

PROYECTO DE VALORIZACIÓN DE SUBPRODUCTOS DE LA INDUSTRIA DE TRANSFORMACIÓN MECÁNICA DE LA MADERA

INFORME FINAL

Silvia Böthig, Stephany Arrejuria, Fernando Bonfiglio, Matías Cagno,
Yamila Delgado, Santiago Martínez, Fabiana Rey, Pierre Cabot, Diego
Martínez

LATITUD - FUNDACIÓN LABORATORIO TECNOLÓGICO DEL URUGUAY | MONTEVIDEO, DICIEMBRE 2021

Proyecto de valorización de subproductos de la Industria de Transformación Mecánica de la Madera.
Informe final

PREFACIO

Latitud es la Fundación del LATU orientada a la planificación y ejecución de proyectos de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i). Tiene por objetivo brindar al sector productivo soluciones innovadoras y de valor que se anticipen a las demandas mundiales, a través de la investigación aplicada, la vinculación tecnológica y el trabajo en redes, para impulsar el desarrollo sostenible del país. La Industrialización de la Madera es una de las líneas de acción de Latitud, cuyo objetivo es fortalecer la cadena productiva de la madera a través de proyectos para la transferencia de tecnologías, la innovación y el desarrollo de productos derivados de la madera con alto valor agregado. A su vez, Latitud cuenta con plantas piloto y laboratorios que permiten aplicar tecnologías tradicionales y emergentes, evaluando procesos y productos.

El equipo de proyecto estuvo integrado por Silvia Böthig, Stephany Arrejuría, Matías Cagno, Fernando Bonfiglio, Santiago Martínez, Yamila Delgado, Fabiana Rey, Pierre Cabot, Diego Martínez y Joaquín Marquisá.

El equipo de proyecto agradece:

A la contraparte en el MIEM conformada por Sebastián Bianchi, Ignacio Fígoli y Ángel Larrama, por sus valiosos aportes y sugerencias.

Al equipo técnico de la División Evaluación e Información de la Dirección General Forestal del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca por la información proporcionada para poder llevar adelante el relevamiento de residuos de los aserraderos.

A todas las empresas que dispusieron de su tiempo y dedicación para responder a las encuestas presentadas.

A los referentes del sector académico que brindaron su tiempo y opinión a la hora de realizar la selección de bioproductos.

A la Dirección Nacional de Industrias del Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM) y a las autoridades de Latitud (Fundación Laboratorio Tecnológico del Uruguay) por el apoyo a este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO	3
1. RESUMEN	4
2. INTRODUCCIÓN	8
3. OBJETIVOS DEL PROYECTO	12
3.1. Objetivos específicos	12
4. ALCANCE	12
5. METODOLOGÍA	13
5.1. Relevamiento de los residuos	13
5.3. Identificación y selección de potenciales bioproductos	14
5.4. Estudio de viabilidad económica	15
6. RESULTADOS	16
6.1. Relevamiento de los residuos	16
6.1.1. Consumo de madera	16
6.1.2. Eficiencia de proceso	17
6.1.3. Residuos generados	17
6.1.4. Gestión de los residuos	19
6.1.5. Disponibilidad de los residuos	22
6.2. Propiedades fisicoquímicas de las especies industrializadas en Uruguay	27
6.3. Identificación de potenciales bioproductos	29
6.4. Estudio de viabilidad económica	39
6.4.1. Biochar y carbón activado	39
6.4.2. Productos de plástico-madera (WPC)	42
6.5. Hallazgos detectados	44
I. Materia prima y tecnología	44
II. Plazos	46
III. Rentabilidad	46
IV. Comerciales	48
V. Financieras	48
VI. Culturales	48
6.6. CONCLUSIONES	49
REFERENCIAS	54

1. RESUMEN

Los residuos de la transformación mecánica de la madera son un tema de interés para el sector productivo y para el gobierno, por razones de sostenibilidad ambiental y económica. Esta industria es una gran generadora de residuos, cuya valorización es necesaria para un crecimiento sostenible del sector. Una mayor circularidad de los procesos contribuiría a la sustentabilidad económica y ambiental. Actualmente, la gran mayoría de estos residuos son utilizados para la generación de energía eléctrica, en competencia con otras fuentes renovables, solar-fotovoltaica y eólica, previéndose la necesidad de diversificar los destinos de la biomasa de este sector.

Este trabajo complementó la base de datos recabada por la Dirección General Forestal del Ministerio de Ganadería y Agricultura en su Relevamiento de Aserraderos 2020, con el objetivo de cuantificar y determinar los destinos actuales de los residuos de la industria forestal para evaluar la disponibilidad de materia prima con el fin de una posible transformación industrial posterior. Al mismo tiempo, se estudiaron alternativas de transformación en el corto plazo, realizándose un estudio preliminar de factibilidad técnico-económico para tres productos a partir de los residuos de la transformación mecánica de la madera en Uruguay.

Se recabó información disponible sobre algunas características fisicoquímicas de la madera y la corteza de los géneros procesados con destino de aserrío en Uruguay, *Eucalyptus sp.*, y *Pinus sp.* En particular se recopilaron datos de densidad, poder calorífico, contenido de celulosa, hemicelulosas, lignina, extractivos y cenizas. Se encontraron diferencias entre especies de *Eucalyptus sp.* y entre géneros, constatándose un mayor contenido de hemicelulosas en *Pinus sp.* comparado con *Eucalyptus spp.*, mientras que las especies de *Eucalyptus spp.* revelan mayor contenido de lignina. Todas las cifras de masa están expresadas como toneladas (t) en base anhidra, salvo cuando se expresa lo contrario.

El consumo de madera verde relevado para el año 2019 fue de 7.384.351 m³, que equivalen a 3.759.036 t en base anhidra, estimándose una generación total de residuos de 515.602 t/año por los aserraderos, la industria de tableros contrachapados y cuatro plantas de astillado. La eficiencia global de proceso es en promedio 54,4% para los aserraderos tradicionales, un 52,5% para los aserraderos con elaboración y un 40,1% para los que realizan remanufactura.

A través de una encuesta dirigida a industrias que procesan más de 1.000 m³/año de madera, se cuantificaron los tipos de residuos producidos por 29 aserraderos, una planta de tableros contrachapados y cuatro plantas de astillado, relevándose su destino actual y el planificado. De la submuestra de 29 aserraderos y la planta de tableros fueron reportados 402.165 t de residuo en 2019. De este subtotal, se consumen internamente 205.641 t (51%), se venden 179.439 t (45%) y se donan, queman, acopian o se envían a vertederos unas 17.085 t (3,8%). El destino para 314.403 t (78,2%) fue la generación de energía eléctrica o cogeneración, seguido de celulosa (9,1%) y energía térmica (6,3%), con fracciones pequeñas para el resto de los destinos y un 3,8% sin valorizar. Esta relación refleja las políticas por parte del estado dirigidas a promover la generación de energías renovables, sin embargo, algunas empresas plantean ciertas incertidumbres asociadas a los futuros contratos de venta de energía eléctrica a partir de biomasa debido al excedente de ésta en el país. Por parte de las plantas de astillado, se generaron 74.926 t de residuos totales, compuesto de corteza (54.399 t) destinada a mejoramiento de suelos en un 89%, a energía térmica en un 8% y a vertedero sin valorización en un 8%, y pin chips (20.527 t) que se venden con destino a energía térmica (91%) y feedlots (9%).

La cantidad de residuos reportada como sin valorizar es muy baja, pero los destinos pueden cambiar según la demanda y precios del mercado. Para un análisis de la disponibilidad de residuos para futuros proyectos de aprovechamiento, se plantearon diferentes escenarios teóricos. Se espera que en el mediano plazo la disponibilidad tienda a acercarse al que en este trabajo fue llamado Escenario 2. Éste propone como disponibles los residuos que actualmente no tienen aprovechamiento (residuos que son acopiados, quemados o enviados a vertedero), además de incluir las fracciones destinadas a donación y venta con poca rentabilidad o poco estables, (ladrilleros, cama de animales, leña, compostaje, etc), incorporando como disponibles los residuos equivalentes al excedente de energía eléctrica que las empresas vierten a la red de UTE y considerando las ampliaciones de producción reportadas para 2020 a 2022 y el consumo de los proyectos de aprovechamiento informados para un futuro cercano. Este escenario estima como potencialmente disponibles 227.653 t/año de madera y 22.469 t/año de corteza.

La disponibilidad de biomasa es una oportunidad para la inversión por parte de nuevos actores de otros sectores industriales. Fueron analizadas algunas limitantes para la transformación industrial, entre las que destacan la rentabilidad, determinada por costos de logística y operativos entre otros factores, aspectos comerciales, debido al pequeño tamaño del mercado uruguayo y a la dificultad de exportar sin acuerdos con países estratégicos. Se plantea además la importancia de encontrar soluciones rentables y factibles de llevarse a cabo en el corto plazo.

A partir de un análisis global de las tecnologías disponibles, de los requisitos para su implementación y de su potencial, complementado con una consulta a referentes académicos del sector, se seleccionaron los siguientes productos bajo la premisa de que sus procesos industriales se basen en tecnologías maduras, puedan ser implementados en el corto plazo y con baja escala de producción:

- Biochar
- Biochar (pequeña escala) + carbón activado
- Wood Plastic Composite, WPC

Se realizó un estudio de prefactibilidad económica para la producción de estos tres productos en pequeña escala, por los propios empresarios del sector estudiado.

El biochar, o biocarbón es un carbón de origen vegetal producido a partir de un proceso de pirólisis, para uso agropecuario como regenerador de suelos, para mejorar la retención de agua y fijación de nutrientes, teniendo también aplicaciones para la descontaminación de suelos, entre otras. Su utilización tiene un impacto positivo en el medio ambiente y en la mitigación del cambio climático, presentando gran potencial de diversificación de sus aplicaciones. Se propuso producir biochar a pequeña escala en plantas de pirólisis modulares, compactas y móviles, con su consecuente baja inversión inicial, flexibilidad en la producción, seguridad de suministro local y menores costos de traslado de materia prima. Estas plantas admiten escalado en forma modular, adicionando trenes de pirólisis a la línea productiva.

El carbón activado es un material con muy alta capacidad de adsorción, utilizado extensamente como purificador para potabilización de agua, siendo OSE su principal consumidor en el país. No existe producción nacional y su consumo está en aumento. Se planteó su producción a partir del biochar, a través de un tratamiento de activación físico o fisicoquímico en la misma la planta industrial, como producto asociado. A estos efectos, se incorpora otro tren de pirólisis con una unidad de activación.

La producción de biochar fue analizada en dos tamaños (600 y 3.000 t biochar/año), bajo dos modelos de abastecimiento, 100% biomasa propia y abastecimiento mixto en una relación 20/80, biomasa propia y biomasa suministrada desde una distancia promedio de 25 km, respectivamente. El carbón activado se

estudió con iguales modalidades de abastecimiento y también en dos escalas (300 y 1.500 t/año), abarcando así el rango entre la mínima escala disponible y la sustitución de las 1.399 t importadas en 2019.

Se encontró que, bajo las condiciones de inversión y supuestos definidos, la producción de biochar bajo los dos modelos determinados podría ser económicamente rentable, mientras que la producción de carbón activado sería viable en el escenario de mayor producción.

Estas dos escalas significan un consumo de 1.800 y 9.000 t/año equivalentes a de 3.000 y 15.000 toneladas de biomasa verde respectivamente. Tendrían abastecimiento suficiente en diferentes locaciones de acuerdo con disponibilidad de Escenario 2. Las plantas de mayor tamaño podrían ser instaladas en los departamentos de Paysandú, Rivera y Tacuarembó, asegurando el suministro de biomasa proveniente del sector estudiado. Sin embargo, podría suplirse la alimentación con residuos de otras cadenas de valor.

El WPC (Wood Plastic Composite) es un material compuesto por madera, plástico y aditivos, que se utiliza en la industria de la construcción para decks, muebles de exterior, revestimiento de fachadas, entre otros. Se realizó un estudio de factibilidad económica de producción de tablillas de WPC para pisos exteriores y pasarelas o decks a partir de residuos tales como aserrín, chips e incluso costaneros, y resinas PEAD (polietileno de alta densidad) recicladas del mercado nacional.

Se propuso una capacidad de producción de 21.600 m²/año equivalentes a 480 t/año, requiriendo una provisión de 306,7 t/año de madera libre de corteza y 154,1 t/año de resina. A esto se le suma la biomasa consumida como combustible, llegando a un consumo total de 403 t/año equivalentes a 725 t/año de madera verde. Este tamaño permite flexibilidad de ubicación en prácticamente cualquier zona del país en relación con la provisión de biomasa como materia prima. Todas las micro-zonas configuradas para una especie en el “Relevamiento de los Residuos” (Böthig, Arrejuria, & Delgado, 2021) podrían abastecer la planta. Como resultado de este modelo, considerando una inversión realizada con capital propio, se obtiene que el proyecto es viable: con una TIR=15%, un VAN= 143.035 USD y un periodo de repago simple de 5,1 años.

Se recomienda la evaluación técnica de la adaptación de estas tecnologías a las materias primas disponibles y ajuste de parámetros de proceso. En especial, la activación del biochar requiere aún trabajos de desarrollo. Se sugiere también la profundización de la evaluación económica enfocando en una localización y caso de negocio concreto.

Las tecnologías más innovadoras, pueden tener más oportunidades de mercado o rentabilidad, pero requieren más desarrollo tecnológico, aumentando la inversión y alargando los plazos. Se requieren por lo tanto acciones en el corto plazo por parte del gobierno para promover proyectos innovadores, analizando en paralelo alternativas con diferentes horizontes temporales. Se propone acortar distancias acordando con empresas referentes y proveedores de tecnología y desarrollos llave en mano.

El establecimiento de industrias de transformación de los residuos industriales de la transformación mecánica de la madera daría lugar a una actividad empresarial local de recolección, clasificación, acopio y, eventualmente, transporte de ese subproducto de la madera. El desarrollo de una cadena comercial de la biomasa debería involucrar: gestión sistemática de los residuos (control de proceso, clasificación, separación y almacenamiento orientados a los requisitos de la demanda), normalización, control de calidad y un sistema de establecimiento de precios según parámetros normalizados de materia prima. Asimismo debería buscarse una optimización del transporte de la biomasa en forma coordinada entre los proveedores y consumidores, con estandarización de precios y condiciones.

El desarrollo de biorrefinerías involucra una integración de diversos actores y especialidades para un aprovechamiento integral del recurso. Es importante el acercamiento de nuevos actores al ecosistema para la introducción de nuevos conocimientos y acortar distancias tecnológicas. Por ejemplo, industria petroquímica y de la celulosa, que abren camino en biorrefinerías a nivel mundial.

Para avanzar en nuevos desarrollos tecnológicos del sector de transformación mecánica e industrias derivadas, es necesario aumentar capacidades en recursos humanos, infraestructura e I+D+i, potenciar el vínculo entre academia e industria, promoviendo la investigación colaborativa con la integración multidisciplinaria y pluri-sectorial.

El aprovechamiento de los recursos dispersos y el establecimiento de biorrefinerías son favorecidos por un contexto asociativo, optimizando costos logísticos, logrando seguridad de suministro para los inversores y estabilidad en el negocio de los residuos para los aserraderos. Se requieren empresas del sector con mayor capacidad tractora para liderar emprendimientos e inversores de otros rubros con los que las MIPYMES podrían asociarse como abastecedores.

Existe desconocimiento del consumidor en general sobre los beneficios ambientales de la economía circular y desinterés por contribuir con un consumo responsable. Es necesario trabajar para promover un cambio cultural hacia la bioeconomía. Implica un cambio en iniciativas de consumo de la sociedad hacia los bioproductos, valorizando la sostenibilidad productiva y el carácter renovable de las materias primas, así como la circularidad en los procesos de transformación. Se deberían generar políticas de promoción a estos efectos.

El mundo tiende a valorar especialmente los productos de origen renovable producidos en forma sostenible, con bajo impacto ambiental. Se sugiere aprovechar oportunidades internacionales disponibles, y desarrollar certificaciones y estrategias de marketing sostenidas en esos aspectos.

Uruguay ya está construyendo una estructura política de sostén para el desarrollo de una bioeconomía circular. El rol conductor del gobierno nacional será protagónico para potenciar el desarrollo de un nuevo ecosistema de negocios asociado a la biomasa residual a través de las políticas sectoriales, coordinado con los gobiernos departamentales y liderando la colaboración entre los actores.

2. INTRODUCCIÓN

El complejo forestal-maderero uruguayo es relativamente joven (a partir de la Ley Forestal N° 15.939 de 1987), pero ha experimentado un crecimiento sostenido durante los últimos treinta años, tanto en lo que respecta al área plantada como a su desarrollo industrial. Con más de un millón de hectáreas plantadas, la cadena forestal uruguaya representa el 3,6 % del producto interno bruto, con exportaciones que alcanzaron los 1.660 millones de dólares estadounidenses en 2018, un 18 % del total exportado. Existen en Uruguay dos principales cadenas industriales vinculadas al sector forestal: la industria celulósica y la transformación mecánica (aserrío y debobinado). Al mismo tiempo, se han desarrollado otras actividades como exportaciones de chips y madera en rolos, que también pueden destinarse a pulpa o aserrío (Uruguay XXI, 2021). Se contabilizan 1.784 empresas relacionadas con el rubro forestal, más del 90 % de las cuales son micro y pequeñas empresas. (Presidencia - Oficina de Planeamiento y Presupuesto, 2019).

A nivel mundial, el sector forestal se muestra dinámico, con nuevos productos, nuevos actores (hemisferio sur) y nuevos mercados emergentes (Asia). Su estructura cambia en forma asociada al desarrollo económico, a las tendencias demográficas, a factores tecnológicos, a la creciente demanda de energía y a factores ambientales (Presidencia - Oficina de Planeamiento y Presupuesto, 2019). Existe una oportunidad de generación de nuevas industrias asociadas especialmente a la tendencia global a la sustitución de la matriz productiva dependiente de la petroquímica por productos de base biológica (bioproductos). La madera y sus subproductos podrían convertirse en la materia prima esencial para esos procesos productivos, aunque no sin altos niveles de inversión, de I+D y capacitación (Presidencia - Oficina de Planeamiento y Presupuesto, 2019).

La industria forestal es un gran generador de residuos sólidos, tanto a nivel de campo como en la fase industrial. Esto ha obligado a desarrollar en algunos casos políticas departamentales que prohíben la instalación de empresas destinadas al aserrío dentro de la trama urbana, estableciendo incluso la relocalización de algunas empresas como en el caso de la ciudad de Tranqueras en Rivera (Instituto Nacional de Impresiones y Publicaciones Oficiales, 2015) y políticas como en el caso de Cerro Largo, en donde se prohíbe a los aserraderos acopiar residuos en planta urbana y suburbana (Junta Departamental de Cerro Largo, 2011). Un planteo recurrente por parte del sector productivo refiere a las grandes cantidades de residuo generadas y la falta de oportunidades de aprovechamiento.

Se han llevado adelante trabajos de relevamiento de las empresas vinculadas al sector forestal, fundamentalmente aserraderos y carpinterías, con el fin de tener más información sobre la situación del sector. En el año 2016 se realizó un relevamiento del sector de transformación mecánica de la madera (aserraderos y carpinterías) en Rivera y Tranqueras. Este trabajo destacó la necesidad de reglas y garantías claras por parte del gobierno local y organismos nacionales, que funcionen como articuladores de cooperación entre las empresas para que de esta forma los pequeños empresarios puedan percibir el beneficio de contar con canales seguros para poder comercializar sus residuos (Rodríguez Miranda, 2016).

En 2018 la Dirección General Forestal (DGF) del MGAP, publicó la Encuesta de Aserraderos 2017 identificando los aspectos productivos y sus principales características durante el período 2016. Este trabajo permitió conocer la situación de estas industrias a nivel país, así como sus necesidades y dificultades. Este relevamiento arrojó que la cantidad de madera procesada durante el período 2016 fue de 804.082 m³, con una máxima instalada de aproximadamente 1,5 millones de m³ anuales (Boscana, Mariana; Boragno, Leonardo, 2017). Los aserraderos de mayor porte representaron en este período un 76% del total de madera consumida en el país, los medianos un 16% y los aserraderos pequeños un 11%. Los aserraderos grandes y medianos principalmente exportan sus productos y cuentan con una cadena integrada de logística, cosecha,

carga y transporte; por otra parte, los aserraderos pequeños están condicionados a la oferta y demanda de materia prima, tienen mayores costos logísticos y comercializan sus productos casi en su totalidad en el mercado interno (Boscana, Mariana; Boragno, Leonardo, 2020). En la fase industrial se generan chips, viruta, aserrín, polvo, costaneros y corteza, entre otros, cuya valorización es crítica para el desarrollo sostenible del sector, transformando un pasivo ambiental en un activo económico.

Una definición política que impactó en el desarrollo de la industria forestal en Uruguay fue la Política Energética de Uruguay, aprobada en 2008 y con vigencia 2030, que define como uno de sus ejes estratégicos la diversificación de la matriz energética con especial énfasis en las energías renovables, a la vez que puntualizan el papel del Estado para diseñar y conducir la política energética.

