
Universidad de la República
Centro Universitario Regional Noreste
Sede Tacuarembó
Ingeniería Forestal

**EFECTO SOBRE EL CONTENIDO DE HUMEDAD DE
ASTILLAS Y ROLOS DE *Eucalyptus spp.* DEL SECADO
ASISTIDO BAJO TECHO TRASLÚCIDO**

Pamela Fagúndez Pivetta

Tutor: Ing. Agrónomo MSc Juan Pedro Posse

Co-tutor: Ing. Químico Alejandro Menchaca García

Tacuarembó, 25 de mayo de 2021

PÁGINA DE APROBACIÓN

CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORESTE – SEDE TACUAREMBO

El tribunal docente integrado por los abajo firmantes aprueba el Trabajo Final de Ingeniería Forestal:

Título:

EFFECTO SOBRE EL CONTENIDO DE HUMEDAD DE ASTILLAS Y ROLOS DE *Eucalyptus spp.* DEL SECADO ASISTIDO SOBRE TECHO TRASLÚCIDO

Autor/es:

Pamela Fagúndez Pivetta

Tutor:

Ing. Agrónomo MSc Juan Pedro Posse

Co-tutor:

Ing. Químico Alejandro Menchaca García

Puntaje: _____

Tribunal:

Profesor.....(nombre y firma).

Profesor.....(nombre y firma).

Profesor.....(nombre y firma).

FECHA:

AGRADECIMIENTOS

Quiero y debo dirigirme primero a la persona responsable de generar en mí el impulso necesario para no bajar los brazos en este proceso, quien a pesar de saber que no podría estar físicamente conmigo, cinco palabras fueron suficientes para hacer posible el aquí y ahora, finalizando mi tesis de grado. “Pamela, no dejes de estudiar”, gracias mamá porque sé que has estado presente a pesar de haber partido temprano, y por ello en ningún momento me permití truncar este capítulo que ambas anhelamos.

Agradezco a todas las personas que me recargaron la mochila de valores que intentaré plasmar en mi vida profesional, por esa calidad humana que refuerza las ganas de progresar.

Gracias a Juan Pedro por no aflojarle ni dejarme aflojar, a Virginia y Natalia por su excelente disposición desde el “vamos”. A cada persona en el frigo que me estiró la mano para hacer posible materializar el proyecto y cada muestreo.

A Menchu y Santiago por las oportunidades y la confianza que me hicieron crecer mucho.

A mi familia, amigos, mi compañero y Él.

RESUMEN

Se presenta el estudio de una propuesta tecnológica para secar astillas de *Eucalyptus spp.* en una planta industrial como alternativa a la tecnología de secado a la intemperie sin estiba utilizada actualmente en la empresa. Las astillas de madera se queman en un gasógeno para la generación de vapor para una planta frigorífica. Se propone una infraestructura con techo de polietileno para la estiba de las astillas, se comparan el contenido de humedad de las astillas bajo techo, contra astillas estibadas a la intemperie hasta lograr un contenido de humedad objetivo para el momento de la combustión, en diferentes períodos del año. Se analizan las diferencias estadísticas entre los tratamientos estudiados, sumado a la influencia de las variables climáticas de cada período de estudio.

Se evalúa también la viabilidad económica de implementar la tecnología teniendo en cuenta indicadores que cuantifican el costo de inversión, sobrecostos de logística y el ahorro en consumo de combustible al secar la totalidad de la leña consumida bajo el sistema en estudio. Para este análisis se calcula el Valor Actual Neto de un flujo de cinco años de implementación y la tasa interna de retorno del proyecto.

Los resultados indican que la tecnología evaluada permite disminuir el contenido de humedad de las astillas de *Eucalyptus spp.* al momento de la combustión frente a la tecnología actual de la empresa que consiste en descargar las astillas a la intemperie sin estiba. La implementación del secadero asistido permite lograr diferencias estadísticamente significativas en relación al contenido de humedad frente al tratamiento sin techo. Se evidencia una ganancia también en el tiempo necesario para el secado de las astillas. En el mismo sentido el análisis económico muestra que la aplicación de la tecnología resulta en ahorros significativos de recursos para un periodo de análisis de cinco años.

ABSTRACT

A technological proposal to dry *Eucalyptus spp.* firewood in an industrial plant as an alternative to the unpacked outdoor drying technology currently used in the company is presented. The wood is burned in a gas generator in order to generate steam for a slaughterhouse. A wooden structure covered with a polyethylene roof is proposed for the stowage of the firewood. It is compared the moisture content of the firewood under roof with the firewood outdoors until a target moisture content is reached in different periods of year. Statistical differences between the studied treatments and the influence of climatic variables for each study period are analyzed.

An economic analysis of the viability of implementing the technology is also evaluated taking in consideration indicators that quantify the investment cost, logistics overruns, and savings in fuel consumption when drying all the firewood consumed under the system proposed. Net present value of a cash flow of five years is presented and also the internal rate of return of the project is calculated.

Results indicate that the update technology allows to reduce the moisture content of the *Eucalyptus spp.* firewood at the time of combustion compared to the current technology used by the company that consists of keeping the chips without a roof or stowage. The use of the assisted dryer shows statistically significant differences in relation to the moisture content compared to the treatment without a roof. There is also evidence of a gain in the time necessary for drying the firewood. In the same sense, the economic analysis shows that the application of the technology results in significant savings of resources for a period of analysis of five years.

ÍNDICE DE CONTENIDO

GLOSARIO DE TÉRMINOS	11
1. INTRODUCCIÓN	12
1.1. Breve presentación de la empresa.....	12
1.2. Demanda y generación de vapor para el proceso	13
1.3. Caracterización del clima en Uruguay	14
1.4. La madera como material.....	18
1.4.1. Contenido de humedad en la madera	19
1.4.2. Mecanismos y factores de intercambio.....	20
1.4.2.1. Aire húmedo.....	21
1.4.2.2. Migración del agua en la madera.....	23
1.5. Secado al aire	24
1.5.1. Madera de <i>Eucalyptus spp.</i> seca al aire.....	25
1.6. Sobre esta monografía	31
1.7. Objetivos	31
1.7.1. Objetivo general	31
1.7.2. Objetivos específicos	31
2. MATERIALES Y MÉTODOS	32
2.1. Diseño y construcción de secadero.....	32
2.2. Determinación del <i>n</i> óptimo	36
2.2.1. Metodología de muestreo.....	37
2.2.2. Determinación del contenido de humedad.....	41
2.3. Análisis económico	41
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	44
3.1. Determinación del tamaño mínimo de muestra.....	44
3.2. Modelos estadísticos	44
3.2.1. Estudio de diferencias entre tratamientos por período.....	44
3.2.1.1. Piloto.....	44
3.2.1.2. Otoño	47

3.2.1.3. Invierno	49
3.2.2. Estudio de modelo completo	52
3.2.3. Estudio de modelo para piloto	53
3.2.4. Estudio de modelo para otoño	54
3.2.5. Estudio de modelo para invierno	54
3.3. Condiciones climáticas versus serie histórica	57
3.3.1. Comparación en período agosto-octubre 2019	57
3.3.1.1. Temperatura promedio del aire	57
3.3.1.2. Heliofanía	58
3.3.1.3. Precipitación acumulada	58
3.3.1.4. Porcentaje de humedad relativa ambiente	59
3.3.2. Comparación en período abril-mayo 2020	59
3.3.2.1. Temperatura promedio del aire	59
3.3.2.2. Heliofanía	60
3.3.2.3. Precipitación acumulada	60
3.3.2.4. Porcentaje de humedad relativa ambiente	61
3.3.3. Comparación en período agosto-setiembre 2020	61
3.3.3.1. Temperatura promedio del aire	61
3.3.3.2. Heliofanía	62
3.3.3.3. Precipitación acumulada	63
3.3.3.4. Porcentaje de humedad relativa ambiente	63
3.4. Análisis económico	64
3.4.1. Coeficiente de apilado	64
3.4.2. Densidad y capacidad de tinglado	65
3.4.3. Flujo de fondos	70
3.4.4. Análisis de sensibilidad	71
4. CONCLUSIONES	72
5. RECOMENDACIONES	73
6. BIBLIOGRAFÍA	74

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Se describen a continuación algunos términos de relevancia que serán utilizados en la monografía

Alfajía: Viga de madera

Astilla: Fragmento irregular de un rolo de madera.

Contenido de humedad de equilibrio higroscópico: es aquel contenido que alcanzaría a tener la madera en ciertas condiciones de temperatura y humedad ambiente si las mismas permanecieran constantes [1].

Densidad de la madera: Siendo la densidad, la relación entre la masa y el volumen de un cuerpo, se pueden definir para la madera por ser un material poroso, una densidad real y una aparente [1].

La densidad real: es aquella en que se descuentan todos los espacios huecos para su determinación, es muy similar para todas las especies, pues depende de la densidad de la lignina, celulosa, hemicelulosas y extractivos, su valor oscila aproximadamente entre 1,51 y 1,56 g/cm³ [1].

La densidad aparente: toma en consideración los espacios porosos de la madera, por lo que es un valor variable según la estructura de la misma y su contenido de humedad. Se determina el cociente en la masa y el volumen [1].

Densidad aparente anhidra: se toman la masa de la muestra anhidra y el volumen en las mismas condiciones [1].

Densidad aparente normal: la masa y el volumen se determinan con la muestra seca al aire, es decir, con un contenido de humedad equivalente al de equilibrio higroscópico [1].

Densidad aparente verde: es la que posee la planta viva, pudiendo considerarse que corresponde a su máximo volumen [1].

Densidad aparente básica: es la masa de la madera anhidra y el volumen de la madera en estado verde [2].

Peso específico: es el cociente entre la densidad de la madera y la densidad del agua [1].

Rolo de madera: Tronco de árbol apeado que se corta a dimensiones normalizadas, para este trabajo, los rolos son de medio metro de longitud.

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se busca evaluar las ventajas de modificar la metodología de secado de astillas de *Eucalyptus* spp. utilizada en una planta industrial actualmente. Se evalúa si la tecnología alternativa propuesta mejora los tiempos de secado y el contenido de humedad de las astillas al momento de su combustión para la generación de vapor.

La disposición actual de las astillas no presenta una configuración de estiba ni disposición definidas, las astillas se distribuyen en parvas a lo largo del terreno de la empresa destinado para tal fin, durante un tiempo de secado al aire que oscila entre los tres a seis meses. El contenido de humedad final de las astillas al momento de su combustión es variable, encontrándose en un rango que oscila en porcentajes menores a 25% en verano hasta mayores a 40% en invierno.

La alternativa que se propone, busca homogeneizar el contenido de humedad de las astillas en el eje de 27% de humedad en base húmeda, por lo que se analizan los tiempos de secado necesarios para lograr este contenido en diferentes momentos del año. Sumado a esto, se propone una configuración de estiba para las astillas y la implementación de un techo de polietileno transparente que mantenga las condiciones de radiación normales, pero evite la exposición directa a la precipitación; de esta forma el proceso de secado no se vería alterado por la adición de humedad durante los eventos de lluvia.

Para evaluar la eficacia de esta propuesta, se realiza un análisis estadístico que valide la significancia del tratamiento de secado bajo techo contra el secado a la intemperie, también se analiza el comportamiento climático del período de análisis en comparación a una serie histórica de treinta años para evaluar cualitativamente si este comportamiento acompaña los patrones climáticos de la serie. Finalmente, se estudia la viabilidad económica de la tecnología propuesta mediante un análisis económico de flujo de fondos, donde se tienen en cuenta la inversión inicial del proyecto necesario para la colocación del techo, los sobrecostos de logística y el ahorro en el consumo de leña producto de una mejora en el poder calorífico inferior al momento de la generación de vapor.

1.1. Breve presentación de la empresa

La empresa donde se desarrolla el estudio es Marfrig Global Foods, una de las compañías líderes en la producción de carne de vacuno del mundo, con veintitrés unidades de faena, doce de procesamiento y ocho centros de distribución instalados en Brasil, Argentina, Uruguay, Chile y Estados Unidos. La compañía está consolidada en América y atiende a diferentes localidades del globo de acuerdo con las demandas y necesidades de cada región.

Entre sus unidades productivas se encuentran las instalaciones ubicadas en la ciudad de Tacuarembó (Uruguay), ubicada en la intersección de Ruta Nacional N°5 Brigadier Gral. Fructuoso Rivera y Ruta Nacional N°26 Gral. Leandro Gómez, con un área edificada de 55.000 metros cuadrados (m²) aproximadamente.

Esta planta frigorífica brinda trabajo a más de 1.000 operarios, que se encargan de mantener la unidad produciendo a su capacidad nominal de faena de 800 reses por día.

Su consumo de agua es de 2.500.000 litros (l) diarios, a razón de 200.000 litros por hora (l/ h) pico. ¹

Para atender su consumo energético su potencia instalada es de 2500 kilovoltiamperio (KVA) en transformadores de 30 kilovoltio (kv) / 0.4 kv (dos transformadores de 1250 KVA cada uno) y de 3750 KVA en transformadores de 30 kv/0.22 kv, (tres transformadores de 1250 KVA cada uno). Cuenta además con un aerogenerador de 1.8 megavatio (MW) de potencia en 31.5 kv.¹

1.2. Demanda y generación de vapor para el proceso

La generación de vapor para el proceso productivo se realiza en dos calderas a leña con capacidad de 8.000 kilogramos por hora (kg/h) de vapor cada una, y una caldera a fuel oil de respaldo de 8.000 kg/h; la capacidad de generación de vapor actual ronda los 24.0000 kg/h a 6 kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm²) de presión manométrica.

Actualmente, el frigorífico se abastece de leña de *Eucalyptus* spp., la cual es comprada a boca de caldera a proveedores externos a la empresa. Las especies generalmente utilizadas son *E. dunnii*, *E. camaldulensis*, *E. tereticornis*, *E. globulus*. La leña es descargada en astillas de aproximadamente medio metro de largo, y se estaciona durante tres meses en verano y primavera o seis meses en invierno y otoño, para luego ser quemada en la caldera. El estacionamiento de la misma es realizado al aire libre y sin una disposición determinada, no existen configuraciones de estibado, y las pilas se depositan sobre la vegetación y sin protección contra lluvia o rocío.

Las características de la madera y la diversidad de fuentes de abastecimiento, así como la logística de gestión del material combustible determina una alta variabilidad en el contenido de humedad del material al momento de la combustión. A su vez las condiciones ambientales contribuyen a la variabilidad en contenido de humedad, teniendo un impacto directo en la eficiencia de generación de vapor final de la caldera, dado que cuanto mayor sea el contenido de agua en la madera, mayor es el gasto energético necesario para evaporarla, perdiéndose con ello energía calorífica para generar el vapor necesario para el proceso productivo, generando una mayor demanda de madera.

Estabilizar el contenido de humedad a lo largo del año, evitando que la leña estacionada entre en contacto con el suelo, precipitaciones y demás condiciones adversas se transforma por tanto en una herramienta crucial para lograr homogeneizar el contenido de humedad de la leña que ingresa a la caldera y capturar los gastos derivados a la compra de mayores volúmenes de leña para compensar las pérdidas de energía en evaporación de agua.

Existe un aumento en el nivel de faena, pasando de 13.600 reses mensuales en 2016, a un promedio de 16.000 reses por mes para 2018. Este aumento en el nivel de faena significó un aumento en el consumo de madera cercano al 5%, pasando de 900.000 kilogramos (kg) mensuales a 950.000 kg mensuales, con picos que superan las 1.000 toneladas por mes.

Esta evolución representa una demanda energética constante, que debe ser acompañada de planes de reducción, ahorro y optimización constantes, en base a una mejora continua en la gestión.

Existe por tanto la oportunidad de ahorro en el consumo de leña, debido a una mayor eficiencia al momento de la combustión en el hogar, sin desviar grandes demandas energéticas a evaporar el agua libre contenida en la madera, lo cual trae consigo un ahorro monetario cuantificable.

1.3. Caracterización del clima en Uruguay

Uruguay es un país que se caracteriza por tener estaciones bien definidas, las temperaturas medias anuales tienen en general una orientación de suroeste a noreste; siendo la temperatura media de 17.5°C con la isoterma media máxima de 19°C sobre Artigas y una mínima de 16°C sobre la costa atlántica de Rocha [3].

Las precipitaciones por su parte presentan un gradiente que crece en dirección sur a norte, siendo las mínimas de 1100mm anuales, alcanzando en el noreste a 1400 e inclusive 1500 mm anuales. Los vientos presentan un marcado predominio desde el noreste a este, con velocidades del orden de 4m/s. La insolación media acumulada para todo el país es de 2500 horas anuales, promediando unas 6 horas y 48 minutos diarias de sol efectivas.

Es posible diferenciar durante el año cuatro estaciones demarcadas que presentan diferente comportamiento en cuanto a temperatura, precipitación, humedad relativa, etc. Las mismas son verano, otoño, invierno y primavera. A continuación, se describen sus características de acuerdo a un relevamiento realizado por INUMET para el período comprendido entre los años 1981-2010 [3].

En verano (diciembre, enero y febrero) temperatura media en la estación se estima en 23,4°C con una desviación estándar de 0,7°C. Si bien las isolíneas de mayor temperatura al norte del país alcanzan los 25°C como se observa en el Gráfico 1.

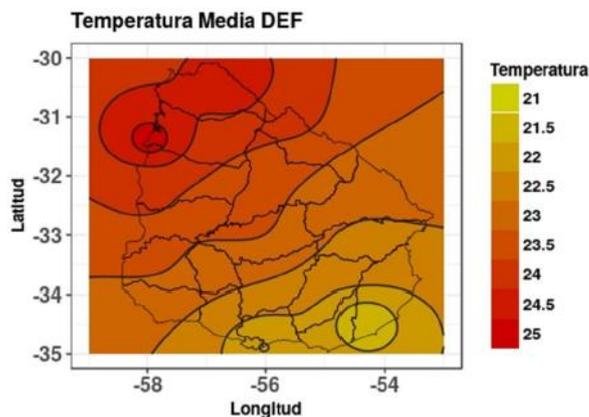


Gráfico 1. Temperatura media en verano para Uruguay.

En cuanto a la precipitación, es la estación que más deja en evidencia la variabilidad espacial y temporal que presentan las mismas en el país como se observa en el Gráfico 2.

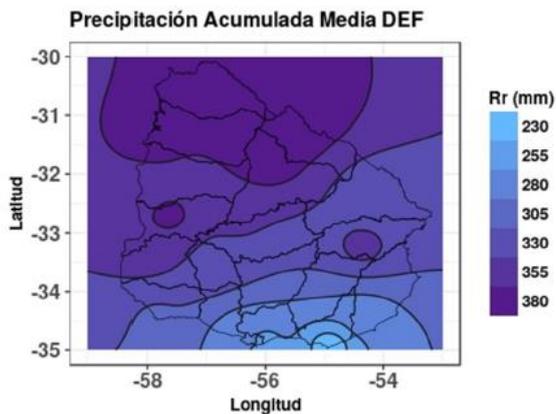


Gráfico 2. Precipitación acumulada en verano para Uruguay.

El valor medio para el período es de 346,0 mm con una desviación estándar de 130,0mm. El mes de febrero es el que presenta las mayores precipitaciones en los 30 años de estudio con 130.7mm en promedio.

En otoño (marzo, abril y mayo) en lo correspondiente a temperatura, las isolíneas más elevadas, al igual que para las demás estaciones, se encuentran situadas al norte del país, sobre los departamentos de Artigas y Salto principalmente como se observa en el Gráfico 3, mientras que la dirección decreciente se genera hacia el sur, sobre la costa del Río de la Plata. El valor promedio de temperatura es de $18,3^{\circ}\text{C}$ con una desviación de $0,6^{\circ}\text{C}$.

