



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LAS
CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA Y LA
GENERACIÓN DE TSS/ADT EN EL PROCESO DE
COCCIÓN SF2.**

Por
Javiera Soledad Rodríguez Neira

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la
Universidad de Concepción para optar al título profesional de
Ingeniera Civil Química

Profesor Guía:
Miguel Ángel Pereira Soto

Profesor Comisión:
Romel Jiménez

Profesional Supervisor:
Matías Cofré Canales
Juan Lagos Valenzuela

Diciembre 2025 Concepción (Chile)
© 2025 Javiera Soledad Rodríguez Neira

© 2025 Javiera Soledad Rodríguez Neira

Ninguna parte de esta tesis puede reproducirse o transmitirse bajo ninguna forma o por ningún medio o procedimiento, sin permiso por escrito del autor.

*A mi Me,
que, aunque tuvo que partir cuando yo tenía apenas 6 años,
siempre supo que lograría ser ingeniera.*

Agradecimientos

Me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que me han acompañado en este viaje académico y personal.

En primer lugar, agradezco a mis padres, Denisse y Mario, por creer siempre en mí y entregarme las herramientas necesarias para que mi única preocupación fuera estudiar, por enseñarme a no rendirme y motivarme día a día, incluso cuando las cosas se volvían complejas. También por apoyarme para viajar diariamente y hacer posible el desarrollo de esta memoria en Santa Fe.

A mis pilares fundamentales dentro de la familia: mi hermano José por su apoyo incondicional, a mis padrinos Javier y Valeska, por impulsarme a ser valiente y confiar en mis capacidades y, por último, a mi prima Magdalena, por estar siempre ahí, apoyarme y hacerme sentir especial.

A mis mascotas: Lulú, mi compañera en las noches de estudio durante los primeros años de carrera, y Lucas, quien llegó en tercer año para convertirse en mi fiel compañero y acompañarme siempre en esas las largas noches de estudio.

A mis amigas y amigos de la universidad, quienes fueron un pilar fundamental para poder avanzar en este camino. Gracias a las risas y también al esfuerzo compartido (o como yo lo llamo, “el sufrimiento en conjunto”) este camino fue más sencillo y quedó lleno de buenos recuerdos. Hago una mención especial a Nicol y Camila, porque recorrer juntas esta última etapa hizo todo más sencillo.

A mis amigos de la infancia, y a quienes se incorporaron hace no tanto tiempo, gracias por su apoyo incondicional y por estar siempre para escucharme.

Finalmente, agradezco a quienes me brindaron la oportunidad de desarrollar mi memoria de título junto a ellos, el equipo CIO de planta Santa Fe. Gracias por las herramientas y conocimientos entregados, por el tiempo dedicado a enseñarme y por el apoyo cada vez que lo necesité.

Resumen

El presente estudio evalúa el impacto de las características de la madera sobre la generación de Tonelada Sólido Seco por tonelada de celulosa producida en el proceso de cocción de la línea Santa Fe 2 (SF2) de CMPC, orientada a la producción de celulosa de fibra corta. El problema se asocia a variaciones del indicador de TSS/ADt, cuyo aumento puede elevar la carga de sólidos hacia evaporadores y desencadenar problemas de balance en el ciclo de recuperación química.

Se integra una revisión bibliográfica para sustentar el efecto de variables de madera y proceso, un levantamiento del estado de la planta mediante visitas y reuniones con áreas operacionales y laboratorios, además de un análisis de datos operacionales que incluye etapas de depuración, cálculo de indicadores y aplicación de herramientas estadísticas (estadística descriptiva, correlaciones y pruebas de hipótesis para la comparación entre periodos). Finalmente, se estructura un modelo causal que describe cómo las propiedades de la madera influyen en variables operacionales, generando cambios en las variables de resultado del área

Los resultados muestran que el año 2023 constituye un periodo estable y comparable con 2025 en términos de ritmos de producción, sin diferencias estadísticamente significativas, lo que permite utilizarlo como línea base para interpretar cambios posteriores. En la evolución temporal del indicador, se observa una disminución sostenida de TSS/ADt hasta 2023 y un aumento leve pero consistente en 2024-2025, lo que se interpreta como el establecimiento de una nueva condición operacional asociada a decisiones y ajustes dentro de la operación, más que a un evento específico. El modelo causal propuesto sugiere que la relación entre las propiedades de la madera y la generación de TSS/ADt se manifiesta principalmente de forma indirecta, al condicionar variables operacionales del digestor, como factores de hidráulicos y el control de severidad, las cuales inciden en el desempeño del proceso.

Por último, se recomienda fortalecer el monitoreo y seguimiento de variables críticas de materia prima y operación, tales como la humedad y densidad básica de la madera, junto con parámetros operacionales como la temperatura de cocción y los factores de extracción y recirculación, por su influencia directa en las variables de respuesta del sistema. Adicionalmente, se sugiere aumentar la frecuencia de medición del indicador orgánico/inorgánico para integrarlo de forma sistemática al control y análisis operacional. Finalmente, se propone incorporar la recomendación del fabricante del digestor para obtener un valor más representativo y consistente con el desempeño real.

Abstract

This study evaluates the impact of wood characteristics on TSS/ADt generation in the cooking process of CMPC's Santa Fe 2 (SF2) line, which is focused on producing short-fiber pulp. The issue addressed is associated with variations in the TSS/ADt indicator, whose increase may raise the solids load to the evaporators and lead to balance problems in the chemical recovery cycle.

The methodology integrates a literature review to support the effect of wood and process variables, an assessment of the plant's operating status through site visits and meetings with operational areas and laboratories, and an operational data analysis that includes data cleaning, indicator calculation, and the application of statistical tools (descriptive statistics, correlations, and hypothesis testing for period-to-period comparisons). Finally, a causal model is developed to describe how wood properties influence operational variables, resulting in changes in the area's output variables.

The results show that 2023 is a stable period and comparable to 2025 in terms of production rates, with no statistically significant differences, allowing it to be used as a baseline for interpreting subsequent changes. In the temporal evolution of the indicator, a sustained decrease in TSS/ADt is observed up to 2023, followed by a slight but consistent increase in 2024–2025, which is interpreted as the establishment of a new operating condition associated with operational decisions and adjustments rather than a specific event. The proposed causal model suggests that the relationship between wood properties and TSS/ADt generation is mainly indirect, as wood properties condition digester operating variables such as hydraulic factors and severity control which in turn affect process performance.

Lastly, recommendations are proposed to strengthen the monitoring and tracking of critical raw-material and operational variables, such as wood moisture content and basic density, together with operating parameters such as cooking temperature and extraction/recirculation factors, due to their direct influence on the outcome variables. In addition, it is suggested to increase the measurement frequency of the organic/inorganic indicator to integrate it systematically into operational control and analysis. Finally, it is proposed to incorporate the digester manufacturer's recommendation to obtain a production value that is more representative and consistent with actual process performance.

Índice

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	OBJETIVOS	5
2.1.	OBJETIVO GENERAL	5
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
3.	METODOLOGÍA.....	6
3.1.	ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS.....	6
3.2.	ESTATUS PLANTA	6
3.3.	DEFINICIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS VARIABLES DE INTERÉS	7
3.4.	OBTENCIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS.....	10
3.4.1.	Depuración de datos.....	10
3.4.2.	Cálculo TSS/ADt	10
3.4.3.	Cálculo niveles de licor negro.....	12
3.5.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	13
3.5.1.	Estadística descriptiva.....	13
3.5.2.	Análisis de correlaciones.....	13
3.5.3.	Determinación de periodos de comparación	14
3.5.4.	Evaluación estadística de diferencia de periodos	15
3.6.	CONSTRUCCIÓN MODELO CAUSAL DEL PROCESO	15
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	16
4.1.	VALIDACIÓN CONTEXTO OPERACIONAL	16
4.1.1.	Comportamiento niveles de licor negro	16
4.1.2.	Comportamiento producción y TSS/ADt	18
4.2.	RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO	20
4.2.1.	Estadística descriptiva.....	20
4.2.2.	Análisis de correlación exploratorio	23
4.2.3.	Análisis inferencial	24
4.2.4.	Correlaciones focalizadas.....	27
4.3.	ANÁLISIS CAUSAL	27
5.	CONCLUSIONES.....	35
6.	RECOMENDACIONES	36
7.	REFERENCIAS	37
8.	ANEXOS.	39
8.1.	ANEXO 1: MADERA.....	39

8.1.1.	Diagrama de bloques proceso.....	39
8.2.	ANEXO 2: COCCIÓN	39
8.2.1.	Diagrama de bloques proceso.....	39
8.3.	ANEXO 3: RESULTADOS ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA ANUAL PROPIEDADES MADERA	40
8.4.	ANEXO 4: RESULTADOS ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA ANUAL VARIABLES COCCIÓN	43
8.5.	ANEXO 5: MATRIZ DE SPEARMAN EXPLORATORIA.....	50
8.6.	ANEXO 6: MATRIZ DE SPEARMAN FOCALIZADA	51
8.7.	ANEXO 7: BOXPLOTS COMPARATIVOS 2023 VS 2025 PARA VARIABLES DEL MODELO CAUSAL	52
8.8.	ANEXO 8: RESUMEN FI	45

Índice de figuras

Figura 1.1. Diagrama de bloques proceso Kraft. Fuente: Elaboración propia.	1
Figura 3.1. Diagrama proceso digestor. Fuente: Manual interactivo CMPC cocción, lavado y deslignificación.	9
Figura 4.1. Comportamiento niveles de licor negro grueso por año.	16
Figura 4.2. Comportamiento niveles de licor negro débil por año.	17
Figura 4.3. Producción Digestor v/s Producción Digestor Recalculada.	18
Figura 4.4. Comportamiento producción digestor por año.	19
Figura 4.5. Comportamiento TSS/ADt por año.	19
Figura 4.6. Boxplot comparativo (2023 vs 2025) de densidad básica.	28
Figura 4.7. Boxplot comparativo (2023 vs 2025) de factor de recirculación CD2.	28
Figura 4.8. Boxplot comparativo (2023 vs 2025) de temperatura de cocción.	28
Figura 4.9. Boxplot comparativo (2023 vs 2025) de factor H.	28
Figura 4.10. Boxplot comparativo (2023 vs 2025) de kappa.	29
Figura 4.11. Boxplot comparativo (2023 vs 2025) de selectividad.	29
Figura 4.12. Boxplot comparativo (2023 vs 2025) de TSS/ADt.	29
Figura 4.13. Esquema causal. Fuente: Elaboración propia.	30
Figura 8.1. Diagrama de bloques proceso de astillado. Fuente: Elaboración propia.	39
Figura 8.2. Diagrama de bloques proceso cocción. Fuente: Elaboración propia.	39
Figura 8.3. Matriz de correlaciones de spearman.	50
Figura 8.4. Matriz de correlaciones de spearman acotada.	51
Figura 8.5. Boxplot comparativo (2023 vs 2025) de carga de álcali.	52
Figura 8.6. Boxplot comparativo (2023 vs 2025) de álcali residual de transferencia.	52
Figura 8.7. Boxplot comparativo (2023 vs 2025) de dosificación de licor blanco en la alimentación.	52
Figura 8.8. Boxplot comparativo (2023 vs 2025) de densidad loose.	52
Figura 8.9. Boxplot comparativo (2023 vs 2025) de pinchip.	43
Figura 8.10. Boxplot comparativo (2023 vs 2025) de aceptado.	43
Figura 8.11. Boxplot comparativo (2023 vs 2025) de factor de extracción CD3.	43
Figura 8.12. Boxplot comparativo (2023 vs 2025) de residual de álcali en CD3.	43
Figura 8.13. Boxplot comparativo (2023 vs 2025) de orgánico/inorgánico.	43
Figura 8.14. Boxplot comparativo (2023 vs 2025) de humedad.	43

Índice de tablas

Tabla 3.1 Valores distribuciones de tamaño no óptimas. (CMPC Pulp, 2021)	6
Tabla 3.2 Propiedades seleccionadas madera	7
Tabla 3.3. Propiedades seleccionadas cocción.....	8
Tabla 4.1. Resultados prueba de hipótesis entre producciones.	18
Tabla 4.2. Estadística descriptiva básica propiedades madera.	20
Tabla 4.3. Estadística descriptiva básica variables cocción.	22
Tabla 4.4. Resultados prueba de hipótesis entre ritmos de producción periodos seleccionados.....	25
Tabla 4.5. Resultados pruebas de hipótesis entre variables cocción periodos seleccionados.	25
Tabla 4.6. Resultados pruebas de hipótesis propiedades madera periodos seleccionados.....	26
Tabla 4.7. Medianas operacionales de las variables de entrada, proceso y salida para los periodos 2023 y 2025.	27
Tabla 8.1. Resultados estadística descriptiva propiedades madera del año 2019.....	40
Tabla 8.2. Resultados estadística descriptiva propiedades madera del año 2020.....	40
Tabla 8.3. Resultados estadística descriptiva propiedades madera del año 2021.....	40
Tabla 8.4. Resultados estadística descriptiva propiedades madera del año 2022.....	41
Tabla 8.5. Resultados estadística descriptiva propiedades madera del año 2023.....	41
Tabla 8.6. Resultados estadística descriptiva propiedades madera del año 2024.....	41
Tabla 8.7. Resultados estadística descriptiva propiedades madera del año 2025.....	42
Tabla 8.8. Resultados estadística descriptiva variables cocción del año 2019	43
Tabla 8.9. Resultados estadística descriptiva variables cocción del año 2020	44
Tabla 8.10. Resultados estadística descriptiva variables cocción del año 2021	45
Tabla 8.11. Resultados estadística descriptiva variables cocción del año 2022	46
Tabla 8.8. Resultados estadística descriptiva variables cocción del año 2023	47
Tabla 8.13. Resultados estadística descriptiva variables cocción del año 2024	48
Tabla 8.14. Resultados estadística descriptiva variables cocción del año 2025	49

Nomenclatura

Símbolo/abreviatura	Descripción	Unidad
ADt/día	Tonelada de celulosa producida por día	-
SF1	Línea productiva 1 Planta Santa Fe	-
SF2	Línea productiva 2 Planta Santa Fe	-
TSS/ADt	Tonelada Sólido seco por tonelada de celulosa producida	-
$kg/m^3 ssc$	Kg por m^3 de sólido sin corteza	-
Densidad Loose	Densidad aparente	Kg/m^3
ρ_s	Coefficiente de Spearman	-
DCS	Distributed control system	-

1. Introducción

En la industria de la celulosa se emplean diversos procesos de transformación físicos y/o químicos a la madera, la cual está compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa, lignina y, en menor proporción, por otros extractivos. El objetivo principal de estos procesos es separar la celulosa de la lignina mediante la desestructuración de la madera. Entre los procesos químicos se destaca el proceso Kraft, cuyo propósito es separar la lignina mediante una cocción alcalina de la madera con licor blanco, compuesto principalmente por hidróxido de sodio (NaOH) y sulfuro de sodio (Na_2S) (Sixta, 2006).

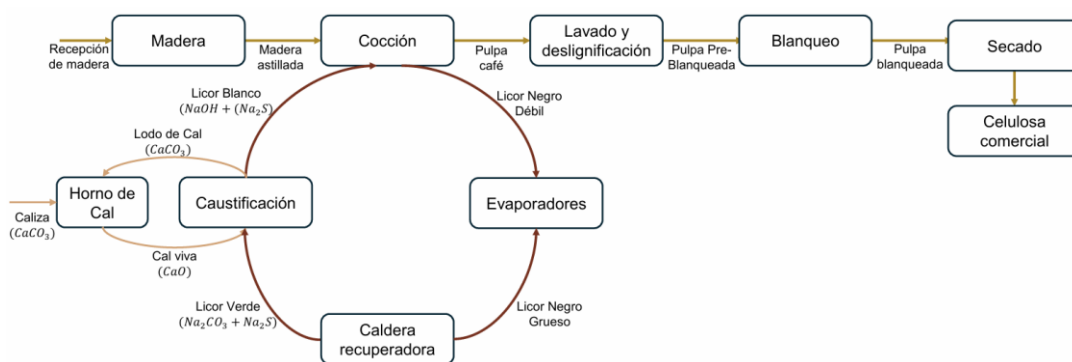


Figura 1.1. Diagrama de bloques proceso Kraft. Fuente: Elaboración propia.

Tal como se muestra en la figura 1.1, el proceso Kraft está conformado por diversas etapas. La primera corresponde a la preparación de la madera, donde esta es descortezada y triturada en forma de astillas con un tamaño estandarizado. Estas ingresan al área de cocción, cuyo equipo principal es el digestor, el cual lleva a cabo la reacción de deslignificación con licor blanco y temperatura, produciendo pulpa de celulosa y licor negro débil. Este último ingresa al ciclo de recuperación química, donde se concentra en un tren de evaporadores y posteriormente se combustiona su fracción orgánica en la caldera recuperadora. A partir del inorgánico remanente se genera licor verde, el cual es utilizado en la etapa de caustificación para regenerar licor blanco, que luego retorna al proceso.

De forma paralela, la pulpa pasa a la etapa de lavado y deslignificación, diseñada para retirar los compuestos solubles liberados en la cocción (los cuales son reutilizados en el área de recuperación química) y reducir el contenido de lignina remanente mediante deslignificación con oxígeno y lavado. Posteriormente, la pulpa ingresa a blanqueo, donde es tratada principalmente con dióxido de cloro (ClO_2) para alcanzar las blancuras establecidas según la norma ISO 2470-1. Finalmente, la pulpa entra a la etapa de secado, donde se elimina el exceso de agua mediante sistemas de vacío y prensas. Una vez seca, la pulpa es cortada en hojas y fardos para su posterior comercialización.

El proceso descrito constituye la base del método de producción de pulpa de celulosa en CMPC, empresa fundada en 1920 (CMPC, s.f.), y líder en la industria forestal y del papel a nivel mundial. CMPC se especializa en la producción de celulosa y papel, además de productos de embalaje y tissue.

Actualmente operan tres plantas de celulosa en Chile, entre ellas Planta Santa Fe, ubicada en Nacimiento, región del Biobío (CMPC, s.f.). Esta instalación es una de las más grandes de la compañía y se especializa en la producción de celulosa a partir de fibra corta de eucalipto, destinada principalmente a la fabricación de papel y derivados (CMPC-Celulosa, s.f.). La planta cuenta con dos líneas de producción: SF1, implementada en 1990 con una capacidad máxima de producción de 380,000 ADt/año y SF2, operativa desde 2006, con una capacidad de 1,120,000 ADt/año (CMPC-Celulosa, s.f.).