En este marco se llevó adelante el Proyecto “Producción de electricidad a partir de Biomasa en Uruguay (PROBIO)”¹, una iniciativa del Gobierno Nacional y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Este trabajo se enfocó en generar herramientas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero generados en Uruguay por la producción de electricidad a partir de combustibles fósiles, mediante la generación de información, promoción e incentivo para el desarrollo de capacidades e instrumentos necesarios para promover la utilización energética sustentable de los subproductos de biomasa provenientes de la actividad forestal y otras cadenas. En este proyecto se destacó la necesidad de generar información más precisa sobre el volumen de residuos de biomasa producidos en las plantaciones forestales, como apoyo a la hora de diseñar políticas que incluyan el potencial de la biomasa para cada región. (INIA Tacuarembó, 2015). Actualmente, como consecuencia de esta y otras acciones, la matriz de energía eléctrica tiene un importante componente de biomasa, representando el 9 % de la potencia instalada para los años 2019 y 2020 (Dirección Nacional de Energía, 2020). En el 2020 un 8% de la energía eléctrica entregada al SIN fue generada a partir de residuos de biomasa forestal (licor negro, residuos de la foresto industria) (UTE, s.f.).

Uruguay ha trabajado en la construcción de la Estrategia Nacional de Desarrollo de largo plazo, Uruguay 2050 (Presidencia - Oficina de Planeamiento y Presupuesto, 2019) para definir las líneas estratégicas para alcanzar una visión integrada que articule políticas macroeconómicas, productivas, sociales y ambientales. En este marco y al ser un complejo productivo clave en la Estrategia Nacional de Desarrollo, se inició en 2017 el estudio prospectivo Bioeconomía forestal al 2050 (Dirección de Planificación de la Oficina de Planeamiento y Presupuesto, 2018), estudio que involucró a gran parte del gobierno, academia y centros tecnológicos involucrados en la temática y que contó con diversas consultorías (Centro Tecnológico Finlandés VTT, Estudio Forestal Faroppa, Facultad de Ingeniería de Udelar). Fueron definidas las áreas de bioeconomía forestal priorizadas realizándose un análisis de la situación de partida en Uruguay y en países de referencia. Se buscó identificar potenciales productos, tecnologías y procesos que agreguen mayor valor a la madera, diversificando y transformando la matriz productiva del país. Entre otros aspectos, estos trabajos identificaron que la valorización de residuos es un aspecto prioritario para el desarrollo del sector forestal, analizándose las aplicaciones de bioenergía y biorrefinería. Se destacó que los residuos son destinados a la producción de bioenergía permitiendo a esas industrias forestales ser autosuficiente desde el punto de vista energético. Pero potenciar ese mercado no es una opción atractiva, debido a que la rentabilidad está disminuyendo constantemente conforme se va desarrollando la política energética, con un importante crecimiento de energías renovables alternativas económicamente más competitivas. Se

¹ Proyecto PROBIO. Accesible en la web: <http://www.probio.dne.gub.uy/cms/>

recomendó fomentar la creación de redes para la utilización conjunta de diferentes subproductos, residuos y desechos de la industria forestal y otros sectores para la producción de productos bioquímicos, biomateriales y biocombustibles de mayor valor agregado (Dirección de Planificación de la Oficina de Planeamiento y Presupuesto, 2019).

En el marco de los trabajos realizados para este proyecto, (Dieste, y otros, 2018) destacan la necesidad de encontrar un destino para los subproductos de la transformación mecánica, fundamentalmente del pino, camino que en su momento apuntaba a la generación de energía eléctrica a partir de biomasa. Asimismo, concluyen que es deseable diversificar la oferta de productos forestales, vislumbrando las industrias de transformación mecánica de la madera y transformación química para aprovechamiento de los residuos con potencial de desarrollo en un marco industrial de biorrefinería (Dieste, A., Cabrera, M.N. Calvijo, L., Casella, N., 2019). El uso eficiente de desechos y residuos requerirá la integración de actores y procesos de diferentes cadenas de valor. La transformación se puede respaldar mediante el desarrollo de agrupaciones y parques industriales, por ejemplo, alrededor de las instalaciones existentes de la industria, como los aserraderos, y promoviendo la creación de redes entre todas las cadenas de valor. En este sentido, los actores industriales que ya operan en varios sectores pueden actuar como catalizadores del proceso (Dirección de Planificación de la Oficina de Planeamiento y Presupuesto, 2019).

En base a estos estudios, el Sistema Nacional de Transformación Productiva y Competitividad Transforma Uruguay, generó una Hoja de Ruta Sectorial Forestal Madera. Su objetivo es construir lineamientos estratégicos identificados como prioritarios y sobre los que se entiende se puede avanzar en el corto plazo, incluyendo como un aspecto fundamental la necesidad de valorizar el gran volumen de residuos generados tanto a nivel de campo como industrial.

Uruguay tiene una fuerte vocación ambiental y se encuentra enfocado en la promoción de un desarrollo sostenible, reflejándose en su compromiso con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la agenda 2030 de desarrollo sostenible aprobada por las Naciones Unidas en el año 2015, la Política Nacional de Cambio Climático y la Estrategia Nacional de Desarrollo Uruguay 2050.

En esta misma línea, y con el objetivo de contribuir a la integración del concepto de economía circular en Uruguay, entre 2014 y 2020 se llevó a cabo el proyecto “Biovalor. Hacia una economía verde en Uruguay: Estimulando prácticas de producción sostenibles y tecnologías con bajas emisiones al ambiente en sectores priorizados”. El mismo fue llevado adelante por MIEM, en asociación con el MVOTMA y el MGAP, con el apoyo de ONUDI y el financiamiento del Fondo para el Medio Ambiente Mundial. Este proyecto contribuyó a la transformación de los diferentes tipos de residuos del sector agropecuario y las cadenas de producción agroindustrial en Uruguay en distintos tipos de energía y/o subproductos, con el objetivo de reducir las emisiones de gases con efecto invernadero, aportando al desarrollo de un modelo sostenible bajo en carbono, apoyado por el desarrollo y transferencia de tecnología adecuada (Ministerio de Industria, Energía y Minería, 2020).

En 2019 aprobó su primer Plan Nacional Ambiental para el Desarrollo Sostenible para fortalecer la institucionalidad ambiental integrando esa dimensión en las prioridades del desarrollo nacional. Este plan propone un abordaje integral y sostenible de los residuos sólidos, con metas de reducción en la generación, aumento en la valorización y disminución de la disposición final. Entre las líneas de acción propuestas propone fortalecer el modelo de gestión de residuos sólidos a través de la elaboración de pautas técnicas para el reciclaje, valorización y disposición final; implementar un mecanismo de control y seguimiento para todas las fracciones de residuos que permita contar con indicadores de generación y gestión discriminado por tipo de residuos, origen y destino, entre otros y que permita evaluar el cumplimiento de las metas. A su

vez establece la necesidad de incrementar el conocimiento y difusión sobre procesos y tecnologías que habilitan el reciclaje y la valorización de residuos, y promover y facilitar alternativas de gestión que colaboren con su incorporación por parte de emprendimientos nacionales (Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente; Sistema Nacional Ambiental (SNA), 2019).

Al igual que la Unión Europea², Japón, China, Escocia y Colombia, Uruguay se encuentra en un proceso de transición hacia una economía circular. Los siguen en este proceso países como Chile, Ecuador, Corea del Sur y Canadá, entre otros (Uruguay Transforma, 2019). Según la Fundación Ellen MacArthur, una economía circular tiene como objetivo mantener los productos, componentes y materiales en su mayor utilidad y valor en todo momento, impulsando el agregado de valor a lo largo del ciclo de vida. Es restaurativa y regenerativa por diseño y prioriza el uso de recursos de origen renovable. De este modo, busca desarrollar las cadenas de la bioeconomía nacional dejando de lado el modelo de economía lineal basado en la extracción de recursos, la producción y la eliminación de los residuos. La bioeconomía se refiere al uso de recursos, procesos, tecnologías, e incluso inteligencia biológica, para la producción de productos y servicios (Uruguay Transforma, 2019). La optimización del uso de la biomasa es un objetivo central de la bioeconomía, a partir de la noción de "cascada de valor", que es llevado a la práctica bajo el concepto de biorrefinería. Alrededor de este objetivo, el concepto de bioeconomía integra políticas de ciencia, tecnología e innovación; políticas de diversificación productiva destinadas al aumento del valor añadido y la creación de empleos decentes; estrategias de crecimiento verde; así como políticas de adaptación y mitigación al cambio climático (Rodríguez, Hitschfeld, & Mondaini, 2017).

En este marco, Uruguay generó en el 2019 el "Plan de Acción en Economía Circular", con el objetivo de impulsar la economía circular en el marco del desarrollo sostenible del país (Uruguay Transforma, 2019). Los principales objetivos del plan consisten en: generar información sistemática que colabore a diseñar políticas públicas centradas en la economía circular, impulsar la investigación e innovación en temas relacionados, identificación e implementación de acciones tempranas para impulsarla, promover el conocimiento de los modelos de negocios basados en ella, incentivar las prácticas y procesos vinculados a ésta. Dentro de las acciones priorizadas en el plan se destaca la valorización de materiales, a través de la optimización de su uso, dándole una nueva vida a los residuos y potenciando el desarrollo de formas de negocios asociadas a su valorización.

En 2019 se aprobó la Ley de Gestión Integral de Residuos (Nº 19.829), que establece los cimientos de la planificación y la política de gestión de residuos a nivel nacional y departamental, impulsando una gestión sólida, resiliente, inclusiva y moderna. Prevé la generación de un Plan Nacional de Gestión de Residuos (PNGR) cuyo proceso de consulta pública finalizó en noviembre 2021³. Es una herramienta de planificación estratégica para implementar conceptos de la dicha ley con un abordaje integral ambiental, económico, social y de gobernanza, que permitirá a nuestro país avanzar en la transición hacia una gestión sostenible de residuos, en el marco de una economía circular.

Con el objetivo de implementación de la Hoja de Ruta Forestal y en el marco de las políticas mencionadas, la Dirección Nacional de Industria (DNI) del MIEM solicita a Latitud la realización de este proyecto, con el

² La Unión Europea como bloque y varios países en forma individual.

³ <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/comunicacion/noticias/primer-plan-nacional-gestion-residuos-uruguay-ingresa-su-etapa-final-abre>

objetivo de contribuir con información sobre los residuos generados por la industria de transformación mecánica de la madera y evaluar algunas alternativas de transformación para su aprovechamiento. Para esto se diseña un relevamiento del sector y se evalúan alternativas de aprovechamiento factibles de ser implementadas en el corto plazo.

3. OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo general del proyecto fue realizar una evaluación preliminar de la factibilidad de la valorización de los residuos lignocelulósicos de la primera transformación mecánica de la madera a través de su transformación industrial.

3.1. Objetivos específicos

Para ello se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- a. Relevar la cantidad, disponibilidad, distribución geográfica y tipos de residuos lignocelulósicos provenientes de la industria de transformación mecánica de la madera.
- b. Identificación de potenciales bioproductos y las tecnologías asociadas a su proceso productivo.
- c. Evaluación de prefactibilidad técnico-económica de generación de nuevos bioproductos a partir de la valorización de residuos de la foresto-industria (chips, aserrín, costaneros, etc.).
- d. Identificar barreras técnicas para la valorización de dichos residuos.

4. ALCANCE

El objeto de estudio fueron los residuos lignocelulósicos generados en 2019 por el sector de la primera transformación mecánica de la madera en Uruguay. Se excluyeron los residuos de manejo silvicultural, residuos de combustión y otros residuos no lignocelulósicos generados por las empresas.

El relevamiento de residuos abarcó los sectores de Aserrado, Tableros Contrachapados y Plantas de Astillado, partiendo de los datos recabados a través de la Encuesta de Aserraderos 2020 realizada por DGF y profundizando dicha información a través de encuestas específicas dirigidas a empresas cuyo consumo anual de materia prima fuese mayor a 1000 m³. Quedaron excluidas empresas pequeñas en situación de informalidad o fuera de la base de datos de DGF, plantas de impregnación, carpinterías, mueblerías, así como aquellas empresas que no respondieron la encuesta. Asimismo, quedaron fuera del alcance del relevamiento otro tipo de residuos no lignocelulósicos de estas industrias, así como los residuos de la industria de la celulosa.

La revisión teórica de las propiedades fisicoquímicas se realizó teniendo en cuenta las principales especies que se industrializan en el país. No pretendió construir una caracterización sino una recopilación de algunas propiedades relevantes.

Los potenciales bioproductos fueron seleccionados considerando exclusivamente aquellos cuyo TRL (Technology Readiness Level), correspondían a avanzados niveles de madurez de la tecnología. Se hizo foco en los tres últimos niveles TRL 7 a TRL 9, que abordan las pruebas y validación de la tecnología en un entorno real, excluyendo los últimos desarrollos tecnológicos y productos que aún se encuentran en fases iniciales o

intermedias de investigación y desarrollo. Fue descartada como alternativa de valorización, la generación de energía eléctrica y/o térmica a partir de la quema de residuos.

5. METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos específicos se subdividió el trabajo en los siguientes módulos:

- Relevamiento de los residuos (Böthig, Arrejuria, & Delgado, 2021)
- Propiedades fisicoquímicas de las especies industrializadas en Uruguay (Bonfiglio & Böthig, 2021)
- Identificación y selección de potenciales bioproductos (Böthig, y otros, 2021)
- Estudio de viabilidad económica (Cagno, Martínez, & Böthig, 2021)

La metodología y los resultados de estos trabajos se presentan en informes independientes y se resumen a continuación.

5.1. Relevamiento de los residuos

El objetivo de esta etapa fue relevar cantidad, disponibilidad y tipos de residuos lignocelulósicos provenientes de la industria de transformación mecánica de la madera del país, enfocado en conocer la disponibilidad según distribución geográfica en el país.

La información fue recabada a través de consultas individuales. En el caso de la industria de aserrado, se contó con la base de datos de la “Encuesta de Aserraderos 2020” realizada por DGF, realizándose una consulta específica sobre los residuos a los aserraderos con un consumo superior a 1000 m³ anuales de madera (“Encuesta de Residuos de Aserraderos”), a la planta de contrachapados (“Encuesta de Residuos de Industria de Tableros Contrachapados”) y las plantas de astillado (“Encuesta de Residuos de Plantas de Astillado”). Dichas encuestas fueron diseñadas para conocer con profundidad los tipos y cantidad de residuos generados y sus destinos, así como previsiones e interés por parte de las empresas para implementar en el corto-mediano plazo proyectos de aprovechamiento de esos residuos. Se complementó la información recabada con una revisión de datos abiertos disponibles.

La información recabada a través de la encuesta de aserraderos y del relevamiento de residuos fue procesada y analizada en forma complementaria. Para este análisis se establecieron 3 clases de tamaño de empresa de acuerdo con los valores de consumo de madera anual:

Mayor a 50.000 m ³	Clase 1
Entre 4.000 y 50.000 m ³	Clase 2
Menor a 4.000 m ³	Clase 3

El consumo verde informado como volumen o como masa, fue convertido a peso anhidro tomando en cuenta el contenido de humedad en base húmeda (CHBH) de las trozas y peso específico aparente básico (PEAB), que es el cociente entre el peso anhidro y el volumen verde de una pieza. Asimismo, todas las unidades de las fracciones de residuos fueron convertidas a unidad másica en estado anhidro para realizar un balance de masa en las empresas. Para realizar dichas conversiones se realizó la distinción entre volumen sólido y volumen a granel.

A través de la capacidad máxima instalada de una industria y la eficiencia de conversión, se infirió la cantidad máxima potencial de generación de residuos. Adicionalmente, se tuvo en consideración nuevos proyectos de ampliación o diversificación que generen más residuos y los proyectos para aprovechamiento informados por los encuestados.

Se preguntó por el destino de las fracciones residuales solicitando datos comerciales, así como su visión sobre las restricciones para un mejor aprovechamiento de los residuos, como ser problemas logísticos (manipulación, almacenamiento y transporte) o tecnológicos asociados a maquinaria disponible.

Para analizar la disponibilidad de residuos para destinos alternativos se plantearon cuatro escenarios teóricos basados en hipótesis diferentes, calculándose la cantidad de biomasa disponible en base a los resultados de las encuestas de residuos.

Para cada escenario se calculó un factor de disponibilidad de residuos definido como la proporción de residuos disponibles en relación con los generados, estimados a través de la eficiencia de cada empresa encuestada.

La disponibilidad es inherente a cada empresa y está condicionado por aspectos empresariales (escala, capacidad de inversión, negociación y emprendedora) y geográficos: mercado local (ubicación de consumidores, precio pagado). En el entendido que varios aspectos empresariales mencionados pueden ser comunes a empresas de tamaños similares se determinó un valor promedio para cada clase. El factor de disponibilidad fue calculado en forma independiente para la corteza y para los residuos madereros, ya que su utilización responde a criterios totalmente independientes.

Para los aserraderos que quedaron fuera del alcance de esta encuesta o no la respondieron, se realizó una **extrapolación de estos escenarios**, asumiendo un factor de disponibilidad de acuerdo con su tamaño. Teniendo presente que esta extrapolación es realizada en un marco totalmente **teórico e hipotético de forma de realizar una estimación global**, o se espera que la disponibilidad estimada de esta forma coincida con la realidad de las empresas de forma individual.

Se ubicó geográficamente los aserraderos, asociando la información sobre la generación y disponibilidad de residuos, para conocer la distribución territorial de los mismos.

Se establecieron “micro-zonas” que pudieran proveer una cantidad de biomasa suficiente y en forma sostenida a una potencial industria de transformación desde una distancia no mayor a 50 km, de forma de ofrecer distintas alternativas de asociatividad, transacción o producción para las empresas cercanas.

5.2. Propiedades fisicoquímicas de las especies industrializadas en Uruguay

Se realizó una breve revisión bibliográfica de las características fisicoquímicas de la madera y la corteza de las especies procesadas en la industria, con el objetivo de complementar el estudio de disponibilidad y la caracterización de los residuos disponibles de acuerdo con los criterios definidos en (Bonfiglio & Böthig, 2021).

5.3. Identificación y selección de potenciales bioproductos

El objetivo en esta etapa fue elaborar un listado de posibles bioproductos y la selección de tres productos para realizar el estudio teórico de prefactibilidad técnico-económico de su producción a partir de residuos de la foresto industria en Uruguay. Se identificaron potenciales productos que pueden ser obtenidos a partir de

los diferentes tipos de residuo y especies, incluyendo desde productos “*commodities*” a productos de nicho (de baja escala con alto valor agregado) siguiendo la metodología explicada en (Böthig, y otros, 2021).

La revisión se realizó considerando los TRL (*Technology Readiness Level*) de los productos considerados, esto es el nivel de madurez de la tecnología. Las tecnologías emergentes representan una oportunidad significativa para la industria forestal al diversificar las posibilidades de que los aserraderos utilicen una mayor proporción de sus residuos u ofrezcan mejores retornos a los usos actuales. Sin embargo, los tiempos requeridos para desarrollo e implementación de la innovación y el alto riesgo asociado, dejan estas tecnologías fuera del alcance de este proyecto que buscó oportunidades en el corto plazo. Debido al carácter aplicado de este estudio no se considerarán productos cuyo desarrollo tecnológico esté aún en fases iniciales de investigación.

Se recabó información técnica de algunos productos o categorías de productos seleccionados que podrían considerarse para Uruguay, abarcando la tecnología de fabricación, TRL, requisitos de tamaño industrial, materia prima, necesidades de I+D y posibles restricciones. Se analizaron los potenciales mercados tanto a nivel local, como regional y mundial, especificaciones de calidad y precios actuales.

Luego de obtener una estimación de los residuos disponibles y factibles de utilizar y teniendo en cuenta a las premisas establecidas, se realizó una selección de tres bio-productos factibles de ser desarrollados en el corto plazo, a través de una consulta externa y un taller interno dentro la gobernanza del proyecto (Latitud y MIEM).

La consulta externa fue realizada a través de una encuesta en formato digital, distribuida individualmente a todos los encuestados. Fueron consultados referentes académicos del sector pertenecientes a diferentes áreas de la cadena forestal vinculadas al objetivo del trabajo: transformación energética, química, bioquímica y mecánica, con visión de las fases productivas forestal e industrial y de aspectos político-económicos. Se propuso recoger una perspectiva sobre la utilización de estos residuos, las oportunidades y restricciones asociadas, complementaria a la aportada por los empresarios en el relevamiento.

Por otro lado, en el taller interno se discutieron las alternativas de bioproductos, teniendo en consideración la factibilidad de producción y comercialización, o las limitaciones existentes, el potencial impacto a nivel nacional para el aprovechamiento de estos residuos y otros derrames.

Las tres visiones contribuyeron a la definición de los tres productos a estudiar.

5.4. Estudio de viabilidad económica

Esta fase se enfocó en la búsqueda de proveedores y profundización sobre las tecnologías seleccionadas para producir los Bioproductos, realizando una breve descripción del proceso, diagrama de flujo y equipamiento mínimo necesario.

Se realizó dimensionamiento y localización en base a una escala mínima de producción, identificando las inversiones necesarias y costos operativos.

Finalmente, se llevó a cabo un análisis de viabilidad económica financiero para las plantas industriales propuestas.

6. RESULTADOS

6.1. Relevamiento de los residuos

Los datos aquí presentados corresponden al año 2019 e involucran supuestos que fueron explicados en la metodología⁴.