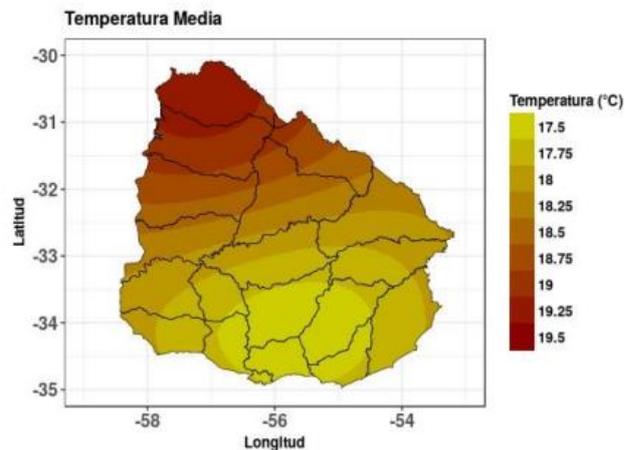


Gráfico 3. Temperatura media en otoño para Uruguay.

En cuanto a la precipitación, si bien es altamente variable, el promedio para la estación registrado es de $365,1\text{mm}$ con una desviación de $134,2\text{mm}$. La lluvia presenta un gradiente suroeste noreste como se observa en el Gráfico 4.

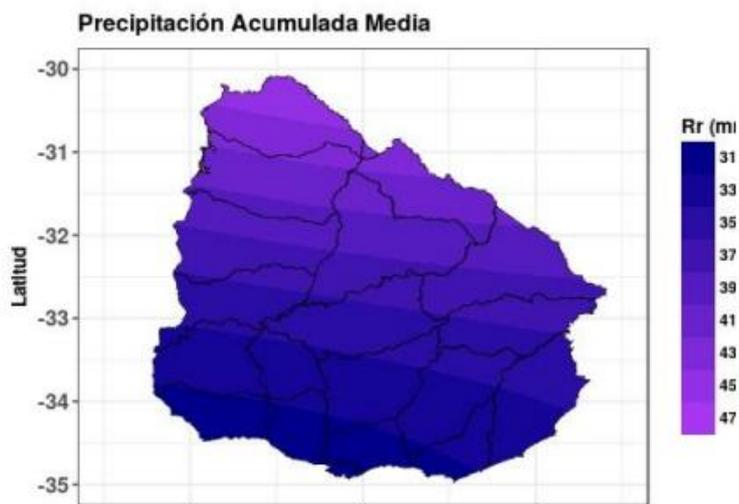


Gráfico 4. Precipitación acumulada en otoño para Uruguay.

En invierno (junio, julio y agosto) la temperatura continúa presentando máximas en zona norte del país, descendiendo al sur como se observa en el gráfico 5. La máxima temperatura relevada

para el período es de 14,5°C al norte, contra 11°C al sur. El departamento de Tacuarembó presenta temperaturas medias entre 12 y 13°C.

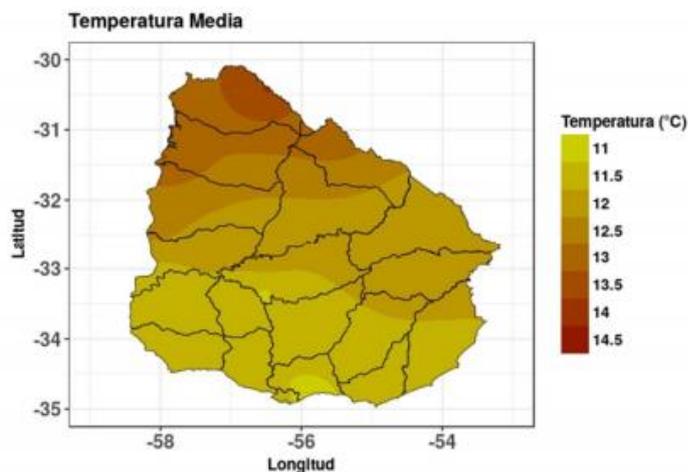


Gráfico 5. Temperatura media en invierno para Uruguay.

La precipitación en el invierno presenta un valor promedio de 256,1mm, y a escala país se observa en el Gráfico 6 un gradiente en dirección Oeste-Este, a diferencia de las demás estaciones que en general presentan un gradiente sur-norte.

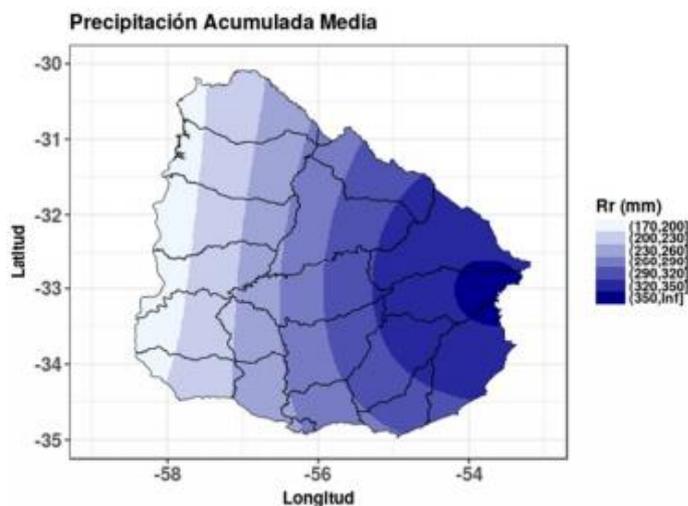


Gráfico 6. Precipitación acumulada en invierno para Uruguay.

Se observa que la zona de Tacuarembó presenta registros de 260 hasta 320mm en el trimestre.

En primavera (setiembre, octubre y noviembre) la temperatura media para este trimestre es de 17,5°C con una desviación estándar de 0,4°C.

La precipitación acumulada en primavera presenta un valor medio de 328,6mm y una desviación estándar de 108,3mm, lo que explicita gran variabilidad para este factor.

1.4. La madera como material

Como características generales, se puede describir a la madera como un material orgánico compuesto químicamente por tres elementos principales, carbono oxígeno e hidrógeno. Estos elementos se combinan para formar tres componentes que son celulosa, hemicelulosas y lignina, que se combinan para establecer la estructura de la madera [4].

La celulosa se presenta como microfibrillas [5] que se agrupan a su vez con cadenas de hemicelulosas, ambas se combinan con la lignina, que actúa como agente cementante.

Tanto la celulosa como las hemicelulosas son polímeros; mientras que la celulosa es lineal, las hemicelulosas se encuentran ramificadas y presentan en general menor peso molecular que la celulosa, las mismas están formadas por diferentes hexosas y pentosas. La celulosa son unidades de glucosa unidas por enlace beta 1-4, y le confieren a la madera su resistencia mecánica. La lignina es un polímero aromático de estructura compleja [4]. Estos componentes se combinan en diferente proporción en las diferentes capas de la pared celular para conferirle a la madera células que permitan su estabilidad mecánica, diferente grado de permeabilidad y otras propiedades características de este material.

Otro componente que se presenta entre un 5-20% de la composición de la madera son los extractivos, los mismos están formados por sustancias orgánicas que le otorgan propiedades como color, resistencia a la degradación, densidad, grado de impermeabilidad, inflamabilidad, etc. Pueden estar formados por taninos y otros polifenólicos, resinas, aceites esenciales, gomas, ceras y metabolitos intermediarios [5]. Finalmente, y en pequeño grado (0.2-1.0%) se encuentran componentes inorgánicos como calcio, potasio, magnesio, entre otros, en forma de cristales, drusas, etc. Estos componentes conforman la madera, sin embargo, existe un porcentaje altamente significativo de agua en la madera que supera el 100% en base seca en la albura de madera verde, y se aproxima al 100% de peso seco en el duramen [5], el cual varía posterior a la cosecha dependiendo de una serie de factores que serán expuestos aquí.

Estos componentes varían su proporción en la madera en función de la especie, la edad del árbol, la posición dentro de un mismo individuo, además de las condiciones de manejo y del propio sitio en el que se desarrolla.

La madera es un material higroscópico, es decir que responde a los cambios de humedad en el ambiente, modificando su contenido de agua en forma de pérdida o ganancia. Estos cambios afectan a su capacidad de ceder energía, es decir, a su eficiencia como material combustible. Cuanto menor sea el contenido de humedad en la madera mayor es la producción de calor por unidad de masa durante la combustión. A este valor se le conoce como poder calorífico inferior, el cual es la energía calorífica que no tiene en cuenta el calor latente del agua que se pierde por llevar el agua contenida en la madera y generada en la combustión a estado de vapor [6].

Quemar madera en forma directa para obtener energía calorífica para un proceso es una medida utilizada en las industrias para abastecer parte de su demanda energética interna, inclusive esta energía calorífica puede finalmente transformarse en energía eléctrica dependiendo los requisitos.

Optimizar su capacidad como material combustible resulta entonces un factor clave para gestionar de forma adecuada el proceso, a la vez de utilizar una fuente de energía renovable para el mismo. Una serie de factores influyen la tasa de pérdida de humedad de la madera, entre ellos la presencia de corteza la cual disminuye la tasa de secado en sentido radial, además del diámetro de la troza en cuestión. Una troza de menor diámetro y contenido de corteza secará más rápido. Cuando el 100% de la corteza está ausente, la tasa de secado puede aumentar hasta tres veces respecto una cobertura total de corteza sobre la troza [7].

La siguiente Tabla [11] muestra el contenido de humedad para madera verde para coníferas y latifoliadas tanto en albura como duramen.

Tipo de madera	Albura [% h.b.s]	Duramen [% h.b.s]
Coníferas	150-200	40-80
Latifoliadas	80-120	60-100

Tabla 1. Valores típicos para contenido de humedad en base seca [% h.b.s]

1.4.1. Contenido de humedad en la madera

Para poder abarcar esta temática, es necesario entender cómo se distribuye el agua en los tejidos vegetales. Se presenta en tres formas:

- El agua de constitución: es la que forma parte de los componentes químicos intracelulares [1].
- El agua higroscópica o adsorbida es la que se encuentra unida a las paredes celulares mediante enlaces químicos [1].

-El agua libre: es la que rellena los poros, conductos y cavidades internas además de impregnar la superficie externa [1].

El agua de constitución se mantiene constante mientras que la adsorbida y libre varían a lo largo del tiempo y según las condiciones ambientales.

El contenido de humedad de la madera verde puede alcanzar hasta el doble de su peso seco, existe un punto llamado punto de saturación de las fibras, que se corresponde con el contenido de humedad que tendría la madera si se pierde completamente el agua libre de ella, en general este valor oscila en torno al 30% en base seca [5]. El agua que supere este valor se corresponde a la proporción de agua libre. La medición del contenido de humedad de la madera se puede realizar, entre otras técnicas, con el método de pesadas que consiste en tomar una muestra cuyo contenido se desea determinar, y secarlo en estufa a 103 (+-2) °C, luego se realizan pesadas sucesivas hasta que dos pesadas consecutivas sean iguales, lo que se considera como peso constante. El contenido de humedad viene dado por [2]:

$$\%CH = \frac{Ph - Ps}{Ps} * 100$$

Donde:

%CH- Porcentaje de humedad en la madera

Ph- Peso de la muestra húmeda

Ps- Peso de la muestra seca

1.4.2. Mecanismos y factores de intercambio

Antes de aclarar en términos generales, los mecanismos de migración de agua en la madera y otros factores asociados se considera importante aclarar ciertos términos referidos al agua contenida en el aire [8]. En la naturaleza, el aire comúnmente presenta un cierto contenido de vapor de agua, conociéndose esta mezcla de aire seco y vapor de agua como aire húmedo. Las características del aire húmedo son factores de alta influencia al momento de analizar un proceso de pérdida de humedad en la madera; de la misma forma que lo son las variables de la madera mencionadas en los apartados anteriores.

1.4.2.1. Aire húmedo

Según la información presente en [8], el aire húmedo es una mezcla de aire seco y vapor de agua, el agua disuelta en el aire es transparente a luz visible, aunque en ciertas condiciones la cantidad de agua presente puede superar el umbral, haciendo que parte del agua se presente en forma de líquido, situación natural conocida como niebla.

El vapor de agua presente en el aire, se encuentra a la misma temperatura que el aire seco, y ambas sustancias pueden ser físicamente modeladas como gases ideales y estudiados a partir de la ecuación de estado de gas ideal: $PV = nRT$, donde $R=8314\text{J/molK}$ es la constante de gas ideal.

La presión atmosférica, a la cual ocurrirá el proceso de pérdida de humedad estudiado en esta monografía, es la presión conocida de 101.325 Pascales (Pa). Esta presión, resulta de la suma de la presión parcial del aire seco y la presión parcial del vapor de agua presente en el mismo, explicada por la ley de Dalton donde dados dos gases A y B la presión total $P_T = P_A + P_B$. Por lo tanto, las transferencias de masa asociadas a cualquier proceso donde esté involucrado el aire húmedo dependerán de la concentración del vapor de agua disuelto en el aire.

La humedad absoluta del aire húmedo es la masa de vapor disuelta por metro cúbico de mezcla, este parámetro también se conoce como densidad de vapor. La misma, aumenta a medida que aumenta la presión parcial de vapor, ya que esto implica tener mayor cantidad de masa por unidad volumétrica. La relación se puede observar en la siguiente fórmula.

$$\rho_v = \frac{m_{agua}}{V} = \frac{p_v}{R_{vapor}T}$$

Donde:

ρ_v , la densidad de vapor

m_{agua} , masa de agua en el aire húmedo

V, volumen de la mezcla

p_v , presión parcial de vapor

R_{vapor} , constante del gas ideal para el vapor de agua

T, temperatura absoluta

La humedad relativa del aire húmedo se define como la relación entre la presión parcial del vapor de la mezcla y la presión de saturación a la misma temperatura.

$$\%HR = \frac{p_v(T)}{p_{v,sat}(T)} * 100$$

Es decir, si se tienen dos mezclas de aire húmedo a la misma temperatura, pero con diferente contenido de humedad, existe un máximo contenido de humedad a una dada temperatura para la cual se alcanza la presión de saturación, y la mezcla no puede contener más vapor de agua; de lo contrario parte de esa agua se presentaría en forma líquida, lo cual podría ocurrir en pocas cantidades en forma de neblinas.

El volumen específico, expresado en metros cúbicos por kilogramo (m³/kg), es el volumen de la mezcla, dividido la masa de aire seco en la misma, el mismo depende proporcionalmente de la temperatura, dado que la presión de vapor es mucho menor que la presión total del aire húmedo, el volumen específico no varía en forma significativa con la presión de vapor. Por tanto, la densidad, que es el inverso de este valor, se asemeja a la densidad del aire seco a la misma temperatura, siendo un poco menor.

La densidad del aire húmedo disminuye a medida que aumenta el contenido de humedad, esto se debe a que una molécula de aire seco masa aproximadamente 29 gramos (g), mientras que una molécula de agua tiene 18g, por tanto, al aumentar el contenido de humedad a la misma presión, se disminuye la masa total de la mezcla.

La humedad específica se representa como los kg de agua por kg de aire seco, en general este valor es muy pequeño ya que se tienen unos pocos gramos de agua por kg de aire seco en la mezcla.

Si se le retira calor al aire manteniéndose el contenido de humedad, su temperatura desciende y ocurre la condensación del agua, lo cual puede manifestarse como rocío o escarcha, según si la temperatura es menor o mayor a 0° Celsius (°C). La temperatura a la cual ocurre esta condensación se conoce como punto de rocío.

En el proceso de secado de la madera, lo que ocurre con el aire es su humectación, esta humectación puede realizarse con o sin adición de calor. En el proceso de secado natural, el sol actúa como una fuente de calor externo que se encarga de la evaporación parcial del agua presente en la madera, donde también el aire húmedo puede ceder calor para evaporar el agua que se lleva en forma de vapor. Por tanto, en este proceso el aire gana humedad, y en la proximidad de la

superficie de la madera puede disminuir su temperatura de bulbo seco, aunque ráfagas de viento pueden ayudar a sustituir la masa de aire próxima a la superficie y hacer el proceso de secado más eficiente.

Dado que la presión de vapor presente en la superficie del agua líquida a retirar de la madera es mayor que la presión del aire, ocurre una transferencia de masa desde el agua libre en la madera hacia el aire, si ambos se encuentran a la misma temperatura, la gota cede energía para evaporarse, lo cual resulta en una disminución de su temperatura. La diferencia de temperatura origina una transferencia de energía desde el aire a la gota, con la consecuente transferencia de masa de la gota al aire. La gota se continúa enfriando hasta que el calor entregado por el aire, iguala al calor que se necesita para evaporar el agua, por tanto, la gota deja de enfriarse y el aire culmina el proceso de evaporación. Esta temperatura de equilibrio se conoce como temperatura de bulbo húmedo. Cuánto más seco se encuentre el aire, mayor será la transferencia inicial de masa de la gota al aire, por lo cual la misma se enfriará más.

Por lo tanto, la transferencia de agua de la gota al aire se da mientras la densidad de vapor del aire saturado alrededor de la gota sea mayor que la corriente de aire que lo rodea, cuanto mayor sea la diferencia entre los contenidos de humedad de estas corrientes de aire, mayor es la cantidad de agua evaporada.

A esta transferencia, se debe agregar la complejidad propia de la migración del agua libre dentro de la estructura de la madera, la cual depende de una serie de factores inherentes a la anatomía de la madera, que varían ampliamente entre especies, sitios, entre otras condiciones.

1.4.2.2. Migración del agua en la madera

Los mecanismos que controlan la ganancia o pérdida de humedad en la madera son: la adsorción del vapor de agua de la atmósfera o absorción del agua líquida (para la entrada del agua), y el drenaje, evaporación y desorción para la salida.

El agua libre se mueve por capilaridad, el vapor de agua se mueve por difusión liberando la humedad de espacios microscópicos de la madera. La difusión de vapor de agua es la forma de eliminar parte del agua libre y el agua higroscópica, proceso llamado desorción. [2]

Si el vapor de agua ingresa o sale del tejido, depende de la diferencia de presión entre la atmósfera y la presión de vapor en la madera, si la presión de vapor en el interior de la madera es menor al exterior, ocurrirá la adsorción que tiende a alcanzar el equilibrio de presiones. Si el caso es

contrario, presión mayor en el interior de la madera, ocurrirá la desorción, cediendo humedad a la atmósfera. Este intercambio lo permite la naturaleza higroscópica de la madera.

Dado que estos cambios ocurren en busca de un equilibrio, y las condiciones climáticas varían constantemente durante el día, ya que el vapor de agua contenido en la atmósfera dependerá de la temperatura (pudiendo admitir mayor contenido de humedad si la temperatura es mayor, expresado en forma de humedad relativa), este proceso oscila constantemente.

Además de estos cambios climáticos, la cinética del agua para entrar o salir de la madera es igualmente variable, el agua libre se elimina con relativa facilidad, con una velocidad que está asociada al gradiente de presiones de vapor anteriormente mencionado, a medida que el contenido de humedad disminuye, se dificulta la difusión del agua al exterior y esto dependerá de la estructura interna del tejido. El proceso de desorción, es decir la eliminación del agua ligada químicamente a las paredes celulares, es regulado también por la disposición interna y las condiciones ambientales, necesitando mayor energía para eliminarla a medida que el contenido de agua disminuye.

Sumado a estas variables, la precipitación y la condensación son eventos que agregan variabilidad al proceso, pues ya no dependerá solamente del intercambio entre la madera y su entorno, sino que se puede agregar contenido de agua al sistema si la misma se encuentra expuesta, como ocurre muchas veces en el caso planteado para esta revisión.

1.5. Secado al aire

La pérdida de humedad de la madera comienza desde el momento mismo que el árbol es apeado, y el proceso se acelera cuando la estación es seca y calurosa, además el mantener el fuste con ramas y hojas y descortezado acelera el proceso. “Es interesante, siempre que no represente un problema de organización de la explotación forestal, el dejar los árboles de 15 a 20 días después de derribados antes de proceder a su desramado [9].”