En los últimos años, la operación de SF2 ha presentado desafíos relevantes. Actualmente, se plantea que existe un aumento en los TSS/ADt (fracción de sólidos disueltos expresados por tonelada de pulpa seca al aire) generados en el área de cocción, lo que incrementaría los volúmenes de licor negro para ritmos de producción equivalentes a los de años anteriores. Se presume que esta situación ha desencadenado un desbalance en los ritmos de producción, generando la necesidad de realizar ajustes en el proceso para mantener la estabilidad de la planta.

Respecto al origen de este fenómeno, se han propuesto diversas hipótesis dentro de planta. Entre ellas, una pérdida en la capacidad de evaporación, una reducción en la capacidad de quemado en la caldera recuperadora o, factores asociados a la operación del digestor, donde cambios en las condiciones de cocción podría estar generando mayor TSS/ADt.

En este contexto, la tecnología del digestor continuo de SF2, llamada Lo-Solids, incorpora múltiples extracciones y recirculaciones distribuidas a lo largo de su altura, con el fin de reducir la carga de sólidos en el proceso de la cocción. Este diseño busca favorecer una operación más estable y homogénea.

Dentro del enfoque asociado al digestor, se consideran dos líneas de análisis: (1) cambios en las condiciones operacionales de la línea de fibra a lo largo del tiempo, y (2) variaciones en las características de la madera procesada. Esta segunda hipótesis constituye el foco del presente estudio.

Se conoce que los TSS/ADt están compuestos por elementos orgánicos (lignina, celulosa, hemicelulosa) e inorgánicos (componentes de licor y extractivos). Por otro lado, el rendimiento pulpable refleja la proporción de pulpa obtenida a partir de una cantidad determinada de madera alimentada (KPI

Depot, s.f.). Ambos parámetros presentan una relación inversa. Al aumentar los TSS/ADt, disminuye el rendimiento pulpable, ya que se degrada una mayor cantidad de componentes pulpables, incrementando así la carga de sólidos en el licor (Smook, 2002).

Como consecuencia de este comportamiento, un aumento en los TSS/ADt no solo implica una disminución del rendimiento pulpable, sino también una mayor carga de sólidos hacia evaporadores, lo que puede generar dificultades en el ciclo de recuperación química.

Como indicador complementario del comportamiento de la cocción y balance químico del proceso, se utiliza la relación orgánico/inorgánico del licor negro (Smook, 2002). Este parámetro indica una aproximación al grado de degradación de los componentes orgánicos de la madera respecto a la carga inorgánica del licor, y es empleado operacionalmente como una señal de la severidad química y de la eficiencia del proceso de cocción.

El presente estudio se centra en determinar si las propiedades de la madera (en este caso específicamente *Eucalyptus Nitens*, principal especie utilizada en SF2) influyen en este fenómeno, en el periodo correspondiente a enero de 2019 a junio de 2025. Dentro de estas propiedades, se considera la densidad básica, definida como la relación entre la masa seca y el volumen saturado (volumen verde).

Diversos estudios han señalado que las diferencias en la densidad básica de la madera tienen implicaciones directas tanto en el rendimiento de la pulpa como en el consumo específico de la madera (Elissetche et al., 2011). En particular, un análisis realizado por el centro de investigación de Planta Santa Fe (I+D) evidenció que existe una relación entre la densidad básica y el rendimiento pulpable (CMPC Celulosa, 2010), lo que sugiere que esta propiedad podría influir en la generación de los TSS/ADt.

La humedad es otra propiedad relevante, definida como el contenido de agua presente en las astillas. Un incremento en esta favorece la vaporización, ya que, al poseer una mayor cantidad de agua, la astilla contiene menos aire que debe ser eliminado en dicha etapa. Asimismo, esto permite mejorar la impregnación al facilitar la difusión de los reactivos hacia el interior de la madera. Sin embargo, esta misma condición reduce el volumen capilar disponible y disminuye la velocidad de penetración del licor (Foelkel, 2009).

Otro factor importante es la granulometría de las astillas, la cual comprende su forma y tamaño, y se encuentra estrechamente vinculada con diversos parámetros del proceso, como la velocidad de deslignificación. Según estudios, las astillas de menor tamaño al establecido, como los pinchips y finos, presentan una velocidad de deslignificación más rápida (Santos et al., 2011), mientras que las astillas de mayor tamaño muestran velocidades menores. Esta condición puede generar diferencias en los tiempos de cocción y afectar la uniformidad del proceso. Asimismo, se ha demostrado que el astillado influye en la eficiencia del proceso Kraft, dado que astillas con tamaños no óptimos pueden reducir el rendimiento pulpable (Kroslak & Courchene, 2008).

Dentro de la importancia de la granulometría, también es necesario considerar el largo y espesor de las astillas, ya que estas dimensiones influyen en la capacidad de impregnación. El licor ingresa principalmente por la sección transversal, donde existe mayor porosidad, por lo tanto, astillas fuera de los rangos establecidos (mayores dimensiones) muestran una penetración más limitada, generando que el proceso sea más lento (Díaz Morales, 2011). Además, se ha documentado que astillas más gruesas requieren de mayor carga alcalina para alcanzar el mismo grado de deslignificación que astillas más delgadas, bajo condiciones similares de cocción (Sixta, 2006).

Estos antecedentes permiten sugerir que las propiedades de la madera influyen de manera directa en el proceso Kraft, particularmente en el área de cocción. Por ello, es posible que estas características condicionen la necesidad de realizar ajustes operativos para alcanzar los resultados esperados en planta y, en consecuencia, podrían relacionarse con la generación de TSS/ADt en el área de interés.

No obstante, una parte de la bibliografía mencionada corresponde a estudios realizados a escalas reducidas y en condiciones de laboratorio, lo que limita su aplicabilidad directa a plantas industriales de gran magnitud, como lo es Santa Fe. Por ello, persiste la interrogante sobre cómo estas propiedades influyen en la operación real del proceso de cocción y la magnitud del impacto que pueden generar.

Considerando lo expuesto, este estudio plantea analizar la posible relación entre las propiedades de la madera utilizada en SF2 y la generación de TSS/ADt en el proceso de cocción, mediante un análisis estadístico de los datos históricos complementado con antecedentes bibliográficos. Este enfoque busca establecer relaciones cuantitativas entre las características de la materia prima y los indicadores clave dentro del área de cocción, con el fin de identificar los factores que condicionan la variabilidad del proceso y proponer oportunidades de mejora.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Evaluar la influencia de las características físicas y químicas de la madera en la generación de TSS/ADt durante el proceso de cocción en la planta Santa Fe 2, mediante un análisis estadístico de datos históricos y operacionales.

2.2. Objetivos específicos

1. Caracterizar la madera procesada en planta Santa Fe, identificando su comportamiento operativo y los valores de referencia del proceso.
2. Investigar teóricamente cómo las propiedades de la madera se relacionan con la generación de TSS/ADt.
3. Correlacionar las tendencias históricas y estadísticas de la madera de Santa Fe 2 con la generación de TSS/ADt para identificar desviaciones y patrones de impacto.
4. Determinar cómo los cambios en la operación de cocción, vinculados a la calidad de la madera alimentada, afectan a la generación de TSS/ADt.

3. Metodología

A continuación, se presenta la metodología empleada para desarrollar el análisis estadístico orientado a evaluar la posible relación entre las características de la madera y la generación de TSS/ADt en el proceso de cocción.

3.1. Antecedentes bibliográficos

En esta etapa se realizó una revisión bibliográfica orientada a comprender cómo las características físicas y químicas de la materia prima se relacionan con el proceso de cocción, cómo influyen en su comportamiento y de qué manera pueden afectar tanto a las variables de proceso como a las de resultado. La búsqueda incluyó artículos científicos, informes técnicos de CMPC, publicaciones en bases de datos académicas y libros especializados en el proceso de pulpaje kraft.

La información recopilada proporcionó una base conceptual que permitió entender cómo estas propiedades podrían vincularse con el desempeño del proceso. Estos antecedentes permiten fundamentar si las relaciones observadas entre las variables responden a asociaciones casuales o vínculos causales.

3.2. Estatus planta

Para el desarrollo del estudio se consideró información operacional real de SF2, obtenida mediante visitas y reuniones con personal del área madera, de los laboratorios y la operación de sala de cocción, con el objetivo de comprender el funcionamiento de cada unidad, identificar las variables monitoreadas en el proceso y conocer los métodos empleados para su seguimiento.

En el área de madera se recopilaron las variables físicas y químicas monitoreadas, junto con las medidas de clasificación asociadas a la granulometría del astillado, determinadas según el largo de las astillas. Estos antecedentes se presentan en la tabla 3.1:

Tabla 3.1 Valores distribuciones de tamaño no óptimas. (CMPC Pulp, 2021)

Parámetro	Valor (mm)
SobreTamaño	> 45
SobreEspesor	> 8
Aceptado	7 a 45
PinChip	3 a 7
Finos	< 3

De igual forma, junto a los operadores responsables del proceso de astillado, se revisó el procedimiento mediante el cual la madera se transforma en astillas, lo que permitió elaborar un diagrama de bloques representativo, que se presenta en la figura 7.1 (anexo 1).

Adicionalmente, se realizaron visitas a los laboratorios central y de madera en planta, con el propósito de revisar los procedimientos de medición y control de las propiedades. En el laboratorio de madera se verificaron las metodologías empleadas para evaluar granulometría, humedad, densidad básica y densidad aparente. En el laboratorio central se observó la medición del porcentaje de sólidos en el licor negro débil posterior a los filtros de licor negro, previo a su envío a evaporadores, cuyo valor típico en planta se sitúa entre 14 y 15%.

Por otro lado, junto al operador de sala de cocción, se revisaron las condiciones de funcionamiento del digestor, los parámetros de operación monitoreados y cómo afectan estos al proceso. Esta información se utilizó para elaborar un diagrama de bloques que mapea las corrientes de los equipos, presentado en la figura 7.2 (anexo 2).

En conjunto, el levantamiento de información realizado permitió identificar las variables de proceso que se registran de manera sistemática en planta, estableciendo la base para definir las variables de interés consideradas en el estudio.

3.3. Definición y caracterización de las variables de interés

La selección de variables a analizar se realizó a partir de la información recopilada en las distintas unidades, lo que permitió obtener una primera aproximación respecto de cuáles podrían influir en la operación y, en particular, en la variable de interés. En el caso de madera, y considerando su disponibilidad y monitoreo en planta, se elaboró el listado presentado en la tabla 3.2:

Tabla 3.2 Propiedades seleccionadas madera

Propiedades	Unidad de medida
Densidad Básica	<i>Kg/m³ssc</i>
Densidad Loose	<i>Kg/m³</i>
Humedad	%
Granulometría	%
Corteza	%

Las mediciones de estas propiedades se realizan dos veces por turno en el caso de granulometría y humedad. En cuanto a la densidad básica y loose sólo se realizan una vez por turno. Las muestras se

extraen desde la cinta que alimenta al digestor y se envían al laboratorio de madera, donde son analizadas. Posteriormente, los resultados se registran en SAGOP y DCS para su monitoreo en línea.

En cuanto a las variables de cocción, estas se obtienen a partir de tres tipos de fuentes: (1) mediciones directas realizadas mediante instrumentación en terreno, (2) cálculos derivados de dichas mediciones y (3) en algunos casos, mediciones efectuadas en laboratorio. El listado se presenta en la tabla 3.3:

Tabla 3.3. Propiedades seleccionadas cocción.

Variables	Unidad de medida	Tipo de medición
Temperatura tope digestor	°C	Intrumentación
Temperatura cocción digestor	°C	Intrumentación
Temperatura fondo digestor	°C	Intrumentación
Presión tope digestor	Bar	Intrumentación
Presión fondo digestor	Bar	Intrumentación
Presión tope torre de impregnación	Bar	Intrumentación
Presión fondo torre de impregnación	Bar	Intrumentación
Factor H	H	Cálculo
Sulfidez	%	Cálculo
Carga de álcali	%	Cálculo
Residual de álcali transferencia	g/L	Cálculo
Residual álcali CD1	g/L	Cálculo
Residual álcali CD3	g/L	Cálculo
Dosificación licor blanco alimentación	%	Cálculo
Dosificación licor blanco transferencia	%	Cálculo
Dosificación licor blanco CD2	%	Cálculo
Dosificación licor blanco CD3	%	Cálculo
Factor de extracción CD1	m^3/ADt	Cálculo
Factores de Recirculación CD2	m^3/ADt	Cálculo
Factor de extracción CD3	m^3/ADt	Cálculo
Factor de dilución de fondo	m^3/ADt	Cálculo
Producción del digestor	$ADt/día$	Cálculo
% de sólidos	%	Análisis de laboratorio
Licor negro a evaporadores (LN a evaporadores)	L/s	Instrumentación
Niveles de licor negro	%	Instrumentación
TSS/ADt	—	Cálculo

Kappa	—	Instrumentación
Viscosidad	<i>mL/g</i>	Análisis de laboratorio
Selectividad	—	Cálculo
Orgánico/Inorgánico	—	Análisis de laboratorio

Las zonas de operación asociadas a las variables descritas en la tabla anterior se definen a continuación:

- Extracción de transferencia: Corresponde a la extracción del licor posterior a la impregnación, donde se ajusta la relación licor madera antes de ingresar a la zona principal de cocción. Esta extracción se realiza en el tope del digestor y parte del licor es utilizada para impulsar las astillas hacia este.
- Extracción CD1: Ubicada en la sección media del digestor. Extrae el licor gastado con el fin de controlar el nivel y remover sólidos generados durante la etapa inicial de la cocción.
- Recirculación CD2: Circulación principal del digestor, encargada de calentar el licor a temperatura de cocción, redistribuir el álcali de forma radial para mantener una cocción uniforme y asegurar el balance hidráulico.
- Extracción CD3: Ubicada en la parte baja del digestor. Remueve el licor gastado y sólidos remanentes. Su flujo se divide una fracción que retorna a la torre de impregnación y a CD2, mientras que lo restante se envía a los filtros de licor negro para posteriormente ser dirigida a evaporadores.

Las ubicaciones específicas de las extracciones se muestran en siguiente figura:

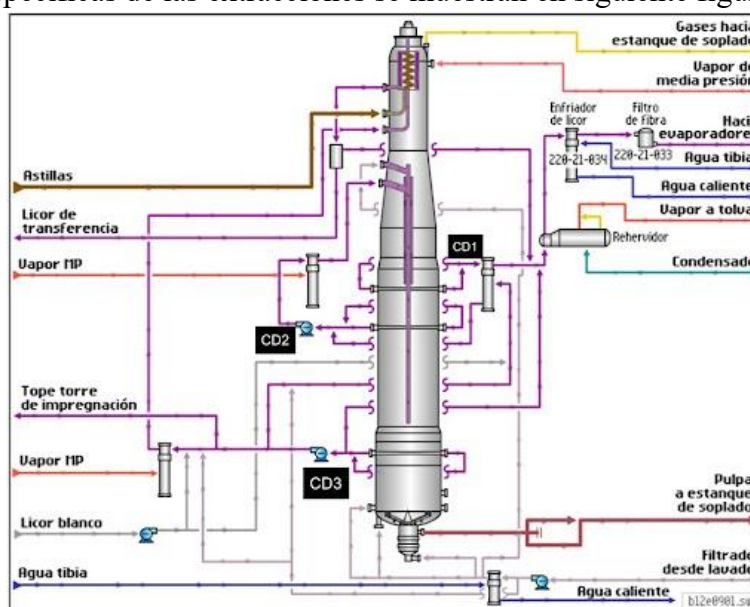


Figura 3.1. Diagrama proceso digestor. Fuente: Manual interactivo CMPC cocción, lavado y deslignificación.

3.4. Obtención y tratamiento de datos

Posteriormente, se recopilaron los indicadores de cada variable desde PI System, herramienta que permite almacenar y visualizar los datos del DCS en línea y registrar de forma continua la información. Esta plataforma incluye mediciones en terreno, cálculos derivados y los resultados de laboratorio, lo que permite disponer de información completa y de largos periodos de operación.

Una vez recopilados los indicadores, estos fueron descargados a través de PI DataLink, herramienta complementaria de Excel que permite realizar la descarga de datos en un periodo de fechas definido y con una frecuencia temporal determinada por el usuario. En este caso, se utilizó el periodo de estudio definido, con una frecuencia de una hora.

3.4.1. Depuración de datos

Tras la descarga y organización de datos en el archivo Excel, estos fueron importados a Python, donde se eliminaron todos aquellos datos que no correspondían a valores numéricos (como *No Data*, entre otros). Posteriormente se aplicó un filtro basado en la producción del digestor, con el propósito de descartar periodos asociados a detenciones de planta y partidas con baja producción.

Luego de este filtro inicial, se procedió a eliminar los datos considerados atípicos. Para ello, se utilizó el criterio estadístico del percentil 95, descartando el 5% de los valores más extremos (tanto inferiores como superiores) de cada variable. De esta manera, se obtuvieron valores más representativos del comportamiento operacional, reduciendo las perturbaciones asociadas a eventos puntuales o defectos en las mediciones. Todo lo anterior fue implementado mediante un código en Python.

Una vez finalizada la depuración y verificada la consistencia de los datos, estos quedaron listos para su posterior análisis.

3.4.2. Cálculo TSS/ADt

Previo al análisis estadístico, se desglosó el cálculo utilizado en planta para el indicador TSS/ADt, con el fin de monitorear las variables involucradas y detectar posibles anomalías en sus mediciones. La fórmula que modela esta variable es la siguiente:

$$\frac{TSS}{ADt} = \frac{\text{Toneladas solidos Seco a evaporadores SF2}}{\text{Producción del digestor}} \quad (1)$$

El numerador de la ecuación 1 corresponde a un cálculo compuesto por diversas variables y conversiones de unidades. Se tiene lo siguiente:

$$\frac{TSS}{\text{día}} = LN \text{ a evaporadores} \left(\frac{L}{s} \right) * \frac{\% \text{ de sólidos}}{100} * \rho_{LN} \left(\frac{g}{cm^3} \right) * 3.6 \left(\frac{g \cdot cm^3 \cdot ton \cdot s \cdot min}{L \cdot g \cdot min \cdot h} \right) * 24 \left(\frac{h}{\text{día}} \right) \quad (2)$$

El flujo de licor negro es medido por un flujómetro ubicado a la salida de los filtros de licor negro que van hacia evaporadores. Para facilitar el cálculo, donde el valor 3.6 opera como factor de conversión de unidades, y además se consideró el valor de la densidad del licor como fijo ($1.06 \frac{g}{cm^3}$), dado que en los periodos estudiados las variables de temperatura y sólidos, de las cuales esta depende, se mantienen estables. El porcentaje de sólidos (% de sólidos) puede ser determinado por instrumentación (densímetro) o mediante el análisis realizado en el laboratorio central (medido cada dos horas).