6.1.1. Consumo de madera

Fue relevado un consumo de madera verde de 7.384.708 m³ (Tabla 1) equivalentes a 3.759.036 toneladas en base anhidra. La Tabla 1 muestra la distribución del consumo entre los sectores industriales encuestados y entre las fuentes de información; a su vez muestra la relación entre las clases.

TABLA 1. CONSUMO VERDE RESULTANTE DE LAS DOS ENCUESTAS CONSIDERADAS EN ESTE TRABAJO TOTALES Y POR CLASE EN M³/AÑO Y COMPARACIÓN DE CONSUMOS COMO PORCENTAJE DE ENCUESTA DE RESIDUOS SOBRE ENCUESTA DE ASERRADEROS.

Clase	Consumo verde (m ³ /año)		Relación (%)
	Encuesta aserraderos	Relevamiento residuos	
Aserraderos	Clase 1	856.680	100
	Clase 2	218.281	51
	Clase 3	74.166	46
Subtotal aserraderos		1.149.127	87
	Plantas tableros	-	n.a.
Subtotal aserraderos y tableros		1.149.127	137
	Plantas de astillado	-	n.a.
Total aserraderos, tableros y astillado		1.149.127	630
Total estimado DGF + tableros + astillado		7.384.708	643

El universo de empresas con consumo mayor a 1.000 m³ anuales está integrado por un total de 48 empresas que consumen el 99% de la materia prima. Sin embargo se encontró una distribución particular de las empresas, con 22 empresas que, con un consumo individual mayor a 4.000 m³/año, representan el 96% del sector relevado y un núcleo de 5 empresas que procesan el 83% de la madera. Desde el punto de vista del aprovechamiento del recurso, es fundamental el manejo de los residuos por parte de las empresas con alto consumo y alta producción de residuos. Se considera que las empresas de mayor tamaño tendrían mayor capacidad de gestionar por sí mismas el manejo de los residuos que generan y a su vez podrían actuar como empresas tractoras de una industrialización posterior de los mismos, consumiendo biomasa de sus vecinos, además de la propia. Desde el punto de vista del derrame en mayor número de empresas, es importante resolver la situación de las pequeñas, ya que un total de 26 empresas tienen consumos entre 1.000 y 4.000 m³ anuales.

⁴ Toda interpretación debe tener en consideración que los residuos producidos dependerán del volumen de producción y de la eficiencia de conversión que podrá variar de acuerdo con las características de los productos elaborados y la calidad de la materia prima procesada, entre otros factores.

6.1.2. Eficiencia de proceso

El volumen procesado y la eficiencia de conversión determinan la cantidad de residuos generados por cada empresa. Este parámetro depende de los productos elaborados, de la calidad de la materia prima procesada y de la tecnología de procesamiento, pudiendo variar en el tiempo de acuerdo a las oscilaciones en las variables mencionadas.

La eficiencia global de proceso corregida⁵ es 54,4% en promedio para los aserraderos tradicionales, y disminuye al aumentar el grado de procesamiento, siendo para los aserraderos con elaboración un 52,5% y un 40,1% para los que realizan remanufactura (Tabla 2).

TABLA 2. RESUMEN DE EFICIENCIA GLOBAL CORREGIDAS PARA LOS 74 ASERRADEROS RELEVADOS POR DGF⁶.

	Eficiencia aserradero portátil/tradicional	Eficiencia aserradero con elaboración	Eficiencia aserradero con remanufactura
Promedio sin outliers	54,4	52,5	40,1
s	5,4	8,3	10,5
Mín	45,0	38,1	32,7
Máx	63,5	65,6	47,5
n total	34	22	3
n depurado	27	17	2
No reporta	11	4	1
CV (%)	10	16	26

6.1.3. Residuos generados

A partir de las eficiencias de proceso se estimó una generación de residuos de 515.602 toneladas anuales anhidras por parte de 74 aserraderos (58%), la industria de tableros contrachapados (27%) y cuatro plantas de astillado (15%).

En la Tabla 3 se detallan los residuos según especie, estimados para la muestra abarcada por la encuesta de aserraderos y para la muestra correspondiente al relevamiento de residuos.

⁵ Estos valores fueron determinados luego de unificar unidades y eliminar valores evidentemente anómalos (Böthig, Arrejuria, & Delgado, 2021)

⁶ Mín=mínimo; Máx=máximo; n total=tamaño de muestra inicial; n depurado= tamaño de muestra luego de eliminar valores anómalos; s=desviación estándar; CV= coeficiente de variación.

TABLA 3. RESIDUOS ANHIDROS PRODUCIDOS POR ESPECIE, ESTIMADOS POR CONSUMO Y EFICIENCIA DE PROCESAMIENTO.

Especie	Residuos anhidros producidos (t/año)		Relación (%)
	Encuesta aserraderos	Relevamiento residuos	
<i>P. taeda</i>	86.198	164.584	191
<i>P. elliotii</i>	1.983	7.501	378
Mezcla <i>Pinus spp.</i> ⁷	108.370	99.481	92
<i>Eucalyptus grandis</i> ⁸	99.802	138.484	139
Eucalipto colorado	4.281	1.567	37
E. pulpables y energía ⁹	-	74.926	n.a.
Otras Spp. ¹⁰	821	410	50
Subtotal aserraderos	301.455	272.805	90
Subtotal aserraderos y tableros	301.455	412.027	137
Total aserraderos, tableros y astillado	301.455	486.953	162
Total estimado DGF + tableros + astillado		515.602	

El relevamiento de residuos abarcó una submuestra conformada por 29 aserraderos (que representan un 87% del consumo para aserrío de los datos de DGF) y 1 planta de tableros contrachapado estimándose un total de 412.027 toneladas anhidras de residuos. Además, participaron 4 plantas de astillado que reportaron producir 74.926 t/año de residuos. Sumando un total de 486.953 toneladas anhidras de residuos.

La Tabla 4 resume los reportes correspondientes a las diferentes fracciones, sumando un total de 402.165 toneladas anhidras anuales, con un apartamiento de un 2,4% por debajo del valor estimado.

TABLA 4. CANTIDAD DE RESIDUOS EN BASE ANHIDRA REPORTADOS POR TIPO, N° DE REPORTES Y N° DE EMPRESAS QUE CUANTIFICAN EL RESIDUO, PARA LAS 29 ASERRADEROS Y 1 EMPRESA DE CONTRACHAPADO ENCUESTADAS.

	Cantidad reportada (t/año)	N° de empresas que reportan residuo	N° de empresas que cuantifican residuo
Corteza	17.044	14	9
Costaneros	8.126	23	23
Aserrín verde	83.908	28	27
Viruta verde	109	8	3
Despunte verdes	4.282	17	14
Chips verdes	258.447	9	9
Aserrín seco	1.240	4	2
Viruta seca	8.604	8	6
Despunte secos	36	4	3
Chips secos	20.369	2	2

⁷ Refiere a *P. taeda* o *P. elliotii*, sin diferenciar especie por parte de las empresas.

⁸ Residuos de esta especie provenientes de aserraderos o planta de contrachapado sin considerar plantas de astillado

⁹ "E. pulpables y energía" incluye las especies *E. grandis* (22%), *E. dunnii* (22%), *E. globulus* (35%), *E. maidenii* (21%) y otras especies del género *Eucalyptus* sin especificar, que son chipeadas tanto para energía como para celulosa.

¹⁰ Incluye álamo, fresnos y algarrobos.

	Cantidad reportada (t/año)	N° de empresas que reportan residuo	N° de empresas que cuantifican residuo
Total	402.165		

Por su parte, las plantas de astillado generan 54.399 t anhidas de corteza y 20.527 t anhidas de pin chips.

6.1.4. Gestión de los residuos

Se detectó que la mayor parte de las empresas no cuantifican la biomasa residual con precisión, desconociendo algunas fracciones. Si bien esperan obtener valor a partir de ella la gestión interna de los residuos es pobre.

La mayoría de las empresas consultadas gestionan sus residuos de madera verde y seca en forma conjunta. Generalmente se obtienen grupos de residuos compuestos por mezclas de varios tipos y especies. Varias empresas declaran tener los residuos mezclados con corteza como principal contaminante. De ser necesario, para una industrialización posterior, las empresas deberán analizar la posibilidad de gestionar los residuos de forma independiente, teniendo en consideración que el grado de pureza estará determinado por dicho proceso.

Las condiciones de almacenamiento y la infraestructura en equipamiento de manipulación son aspectos importantes para que el recurso llegue en óptimas condiciones a un posterior aprovechamiento. La principal forma de almacenamiento de la corteza, costaneros y despuntes verdes es a la intemperie, observándose degradación en varios casos. Los chips verdes se almacenan tanto en silos como a la intemperie, pero tienen rotaciones mucho más altas y menores tiempos de acopio. Por otro lado, los residuos secos tienen menores tiempos de acopio respecto a los residuos verdes y son mayormente resguardados bajo techo o en silos.

En base a la información presentada por dichas empresas, en la Figura 1 se visualizan los diferentes mecanismos de disposición actuales de los residuos. Aproximadamente la mitad de los residuos es consumida internamente, mientras que un 44,6% es vendido, un 0,4% es donado y apenas un 3,8% permanece sin valorizar. Ese remanente se puede desglosar en material que es acopiado (54,3%), quemado (16,6%) o llevado a vertedero (12,3%), restando un 16,8% que no es valorizado pero no se reporta su destino.

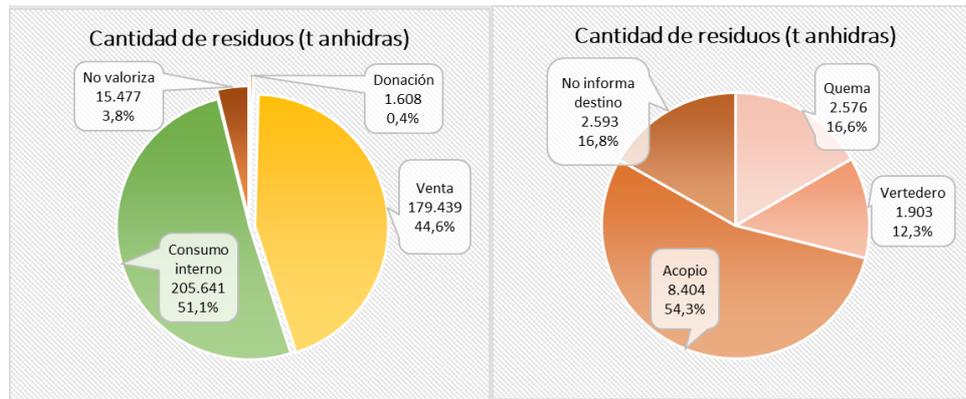


FIGURA 1. MECANISMO DE DISPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS GENERADOS CUANTIFICADOS POR LOS 29 ASERRADEROS RELEVADOS Y 1 PLANTA DE TABLEROS CONTRACHAPADOS. IZQUIERDA: TODOS LOS RESIDUOS. DERECHA: DESGLOSE DE RESIDUOS NO VALORIZADOS.

Por parte de las plantas de astillado, del total de residuos generados 56% son consumidos internamente, 39% son vendidos mientras que un 5% es enviado a vertedero.

En la Tabla 5 se muestran todos los destinos internos o externos para los residuos reportados por las empresas, agrupados como “Corteza”, “Despuntes, costaneros y chips”, y “Aserrín y viruta” y son resumidos en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

En el año 2019, para los aserraderos y planta de tableros relevados el mayor destino para los diferentes grupos de residuos es la generación de energía eléctrica, para ser consumida tanto interna como externamente, con valores de 180.755 t anhidras y 133.647 t anhidras, respectivamente, sumando un total de 314.403 toneladas anhidras (78,2% del total de residuos). El segundo destino es la venta de chips para celulosa (9,1%), seguido de energía térmica (6,3%) con un consumo mayormente interno, mientras que, el resto de los destinos asciende en conjunto a un total de 2,5%, quedando una fracción remanente sin valorizar de 3,8%.

TABLA 5. DESTINOS EXTERNOS E INTERNOS DE LOS RESIDUOS EN TONELADAS ANHIDRAS ANUALES Y FRACCIÓN SOBRE EL RESIDUO GENERADO DEL USO DE CADA GRUPO DE RESIDUO, PARA LOS 29 ASERRADEROS Y 1 PLANTA DE TABLEROS CONTRACHAPADOS.

Destinos		Subtotal corteza		Subtotal costaneros, despuntes y chips		Subtotal aserrín y viruta		Total (t/año)	Total Externo + Interno (t/año)
		(t/año)	(%)	(t/año)	(%)	(t/año)	(%)		
Energía eléctrica	Internos	4.367	25,6	152.327	52,3	24.062	25,6	180.755	314.403
	Externos	11.413	67,0	67.812	23,3	54.422	58,0	133.647	
Celulosa	Externos	-	-	36.667	12,6	-	-	36.667	36.667
Energía térmica	Internos	-	-	18.208	6,3	5.608	6,0	23.815	25.452
	Externos	-	-	1.589	0,5	47	0,1	1.636	
Leña	Internos	-	-	149	0,1	-	-	149	3.418
	Externos	-	-	3.239	1,1	31	0,0	3.270	
Ladrilleros	Externos	23	0,1	1.010	0,3	846	0,9	1.879	1.879

Destinos		Subtotal corteza		Subtotal costaneros, despuntes y chips		Subtotal aserrín y viruta		Total	Total Externo + Interno
		(t/año)	(%)	(t/año)	(%)	(t/año)	(%)		
Cama de animales	Externos	-	-	-	-	1.560	1,7	1.560	1.560
Embalaje	Externos	-	-	1.315	0,5	-	-	1.315	1.315
Mejora suelo y compost	Internos	922	5,4	-	-	-	-	922	963
	Externos	-	-	-	-	42	0,0	42	
Construcción	Externos	-	-	606	0,2	-	-	606	606
Pellets	Externos	-	-	-	-	211	0,2	211	211
Destino sin especificar	Externos	-	-	114	0,0	-	-	114	114
Talleres mecánicos	Externos	-	-	-	-	53	0,1	53	53
Briquetas	Externos	-	-	-	-	47	0,1	47	47
Sin destino		318	1,9	8.226	2,8	6.932	7,4	15.477	15.477

La biomasa generada por las industrias forestales de mayor porte tiene como destino principal la producción de bioenergía. La generación de energía eléctrica a partir de biomasa es un proceso cuya rentabilidad está disminuyendo dado el gran éxito de las políticas energéticas solares y eólicas, con menores costos que los que puede producir el sector forestal (Dirección de Planificación de la Oficina de Planeamiento y Presupuesto, 2018) y a la creciente energía producida a partir de biomasa de la industria de la celulosa. El motor clave de la producción de energía a partir de biomasa han sido las políticas de diversificación de la matriz energética y de mitigación de cambio climático, en un camino a la independización de los combustibles fósiles y su sustitución por otros que produzcan bajas emisiones de gases de efecto invernadero.

La diversificación de los destinos permitiría enfrentar los cambios en la demanda de energía a partir de la biomasa y contribuir a una descarbonización de otros sectores de la economía. Existe además una menor porción de residuos generados por las empresas más pequeñas que no tiene un destino que le sume valor agregado. El desafío está en avanzar hacia bioproductos de mayor agregado de valor a partir de los residuos.

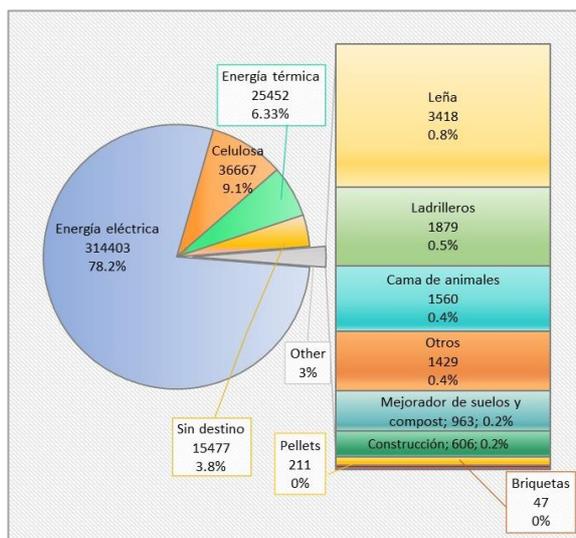


FIGURA 2. DISTRIBUCIÓN DE USOS FINALES DE BIOMASA RESIDUAL EXPRESADOS EN T/AÑO Y COMO PORCENTAJE DE LOS RESIDUOS GENERADOS POR LOS 29 ASERRADEROS Y UNA PLANTA DE CONTRACHAPADO.

En cuanto a las plantas de astillado, la corteza es aprovechada internamente como mejorador de suelos (89%), vendida para energía térmica (8%) y lo restante es enviado a vertedero (3%). Los pin chips se venden con destino a energía térmica (91%) y feed lots (9%).

6.1.5. Disponibilidad de los residuos

Teniendo en cuenta posibles dinámicas en el mercado de este recurso, se estudiaron diferentes escenarios de disponibilidad de los residuos como materia prima para un desarrollo industrial. Los escenarios fueron calculados para la submuestra del relevamiento de residuos y extrapolados al resto de los aserraderos encuestados por DGF. Se calculó un factor de disponibilidad relativo a la cantidad de residuos generados para cada empresa y se consideraron valores promedio por cada clase para ser aplicados en la extrapolación a la muestra ampliada.

Escenario 1

Este escenario supone disponibles los residuos generados en la planta industrial en el año 2019 que no son valorizados, los donados y los que se venden para usos de poco valor o poco estables como por ejemplo leña, camas de animales o ladrilleros. Esta definición comprende los residuos que no son valorizados internamente, los que no son vendidos para celulosa o con fin energético industrial (energía térmica, eléctrica, pellets, briquetas) y los que no son destinados a mejoramiento de suelos.

Esta hipótesis lleva a considerar 46.165 toneladas anuales de residuos madereros y 4.825 toneladas anuales de corteza contabilizadas en base anhidra, disponibles para otro destino.

Escenario 2

Una segunda hipótesis se plantea teniendo en cuenta la incertidumbre asociada a los futuros contratos de provisión de energía eléctrica al Sistema Interconectado Nacional (S.I.N.) manifestada por los encuestados, en un contexto regional en el que los costes de generación de energía eléctrica a partir de la energía eólica y solar fotovoltaica disminuyen año a año en comparación a la biomasa (IRENA, 2021) y teniendo presente la instalación de una nueva planta de celulosa (UPM) que suministrará una potencia de más de 150 MW a la red de energía eléctrica (MIEM, 2021).

Este escenario considera disponible la biomasa del Escenario 1 a la que se le agregan los residuos equivalentes al excedente de energía que las empresas con planta de cogeneración vierten a la red eléctrica de UTE, así como los residuos que son vendidos para la generación de energía eléctrica. Asimismo, considera los aumentos de generación de residuos por ampliaciones planificadas e informadas por algunos encuestados y descuenta los proyectos de aprovechamiento en proceso de implementación, para el período 2020 a 2022.

Este escenario resulta en una disponibilidad de 227.653 toneladas anhidras de residuos madereros y 22.469 toneladas de corteza anuales.

Escenario 3

Una tercera hipótesis mantiene la disponibilidad de residuos madereros del Escenario 2 y aumenta la disponibilidad a través de una mayor recuperación de la corteza. Se asume una recuperación promedio del 50% de la corteza en planta industrial a través de cambios en el proceso, como el descortezado previo en los aserraderos, y una extracción del 30% promedio de la corteza remanente en el campo. La viabilidad de este escenario depende de factores de sostenibilidad y de los esquemas de Gestión Forestal Sostenible FSC y PEF según se afirma en (PROBIO, 2013). De esta manera aumenta la disponibilidad anual de la corteza a 45.857 toneladas en base anhidra.

Escenario 4

Una cuarta alternativa planteada involucra las hipótesis del escenario 3 con la operación de todos los establecimientos productivos al máximo de su capacidad¹¹ generando 318.872 toneladas en base anhidra. De esta manera estarían disponibles 268.630 toneladas anhidras de madera y 50.242 toneladas anhidras de corteza anuales.

La Tabla 6 resume las cantidades generadas en el año relevado, las estimadas a máxima capacidad teniendo en consideración los nuevos proyectos reportados por los encuestados y las disponibles según las cuatro hipótesis planteadas.

¹¹ En los casos en que las empresas no informaron su máxima capacidad de operación, y no se dispone de este valor por otra fuente, se asumió la producción actual como la máxima (criterio conservador).