De no mantener el fuste con follaje, también se puede tener en cuenta que el agua circula más rápidamente en sentido longitudinal que radial, por lo que trozar el árbol en rolos de poca longitud contribuye a acelerar la pérdida de humedad.

La estacionalidad es altamente influyente, los árboles que se corten al final de la estación fría y húmeda como el invierno, tendrán todo el verano para secar lo cual favorece el proceso frente a un árbol apeado a finales de la estación calurosa que deberá secar durante la estación menos favorable.

1.5.1. Madera de Eucalyptus spp. seca al aire

En el proceso de secado de la madera pueden distinguirse tres etapas, partiendo de madera saturada en agua hasta que se evapore el superficial de la pieza, luego se alcanza un punto crítico donde comienza la segunda etapa hasta el punto de saturación de las fibras, y desde este último hasta alcanzar el equilibrio higroscópico. La tasa de secado varía durante el proceso y depende mucho de la velocidad del aire y su temperatura y la humedad relativa de la atmósfera circundante [2].

Una revisión bibliográfica acerca de la tecnología del secado solar durante las últimas tres décadas [10], demuestra que, en la mayoría de los casos, el secado es satisfactorio tanto para el contenido de humedad final logrado, el tiempo de secado y la calidad de la madera, además de ser una tecnología económicamente viable, con algunas excepciones como los hornos de secado solar altamente sofisticados.

Los secaderos solares descritos en la literatura consultada [10], son básicamente de dos tipos; el tipo invernadero, que consiste en una estructura de madera con paredes y techo cubiertos de un material transparente y los colectores solares en la estructura; luego está el otro tipo de secadero, del tipo horno con colector externo, que se encuentra aislado en una cámara, y se conecta al horno a través de ductos también aislados.

Tomando en cuenta el diseño, los secaderos serán el resultado de la combinación del material de cobertura, el área de la misma, el material del suelo y la transparencia a cortas o largas longitudes de onda según el material utilizado, la inclinación y las superficies de absorbanza también son importantes. El secado mediante la exposición al sol es uno de los métodos más antiguos de secado utilizando la energía solar [11].

El secado es un proceso donde el exceso de agua es removido de un producto natural o industrial, para lograr alcanzar el estándar de contenido de humedad especificado, para ello se utiliza energía de manera intensiva.

El método más extendido de secado es mediante convección, es decir un flujo de aire transporta la energía en forma de calor, entrando en contacto con la superficie del producto y transfiriendo su humedad a la atmósfera.

Cuando el producto es expuesto directamente a los rayos solares, existe una circulación de aire caliente que por diferencia de densidad remueve la humedad de la superficie, una vez que la

misma migra desde el interior del cuerpo. Es un método factible en regiones donde la intensidad de radiación solar es alta y el fotoperiodo durante el día es largo.

El secado bajo tinglado permite eliminar el efecto retardador que tienen las lluvias sobre el secado, la ventaja se observa principalmente en invierno en ensayos realizados en Australia con madera de una pulgada de espesor, donde la ganancia en tiempo fue de dos meses [2].

Es un procedimiento económico, especialmente para cantidades pequeñas o medianas de un determinado producto, además, es ambientalmente amigable. La tasa de secado está relacionada directamente con la forma en la que esté contenida el agua a evaporar

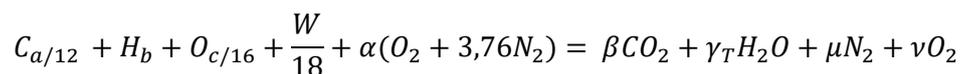
Uno de los objetivos de secar madera que resulta de interés para la empresa dentro de la cual se realiza el estudio, es el incremento en poder calorífico que se obtiene gracias a la reducción en contenido de humedad [2]. Con el interés de reducir el consumo de leña, se presenta el siguiente estudio de una tecnología alternativa de secado para las astillas de *Eucalyptus spp.*

Los cálculos de anteproyecto para estimar el ahorro tentativo de aplicarse la tecnología, se realizan considerando un contenido de humedad en base húmeda de 27% como objetivo con leña secada bajo techo; de esta forma se obtiene el posible ahorro de consumo de leña.

De la misma forma, una vez realizados los ensayos de secado, los resultados reales permiten obtener el verdadero ahorro potencial del proyecto comparándose con el gasto real de leña en el mismo período de ensayo.

Ambos resultados, se obtienen mediante el sistema de ecuaciones presentado a continuación, dado que el contexto actual no permitió realizar una medición de la composición de humos de chimenea, se considera una situación ideal de combustión completa donde la caldera se encontraría por tanto trabajando en las mejores condiciones, con un foguista que optimice la operativa y funcionamiento de la misma.

Partiendo de la composición elemental de la madera utilizada [12] [13] el balance de masa para la combustión completa es:



Donde los valores C, H, O y W son la fracción de carbono, hidrógeno, oxígeno y agua respectivamente, en base seca de madera. De este balance se obtiene que:

$$\beta = \frac{a}{12}$$

$$\gamma_T = \frac{W}{18} + \frac{b}{2}$$

$$\mu = 3,76\alpha$$

$$\nu = \alpha - \alpha_q$$

Donde α_q es la fracción de aire estequiométrico y la relación entre α_q y α viene dada por el exceso de aire de la siguiente forma $E = \frac{\alpha - \alpha_q}{\alpha_q}$ y $\alpha_q = \frac{a}{12} + \frac{b}{4} - \frac{c}{32}$

El balance de energía aplicado a la caldera es el siguiente [14]:

$$W_{leña\ húm} [(1 - W_{bh,leña})PCS + W_{bh,leña}[c_{p\ agua}(Ta - To)] + (1 - W_{bh,leña})C_{pm}(Ta - To) + 139(1 - W_{bh,leña})\alpha c_{p\ aire}(Ta - To)] + W_v(hf - hv) = W_{leña\ húm}(1 - W_{bh,leña})[\beta h_{sCO_2} + \gamma_T(h_{sH_2O} + 18h_{fg,25^\circ C}) + \mu h_{sN_2} + \nu h_{sO_2}]$$

Donde el factor 139 corresponde a:

$$32 \left(\frac{kg\ O_2}{kmol\ O_2} \right) * \frac{1}{0.23} \left(\frac{kg\ aire}{kg\ O_2} \right)$$

Siendo:

$$PCS: Poder\ calor\ superior\ del\ combustible \left(\frac{kcal}{kg\ leña\ seca} \right)$$

$$c_{p\ agua}: Calor\ específico\ del\ agua \left(\frac{kcal}{kg\ agua^\circ C} \right)$$

Ta: Temperatura de entrada del combustible y del aire ($^\circ C$)

To: Temperatura del estado de referencia ($^\circ C$)

$$C_{pm}: Calor\ específico\ madera \left(\frac{kcal}{kg\ madera\ secaK} \right)$$

$$c_{p\ aire}: Calor\ específico\ del\ aire \left(\frac{kcal}{kg\ aire^\circ C} \right)$$

hf: Entalpía agua subenfriada a la temperatura de alimentación y presión de operación de la caldera ($\frac{kcal}{kg}$)

hv: Entalpía del vapor saturado a 7 bar absolutos ($\frac{kcal}{kg}$)

h_{sCO₂}: Entalpía del dióxido de carbono a la temperatura de salida de los humos ($\frac{kcal}{kmol}$)

h_{sH₂O}: Entalpía del vapor de agua a la temperatura de salida de los humos ($\frac{kcal}{kmol}$)

h_{N_2} : Entalpía del nitrógeno gaseoso a la temperatura de salida de los humos ($\frac{kcal}{kmol}$)

h_{O_2} : Entalpía del oxígeno gaseoso a la temperatura de salida de los humos ($\frac{kcal}{kmol}$)

T_{ch} : Temperatura de salida de humos ($^{\circ}C$)

$h_{fg,25^{\circ}C}$: Calor de vaporización del agua a $25^{\circ}C$, ($\frac{kcal}{kg}$)

El poder calorífico superior se considera 4000 kcal/kg leña seca, siendo más conservador que el valor indicado en [2].

Se trabaja a partir de las ecuaciones presentadas con un exceso de aire de 18%, valor obtenido con datos históricos de consumo y humedad, y verificado luego de realizado un estudio de combustión en la caldera por una empresa tercerizada.

Para estimar el ahorro potencial se realizan los cálculos con un histórico de dos años de información (2018-2019), se presentan en la siguiente Tabla 2.

Mes	Consumo leña real [kg]	Consumo leña c/proyecto [kg]	Ahorro leña [kg]
Ene-18	825.748	811.609	14.139
Feb-18	735.755	800.089	- 64.333
Mar-18	848.567	922.764	- 74.198
Abr-18	936.319	978.231	- 41.912
May-18	1.092.036	981.368	110.668
Jun-18	1.385.125	1.202.156	182.969
Jul-18	115.287	98.848	16.440
Ago-18	1.092.951	983.309	109.642
set-18	1.212.310	1.086.369	125.941
Oct-18	1.235.788	1.059.569	176.219
Nov-18	1.083.897	1.035.759	48.138
Dic-18	891.973	871.300	20.673
Ene-19	883.708	911.922	- 28.213
Feb-19	910.736	953.014	- 42.278
Mar-19	1.084.573	997.959	86.614
Abr-19	1.161.012	1.068.294	92.718
May-19	1.202.420	1.079.968	122.453
Jun-19	1.262.153	1.063.497	198.656
Jul-19	390.397	352.048	38.349
Ago-19	1.262.421	1.078.937	183.485
set-19	1.192.340	1.094.046	98.294
Oct-19	1.119.341	1.001.108	118.233
Nov-19	1.051.595	985.881	65.714
Dic-19	764.705	786.284	- 21.579

Tabla 2. Resumen de cálculos realizados para estimar el ahorro de consumo y costos asociados.

Existen períodos en que la humedad y otras condiciones operativas hacen que los valores de capturas estimadas sean en realidad negativos, teniendo en cuenta que podrían lograrse humedades aún menores, es posible que esta captura teórica sea inclusive mayor en la práctica. Esta situación se observa principalmente en verano y es por este motivo que para futuras consideraciones esta estación no se tuvo en cuenta ya que no representa un desafío a mejorar con los límites impuestos.

La captura esperada según las estimaciones resulta en un 6% del consumo en el período considerado, lo cual, representa 55.326 dólares (US\$) ganados en un año, considerando que la captura resulte en un 80% del valor calculado como ahorro teórico, la magnitud de este ahorro se puede visualizar en el Gráfico 7 y leer en la Tabla 3.

Captura leña [kg]	Captura máxima [US\$]	Captura al 80% [US\$]
1.536.829	110.652	88.521

Tabla 3. Análisis de anteproyecto, captura estimada.

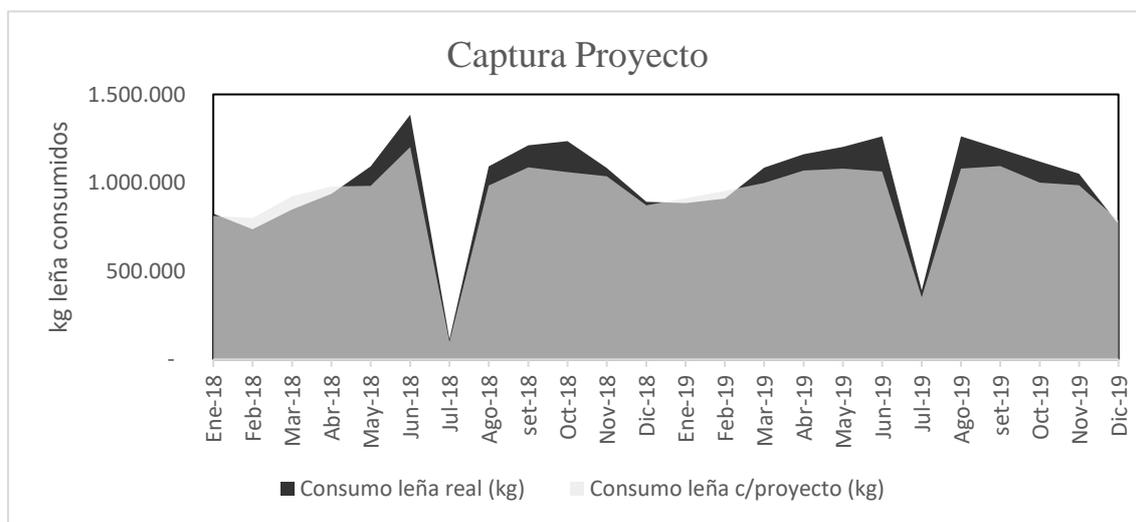


Gráfico 7. Análisis de anteproyecto, captura estimada.

1.6. Sobre esta monografía

Este documento presenta una tecnología alternativa a ser aplicada en una planta industrial para mejorar la eficiencia en el uso de un biocombustible. Se describen en él primeramente las características de la empresa dentro de la cual se realiza el análisis, luego la forma en la cual se pretende estructurar el desarrollo del estudio.

La tecnología propuesta tiene como objetivo disminuir el contenido de humedad de la leña de forma que se incremente el poder calorífico inferior del combustible utilizado al momento de la combustión en gasógeno, para lograr de esta forma, reducir el consumo neto de combustible de la empresa y consecuentemente generar un ahorro de costos que compense la implementación de la propuesta.

Para ello, se realiza un muestreo estandarizado mediante análisis estadístico y se diferentes modelos en base a las muestras colectadas, además, se estudia la rentabilidad de la tecnología a través de un análisis económico.

1.7. Objetivos

1.7.1. Objetivo general

El objetivo general del proyecto es analizar el impacto del secado solar natural bajo techo de polietileno sobre el contenido de humedad de astillas para leña del género (astillas de *Eucalyptus spp.*) para proponerlo como tecnología alternativa a la metodología de secado actual de una industria.

1.7.2. Objetivos específicos

Modelar el proceso de pérdida de humedad en astillas con y sin secado solar natural

Realizar análisis económico para estudiar la rentabilidad de la implementación de la tecnología evaluada.

Comparación de la evolución del porcentaje de humedad en dos situaciones contrastantes (con y sin techo) en diversas estaciones considerando los cambios en condiciones climáticas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

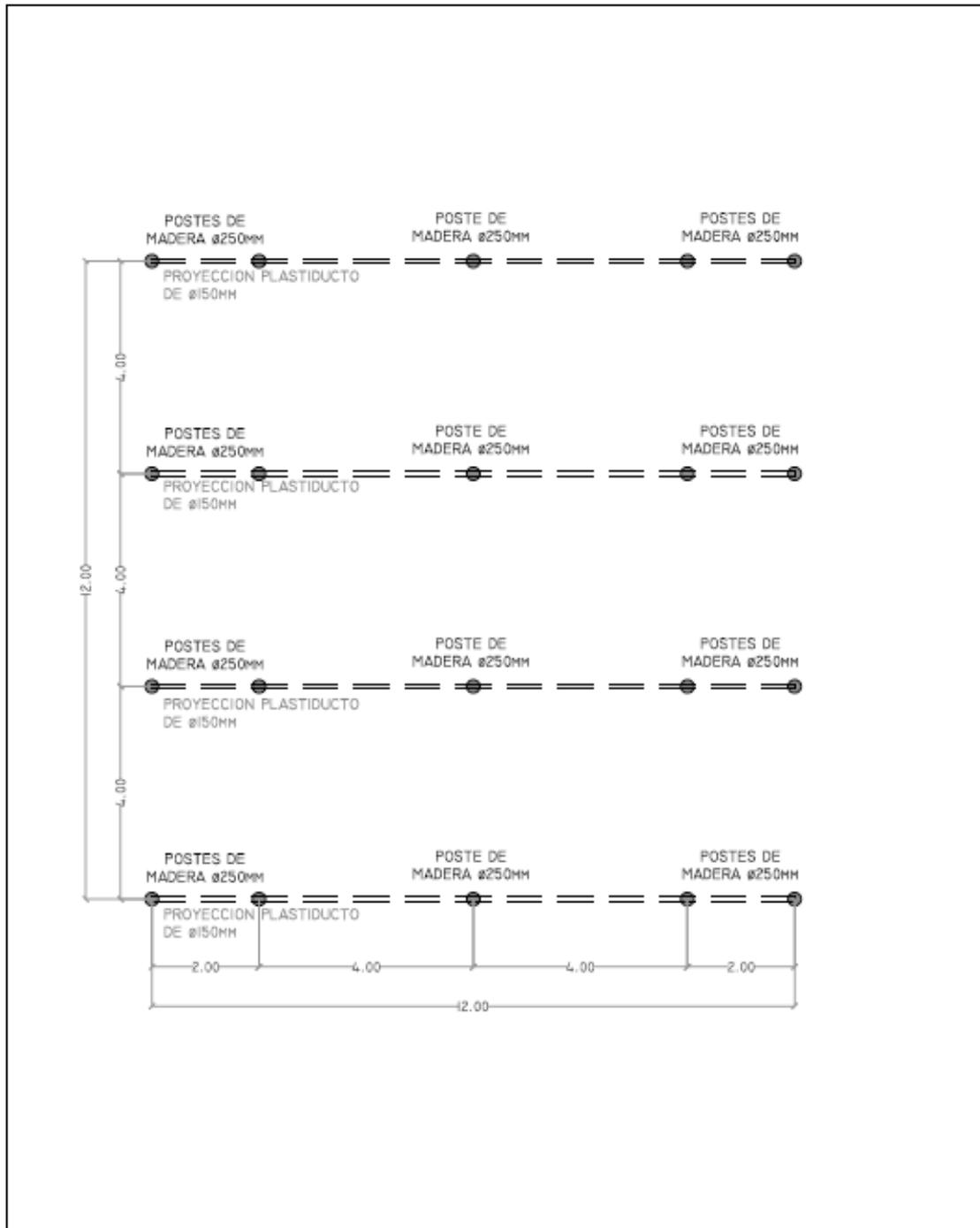
2.1. Diseño y construcción de secadero

Para realizar el tratamiento con techo, se construyó una estructura en madera, sin paredes laterales y con techo de polietileno en forma de arco. Dicha estructura presenta dimensiones de 12m*12m con una altura máxima del arco de 5m en su zona media, y 2m en los bordes.

Se encuentra posicionado en la zona de mayor altitud del predio de la planta industrial, con orientación longitudinal en sentido E-O, favoreciendo el pasaje de los vientos dominantes en esa dirección. La geología del sitio corresponde a areniscas de formación Tacuarembó, finas a medias, de coloraciones blancas y rosadas.

La estructura se sostiene con columnas tratadas con CCA (arseniato de cobre cromatado) de *Eucalyptus grandis*, sostenidas con una base de hormigón a un metro de profundidad. Las columnas exteriores son de 3m de largo, con 25cm de diámetro a la base y 15cm en punta fina, las columnas medias son de 5m de largo, con 25cm de diámetro a la base y 18cm en punta fina; y las columna

as al medio son de 6m de largo, con 25cm de diámetro a la base y 18cm en punta fina. Las Imágenes 1, 2 y 3 ilustran estas aclaraciones. El techo en arco presenta una estructura de tubo plástico de 2", donde se sostiene el nylon de 100 micrones, con alfajías colocadas longitudinalmente como soporte. Se abren canales de desagüe rodeando las zonas altas, que redirigen el agua de precipitaciones a zonas adyacentes, sin ingresar a la zona techada, se puede visualizar en las Imágenes 4 y 5 sobre la construcción del tinglado.



 MARFRIG		Tacuarembó Marfrig - Planta Industrial Tacuarembó Ruta 5 & 26 CP 45000 - Tacuarembó - Uruguay Tel: 998 4632-3841 / www.marfrigboef.com	
		INVERNACULO PARA LEÑA PLANTA GENERAL	
Téc. Responsable: Ing. Qco. Alejandro Menchaca		Lámina 1/2	
Dibujo : Leonardo Brum		Escala 1/100	
NOMBRE DE PLANO:	CANTIDAD:	RESPONSABLE DEL DISEÑO:	FECHA:
0000000000	1	Sr. Leonardo Brum	14/04/2023

Imagen 1. Planta General de tinglado.