Se modeló el comportamiento del indicador a partir del desglose del cálculo, con el objetivo de verificar su congruencia con lo esperado por la operación. A partir de esta observación, se evidenció un problema en el instrumento encargado de medir el porcentaje de sólidos durante más de un año. Por este motivo, se descartó trabajar con dicha medición, optando por utilizar la de laboratorio.

Además, se desglosó el cálculo de la producción del digestor. Esta estimación se basa en la medición de la alimentación mediante el chip meter, a la cual se le aplica un rendimiento teórico. Esta se define como:

$$\frac{ADt}{\text{día}} = \frac{\text{Grado de llenado} * V. \text{tornillo} * \rho_{\text{aparente}} * \text{Rendimiento} * rpm \text{ tornillo}}{62.5} \quad (3)$$

Donde,

- Grado de llenado: 0.87 (configurado por el operador).
- Volumen del tornillo: $0.7232 m^3$ (fijo, proporcionado por el fabricante).
- ρ_{aparente} : $172 \frac{Kg}{m^3}$ (configurado por el operador).
- Rendimiento: 54.5 % (valor teórico, proporcionado por el fabricante).
- Rpm del tornillo: Valor dinámico (definido según mediciones de instrumentación).
- 62.5: Factor de conversión de unidades.

Se estudió el comportamiento de la producción según la modelación de la ecuación 3, la cual proviene del manual del fabricante del digestor. En dicho documento se señala que la densidad

aparente no debe considerarse como un valor constante (CMPC Celulosa, s.f.), ya que es necesario utilizar un valor real para obtener una estimación más precisa de la producción. En la operación de planta, este valor se considera un número fijo que ocasionalmente es modificado por el operador.

A partir de esta observación, se decidió trabajar con una producción que incorporara este parámetro de manera dinámica, utilizando las mediciones proporcionadas por el laboratorio de madera, con el fin de emplear datos más representativos de la operación.

Para verificar si existía una diferencia real entre los valores actualmente utilizados por la operación y aquellos obtenidos siguiendo la recomendación del manual, se desarrolló un código en Python que aplicaba la prueba de hipótesis no paramétrica U de Mann-Whitney. Esta prueba resulta adecuada para este tipo de datos, ya que no requiere asumir normalidad, las varianzas no son necesariamente iguales y las muestras son independientes.

La prueba seleccionada se centra en comparar la función de distribución acumulada (F) del parámetro de producción ($ADt/día$) entre la producción actual y la versión recalculada. Bajo este enfoque, se planteó la siguiente prueba de hipótesis, utilizando un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$:

$$\begin{aligned} H_0: F_{actual}(x) &= F_{recalculada}(x) \\ H_1: F_{actual}(x) &\neq F_{recalculada}(x) \end{aligned} \quad (4)$$

Donde,

- H_0 : Las distribuciones de las producciones son iguales.
- H_1 : La distribución de la producción actual es sistemáticamente diferente de la recalculada.

3.4.3. Cálculo niveles de licor negro

Para representar los niveles de licor presentes en planta, se trabajó con un ponderado entre los niveles de los estanques de licor negro débil disponibles para SF2, donde se cuenta con dos estanques de $6500 m^3$ de volumen cada uno para almacenarlo. La fórmula resultante es la siguiente:

$$Nivel LND total (\%) = \frac{(Nivel Tk 1 * 6,500 m^3) + (Nivel Tk 2 * 6,500 m^3)}{13,000 m^3} \quad (5)$$

De este modo, se obtuvo un indicador representativo del nivel de licor negro débil general en planta, lo que permitió analizar su comportamiento durante los últimos años.

3.5. Análisis estadístico

A continuación, se presenta el análisis estadístico realizado para comprender el comportamiento de las variables y su relación con el desempeño del proceso.

3.5.1. Estadística descriptiva

Para iniciar el estudio estadístico, fue necesario comprender la estadística descriptiva de los factores analizados, observando su comportamiento general y sus variaciones a lo largo de distintos periodos (años), con el propósito de identificar posibles cambios asociados a la materia prima o a las condiciones de operación del digestor.

Este análisis se llevó a cabo mediante Python, utilizando la función *describe*, para obtener las principales medidas descriptivas de cada parámetro descargado en formato tabular. Complementariamente, también era relevante incorporar una representación gráfica de su comportamiento. Con este fin, se desarrolló un código de Python que, mediante la identificación del año correspondiente a cada registro a partir de la columna fecha, organiza la información de cada variable para representarla en un *boxplot*, mostrando su comportamiento anual. Este procedimiento fue ejecutado dentro de un ciclo *for*, lo que permitió aplicar la misma lógica de manera automática y consistente para todas las variables.

Además, se evaluó si los datos seguían una distribución normal, ya que este aspecto es un factor excluyente para la aplicación de ciertos criterios estadísticos. Para obtener esta información, se añadieron a la tabla generada por la función *describe* los valores de sesgo y la curtosis estandarizada. Si estos valores se encuentran en el rango de -2 a 2 , se puede considerar que los datos se ajustan a una distribución normal.

3.5.2. Análisis de correlaciones

Para complementar la estadística descriptiva, se desarrolló un análisis de correlaciones con el fin de identificar la existencia y el sentido de posibles relaciones entre las variables estudiadas y el parámetro de interés (TSS/ADt).

Para ello, se consideró que no todas las variables seguían una distribución normal, lo cual es común en estudios de procesos industriales debido a su alta variabilidad. En función de esto, se decidió utilizar el coeficiente de correlación de Spearman.

A diferencia del coeficiente de Pearson, Spearman no requiere que los datos sigan una distribución normal y, además, se basa en rangos de valores, lo que evita que se vea afectado por relaciones no lineales. Esto permite determinar relaciones monotónicas entre variables, incluso si la relación no es estrictamente lineal, lo cual resulta esencial en este caso, debido a la diversidad de factores involucrados.

El coeficiente de Spearman se calculó en Python mediante la función `corr(method='spearman')` y, para representarlo gráficamente, se utilizó un *heatmap*, obteniendo así una matriz de correlaciones entre todas las variables. La interpretación de estos coeficientes se realizó considerando magnitudes cercanas a ± 1 como relaciones fuertes, valores mayores a 0.3 moderadas y valores próximos a 0 como relaciones débiles o inexistentes. El signo del coeficiente señala la dirección de la relación: positivo cuando ambas variables presentan un comportamiento similar y negativo cuando sus comportamientos son opuestos.

Este análisis permitió identificar las asociaciones relevantes entre las variables, lo que facilitó la interpretación de la posible influencia entre el proceso y la generación de TSS/ADt.

3.5.3. Determinación de periodos de comparación

Para identificar diferencias dentro de la operación, se decidió trabajar con dos periodos distintos para establecer una comparación. Como base, se seleccionó el periodo actual del año 2025, ya que refleja las condiciones de operación vigentes. Para definir el segundo periodo, se eligió un año en que la generación de TSS/ADt fuera baja, pero con ritmos de producción similares a los del periodo actual. Este año fue identificado como un “periodo estable”.

A partir de los *boxplots* de la generación de TSS/ADt por año, se identificó el año más estable. Siguiendo lo mencionado anteriormente, se procedió verificar si los ritmos de producción del año seleccionado eran similares a los de 2025. Para ello, se desarrolló un código en Python que aplicaba la prueba de hipótesis no paramétrica U de Mann-Whitney.

La prueba seleccionada se centra en comparar la función de distribución acumulada (F) del parámetro de producción (*ADt/día*) entre el año estable y 2025. Según esto se planteó la siguiente prueba de hipótesis, utilizando un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$:

$$\begin{aligned} H_0: F_{20xx}(x) &= F_{2025}(x) \\ H_1: F_{20xx}(x) &\neq F_{2025}(x) \end{aligned} \tag{6}$$

Donde,

- H_0 : Las distribuciones de las producciones son iguales.
- H_1 : La distribución de la producción de un año es sistemáticamente diferente a la del otro.

3.5.4. Evaluación estadística de diferencia de periodos

Para identificar las diferencias entre los periodos definidos, se realizó una comparación del comportamiento de los parámetros de estudio en ambos años, con el objetivo de establecer cuáles no mostraron cambios significativos.

Para llevar a cabo esto, se aplicó nuevamente la prueba no paramétrica U de Mann-Whitney (descrita en la sección anterior y en la ecuación 6), pero esta vez se aplicó de manera individual a cada uno de los parámetros de estudio seleccionados mediante un ciclo *for* en python. Este análisis se utilizó como base para identificar aquellas variables que, al mostrar un cambio significativo ($p \leq 0.05$), pudieran estar relacionadas con la modificación en la operación (parámetros de entrada) o causando cambios en los parámetros de salida (parámetros de operación).

Según este criterio, se eliminaron aquellos parámetros que se mantuvieron sin cambios significativos ($p > 0.05$) dentro de estos periodos. De esta forma, solo se consideraron las variables que sí sufrieron cambios, para posteriormente evaluar cómo estos podrían estar vinculados con el aumento de la generación de TSS/ADt.

3.6. Construcción modelo causal del proceso

Se elaboró un modelo causal como síntesis del análisis realizado, integrando las correlaciones y los cambios observados en las variables del proceso para establecer los comportamientos derivados de las propiedades de la materia prima que podrían influir en la variable de interés.

Las correlaciones utilizadas corresponden a la totalidad de los datos disponibles para cada variable, y la construcción del modelo se basa en tres pilares: datos operacionales, la información bibliográfica recopilada y la validación técnica por parte de la operación. El objetivo es identificar qué condiciones operativas pueden generar variaciones dentro del proceso, y adicionalmente, como estas podrían influir en la generación de TSS/ADt.

4. Resultados y discusión

4.1. Validación contexto operacional

Según la situación de estudio descrita, se examina el contexto de planta con el propósito de verificar que los elementos planteados sean coherentes con el comportamiento real del proceso. Este análisis permite evaluar, además, si la hipótesis propuesta para explicar el fenómeno observado resulta consistente dentro de las condiciones operacionales existentes.

4.1.1. Comportamiento niveles de licor negro

Se plantea que existe un aumento en los niveles de licor negro. En la operación, se trabaja con tanques de almacenamiento de licor negro grueso (posterior al circuito de evaporadores) y licor negro débil (a la salida del área de cocción). El nivel de licor negro grueso se regula en función del licor negro débil, de modo que, si el primero se encuentra elevado, debe disminuirse o detenerse el envío desde los estanques de licor negro débil hacia evaporadores y viceversa.

A continuación, se presenta el comportamiento de ambos parámetros mediante *boxplots*:

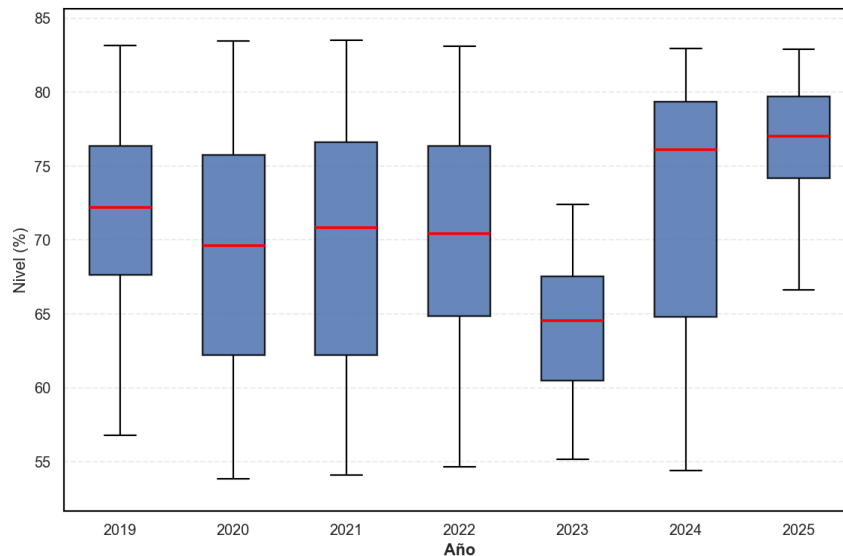


Figura 4.1. Comportamiento niveles de licor negro grueso por año.

Entre 2019 y 2022 se observa un comportamiento similar, con medianas que oscilan entre el 70 % y 73 % y rangos que se mantienen entre 55% y 80%. En 2023, en cambio, la mediana desciende a aproximadamente 65%, junto con una reducción en los límites superior e inferior, que se estrechan entre 55% y 73%, lo que indica un comportamiento más estable respecto de los años anteriores.

En 2024 ocurre lo contrario: la mediana aumenta nuevamente a cerca de 73%, acompañada de una mayor variabilidad, aunque dentro de rangos de variación similares a los años previos a 2023. Por otro lado, en 2025, la mediana es similar, pero el rango se acota a 68 – 73%, lo que sugiere una operación más controlada.

Estas variaciones sugieren posibles modificaciones en la operación. Por ello, se revisa el comportamiento del licor negro débil, presentado en la figura 4.2.

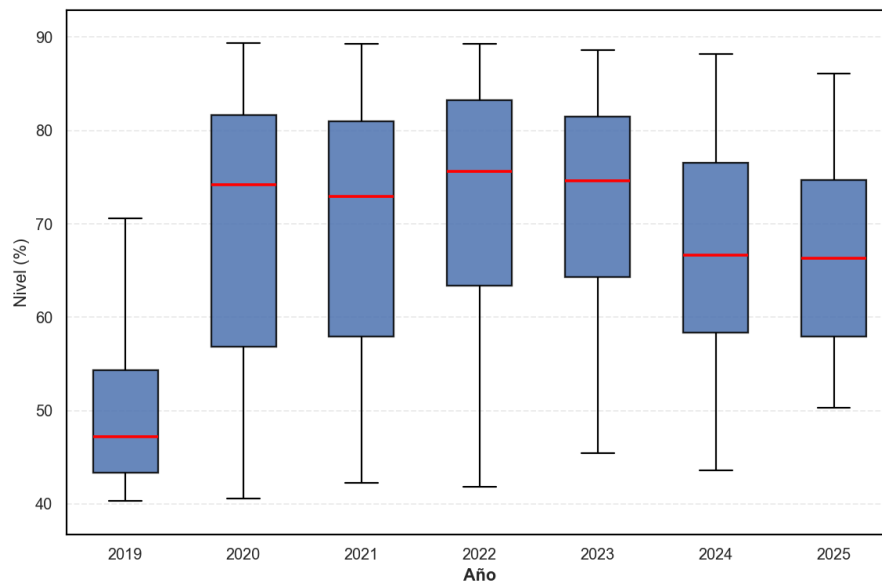


Figura 4.2. Comportamiento niveles de licor negro débil por año.

Los niveles de licor negro débil corresponden a una decisión operativa que, por lo general, viene acompañada de ajustes en la producción del digestor. Actualmente, se consideran críticos los niveles entre 55 y 75 %. Según la figura 4.2, estos márgenes han experimentado variaciones en los últimos años, lo que evidencia ajustes en la gestión operativa del nivel.

Entre 2020 y 2023 se observa una tendencia estable, con medianas en torno a 70 – 75 % y distribuciones que oscilan aproximadamente entre 40% y 95 %. A partir de 2024, la mediana desciende a alrededor de 65 % y el rango se acota entre 45 y 85 % , lo que indica un control más estrecho de la variable. Durante 2025 esta tendencia se mantiene, con niveles más bajos respecto a los de los años previos.

A partir de estos resultados, se confirma la necesidad de analizar cómo estos cambios operacionales se relacionan con la producción del digestor, en el contexto de la hipótesis que plantea una mayor generación de TSS/ADt.

4.1.2. Comportamiento producción y TSS/ADt

Para estudiar el comportamiento de los TSS/ADt resulta fundamental analizar la producción del digestor. Para ello, se modela su comportamiento utilizando la ecuación 3, generando dos estimaciones: una correspondiente a la operación real de planta (donde la densidad aparente es configurada por el operador (ajustada directamente en el DCS) y se mantiene prácticamente constante) y otra de carácter experimental, en la que dicha densidad se considera variable según lo recomendado en el manual. Esto permite obtener los siguientes resultados presentados en la figura 4.3 para todos los años incluidos en el estudio:

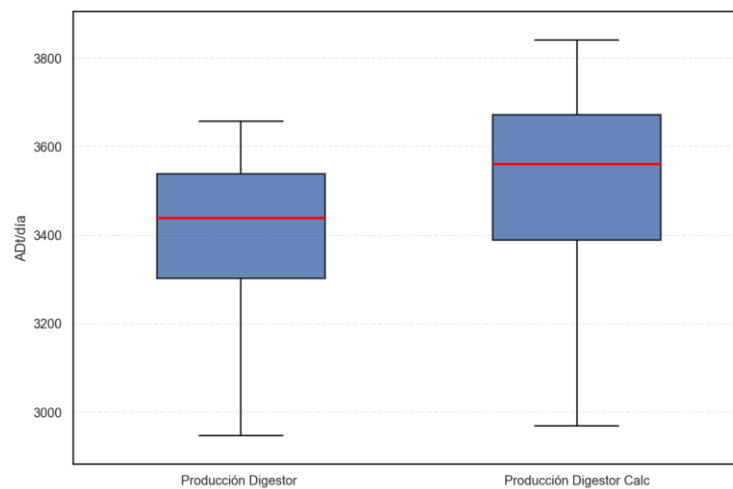


Figura 4.3. Producción Digestor v/s Producción Digestor Recalculada.

Gráficamente se aprecia una diferencia entre ambas estimaciones de producción. La versión recalculada presenta valores máximos y una mediana superior a los registrados en planta, lo que sugiere que el digestor estaría operando a un nivel de producción mayor al reflejado en la operación real.

A partir de la prueba de hipótesis descrita en la ecuación 5, aplicada a todos los datos disponibles, se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 4.1. Resultados prueba de hipótesis entre producciones.

Estadístico U	P-valor
3263063	$4.04e^{-16}$

Dado que se obtiene un p-valor extremadamente pequeño (influenciado por el tamaño de la muestra, $n > 500$), se concluye que existe una diferencia estadísticamente significativa entre ambas distribuciones. Además, por recomendación original del fabricante para la operación del digestor, se decide trabajar con la producción recalculada considerando este factor variable.