TABLA 6. DISPONIBILIDAD DE RESIDUOS EN BASE ANHIDRA PARA LOS PRINCIPALES GÉNEROS, SEPARADOS SEGÚN MADERA O CORTEZA, CORRESPONDIENTE A LOS CUATRO ESCENARIOS PROPUESTOS Y EXTRAPOLADA A LA MUESTRA AMPLIADA DE ESTE ESTUDIO

	<i>Eucalyptus spp.</i> (t/año)	<i>Pinus spp.</i> (t/año)	Madera total (t/año)	Corteza (t/año)	Total
Escenario 1	22.228	23.519	46.165	4.825	50.989
Escenario 2	33.309	196.257	227.653	22.469	250.121
Escenario 3	33.309	196.257	227.653	45.857	273.510
Escenario 4	47.744	220.886	268.630	50.242	318.872
Total generados 2019	170.001	250.288	420.960	94.643	515.602
Total máxima capacidad	212.684	394.724	609.182	116.671	725.854

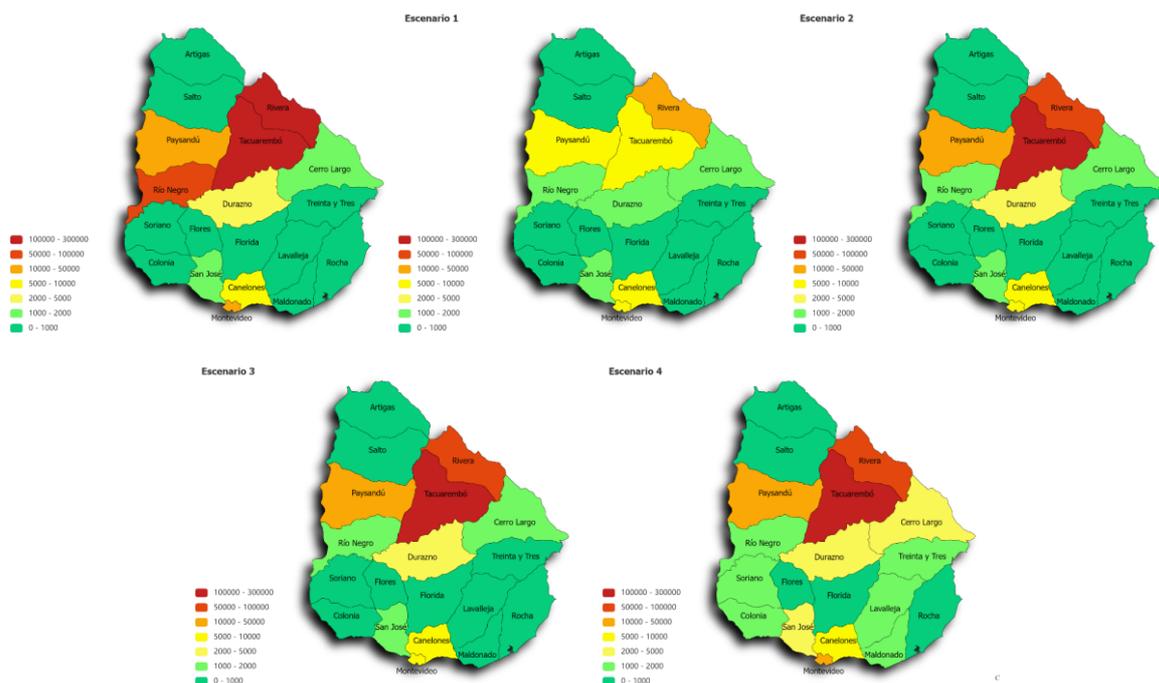


FIGURA 3. MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE LOS RESIDUOS GENERADOS EN 2019, EN BASE ANHIDRA .

Si bien este trabajo no pretende ser un estudio de prospectiva, es posible pensar que la tendencia del sector se aproxime a la planteada en el Escenario 2. Se estima que la disponibilidad de los residuos se ubicaría entre los valores del Escenario 1 y el Escenario 2, esperándose que la tendencia en la variación de la disponibilidad de esta biomasa se aproxime al Escenario 2, teniendo en consideración el contexto del mercado energético, las ampliaciones productivas y los nuevos emprendimientos que ya se están generando.

Se considera al Escenario 4 como el horizonte más ambicioso de todos con relación a las expectativas de disponibilidad del recurso, optimista desde el punto de vista del crecimiento del sector y de la recuperación de biomasa.

La Tabla 7 presenta los datos de distribución departamental de los residuos generados y disponibles según el Escenario 2, mostrándose en forma gráfica la distribución para los cuatro escenarios en la Figura 3.

TABLA 7. RESUMEN DE DATOS DE GENERACIÓN Y ESTIMACIÓN DE DISPONIBILIDAD POR DEPARTAMENTO PARA EL ESCENARIO 2, EXPRESADAS EN TONELADAS EN BASE ANHIDRA.

Departamento	Total generados (t/año)	Total generados 2019 ampliado (t/año)	Escenario 2 (t/año)				
			Madera <i>Eucalyptus</i> spp.	Madera <i>Pinus</i> spp.	Madera total	Corteza	Total
Canelones	9.034	9.034	5.271	939	6.210	47	6.257
Cerro Largo	1.634	1.634	1.394	144	1.538	4	1.543
Colonia	472	472	251	143	394	13	407
Durazno	2.852	2.852	703	1.401	2.104	4	2.109
Lavalleja	189	189	158	-	158	5	164
Maldonado	155	155	-	130	130	4	134
Montevideo	14.248	14.248	6.859	-	2.691	4.226	6.917
Paysandú	37.954	37.954	2.401	20.437	23.144	190	23.333
Río Negro	65.000	65.000	-	-	1.950	-	1.950
Rivera	169.061	206.237	7.417	61.585	69.001	266	69.267
Salto	-	-	-	-	-	-	-
San José	1.539	1.539	478	716	1.194	9	1.203
Soriano	187	187	156	-	156	5	162
Tacuarembó	212.865	314.421	7.895	110.763	118.658	17.663	136.321
Treinta y Tres	412	412	324	-	324	30	355
Total	515.602	654.335	33.309	196.257	227.653	22.469	250.121

Micro-zonas

La biomasa disponible fue geolocalizada, definiéndose micro-zonas conformadas por empresas que sumen una oferta de biomasa de al menos 1.000 toneladas anhidras anuales y concentradas en una región donde la distancia a recorrer por la materia prima no supere los 50 km.

En las Figura 4 y Figura 5 se representan gráficamente como círculos las microzonas configuradas para los Escenarios 1 y 2 respectivamente, siendo el diámetro proporcional a la distancia máxima a la empresa tractora (centro de la micro-zona). Las micro-zonas conformadas por una única empresa se muestran como un punto, con distancia nula al centro de la micro-zona.

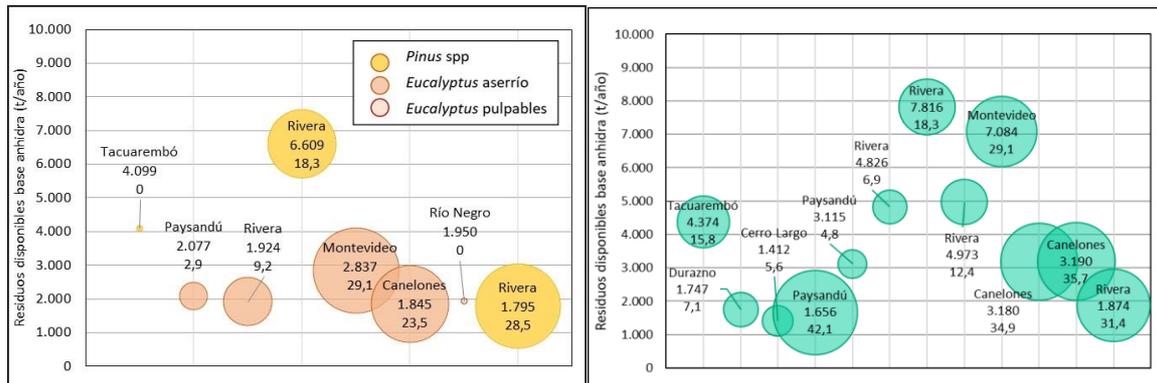


FIGURA 4. MICRO-ZONAS DE BIOMASA DISPONIBLE SEGÚN ESCENARIO 1. A LA IZQUIERDA: MICROZONAS QUE OFRECEN BIOMASA DE UNA ESPECIE O GÉNERO; A LA DERECHA: MICROZONAS QUE OFRECEN MEZCLA DE GÉNEROS. LAS ETIQUETAS DE LAS BURBUJAS MUESTRAN LA UBICACIÓN DEL CENTRO, LA CANTIDAD DISPONIBLE (T/AÑO) Y LA DISTANCIA DE LA EMPRESA MÁS DISTANTE AL CENTRO DE LA MICRO-ZONA (KM).

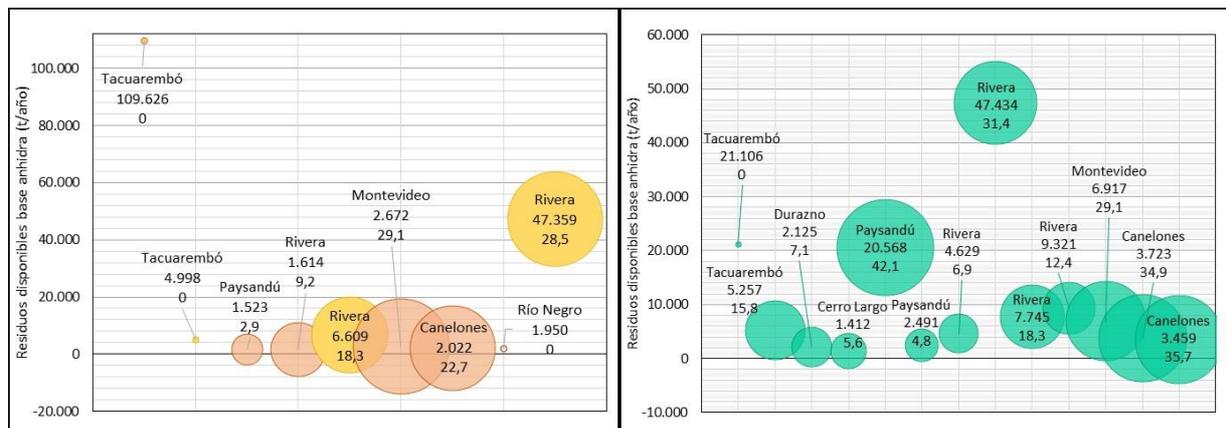


FIGURA 5. MICRO-ZONAS DE BIOMASA DISPONIBLE SEGÚN ESCENARIO 2. A LA IZQUIERDA: MICROZONAS QUE OFRECEN BIOMASA DE UNA ESPECIE O GÉNERO; A LA DERECHA: MICROZONAS QUE OFRECEN MEZCLA DE GÉNEROS. LAS ETIQUETAS DE LAS BURBUJAS MUESTRAN LA UBICACIÓN DEL CENTRO, LA CANTIDAD DISPONIBLE (T/AÑO) Y LA DISTANCIA DE LA EMPRESA MÁS DISTANTE AL CENTRO DE LA MICRO-ZONA (KM).

La Figura 5 presenta las micro-zonas conformadas para el Escenario 2. Ocho micro-zonas con disponibilidad anual de residuos mayor a 1.000 t anhidras podrían abastecer a una planta con una sola especie o género: tres micro-zonas abastecerían pino (dos ubicadas en Tacuarembó y una en Rivera), cuatro proveerían *E. grandis* (Paysandú, Rivera, Montevideo y Canelones) y una *E. pulpables* (Río Negro). Se destaca una de ellas ubicada en Tacuarembó, con disponibilidad de 98.262 t anhidras de madera y 11.364 t anhidras de corteza de *Pinus spp.* (109.626 t en total).

Le siguen micro-zonas con menor proporción de residuos disponibles, por ejemplo, en Rivera 6.609 t anhidras o en Tacuarembó con 4.998 toneladas anhidras, ambas de mezcla de *Pinus spp.*

En este modelo de disponibilidad las micro-zonas de *Eucalyptus spp.* no superan los 2.672 t anhidras.

Bajo las mismas hipótesis, fueron configuradas 13 micro-zonas abasteciendo con mezcla de especies, distribuidas en los departamentos de Tacuarembó, Paysandú, Rivera, Montevideo, Canelones, Durazno y Cerro Largo. En este caso, existen tres micro-zonas relevantes correspondientes a los departamentos de

Tacuarembó, Paysandú y Rivera con cantidades de madera disponible de 21.106, 20.568 y 47.434 t anhidras, respectivamente.

Las micro-zonas configuradas son el producto de algunas combinaciones de posibles proveedores cercanos con las premisas ya explicadas, no siendo las únicas posibles. Por ejemplo, las empresas que consumen más de una especie fueron asignadas como proveedoras de mezcla, aunque pudieran clasificar y abastecer de a una especie por separado. Por otra parte, para cada condición, cada empresa fue asignada a una sola micro-zona, aunque por distancia pudiera pertenecer a diferentes grupos.

Se debe tener en cuenta que estos escenarios son teóricos y producto de una extrapolación, siendo afectados por cambios del contexto, decisiones empresariales no informadas en este relevamiento, así como el funcionamiento de la nueva planta de celulosa en Durazno, que en un futuro podría alterar la cantidad de residuos disponibles en esa zona.

Antes de decidir una potencial localización industrial será necesario un análisis localizado más profundo para la zona de interés, en relación con la generación, destinos y perspectivas.

6.2. Propiedades fisicoquímicas de las especies industrializadas en Uruguay

A continuación, se presenta una breve compilación de información recabada sobre las propiedades de la madera y de la corteza de las principales especies mencionadas.

La biomasa lignocelulósica se compone principalmente de celulosa, hemicelulosa y lignina, que están estrechamente interrelacionadas, formando una compleja y rígida estructura. Contiene otros componentes minoritarios, como extractivos y compuestos inorgánicos (determinados experimentalmente como las cenizas remanentes de la combustión).

En base a la revisión bibliográfica realizada (Bonfiglio & Böthig, 2021), si bien existen algunas diferencias en los valores entre autores, en general existe consenso que las gimnospermas o coníferas, (*Pinus spp.*) poseen mayor contenido de hemicelulosas que las angiospermas o latifoliadas (*Eucalyptus spp.*), mientras que la lignina es mayor en las especies de *Eucalyptus* que en las de *Pinus* (Mussatto, 2016) (Sixta, 2006). En la Figura 6 se puede observar comparativamente estos aspectos y rangos de variación encontrados, según algunos de los estudios evaluados.

El principal componente hemicelulósico es el xilano, un polímero de xilosa con diferentes ramificaciones como ácido acético y otros azúcares, siendo el ácido metilglucurónico una ramificación particularmente presente en *Eucalyptus* (Sixta, 2006). Para las coníferas la presencia de manano como hemicelulosa puede ser considerable.

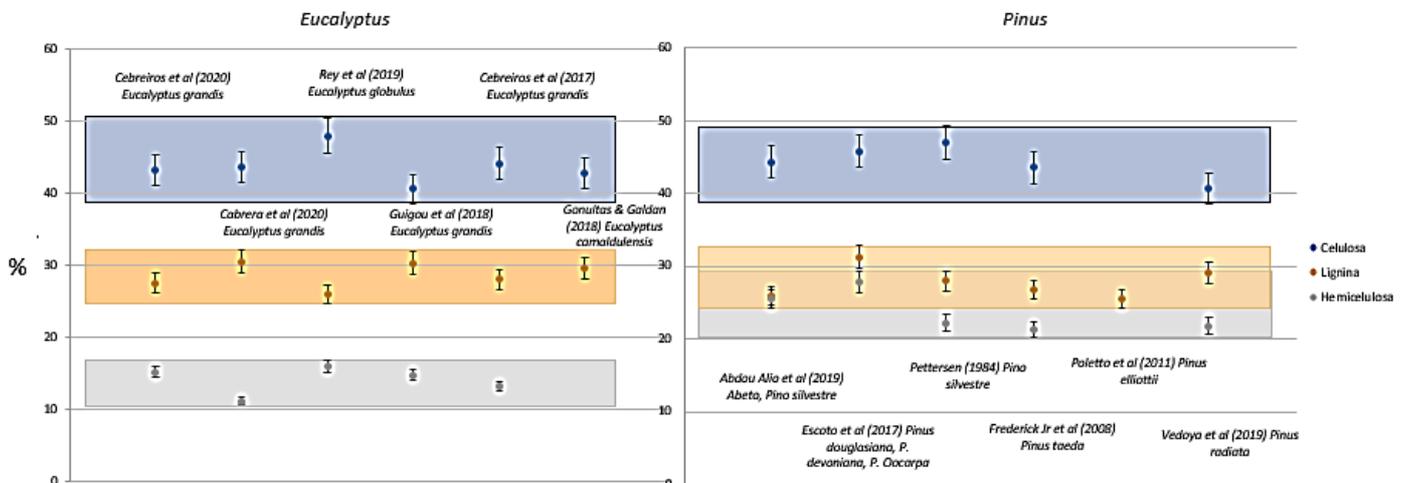


FIGURA 6. COMPARATIVO DE CELULOSA-HEMICELULOSA-LIGNINA GENERAL SEGÚN BIOGRAFÍA SEPARADA POR ESPECIES *EUCALYPTUS* (IZQUIERDA) Y *PINUS* (DERECHA).

Las unidades repetitivas de las que está compuesta la lignina difieren entre *Pinus* sp. y *Eucalyptus* sp.. Mientras que la lignina de *Eucalyptus* está compuesta por unidades G y S, la lignina de *Pinus* está compuesta principalmente por unidades G, lo que puede introducir variantes al momento de aprovechar la lignina dependiendo de su origen (Sixta, 2006) (Mussatto, 2016).

En el caso de la corteza, se mantiene la tendencia de mayor hemicelulosa para *Pinus*, aunque esta diferencia se ve reducida y es más notable la mayor presencia de extractivos para *Pinus* y aumento de cenizas tanto para *Eucalyptus* como para *Pinus*.

Respecto a la lignina en corteza en general es menor a mayor altura del fuste, de la misma manera que la celulosa, lo que hace suponer mayor porcentaje de hemicelulosa a mayor altura.

Los valores de densidad básica promedios encontrados para especies cultivados en Uruguay de *Pinus* spp. (0,429 g/cm³) y *E. grandis* (0,431-0,441 g/cm³) fueron similares; hallándose mayores valores para *E. globulus* (0,534 g/cm³) y para *E. dunnii* (0,499 g/cm³); *Eucalyptus tereticornis* (colorados) ha sido reportado con una densidad promedio mayor que todas las analizadas, con una densidad de 0,680 g/cm³. (Bragatto, 2010) (Cebreiros, Guigou, & Cabrera, 2017) (Doldán & Böthig, 2002) (Doldán, Fariña, & Tarigo, 2008) (Guigou, y otros, 2018) (Leschinsky, Sixta, & Patt, 2009) (Reina, Influencia de la composición química de la madera de *Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus globulus* en los parámetros de pulpeo Kraft, 2010) (Reina, Botto, Mantero, Moyna, & Menéndez, 2016) (Resquín, Fariña, Rachid, Rava, & Doldán, 2012) (Tarigo, 2020) (datos propios sin publicar).

Respecto al poder calorífico, dentro de las muestras estudiadas el valor promedio del *Pinus taeda* fue reportado como el mayor (20319 J/g), seguido por el *Eucalyptus globulus* (19473 J/g) y por último por el *E. grandis* (14753 J/g). Sin embargo, al comparar *Eucalyptus* spp. vs *Pinus* spp., el poder calorífico promedio de *Pinus* spp. (15031 J/g) es inferior al de *Eucalyptus* spp (16188 J/g) (Bragatto, 2010) (Cebreiros, Guigou, & Cabrera, 2017) (Doldán & Böthig, 2002) (Doldán, Fariña, & Tarigo, 2008) (Guigou, y otros, 2018) (Leschinsky, Sixta, & Patt, 2009) (Reina, Influencia de la composición química de la madera de *Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus globulus* en los parámetros de pulpeo Kraft, 2010) (Reina, Botto, Mantero, Moyna, & Menéndez, 2016) (Resquín, Fariña, Rachid, Rava, & Doldán, 2012) (Tarigo, 2020) (datos propios sin publicar).

Para la evaluación de factibilidad de algunos procesos en particular puede ser necesario la determinación de algunas propiedades o componentes específicos adicionales a las propiedades resumidas en este trabajo.

6.3. Identificación de potenciales bioproductos

En el informe “Identificación de potenciales bioproductos” (Böthig, y otros, 2021) se presenta una recopilación bibliográfica, incluyendo una descripción, aplicaciones, producto al que sustituye y su proceso productivo considerando la materia prima requerida. Presenta el TRL (grado de desarrollo tecnológico) encontrado y describe también requerimientos de investigación necesarios y barreras o desafíos para la innovación. Además, incorpora datos de mercado internacional y regional.

En la Tabla 8 se resume el listado de bioproductos sobre los cuales se realizó la revisión bibliográfica. Se presenta un resumen descriptivo enumerando principales aplicaciones, palabras clave indicativas del proceso productivo, listándose también barreras y desafíos para su implantación. Asimismo se presentan datos de consumo de biomasa y producción, correspondientes a la menor capacidad industrial encontrada en este trabajo. Estos datos pretenden proporcionar una idea de tamaño industrial requerida para cada producto y cantidad de materia prima requerida.

TABLA 8. LISTADO DE BIOPRODUCTOS CONSIDERADOS (BÖTHIG, Y OTROS, IDENTIFICACIÓN DE POTENCIALES BIOPRODUCTOS. PROYECTO DE VALORIZACIÓN DE SUBPRODUCTOS DE LA INDUSTRIA DE TRANSFORMACIÓN MECÁNICA DE LA MADERA.