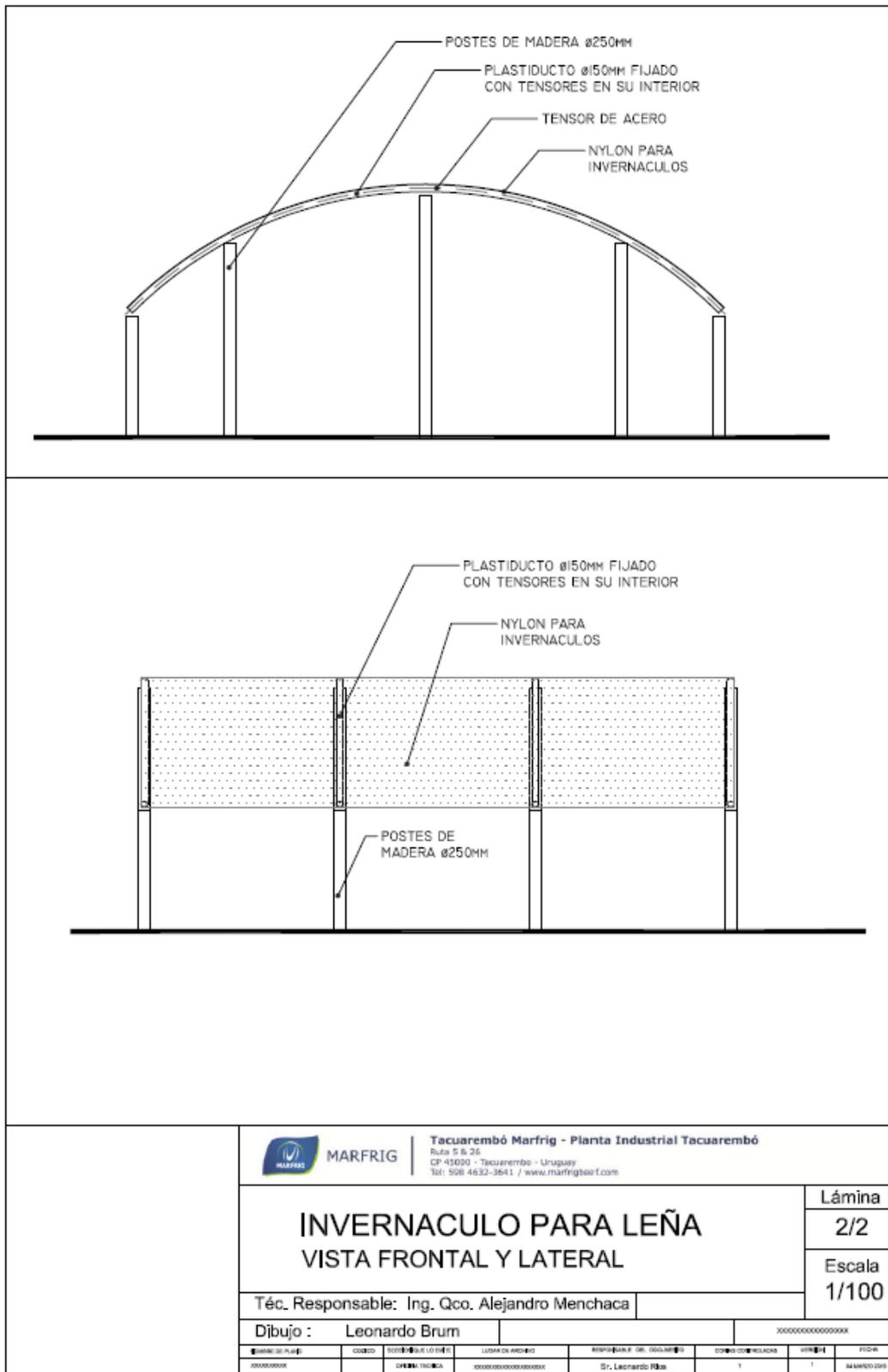


Imagen 2. Vista frontal y lateral del diseño

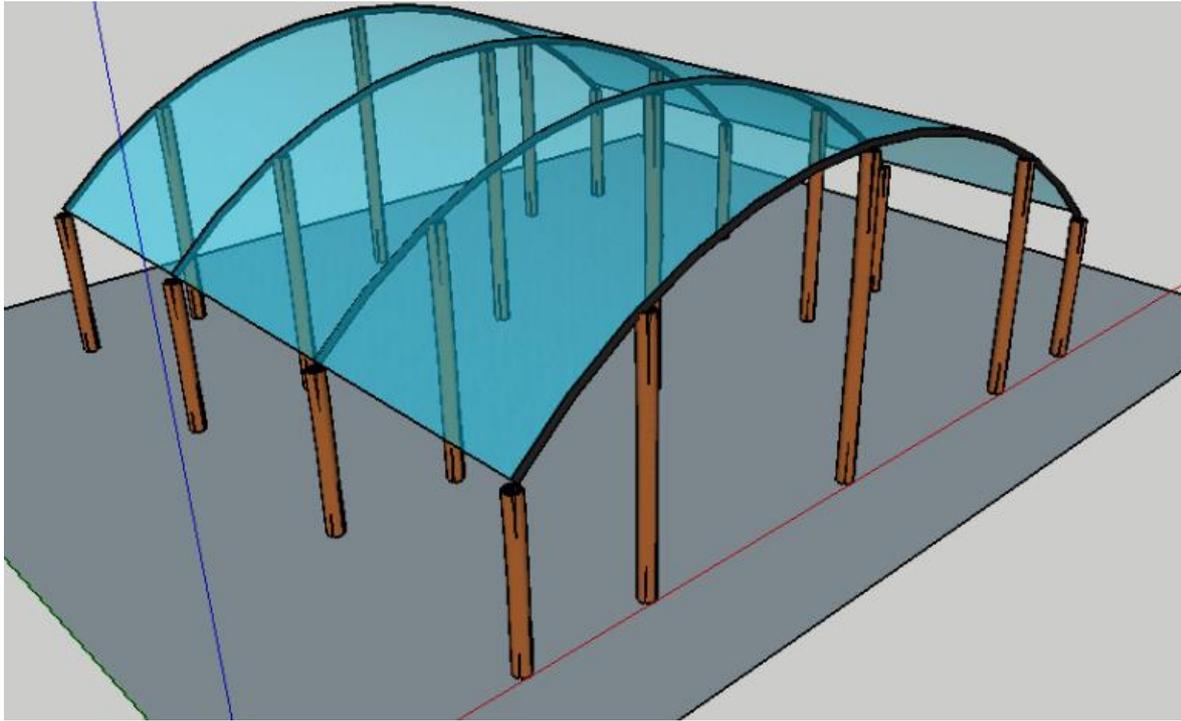


Imagen 3. Diseño tridimensional de tinglado.



Imagen 4. Construcción de estructura.



Imagen 5. Construcción de estructura.

2.2. Determinación del n óptimo

Para determinar el tamaño mínimo de muestra, se realiza una instancia piloto en el período Agosto-Octubre 2019. Se arman para el tratamiento con techo, cuatro filas de estiba, dos filas para el tratamiento sin techo, y se mantiene un testigo con la situación actual de stock (sin techo y sin estiba).

Se toman, en cuatro instancias durante 75 días, ocho muestras de cada fila y seis muestras del testigo. Las muestras en las filas se disponen de forma tal que se diferencian cuatro unidades muestrales a lo largo de la fila, dos al borde y dos al centro, separadas dos metros cada una. En cada posición de la fila, se diferencian a su vez dos submuestras, una en posición inferior de la fila, y otra superior. Las muestras en el testigo se diferencian en interiores al mismo, donde no se recibe radiación ni circulación de viento, y exteriores; se toman tres muestras de cada posición.

De esta forma, cada instancia de muestreo en el piloto finaliza con 54 muestras, 32 con techo, 16 sin techo, 6 de testigo. Se extrae un corte transversal de las astillas seleccionadas con un espesor de 2 a 3 cm, las cuales son rotativas en cada instancia, respetando el espacio de la posición, evitando así la introducción de errores debido al cambio de longitud de las astillas.

Los discos son llevados a probetas de 3cm*3cm*2cm, con una sierra circular de banco. Finalmente, son secados durante 48 horas, hasta peso constante, en estufa a 70°C.

Durante el periodo piloto, son analizadas 216 muestras, los resultados se procesan estadísticamente utilizando el software R [15]. Se trabajó con el siguiente modelo de regresión lineal múltiple:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 Fecha_i + \beta_2 Tratam_i + \beta_3 Fila_i + \beta_4 Posición_i + \varepsilon_i \quad [1]$$

Siendo:

Y: El porcentaje de humedad medido en las astillas

Fecha: Las cuatro fechas que se midieron para el plan piloto

Tratam: Ubicación de la pila de astillas (interior, exterior) que a los efectos de este estudio fueron renombrados como “Interior” y “Exterior”

Fila: Número de fila de la cual se obtuvieron los datos (1-4 para Interior, 1-2 para Exterior)

Posición: En la fila, dos al medio y dos contra los bordes

Inf.Sup: Ubicación vertical en la pila, que puede ser inferior o superior

ε : Residual del modelo

2.2.1. Metodología de muestreo

Para conocer el efecto del techo a lo largo del año, es necesario realizar el experimento en periodos representativos de las diferentes estaciones, determinando así, si existe o no una diferencia en cada una de ellas entre los tratamientos.

De esta forma, se establecen periodos para la instalación del experimento, donde serán tomadas muestras con una frecuencia de 20 a 25 días, en cuatro instancias por período.

El diseño del experimento, una vez estandarizado, consiste en el estibado de pilas de astillas de 6m de largo, un metro de ancho y 70cm de altura, con dos repeticiones bajo techo y dos fuera del

tinglado. Las filas se realizan de forma tal que el eje longitudinal de las astillas sea paralelo a la dirección del viento dominante como se observa en la imagen 6, ya que en esta dirección la velocidad de difusión de la humedad es 10 a 15 veces mayor que en sentido radial o tangencial [2].

En cada instancia de muestreo estandarizada, es decir posterior a la primavera 2019, que presenta un muestreo más exhaustivo; se toma una astilla de cada extremo de la fila, y dos en el centro, una en posición superior de la fila y otra inferior. A cada astilla seleccionada se le realiza un corte transversal de aproximadamente 3cm de espesor, los discos resultantes son llevados a probetas de 3cm*3cm*2cm, (Imagen 7) a las cuales se les determina el contenido de humedad.

Las dimensiones de las astillas / rolos es una variable que influye en el proceso de pérdida de humedad, dado que para este trabajo se pretende que el material utilizado represente el material combustible habitual utilizado, no se clasificó el mismo por tamaño. En el marco de la operativa habitual de abastecimiento a la caldera no es viable clasificar las astillas según clase diamétrica por lo cual se caracteriza el combustible de la empresa sin alteraciones en la distribución diamétrica o forma del mismo, y representándolo de la forma más completa posible, teniendo en cuenta las herramientas que se tienen para el armado de las probetas y la manipulación de las muestras.

Es por ello que las muestras se obtienen de rolos y astillas cuyo diámetro equivalente sea representativo de la población, para ello se estudia la distribución diamétrica de una serie de lotes de leña obteniéndose el siguiente histograma de distribuciones donde se representa la frecuencia absoluta de cada clase diamétrica establecida, Gráfico 8.

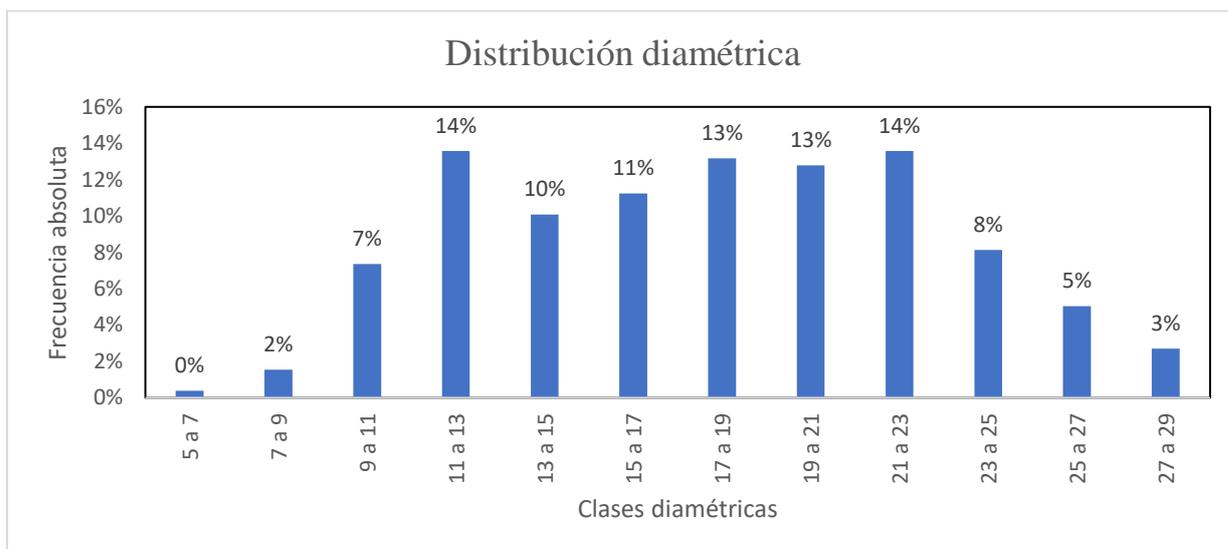


Gráfico 8, distribución diamétrica de la población.

El criterio de muestreo definido fue no extraer muestras en probetas menores a 13 cm (centímetros) de diámetro (o espesor si no fueran cilíndricas), por lo que las probetas utilizadas para caracterizar la humedad provienen de piezas mayores a 13 cm (centímetros), que representa el 77% de la población diamétrica.

Cabe destacar, que en el tratamiento con techo se realizan tres filas iguales, de las cuáles son muestreadas una al borde, y una al centro, para contemplar ambas posiciones dentro del tinglado. De esta manera, cada estación culmina con un total de 32 muestras del tratamiento con techo y 32 del tratamiento sin techo, con 64 muestras en total por comparación.

Los resultados de estos muestreos, sumados a los resultados obtenidos durante el muestreo piloto, son analizados utilizando modelos lineales y modelos de efectos mixtos, tomando como variable aleatoria a la muestra en cada fecha de muestreo, ya que en cada instancia de muestreo se extrae un disco de una astilla diferente comprendida dentro de la misma submuestra. El modelo final analizado es el siguiente:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 dias_i + \beta_2 Tratam_i + \beta_3 Periodo_i + \beta_4 Periodo_i * Lluvia_i + \beta_5 Muestra_i + \varepsilon_i \quad [2]$$

Siendo:

Y: El porcentaje de humedad medido en las astillas

Días: Los días transcurridos luego del primer muestreo de cada período

Tratam: Ubicación de la pila de astillas (interior, exterior).

Período: Instancias en que se realizaron los muestreos. (Piloto, otoño, invierno)

Periodo*Lluvia: Interacción entre el período de análisis y los eventos de precipitación

Muestra: Ubicación de la astilla en el muestreo, efecto aleatorio.

ε : Residual del modelo



Imagen 6. Armado de filas para tratamiento con techo.



Imagen 7. A la izquierda discos identificados, a la derecha armado de probetas.

2.2.2. Determinación del contenido de humedad

El contenido de humedad se determina por método gravimétrico, cada probeta de 3cm*3cm*2cm se pesa en una balanza digital de precisión 0.01% por gramo. Las muestras son secadas en estufa durante al menos 48 horas, hasta lograr peso constante, a 70°C.

El contenido de humedad en base seca se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Humedad} = \frac{(\text{Peso inicial} - \text{Peso final})}{\text{Peso final}} * 100$$

Siendo:

-Peso inicial, el peso obtenido de la probeta antes de secar.

-Peso final, el peso obtenido de la probeta luego de secar.

Las probetas se conservan en bolsas de nylon, con la trazabilidad correspondiente para reconocer su posición en la pila, de forma de evitar absorción o pérdida de humedad adicional.

Las fechas establecidas para realizar los muestreos a lo largo del experimento, son contempladas en la Tabla 4.

Año	Armado y muestreo	Muestreo	Muestreo	Muestreo
2019	1-Ago	20-Ago	10-set	30-set
2020	10-Mar	3-Abr	27-Abr	25-May
2020	1-Jun	22-Jun	15-Jul	6-Ago

Tabla 4. Protocolo de muestreo durante el estudio.

Siguiendo este esquema, es posible al finalizar, reflejar el efecto de la presencia de techo en el proceso de pérdida de humedad de madera verde, y evaluar si es rentable su implementación para lograr reducir el consumo de leña en la planta industrial.

2.3. Análisis económico

Se evaluó la viabilidad económica de realizar el proyecto considerando un diseño tal que todo el consumo de la industria puede ser estibado bajo techo y lograr el contenido de humedad que se determinó a partir de los muestreos referenciados en el apartado 2.2.2 que fueron llevados a cabo entre agosto 2019 y agosto 2020.

La necesidad de realizar esta evaluación surge de conocer el potencial económico que presenta optar por la implementación de esta tecnología para mejorar el uso del biocombustible. Para realizar esta evaluación es necesario comprender cuál es el marco de aplicación del proyecto y las decisiones que implica aplicarlo [16]. Por tanto, se busca cuantificar de la forma más ajustada a la realidad posible los diferentes componentes que participan de la implementación de este proyecto. Los componentes del flujo de fondos que se tienen en cuenta son los costos de inversión asociados a la construcción de un tinglado con las dimensiones requeridas, el ahorro que implica la disminución del consumo de leña comparado con el consumo actual, el sobrecosto asociado a la necesidad de estibar la leña, los costos de mantenimiento y necesarios. Los valores fueron expresados en US\$ utilizando el tipo de cambio 44\$/US\$. Se plantea para este análisis una tasa de descuento de 5% y se procede a calcular el valor actual neto para un período de cinco años, y la tasa interna de retorno del proyecto. En primera instancia, se realizan los cálculos de las variables a considerar en el flujo de fondos para llevar a cabo el análisis.

Para determinar la capacidad dimensional del tinglado, se determina experimentalmente el coeficiente de apilado de una pila estándar de astillas. Para determinar el espacio físico que ocupan una cierta cantidad de astillas, se realiza una pila de 1m*1m*0.85m, de la cual se cuentan las astillas presentes y se agrupan en clases, a cada clase de rolo/astilla se le determina por método arquimediano el volumen real, determinándose así el coeficiente de apilado mediante:

$$\text{Coef. de apilado} = \frac{\text{Volumen ocupado por leña}}{\text{Volumen total de la pila}} \quad [3]$$

Siendo:

$$\text{Volumen ocupado por leña} = \sum \text{Volumen clase}_i * \text{Cantidad clase}_i \quad [4]$$

El volumen de cada clase se mide tomando muestras y calculando el volumen de agua desplazado al sumergirlas por completo en un recipiente de dimensiones conocidas.

Dado que las transacciones en la empresa se realizan con toneladas y no metros cúbicos, se determina experimentalmente la densidad de la madera utilizada mediante:

$$\text{Densidad} = \frac{\text{Masa de madera seca}}{\text{Volumen de madera verde}} \quad [5]$$

Se toman muestras de la leña, secándose en estufa hasta peso constante a 100°C, y se determina el volumen verde saturando las muestras en agua y luego aplicando método de desplazamiento volumétrico al igual que con el volumen de las astillas.

Finalmente, para calcular la capacidad del secadero a construir para estibar todo el consumo de leña de la planta, se considera que la leña ingresa al stock con un 50% de humedad en base húmeda, por lo que se agrega esta cantidad de masa a la masa seca determinada por método gravimétrico y se recalcula la densidad en estas condiciones. Se aplica a este valor el coeficiente de apilado determinado por la ecuación [4] y de esta forma se obtiene la capacidad volumétrica del secadero a dimensionar.