Con el fin de analizar el comportamiento anual de la producción recalculada, se presenta a continuación el boxplot correspondiente:

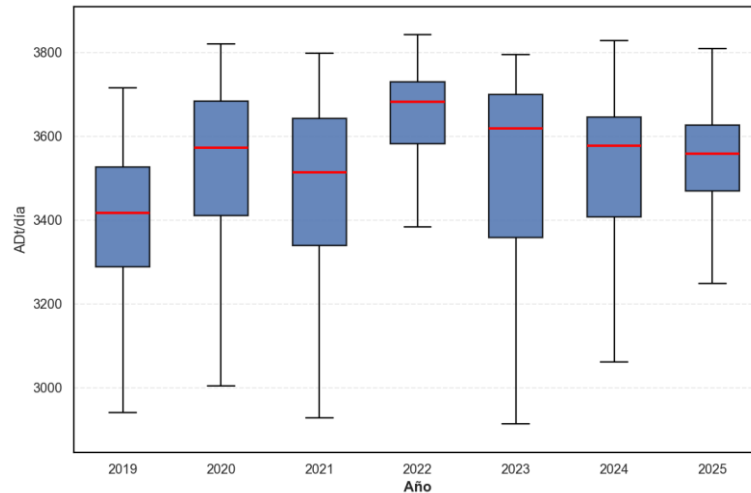


Figura 4.4. Comportamiento producción digestor recalculada por año.

La producción muestra oscilaciones en el periodo estudiado, evidenciando una tendencia a la baja desde 2022, cuando la mediana se sitúa cerca de $3630 \frac{ADt}{día}$. En 2025, la mediana se sitúa cerca de $3580 \frac{ADt}{día}$, junto con un comportamiento más estable. Esta disminución podría estar vinculada a la nueva decisión operativa sobre los niveles críticos de licor negro débil (figura 4.2), dado que ambos comportamientos coinciden temporalmente. Esto refuerza la idea de que dichos niveles se vinculan de manera directa con variaciones en la producción.

Dado lo anterior, fue necesario estudiar el comportamiento de los TSS/ADt utilizando el nuevo cálculo de producción:

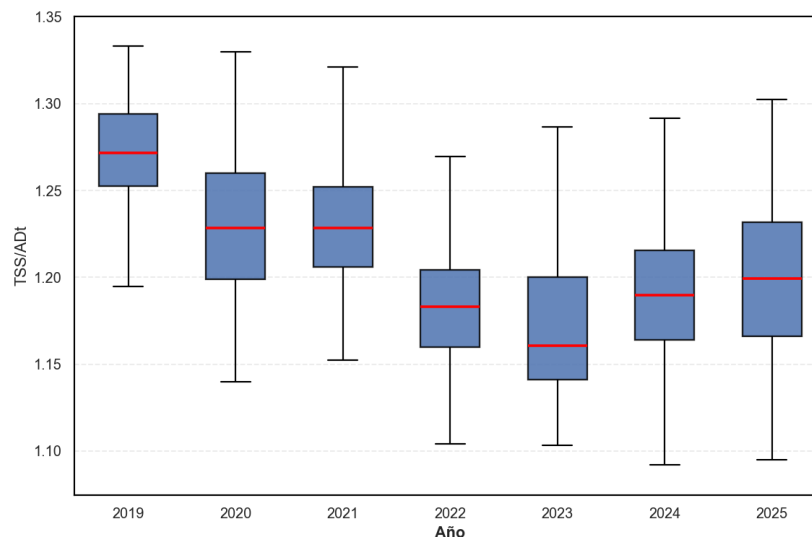


Figura 4.5. Comportamiento TSS/ADt por año.

Entre 2019 y 2023 se observa una disminución progresiva de la mediana de TSS/ADt, pasando de aproximadamente 1.28 en 2019 a cerca de 1.19 en 2023. A partir de este año, se aprecia un leve aumento en la mediana, alcanzando alrededor de 1.20 en 2024 y 2025, sin recuperar los niveles más elevados de los primeros años.

Según estos resultados, se considera razonable la hipótesis de que el digestor está generando una mayor cantidad de TSS/ADt en comparación con los últimos tres años. Por ello, se procede a analizar cómo este comportamiento podría relacionarse con las propiedades de la materia prima y con las variaciones en los parámetros operativos del área de cocción.

4.2. Resultados del análisis estadístico

Con el fin de identificar el origen del aumento observado en la generación de TSS/ADt, se realiza un análisis estadístico orientado a evaluar si este comportamiento puede vincularse con las propiedades de la materia prima y determinar la posible influencia de dichas propiedades sobre los distintos parámetros de operativos del proceso, específicamente en el área de cocción.

4.2.1. Estadística descriptiva

Como primera etapa, se obtuvo la estadística descriptiva de todas las variables seleccionadas, para caracterizar su comportamiento y evaluar si se ajustan o no a una distribución normal. En la tabla 4.2 se presentan los resultados correspondientes de todos los años considerados en el estudio de las propiedades de la madera, en el anexo 3 se incluyen tablas con la estadística descriptiva desglosada por año:

Tabla 4.2. Estadística descriptiva básica propiedades madera.

Propiedad	Media	Mediana	Desviación Estándar	[Mín, Máx]	Sesgo/curtosis estandarizada
Densidad básica (kg/m^3 ssc)	495.2	495.2	5.2	[483.5, 507.5]	0.02 / -0.9
Humedad (%)	49.7	49.6	1.5	[46.2, 52.8]	0.06 / -0.08
Densidad loose (kg/m^3)	181.7	181.6	3.0	[174.0, 191.0]	0.3 / -0.1
Aceptado (%)	90.5	91.0	2.1	[85.5, 94.2]	-0.7 / -0.4
PinChip (%)	5.4	4.5	2.6	[1.9, 12.0]	1.0 / -0.03
Finos (%)	0.6	0.57	0.2	[0.3, 1.1]	0.7 / -0.2
Sobretamaño (%)	0.06	0.02	0.08	[0, 0.4]	1.5 / 1.9
Sobreepesor (%)	2.5	2.4	1.1	[0.7, 5.9]	0.5 / -0.5
Corteza (%)	0.5	0.4	0.2	[0.1, 1.3]	0.5 / -0.2

A partir de la tabla 4.2, se observa que las propiedades de la madera presentan comportamientos coherentes con lo esperado para *Eucalyptus Nitens* (New Forests, 2022) utilizado en esta línea de operación. Tanto la densidad básica como la densidad loose muestran medias estables y baja variabilidad, lo que sugiere una materia prima relativamente homogénea. La humedad también presenta una dispersión acotada, favoreciendo a un comportamiento predecible en etapas de vaporización e impregnación.

En cuanto a la granulometría, el porcentaje de aceptado muestra una variación moderada, no obstante, las fracciones no óptimas (pinchip, finos, sobretamaño y sobreespesor) evidencian una mayor inestabilidad. Este comportamiento es relevante desde el punto de vista operacional, ya que variaciones en estas pueden afectar los parámetros clave del proceso. Finalmente, el bajo contenido y baja variabilidad de corteza indican un comportamiento estable, reduciendo el riesgo de incorporación de compuestos no deseados durante la cocción.

Además de la estadística descriptiva básica, se evaluaron indicadores de forma con el fin de determinar si las variables podían asociarse a una distribución normal. En general, la mayoría de las propiedades presentan valores de sesgo y curtosis estandarizada cercanos a cero, lo que sugiere distribuciones moderadamente simétricas. No obstante, variables como pinchip, finos y sobretamaño muestran desviaciones más marcadas, lo que evidencia asimetrías en la distribución.

La evaluación conjunta de estos indicadores permite identificar desviaciones respecto de la normalidad. Según los criterios definidos en la metodología, algunas variables como finos y pinchip se encuentran al límite, por ende, no todas cumplen con el supuesto de normalidad. En consecuencia, aunque ciertas propiedades podrían aproximarse a un comportamiento normal, la heterogeneidad observada confirma la necesidad de emplear pruebas no paramétricas en los análisis posteriores.

Desde una perspectiva operacional, las variables que podrían presentar mayor asimetría corresponden principalmente a las asociadas a la granulometría, las cuales suelen presentar fluctuaciones derivadas del funcionamiento de los astilladores y de la variabilidad en la preparación de la madera. Estas variaciones pueden influir en la estabilidad en los parámetros clave del proceso.

Siguiendo el análisis anterior, se caracterizan estadísticamente las variables de cocción, evaluando tanto su comportamiento como su ajuste a la normalidad. Los resultados para el periodo completo se presentan en la tabla 4.3, mientras que los detalles anualizados se incluyen en el anexo 4:

Tabla 4.3. Estadística descriptiva básica variables cocción.

Propiedad	Media	Mediana	Desviación Estándar	[Mín, Máx]	Sesgo/curtosis estadarizada
Temperatura tope digestor	144	144	1.2	[140.7, 146.8]	-0.2/-0.7
Temperatura cocción digestor	154.7	154.5	2.3	[150.6, 160]	0.3/-0.8
Temperatura fondo digestor	155.4	155.2	1.9	[151.7, 159.8]	0.3/-0.7
Presión tope digestor	4.1	4.0	0.1	[3.8, 4.4]	0.7/-0.5
Presión fondo digestor	89.9	88.2	8.6	[76.4, 110.7]	0.7/-0.4
Presión tope torre de impregnación	10.1	10.1	0.2	[9.7, 10.5]	0.1/-0.8
Presión fondo torre de impregnación	59.5	59.4	3.2	[52.9, 67.7]	0.2/-0.8
Factor H	435.7	424.2	63.8	[336.7, 596.7]	0.6/-0.6
Sulfidez	33.4	33.6	1.5	[29.9, 36]	-0.4/-0.9
Carga de álcali	21.5	21.5	0.5	[20.5, 22.7]	0.3/-0.6
Residual de álcali transferencia	8.1	7.9	1.0	[6.4, 10.3]	0.3/-1.0
Residual álcali CD1	5.9	5.9	0.5	[4.6, 10.3]	-0.1/-0.3
Residual álcali CD3	6.2	6.2	0.5	[5.1, 7.6]	0.4/0.2
Dosificación licor blanco alimentación	10.3	10.4	1.1	[7.8, 12.1]	0.4/-0.8
Dosificación licor blanco transferencia	4.8	4.7	0.8	[3.6, 6.6]	0.6/-0.5
Dosificación licor blanco CD2	5.2	5.3	1.0	[0.9, 6.1]	-5.0/20
Dosificación licor blanco CD3	0.6	0.6	0.1	[0.5, 0.8]	0.2/-1.2
Factor de extracción CD1	2.9	2.8	0.3	[2.2, 3.7]	0.5/-0.5
Factores de Recirculación CD2	4.0	3.9	0.5	[2.2, 3.9]	0.2/-1.0
Factor de extracción CD3	5.2	5.2	0.5	[3.7, 6.0]	-0.9/0.3
Factor de dilución de fondo	1.1	1.1	0.1	[0.8, 1.4]	0.1/-1.0
Producción del digestor	3509.5	3509.5	0.3	[2898.9, 3842.2]	-0.9/-0.0
TSS/ADt	1.2	1.2	0.1	[1.1, 1.4]	0.1/-0.8
Kappa	16.6	16.7	0.3	[15.8, 17.3]	-0.2/-0.6
Selectividad	81.2	81.3	3.6	[72.9, 89.1]	-0.1/-0.9
Viscosidad	1348.9	1355.0	57.6	[1131.8, 1490.0]	-0.6/0.2
Orgánico/Inorgánico	1.5	1.6	0.1	[1.4, 1.7]	-0.5/-0.6

A partir de la tabla 4.3, se observa que la mayoría de las variables de cocción presentan comportamientos estables, de acuerdo con los valores de desviación estándar (en sus unidades correspondientes). Las temperaturas del digestor muestran medias y medianas prácticamente equivalentes, con bajas desviaciones estándar bajas y valores de sesgo y curtosis cercanos a cero, lo que indica distribuciones simétricas y un perfil térmico controlado.

En el caso de las presiones, también se aprecia un comportamiento estable, con excepción de la presión de fondo del digestor, que presenta una desviación estándar elevada. Esto sugiere variaciones operacionales asociadas a fenómenos de compactación y descompactación dentro del digestor, los cuales se encuentran influenciados por las características de la madera.

Los parámetros químicos (sulfidez, carga de álcali, dosificaciones de licor y residuales de álcali) presentan baja variabilidad, lo que evidencia una receta establecida en cuanto a estas variables para resultados. No obstante, la dosificación de licor blanco en la CD2 destaca por presentar variabilidad en sus datos, lo cual sugiere ajustes operacionales sin un patrón.

En cuanto a los factores de extracción y recirculación, su variabilidad moderada concuerda con los ajustes hidráulicos que deben realizarse según las condiciones operativas del momento, lo que es consistente con la naturaleza dinámica del flujo dentro del digestor.

Las variables de respuesta del proceso (TSS/ADt, kappa, selectividad y viscosidad) muestran medianas similares a las medias, lo que refleja estabilidad en los resultados de cocción. No obstante, la viscosidad presenta una desviación estándar relativamente alta, evidenciando su sensibilidad frente a variaciones en la madera, condiciones químicas y el control térmico,

Finalmente, varias variables presentan valores de sesgo y curtosis que se alejan de los criterios de normalidad definidos en la metodología, reforzando la necesidad de utilizar métodos no paramétricos en los análisis posteriores, asegurando así conclusiones coherentes con la naturaleza de los datos.

4.2.2. Análisis de correlación exploratorio

Para identificar relaciones entre las propiedades de la madera, los parámetros de cocción y los indicadores del proceso, se aplica un análisis de correlación mediante el coeficiente de Spearman, con el fin determinar la existencia y dirección de asociaciones monotónicas entre las variables. Los resultados se visualizan mediante un *heatmap*, presentado en la figura 8.3 (anexo 5).

A partir de este análisis, se identifican asociaciones iniciales que permiten comprender como interactúan las variables del proceso. En términos generales, las propiedades de la madera presentan correlaciones débiles a intermedias. Por ejemplo, la densidad básica correlaciona positivamente con variables de operación hidráulica del digestor, como los factores de extracción CD3 ($\rho_s = 0.2$) y recirculación CD2 ($\rho_s = 0.4$), lo que sugiere que maderas más densas influyen en el comportamiento interno del digestor. La densidad loose muestra un patrón similar.

La humedad también presenta relaciones relevantes, destacando una correlación negativa con la temperatura de cocción ($\rho_s = -0.3$). Aunque esta asociación no es completamente intuitiva. En cuanto a granulometría, el porcentaje de aceptado muestra una correlación negativa con la temperatura de cocción ($\rho_s = -0.4$). Esto sugiere que, al procesar una menor cantidad de astillas de tamaño óptimo (representado por un aumento en el pinchip), se requiere menor severidad térmica. Asimismo, las fracciones granulométricas correlacionan entre sí, lo cual es coherente con su origen en el proceso de astillado.

Respecto de las variables de salida, la generación de TSS/ADt presenta correlaciones bajas con las propiedades de la madera, aunque sí muestra asociaciones con los parámetros de cocción, lo que indica que su comportamiento estaría más estrechamente vinculado con la respuesta operacional a las variaciones de la materia prima. Este análisis permite entregar una visión general del comportamiento de las variables.

4.2.3. Análisis inferencial

Para evaluar si los cambios observados en la generación de TSS/ADt están asociados a modificaciones en la operación derivadas de variaciones en la materia prima, se aplica un análisis inferencial. Este permite, mediante pruebas de hipótesis, identificar los periodos de comparación y determinar qué variables presentan cambios significativos entre ellos.

4.2.3.1. Definición de periodos de comparación

Para identificar el periodo estable, se analiza la figura 4.5, la cual muestra el comportamiento de los TSS/ADt a lo largo de los años. A partir de esta revisión, se selecciona el año 2023 por presentar un comportamiento más estable de la variable. Posteriormente, con el fin de verificar que sus ritmos de producción sean comparables a los del año 2025, se aplica la prueba de hipótesis descrita en la ecuación 6, cuyos resultados se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 4.4. Resultados prueba de hipótesis entre ritmos de producción periodos seleccionados.

Estadístico U	P-valor
30281.0	0.58

Los resultados de la prueba indican un estadístico U de 30281.0, asociado a un valor p de 0.58, superior al nivel de significancia $\alpha = 0.05$. Esto muestra que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los ritmos de producción de 2023 y 2025. En consecuencia, ambos años presentan comportamientos similares en términos de producción, lo que valida la elección de 2023 como periodo estable para su comparación con periodo actual.

4.2.3.2. Evaluación de diferencias entre periodos

Una vez definidos los periodos a comparar, se analizan las diferencias entre ambos mediante la prueba de hipótesis descrita en la ecuación 6, aplicada individualmente a cada una de las variables del estudio. El objetivo es identificar qué parámetros presentan cambios estadísticamente significativos entre 2023 y 2025. Los resultados para las variables de cocción se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 4.5. Resultados pruebas de hipótesis entre variables cocción periodos seleccionados.

Variables	Estadístico U	P-valor
Temperatura tope digestor	17286.0	0.00
Temperatura cocción digestor	43294.0	0.00
Temperatura fondo digestor	14885.0	0.00
Presión tope digestor	55883	0.00
Presión fondo digestor	13674.0	0.00
Presión tope torre de impregnación	43091.0	0.00
Presión fondo torre de impregnación	15649.0	0.00
Factor H	34261.0	0.001
Sulfidez	33842.0	0.009
Carga de álcali	39525.0	0.00
Residual de álcali transferencia	13511.0	0.00
Residual álcali CD1	24791.0	0.027
Residual álcali CD3	17286.0	0.00
Dosificación licor blanco alimentación	14655.0	0.00
Dosificación licor blanco transferencia	39850.0	0.00
Dosificación licor blanco CD2	13597.0	0.00
Dosificación licor blanco CD3	27890.0	0.00

Factor de extracción CD1	13022.0	0.00
Factores de Recirculación CD2	1741.0	0.00
Factor de extracción CD3	52403.0	0.00
Factor de dilución de fondo	22928.0	0.00
TSS/ADt	19500.0	0.00
Kappa	40051.0	0.00
Viscosidad	31534.0	0.69
Selectividad	26978.0	0.017
Orgánico/Inorgánico	24930.0	0.047

A partir de los valores p obtenidos, se observa que la única variable que no presenta diferencias estadísticamente significativas entre los periodos comparados es la viscosidad ($p = 0.69$). En consecuencia, esta variable se excluye del análisis posterior, ya que su estabilidad entre 2023 y 2025 indica que no constituye un factor relevante en las variaciones del parámetro de interés (TSS/ADt).

De manera análoga, se obtienen los resultados para las propiedades de la madera, presentados en la tabla 4.6:

Tabla 4.6. Resultados pruebas de hipótesis propiedades madera periodos seleccionados.

Propiedad	Estadístico U	P-valor
Densidad básica	23267.0	0.00
Humedad	39780.0	0.00
Densidad loose	16754.0	0.00
Aceptado	40311.0	0.00
PinChip	18812.0	0.00
Finos	31591.5	0.67
Sobretamaño	37576.0	0.07
Sobreepesor	31937.5	0.46
Corteza	33000.5	0.13

Según los resultados, las propiedades que no presentan diferencias estadísticamente significativas son finos, sobretamaño, sobreepesor y el contenido de corteza, todas con valores $p > 0.05$. Por lo tanto, estas variables también se excluyen del análisis posterior, siguiendo el mismo criterio aplicado a las variables de cocción.

