip, A., & Kemp, R., (1998). Technological Change. En S. Rayner & L. Malone (Eds.), *Human Choice and Climate Change* (Vol. 2, Resources and Technology) (pp.327-399). Washington D.C.: Batelle Press. <https://www.nhbs.com/human-choice-and-climate-change-volume-2-resources-and-technology-book>
- Rivero, C. P., Hu, Y., Kwan, T. H., Webb, C., Theodoropoulos, C., Daoud, W., & Lin, C. S. K. (2017). Bioplastics from solid waste. En J. Wong, D. T. Rajeshwar & A. Pandey (Eds.), *Current developments in biotechnology and bioengineering: Solid waste management* (pp. 1-26). Elsevier. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63664-5.00001-0>
- Rudnik, E. (2013). Compostable polymer materials: Definitions, structures, and methods of preparation. En S. Ebnesajjad (Ed.), *Handbook of biopolymers and biodegradable plastics: Properties, processing and applications* (pp. 189-211). Elsevier. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-045371-2.X5001-X>
- Rutkow, I. M., & Zuidema, G. D. (1981). Surgical rates in the United States: 1966 to 1978. *Surgery*, 89(2), 151-162. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/7455900>
- Sahal, D. (1985). Technological guideposts and innovation avenues. *Research Policy*, 14(2), 61-82. doi: [https://doi.org/10.1016/0048-7333\(85\)90015-0](https://doi.org/10.1016/0048-7333(85)90015-0)
- Said, Z. F., & Chiellini, E. (Eds.). (21-25 de marzo de 1999). *International workshop on environmentally degradable polymers: Polymeric materials and the environment (Selected Papers)*. UNIDO-International Center for Science and High Technology, en Doha, Qatar. [https://open.unido.org/api/documents/4813694/download/SELECTED%20PAPERS%20FROM%20ICS-UNIDO%20WORKSHOP%20ON%20ENVIRONMENTALLY%20DEGRADABLE%20POLYMERS%20-%20POLYMERIC%20MATERIALS%20AND%20THE%20ENVIRONMENT%20\(22591.en\)](https://open.unido.org/api/documents/4813694/download/SELECTED%20PAPERS%20FROM%20ICS-UNIDO%20WORKSHOP%20ON%20ENVIRONMENTALLY%20DEGRADABLE%20POLYMERS%20-%20POLYMERIC%20MATERIALS%20AND%20THE%20ENVIRONMENT%20(22591.en))
- Schmitt, E. E., & Rocco, A. (1963). *Surgical sutures. US Patent No. 3297033*. Washington, D.C. United States Patent Office. <https://patentimages.storage.googleapis.com/a8/0a/60/5a79d95ed956ab/US3297033.pdf>
- Schot, J., & Geels, F. W. (2007). Niches in evolutionary theories of technical change. A critical survey of the literature. *Journal of Evolutionary Economics*, 17, 605-622. doi: <https://doi.org/10.1007/s00191-007-0057-5>
- Schot, J., & Geels, F. W. (2008). Strategic niche management and sustainable innovation journeys: Theory, findings, research agenda, and policy. *Technology Analysis & Strategic Management*, 20(5), 537-554. doi: <https://doi.org/10.1080/09537320802292651>
- Sin, L. T., Rahmat, A. R., & Rahman, W. A. (2013). Overview of poly(lactic Acid). En S. Ebnesajjad (Ed.), *Handbook of biopolymers and biodegradable plastics: Properties, processing and applications* (pp. 11-54). Elsevier. doi: <https://doi.org/10.1016/C2011-0-07342-8>
- Singhvi, M. S., Zinjarde, S. S., & Gokhale, D. V. (2019). Polylactic acid: Synthesis and biomedical applications. *Journal of Applied Microbiology*, 127(6), 1612-1626. doi: <https://doi.org/10.1111/jam.14290>
- Smith, A. (2007). Translating sustainabilities between green niches and socio-technical regimes. *Technology Analysis & Strategic Management*, 19(4), 427-450. doi: <https://doi.org/10.1080/09537320701403334>
- Smith, A., & Raven, R. (2012). What is a protective space? Reconsidering niches in transitions to sustainability. *Research Policy*, 41, (pág.). doi: <https://doi.org/10.1016/j.respol.2011.12.012>
- Smith, A., Stirling, A., & Berkhout, F. (2005). The governance of sustainable socio-technical transitions. *Research Policy*, 34(10), 1491-1510. doi: <https://doi.org/10.1016/j.respol.2005.07.005>
- Smith, A., Voß, J., & Grin, J. (2010). Innovation studies and sustainability transitions: The allure of the multi-level perspective and its challenges. *Research Policy*, 39(4), 435-448. doi: <https://doi.org/10.1016/j.respol.2010.01.023>