Producto	Descripción y aplicación	Palabras clave de proceso productivo	Barreras o desafíos	Menor capacidad encontrada	
				Consumo (t/año)	Producción (t/año)
Etanol	Alcohol etílico con aplicaciones como desinfectante, solvente y materia prima. Industria química, alimentaria y bebidas. Combustible líquido	Pretratamiento, Celulosa, Fermentación	Económicas, alto gasto energético en proceso, costo de capital	100.000	7,9 ¹²
Ácido acético	Ácido orgánico débil con aplicaciones alimentarias e industria química	Pretratamiento, extracción líquido-líquido	Económicas, alto gasto energético	Sin Dato	Sin Dato
Furfural	Aldehído, producto de deshidratación de la xilosa - Adhesivos, saborizante, precursor químico	Pretratamiento, Hemicelulosa, deshidratación con sulfúrico como catalizador, extracción	Alto uso de solvente para recuperación, costo alto, bajo rendimiento	17.000	1.500
Ácido Láctico / poli láctico	Él Ac. Láctico es un ácido orgánico de 3 carbonos y un hidroxilo. <i>Building block</i> . Aplicación en Industria química, cosmética, alimentaria y farmacéutica Polimeriza para formar PLA: plástico biodegradable	Pretratamiento, celulosa, fermentación, purificación, polimerización	Rentabilidad, desarrollo de enzimas más eficientes, Integrar el proceso con otros subproductos	1.000	100 (ácido láctico)
Butanol	Alcohol. Solvente y materia prima para producción de plásticos, resinas para pinturas y acetato de butilo. Combustible líquido de alto poder calorífico	Pretratamiento, Celulosa, Fermentaciones ABE, IBE	Bajo rendimiento de producción y alta toxicidad del biobutanol a microorganismos. Inhibición por productos de hidrólisis	400.000	26.800
Ácido succínico	<i>Building block</i> en la síntesis de diferentes productos de valor y químicos especiales. Aplicaciones en Ind. alimentaria, farmacéutica y química	Pretratamiento, celulosa, Fermentación anaeróbica	Baja competitividad frente al Ác. succínico de origen fósil	4890	2000
Ácido levulínico	Ácido carboxílico producto de descomposición de hexosas. <i>Building block</i> para industria química	Pretratamiento, celulosa, Hidrólisis catalizada por ácidos	Costo de producción muy alto	20.000	2.800
Ácido Fórmico	Ácido orgánico fuerte. Industria alimentaria animal, conservación del forraje, curtido de cuero, prevenir formación hielo	Pretratamiento, Celulosa, subproducto levulínico	Costo de producción muy alto	Sin Dato	20.000 (no mínima)
Xilitol	Polialcohol de cinco átomos de carbono. Edulcorante, goma de mascar, Ind. alimentaria, farmacéutica, cuidado personal	Pretratamiento, Hemicelulosa, fermentación, purificación, cristalización	Integración con otros subproductos para mejorar rentabilidad	14.000	2.000
Sorbitol	Poliol lineal, de 6 carbonos y 6 grupos hidroxilos. Edulcorante, espesante, humectante y estabilizante. Industria alimentaria, farmacéutica, cosmético, cuidado personal	Pretratamiento, celulosa, hidrogenación, purificación, cristalización	Integración con otros subproductos para mejorar rentabilidad. Desarrollar proceso continuo.	177.000	36.000
PHA	Polímeros con una estructura general común y distintos largos de cadena. Plásticos biodegradables	Pretratamiento, Fermentación bacteriana (producto de reserva)	Bajo precio derivados del petróleo, Alto costo de extracción, costo alto de producción	Sin Dato	Sin Dato

¹² Datos de Producción y consumo de mínima corresponden a emprendimientos y fuentes diferentes

Producto	Descripción y aplicación	Palabras clave de proceso productivo	Barreras o desafíos	Menor capacidad encontrada	
				Consumo (t/año)	Producción (t/año)
Bio-Oil	Mezcla líquida de compuestos orgánicos (alcanos, aromáticos y fenólicos, producto de proceso termoquímicos. Combustible líquido , puede ser materia prima para otros	Chipeado o molienda, secado, pirólisis rápida o HTL (Licuefacción Hidrotérmica)	Mayor costo que combustible fósil. Incompatibilidad con combustibles convencionales. Escalado. Problemas de Salud y Seguridad Ambiental, Normalización. Mejorar difusión e imagen	4000	3.600
Biochar	Sólido con alto contenido de carbono producido a partir de la pirólisis. Mejorador de suelos , descontaminación, purificación, complemento alimenticio ganado, combustible sólido, materia para carbón activado	Chipeado o molienda, secado, pirolisis lenta	Económica. Gran inversión de capital	3.600	1.512
		Chipeado o molienda, secado, pirolisis con microondas	Oportunidad plantas modulares. Ajustar proceso según aplicación	1.250 (paja de trigo)	300 (pirólisis microondas)
Carbón vegetal	Combustible sólido	Pirólisis lenta- tecnología nueva: Pirolisis con microondas (Advanced Environmental Technologies)	Tecnificación, industrialización, sistemas continuos, falta competitividad con otros países	Sin Dato	Desde artesanal a industrial
Ácido piroleñoso	Solución acuosa de condensado de los gases de pirólisis, Herbicida, pesticida e insecticida, antimicrobiano, nutriente para plantas, usos para salud ; aditivos alimentario humano y alimentación animal.	Pirólisis lenta	Sólo puede ser económica si se integra en aserraderos o se combina con la producción de otros productos de pirólisis, como pellets de madera.	35.000	Sin Dato
		Pirólisis con microondas (Advanced Environmental Technologies)		1250	360
Carbón Activado	Adsorbente carbonoso de alta capacidad. Uso en purificación de agua potable, subterránea y residual; descontaminación de gases y aire. Recuperación metales preciosos. Industria alimenticia	Pirólisis y activación física. Activación química. Microondas	Altos requerimientos de capital, costo energético. Oportunidad tecnologías modulares, estudio microondas,	150.000 (carbón activado y biochar)	22.500
				10.000 (cascara de nuez, s/dato humedad)	2.100
Pellets	Biocombustible sólido, uso doméstico e industrial	Molienda, secado, pelletizado	Costos secado, energía eléctrica, transporte, baja competitividad	7.200	7.200 ¹³

¹³ A través del Relevamiento de Residuos del Sector de Transformación Mecánica de la Madera, se han detectado proyectos industriales de esta capacidad y menores, de las que no se cuenta con información cuantitativa

Producto	Descripción y aplicación	Palabras clave de proceso productivo	Barreras o desafíos	Menor capacidad encontrada	
				Consumo (t/año)	Producción (t/año)
Taninos	Polifenoles de alto peso molecular. Agentes de clarificación; aditivos plastificantes. Curtido del cuero; Teñido de fibras naturales. Aditivos en alimentos; Aplic.médicas, farmacéuticas y veterinarias. Adhesivos madera.	Extracción	Sin Dato	Sin Dato	Sin Dato
Hongos comestibles	Fructificación de hongos cultivados para alimentación. Fuente de compuestos bioactivos	Fermentación sólida	Mercado nacional pequeño. Falta proveedores de "semilla".	Sin Dato	Sin Dato
Proteína unicelular (SCP)	Proteína microbiana, células o proteínas extraídas de levaduras, hongos, bacterias o algas. Alimentación animal y humana;	Fermentación sumergida y fermentación sólida	Reducir costos de producción, mejora de calidad del producto , alta inversión en infraestructura	Sin Dato	10.000
WPC	Material compuesto a partir de madera y plásticos. Aplicaciones en la construcción, pisos, pasarelas, terminaciones exterior, muebles	Molienda, secado, mezclado, extrusión, acabado	Temperatura de procesamiento. Compatibilidad entre la superficie de las fibras de madera y los materiales plásticos.	307 (base anhidra)	480
Cemento-madera	Placas compuestas por cemento y madera en diferentes formas: partículas (CBPB) lana (WWCB), viruta o hebras (WSCB) o fibras (FCB). Uso en construcción como revestimiento, para interiores o fachadas pisos, cielorrasos y techos	Molienda, mezclado, formación, secado y finalización	Crear producto competitivo en el mercado interno. Evaluar LCA	13.500 (CBPB, no es mínima)	47.700 (CBPB, no es mínima)

Los datos de esta planilla son orientativos, y deben ser considerados solamente como un insumo para el análisis, especialmente los datos de mínima capacidad

Puede existir información más actualizada y profunda. Las citas bibliográficas se encuentran en los ítems correspondientes del documento que dio origen a esta tabla.

La Figura 7 refleja la opinión de los técnicos externos consultado, combinando su percepción sobre la factibilidad de producir a nivel nacional los bioproductos mencionados con la prioridad otorgada.

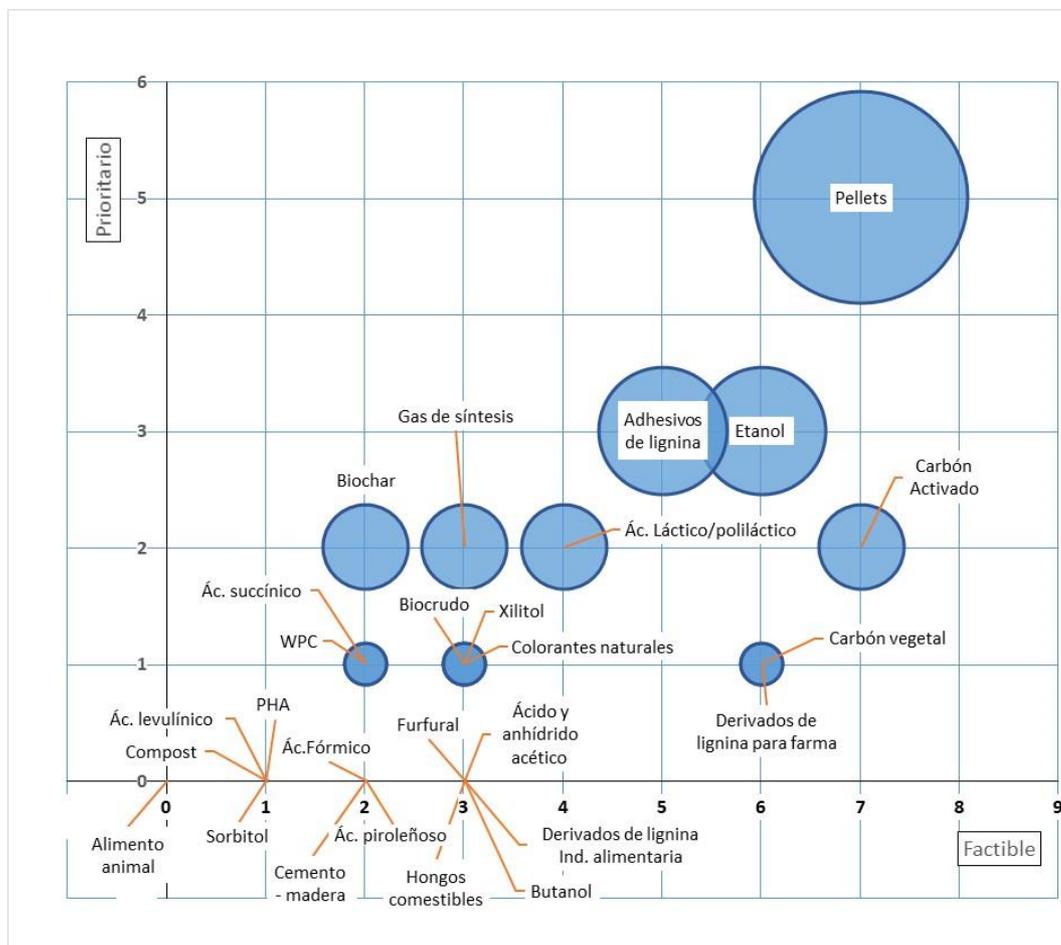


FIGURA 7. PRIORIZACIÓN DE PRODUCTOS, POR PARTE DEL GRUPO CONSULTADO. EJE HORIZONTAL "FACTIBILIDAD": NÚMERO DE EVALUACIONES POSITIVAS SOBRE LA FACTIBILIDAD DE PRODUCIR EN URUGUAY; EJE VERTICAL "PRIORITARIO": CANTIDAD DE VOTOS EN EL RANKING DE LOS 3 PRIORITARIOS. TAMAÑO DE LA BURBUJA: PRIORIDAD OTORGADA POR EL GRUPO.

Las opciones más votadas como factibles de ser fabricados en Uruguay fueron los pellets y carbón activado, seguidos de derivados de lignina para la industria farmacéutica, etanol y carbón vegetal, y en tercer lugar se posicionaron los adhesivos derivados de lignina.

Dentro de los productos seleccionados como factibles de producción, el entrevistado debió seleccionar los 3 prioritarios según su opinión. El producto más recomendado fue pellets, siendo que 5 encuestados lo posicionaron en el tope del ranking, seguido de la producción de etanol y adhesivos derivados de lignina (Figura 7). Los siguen ácido láctico/poliláctico, biochar, el carbón activado y gas de síntesis.

Los productos de la industria química, como por ejemplo ácido fórmico, acético, levulínico, piroleñoso, furfural, butanol o sorbitol, no fueron seleccionados como prioritarios por ninguno de los consultados.

Tres encuestados agregaron productos a la lista: pasta de celulosa de coníferas (papel de embalaje), lignina, lignina sulfonada, metanol, etileno, carboximetilcelulosa

Desde el punto de vista de uno de los técnicos consultados, el desarrollo de una industria de papel de embalaje de fibra larga tendría el potencial de sustentar la cadena de aserrado, dándole gran valor de la madera triturada, generando a su vez una biorrefinería para obtención de otros productos. La materia prima puede tener al menos tres orígenes: 1) madera local con el recurso forestal actual; 2) madera local con

aumento de la superficie de coníferas; 3) madera local complementada con importación de materia prima. Este producto no fue incorporado al análisis debido a que la materia prima requerida excede a la comprendida en este estudio

Un encuestado estimó una producción mínima para pellets de 200 t producto/año, Carbón activado 500 t producto/año, y Biocrudo (pirólisis o licuefacción) 500 t producto/año. Estos datos son interesantes para tener en consideración y profundizar, especialmente para los productos de biorrefinería termoquímica.

Otro encuestado sugirió un horizonte de tiempo para la producción de pellets 2020-2025 y para la producción de derivados de lignina un plazo de 2030-2040.

Los productos considerados para la evaluación fueron ordenados de acuerdo con el consumo de biomasa lignocelulósica y agrupados según la siguiente escala de consumo de materia prima expresado en toneladas en base anhidra (Figura 8).

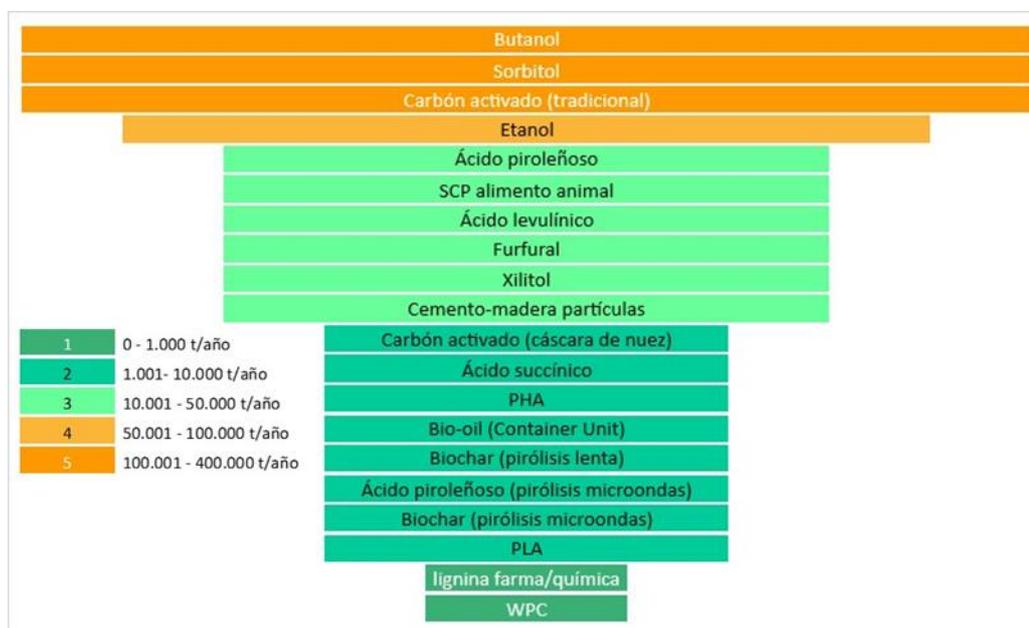


FIGURA 8. ESCALA DE PRODUCCIÓN DEFINIDA POR EL CONSUMO DE BIOMASA EXPRESADA EN BASE ANHIDRA, PARA LOS PRODUCTOS PROPUESTOS.

Todas las propuestas de transformación bioquímica o termoquímica fueron concebidas como biorrefinerías de pequeña escala, obteniendo diferentes fracciones para valorizar a partir de la biomasa, ya sea con un pretratamiento fisicoquímico y posteriores procesos bioquímicos o a través de una transformación termoquímica.

En el caso de los materiales reconstituidos o productos “*composites*”, la biomasa es valorizada integralmente en el proceso.

Para el análisis de disponibilidad de materia prima se consideró la disponibilidad correspondiente a las hipótesis del Escenario 2, cuya distribución departamental se resume en la Figura 9 y es expresada según la escala definida en la Figura 8. Se evalúa el tamaño de industria que podría llegar a emplazarse, asumiendo

en forma muy simplificada que la industria consumiera todo el residuo disponible en el departamento, sin competencia¹⁴.

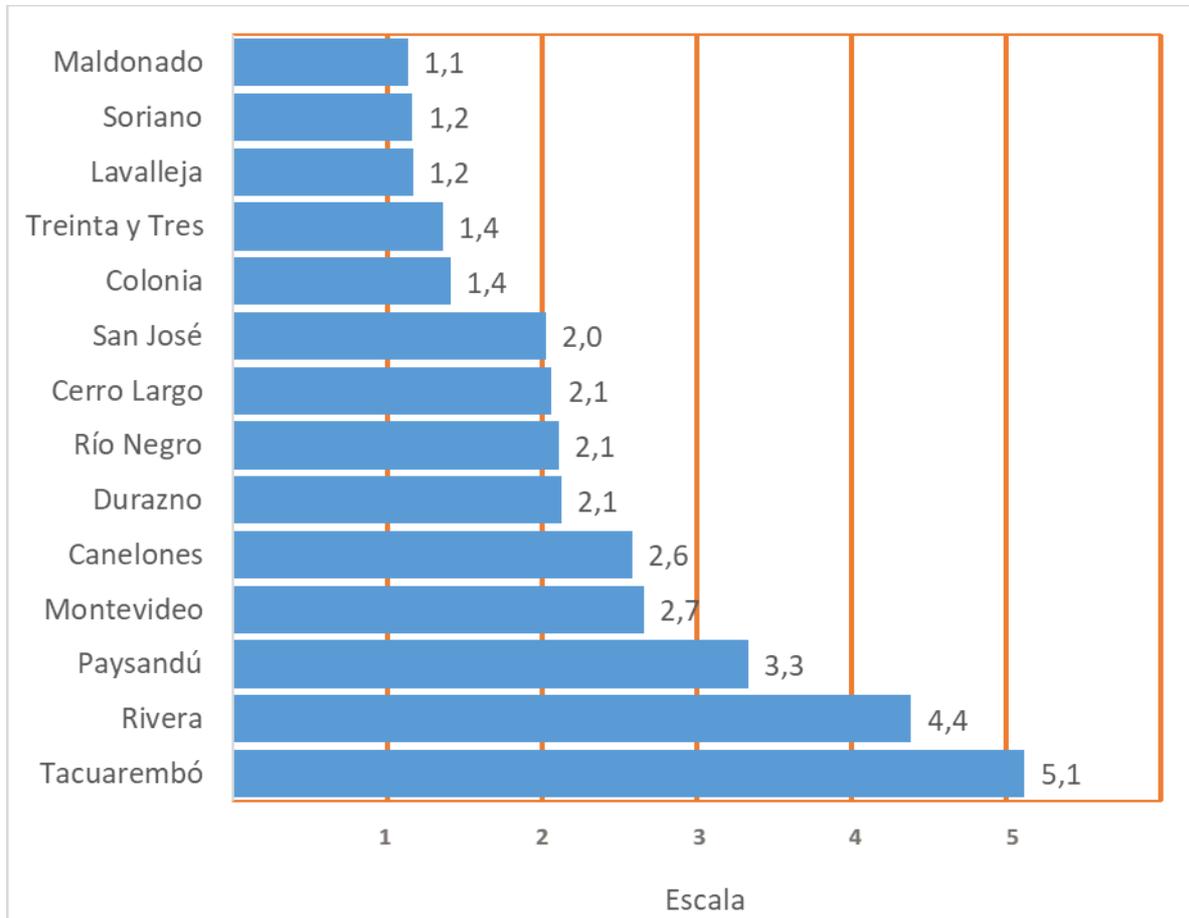


FIGURA 9. ESCALAS INDUSTRIALES QUE SERÍAN HIPOTÉTICAMENTE VIABLES POR DEPARTAMENTO RELEVADO.