A partir de estos resultados, se mantiene únicamente el conjunto de variables que presentan diferencias significativas entre los periodos comparados, concentrando el estudio en aquellos factores que efectivamente muestran variaciones relevantes dentro del proceso.

4.2.4. Correlaciones focalizadas

En función de la depuración de variables, se obtiene una nueva matriz de correlaciones de Spearman que permite enfocar el análisis exclusivamente en aquellas variables cuyo cambio podría haber influido en las condiciones de operación o en los resultados del proceso. Este enfoque facilita identificar relaciones más precisas entre los parámetros relevantes y orientar la interpretación posterior del comportamiento de los TSS/ADt. Esta versión presentada en la figura 8.4 (Anexo 6) se observan correlaciones más claras entre las propiedades de la madera y los parámetros de cocción que mostraron variaciones relevantes.

4.3. Análisis causal

A partir de las correlaciones identificadas en la matriz acotada y de la evidencia teórica y operacional disponible, se desarrolla un análisis orientado a comprender cómo las variables de entrada y de operación se relacionan con las variables de salida del sistema de cocción.

Como base para este análisis, se considera la comparación operacional entre el año estable (2023) y el periodo actual (2025). En la tabla 4.7 se presentan las medianas de las principales variables involucradas en el estudio, junto con su clasificación según el tipo de parámetro (entrada, proceso o salida), lo que permite contextualizar los cambios operacionales observados entre ambos periodos.

Tabla 4.7. Medianas operacionales de las variables de entrada, proceso y salida para los periodos 2023 y 2025.

Variable	Mediana 2023	Mediana 2025	Tipo de variable
Densidad básica	490	491.5	Entrada
Densidad Loose	181	183.5	
Humedad	49	48	
Pinchip	3.5	4.2	
Aceptado	92	91.5	
Factor de recirculación CD2	3.6	3.8	Proceso
Factor de extracción CD3	5.3	4.8	
Dosificación licor blanco alimentación	10.4	11.3	
Carga de álcali	21.6	21.4	
Álcali residual transferencia	7.6	8.6	
Álcali residual CD1	6.3	5.2	
Álcali residual CD3	5.8	5.4	
Temperatura de cocción	157.5	155	

Factor H	480	450	Salida
Kappa	16.9	16.8	
Selectividad	78	78.5	
TSS/ADt	1.16	1.2	
orgánico/inorgánico	1.56	1.59	

Con el fin de complementar la comparación de medianas presentada en la tabla anterior, se incorporan los boxplot comparativos 2023 vs 2025 para las variables que componen el camino causal principal. Estas visualizaciones permiten evaluar el desplazamiento de las distribuciones y su variabilidad entre periodos, entregando un respaldo gráfico a los cambios operacionales previamente identificados. Las comparaciones del resto de variables presentes en el análisis se encuentran en el anexo 7.

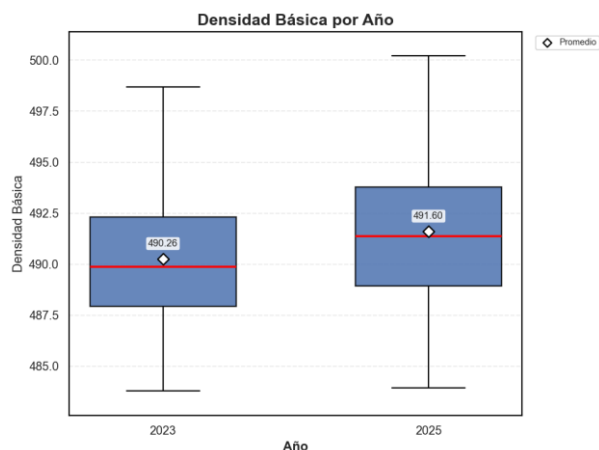


Figura 4.6. Boxplot comparativo (2023 vs 2025) de densidad básica.

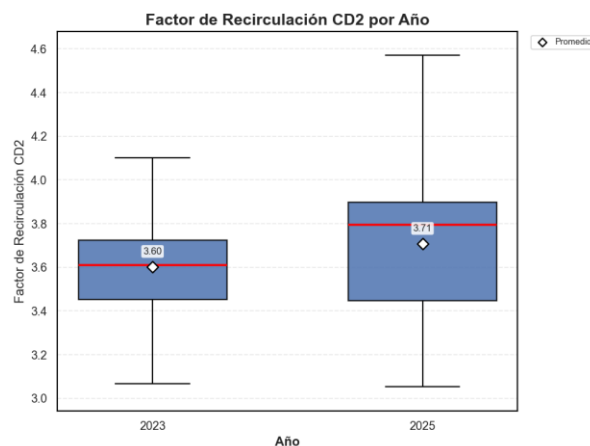


Figura 4.7. Boxplot comparativo (2023 vs 2025) de factor de recirculación CD2.

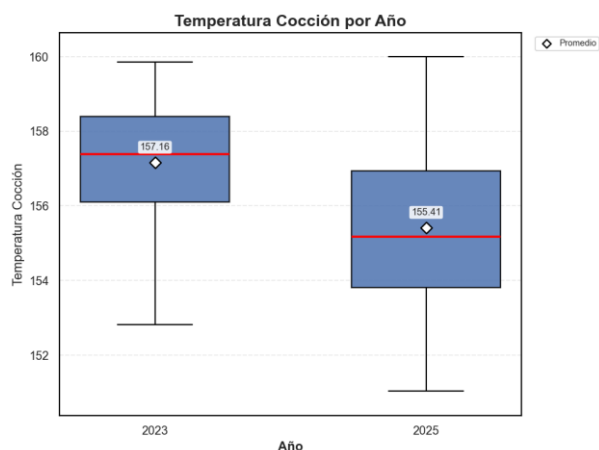


Figura 4.8. Boxplot comparativo (2023 vs 2025) de temperatura de cocción.

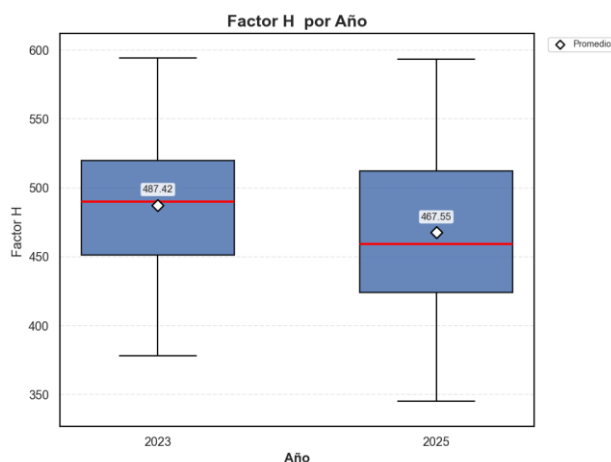


Figura 4.9. Boxplot comparativo (2023 vs 2025) de factor H.

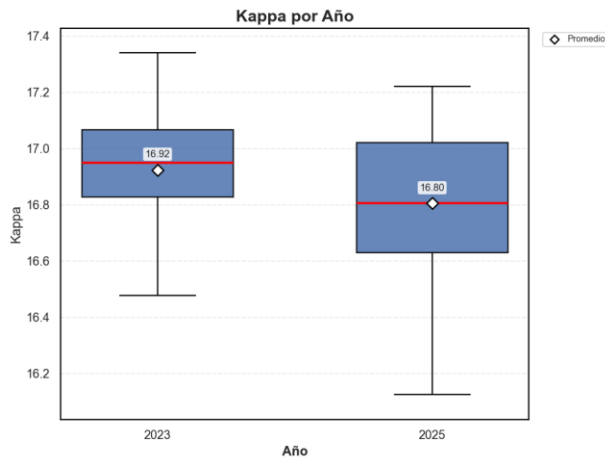


Figura 4.10. Boxplot comparativo (2023 vs 2025) de kappa.

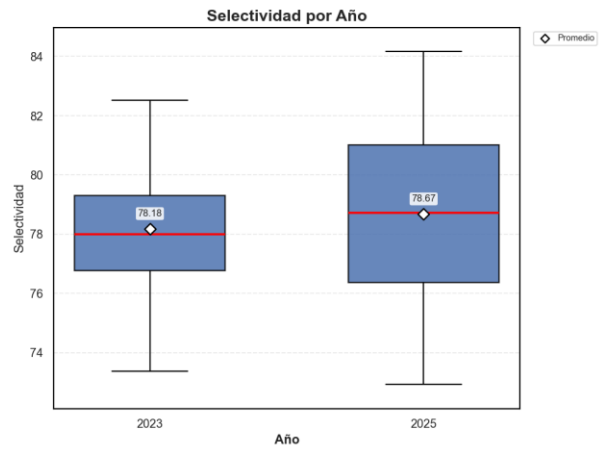


Figura 4.11. Boxplot comparativo (2023 vs 2025) de selectividad.

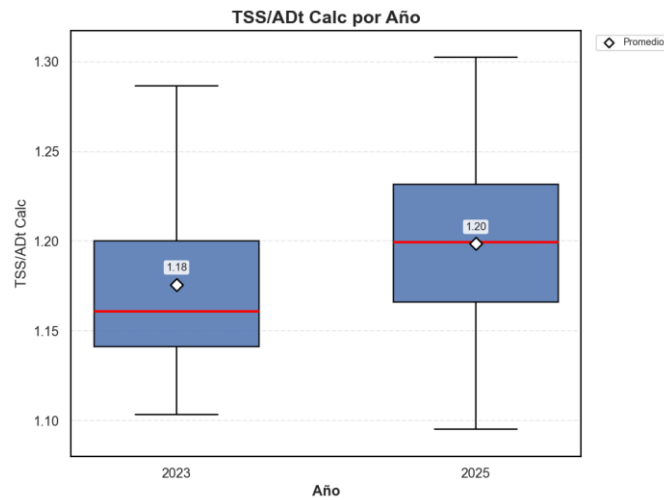


Figura 4.12. Boxplot comparativo (2023 vs 2025) de TSS/ADt.

A partir de esta evidencia descriptiva, y considerando las asociaciones identificadas mediante el coeficiente de Spearman, se sintetizan las relaciones más relevantes entre variables de entrada, proceso y salida. Con el objetivo de integrar estos resultados con fundamentos bibliográficos y operacionales, se construye un modelo causal que organiza de manera estructurada las principales interacciones entre los parámetros analizados, el cual se presenta en la figura 4.6.

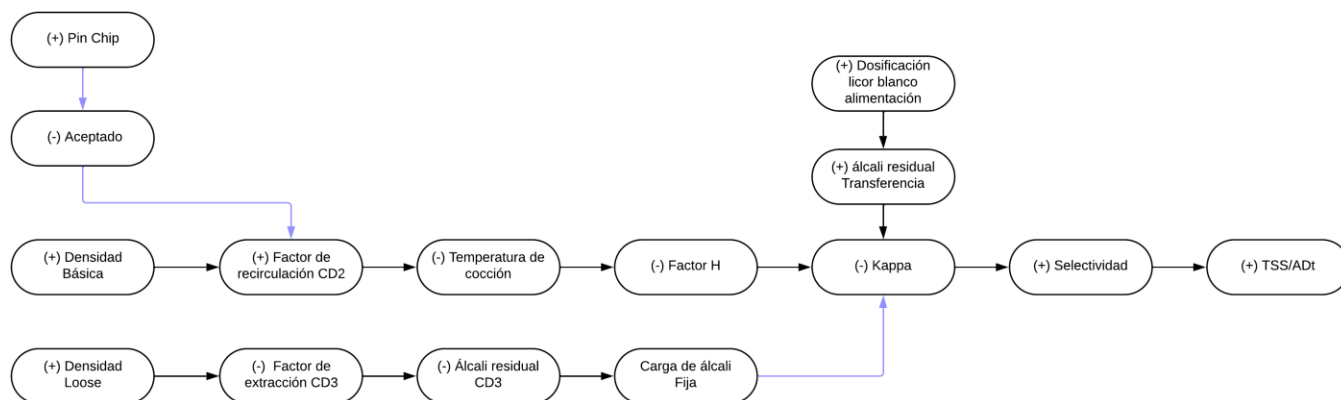


Figura 4.13. Esquema causal. Fuente: Elaboración propia

El análisis identifica un camino causal principal que explica cómo las propiedades de la madera inducen ajustes operacionales que se reflejan en las condiciones de salida del proceso. En primer lugar, según la matriz de correlación presentada en la figura 8.4 (anexo 6) se observa que un aumento en la densidad básica se asocia con un incremento del factor de recirculación CD2 ($\rho_s = 0.4$). Según Fardim (2011), una mayor densidad básica se explica principalmente por un aumento en la proporción de la pared celular y una estructura menos porosa, lo que limita la penetración del licor blanco al interior de la astilla. Esta menor accesibilidad del álcali incrementa el riesgo de zonas de agotamiento de este, lo que exige compensaciones operacionales para evitar esta condición.

Frente a esta condición, el sistema responde mediante un aumento del factor de recirculación de la CD2. Este ajuste no implica necesariamente un incremento en la carga de álcali del proceso, sino mayor difusión y homogenización de los reactivos en esta zona, lo que permite renovar el licor y mantener concentraciones adecuadas de álcali en la zona de cocción (CMPC Celulosa, s.f.). Este mayor flujo favorece una distribución más homogénea de los químicos y promueve una deslignificación dominada por el ataque químico. Asimismo, al incrementarse la recirculación, que transporta tanto energía como reactivos, se reduce la temperatura necesaria para alcanzar el perfil térmico requerido, lo que concuerda con la correlación negativa observada entre la recirculación y temperatura de cocción ($\rho_s = -0.6$).

La disminución en la temperatura de cocción impacta directamente en el factor H, coherente con la elevada correlación entre ambas variables ($\rho_s = 0.9$). Dado que el factor H integra el efecto combinado de temperatura y tiempo de cocción, los ajustes térmicos se traducen en variaciones proporcionales de este parámetro.

El factor H presenta, a su vez, una correlación directa con el número kappa ($\rho_s = 0.2$). Aunque esta relación podría parecer contradictoria con la teoría de la cinética del proceso, se explica por la acción del sistema de control. De acuerdo con el manual de operación (CMPC Celulosa, 2022), el controlador ajusta la temperatura (y por ende el factor H) para mantener el kappa dentro del *setpoint*, incrementando la severidad cuando el kappa aumenta y reduciéndola cuando disminuye. En este contexto, el factor H refleja principalmente una acción correctiva del lazo de control más que la dinámica natural del proceso.

El número kappa se relaciona de manera inversa con la selectividad (capacidad de los reactivos químicos para eliminar la lignina, minimizando la degradación y pérdida de carbohidratos) ($\rho_s = -0.6$), definida como:

$$Selectividad = \frac{Viscosidad}{Kappa} \quad (7)$$

Considerando que la viscosidad se mantiene relativamente estable entre los periodos analizados, una disminución del kappa conduce a un aumento de la selectividad. Este mayor grado de deslignificación se asocia, a su vez, con un incremento en la generación de TSS/ADt, consistente con la correlación observada ($\rho_s = -0.5$).

Además del camino causal principal, se identifican rutas secundarias que complementan la interpretación del proceso. En cuanto a la calidad del astillado, un aumento en el contenido de pinchip se asocia con una disminución del porcentaje de aceptado, manteniéndose constantes las demás fracciones granulométricas. Debido a su menor espesor, los pinchips presentan mayores velocidades de deslignificación (Fardim, 2011), lo que obliga a operar bajo condiciones menos agresivas para evitar el sobretratamiento de la fibra.

Por otra parte, un incremento en la densidad loose sugiere una mayor compactación del digestor, lo que concuerda con el aumento observado en la presión de fondo. Según el manual de operación (CMPC Celulosa, s.f.), esta compactación reduce la eficiencia hidráulica, restringiendo la extracción y circulación del licor, lo que se refleja en la correlación negativa con la extracción CD3 ($\rho_s = -0.5$). Una menor extracción incrementa la retención de licor y reduce la disponibilidad de álcali residual. Dado que la carga de álcali se mantiene aproximadamente constante en la operación actual, esta condición implica un mayor grado de agotamiento químico durante la cocción, afectando la eficiencia de la deslignificación, y favoreciendo reacciones de condensación de lignina (Sixta, 2006). Este comportamiento es consistente con la correlación negativa observada entre el álcali residual y el

número de kappa ($\rho_s = -0.5$), indicando que una distribución menos eficiente del licor se asocia a cambios en la severidad efectiva de la cocción (representados en el kappa).

Asimismo, un aumento en la dosificación de licor blanco en la alimentación se asocia a mayores niveles de álcali residual en la zona de transferencia ($\rho_s = 0.6$). Este comportamiento es consistente con la lógica del proceso, ya que una dosificación superior a la requerida para la deslignificación deseada permite que parte del álcali avance hacia etapas posteriores del digestor. En consecuencia, se observa una relación inversa entre álcali residual de transferencia y el número de kappa, dado que una mayor disponibilidad de álcali residual favorece mayores niveles de deslignificación.

Existen dos variables adicionales que, si bien podrían estar vinculadas a cambios operacionales, no se incorporan explícitamente en el modelo causal debido a la naturaleza de sus variaciones entre los periodos analizados. La primera corresponde a la humedad de la madera, la cual influye directamente en las etapas de vaporización e impregnación. Una menor humedad dificulta la penetración del licor blanco, pudiendo inducir la necesidad de aumentos en la carga de álcali en la alimentación para compensar esta situación. Como medida correctiva, la operación incorpora agua a la madera antes de su ingreso a la tolva de astillas.

La segunda variable corresponde al contenido orgánico/inorgánico del licor negro, indicador que entrega una aproximación del grado de degradación de carbohidratos (cuando aumenta) o de la carga química (cuando disminuye). En el periodo estable se observa un menor valor de este indicador, en un contexto de mayor carga de álcali y mayores residuales en la extracción CD1, lo que sugiere una cocción química más agresiva. Adicionalmente, en este mismo periodo se opera con temperaturas más elevadas, lo que indica una mayor contribución del componente térmico y, pese a un menor factor de recirculación, mantiene una mayor disponibilidad química debido a la mayor carga de álcali.

Las relaciones identificadas en el modelo causal no solo permiten explicar las diferencias entre el periodo estable y el periodo actual, sino que también permiten derivar criterios operacionales coherentes con el funcionamiento del proceso. En este sentido, el modelo describe cómo los cambios en las propiedades de la materia prima generan respuestas en compensación a través de las variables de operación del área de cocción, las cuales se reflejan finalmente en los indicadores de salida del proceso.