Una vez realizado el flujo de fondos, se calcula el Valor Actual Neto de la inversión, el cual es la diferencia entre el valor presente de los ingresos y el valor presente de los costos, durante un período de tiempo. Si este valor resulta positivo, se puede considerar realizar la inversión, por otro lado, si este valor resulta negativo significa que los flujos de fondos futuros no cubrirán el costo inicial. Si el valor es igual a cero, los ingresos igualarán los costos y se dice que la inversión es neutra [16].

$$VAN = \sum_{t=1}^T \left(\frac{CF_t}{(1+i)^t} \right) - C_o \quad [6]$$

Donde:

CF, es el flujo neto de un período de tiempo t.

i, es la tasa de descuento seleccionada.

C_o , es la inversión inicial.

El otro indicador calculado es la Tasa Interna de Retorno, la cual se define como la tasa de descuento requerida para que el Valor Actual Neto sea igual a cero. Es el reflejo de la eficiencia de una inversión, por lo que cuánto mayor es este valor más atractivo es la inversión.

Se obtiene despejando el valor TIR de la siguiente ecuación:

$$0 = \sum_{t=1}^T \left(\frac{CF_t}{(1+TIR)^t} \right) - C_o \quad [7]$$

Fórmulas [6] y [7] extraídas de [16].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Determinación del tamaño mínimo de muestra

Con la información proporcionada por el modelo [1] se logró obtener una estimación de la diferencia entre los tratamientos (Techo vs NoTecho) de 0.17245 con un desvío (Residual std error) de 0.2718.

Con esta información, trabajando con un nivel de significancia de 5% y con una potencia del 80%, el tamaño de muestra a considerar por comparación es de **39 astillas**.

Este tamaño mínimo de muestra para comparar los tratamientos en cada estación individual fue respetado, en los siguientes períodos de muestreo tal como fue aclarado en la metodología, completando 64 muestras en los períodos posteriores al piloto.

3.2. Modelos estadísticos

3.2.1. Estudio de diferencias entre tratamientos por período

Para comenzar el análisis, se estudia en primera instancia la diferencia estadística entre tratamientos para cada período de muestreo. Los períodos se dividen en piloto (agosto-octubre 2019), período otoño (marzo-abril) y período invierno (agosto-setiembre 2020).

Este estudio se realizó utilizando modelos de efectos fijos, utilizando como variable de respuesta el contenido de humedad de la madera. Se verifica que no existe interacción entre la fecha y el tratamiento, pudiendo así estudiar ambos efectos principales de forma independiente.

3.2.1.1. Piloto

Comenzando por el modelo piloto se grafican a continuación los parámetros estacionales temperatura promedio, mínima y máxima por día en °C, mm de precipitación acumulados diarios, y el porcentaje de humedad relativo diario.

Para realizar una comparación visible, se grafican el contenido de humedad en base seca logrado con cada tratamiento en la fecha realizada el muestreo, valor que se mantiene constante en el gráfico hasta el siguiente muestreo, ilustrando las reducciones cuantificadas en cada muestreo.

El período representado comprende desde el 3 de agosto de 2019 hasta el 15 de octubre de 2019, donde la temperatura promedio oscila entre 10°C y 28°C con mínimas de 0°C y máximas de 35°C; se observan además eventos de precipitación a lo largo de todo el período.

Se observan entre el 28 de agosto y el 8 de septiembre, eventos de lluvias de 36mm y 67 mm respectivamente; seguidos a estos eventos se realiza un muestreo el día 9 de septiembre, donde efectivamente los resultados indican una reducción del contenido de humedad en el tratamiento con techo de un 14,6%, mientras que el tratamiento sin techo aumenta el contenido de humedad en 1%.

Los últimos días del período se observa otro evento de 134 mm, al finalizar las mediciones el tratamiento sin techo reduce un 30% el contenido de humedad respecto a la medición anterior, mientras que el tratamiento con techo se reduce un 21%. Por tanto, si bien la reducción en el interior es menor, los eventos de precipitación no permiten a las astillas estibadas al exterior lograr la humedad deseada en el mismo tiempo que las astillas cubiertas por el techo.

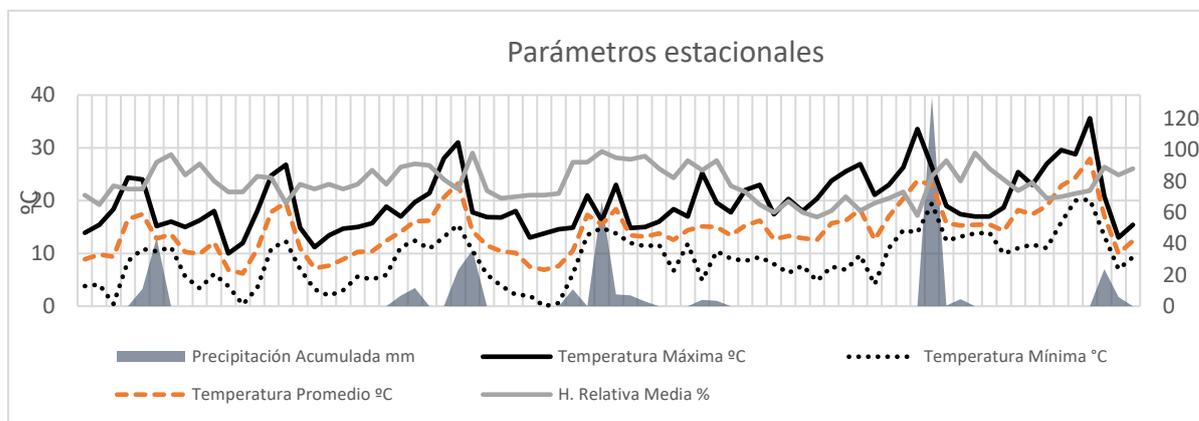


Gráfico 9. Parámetros estacionales durante el período piloto.



Gráfico 10. Contenido de humedad de la madera durante período piloto

La siguiente tabla ilustra un resumen de la evolución en cada muestreo, entre el interior y el exterior, reflejando también la evolución de un testigo que simula las condiciones actuales de la empresa, sin estiba y sin techo. El testigo reduce únicamente un 21.7% el contenido de humedad desde el inicio del período, por lo que efectivamente queda demostrada la necesidad de modificar la logística de estiba, continuando el proyecto en buscar la justificación de acompañar la estiba con la presencia de techo para mejorar aún más la reducción en el contenido de humedad.

Muestreo	Int.	F1	F2	F3	F4	Ext.	F1	F2	Parva	Int.	Ext.	Días
Humedad_1	98	97	111	93	91	106	111	102	77	85	68	0
Humedad_2	63	61	62	69	58	78	90	65	67	76	57	19
Humedad_3	48	52	47	47	49	78	78	79	47	51	42	38
Humedad_4	27	29	24	25	30	48	51	45	55	66	45	74

Tabla 5. Resumen de los muestreos realizados durante el período piloto, valores expresados en % de humedad en base seca. “F” Fila, “Int” Interior, “Ext” Exterior.

Para corroborar la existencia de una diferencia real se realiza una comparación de medias de tratamiento con y sin techo para cada fecha de muestreo, la cual muestra que existen diferencias significativas entre tratamientos en las 4 fechas de muestreo como se pueden observar en el Gráfico 11 y la Tabla 6. Además, el tratamiento con techo fue el único que alcanzó la humedad objetivo al final del muestreo.

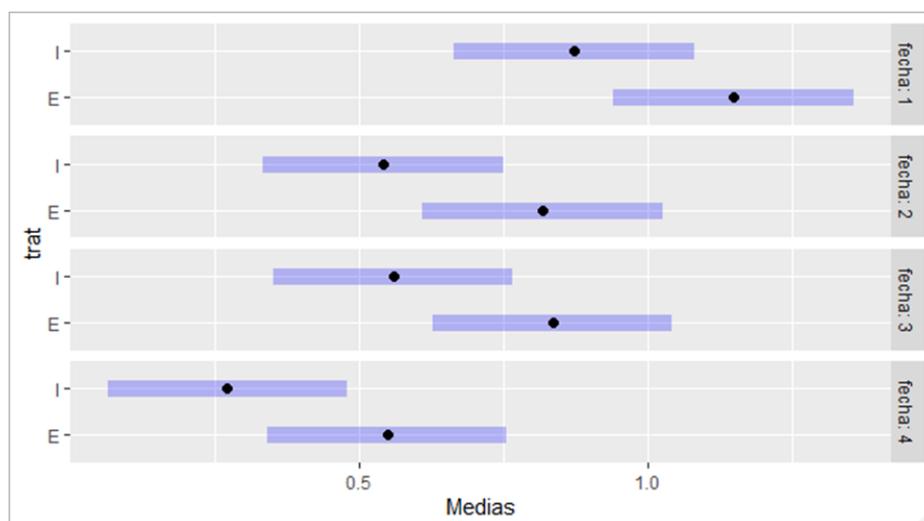


Gráfico 11. Comparación de medias por tratamiento en muestreo piloto.

Fecha	Tratamiento	Medias estimadas	Error estándar	Grupo
1	I	0,873	0,104	1
1	E	1,150	0,104	2
2	I	0,543	0,104	1
2	E	0,819	0,104	2
3	I	0,560	0,104	1
3	E	0,836	0,104	2
4	I	0,273	0,104	1
4	E	0,549	0,104	2

Tabla 6. Comparación de medias por tratamiento en período piloto.

Esto permite afirmar con un 95% de confianza, que existen diferencias significativas entre tratamiento durante todo el período de muestreo piloto.

3.2.1.2. Otoño

En el análisis de parámetros estacionales, se observan eventos de precipitación de hasta 50 mm anterior al segundo muestreo el día 2/4/2020. Los resultados de este muestreo indican una reducción del contenido de humedad en las astillas bajo techo, alcanzando un 23% de humedad en base seca, contra un 40% de humedad en las astillas del tratamiento sin techo. La reducción final del tratamiento con techo se evidencia menor a la reducción del tratamiento sin techo final, considerando que la humedad lograda bajo techo resulta ya inferior al punto de saturación de la fibra, el proceso de pérdida de humedad ya ha disminuido por tanto la tasa de velocidad.

Sumado a esto, las precipitaciones anteriores al último parecen generar que el tratamiento sin techo descienda hasta un 33% el contenido de humedad, no logrando, aun así, satisfacer los requisitos del anteproyecto.

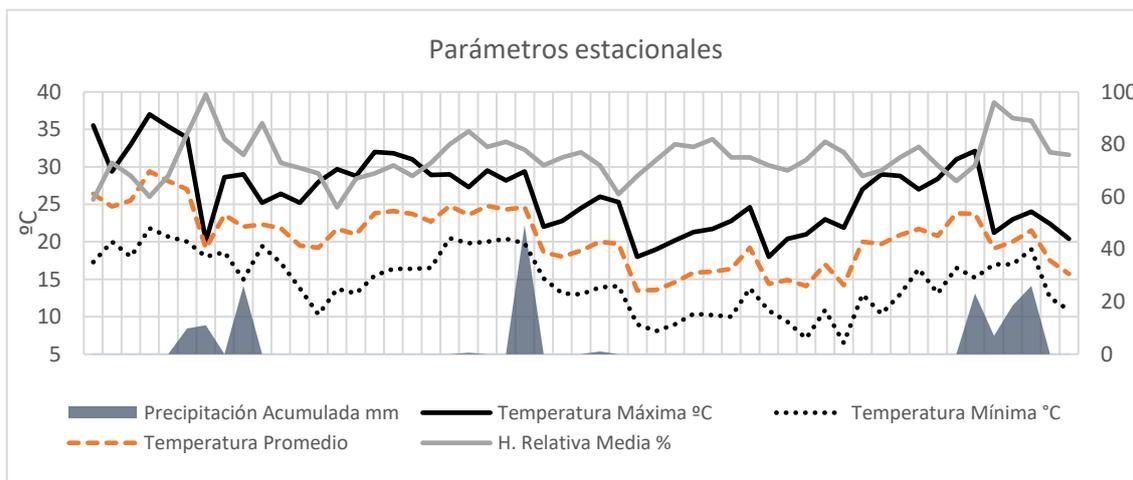


Gráfico 12. Parámetros estacionales durante el período otoño.



Gráfico 13. Contenido de humedad de la madera durante período otoño.

La siguiente tabla de resumen muestra para el período comprendido entre el 10 de marzo y el 30 de abril una reducción de 55% de humedad en el interior contra una reducción de 39% en el exterior, en un total de 51 días. Por otra parte, se debe destacar el que el tratamiento con techo logra el contenido de humedad objetivo a los 24 días de iniciado el tratamiento, con un 23% de humedad, cuando el tratamiento sin techo aún presenta 40% de humedad.

Muestreo	Interior	Fila 1	Fila 2	Exterior	Fila 1	Fila 2	Días
Humedad_1	74	75	74	72	65	82	0
Humedad_2	23	24	22	40	32	48	24
Humedad_3	19	18	20	33	31	35	51

Tabla 7. Resumen de muestreos durante período otoño, valores expresados en % de humedad en base seca.

El análisis de diferencias estadísticas entre tratamientos para las fechas de muestreo que se presentan en el Gráfico 14 y Tabla 8, indica que las diferencias observadas no son significativas, por tanto, no es posible afirmar que los resultados obtenidos del tratamiento con techo sean diferentes a los del tratamiento sin techo mediante este análisis. Sin embargo, para este muestreo puntual el tratamiento con techo logró la humedad objetivo a los 24 días de estiba, mientras que al tratamiento sin techo le lleva aproximadamente 50 días lograrlo.

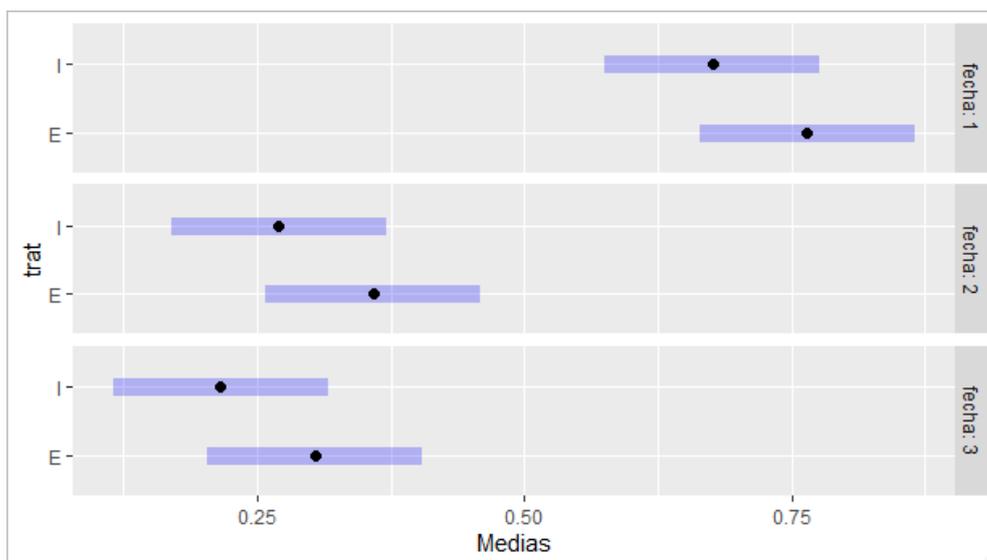


Gráfico 14. Comparación de medias por tratamiento durante muestreo otoño.

Fecha	Tratamiento	Medias estimadas	Error estándar	Grupo
1	I	0,676	0,050	1
1	E	0,764	0,050	1
2	I	0,270	0,050	1
2	E	0,580	0,050	1
3	I	0,216	0,050	1
3	E	0,304	0,050	1

Tabla 8. Comparación de medias por tratamiento en período otoño.

3.2.1.3. Invierno

Para el muestreo realizado durante el invierno de 2020, es posible notar que los eventos de precipitación son ausentes durante prácticamente todo el muestreo, con excepción de los extremos temporales. Además, las temperaturas máximas alcanzan los treinta grados en agosto, contribuyendo a que la pérdida de humedad entre ambos tratamientos se equipare hacia el tercer muestreo realizado el 14/8. En esta ocasión, el contenido de humedad en tratamiento con y sin techo es de 32% y 33%, respectivamente.

Los eventos de precipitación que se presentan hacia finales del período son probablemente los responsables de que el tratamiento sin techo no logre la humedad objetivo contra las astillas bajo techo, que alcanzan un 27% de humedad.

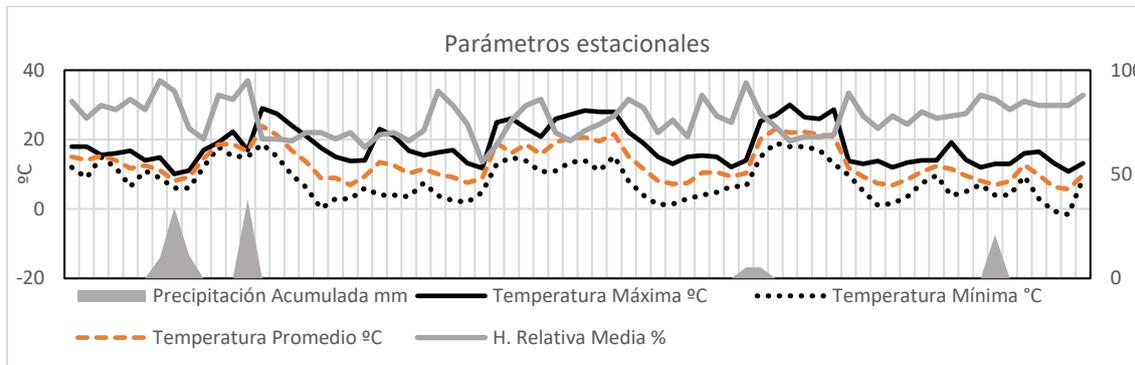


Gráfico 15. Parámetros estacionales durante período invierno.



Gráfico 16. Contenido de humedad durante el invierno.

Las reducciones mencionadas se resumen en la siguiente tabla, donde luego de setenta días de estacionado de las astillas, el tratamiento con techo culmina con 27% de humedad frente a un 32% de humedad en el tratamiento sin techo.

Muestreo	Interior	Fila 1	Fila 2	Exterior	Fila 1	Fila 2	Días
Humedad_1	104	107	100	105	97	115	0
Humedad_2	45	38	52	62	44	86	20
Humedad_3	32	34	31	33	32	35	45
Humedad_4	27	31	23	32	28	36	70

Tabla 9. Resumen de muestreos durante el invierno, valores expresados en % de humedad en base seca.

El análisis de medias entre tratamientos presentado en el Gráfico 17 y la Tabla 10, indica que no se evidencian diferencias significativas entre tratamientos durante el invierno en base al modelo estudiado. A pesar de compartir meses del año con el muestreo piloto durante 2019, el

comportamiento del clima fue distinto entre años, el invierno presenta temperaturas menores y menor frecuencia en eventos de precipitación al igual que en mm acumulados de lluvia. Esta diferencia determina que no existan diferencias significativas entre tratamientos para este período cuando sí se detectaron para el 2019 en una época del año similar.