Este es un análisis muy simplificado que permite en forma rápida descartar algunas industrias por el tamaño requerido, pero no es un análisis de factibilidad real y tampoco considera las distancias dentro del departamento. Un análisis más detallado vinculado a la disponibilidad puede realizarse con las micro-zonas definidas en el Relevamiento de los residuos (Böthig, Arrejuria, & Delgado, 2021) mostradas en las Figura 4 y Figura 5.

Dada la disponibilidad local heterogénea de los residuos, la potencial competencia por el recurso y la incertidumbre sobre la disponibilidad futura de los mismos, se priorizaron las menores escalas productivas. Se consideraron entonces las opciones categorizadas como Escalas 1, 2 y 3, mientras que los productos clasificados en escalas 4 y 5 fueron descartados del presente análisis.

¹⁴ En el "Informe de Relevamiento" (Böthig, Arrejuria, & Delgado, RELEVAMIENTO DE RESIDUOS. PROYECTO DE VALORIZACIÓN DE SUBPRODUCTOS DE LA INDUSTRIA DE TRANSFORMACIÓN MECÁNICA DE LA MADERA. INFORME 1, 2021) se realiza un análisis más cuidadoso de la localización de los residuos según distancias adecuadas para el transporte

La visión del equipo fue concebir industrias multi-materia prima, que puedan procesar diferentes tipos de materia prima ajustando variables de proceso. De esta forma se implantaría una bioeconomía eficiente e integradora, diversificando el consumo de materia prima para amortiguar el efecto de la creciente presión del mercado sobre los residuos, mitigando el riesgo de la falta de materia prima.

Una vez reducido el espectro de opciones por la escala, se acota por el horizonte de tiempo previsto para implementación. De acuerdo con el TRL de cada producto considerado, y la necesidad de realizar estudios para adecuar las tecnologías a las materias primas locales, los productos fueron clasificados en corto, mediano y largo plazo.

Como alternativas para un mediano y largo plazo se puede esperar la aparición de la industria química o bioquímica en este sector. Estas industrias pueden desarrollarse en diferentes escalas, admitiendo bajo tamaño para algunos productos. Es necesario:

- Contar con tecnologías de mayor madurez a nivel global y adaptación a las materias primas locales
- Orientación industrial hacia la bioeconomía. Intervención de actores de la industria química, biotecnológica, alimentaria y/o farmacéutica
- Cambio de paradigma hacia el trabajo colaborativo. Las industrias deberían asociarse de forma complementaria con las industrias forestales para aprovechar las diferentes fracciones provenientes de un pretratamiento, aportando su conocimiento especializado
- Generar complejos industriales de biorrefinería forestal
- Esquema flexible que se adapte a las fluctuaciones de materia prima

La industria derivada de la lignina tiene elevado potencial de productos de alto valor. Sin embargo, hace falta desarrollar recursos humanos, tecnología y un entorno de mercado que estimule a las empresas a desarrollar estos productos. Asimismo, se encuentran dificultades para la generación de bioproductos a partir de lignina a partir del proceso de fabricación de celulosa en Uruguay, ya que depende de las decisiones de las grandes empresas internacionales, que ya tienen sus procesos estandarizados, energéticamente resueltos y un mercado estable para la bioenergía producida.

De los residuos de corteza de los aserraderos se puede extraer taninos, los cuales tienen una variedad de aplicaciones como ser la fabricación de adhesivos, curtido de cuero, tratamiento de aguas, en la industria de la bebida y el compostaje como substrato hortícola. La desventaja es el escaso desarrollo en el país por lo que sería necesario fortalecer las capacidades de los diferentes actores para apoyar a las empresas interesadas en desarrollar estos productos.

Los tableros de partículas cemento-madera son una alternativa interesante para el mediano plazo, ya que tienen una amplia utilización en la construcción. Esta industria se abastecería también con cemento Portland, una materia prima nacional disponible de más de un proveedor. Otros residuos agroindustriales, pueden ser evaluados como materias primas para su uso. Por otra parte, sería recomendable evaluar aspectos de sostenibilidad en relación con el consumo de agua.

Las proteínas para alimento animal son un producto de alto interés por su valor agregado y su contribución al resto de la bioeconomía; si bien existen algunos productos en fase prototipo y en mercado, en general se requiere aún bastante estudio para su desarrollo local. Por esta razón fueron descartados para la siguiente fase del proyecto.

No se incluyeron en esta propuesta de selección, productos que son factibles de ser producidos pero que no requieran del proyecto para evaluar factibilidad, como los pellets o los hongos comestibles, que actualmente están siendo producidos en el país

Una biorrefinería termoquímica tradicional opera a una escala considerable consumiendo 150.000 t/año de materia prima anhidra, en cambio se han detectado en el mercado plantas modulares de pequeña escala, que permiten el escalado por agregado de módulos y un cambio de ubicación ante un cambio de escenario. Esto es una gran ventaja para enfrentar la incertidumbre acerca de la disponibilidad y competencia por la materia prima.

Las condiciones de pirólisis pueden ajustarse para alterar la relación y tasas de producción de las salidas (biochar, líquido y gas) según la materia prima. La pirólisis lenta implica procesos lentos a bajas temperaturas y favorece mayores rendimientos de producción de carbón, mientras que la pirólisis rápida a temperaturas altas y tiempos de residencia más cortos beneficia mayores rendimientos de vapores orgánicos y gases de pirólisis. Dependiendo del objetivo, estos gases pueden ser quemados para aportar calor, o pueden ser debidamente tratados para producir una mezcla de agua, gases livianos y bio-fuel, obteniéndose un abanico de productos.

En base a la convergencia de las visiones se seleccionaron 3 productos que representen oportunidades de mercado, cuyos procesos industriales se basan en tecnologías maduras y que pueden ser implementados en el corto plazo y procesos productivos de bajas escalas, debido a factores de disponibilidad de residuos de la transformación mecánica de la madera.

- **Biochar**
- **Biochar + carbón activado**
- **WPC**

El biochar es un bioproducto estable de uso agropecuario con impacto positivo en el ambiente y su uso contribuye a la mitigación del daño producido por el cambio climático. Se utiliza para regenerar suelos, ya que favorece la recomposición de la estructura, al mejorar la retención de agua y fijar los nutrientes. Como consecuencia de esto, otorga un beneficio a las plantaciones, ya que los nutrientes y agroquímicos quedan retenidos y se tiene menor lixiviación de fertilizantes hacia los cursos de agua, evitando floraciones algales. Tiene otras múltiples aplicaciones beneficiosas para el ambiente, como filtro para la restauración de cursos de agua eutrofizados, para la remoción de contaminantes orgánicos y de metales pesados. Contribuye también a la mitigación del cambio climático como adsorbente de CO₂ y N₂O, y es también empleado para uso industrial como filtro de chimeneas. Se puede utilizar también en usos alternativos e innovadores como en materiales de construcción, cemento y asfalto (Böthig, y otros, 2021).

Se propuso la alternativa de producir biochar a pequeña escala en plantas modulares y compactas. De esta forma se introduce el concepto innovador de biorrefinería a pequeña escala. Es una forma de llevar la tecnología a la fuente generadora de biomasa, minimizando los costos energéticos logísticos y una vía más rápida de insertarse en el mercado. Tiene varias ventajas, por ejemplo, baja inversión inicial, seguridad de suministro local de materia prima y menores costos de traslado (Böthig, y otros, 2021). Esta forma permitiría generar un vínculo entre las partes interesadas y los mercados de los productos, impulsando un desarrollo en conjunto.

Existen empresas que comercializan tecnologías de producción de biochar en este formato. Estas plantas pueden operar en forma continua y también discontinua aprovechando los períodos de menor precio de la energía eléctrica. Operan en forma flexible, pudiendo aumentar o disminuir su producción y moverse de

locación según la disponibilidad de materia prima o la demanda. Otra ventaja de estas plantas es que sus condiciones de operación pueden ser ajustadas fácilmente variando las características de los productos, así como los coproductos obtenidos.

En la Tabla 8 se presenta información de consumo anual en una planta de pirólisis por microondas a baja escala. Asumiendo un tamaño de ese orden con un consumo anual de 1250 t de materia prima, una industria de este tipo podría instalarse en Tacuarembó, Rivera, Río Negro, Paysandú, Montevideo, Canelones, Durazno o Cerro Largo, teniendo en cuenta la disponibilidad del Escenario 2 (Tabla 7 y Figura 9). Asimismo, admite cambio de locación de acuerdo con cambios en el suministro de materia prima.

El carbón activado fue detectado como una oportunidad debido al mercado existente y por sus múltiples usos derivados de su gran poder adsorbente fundamentalmente como agente purificador, para tratamiento de aguas y gases. En filtros de aire elimina olores y otros compuestos gaseosos. Tiene aplicaciones en farmacéutica y cosmética, como uso médico para tratar envenenamiento ya que previene la absorción de sustancias tóxicas en el estómago, para crema faciales y como blanqueador dental.

Se cuenta en Uruguay con un gran consumidor para la purificación de agua potable (OSE), que se abastece 100% con carbón activado importado. Este comprador puede actuar como tractor de la industria, y debido a la diversidad de aplicaciones posibles, en el futuro el mercado puede ser más amplio. El consumo de carbón activado tiene tendencia creciente, ascendiendo las importaciones en 2019 a 1.399 ton/año.

Este producto puede ser obtenido a partir del biochar, a través de un tratamiento físico o fisicoquímico, por lo que se plantea el estudio de su producción en la misma ubicación del biochar, como producto asociado. De esta forma, se estaría generando una diversificación de productos que amplía el mercado en función de la demanda, ya que adicionando un tren de tratamiento fisicoquímico es posible alternar la producción de biochar continuando el proceso hacia carbón activado. Será necesario validar el proceso y evaluar los rendimientos de carbón activado a partir de la biomasa local, comparando sus propiedades con las especificidades requeridas por la demanda.

De acuerdo con la Tabla 8, el carbón activado producido por activación física a partir de cáscara de nuez puede requerir aproximadamente 10.000 t/año, cantidad disponible, según Escenario 2, en los departamentos de Tacuarembó, Rivera y Paysandú (Tabla 7 y Figura 9). Sin embargo, si se produjera la activación a partir del biochar en una planta modular requeriría 1250 t/año, lo que permitiría ubicarla en Tacuarembó, Rivera, Río Negro, Paysandú, Montevideo, Canelones, Durazno o Cerro Largo, considerando las hipótesis del Escenario 2 (Tabla 7 y Figura 9). Al igual que el biochar, esta última opción admite cambio de locación de acuerdo con cambios en la oferta de materia prima.

El WPC fue seleccionado como una forma de valorizar residuos plásticos y de la foresto industria, contribuyéndose a la circularidad de ambas cadenas de valor. Es un material versátil que se utiliza para fabricar diversos productos para la construcción, revestimientos, pasarelas, muebles de jardín y para parques. Le proporciona un nuevo ciclo de vida al residuo plástico, convirtiéndose en un producto de alta durabilidad que permite aplicaciones exteriores con buen desempeño. Evita el uso del preservante CCA (solución acuosa de óxidos de cobre cromo y arsénico) utilizado por la mayor parte de las plantas de impregnación en Uruguay, que a nivel internacional tiene restricciones para su aplicación y su disposición final.

Este producto tiene mercado externo e interno, sustituyendo también importaciones de productos con el mismo destino final.

Teniendo en consideración la mínima escala de 307 t/año de materia prima anhidra la (Tabla 8) y la disponibilidad de residuos estimada (Tabla 7 y Figura 9), sería posible ubicarlo en los siguientes departamentos: Tacuarembó, Rivera, Río Negro, Paysandú, Montevideo, Canelones, Durazno, Cerro Largo, San José o Treinta y Tres. Una opción para aprovechar la baja escala es ubicar la planta en alguna micro-zona del sur de Canelones, San José o Montevideo y así minimizar el costo de transporte por su cercanía al puerto de Montevideo.

Otras consideraciones importantes para refinar su localización deben ser:

- La disponibilidad de plásticos reciclados aptos como materia prima
- Zona de mayor consumo, región costera al sureste del país. La disponibilidad de biomasa lignocelulósica en esa zona debería ser relevada especialmente, ya que esa región tuvo baja participación en el relevamiento (Böthig, Arrejuria, & Delgado, 2021).

6.4. Estudio de viabilidad económica

6.4.1. Biochar y carbón activado

Luego de una búsqueda de proveedores tecnológicos, se evaluó una alternativa de producción de biochar y carbón activado por pirólisis a baja escala con una productividad aproximada de hasta 10 t/h. de biochar, a través de una tecnología modular y compacta que es comercializada llave en mano.

El proceso consta de tres etapas principales: molienda, secado y pirólisis; seguidas de un enfriamiento rápido y un embalaje en big bags. Si el producto final es carbón activado, el biochar es introducido a otro tren de pirólisis con una unidad de activación.

Admite biomasa lignocelulósica de diferentes tipos (madera, cáscara de arroz, otros residuos agropecuarios) y formas (aserrín, viruta, chips.). Puede alimentarse con madera de diferentes especies, admitiendo incluso corteza para la producción de *biochar*, pero no así para el carbón activado. De todas formas, cuanto más homogénea es la materia prima más homogéneo el producto, recomendándose trabajar por separado las diferentes especies o tipos de materia prima.

Estos sistemas admiten escalado en forma modular, adicionando trenes de pirólisis a la línea productiva. Se plantearon dos alternativas para la producción de biochar (Modelos 1.1 y 1.2) y dos para la producción de carbón activado (Modelos 2.1 y 2.2). En los modelos 1.1 y 2.1, se consideró 1 tren de pirólisis para un aserradero capaz de autoabastecerse con la biomasa para los procesos, mientras que en los modelos 1.2 y 2.2 se consideró equipamiento con 5 trenes y con una capacidad de autoabastecimiento del 20% y un abastecimiento del 80% restante de aserraderos cercanos, a un radio menor a 50 km.

Estas dos escalas significan un **consumo anual de 3.000 y 15.000 toneladas de biomasa** respectivamente, que con un 40% de contenido de humedad en base húmeda equivalen a 1.800 y 9.000 toneladas en base anhidra y una **producción anual de biochar estimada en 600 y 3.000 t/año** respectivamente. Teniendo en cuenta la sustitución de la turba importada como única aplicación, la mayor capacidad de diseño bastaría

para abastecer el 71% de las importaciones de 2019 (4200 t). Sin embargo, al considerar el mercado regional, se constata que Argentina y Brasil han importado aproximadamente 10.000 t de turba. Por otra parte, de acuerdo con NKWOOD (2019) citado por (Böthig, y otros, 2021) las perspectivas son optimistas para el mercado mundial de biochar, con una tasa de crecimiento anual compuesto del 11,22% en volumen durante el período 2020-2028.

Para un proceso de producción de **carbón activado**, se estimaron producciones de **300 y 1.500 t/año**, respectivamente. En este último caso la producción sería adecuada para abastecer el consumo nacional interno (1.399 t en 2019) (Böthig, y otros, 2021). En base a las hipótesis de disponibilidad del Escenario 2 del “Relevamiento de Residuos”, para los escenarios 1.1 y 2.1 aquí planteados, se detectaron 7 empresas que podrían auto abastecerse: dos en **Tacuarembó**, dos en **Rivera**, una en **Río Negro** y una en **Montevideo** con residuos de madera y una en **Montevideo** sólo con residuos de corteza, todas sin mezcla de género. Por otra parte, 5 empresas ubicadas en los departamentos de Tacuarembó, Durazno, Paysandú, Rivera y Canelones también podrían autoabastecerse con mezcla de especies o géneros. Para los **Escenarios 1.2 y 2.2**, se encontraron dos micro-zonas, ubicadas en **Tacuarembó y Rivera**, que podrían abastecer este proceso sin mezclar especies, con residuos de madera o madera y corteza en el primer caso y sólo con madera en el segundo. Mientras tanto, cuatro micro-zonas podrían abastecer la planta industrial con residuos de madera y complementar con corteza, combinando especies o géneros, en **Tacuarembó, Paysandú y Rivera**. Sin embargo, estas zonas serían abastecidas en más de un 20% por las empresas tractoras, lo que implica un menor costo de transporte de materia prima desde las otras empresas y por lo tanto un balance de costos directos más favorable al calculado. Al ser una planta portátil, existe también la posibilidad de que ante un cambio de oferta de materia prima la planta pueda ser instalada en otro predio industrial.

Para el modelo empresarial analizado con un aserradero que invierte fondos propios, de la evaluación del Valor Actual Neto (VAN) de la inversión y la Tasa Interna de Retorno (TIR) mostrados en la Tabla 9 se desprende que los modelos 1.1, 1.2 y 2.2 podrían ser rentables ya que se obtuvo un VAN positivo y una TIR mayor a la tasa de descuento seleccionada (7,1%)

TABLA 9. VALOR ACTUAL NETO Y TASA INTERNA DE RETORNO EVALUADOS PARA LOS MODELOS PROPUESTOS¹⁵.

Modelo	1.1	1.2	2.1	2.2
Producto	BIOCHAR	BIOCHAR	CARBON ACTIVADO	CARBON ACTIVADO
Consumo biomasa verde (t/año)	3000	15000	3000	15000
Producción (t/año)	600	3000	300	1500
Modalidad de abastecimiento	Autoabastecimiento	20 % propio + 80% aserraderos cercanos	Autoabastecimiento	20 % propio + 80% aserraderos cercanos
TIR (%)	13	30	-1	10
VAN (USD)	117.686	1.326.200	-244.062	277.909
Repago simple (años)	5,5	3,1	10,6	6,0

¹⁵ Para la evaluación financiera de los distintos modelos se calculó la tasa de retorno requerido de los fondos propios (7,1%), según el Enfoque del Accionista, aplicando el Capital Pricing Asset Model.

Inversión inicial (USD)	417.975	1.058.662	716.410	1.769.612
-------------------------	---------	-----------	---------	-----------

La producción de 300 t/año de carbón activado no es rentable bajo las condiciones de estudio debido a la pequeña escala y el alto monto de la inversión. Sin embargo, al aumentar la escala en un factor de 5 (modelo 2.2) se logra una TIR del 10% con repago simple de 6 años.

La producción de 600 t/año de biochar con la misma modalidad de abastecimiento que el modelo 2.1, es en cambio rentable con 5,5 años de repago. La producción de 3.000 t/año de biochar consumiendo anualmente 15.000 toneladas de biomasa verde, por parte de un aserradero que se autoabastece en un 20 %, mientras que el 80 % restante lo compra a otros en un radio promedio de 25 km, presenta el mayor valor actual neto (VAN) y un periodo de repago simple de 3,1 años.

Los casos de mayor producción, ya sea de *biochar* como de carbón activado (modelos 1.2 y 2.2), se presentan más ventajosos, disminuyendo el monto de la inversión en relación con la producción (Tabla 9). En estos casos, con un consumo de materia prima de 15.000 t/año y un costo del transporte de materia prima agregado, aumenta la incidencia de la biomasa puesta en planta desde aproximadamente un 38 % de los costos hasta un 71% y 64%, respectivamente. No obstante, los costos de transporte de materia prima podrían descender sustancialmente, ya que se encontraron varias empresas que pueden autoabastecerse en mayor proporción a la estimada.

Teniendo en cuenta el alto impacto de los costos de biomasa y transporte, este estudio de viabilidad económica debería ser extendido a otras capacidades de producción, modalidades intermedias de abastecimiento mixto de materia prima (propio y externo) y podrían ajustarse teniendo en cuenta las características particulares locales, las distancias reales y la cantidad transportada desde cada empresa.

En el caso del carbón activado, aunque los valores de evaluación financiera para el modelo de mediana escala son menos prometedores que para el caso del biochar, siguen siendo favorables. Adicionalmente debemos considerar que este producto tiene un mercado totalmente desarrollado. La capacidad productiva de una planta según el modelo 2.2 sería de 1.500 toneladas por año, mientras que en el 2019 se importaron 1.399 toneladas, siendo la mayoría para uso como purificador de agua potable.

Se debe tener en cuenta que las producciones estimadas dependen del rendimiento de proceso. Para este estudio se aplicaron valores teóricos aportados por el fabricante, pudiendo variar significativamente luego de la adaptación de la tecnología para las materias primas locales. La flexibilidad de este sistema permite la operación alternada produciendo en forma combinada biochar y carbón activado como producto final.

En relación con las materias primas a utilizar, este proceso permite manejar la presión sobre el consumo de los residuos, considerando la utilización de residuos de otras cadenas agropecuarias. Se recomienda el estudio y optimización de las condiciones operativas para las diferentes alternativas de biomasa nacionales, teniendo en consideración los destinos finales proyectados.

Para el proceso de activación del carbón se requeriría mayor profundización experimental. De acuerdo con el proveedor de la tecnología, se requiere realizar experiencias a escala piloto para desarrollar un proceso de activación adecuado para las diferentes materias primas nacionales. Es altamente recomendado realizar un estudio de este tipo, para lo cual es posible arrendar las instalaciones de la compañía y realizar pruebas para

el desarrollo de producto¹⁶. Durante las pruebas piloto deberían ser verificados también los balances energéticos del proceso.

6.4.2. Productos de plástico-madera (WPC)

En base al mercado potencial encontrado de los materiales para pisos exteriores, pasarelas o decks en (Böthig, y otros, 2021), se realizó un estudio de factibilidad económica de producción de tablillas de productos de plástico-madera (WPC, Wood Plastic Composite) con este destino. Las materias primas propuestas fueron residuos de la transformación mecánica de la madera tales como aserrín, chips e incluso costaneros y resinas plásticas recicladas del mercado nacional.