En particular, el esquema causal indica que, ante un aumento en la densidad básica, la limitación principal del proceso no se asocia a la severidad térmica, sino a la accesibilidad y distribución del licor blanco dentro de la astilla. Bajo estas condiciones, el modelo sugiere que la respuesta operacional prioritaria se centra en mejorar la impregnación y la renovación del licor, lo que se refleja en un aumento del factor de recirculación CD2, según lo permita el diferencial de presión de los harneros en la zona. Este ajuste permite sostener niveles adecuados de álcali residual y una deslignificación más uniforme, reduciendo la dependencia de incrementos en la temperatura de cocción.

En este contexto, la disminución observada en la temperatura y por ende del factor H no responde a una menor demanda de severidad del proceso, sino a una mejor distribución química y térmica del licor, lo que permite alcanzar el perfil de cocción requerido con menor aporte térmico. El modelo también muestra que la relación entre el factor H y el número de kappa no representa una causalidad directa, sino la acción correctiva del lazo de control de kappa, que ajusta la severidad para mantener el producto dentro del *setpoint* operativo.

Desde el punto de vista del desempeño del proceso, una reducción del número de kappa, manteniendo valores relativamente estables de viscosidad, se traduce en un aumento de la selectividad. No obstante, el modelo indica que este aumento de la eficiencia de deslignificación se asocia simultáneamente a un incremento en el indicador de TSS/ADt, reflejando un balance operacional entre calidad de la pulpa y pérdidas del proceso. En este sentido, el aumento de TSS/ADt se interpreta como una consecuencia esperable de una mayor remoción de lignina, más que un incremento en la carga de reactivos o una desviación operacional.

Adicionalmente, el modelo identifica que incrementos en la densidad loose se asocian a una mayor compactación del digestor, afectando el equilibrio hidráulico del sistema. Esta condición se refleja en una menor extracción del licor, una reducción en residuales de álcali y, en consecuencia, en cambios en la eficiencia de la delignificación. Bajo este escenario, el esquema causal indica que las acciones operacionales deben orientarse a regularizar la hidráulica del digestor, priorizando la estabilidad de extracciones y circulaciones por sobre ajustes directos en la severidad térmica del proceso.

En cuanto a la granulometría, el aumento en fracciones como pinchip y la disminución del porcentaje de aceptado se asocian a una mayor heterogeneidad en la velocidad de deslignificación por la diferencia de tamaños entre el tipo de astillas. El modelo sugiere que, bajo estas condiciones, la aplicación de parámetros muy agresivos incrementa el riesgo de un sobretratamiento de la fibra,

generando mayor dispersión en los resultados del proceso, aun cuando el control de kappa se mantenga activo.

En el caso de variaciones en la humedad de la madera, los resultados indican que la acción prioritaria no debe centrarse en aumentar la severidad de la cocción, sino en asegurar una adecuada impregnación previa de la astilla. Cuando la humedad disminuye, se dificulta la difusión del licor blanco, por lo cual resulta más efectivo implementar medidas correctivas previas (como la adición controlada agua antes del ingreso a la tolva de astillas). Este enfoque permite mantener la estabilidad del proceso sin inducir cambios innecesarios en las variables químicas y térmicas.

Respecto al indicador orgánico/inorgánico del licor negro, los resultados sugieren que su interpretación debe realizarse como una señal complementaria del balance químico del proceso, y no como una variable de ajuste directa. En este contexto, la recomendación es utilizar este parámetro como apoyo al diagnóstico del estado de la cocción, en conjunto con kappa, residuales de álcali y TSS/ADt, evitando su uso aislado como criterio de corrección operacional.

En síntesis, las relaciones identificadas permiten traducir el modelo causal en criterios operacionales, frente a cambios en la materia prima que generan limitaciones en la impregnación y la hidráulica del digestor, la estrategia prioriza asegurar parámetros clave como la distribución del licor y la estabilidad de los flujos, permitiendo que el lazo de control de kappa realice los ajustes de severidad necesarios.

Bajo este enfoque, el monitoreo en conjunto de los parámetros de salida (kappa, selectividad y TSS/ADt), complementado con indicadores como el orgánico/inorgánico, se identifica como una herramienta relevante para anticipar el desempeño del proceso y sostener su estabilidad operacional.

En conjunto, se permite identificar relaciones y consecuencias consistentes entre las propiedades de la materia prima y los indicadores de desempeño del proceso. El análisis estadístico complementado con la interpretación causal, evidencia que las variaciones observadas en la generación de TSS/ADt responden principalmente a mecanismos de compensación operacional frente a cambios en la madera, más que a desviaciones aisladas de control.

5. Conclusiones

En base a los resultados, se valida el contexto operacional de planta, ya que, a partir del análisis comparativo de los distintos factores, se observa que el indicador TSS/ADt presenta una disminución sostenida hasta 2023, seguida de un alza moderada pero consistente durante 2024 y 2025. Si bien estos valores no alcanzan los niveles máximos observados antes del período de descenso, se sitúan por sobre los registrados en los últimos tres años, evidenciando un cambio real en la condición operativa posterior a 2023. Este comportamiento se presenta en paralelo a la decisión de operar con un control más acotado de los niveles de licor negro débil y a una tendencia a la baja en la producción desde 2022. Por lo tanto, el comportamiento actual de este parámetro no se atribuye a un evento puntual, sino a un ajuste de las variables para sostener la estabilidad del proceso y la calidad del producto frente a un nuevo contexto operativo.

Respecto a la influencia de las propiedades de la madera en la generación de TSS/ADt, se concluye que esta existe, pero se manifiesta principalmente de forma indirecta. El análisis estadístico y causal indica que variables como la densidad básica y la densidad loose no presentan correlaciones directas elevadas con los TSS/ADt, sin embargo, sí se vinculan con variables de proceso relacionadas con la hidráulica del digestor y la distribución de químicos. De este modo, al alterarse la circulación del licor o dificultarse la impregnación de la astilla, la operación debe responder mediante ajustes de compensación cuyos efectos impactan en los indicadores de salida.

Por otro lado, las propiedades de astillado presentan una relación más directa con la variable de estudio. Una disminución del porcentaje de aceptado, representada por un aumento en el porcentaje de pinchip, implica una alimentación heterogénea al digestor. En este escenario, las astillas inferiores en tamaño reciben un tratamiento químico y térmico excesivo, provocando una mayor degradación que se refleja directamente en un incremento de los TSS/ADt.

En conclusión, el desempeño del indicador TSS/ADt no es un fenómeno aislado, sino la respuesta directa a la degradación térmica y química de las astillas de menor tamaño (pinchip) y medidas correctivas ante las variaciones en la madera, las cuales afectan a los factores hidráulicos del sistema. Se establece que la estabilidad de este parámetro requiere de una estrategia de control dinámica, considerando parámetros como los niveles de licor negro y carga térmica del digestor, en lugar de operar con ciertas condiciones fijas.

6. Recomendaciones

Para reducir la generación de TSS/ADt, se recomienda operar con foco en una cocción más uniforme, evitando zonas de agotamiento y sobrecocción. Es clave asegurar una distribución homogénea del licor y residuales estables, los cuales permitirán identificar, según corresponda, cuál de estas situaciones está ocurriendo, siempre que no se presente una precipitación de lignina. Esto debe apoyarse, en la medida de lo posible, en el ajuste de recirculación CD2 (siempre que los diferenciales de presión lo permitan), con el fin de mejorar la renovación química.

En paralelo, se recomienda estabilizar la hidráulica del digestor mediante un control de circulaciones y extracciones, considerando operar con un elevado factor de dilución para evitar la compactación, siempre que los diferenciales de presión de la CD3 lo permitan. A su vez, se debe complementar con el control de la presión del fondo, ya que un exceso de dilución puede reducirla en exceso y desencadenar un colgamiento del digestor. Finalmente, Controlar la granulometría priorizando que la distribución uniforme, de tamaños inadecuados, considerando que generalmente suele verse más inclinada hacia el aumento del pinchip (astillas subdimensionadas) el cual se asocia a un incremento de TSS/ADt.

Adicionalmente, se sugiere alinear el cálculo de la producción del digestor con el criterio recomendado por el fabricante, actualizando la densidad loose periódicamente (semanal o mensual) para reflejar tendencias reales.

Respecto al indicador orgánico/inorgánico del licor negro, se recomienda incrementar la frecuencia de su medición (actualmente semanal) e integrarlo sistemáticamente al monitoreo para anticipar variaciones en el desempeño del proceso. Este parámetro funciona como un diagnóstico complementario de diagnóstico del balance químico y de la agresividad del proceso, más que como una variable de ajuste directo sobre el producto final. Su interpretación se fortalece cuando se analiza en conjunto con los principales indicadores de salida, lo que permite identificar tendencias de degradación de carbohidratos o cambios en la severidad química.

7. Referencias

CMPC. (s. f.). Historia. <https://www.cmpc.com/nosotros/historia/>

CMPC Celulosa. (2003). *Rendimiento y propiedades de Eucalyptus nitens a los 12 años* (IDC 2003-89). CMPC.

CMPC - celulosa. (s. f.). <https://www.cmpccelulosa.cl/CMPCCELULOSA/interior.aspx?cid=524&leng>

CMPC Celulosa. (s. f.). Sistema de cocción: Manual de operación del digestor Andritz – Planta Santa Fe. CMPC Celulosa.

CMPC Celulosa. (2010). *Influencia de la edad de la madera de Eucalyptus globulus y Eucalyptus nitens en la aptitud pulpable* (Informe IDC 2009-78). CMPC Celulosa.

CMPC Celulosa. (2022). *Manual de capacitación: Control avanzado CMPC Kappa Digestor L2* (Planta Santa Fe). CMPC Celulosa.

CMPC Pulp. (2021). Características de madera para proceso (Especificación SG Proceso y Calidad, código E5TECIPR01, versión 34). CMPC.

Díaz Morales, C. M. (2011). *Validación de variables que afectan el rendimiento en digestor continuo para producción de celulosa kraft de Eucalyptus*. Universidade Federal de Viçosa.

Elissetche, J. P., Valenzuela, S., García, R., Norambuena, M., Iturra, C., Rodríguez, J., Teixeira Mendonça, R., & Balocchi, C. (2011). *Transcript abundance of enzymes involved in lignin biosynthesis of Eucalyptus globulus genotypes with contrasting levels of pulp yield and wood density*. Tree Genetics & Genomes, 7, 103–112. <https://doi.org/10.1007/s11295-011-0367-5>

Fardim, P. (Ed.). (2011). Chemical pulping. Part 1: Fibre chemistry and technology. Paper Engineers' Association.

Foelkel, C. (2009). *O processo de impregnação dos cavacos de madeira de eucalipto pelo licor kraft de cozimento*. Eucalyptus Online Book & Newsletter.

KPI Depot. (s. f.). *Pulp yield efficiency*. <https://kpidepot.com/kpi/pulp-yield-efficiency>

Kroslak, M., & Courchene, C. (2008). Impact of wood quality and pulping conditions on pulp yield and quality. En Proceedings of the 2008 TAPPI Engineering, Pulping and Environmental Conference. TAPPI. <https://www.tappi.org/content/events/08kros/manuscripts/1-1.pdf>

New Forests. (2022). *Eucalyptus Nitens Specifications: E. Nitens wood properties from Australian grown certified plantation wood*.

Santos, R. B., Colodette, J. L., & Jameel, H. (2011). *Hardwood lignin vs. pulping*. BioResources, 6(4), 3781–3794.

Sixta, H. (Ed.). (2006). Handbook of pulp. (Vols. 1–2). Wiley-VCH.

Smook, G. A. (2002). *Handbook for pulp & paper technologists* (3rd ed.). Angus Wilde Publications.

8.3. Anexo 3: Resultados estadística descriptiva anual propiedades madera

Tabla 8.1. Resultados estadística descriptiva propiedades madera del año 2019.

Propiedad	Media	Mediana	Desviación Estándar	[Mín, Máx]	Sesgo/curtosis estandarizada
Densidad básica ($kg/m^3 ssc$)	497.4	497.6	3.8	[484.5, 505.6]	-2.8/-0.1
Humedad (%)	41.1	51.4	0.9	[47.8, 52.6]	-7.1/2.3
Densidad loose (kg/m^3)	178.7	178.6	2.1	[174.4, 185.0]	3.4 /0.3
Aceptado (%)	87.3	87.0	1.3	[85.5, 91.7]	8.2 /3.8
PinChip (%)	10.0	10.8	1.6	[3.3, 12.0]	-9.9 /6.7
Finos (%)	0.8	0.8	0.1	[0.4, 1.1]	-3.9 /1.2
Sobretamaño (%)	0.0	0.00	0.0	[0, 0.2]	1.5 /1.9
Sobreepesor (%)	1.3	1.1	0.5	[0.7, 4.6]	6.7 /1.4
Corteza (%)	0.3	0.2	0.2	[0.1,1.0]	3.6 /8.4

Tabla 8.2. Resultados estadística descriptiva propiedades madera del año 2020.

Propiedad	Media	Mediana	Desviación Estándar	[Mín, Máx]	Sesgo/curtosis estandarizada
Densidad básica ($kg/m^3 ssc$)	499.8	499.9	3.6	[487.9, 507.5]	-2.9/0.3
Humedad (%)	49.3	49.3	1.1	[46.6, 52.4]	0.5 /-1.1
Densidad loose (kg/m^3)	181.6	181.5	2.3	[175.4, 188.3]	0.3 /0.8
Aceptado (%)	89.4	89.4	1.4	[85.8, 92.8]	-0.4 /-2.2
PinChip (%)	5.9	5.1	2.7	[2.3, 11.6]	2.9/-4.9
Finos (%)	0.6	0.6	0.1	[0.3, 1.0]	1.4 /-2.2
Sobretamaño (%)	0.1	0.1	0.1	[0, 0.4]	5.4 /-0.6
Sobreepesor (%)	3.1	3.6	1.1	[0.9, 5.8]	0.2 /4.8
Corteza (%)	0.5	0.5	0.2	[0.1,1.1]	2.9 /-1.5

Tabla 8.3. Resultados estadística descriptiva propiedades madera del año 2021.

Propiedad	Media	Mediana	Desviación Estándar	[Mín, Máx]	Sesgo/curtosis estandarizada
Densidad básica ($kg/m^3 ssc$)	497.9	498.6	4.6	[483.9, 506.7]	-3.8/0.7
Humedad (%)	49.9	50.0	1.2	[46.5, 52.5]	-2.7 /-1.8
Densidad loose (kg/m^3)	181.5	181.6	2.3	[174.0, 187.9]	-0.6 /0.2
Aceptado (%)	90.8	90.7	1.3	[87.2, 93.6]	0.1 /-2.3
PinChip (%)	4.3	3.9	1.4	[2.0, 9.9]	8.2 /4.6
Finos (%)	0.5	0.5	0.1	[0.3, 0.9]	3.9 /-0.4
Sobretamaño (%)	0.1	0.1	0.1	[0.0,0.4]	7.2/3.3
Sobreepesor (%)	3.4	3.3	0.9	[1.0, 5.9]	-0.1 /-1.6
Corteza (%)	0.6	0.6	0.2	[0.2,1.2]	2.9/-0.4

Tabla 8.4. Resultados estadística descriptiva propiedades madera del año 2022.

Propiedad	Media	Mediana	Desviación Estándar	[Mín, Máx]	Sesgo/curtosis estandarizada
Densidad básica ($kg/m^3 ssc$)	494.3	494.5	5.7	[483.5, 507.3]	0.7/−3.3
Humedad (%)	50.5	50.6	1.5	[46.7, 52.8]	−2.5/−3.5
Densidad loose (kg/m^3)	181.6	181.6	2.3	[176.4, 189.8]	2.6 /0.7
Aceptado (%)	91.1	91.2	1.2	[86.8, 93.4]	−641 /−0.5
PinChip (%)	4.5	4.3	1.5	[2.2, 10.9]	8.2 /5.6
Finos (%)	0.6	0.6	0.1	[0.3, 1.1]	2.6 /−0.4
Sobretamaño (%)	0.1	0.1	0.1	[0, 0.4]	9.5 /6.0
Sobreepesor (%)	2.9	2.8	1.0	[1.0, 5.8]	3.7 /−1.1
Corteza (%)	0.4	0.4	0.2	[0.1,1.1]	5.9 /0.9

Tabla 8.5. Resultados estadística descriptiva propiedades madera del año 2023.

Propiedad	Media	Mediana	Desviación Estándar	[Mín, Máx]	Sesgo/curtosis estandarizada
Densidad básica ($kg/m^3 ssc$)	490.3	489.9	3.3	[483.8, 507.1]	6.4/6.2
Humedad (%)	49.0	48.9	1.1	[46.4, 51.6]	0.06 /−2.2
Densidad loose (kg/m^3)	181.3	180.9	2.6	[175.8, 188.7]	3.7 /−0.3
Aceptado (%)	92.2	92.3	1.0	[88.6, 94.1]	−6.1 /0.3
PinChip (%)	3.8	3.6	1.1	[2.0, 8.4]	6.7 /4.1
Finos (%)	0.5	0.5	0.1	[0.3, 1.0]	6.7 /1.4
Sobretamaño (%)	0.0	0.00	0.1	[0, 0.3]	1.5 /1.9
Sobreepesor (%)	2.6	2.5	0.7	[0.3, 1.0]	6.7 /1.4
Corteza (%)	0.5	0.5	0.2	[0.1,1.1]	3.6 /−0.2

Tabla 8.6. Resultados estadística descriptiva propiedades madera del año 2024.

Propiedad	Media	Mediana	Desviación Estándar	[Mín, Máx]	Sesgo/curtosis estandarizada
Densidad básica ($kg/m^3 ssc$)	493.4	493.5	3.7	[485.8, 504.1]	1.3/−1.6
Humedad (%)	48.9	49.0	1.1	[46.4, 52.2]	1.5 /−0.9
Densidad loose (kg/m^3)	184.8	184.8	2.7	[176.0, 191.0]	−1.8 /1.3
Aceptado (%)	92.0	92.0	1.0	[88.8, 94.2]	−2.9 /−0.9
PinChip (%)	4.6	4.3	1.4	[2.0, 8.8]	4.2 /−1.6
Finos (%)	0.5	0.5	0.1	[0.3, 0.8]	2.9 /−1.0
Sobretamaño (%)	0.0	0.0	0.1	[0, 0.3]	14.3 /12.0
Sobreepesor (%)	2.1	2.0	0.7	[0.9, 4.5]	5.2 /−0.1
Corteza (%)	0.5	0.5	0.2	[0.1,1.1]	4.4/1.4

Tabla 8.7. Resultados estadística descriptiva propiedades madera del año 2025.