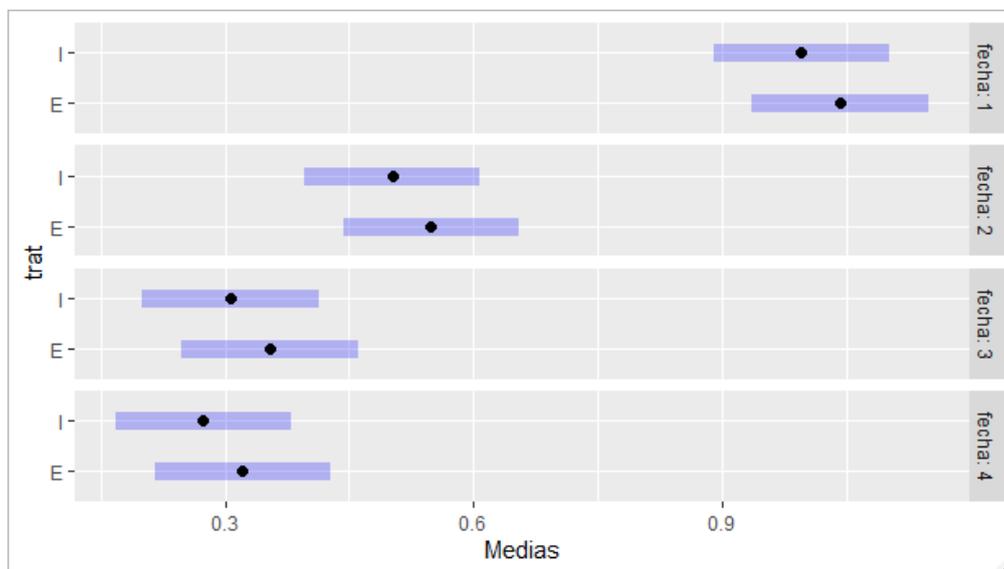


Gráfico 17. Comparaciones de medias por tratamiento durante período invierno.

Fecha	Tratamiento	Medias estimadas	Error estándar	Grupo
1	I	0,995	0,053	1
1	E	1,042	0,053	1
2	I	0,502	0,053	1
2	E	0,549	0,053	1
3	I	0,307	0,053	1
3	E	0,354	0,053	1
4	I	0,274	0,053	1
4	E	0,321	0,053	1

Tabla 10. Comparación de medias por tratamiento durante período invierno.

3.2.2. Estudio de modelo completo

Dado que los modelos analizados no incluyen el estudio del efecto del clima, además de que la posición de muestreo es variable en cada fecha, ya que la probeta se genera en base a una submuestra de la posición correspondiente; se decide estudiar la respuesta del contenido de humedad a partir de un modelo de efectos mixtos.

En este modelo, la muestra se considera como un efecto aleatorio, y las demás variables explicativas como efectos fijos, esto permite obtener una estimación de la evolución del contenido de humedad durante los períodos de estudio, contemplando todas las fuentes de variación posibles.

En primera instancia, se parte de un modelo que englobe todos los períodos, a través del método de selección stepwise, donde se analiza la influencia de cada una de las variables y su respectiva significancia respecto al efecto que tienen sobre el contenido de humedad.

Se parte de las variables que hacen referencia a la posición y los días de muestreo y los tratamientos, del cual se obtienen que los únicos efectos significativos son los tratamientos y los días. Luego se agregan al modelo las variables climáticas que representan los eventos de precipitación y la temperatura promedio (p-valor 0.4278), ya que las demás variables del clima se encuentran altamente correlacionadas con la lluvia y por tanto no agregan información adicional al modelo.

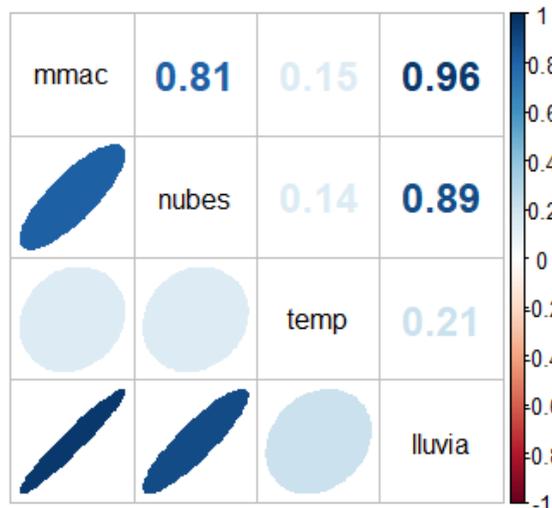


Gráfico 18. Correlación de variables climáticas en modelo global.

El modelo final [2] que abarca solamente las variables significativas muestra los siguientes resultados:

	Valor	Error estándar	p-valor
Intercepto	1,0996186	0,06172709	0,0000
días	-0,0281324	0,00416645	0,0000
tratI	-0,1415384	0,05690312	0,0261
periodoOTOÑO	-0,3510788	0,07394514	0,0000
periodoINVIERNO	-0,0596894	0,06624941	0,3690
periodoPILOTO:lluvia	0,0765055	0,01560025	0,0000
periodoOTOÑO:lluvia	0,0761612	0,01757390	0,0000
periodoINVIERNO:lluvia	0,1826428	0,04108147	0,0000

Tabla 11. Modelo final completo con variables significativas.

De los resultados obtenidos es posible concluir que por cada día que pasa, la humedad desciende un 2.8% para todos los períodos, mientras que la diferencia entre el tratamiento interior (bajo techo) y el tratamiento exterior (sin techo) es de 14%. El período de invierno no presenta diferencias en cuanto al contenido de humedad en el momento inicial con el período piloto.

Además, por cada día adicional de lluvia, la humedad en el exterior aumenta 7.6% para los períodos piloto y otoño, mientras que es un 18.3% para el tratamiento invierno. Por otro lado, en el tratamiento interior, durante el invierno la ganancia de humedad por cada día de lluvia es de un 4%, mientras que, en los períodos piloto y otoño, a pesar de la precipitación, el contenido de humedad en el tratamiento con techo se reduce un 6.5%, es decir que no hay ganancia de humedad aún en los días de lluvia.

El valor de R^2 para este modelo es de 0.555, es decir que el modelo logra explicar en un 55,5% la respuesta del contenido de humedad frente a las variables mencionadas.

Con el fin de evaluar si algún otro modelo logra un mejor ajuste, se analiza qué sucede al estudiar un modelo de efectos mixtos por cada período por separado, evaluando cuales son las variables significativas en cada caso, presentando los correspondientes coeficientes de determinación.

3.2.3. Estudio de modelo para piloto

El análisis de este período muestra significancia solamente para la variable día y tratamiento, no se incluye ninguna variable climática como significativa. El R^2 para este modelo es de 0.404. Por tanto, no logra mejorar el ajuste del modelo global.

3.2.4. Estudio de modelo para otoño

El análisis de este período muestra significancia para las variables días y para todas las variables climáticas por separado, sin embargo, las mismas presentan alta colinealidad entre ellas, por lo que solamente se incluye la variable lluvia (eventos de precipitación).

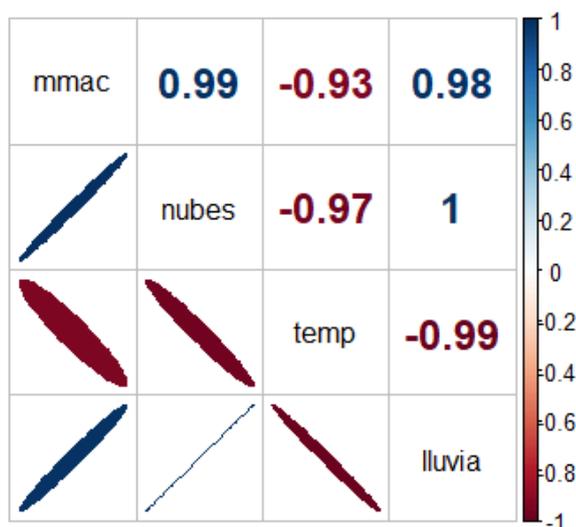


Gráfico 19. Correlación para variables climáticas en período otoño.

El R^2 para este modelo es de 0.610. Sin embargo, el tratamiento no figura como una variable significativa. Tal como se había indicado previamente, en otoño no hay diferencias significativas entre tratamientos (Gráfico 8), por lo tanto el tratamiento no es significativo.

3.2.5. Estudio de modelo para invierno

El análisis de este período muestra significancia para las variables días y para todas las variables climáticas por separado, sin embargo, las mismas presentan alta colinealidad entre ellas, por lo que solamente se incluye la variable lluvia (eventos de precipitación).

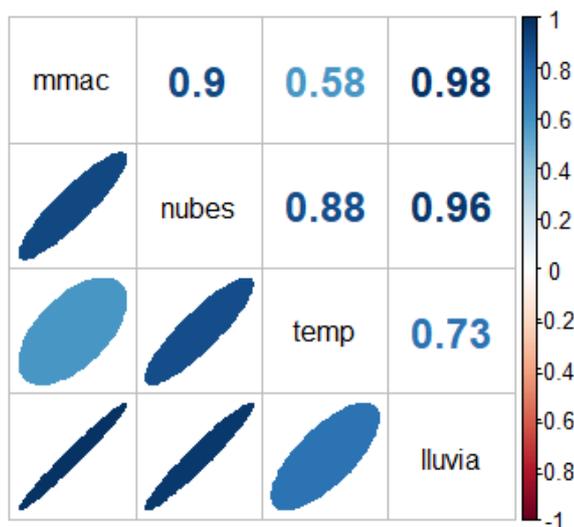


Gráfico 20. Correlación para variables climáticas en período invierno.

El R^2 para este modelo es de 0.756 y similarmente a lo que ocurrió en el período de otoño, el tratamiento no figura como una variable significativa.

Por tanto, se define como mejor modelo de análisis que considera todos los períodos de muestreo considerados ya que analizando los períodos de forma individual, solamente se logra estimar lo que ocurre en esos momentos puntuales del año, y lo logran hacer de forma muy forzada al contar como máximo con cuatro instancias de evaluación.

En cambio, al trabajar con el modelo que contempla todos los períodos, se logra identificar que independientemente del período, existen diferencias entre los tratamientos evaluados y por consiguiente sí hay una reducción significativa de la humedad en condiciones bajo techo.

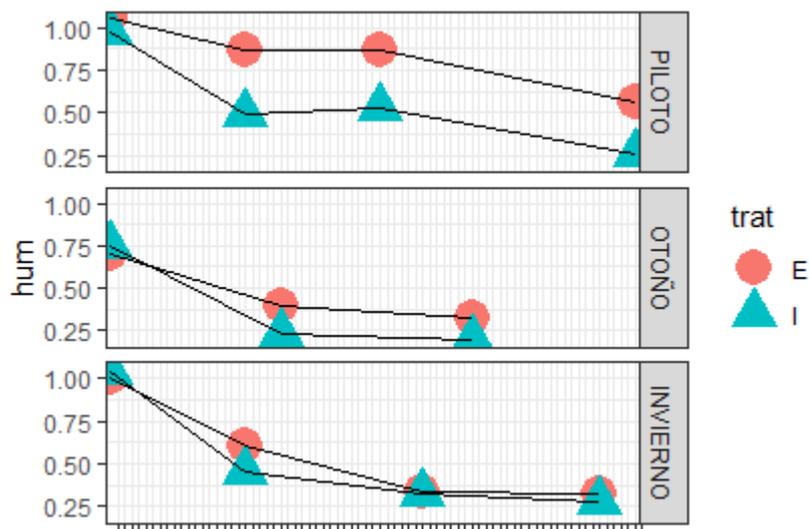


Gráfico 21. Contenido de humedad para cada tratamiento en cada período de muestreo.

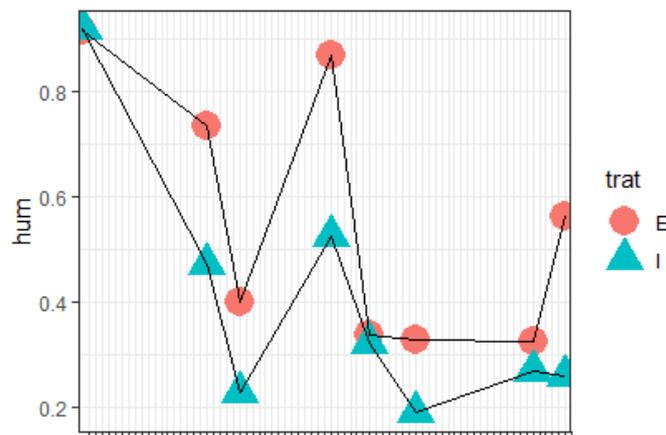


Gráfico 22. Contenido de humedad por tratamiento en todos los períodos de muestreo.

Como se observa en el Gráfico 21, para el período invierno y otoño, los muestreos realizados obtienen resultados muy cercanos numéricamente de contenido de humedad para cada tratamiento, por lo que podría ocurrir que la cantidad de muestreos por periodo no permite captar una diferencia significativa entre ellos. Sin embargo, esta diferencia es mayor en el período piloto y con cuatro muestreos es posible afirmar la significancia del tratamiento. Por otro lado, si se observa el Gráfico 22, cuando se analizan todos los períodos, se cuenta con mayor cantidad de información para realizar la comparación entre tratamientos por lo que se logra identificar una reducción significativa del contenido de humedad con el tratamiento interior (bajo techo).

Sumado a ello, actualmente los tiempos de stock oscilan los cuatro a seis meses, mientras que el mayor período de muestreo fue de aproximadamente 3 meses para llegar al valor objetivo de humedad, por lo que se reducen los tiempos de stock.

Es posible mejorar los resultados obtenidos si además de modificar el régimen de muestreo se plantea una tecnología alternativa que incluya equipos para controlar la circulación de viento dentro del secadero, añadiendo a la convección natural existente en el secadero propuesto, convección forzada que mejore la tasa de intercambio de energía.

3.3. Condiciones climáticas versus serie histórica

Para comprender cómo se comportaron los factores climáticos durante el período de muestro, en comparación con las condiciones históricas de la zona, se considera una serie de datos de treinta años, entre 1988-2018, la cual se compara con los eventos ocurridos durante los muestreos.

De esta forma, se podrá comprender si los datos fueron obtenidos durante un régimen similar a las condiciones históricas, o bien detectar si existen desvíos frente al comportamiento representativo del clima en las fechas de muestreo.

A continuación, se presentan comparaciones para cada período de muestreo, comparando la temperatura promedio, heliofanía, precipitación acumulada, en forma diaria.

3.3.1. Comparación en período agosto-octubre 2019

3.3.1.1. Temperatura promedio del aire

Se observa que la temperatura promedio presenta picos mínimos y máximos que difieren hasta nueve grados por encima y por debajo de la temperatura promedio en los últimos treinta años. El mes de agosto presenta oscilaciones en torno a la media de la serie, mientras que, a partir de mediados de setiembre, los datos correspondientes al muestreo indican temperaturas promedio por encima de la media histórica.

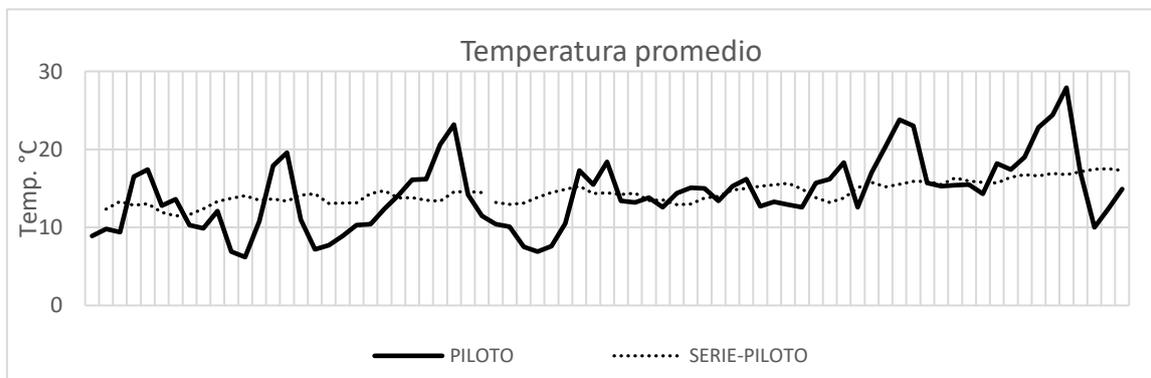


Gráfico 23. Temperatura promedio diaria durante el muestreo versus período 1988-2018.

3.3.1.2. Heliofanía

Respecto a las horas de heliofanía diarias, el período de muestreo oscila en torno a la media histórica, de un promedio de seis horas diarias, el período de muestreo en cuestión presenta hasta doce horas de heliofanía en los valores pico en el mes de setiembre.

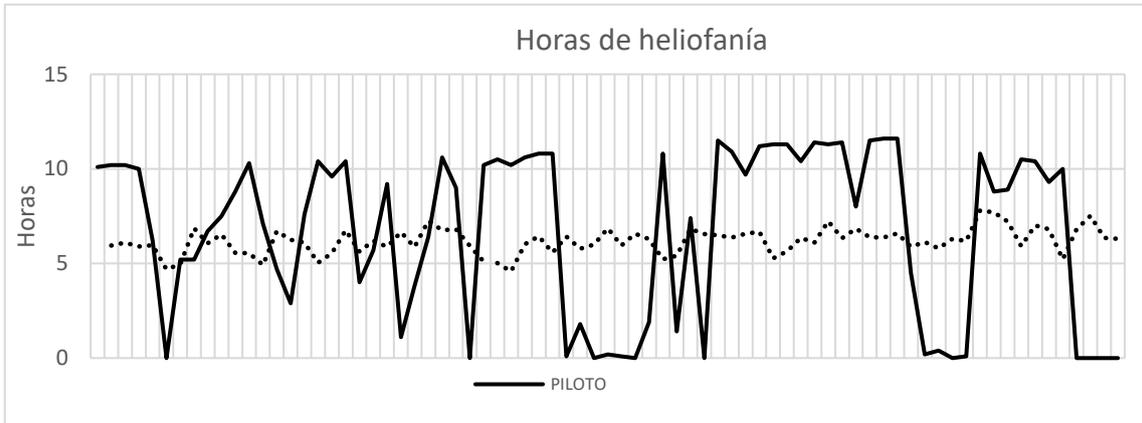


Gráfico 24. Horas de heliofanía diaria durante el muestreo versus período 1988-2018.

3.3.1.3. Precipitación acumulada

En cuanto a la precipitación diaria, la mayoría de los valores se mantienen cercano a la media histórica, aunque se observan eventos de picos de hasta 134 mm diarios contra 5 mm en la serie histórica, estos eventos contribuyen notoriamente a maximizar el efecto del tratamiento con techo en las pruebas realizadas, ya que las precipitaciones por encima de la media marcan una diferencia en cuanto a la reducción en contenido de humedad de las astillas bajo techo contra aquellas que se mantienen expuestas a estos eventos de precipitación.

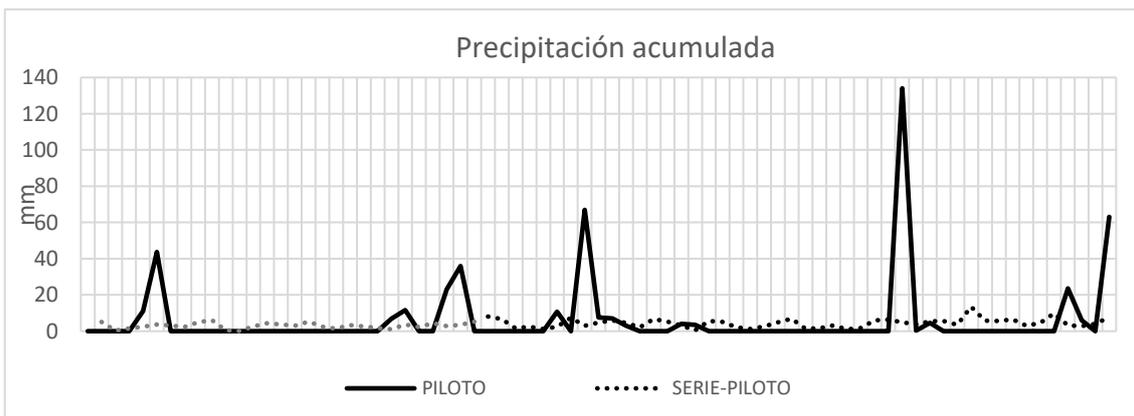


Gráfico 25. Precipitación acumulada diaria durante el muestreo versus período 1988-2018.

3.3.1.4. Porcentaje de humedad relativa ambiente

La humedad relativa se mantiene cercana a la media, con excepción de la última quincena de setiembre 2019, donde el porcentaje de humedad desciende de 60%, cuando la media histórica indica 80% de humedad para esa época.