La materia prima podrá ser madera de diferentes especies pero libre de corteza. No es recomendable mezclar entre sí, madera de pino y de eucalipto, debiendo ser procesados por separado y producir compuestos con una sola especie en diferentes partidas ajustando las variables de proceso para cada materia prima. El proceso clave de producción de WPC es la extrusión de la mezcla de madera con las resinas plásticas y aditivos, que permiten la homogenización de la mezcla y mejoran las características del producto.

Respecto al proceso, la primera etapa comprende el pretratamiento de la madera; dependiendo de la materia prima, se requerirán distintas etapas previas de molienda. Luego continúa el proceso de pre-secado, seguido de una etapa de pulverización y finalmente a otro proceso de secado hasta una humedad de 2% en base seca. El aserrín es mezclado y precalentado con las resinas y los aditivos, en una proporción recomendada de madera a resina de 70/30. La mezcla homogénea es precalentada e ingresa a la línea de extrusión. El perfil formado pasa al banco de calibración y luego a la cortadora automática, para finalizar en la línea de embalaje.

Respecto a la materia prima, deberá ser madera libre de corteza y sin mezcla entre pino y eucalipto, ajustando las variables del proceso según la especie.

Se propuso una capacidad de producción de 21.600 m²/año equivalentes a 480 t/año, requiriendo una provisión de 307 toneladas anuales de madera libre de corteza en base anhidra y 134 toneladas anuales de resina. A esto se le suma la biomasa consumida como combustible, llegando a un consumo total de madera verde de 725 t/año equivalentes a 403 t/año en base anhidra.

Este tamaño permite flexibilidad de ubicación en prácticamente cualquier zona del país en relación con la provisión de biomasa como materia prima. Todas las micro-zonas configuradas para una especie en el “Relevamiento de los Residuos” podrían abastecer la planta. Para el caso del Escenario 1, se conformaron 8 micro-zonas que pueden proveer de biomasa suficiente sin mezclar especies en los departamentos de Tacuarembó, Paysandú, Montevideo, Canelones, Río Negro y Rivera (Figura 4). En base a la disponibilidad del Escenario 2, la planta se podría ubicar en 9 “micro-zonas” ubicadas en Tacuarembó, Rivera, Paysandú, Montevideo y Río Negro (Figura 5).

¹⁶ El “Estudio de Viabilidad Económica” (Böthig, y otros, IDENTIFICACIÓN DE POTENCIALES BIOPRODUCTOS. PROYECTO DE VALORIZACIÓN DE SUBPRODUCTOS DE LA INDUSTRIA DE TRANSFORMACIÓN MECÁNICA DE LA MADERA. INFORME 3, 2021) provee información de costos al respecto.

Por otra parte, según el Relevamiento de Residuos (Böthig, Arrejuria, & Delgado, 2021) se detectaron 16 empresas que de acuerdo con las hipótesis establecidas para los escenarios 1 y 2, respectivamente, podrían autoabastecerse en los departamentos de Tacuarembó, Paysandú, Rivera, Montevideo, Canelones y Río Negro. Este nivel de consumo de biomasa puede alcanzarse con diversidad de asociaciones de empresas, adicionales a las aquí contabilizadas.

En cuanto al abastecimiento con las resinas, técnicamente es posible producir el WPC a partir de polipropileno (PP) o polietileno de alta densidad (PEAD). Sin embargo, se seleccionó PEAD cuya cadena de reciclado y venta está desarrollada a nivel nacional (Baráibar & Andrada, 2018).

Este modelo para la producción de 21.600 m² de tabillas para pasarelas de WPC a partir considerando una inversión realizada con capital propio podría ser viable para las condiciones definidas y supuestos asumidos, obteniéndose una TIR=15%, un VAN= 143.035 USD y un periodo de repago simple de 5,1 años (Tabla 10).

TABLA 10. TAMAÑO PROPUESTO Y VALORES DE FLUJO DE FONDOS¹⁷.

Producto		WPC
Materia prima	Biomasa verde(t/año)	552
	Resina (t/año)	134
Consumo biomasa verde total (t/año)		725
Producción / (m ² /año)		21.600
TIR (%)		15
VAN (USD)		143.035
Repago simple (años)		5,1
Inversión inicial (USD)		544.651

Es importante mencionar que este modelo es muy sensible al precio de venta, una disminución del 5% del valor de venta lleva el VAN a 0.

Se debe tener en cuenta que muchos costos fueron asumidos para las condiciones más desfavorables, requiriéndose un estudio más profundo una vez propuesta una locación de interés.

Realizando un análisis de la estructura de costos destaca el gran impacto del costo de los aditivos. Esto determina la gran importancia económica de la optimización de su dosificación así como la búsqueda de proveedores para la mejora de los precios. El ajuste de aditivos es muy importante desde el punto de vista de los costos pero también del desempeño, sugiriéndose evaluar aditivos alternativos.

En segundo orden, se distingue el costo de las resinas como muy influyente (21,6%). La relación de madera resina debiera ser ajustada, pero no es de esperar una variación con impacto significativo en los costos.

¹⁷ Para la evaluación financiera de los distintos modelos se calculó la tasa de retorno requerido de los fondos propios (9%), que es la tasa adecuada para el Enfoque del Accionista, aplicando el Capital Pricing Asset Model.

El costo de energía eléctrica es el tercero en magnitud, casi un 16%, no visualizándose en forma preliminar posibilidad de reducirlo.

La modalidad de los fletes y su costo deberían ser ajustados una vez seleccionada una localización concreta.

Se recomienda una evaluación técnica del proceso con las diferentes materias primas madereras posibles y las resinas disponibles en plaza. Se debería estudiar las condiciones operativas para las diferentes materias primas, la relación de composición, aditivos agregados y realizar ajuste de dosificación, evaluando la calidad del producto obtenido. En base a estos estudios previos se definirían las especificaciones y tolerancias de las materias primas.

Asimismo, teniendo en cuenta la incertidumbre del mercado de residuos, se sugiere evaluar la utilización de otros residuos lignocelulósicos, como por ejemplo, cascarilla de arroz, como materia prima alternativa.

Como reflexión final, es posible pensar que un producto de este tipo diseñado bajo un concepto de reciclado de recursos, biomasa industrial residual y materiales plásticos urbanos tenga una aceptación importante por un sector de la sociedad y pueda ser también promovido en su utilización por ciertos actores. De esta manera se puede aspirar a la disposición social a pagar este valor ambiental agregado, así como políticas públicas de apoyo y promoción.

6.5. Hallazgos detectados

Del análisis de revisión de antecedentes, las consultas a los empresarios y a los técnicos surgen algunos hallazgos para el aprovechamiento de residuos (Fortalezas, Oportunidades, Amenazas y Restricciones) y posibles acciones a tomar que se presentan a continuación.

I. Materia prima y tecnología

Hallazgos	Fortaleza: Disponibilidad de recursos renovables producidos en forma sostenible para industrializar
Medidas	Aprovechar los recursos planteando un esquema de biorrefinería, siguiendo un camino en el que se maximice el aprovechamiento de los recursos naturales. Introducir tecnologías y procesos adecuados

Hallazgos	Oportunidad: Diversidad de tecnologías y procesos innovadores disponibles en el mundo
	Oportunidad: Es posible producir productos que contribuyen al cumplimiento de las metas de desarrollo sostenible y a reducir los efectos negativos del cambio climático.
	Restricción: Al no existir petróleo como recurso natural nacional no hay tradición de producción de químicos derivados, con las implicancias de falta de actores privados, know-how en todos los ámbitos
Medidas	Otros actores deberían involucrarse. La industria química puede ser un importante actor en el desarrollo de nuevas industrias derivadas de esta biomasa.

	<p>Políticas productivas para la atracción de inversores de otros rubros: industria química, biotecnológica, alimentaria, farmacéutica, plástico</p> <p>Trabajo multidisciplinario en todos los órdenes (académico, empresaria, industrial , servicios)</p>
--	---

Hallazgos	Oportunidad: La industria petroquímica se está reconvirtiendo a nivel mundial al procesamiento de biomasa y las industrias de celulosa son líderes en desarrollo de biorrefinerías a nivel mundial
Medidas	Promover introducción de biorrefinerías asociadas a estas empresas

Hallazgos	Restricción: Los empresarios plantean limitaciones tecnológicas y de conocimiento para generar nuevos desarrollos
Medidas	<p>Promover asociación con otros rubros</p> <p>Liderazgo gubernamental para promover nuevas rutas</p> <p>Generar nuevos conocimientos e ideas, que se traducirían en tecnologías aplicables localmente en el mediano o largo plazo y rentabilidad de nuevos proyectos</p>

Hallazgos	Restricción: Aún son insuficientes las capacidades en recursos humanos, infraestructura e I+D+i. Es necesario generar una masa crítica que impulse el cambio tecnológico
Medidas	<p>Fortalecimiento de las capacidades de los recursos humanos a nivel de grado y posgrado, y también a nivel operativo-técnico en el sector, particularmente en lo que tiene que ver con construcción en madera (traccionando de la cadena que genera el recurso), biorrefinería y bioenergía; generando intercambios entre sector académico y la industria.</p> <p>Promover I+D colaborativa en grupos multidisciplinarios para el desarrollo de tecnologías y primeros prototipos. Incorporar diferentes grupos de conocimiento que abarque diversidad de matrices (madera, cascara de arroz, gramíneas, otros residuos) y diferentes especialidades.</p> <p>Promover y desarrollar vínculos entre las actividades de I+D y las industrias para el diseño y operación de pruebas piloto.</p> <p>Liderazgo político en el incentivo de este tipo de redes.</p>

Hallazgos	Restricción: Heterogeneidad de la biomasa y sus propiedades
Medidas	<p>Mejorar la gestión de los residuos, clasificando y procesándola de acuerdo con destino.</p> <p>Considerar la diversidad de la materia prima desde el momento de diseño y desarrollar o introducir tecnologías flexibles</p>

Hallazgos	Restricción: Contaminación de los residuos con barro o piedras que dificulta su utilización.
Medidas	Mejorar la gestión del proceso y de los residuos, adecuando infraestructura de

	almacenamiento
--	----------------

II. Plazos

Hallazgos	<p>Restricción: Por razones económicas y ambientales, los empresarios necesitan soluciones de emprendimientos factibles de llevar a cabo en corto plazo, mientras que las tecnologías más rentables requieren más desarrollo tecnológico, aumentando la inversión y alargando los plazos.</p> <p>Oportunidad: Diversidad de tecnologías y procesos innovadores disponibles en el mundo</p>
Medidas	<p>Acciones en el corto plazo por parte del gobierno para promover proyectos innovadores</p> <p>Se debería analizar en paralelo alternativas con diferentes horizontes temporales</p> <p>Acortar distancias acordando con empresas referentes y proveedores de tecnología y desarrollos llave en mano</p>

III. Rentabilidad

Se visualizan restricciones a la rentabilidad de los proyectos de industrialización de los recursos debidas esencialmente a razones logísticas y de escala.

LOGÍSTICA:

Hallazgos	<p>Restricción: Dispersión geográfica de los residuos</p> <p>Restricción: Gran distancia entre polos forestales (plantaciones forestales y las principales plantas industriales de transformación mecánica) y los puertos de salida</p> <p>Restricción: Pocas opciones y altos costos de transporte</p> <p>Restricción: Baja densidad másica y energética. Gran volumen específico</p>
Medidas	<p>Una planta industrializadora debería estar próxima al lugar de generación (Dirección de Planificación de la Oficina de Planeamiento y Presupuesto, 2019).</p> <p>Inversiones en infraestructura y logística del producto terminado también son críticas (Dirección de Planificación de la Oficina de Planeamiento y Presupuesto, 2019)</p> <p>Evaluar alternativas para los proyectos individualmente, de forma de optimizar la logística caso a caso</p> <p>Optimización de logística externa en forma coordinada entre los proveedores y consumidores, con estandarización de precios y condiciones</p>

ESCALA:

Hallazgos	<p>Restricción: Baja escala en generación de biomasa. La cantidad de biomasa producida individualmente es baja a moderada. Los aserraderos en Uruguay son pequeños y medianos, dificultando también la competitividad general de las empresas (Uruguay Transforma: Sistema Nacional de Transformación Productiva y Competitividad, 2019).</p> <p>Restricción: Muchas industrias requieren alto costo de inversión inicial, requiriendo mayores escalas de operación para amortizar</p>
Medidas	<p>Para optimizar el aprovechamiento del recurso se debe promover una articulación y cooperación de las distintas actividades forestales, donde los residuos de varias industrias sean la materia prima de otras, potenciando asociatividad, clusterización y cooperativismo.</p> <p>La asociatividad puede disminuir el impacto financiero de los costos de las inversiones</p> <p>Introducción de tecnologías modulares fácilmente escalables</p> <p>Buscar complementariedad con otras materias primas, residuos de otras cadenas de valor</p> <p>Introducción de tecnologías flexibles “multi-materia prima”</p>

Hallazgos	<p>Amenaza: Competencia por el recurso. En la medida que se generen proyectos de aprovechamiento se aumenta la demanda por la biomasa, aumentando la presión sobre los precios y disminuyendo disponibilidad</p>
Medidas	<p>La estandarización de calidades de estos materiales (los residuos) contribuiría a establecimiento de precios justos</p> <p>La utilización de múltiples materias primas aumenta oferta y baja presión sobre el recurso</p> <p>Buscar complementariedad con otras materias primas, residuos de otras cadenas de valor</p> <p>Introducción de tecnologías flexibles “multi-materia prima”</p>

Hallazgos	<p>Amenaza: Algunas empresas pueden generar por sí solas industrias de pequeña escala y poco valor agregado, con el riesgo de “dispersar” el recurso, dificultando la implantación de proyectos de mayor retorno en el mediano plazo</p>
Medidas	<p>Acciones en el corto plazo por parte del gobierno para promover proyectos innovadores</p>

Hallazgos	<p>Restricción: Demanda actual insuficiente del residuo que justifique la gran inversión en incorporación de nuevos equipamientos o de infraestructura para gestionarlos adecuadamente</p>
Medidas	<p>Acuerdos comerciales con consumidores de biomasa para estabilizar demanda y viabilizar inversiones</p> <p>Inversiones compartidas (consorcios)</p>

IV. Comerciales

Hallazgos	Restricción: las empresas de tamaño mediano y menor porte opinan que la escala del mercado uruguayo es demasiado pequeña
Medidas	<p>La exportación podría ser potenciada a través de tratados bilaterales o acuerdos comerciales con grupos de países estratégicos</p> <p>Promoción de la cadena a través de compras públicas</p> <p>Cuando el rubro industrial se diversifica, las inversiones deberían ser asociadas con empresas de los rubros específicos (química, bioquímica, farmacéutica, etc.) con conocimiento de esos mercados</p>

Hallazgos	Restricción: Cadena comercial no desarrollada, mercado de residuos inmaduro.
Medidas	<p>Necesidad de estandarizar el comercio de la biomasa de forma de asegurar la calidad de la materia prima, apoyar el desarrollo de proveedores</p> <p>Asociatividad permitiría a las pequeñas empresas generar mejores acuerdos comerciales con proveedores y compradores</p> <p>Involucramiento del proveedor de materia prima en el negocio global puede mejorar resultados</p>

V. Financieras

Hallazgos	Restricción: En un tercer nivel de preocupación de las empresas encuestadas está el acceso a capital para llevar a cabo un emprendimiento propio.
Medidas	<p>Políticas para la atracción de inversores específicos</p> <p>Asociatividad para compartir riesgo y mitigar impacto financiero</p> <p>Políticas financiamiento alineadas a indicadores de circularidad y sostenibilidad</p>

VI. Culturales

BIOPRODUCTOS:

Hallazgos	Oportunidad: El mundo tiende a valorar especialmente los productos de origen renovable producidos en forma sostenible, con bajo impacto ambiental, pagándose precios diferenciales
Medidas	<p>Aprovechar recursos internacionales disponibles para estos objetivos</p> <p>Desarrollar certificaciones y estrategias de marketing sostenidas en esos aspectos</p>

Hallazgos	<p>Restricción: Poca cultura en la utilización de los productos de transformación mecánica y para concebir proyectos de biorrefinería. Desconocimiento del consumidor en general sobre los beneficios ambientales de la economía circular y desinterés por contribuir con un consumo responsable</p> <p>Fortaleza: El país está construyendo una estructura para sustentar y apoyar el desarrollo sostenible a través de diferentes ejes</p>
Medidas	<p>Liderazgo del estado en :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Políticas de promoción de consumo y/o aprovechamiento de estos residuos y para generar un mercado de bioproductos o biomateriales • Campañas de concientización de beneficios ambientales • Beneficios económicos por consumo de bioproductos • Estado como tractor del consumo • Generación de confianza en bioproductos y bioinsumos a través de estandarización y desarrollo de cadena de proveedores

ASOCIATIVIDAD

Hallazgos	<p>Restricción: No es un tema que esté en la agenda de una gran parte de las empresas. Limitaciones culturales restringen a los empresarios uruguayos a asociarse.</p> <p>Oportunidad: ADEMA en el noreste del país, es una herramienta útil y antecedente promisorio para otras regiones.</p>
Medidas	<p>Necesidad de LIDERAZGOS. Algunas empresas deberían liderar el proceso actuando como tractoras de “micro-zona”</p> <p>Políticas de promoción para establecimiento de vínculos entre partes interesadas</p> <p>Replicación de experiencia de ADEMA</p> <p>Trabajo a nivel gubernamental local para comprender las realidades regionales, realización de actividades de promoción, capacitación, y construcción de gobernanzas locales</p>

6.6. CONCLUSIONES

Este trabajo compiló diferentes fuentes de información acerca de los residuos de la Cadena de Transformación Mecánica de la Madera permitiendo llegar a estimaciones de disponibilidad y geolocalización de los residuos como materia prima para su transformación industrial.

A partir del relevamiento de residuos realizado para el año 2019 a 29 aserraderos y una industria de tableros contrachapados, se reportaron 402.165 toneladas de residuo en base anhidra, sin embargo considerando un universo mayor de 79 aserraderos, la industria de tableros contrachapados y cuatro plantas de astillado, se

alcanza un consumo de madera verde de 7.384.351 m³ y en base a la eficiencia de conversión fueron estimadas 515.602 toneladas anuales de residuos en base anhidra.

Se encontró pobre cuantificación de los residuos y de los costos implicados por parte de los empresarios. Se sugiere que otras iniciativas de relevamiento sean realizadas en forma acotada localizada y con apoyo de las gobernanzas locales y mediciones. Desde el diseño de la actividad debería incluirse fuentes de información transversal (Dirección Nacional de Energía, Ministerio de Ambiente, Intendencias).

Existe diferencia entre las empresas de mayor consumo y las pequeñas en el aprovechamiento de los residuos, destacándose un aprovechamiento total de los residuos madereros por parte de las grandes, pero con voluntad de encontrar mejores oportunidades.

El mayor destino reportado es generación de energía eléctrica (78,2%), seguido de energía térmica (6,3%), otros destinos un 2,5% y un 3,8% permanece sin valorizar. Actualmente, existen varios proyectos para producir combustibles sólidos a partir de aserrín y viruta, así como planes para generar energía térmica para hornos de secado. Para ajustar las perspectivas futuras, se recomienda analizar el balance presente y proyectado de todo el material combustible consumido por las plantas de energía y las perspectivas de demanda energética para las plantas de bioenergía y por las industrias asociadas, así como las perspectivas de oferta energética de las otras fuentes renovables.

Se relevaron cuatro plantas de astillado con una generación de residuos reportados de 74.926 t anhidras, de los cuales un 61% es consumido internamente para mejoramiento de suelos, un 33% es vendido, mientras que resta un 6% sin valorizar que es enviado a vertedero.

La diversificación de los destinos permitiría enfrentar los cambios en la demanda de energía a partir de la biomasa y contribuir a una descarbonización de otros sectores de la economía. El desafío consiste en avanzar hacia bioproductos de mayor agregado de valor.

El establecimiento de industrias de transformación de los residuos industriales de la transformación de la madera daría lugar a una actividad empresarial local adicional de recolección, clasificación, acopio y, eventualmente, transporte de ese subproducto de la madera. El desarrollo de una cadena comercial de la biomasa residual de la primera transformación de la madera debería involucrar varios aspectos: gestión sistemática de los residuos (control de proceso, clasificación, separación y almacenamiento orientados a los requisitos de la demanda), normalización y control de calidad, sistema de establecimiento de precios según parámetros normalizados de materia prima. Asimismo, debería buscarse una optimización del transporte de la biomasa en forma coordinada entre los proveedores y consumidores, con estandarización de precios y condiciones.

La diversidad y variabilidad de las características de la materia prima deben ser consideradas desde el momento de diseño del proceso, recomendándose desarrollar o introducir tecnologías flexibles.

Teniendo en cuenta posibles dinámicas en el mercado de este recurso, se estudiaron diferentes escenarios de disponibilidad de los residuos. Si se suponen disponibles los residuos que no son valorizados internamente y no son vendidos a plantas de celulosa, con fin energético industrial (energía térmica, eléctrica, pellets, briquetas) o destinados a mejoramiento de suelos, significaría 46.165 toneladas anuales de residuos madereros y 4.825 toneladas anuales de corteza que estarían disponibles para otro destino, ambas en base anhidra (Escenario 1).