Propiedad	Media	Mediana	Desviación Estándar	[Mín, Máx]	Sesgo/curtosis estandarizada
Densidad básica (kg/m^3_{ssc})	491.6	491.4	3.3	[483.9, 510.2]	1.2/1.3
Humedad (%)	48.3	48.3	1.1	[46.2, 51.2]	1.0 /−1.7
Densidad loose (kg/m^3)	183.5	183.5	2.8	[176.9, 191.0]	1.5 /−0.5
Aceptado (%)	91.7	91.7	0.8	[89.5, 93.7]	−0.1 /−0.5
PinChip (%)	4.5	4.3	1.0	[2.5, 7.8]	63.0/0.3
Finos (%)	0.5	0.5	0.1	[0.3, 0.8]	1.6 /1.4
Sobretamaño (%)	0.0	0.00	0.1	[0, 0.3]	10.8 /8.6
Sobreepesor (%)	2.5	2.4	0.7	[0.9, 3.0]	1.1 /−0.8
Corteza (%)	0.5	0.4	0.2	[0.1,1.1]	2.4 /−1.0

8.4. Anexo 4: Resultados estadística descriptiva anual variables cocción

Tabla 8.8. Resultados estadística descriptiva variables cocción del año 2019

Propiedad	Media	Mediana	Desviación Estándar	[Mín, Máx]	Sesgo/curtosis estadarizada
Temperatura tope digestor	142.6	142.6	0.8	[140.7, 144.7]	0.1/−2.0
Temperatura cocción digestor	152.9	153.0	1.2	[150.6, 155.7]	−0.7/−3.5
Temperatura fondo digestor	154.2	153.0	1.1	[151.9, 157.1]	1.6/−2.5
Presión tope digestor	4.0	4.0	0.1	[3.8, 4.2]	3.5/2.5
Presión fondo digestor	85.7	84.3	6.3	[76.4, 102.6]	3.3/−3.6
Presión tope torre de impregnación	10.0	10.0	0.1	[9.7, 10.2]	1.2/−1.3
Presión fondo torre de impregnación	61.4	61.2	2.7	[55.7, 67.7]	1.3/−3.2
Factor H	379.8	377.3	26.8	[337.1, 488.8]	6.9/4.6
Sulfidez	34.2	34.5	1.0	[29.9, 36.0]	−12.2/14.4
Carga de álcali	21.3	21.1	0.5	[20.5, 22.7]	6.4/−1.1
Residual de álcali transferencia	9.3	9.3	0.5	[6.9, 10.2]	−5.9/6.2
Residual álcali CD1	5.6	5.6	0.5	[4.6, 7.1]	1.2/−2.4
Residual álcali CD3	6.2	6.2	0.5	[5.2, 7.9]	1.9/−1.9
Dosificación licor blanco alimentación	11.4	11.4	0.3	[8.8, 12.0]	−12.9/−10.8
Dosificación licor blanco transferencia	4.0	4.0	0.2	[3.7, 5.0]	5.2/2.5
Dosificación licor blanco CD2	5.1	5.1	0.4	[0.0, 5.9]	−37.0/20
Dosificación licor blanco CD3	0.6	0.6	0.1	[0.5, 0.8]	2.4/−5.5
Factor de extracción CD1	2.8	2.7	0.2	[2.3, 3.5]	2.5/−1.0
Factores de Recirculación CD2	4.6	4.6	0.1	[4.2, 4.8]	−4.2/2.0
Factor de extracción CD3	5.6	5.7	0.4	[3.8, 6.0]	−20.9/30.4
Factor de dilución de fondo	1.2	1.3	0.1	[0.9, 1.4]	−5.9/−1.6
Producción del digestor	3401	3416	164	[2941, 3715]	−3.5/−1.3
TSS/ADt	1.3	1.3	0.0	[1.2, 1.3]	−4.5/2.4
Kappa	16.5	16.6	0.2	[15.8, 17.0]	−3.5/−0.5
Selectividad	83.8	84.1	2.0	[74.8, 88.0]	−4.9/3.2
Viscosidad	1393.9	1400.0	29.6	[1240, 1460]	−4.9/4.8
Orgánico/Inorgánico	—	—	—	—	—

Tabla 8.9. Resultados estadística descriptiva variables cocción del año 2020

Propiedad	Media	Mediana	Desviación Estándar	[Mín, Máx]	Sesgo/curtosis estadarizada
Temperatura tope digestor	144.1	144.2	1.0	[141.5, 146.0]	-2.9/-1.4
Temperatura cocción digestor	152.7	152.4	1.5	[150.6, 157.5]	7.0/1.2
Temperatura fondo digestor	153.8	153.3	1.3	[151.7, 158.2]	6.6/0.2
Presión tope digestor	4.0	4.0	0.0	[3.8, 4.1]	1.3/-0.1
Presión fondo digestor	82.8	81.8	4.8	[76.4, 109.9]	18.2/35.3
Presión tope torre de impregnación	10.0	10.0	0.1	[9.7, 10.2]	-2.2/-2.3
Presión fondo torre de impregnación	60.7	61.4	3.0	[53.2, 66.5]	-2.2/-2.3
Factor H	387.8	378.0	40.8	[336.7, 529.7]	7.1/0.8
Sulfidez	34.6	34.8	0.9	[30.7, 36.0]	-9.4/7.9
Carga de álcali	21.5	21.5	0.5	[20.6, 22.6]	2.4/-2.1
Residual de álcali transferencia	8.0	7.6	1.2	[6.4, 10.3]	2.5/-4.3
Residual álcali CD1	6.0	5.9	0.4	[5.2, 7.2]	7.1/2.9
Residual álcali CD3	6.3	6.3	0.4	[5.2, 7.3]	-0.3/-1.5
Dosificación licor blanco alimentación	9.6	9.4	1.5	[7.8, 12.1]	2.1/-4.8
Dosificación licor blanco transferencia	5.6	5.9	0.9	[3.7, 6.6]	-7.6/0.0
Dosificación licor blanco CD2	5.3	5.3	0.4	[4.3, 6.1]	-1.8/3.2
Dosificación licor blanco CD3	0.7	0.7	0.1	[0.5, 0.8]	-4.2/-2.4
Factor de extracción CD1	2.8	2.8	0.2	[2.4, 3.4]	3.7/0.5
Factores de Recirculación CD2	4.4	4.4	0.2	[3.7, 4.9]	-4.8/-0.8
Factor de extracción CD3	5.6	5.6	0.2	[5.0, 5.9]	-4.0/-1.9
Factor de dilución de fondo	1.2	1.2	0.1	[1.0, 1.4]	1.5/-1.4
Producción del digestor	3502	3572	233.9	[2898, 3820]	-8.0/0.3
TSS/ADt	1.2	1.2	0.0	[1.1, 1.3]	1.9/-2.2
Kappa	16.4	16.4	0.2	[15.8, 16.9]	-1.6/-1.4
Selectividad	84.7	85.0	2.1	[75.7, 89.1]	-6.4/5.3
Viscosidad	1386.8	1390.0	40.5	[1240.0, 1480.0]	-4.6/4.2
Orgánico/Inorgánico	1.5	1.5	0.1	[1.4, 1.7]	1.1/-3.1

Tabla 8.10. Resultados estadística descriptiva variables cocción del año 2021

Propiedad	Media	Mediana	Desviación Estándar	[Mín, Máx]	Sesgo/curtosis estadarizada
Temperatura tope digestor	144.3	144.3	0.7	[142.1, 145.8]	-2.1/-1.1
Temperatura cocción digestor	153.5	153.6	1.3	[150.6, 156.3]	-1.5/-2.5
Temperatura fondo digestor	155.2	154.9	1.7	[151.8, 158.9]	1.1/-3.7
Presión tope digestor	4.0	4.0	0.1	[3.8, 4.1]	3.9/0.9
Presión fondo digestor	89.5	89.4	7.2	[77.0, 110.4]	3.9/1.0
Presión tope torre de impregnación	10.0	10.0	0.1	[9.7, 10.2]	-1.9/-2.8
Presión fondo torre de impregnación	59.4	59.5	2.9	[52.9, 67.7]	-0.2/-1.8
Factor H	414.7	412.6	31.0	[394.4, 520.5]	3.2/-0.3
Sulfidez	34.5	34.6	0.6	[31.3, 35.8]	-7.4/9.9
Carga de álcali	21.4	21.5	0.4	[20.6, 22.3]	-1.0/-2.4
Residual de álcali transferencia	7.6	7.5	0.7	[6.4, 9.1]	2.6/-1.6
Residual álcali CD1	5.9	5.9	0.4	[4.9, 6.8]	-0.1/-0.3
Residual álcali CD3	6.3	6.2	0.3	[5.4, 7.3]	3.4/0.5
Dosificación licor blanco alimentación	9.0	9.0	0.5	[7.9, 10.4]	0.5/-2.8
Dosificación licor blanco transferencia	5.5	5.6	0.6	[4.3, 6.6]	-2.6/-3.5
Dosificación licor blanco CD2	5.5	5.6	0.5	[0.9, 6.1]	-5.0/20
Dosificación licor blanco CD3	0.6	0.5	0.1	[0.5, 0.8]	6.5/-3.2
Factor de extracción CD1	3.2	3.2	0.2	[2.7, 3.7]	0.3/-4.5
Factores de Recirculación CD2	3.9	3.9	0.2	[3.6, 4.9]	7.2/-2.3
Factor de extracción CD3	4.9	5.0	0.4	[3.8, 5.9]	-4.6/2.3
Factor de dilución de fondo	1.1	1.0	0.1	[0.9, 1.4]	4.4/-2.2
Producción del digestor	3470	3513	218	[2927, 3798]	-4.9/-1.8
TSS/ADt	1.2	1.2	0.0	[1.2, 1.4]	1.2/0.5
Kappa	16.4	16.4	0.3	[15.8, 17.0]	0.5/-2.0
Selectividad	83.5	83.6	2.2	[76.7, 89.1]	-1.8/-1.1
Viscosidad	1369.4	1375.0	39.1	[1231.8, 1490.0]	-3.6/1.0
Orgánico/Inorgánico	1.5	1.5	0.1	[1.4, 1.7]	1.5/-3.6

Tabla 8.11. Resultados estadística descriptiva variables cocción del año 2022

Propiedad	Media	Mediana	Desviación Estándar	[Mín, Máx]	Sesgo/curtosis estadarizada
Temperatura tope digestor	143.3	143.3	0.8	[141.4, 145.9]	-0.1/-1.4
Temperatura cocción digestor	154.8	155.0	1.4	[151.3, 158.0]	-2.6/1.0
Temperatura fondo digestor	154.6	154.6	1.0	[151.8, 157.4]	2.5/1.0
Presión tope digestor	4.1	4.0	0.1	[3.9, 4.4]	5.3/-2.5
Presión fondo digestor	91.2	88.9	8.7	[77.7, 110.5]	5.2/-2.4
Presión tope torre de impregnación	10.2	10.2	0.2	[9.7, 10.5]	-0.4/-1.3
Presión fondo torre de impregnación	60.3	60.1	2.6	[53.9, 67.3]	1.2/-0.9
Factor H	417.7	416.2	38.8	[340.7, 566.7]	2.9/1.6
Sulfidez	32.7	32.6	1.3	[29.9, 35.9]	-1.7/-1.4
Carga de álcali	21.3	21.3	0.3	[20.6, 22.2]	1.3/-2.3
Residual de álcali transferencia	7.4	7.4	0.5	[6.5, 8.6]	1.4/-4.5
Residual álcali CD1	6.1	6.1	0.4	[4.8, 7.2]	1.4/4.1
Residual álcali CD3	6.3	6.1	0.6	[5.2, 7.6]	3.6/2.8
Dosificación licor blanco alimentación	9.7	9.7	0.5	[8.7, 11.2]	5.0/1.2
Dosificación licor blanco transferencia	4.6	4.7	0.4	[3.6, 5.5]	-2.6/-1.5
Dosificación licor blanco CD2	5.2	5.5	1.5	[0.9, 6.1]	-25.0/20
Dosificación licor blanco CD3	5.2	5.2	0.2	[4.7, 5.9]	-1.3/-5.9
Factor de extracción CD1	2.8	2.8	0.2	[2.3, 3.5]	2.8/0.5
Factores de Recirculación CD2	3.8	3.7	0.2	[3.2, 4.8]	8.8/12.0
Factor de extracción CD3	5.2	5.2	0.2	[4.7, 5.9]	4.4/5.0
Factor de dilución de fondo	1.0	1.0	0.1	[0.9, 1.4]	5.8/0.2
Producción del digestor	3635	3681	148	[2954, 3842]	-13.9/15.0
TSS/ADt	1.2	1.2	0.0	[1.1, 1.3]	1.7/0.3
Kappa	16.9	16.9	0.2	[15.9, 17.3]	-7.2/3.6
Selectividad	79.9	79.5	2.5	[73.1, 87.1]	3.0/0.4
Viscosidad	1351.9	1353.0	46.3	[1210.0, 1480.0]	-1.7/2.4
Orgánico/Inorgánico	1.6	1.6	0.1	[1.4, 1.7]	-3.5/-0.7

Tabla 8.12. Resultados estadística descriptiva variables cocción del año 2023

Propiedad	Media	Mediana	Desviación Estándar	[Mín, Máx]	Sesgo/curtosis estadarizada
Temperatura tope digestor	144.1	144.1	1.1	[141.8, 146.2]	-0.4/-3.7
Temperatura cocción digestor	157.2	157.5	1.7	[151.8, 159.9]	-5.0/0.2
Temperatura fondo digestor	156.2	156.2	1.3	[153.4, 159.2]	1.9/-1.9
Presión tope digestor	4.2	4.2	0.1	[3.8, 4.4]	7.9/-7.9
Presión fondo digestor	90.7	88.3	7.0	[81.1, 110.5]	9.4/2.3
Presión tope torre de impregnación	10.3	10.3	0.2	[9.7, 10.5]	-10.0/6.2
Presión fondo torre de impregnación	56.4	56.2	1.7	[53.1, 62.3]	6.2/3.8
Factor H	487.4	489.9	46.3	[378.0, 594.3]	-0.2/-2.6
Sulfidez	32.2	32.2	1.0	[29.9, 35.2]	0.0/0.3
Carga de álcali	21.7	21.6	0.4	[20.7, 22.6]	3.0/-2.1
Residual de álcali transferencia	7.9	7.7	0.8	[6.4, 10.0]	4.6/-2.5
Residual álcali CD1	6.2	6.2	0.5	[4.6, 7.1]	-3.3/0.0
Residual álcali CD3	6.0	6.0	0.5	[5.1, 7.4]	2.0/-2.7
Dosificación licor blanco alimentación	10.6	10.4	0.6	[9.6, 12.1]	4.6/-3.2
Dosificación licor blanco transferencia	4.7	4.7	0.4	[3.7, 5.7]	0.2/-0.1
Dosificación licor blanco CD2	4.7	5.2	1.8	[0.9, 6.0]	-15.0/19
Dosificación licor blanco CD3	0.6	0.6	0.1	[0.5, 0.8]	0.4/-4.2
Factor de extracción CD1	2.6	2.5	0.2	[2.2, 3.4]	8.5/3.0
Factores de Recirculación CD2	3.6	3.6	0.3	[3.1, 4.5]	4.3/2.9
Factor de extracción CD3	5.2	5.3	0.4	[4.0, 5.9]	-10.9/5.9
Factor de dilución de fondo	1.1	1.1	0.1	[0.9, 1.4]	4.7/-0.3
Producción del digestor	3532	3618	212	[2912, 3794]	-6.6/-1.9
TSS/ADt	1.2	1.2	0.1	[1.1, 1.3]	7.2/0.0
Kappa	16.9	17.0	0.2	[16.3, 17.3]	-5.4/1.6
Selectividad	78.2	78.0	1.9	[73.4, 88.2]	6.0/7.5
Viscosidad	1321.7	1325.0	38.3	[1131.8, 1480.0]	-1.6/10.2
Orgánico/Inorgánico	1.6	1.6	0.1	[1.4, 1.7]	-4.5/-0.7

Tabla 8.13. Resultados estadística descriptiva variables cocción del año 2024

Propiedad	Media	Mediana	Desviación Estándar	[Mín, Máx]	Sesgo/curtosis estadarizada
Temperatura tope digestor	145.2	145.2	0.7	[141.9, 146.6]	-7.7/5.9
Temperatura cocción digestor	156.9	157.1	1.8	[151.2, 159.9]	-3.7/-1.0
Temperatura fondo digestor	157.5	157.6	1.5	[152.6, 159.8]	-2.7/-1.5
Presión tope digestor	4.1	4.1	0.1	[3.8, 4.3]	1.6/-1.9
Presión fondo digestor	95.1	94.3	8.3	[78.6, 110.7]	0.9/-3.4
Presión tope torre de impregnación	10.2	10.2	0.2	[9.7, 10.5]	-5.4/0.5
Presión fondo torre de impregnación	59.3	58.9	3.3	[53.2, 66.4]	1.8/-4.8
Factor H	514.7	521.1	51.0	[370.3, 596.7]	-3.1/-2.6
Sulfidez	32.9	33.1	1.4	[30.0, 35.7]	-0.9/-3.3
Carga de álcali	22.1	22.1	0.3	[20.8, 22.6]	-2.7/0.0
Residual de álcali transferencia	7.9	8.0	0.9	[6.5, 9.9]	2.9/-2.6
Residual álcali CD1	5.8	5.8	0.5	[4.7, 7.1]	2.2/-1.6
Residual álcali CD3	6.1	6.1	0.3	[5.4, 6.8]	-0.4/-0.3
Dosificación licor blanco alimentación	10.9	10.8	0.5	[10.0, 12.1]	3.7/-1.8
Dosificación licor blanco transferencia	4.6	4.6	0.4	[3.7, 5.5]	-1.3/-0.2
Dosificación licor blanco CD2	5.3	5.3	0.4	[4.4, 6.1]	-0.1/-1.4
Dosificación licor blanco CD3	0.6	0.6	0.1	[0.5, 0.8]	1.3/2.5
Factor de extracción CD1	2.9	2.9	0.3	[2.2, 3.6]	1.3/-4.1
Factores de Recirculación CD2	3.6	3.6	0.3	[3.1, 4.6]	2.8/-2.0
Factor de extracción CD3	4.6	4.8	0.4	[3.7, 5.6]	-4.3/-1.9
Factor de dilución de fondo	1.1	1.1	0.1	[0.9, 1.4]	3.0/-0.3
Producción del digestor	3508	3577	191	[2929, 3828]	-7.9/1.8
TSS/ADt	1.2	1.2	0.0	[1.1, 1.3]	3.5/1.5
Kappa	16.6	16.7	0.2	[15.8, 17.1]	4.0/2.9
Selectividad	78.1	77.5	3.2	[72.9, 88.3]	3.8/-1.2
Viscosidad	1285.8	1283.8	59.8	[1150.0, 1470.0]	1.0/-1.9
Orgánico/Inorgánico	1.6	1.6	0.1	[1.4, 1.7]	-5.4/0.0