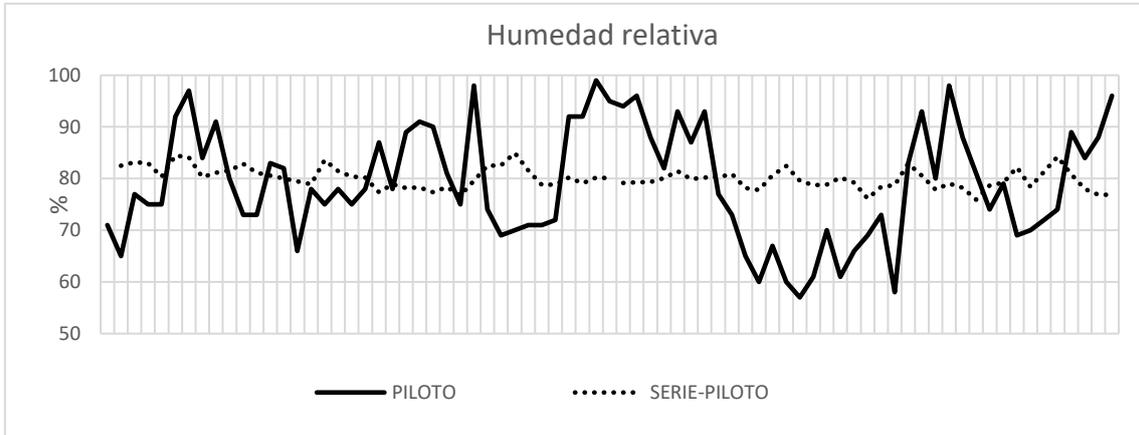


Gráfico 26. Humedad relativa diaria durante el muestreo versus período 1988-2018.

3.3.2. Comparación en período abril-mayo 2020

3.3.2.1. Temperatura promedio del aire

Respecto a otoño del año 2020, la temperatura promedio diaria oscila en torno a la media histórica, respetando también los descensos de temperatura en abril respecto a marzo. No se detectan por tanto variaciones significativas en el período de muestreo.

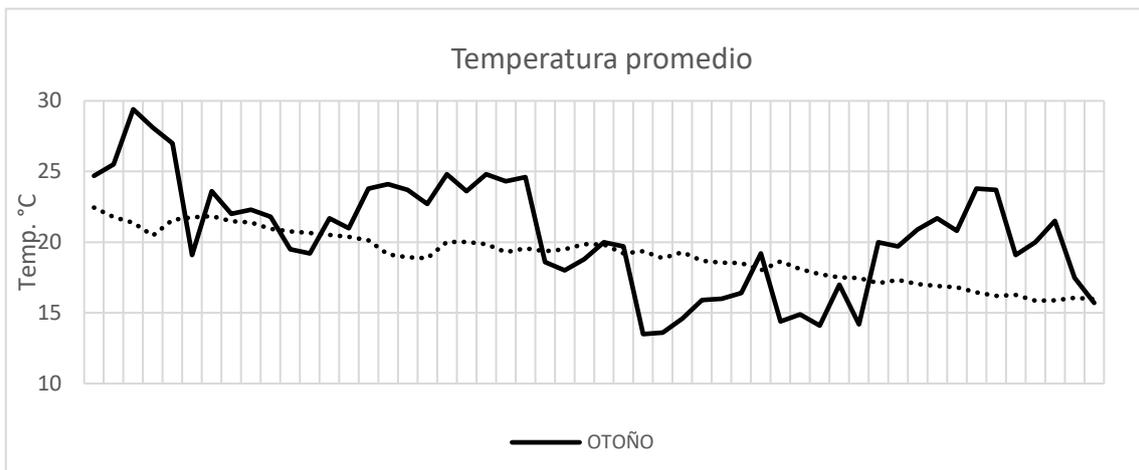


Gráfico 27. Temperatura promedio diaria durante el muestreo versus período 1988-2018.

3.3.2.2. Heliofanía

En cuanto a la heliofanía, se observan al igual que con la temperatura promedio, que el periodo de muestreo presentó valores en torno a la media histórica. Los picos de hasta once horas al igual que en el período de muestreo piloto en 2019 se mantienen.

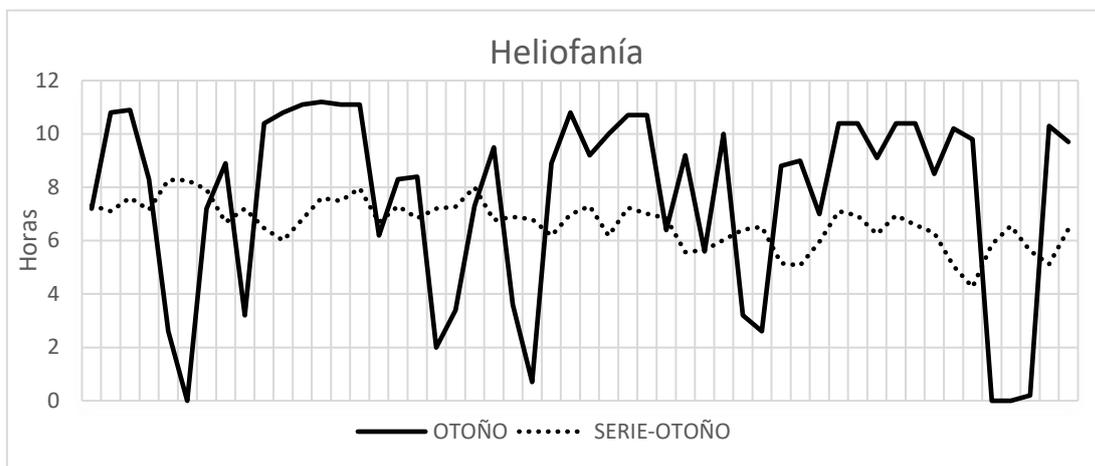


Gráfico 28. Horas de heliofanía diaria durante el muestreo versus período 1988-2018.

3.3.2.3. Precipitación acumulada

Las precipitaciones ocurridas muestran eventos que superan el promedio histórico alcanzando los 49 mm diarios, manteniéndose aun así por debajo de los picos notorios en el período 2019 que superar los 100 mm diarios.

En este caso se evidencian entre cuatro y cinco eventos de notoria superioridad frente a la media, al igual que en el período 2019. Sin embargo, dado que esta serie de datos abarca menos tiempo, los picos son entonces más frecuentes que para el invierno del año anterior en este período.

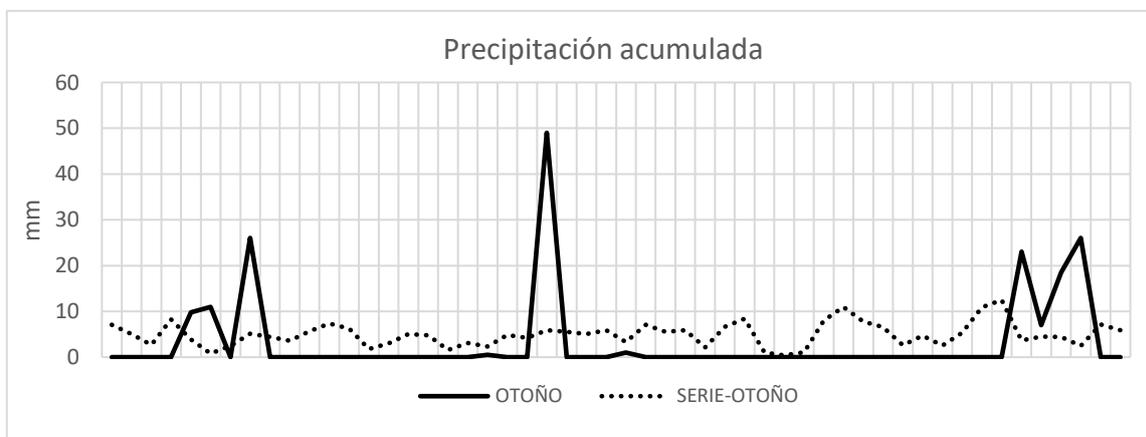


Gráfico 29. Precipitación acumulada diaria durante el muestreo versus período 1988-2018.

3.3.2.4. Porcentaje de humedad relativa ambiente

En este período las diferencias en la humedad relativa se hacen notorias, encontrándose por debajo de la media histórica para prácticamente todo el período de muestreo.

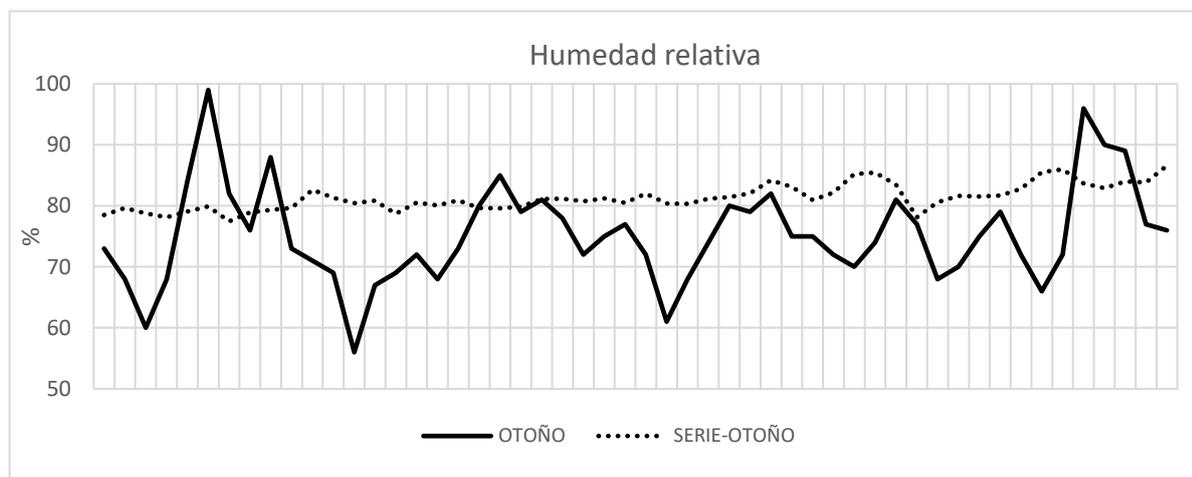


Gráfico 30. Humedad relativa diaria durante el muestreo versus período 1988-2018.

3.3.3. Comparación en período agosto-setiembre 2020

3.3.3.1. Temperatura promedio del aire

La temperatura promedio oscila en torno a la media histórica, los primeros días del mes de setiembre parecen ajustarse en mayor medida a la media, al igual que el mes de setiembre 2019 durante el muestreo piloto. Por otro lado, las diferencias que se evidenciaron en agosto 2019 contra la serie se pueden apreciar de igual forma, con diferencias de entre siete y ocho grados de la media histórica.

Además, a comienzos de julio, las temperaturas promedio se observan menores al promedio de los últimos treinta años.

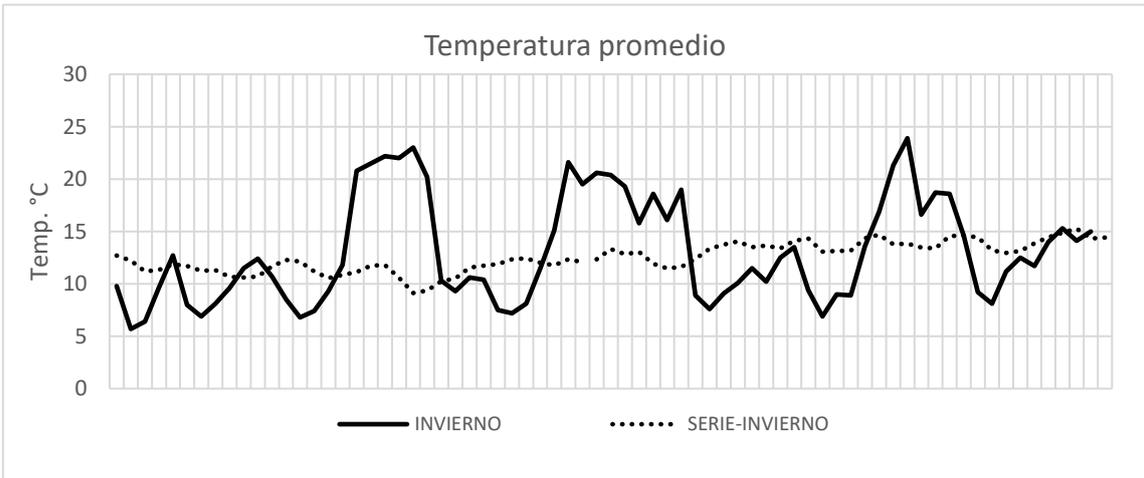


Gráfico 31. Temperatura promedio diaria durante el muestreo versus período 1988-2018.

3.3.3.2. Heliofanía

Las horas de heliofanía también oscilan en torno a la media, con la excepción de los primeros días del mes de setiembre, que presenta diferencias notorias con setiembre 2019 respecto al histórico. En 2020, las horas de heliofanía se encuentran por debajo de la media dentro de los primeros días de setiembre, cuando en 2019 se mantiene una oscilación con valores por encima y por debajo de la media, llegando hasta dos o tres días por debajo de ella, para este caso, prácticamente los diez primeros días presentan menor cantidad de horas.

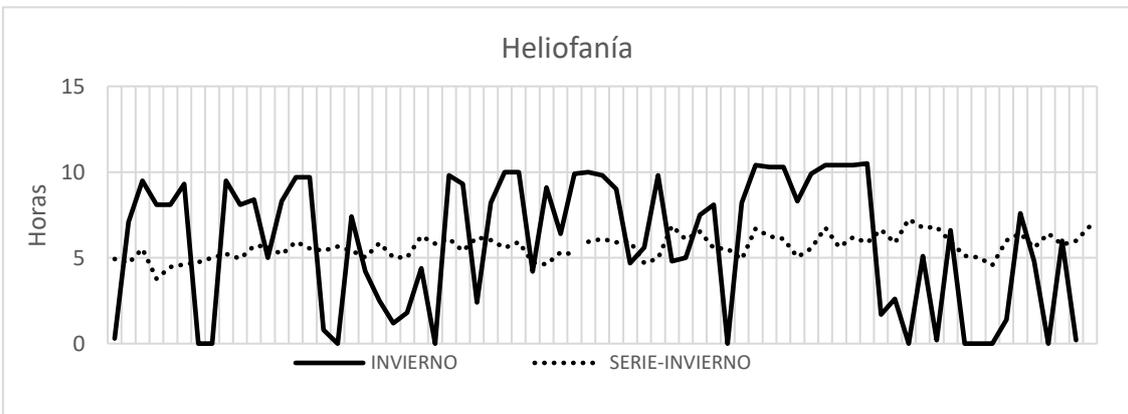


Gráfico 32. Horas de heliofanía diaria durante el muestreo versus período 1988-2018.

3.3.3.3. Precipitación acumulada

Respecto a las precipitaciones, se evidencian entre el 11 de julio y el 24 de agosto de 2020, únicamente dos días de precipitaciones menores a 10 mm diarios, lo cual marca una diferencia significativa contra la media histórica, donde las precipitaciones se mantienen en media de 5 a 10 mm, aproximadamente constantes en este período.

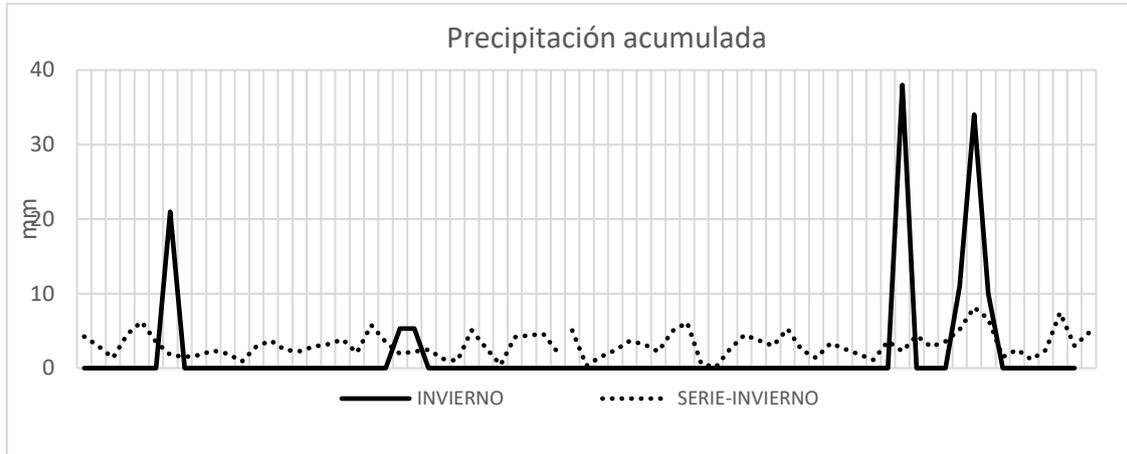


Gráfico 33. Precipitación acumulada diaria durante el muestreo versus período 1988-2018.

3.3.3.4. Porcentaje de humedad relativa ambiente

Al igual que en el período de muestreo de otoño, la humedad relativa en invierno se encuentra en su mayoría por debajo de la media histórica, comenzando a equipararse hacia el mes de setiembre.

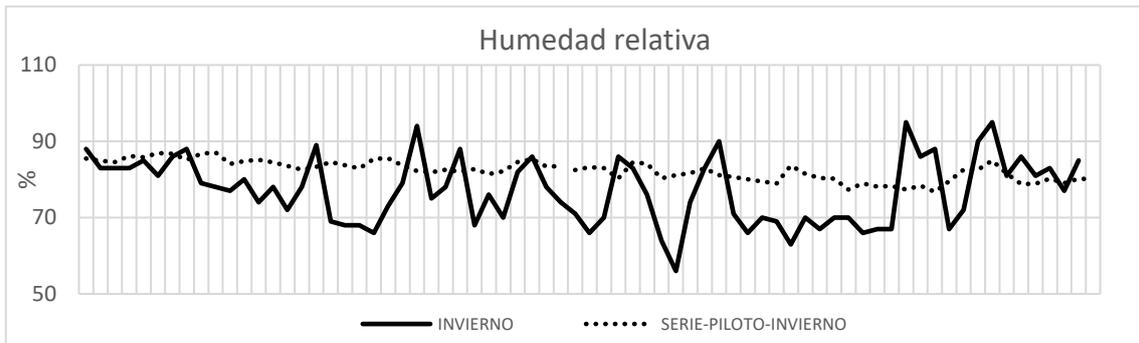


Gráfico 34. Precipitación acumulada diaria durante el muestreo versus período 1988-2018.

En resumen, el período piloto en 2019 presenta temperaturas en parte mayores al promedio, precipitaciones más altas y humedad relativa menor en setiembre, estos efectos combinados podrían influenciar a potenciar el efecto del techo como tratamiento de secado natural.

En el período de otoño las precipitaciones son más frecuentes al promedio y algunas de mayor intensidad, lo cual de igual forma contribuye a potenciar el efecto del techo frente a las astillas sin techo durante el período de muestreo.

Finalmente, en invierno de 2020, las temperaturas son menores en julio, las horas de heliofanía son menores en este período también. Las precipitaciones son considerablemente menores y la humedad relativa se encuentra por debajo de la media. Esto podría ayudar a explicar porque no se evidencian diferencias significativas entre tratamientos cuando se analiza el período invierno de forma individual.

En general, el comportamiento del clima presenta pequeñas desviaciones respecto a la media histórica que podrían haber influenciado en ciertos casos, a reforzar las diferencias entre tratamientos, así como disminuirlas en el caso del invierno.

3.4. Análisis económico

Para llevar a cabo este análisis, en primera instancia se dimensionó un tinglado que lograra cubrir el total de la leña consumida en la planta industrial. Conociendo las dimensiones necesarias, se procede a determinar la inversión inicial necesaria para construir la infraestructura del tinglado y el ahorro debido a la reducción del consumo, para realizar el flujo de fondos del proyecto.