Una segunda hipótesis libera lo que actualmente es vendido para generación de energía eléctrica y asume que las empresas que tienen plantas de bioenergía solo consumen para abastecimiento interno. Asimismo, considera los aumentos de generación de residuos por ampliaciones y descuenta los proyectos de aprovechamiento que se encuentran en proceso de implementación. Resulta en una disponibilidad de 227.653 toneladas anhidras de residuos madereros y 22.469 toneladas de corteza anuales (Escenario 2).

Se analizó la distribución geográfica de los residuos disponibles de acuerdo con estas hipótesis, conformándose micro-zonas capaces de abastecer una planta industrial con al menos 1.000 t/año de biomasa residual (en base anhidra) desde una distancia por carretera no mayor a 50 km, en los departamentos de Tacuarembó, Paysandú, Rivera, Montevideo, Canelones, Durazno, Cerro Largo y Río Negro.

Si bien se encontró una alta proporción de residuos de pino, toda proyección de aprovechamiento basada en esta materia prima debería ser cuidadosamente estudiada en conjunto con los actores interesados, debido a que en el largo plazo se prevé una reducción de áreas plantadas.

A nivel global existe gran desarrollo de tecnologías y procesos innovadores producto de transformaciones mecánicas, químicas, termoquímicas y bioquímicas. Es posible producir productos que contribuyen al cumplimiento de las metas de desarrollo sostenible y a reducir los efectos negativos del cambio climático. Por razones económicas y ambientales, los empresarios necesitan soluciones de emprendimientos factibles de llevar a cabo en corto plazo, sin embargo, plantean limitaciones tecnológicas y de conocimiento para generar nuevos desarrollos. Las tecnologías más rentables requieren más desarrollo tecnológico, aumentando la inversión y alargando los plazos. Se requieren, por lo tanto, acciones en el corto plazo por parte del gobierno para promover proyectos innovadores, analizando en paralelo alternativas con diferentes horizontes temporales. Se propone acortar distancias acordando con empresas referentes y proveedores de tecnología y desarrollos llave en mano.

Se estudió la viabilidad económica de producir biochar, carbón activado y WPC a baja escala. Los tres productos poseen un alto valor de TRL, pudiendo instalarse a nivel industrial en un corto plazo, admiten bajas escalas de producción, el WPC y el carbón activado tiene mercados maduros, mientras que, el *biochar* es un producto con un mercado nuevo en crecimiento.

El *biochar* cumple funciones ambientales actuando en la regeneración y descontaminación de suelos, cursos de agua y emisiones gaseosas. De esta forma, su utilización genera un gran impacto en las metas de disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero y secuestro de carbono, contribuyendo al camino hacia una neutralidad de CO₂ en 2050. El carbón activado es un agente purificador de múltiples aplicaciones con una demanda importante para la purificación del agua, satisfaciendo la necesidad básica del agua potable. Su oferta actual es totalmente importada.

La producción de biochar fue estudiada en plantas de pirólisis modulares fácilmente escalables en dos escalas, 600 y 3.000 t/año, para modalidades de autoabastecimiento y abastecimiento mixto, 20 % propio y 80 % comprado en un radio promedio de 25 km. Ambas fueron encontradas rentables, siendo el costo de la biomasa el que más incide en el resultado operativo, pero en el segundo caso se encontró también una importante incidencia del transporte.

Fue estudiada la producción de carbón activado por activación física del biochar en el mismo tipo de plantas para dos escalas, 300 t/año y 1.500 t/año, con iguales modalidades de abastecimiento que el biochar. La producción de 300 t/año no es rentable bajo las condiciones de estudio debido a la pequeña escala y el alto

monto de la inversión. Sin embargo se viabiliza al aumentar la escala en un factor de 5 para las condiciones estudiadas.

El WPC fue propuesto como un consumidor en la cadena de reciclaje de los residuos plásticos, profundizando las acciones de economía circular tanto para los residuos de madera como de plástico y cuando sustituye la madera preservada, contribuye a la disminución de la introducción de químicos al sistema. En el caso del WPC, se obtienen valores de evaluación financiera favorables, por lo que la inversión podría ser viable según los supuestos y estimaciones asumidas.

Los tres productos evaluados admiten otros tipos de biomasa lignocelulósica en su proceso, factor fundamental para contrarrestar la presión de la competencia por el recurso.

Debería realizarse un estudio y optimización de las condiciones operativas para las diferentes alternativas de biomasa nacionales, teniendo en consideración los destinos finales proyectados, llegando a la realización de pruebas piloto. Durante las pruebas piloto de los procesos termoquímicos deberían ser verificados también los balances energéticos y de coproductos del proceso. El proceso de activación del carbón requeriría mayor profundización experimental.

Se propone también una profundización de la evaluación tecnológica, económica y financiera una vez decidida una locación, teniendo en cuenta en forma integral todos los aspectos energéticos, logísticos, comerciales, empresariales y ambientales implicados sinérgicamente en una biorrefinería. Los aspectos locales tienen alta incidencia, por lo que la localización es muy importante para este estudio

El desarrollo de biorrefinerías involucra una integración de diversos actores y especialidades para un aprovechamiento integral del recurso. Es importante el acercamiento de nuevos actores al ecosistema para la introducción de nuevos conocimientos y acortar distancias tecnológicas. Por ejemplo, Industria petroquímica y de la celulosa, que abren camino en biorrefinerías a nivel mundial.

Para avanzar en nuevos desarrollos tecnológicos, es necesario generar una base sólida en materia de capacidades en recursos humanos, infraestructura e I+D+i, potenciar el vínculo entre academia e industria, promoviendo la investigación colaborativa con la integración multidisciplinaria y pluri-sectorial.

Los residuos madereros son voluminosos y se generan en forma dispersa; las distancias a recorrer a los puertos pueden ser largas y su transporte es caro y prácticamente monopolizado por los camiones. La optimización de toda la logística de suministro y distribución es preponderante para la reducción de costos operativos.

La baja escala de disponibilidad del recurso lleva a un mayor impacto del costo de las inversiones. La asociatividad y la introducción de otras materias primas y de tecnologías flexibles “multi-materia prima” permiten trabajar a mayores escalas. Asimismo, tecnologías modulares son fácilmente escalables permitiendo un inicio con baja inversión y un crecimiento paulatino.

En la medida que se generen proyectos de aprovechamiento se aumenta la competencia por el recurso, aumentando la presión sobre los precios y disminuyendo disponibilidad. Un sistema de establecimiento de precios y poder manejar alternativas para la materia prima contribuirían a estabilizar el precio.

El aprovechamiento de los recursos dispersos y el establecimiento de biorrefinerías son también favorecidos por un contexto de clusterización u otras formas asociativas. optimizando costos logísticos, logrando seguridad de suministro para los inversores y estabilidad en el negocio de los residuos para los aserraderos.

En las micro-zonas cercanas a plantas urbanas podrían incorporarse también carpinterías locales como proveedores de materia prima. Se requieren empresas del sector con mayor capacidad tractora para liderar emprendimientos e inversores de otros rubros con los que las PYMES y MIPYMES podrían asociarse como abastecedores.

El concepto de asociatividad está presente y arraigado en la región Noreste, especialmente entre los pequeños industriales, donde ya existen precedentes, sin embargo no está en la agenda de gran parte del sector. La asociatividad existente debería ser aprovechada y profundizada para dar sostén a la generación de biorrefinerías.

Al evaluar la localización de una potencial industria, deberían estudiarse micro-zonas con un tamaño adecuado al proceso planificado profundizando el análisis de disponibilidad localizado en la zona de interés, teniendo en consideración los tipos de residuos requeridos, las especificaciones de la materia prima y la competencia local por este recurso.

El mundo tiende a valorar especialmente los productos de origen renovable producidos en forma sostenible, con bajo impacto ambiental. Se sugiere aprovechar recursos internacionales disponibles para ello, y desarrollar certificaciones y estrategias de marketing sostenidas en esos aspectos

Existe desconocimiento del consumidor en general sobre los beneficios ambientales de la economía circular y desinterés por contribuir con un consumo responsable. Es necesario trabajar para promover un cambio cultural hacia la bioeconomía en la utilización de los productos provenientes de las cadenas de valor generadas a partir de la producción forestal que en Uruguay está mayormente certificada por su sostenibilidad ambiental, social y económica. Implica un cambio en iniciativas de consumo de la sociedad hacia los bioproductos, valorizando la sostenibilidad productiva y el carácter renovable de las materia primas, así como la circularidad en los procesos de transformación. Se deberían generar políticas de promoción a estos efectos.

Todo esto debe respaldarse en la gran fortaleza del país, que está construyendo una estructura para sustentar y apoyar el desarrollo sostenible de la bioeconomía circular a través de diferentes ejes. El rol conductor del gobierno nacional a través de las políticas sectoriales y coordinado con los gobiernos departamentales, es importante para potenciar el desarrollo de un nuevo ecosistema de negocios asociado a la biomasa residual a través de:

- Políticas de incentivo a la creación de industrias de diversificación de la bioeconomía forestal que contribuyan al desarrollo de la Economía Circular
- Políticas productivas para la atracción de inversores de otros rubros: industria química, biotecnológica, alimentaria, farmacéutica, plástico
- Políticas de financiamiento alineadas a indicadores de circularidad y sostenibilidad
- Promoción de la cadena a través de compras públicas
- Tratados bilaterales o acuerdos comerciales con grupos de países estratégicos para potenciar exportación de estos productos
- Incentivo a redes para la generación de conocimiento
- Trabajo a nivel gubernamental local para comprender las realidades regionales, realización de actividades de promoción, capacitación, y construcción de gobernanzas locales
- Aprovechar las estructuras locales y promoverlas en las zonas que no haya, para permitir un gobierno de cercanía con intervenciones adaptadas localmente (Replicación de experiencia de ADEMA)

- Políticas de promoción para establecimiento de vínculos entre partes interesadas.
- Políticas de capacitación y de promoción de consumo de materiales y productos renovables, provenientes de procesos sostenibles

REFERENCIAS

- A. G. Rodríguez, M. R. (2019). Hacia una bioeconomía sostenible en América Latina y el Caribe: elementos para una visión regional. *LC/TS.2019/25(N° 191)*. Santiago: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Baráibar, F., & Andrada, L. (2018). *Informe Diagnóstico Reciclado. Volúmenes de residuos plásticos no industriales recuperados a nivel nacional. Segunda entrega 2018*. CTPlas (Centro Tecnológico del Plástico), Montevideo. Recuperado el 02 de 02 de 2021, de Centro Tecnológico del Plástico: <https://ctplas.com.uy/wp-content/uploads/2019/03/Informe-PI%C3%A1sticos-ANDE-CTPLAS-2018-Final-Publicable.pdf>
- Bonfiglio, F., & Böthig, S. (2021). *PROPIEDADES FISCOQUÍMICA DE LAS ESPECIES INDUSTRIALIZADAS EN URUGUAY. PROYECTO DE VALORIZACIÓN DE SUBPRODUCTOS DE LA INDUSTRIA DE TRANSFORMACIÓN MECÁNICA DE LA MADERA. INFORME 2*. Latitud, Fundación Laboratorio Tecnológico del Uruguay. Montevideo: MIEM.
- Boscana, Mariana; Boragno, Leonardo. (2017). *Encuesta de Aserraderos Año 2017*. Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. MGAP, División Evaluación e Información. Dirección General Forestal, Montevideo. Obtenido de <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/datos-y-estadisticas/>
- Boscana, Mariana; Boragno, Leonardo. (2020). *Encuesta de Aserraderos 2020*. MGAP. Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca, División Evaluación e Información. Dirección General Forestal. , Montevideo. Obtenido de <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2020-09/INFORME%20FINAL.pdf>
- Böthig, S., Arrejuria, S., & Delgado, Y. (2021). *RELEVAMIENTO DE RESIDUOS. PROYECTO DE VALORIZACIÓN DE SUBPRODUCTOS DE LA INDUSTRIA DE TRANSFORMACIÓN MECÁNICA DE LA MADERA. INFORME 1*. Latitud, Fundación Laboratorio Tecnológico del Uruguay. Montevideo: MIEM.
- Böthig, S., Arrejuria, S., & Delgado, Y. (2021). *RELEVAMIENTO DE RESIDUOS. PROYECTO DE VALORIZACIÓN DE SUBPRODUCTOS DE LA INDUSTRIA DE TRANSFORMACIÓN MECÁNICA DE LA MADERA. INFORME 1*. Latitud, Fundación Laboratorio Tecnológico del Uruguay. Montevideo: MIEM.
- Böthig, S., Bonfiglio, F., Cagno, M., Rey, F., Martínez, S., Arrejuria, S., . . . Martínez, D. (2021). *IDENTIFICACIÓN DE POTENCIALES BIOPRODUCTOS. PROYECTO DE VALORIZACIÓN DE SUBPRODUCTOS DE LA INDUSTRIA DE TRANSFORMACIÓN MECÁNICA DE LA MADERA. INFORME 3*. Latitud, Fundación Laboratorio Tecnológico del Uruguay. Montevideo: MIEM.

- Böthig, S., Bonfiglio, F., Cagno, M., Rey, F., Martínez, S., Arzejuría, S., . . . Martínez, D. (2021). *IDENTIFICACIÓN DE POTENCIALES BIOPRODUCTOS. PROYECTO DE VALORIZACIÓN DE SUBPRODUCTOS DE LA INDUSTRIA DE TRANSFORMACIÓN MECÁNICA DE LA MADERA. INFORME 3*. Latitud, Fundación Lbaoratorio Tecnológico del Uruguay. Montevideo: MIEM.
- Bragatto, J. (2010). *Avaliação do potencial da casca de Eucalyptus spp. para a produção de bioetanol*. Piracicaba: Tesis Doctoral.
- Cagno, M., Martínez, S., & Böthig, S. (2021). *ESTUDIO DE VIABILIDAD ECONÓMICA. PROYECTO DE VALORIZACIÓN DE SUBPRODUCTOS DE LA INDUSTRIA DE TRANSFORMACIÓN MECÁNICA DE LA MADERA. INFORME 4*. Montevideo, Uruguay: MIEM.
- Cebreiros, F., Guigou, M., & Cabrera, M. (2017). Integrated Forest biorefineries: recovery of acetic acid as a by-product from eucalyptus wood hemicellulosic hydrolysates by solvent extraction. *Industrial Crops and Products*, 109, 101-108.
- Dieste, A., Baño, V., Cabrera, M. N., Clavijo, L., Palombo, V., Moltini, G., & Cassella, F. (2018). *Forest-Based Bioeconomy Areas: Strategic products from a technological point of view*. Facultad de Ingeniería. UdelaR, Montevideo. Uruguay.
- Dieste, A., Cabrera, M.N. Calvijo, L., Casella, N. (2019). *La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica*. Facultad de Ingeniería. Universidad de la República. Montevideo: Facultad de Ingeniería. Universidad de la República. Recuperado el 2020, de <https://hdl.handle.net/20.500.12008/22747>
- Dirección de Planificación de la Oficina de Planeamiento y Presupuesto. (2018). *Avances del Proyecto Bioeconomía Forestal 2050*. Montevideo.
- Dirección de Planificación de la Oficina de Planeamiento y Presupuesto. (2019). *Oportunidades para el futuro de la bioeconomía forestal en Uruguay*. Montevideo.
- Dirección Nacional de Energía. (2020). *Balance energético 2019*. Dirección Nacional de Energía. Ministerio de Industria y Energía. República Oriental del Uruguay, Planificación. Estadística y Balance. Montevideo, Uruguay: Gráficos Mosca. Recuperado el 2021, de www.ben.miem.gub.uy
- Doldán, J., & Böthig, S. (2002). Propiedades fundamentales en maderas de especies de prioridad Forestal. *Seminario Avances de caracterización de maderas uruguayas -JICA LATU*.
- Doldán, J., Fariña, I., & Tarigo, F. (2008). Relevamiento de propiedades pulpables de Eucalyptus spp. de plantaciones uruguayas para pulpa Kraft. *Revista Forestal - Sociedad de productores forestales*.
- Guigou, M., Cabrera, M., Vique, M., Bariani, M., Guarino, J., & Ferrari, M. (2018). Combined pretreatments of Eucalyptus sawdust for ethanol production. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 9, 293-304.
- INIA Tacuarembó. (2015). *Mejoramiento en la calidad de la información vinculada con la utilización de la biomasa forestal*.

- Instituto Nacional de Impresiones y Publicaciones Oficiales. (6 de Octubre de 2015). Recuperado el 02 de junio de 2021, de <http://www.impo.com.uy/diariooficial/2015/10/06/documentos.pdf>
- Junta Departamental de Cerro Largo. (23 de Junio de 2011). *juntacerrolargo.gub.uy*. Recuperado el 02 de Junio de 2021, de <http://www.juntacerrolargo.gub.uy/Archivos/Decretos%20y%20Resoluciones/Decretos%202011/DECRETO%2027.11%20Regulacion%20de%20residuos%20aserraderos.pdf>
- Leschinsky, M., Sixta, H., & Patt, R. (2009). Detailed mass balances of the autohydrolysis of *Eucalyptus globulus* at 170 °C. *BioResources*, 4(2), 687-703.
- Ministerio de Industria, Energía y Minería. (2020). *Biovalor: Hacia una economía verde en Uruguay: Estimulando prácticas de producción sostenible y producción sostenibles y tecnología con bajas emisiones al ambiente en sectores priorizados*.
- Ministerio de Industria, Energía y Minería. (2020). *Economía Circular y Cambio Climático. Contribución desde Uruguay a través de la valorización de residuos. El proyecto Biovalor*. MIEM-MA-MGAP-UNIDO-GEF, Uruguay. Obtenido de <https://biovalor.gub.uy/publicacion-final/>
- Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente; Sistema Nacional Ambiental (SNA). (2019). *Plan Nacional Ambiental para el Desarrollo Sostenible*. Montevideo, Uruguay: Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA). Recuperado el 2021, de https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/documentos/publicaciones/Plan_Nacional_Ambiental_para_el_Desarrollo_Sostenible.pdf
- Mussatto, S. I. (Ed.). (2016). *Biomass Fractionation Technologies for a Lignocellulosic Feedstock Based Biorefinery*. Elsevier.
- Presidencia - Oficina de planeamiento y Presupuesto. (2019). *Estrategia Nacional de Desarrollo*. Uruguay: Presidencia de la República.
- Reina, L. (2010). *Influencia de la composición química de la madera de Eucalyptus grandis y Eucalyptus globulus en los parámetros de pulpeo Kraft* (Tesis presentada para Magister en Ciencias Agrarias ed.). Montevideo: Facultad de Agronomía - Universidad de la República.
- Reina, L., Botto, E., Mantero, C., Moyna, P., & Menéndez, P. (2016). Production of second generation ethanol using *Eucalyptus dunnii* bark residues and ionic liquid pretreatment. *Biomass and Bioenergy*, 93, 116-121. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.06.023>
- Resquín, F., Fariña, I., Rachid, C., Rava, A., & Doldán, J. (2012). Influencia de la edad de corte en el pulpeo de *Eucalyptus globulus* plantado en Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, 16(2), 27-38.
- Rodriguez Miranda, A. (2016). *Relevamiento del sector de transformación mecánica de la madera en Rivera y Tranqueras (aserraderos y carpinterías)*. Consultoría a Intendencia Departamental de Rivera, Oficina de Planeamiento y Presupuesto y DINAPYME, Ministerio de Industria, Minería y Energía. Recuperado el 2020

- Rodríguez, A. G., Hitschfeld, M. A., & Mondaini, A. O. (2017). *Bioeconomía en América Latina y el Caribe. Contexto global y regional y perspectivas* (Vol. 215). Santiago: CEPAL. Naciones Unidas. Recuperado el 2021, de https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/42427/1/S1701022_es.pdf
- Sánchez, D. Z. (2020). *Literature review and evaluation of research gaps to support wood products innovation*. Assesment, Joint Institute For Wood Products Innovation. Recuperado el Junio de 2020, de https://bof.fire.ca.gov/media/9688/full-12-a-jiwpi_formattedv12_3_05_2020.pdf
- Sixta, H. (Ed.). (2006). *Handbook of Pulp*. Austria: Wiley-VCH.
- Stafford, W., De Lange, W., Nahman, A., Chunilall, V., Lekha, P., Andrew, J., . . . Trotter, D. (2020). Forestry Biorefineries. *Renewable Energy*, 154, 461-475.
- Tarigo, F. (2020). *Estudio del comportamiento histórico de los Eucalyptus spp.* LATU - Sin Publicar.
- Uruguay Transforma. (29 de Noviembre de 2019). *Plan de Acción en Economía Circular*. Obtenido de <https://www.uruguayemprendedor.uy/uploads/recurso/f9b7b28f1f6db547ffd9f1306f1a740507131cd8.pdf>
- Uruguay XXI. (Abril de 2021). *Sector Forestal en Uruguay*. Recuperado el 19 de Mayo de 2021, de <https://www.uruguayxxi.gub.uy/es/centro-informacion/articulo/sector-forestal/>
- UTE. (s.f.). *Composición energética*. Recuperado el 20 de Agosto de 2021, de <https://portal.ute.com.uy/composicionenergetica>