- Soesanto, Q. M. B., Prihadyanti, D., Hartiningsih, H., & Fizzanty, T. (2016). Dynamics of bioplastics development in Indonesia. *STI Policy and Management Journal*, 1(2), 153-161. doi: <http://dx.doi.org/10.14203/STIPM.2016.48>

- Steger, U., & Meima, R. (1998). The strategic dimensions of environmental management. Sustaining the corporation during the age of ecological discovery. Pelgrave. doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-349-14564-5>
- Thakur, V. K., Thakur, M. K., & Kessler, M. R. (2017). *Handbook of composites from renewable materials. Biodegradable Materials (vol. 5)*. Scrivener-Wiley. <http://www.scrivenerpublishing.com/cart/title.php?id=331>
- The Dow Chemical Company. (2006). *Annual Report for the year ended December 31, 2005*. The Dow Chemical Company. <https://www.nrc.gov/docs/ML0621/ML062120405.pdf>
- The Ships List. (2019). *Grace Line (W. R. Grace & Co.), New York 1882-1969*. The Ships List. <http://www.theshipslist.com/ships/lines/grace.shtml>
- Thielen, M. (2014). *Bioplastics*. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. https://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/b/r/brosch.biokunststoffe-web-v01_1.pdf
- van den Bergh, J., & Bruinsma, F. R. (Eds.). (2008). *Managing transition to renewable energy. Theory and practice from local, regional and macro perspectives*. Edward Elgar. <https://www.e-elgar.com/shop/managing-the-transition-to-renewable-energy>
- Vijayendran, B. (2010). *Biobased chemicals: Technology, economics and markets*. Centre for Management Technology. <http://nova-institut.de/pdf/11-01%20Biobased%20Chemicals%20White%20Paper%20Asia.pdf>
- Volova, T. G., Vinnik, Y. S., Shishatskaya, E. I., Markelova, N. M., & Zaikov, G. E. (2017). *Natural-Based polymers for biomedical applications*. Apple Academic Press, CRC Press, Taylor & Francis Group. <https://www.crcpress.com/Natural-Based-Polymers-for-Biomedical-Applications/Volova-Vinnik-Shishatskaya-Markelova-Zaikov/p/book/9781771884358>
- Wagner, W. R., Sakiyama-Elbert, S. E., Zhang, G., & Yaszemski, M. J. (Eds.). (2020). *Biomaterials science: An introduction to materials in medicine (4th ed.)*. Academic Press. <https://www.elsevier.com/books/biomaterials-science/wagner/978-0-12-816137-1>
- Weber, K. M., & Rohrer, H. (2012). Legitimizing research, technology and innovation policies for transformative change: Combining insights from innovation systems and multi-level perspective in a comprehensive 'failures' framework. *Research Policy*, 41(6), 1037-1047. doi: <https://doi.org/10.1016/j.respol.2011.10.015>
- Werber, F. X., & Baptist, J. N. (1964). Poly-β-hydroxybutyric acid --a naturally occurring thermoplastic material. *Polymer Engineering & Science*, 4(4), 245-250. doi: <https://doi.org/10.1002/pen.760040403>
- Whitmarsh, L. (2012). How useful is the Multi-Level Perspective for transport and sustainability research. *Journal of Transport Geography*, 24, 483-487. doi: <https://doi.org/10.1002/pen.760040403>
- Yee, L. H., & Foster, L. J. (2015). Polyhydroxyalkanoates as packaging materials: Current applications and future prospects. En I. Roy & P. M. Visakh (Eds.), *Polyhydroxyalkanoate (PHA) based blends, composites and nanocomposites* (pp. 183-207). Royal Society of Chemistry. doi: <https://doi.org/10.1039/9781782622314-00183>
- Yuan, D., Bassie, L., Sabalza, M., Miralpeix, B., Dashevskaya, S., Farre, G., Rivera, S., Banakar, R., Bai, C., Sanahuja, G., Arjó, G., Avila, E., Zorrilla-López, U., Ugidos-Damboriena, N., López, A., Almacellas, D., Zhu, C., Capell, T., Hahne, G., Twyman, R., & Christou, P. (2011). The potential impact of plant biotechnology on the Millennium Development Goals. *Plant Cell Reports*, 30, 249-265. doi: <https://doi.org/10.1007/s00299-010-0987-5>
- Zhang, X. (2017). *Science and principles of biodegradable and bioresorbable medical polymers*. Elsevier. doi: <https://doi.org/10.1016/C2014-0-03471-5>