Para determinar cuál será el ahorro en el consumo de leña gracias a la reducción del contenido de humedad al momento de la generación de vapor, se realiza el mismo balance energético presentado en la subsección 1.5.1 pero conociendo la humedad lograda con el secado bajo techo, se ajusta el poder calorífico inferior del combustible y el total de kilogramos necesarios para cubrir la demanda. Este valor es un estimado del ahorro de leña que permitirá alcanzar la implementación del tinglado, ya que se cuentan con los valores de humedad logrados durante el período de muestreo como base para llevar a cabo esta estimación.

A continuación, se detalla el cálculo de estos insumos.

3.4.1. Coeficiente de apilado

Dado que no existe una geometría exacta en relación a la leña utilizada, se muestra una pila estándar para clasificar las astillas y rolos en clases diamétricas y determinar su volumen mediante método arquimediano. Se realiza una pila de 1 m² por 0.85 metros de altura y se cuentan y clasifican los rolos y astillas que la componen, esta composición se detalla en la Tabla 12.

El volumen obtenido mediante desplazamiento volumétrico en un recipiente con agua y dimensiones conocidas de las clases de rolo/astilla identificados son:

Clases	Diámetro pta fina (cm)	Cantidad	Volumen (m³)
Rolo chico	10 a 12	16	0,006971750
Rolo mediano	13 a 17	8	0,008505536
Rolo grande	18 a 21	12	0,012270281
Astillas	N/A	8	0,012920978

Tabla 12. Conformación de una pila de leña estándar.

Por tanto, considerando el volumen detallado en la tabla 12, la ecuación 4 permite calcular el volumen total por clase de leña, la suma de estos volúmenes determina el total de volumen de leña en la pila, cuyo volumen total (leña + aire) es conocido. Con la ecuación 3 se determina el coeficiente de apilado que se detalla en la Tabla 13.

Volumen estéreo [m³]	Volumen leña [m³]	Coefficiente apilado
0,85	0,43	0,51

Tabla 13. Conformación de una pila de leña estándar.

3.4.2. Densidad y capacidad de tinglado

Dado que las transacciones respecto a la leña en la industria donde se realiza el proyecto se realizan en función de la masa y no del volumen, se necesita conocer la densidad de la madera para poder determinar cuánta leña por unidad de superficie podrá contener el tinglado, considerando que la misma se apile respetando el coeficiente de apilado detallado en la Tabla 13.

Se muestrean entonces trozos de madera para contar con un valor numérico aproximado de la densidad de la madera en el contexto de aplicación del proyecto. Se determina el volumen verde de las muestras por método de desplazamiento volumétrico, y se secan en estufa hasta peso constante para determinar la masa seca de madera. La densidad se determina por medio de la ecuación 5, los resultados para cada caso y la densidad promedio se presentan en la Tabla 14.

	Volumen [cm³]	Peso [g]	Densidad [kg/m³]
Muestra 1	180	58,41	325
Muestra 2	144	87,88	610
Muestra 3	288	118,99	413
Muestra 4	180	54,65	304
Promedio			413

Tabla 14. Densidad de la madera en las condiciones del proyecto.

Dado que la leña será estacionada con aproximadamente 50% de contenido de humedad en base húmeda al comenzar el proceso de secado bajo techo, la masa total por unidad volumétrica con la que se debe trabajar para dimensionar el tinglado es mayor a la calculada a partir de la masa seca de madera.

Se considera la densidad de la madera con 50% de humedad, resultado al cual se le aplica el coeficiente de apilado presentado en la Tabla 12. Además, se tiene en cuenta un factor de 0.58 m² fila/m² de tinglado considerando las calles de circulación de máquina de menor porte para retirar la leña. Con ello la capacidad del tinglado resulta en 0,18 (ton/ m³), ver Tabla 15. Dado que la altura de la pila no es una limitante, se tienen entonces 0,18 toneladas por metro cuadrado de tinglado (ton/ m²).

Coeficiente apilado	Factor de calles	Densidad con 50% humedad [kg/m³]	Capacidad [kg/m³]
0,51	0,58	619	183

Tabla 15. Capacidad del tinglado a dimensionar.

Debido a los tiempos de estiba, es necesario contar con un stock mayor al consumo, de forma que los tiempos de secado no impidan el flujo continuo de madera “seca” hacia boca de caldera. Por tanto, si bien el consumo promedio mensual es de 1.000 toneladas, se realizan los cálculos para la estiba de 1200 toneladas.

Se cuentan como alternativas de diseño, dos opciones de construcción. El tinglado piloto que se realizó en la planta donde se lleva a cabo el estudio, y también se consideran los costos de un tinglado realizado por una empresa tercerizada en otra de las unidades productivas de la empresa, que puede trasladarse al sitio de construcción de esta tecnología.

La primera alternativa realizada como prototipo para los ensayos, fue supervisado por una empresa tercerizada, mientras que los insumos y parte de la mano de obra son propias de la empresa, el resumen del detalle de la inversión se presenta en la Tabla 16.

Materiales	Costo por material [U\$S]	Total inversión [U\$S]	Total área prototipo [m²]	Costo unitario [U\$S/m²]
Columnas para estructura	1.868	11.595	225	51,5
Tubo plástico para techo	247			
Alambre de atillo para techo	126			
Polietileno para techo	247			
Mano de obra	9.108			

Tabla 16. Detalles de la inversión realizada para el prototipo, alternativa 1.

La segunda alternativa, realizado en otra unidad de la empresa, fue totalmente tercerizado y se cuenta con los ítems detallados como se resume en la Tabla 17.

Materiales	Costo por material [U\$S]	Total inversión [U\$S]	Total área prototipo [m²]	Costo unitario [U\$S/m²]
Hormigón para bases invernáculo	5.000	97.162	4.140	23,5
Madera curada	32.000			
Nylon	7.000			
Maquinaria	18.150			
Materiales techo	4.000			
Mano de obra invernáculo	27.012			
Contingencias	4.000			

Tabla 17. Detalles de la inversión realizada para por otra unidad.

Por lo tanto, el diseño utilizado para el piloto implica un costo de 51 USD/m², lo cual eleva el costo de inversión en comparación a la otra alternativa, por tanto, se opta por considerar la alternativa dos, agregándole un 30% al costo total de la inversión debido a costos de traslado del personal de la empresa y otras contingencias asociadas.

Teniendo en cuenta la capacidad de apilado determinado en la Tabla 15 y la necesidad de estibar 1200 toneladas para abastecer el total del consumo de la fábrica, se determina que el área necesaria para secar toda la demanda de leña es de aproximadamente 6600 m². Teniendo en cuenta el costo de inversión de la alternativa dos, más un sobrecosto de 30%, se estima 31U\$S/m² como costo unitario; esto determina que la inversión necesaria para un proyecto global es de 201.712 U\$S.

A estibar [ton]	Capacidad de apilado [ton/m²]	Área requerida [m²]	Costo unitario [U\$S/m²]	Inversión [U\$S]
1200	0,18	6575	31	201.712

Tabla 18. Inversión inicial para el proyecto global.

Para estimar el ahorro en el consumo de leña, se utilizan los resultados obtenidos para determinar el contenido de humedad logrado para cada estación en base húmeda, y de esta forma, se determina los kilogramos totales requeridos para cubrir la demanda energética necesaria para la generación de vapor a 0.7MPa de presión.

Los cálculos siguen la línea utilizada en el anteproyecto, corrigiéndose el contenido de humedad en base a los resultados obtenidos de las mediciones realizadas en el período agosto 2019-agosto 2020, el consumo de agua se considera equivalente al vapor generado, despreciándose las purgas de la caldera. Los valores netos de agua consumida se corresponden con los datos reales durante el período de análisis. La Tabla 19 muestra el detalle de este procedimiento mes a mes, con un resumen que indica un ahorro en el consumo de leña de un 9% respecto al total consumido durante ese período.

El consumo real de leña fue de 13.500 toneladas, mientras que la implementación del tinglado permite consumir 12.300 toneladas, la diferencia se aproxima a un total de 1.200 toneladas en doce meses de consumo.

Mes	Consumo leña real [kg]	Consumo leña con proy [kg]	Agua consumida [kg]	Humedad lograda [%bh]
Ago-19	1.262.421	1.132.183	4.385.443	27
set-19	1.303.732	1.108.337	4.445.523	25
Oct-19	1.119.341	949.376	4.069.101	21
Nov-19	1.051.595	934.935	4.007.209	21
Dic-19	764.705	745.652	3.195.927	21
Ene-20	748.406	620.234	2.871.652	16
Feb-20	794.222	700.477	3.243.174	16
Mar-20	901.492	842.844	3.902.325	16
Abr-20	653.207	595.732	2.758.208	16
May-20	1.001.998	935.169	4.201.156	18
Jun-20	1.262.153	974.772	4.110.912	22
Jul-20	1.448.514	1.412.459	5.471.073	27
Ago-20	1.259.249	1.347.497	5.219.449	27

Tabla 19. Estimación del ahorro de consumo de leña.

3.4.3. Flujo de fondos

Para construir el flujo de fondos se incluye como costos, el costo de la leña, el sobre costo por la estiba, los costos de mantenimiento correspondientes al recambio de polietileno, el ingreso debido al ahorro calculado en la Tabla 19, y la inversión inicial presentada en la tabla 18. La vida útil de la inversión se estima en 20 años¹, calculándose el valor residual del mismo dentro del período de análisis de cinco años, se realiza un análisis antes de impuestos.

Se considera una tasa de descuento de 5% anual, impuesta por la empresa, y un factor de cambio de 44 \$/U\$S para la conversión de los costos que se registran en pesos uruguayos.

El valor residual de la inversión se obtiene mediante el siguiente cálculo:

$$Valor\ residual = \frac{Valor\ de\ la\ inversión}{Vida\ útil} * (Vida\ útil - años\ de\ uso)$$

Los costos unitarios para cada ítem se detallan en la Tabla 20

Costo flete [\$/ton]	Costo leña [\$/ton]	Costo acarreo [\$/ton]	Costo estiba [\$/ton]
1565	935	275	200

Tabla 20. Costos unitarios para cada ítem, información de la empresa.

Considerando los costos asociados a inversión y estiba y el ahorro debido al menor consumo de leña anual, el proyecto resulta presentar una rentabilidad positiva. El ahorro anual oscila entre 17.000 a 24.000 U\$S. El Valor Actual Neto es de 9.884 U\$S, lo que significa que la diferencia entre el valor presente de los ingresos y los costos es positiva, por lo tanto, el valor presente de los ingresos es mayor que el valor presente de los costos. La tasa interna de retorno del proyecto es del 6%, superando la tasa mínima exigida para el proyecto. Los detalles de este flujo de fondos se presentan en la Tabla 21.

1

¹ Dado que la infraestructura se compone principalmente de las columnas tratadas, se considera la vida útil del proyecto igual a la vida útil de las columnas. Esta información se obtiene de comunicación personal con empresa que vende este insumo.

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Inversión inicial	-\$ 201.712					
Costo estibado		-\$ 55.908	-\$ 55.908	-\$ 55.908	-\$ 55.908	-\$ 55.908
Ahorro flete		\$ 45.220	\$ 45.220	\$ 45.220	\$ 45.220	\$ 45.220
Ahorro en leña		\$ 27.017	\$ 27.017	\$ 27.017	\$ 27.017	\$ 27.017
Ahorro acarreo		\$ 7.946	\$ 7.946	\$ 7.946	\$ 7.946	\$ 7.946
Costo mantenimiento			-\$ 6.960		-\$ 6.960	
Valor residual del proyecto						\$ 151.284
Neto anual	-\$ 201.712	\$ 24.275	\$ 17.315	\$ 24.275	\$ 17.315	\$ 175.559
			VAN	\$ 9.884		
			TIR	6%		

Tabla 21. Flujo de fondos para el proyecto.

3.4.4. Análisis de sensibilidad

Con el fin de evaluar cuál es la robustez del proyecto frente a cambios en las variables que lo componen, se realizan dos análisis de sensibilidad, uno al costo de estibado y otro al factor de cambio, ya que se identifica que son las variables frente a las cuáles las variaciones en los resultados de VAN y TIR se ven más acentuadas. Las demás variables se mantienen constantes y el análisis se realiza sobre el mismo período de tiempo de cinco años.

Comenzando por el costo de estibado, manteniendo el factor de cambio constante, el máximo valor frente al cual el VAN continúa siendo positivo es de 208 \$/ton, que da como resultado un Valor Actual Neto de 202 U\$S y una Tasa Interna de Retorno que iguala la tasa de interés de 5%.

En cambio, si el factor aumenta a 45 \$/U\$S, el Valor Actual Neto desciende a -1.919 U\$S y la Tasa Interna de Retorno continúa siendo 5%.

Sin embargo, si el costo de estiba se mantiene en 200 \$/ton, el factor de cambio puede crecer hasta 48,5 \$/U\$S, esta combinación da como resultado un Valor Actual Neto de 132 U\$S y la Tasa Interna de Retorno continúa valiendo 5%.

Si se cambian ambas variables, un punto cercano al equilibrio encontrado es para un factor de cambio de 46,5 \$/U\$S y un costo de estiba de 203 \$/ton, que resulta en un Valor Actual Neto de 798 U\$S y 5% para la Tasa Interna de Retorno.

Por lo tanto, el proyecto es aún más sensible al costo de estiba que al factor de cambio, siendo el máximo valor para un factor constante de 208 \$/ton.

4. CONCLUSIONES

Los resultados indican que la tecnología propuesta implica una ganancia real en cuanto a disminuir el contenido de humedad de las astillas de *Eucalyptus spp.* al momento de la combustión. La aplicación del secado asistido permitirá a la empresa reducir el consumo de combustible y mantener la generación de vapor actual, cubriendo la demanda de la industria, ya que no se consumirá la misma energía para evaporar el agua contenida en la madera, aumentando el poder calorífico inferior del combustible disponible para la generación de vapor.

Se verifica la significancia de los tratamientos, logrando el tratamiento con techo un 14% menos de contenido de humedad en relación al tratamiento sin techo. Las variables climáticas eventos de precipitación, mm acumulados y heliofanía son significativas para el proceso de secado asistido y presentan alta colinealidad entre ellas. A su vez, existe una interacción entre los eventos de precipitación y los períodos de estudio que marca una diferencia en el contenido de humedad por cada día de lluvia en los diferentes períodos. El modelo seleccionado logra ajustarse un 55.5% al proceso de estudio, lo cual resulta satisfactorio dado la variabilidad de los efectos tenidos en cuenta en la naturaleza.

La tecnología propuesta permite ahorros significativos y presenta una tasa interna de retorno positiva de lo cual se desprende que su aplicación tendrá beneficios significativos para la empresa, el proyecto es sensible al costo de estiba en primer lugar, seguido por la tasa de cambio, lo cual debe tenerse en consideración al momento de implementarse la tecnología. También permitirá una reducción del tiempo stock lo cual tiene impactos tanto en los costos como en la logística industrial

Existen a su vez beneficios no cuantificables como la mejora respecto a la logística del combustible, ya que la tecnología permite tener controlados los tiempos de stock y la organización espacial y disposición de las astillas.

5. RECOMENDACIONES

Es posible mejorar la tecnología propuesta si se estudia el impacto de colocar equipos que mejoren la circulación de viento, añadiéndole circulación forzada a la convección natural existente, esto podrá influenciar en la tasa de secado. Con el mismo objetivo, lograr mejoras las condiciones del suelo, ya sea mediante la colocación de hormigón o estibar la leña sobre una superficie que permita circulación del viento por debajo de las pilas.

Para generar una base de datos más robusta, es necesario aumentar la frecuencia de muestreos y colocar instrumentos de medición como termómetros y anemómetros que permitan observar la variabilidad in situ del comportamiento del clima.

Evaluar el efecto de la presencia de corteza en las astillas y rolos como agente limitante de la movilidad de agua en sentido radial, además evaluar el efecto del secado sobre el contenido de extractivos y a su vez de éstos sobre el poder calorífico de la madera.

Dado que no solamente la industria en la cual se realizó el estudio utiliza este biocombustible para cubrir la demanda de vapor, estudiar el impacto que puede tener su aplicación en otras industrias que lo requieran es una propuesta interesante, dado que mediante este proyecto queda demostrado que puede ser una tecnología efectiva y viable económicamente.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. Spavento, G.D. Keil y S. Monteoliva, *Propiedades físicas de la madera*. Buenos Aires: Universidad Nacional de la Plata, 2008. Consultado: Feb. 10, 2020. [En línea]. Disponible:
https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/1689/mod_resource/content/0/Propiedades_Fisicas_2008.pdf
- [2] R. Tuset, F. Durán, “Manual de maderas comerciales, equipos y procesos de utilización,” Vol II, Hemisferio Sur, Bs As, Argentina, 2008.
- [3] INUMET. “Climatología estacional” INUMET.gub.uy.
<https://www.inumet.gub.uy/clima/climatologia-estacional> (consultado Feb. 18, 2020).
- [4] J.CF. Walker *et al.*, *Primary wood processing: principles and practice*, Londres: Chapman & Hall, 1993.
- [5] P. Perré y R.B. Keey, “Drying of wood: principles and practices,” en *Handbook of industrial drying*, A.S. Mujumdar, Ed., 4ª ed. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015, cap. 40, pp. 797-846
- [6] S.D. Müzel, *et al.* “Poder calorífico da madeira de Eucalyptus grandis e da Hevea brasiliensis,” *Brazilian Journal of Biosystems Engineering*, vol. 8, no. 2, pp 166-172, 2014. [En línea]. Disponible:
https://www.researchgate.net/publication/281450571_PODER_CALORIFICO_DA_MADEIRA_DE_Eucalyptus_grandis_E_DA_Hevea_brasiliensis_WOOD_CALORIFIC_POWER_FROM_Eucalyptus_grandis_AND_Hevea_brasiliensis_SPECIES
- [7] M. Defo y G. Brunette, “A log drying model and its application to the simulation of the impact of bark loss,” *Forest Products Journal*, vol. 56, no. 5, pp.71-77, Mayo, 2006.
- [8] G. Pisciotano, A. Urquiola y D. Croza, *Aire húmedo, psicrometría y aplicaciones a la ingeniería mecánica*, Montevideo: Depto de Termodinámica Aplicada del IIMPI, UdelaR, 2020.
- [9] H. Alvarez, *Secado de la madera al aire*. (Hojas Divulgadoras del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación). Madrid: Extensión Agraria, 1985. Consultado: Feb. 13, 2020. [En línea]. Disponible:
https://www.mapama.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1984_19.pdf
- [10] M.A. Sattar, “Solar drying of timber - a review,” *Holz als Roh- und Werkstoff*, vol. 51, pp. 409-416, 1993.
- [11] V. Belessiotis y E. Delyannis, “Solar drying,” *Solar Energy*, vol. 85, pp. 1665-1691, 2011.

- [12] B. Corradi, *et al.*, “Influence of chemical composition of eucalyptus wood on gravimetric yield and charcoal properties,” *BioResources*, vol. 8, no. 3, pp. 4574-4592, Mayo 2013.
- [13] S. de Oliveira, *et al.*, “Potential of Mild Torrefaction for Upgrading the Wood Eenergy of Differents Eucalyptus Species,” *Forests*, vol. 9, no. 9, Set. 2018.
- [14] M. García, *et al.*, “Diseño de planta de producción de paneles CLT: cross laminated timber,”
Tesis de grado, Instituto de Ingeniería Química, Fac. Ing., Udelar, 2018.
- [15] R Foundation for Statistical Computing. “R: A language and environment for statistical computing.” R-PROJECT.org
<http://www.R-project.org/> (consultado Set. 18, 2020).
- [16] P. Bettinger, *et al.*, “Valuing and characterizing forest conditions,” en *Forest management and planning*. Londres: Academic Press, 2008, cap. 2, pp. 15-56.