Tabla 8.14. Resultados estadística descriptiva variables cocción del año 2025

Propiedad	Media	Mediana	Desviación Estándar	[Mín, Máx]	Sesgo/curtosis estadarizada
Temperatura tope digestor	144.9	145.0	0.9	[141.9, 146.8]	−2.4/0.2
Temperatura cocción digestor	155.4	155.2	2.2	[151.0, 160.0]	1.4/−2.1
Temperatura fondo digestor	157.4	157.7	1.4	[151.7, 159.6]	−4.6/3.5
Presión tope digestor	4.1	4.1	0.1	[3.8, 4.2]	−3.1/−0.1
Presión fondo digestor	99.3	102.2	8.4	[81.9, 110.6]	−2.7/−3.0
Presión tope torre de impregnación	10.2	10.3	0.1	[9.7, 10.4]	−5.1/0.4
Presión fondo torre de impregnación	598.4	58.1	2.4	[53.1, 64.4]	1.1/−2.1
Factor H	467.5	459.5	59.0	[345.0, 593.5]	1.4/−2.2
Sulfidez	31.9	31.9	0.9	[30.0, 34.4]	0.7/−1.5
Carga de álcali	21.4	21.5	0.1	[21.0, 22.0]	0.2/3.6
Residual de álcali transferencia	8.8	8.7	0.9	[6.7, 10.3]	−0.2/−2.7
Residual álcali CD1	5.1	5.1	0.4	[4.6, 6.6]	5.6/2.8
Residual álcali CD3	6.0	6.1	0.3	[5.1, 6.9]	−2.0/0.3
Dosificación licor blanco alimentación	11.1	11.3	0.7	[9.5, 12.1]	−5.4/0.4
Dosificación licor blanco transferencia	4.1	4.1	0.4	[3.6, 5.0]	2.8/−1.7
Dosificación licor blanco CD2	5.5	5.5	0.3	[4.7, 6.1]	0.3/−1.9
Dosificación licor blanco CD3	0.5	0.5	0.1	[0.5, 0.7]	3.6/−1.8
Factor de extracción CD1	3.0	2.9	0.3	[2.3, 3.6]	1.0/−3.5
Factores de Recirculación CD2	3.7	3.8	0.3	[3.1, 4.6]	−1.1/−0.7
Factor de extracción CD3	4.6	4.7	0.4	[3.7, 5.9]	−2.7/−1.1
Factor de dilución de fondo	1.1	1.1	0.1	[0.9, 1.4]	2.3/2.7
Producción del digestor	3523	3558	165	[2930, 3808]	−8.0/6.6
TSS/ADt	1.2	1.2	0.0	[1.1, 1.3]	0.1/−1.2
Kappa	16.8	16.8	0.2	[16.1, 17.2]	−1.2/−1.4
Selectividad	78.7	78.7	2.8	[72.9, 84.2]	−0.1/−0.9
Viscosidad	1315.9	1324.0	51.6	[1164.2, 1410.0]	−0.5/−2.5
Orgánico/Inorgánico	1.6	1.6	0.1	[1.4, 1.7]	−8.7/9.3

8.5. Anexo 5: Matriz de Spearman exploratoria

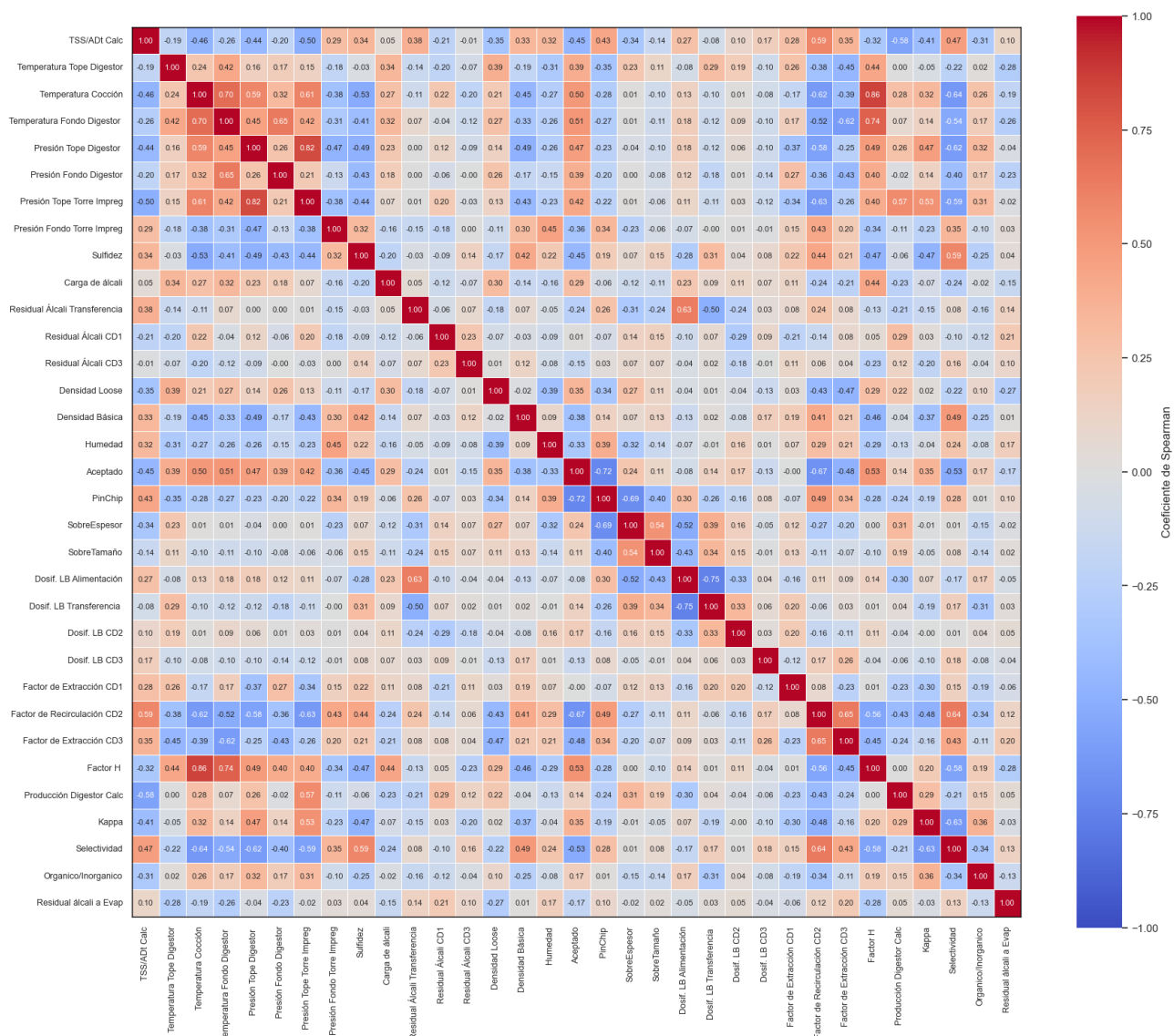


Figura 8.3. Matriz de correlaciones de spearman.

8.6. Anexo 6: Matriz de Spearman focalizada

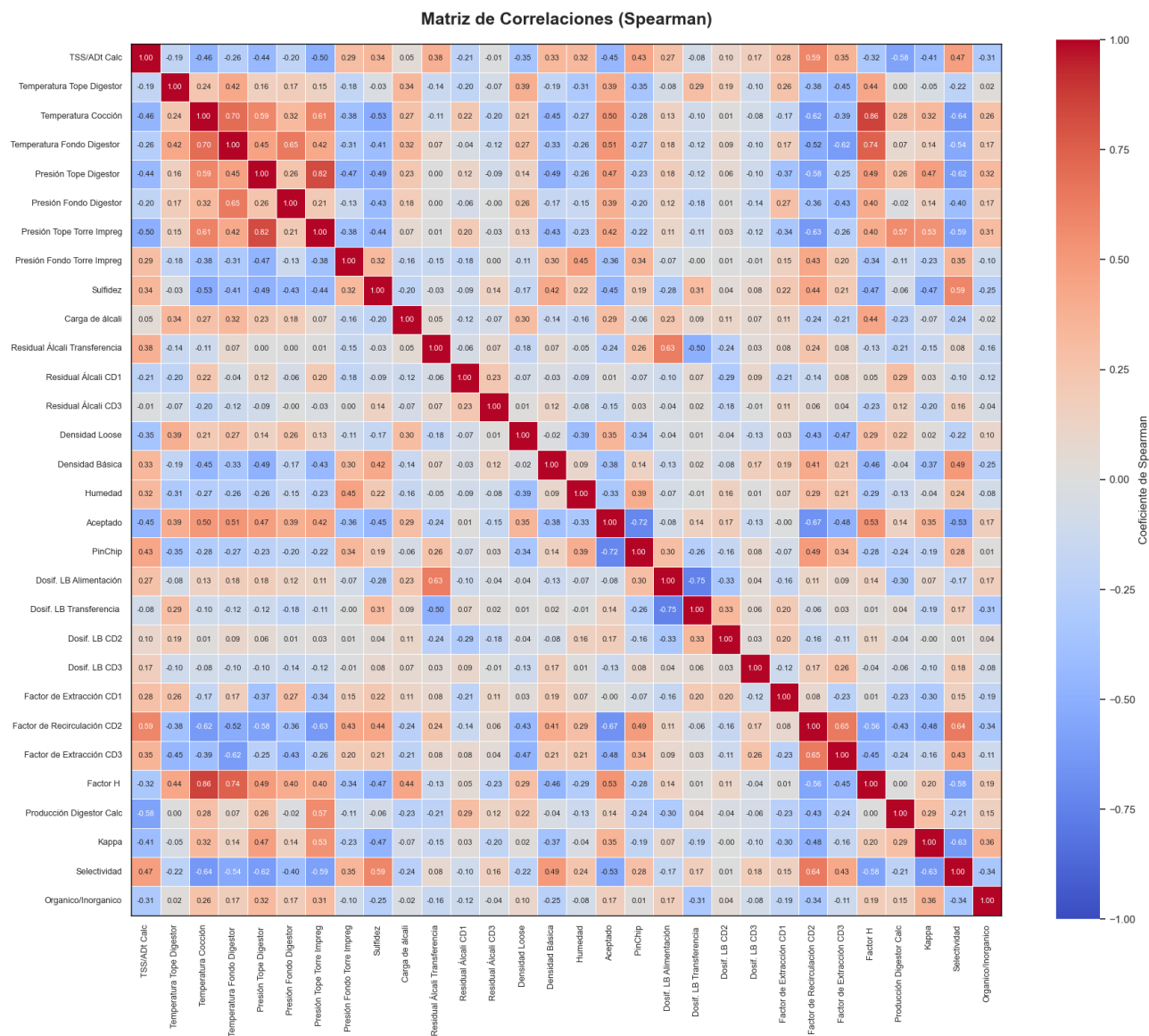


Figura 8.4. Matriz de correlaciones de spearman acotada.

8.7. Anexo 7: Boxplots comparativos 2023 vs 2025 para variables del modelo causal

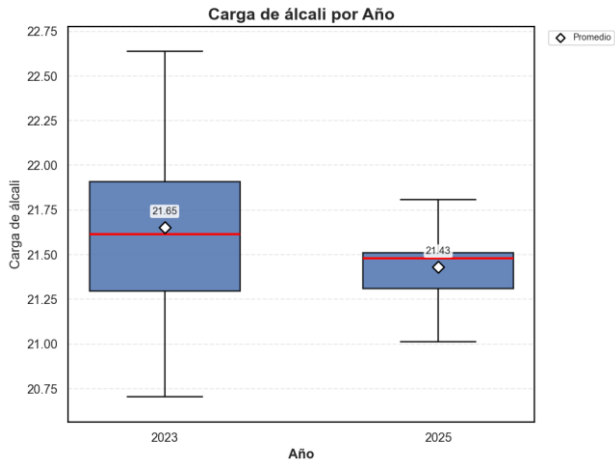


Figura 8.5. Boxplot comparativo (2023 vs 2025) de carga de álcali.

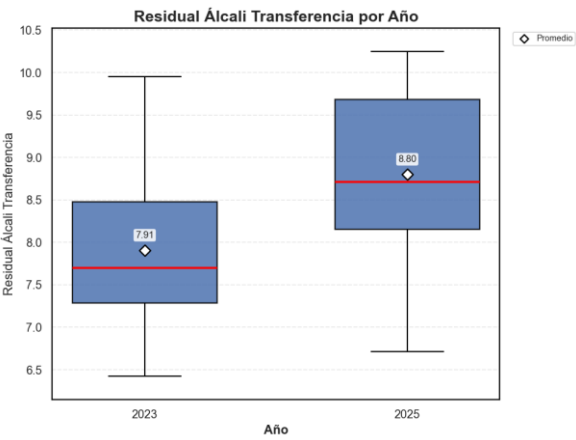


Figura 8.6. Boxplot comparativo (2023 vs 2025) de álcali residual de transferencia.

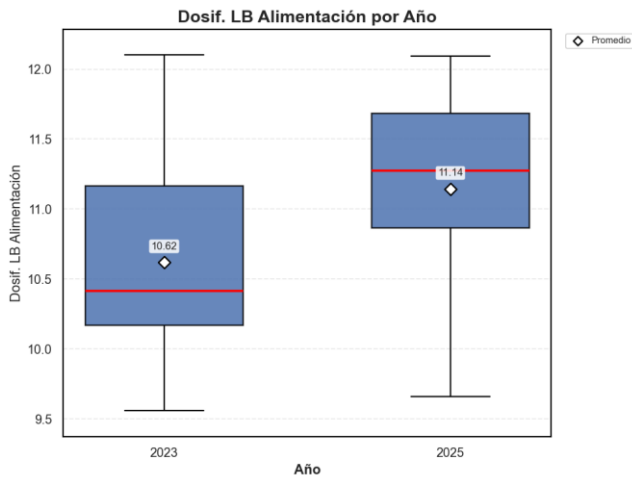


Figura 8.7. Boxplot comparativo (2023 vs 2025) de dosificación de licor blanco en la alimentación.

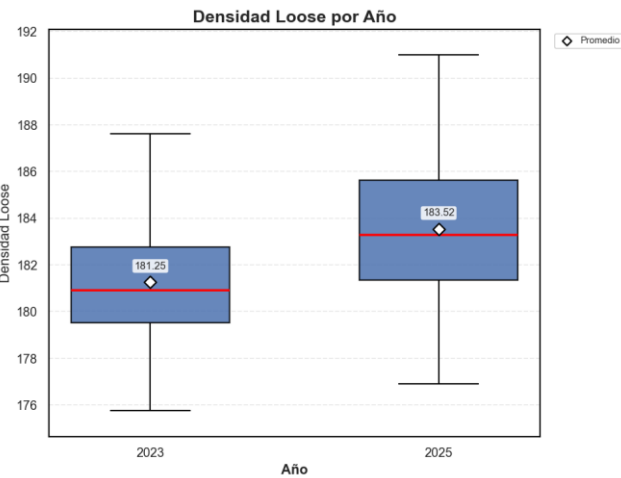


Figura 8.8. Boxplot comparativo (2023 vs 2025) de densidad loose.

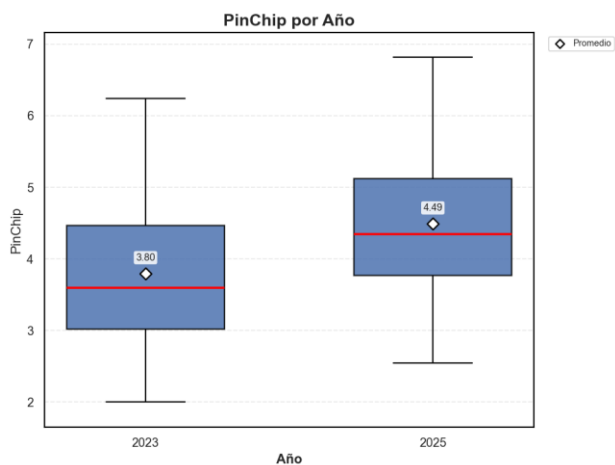


Figura 8.9. Boxplot comparativo (2023 vs 2025) de pinchip.

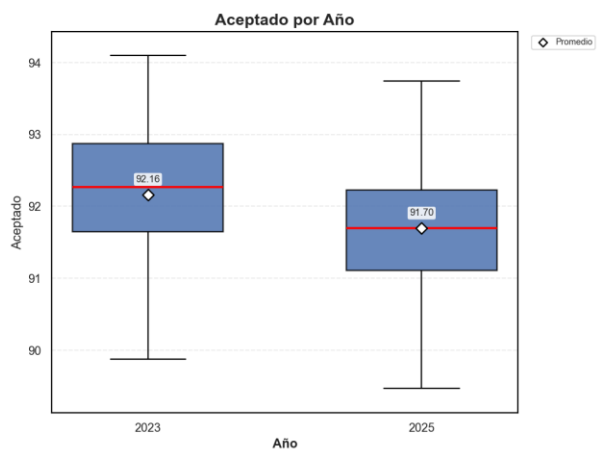


Figura 8.10. Boxplot comparativo (2023 vs 2025) de aceptado.

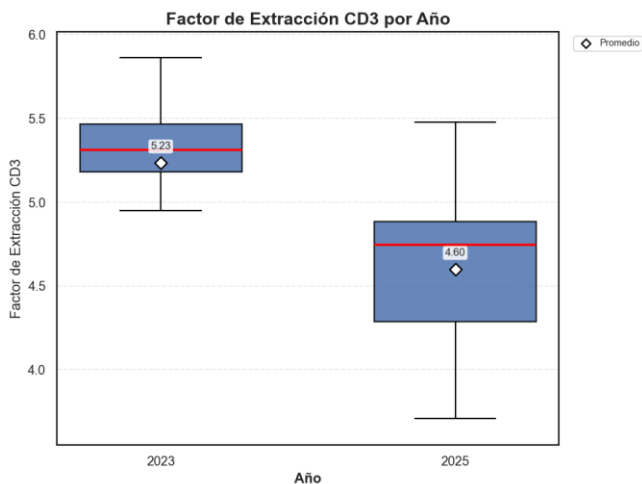


Figura 8.11. Boxplot comparativo (2023 vs 2025) de factor de extracción CD3.

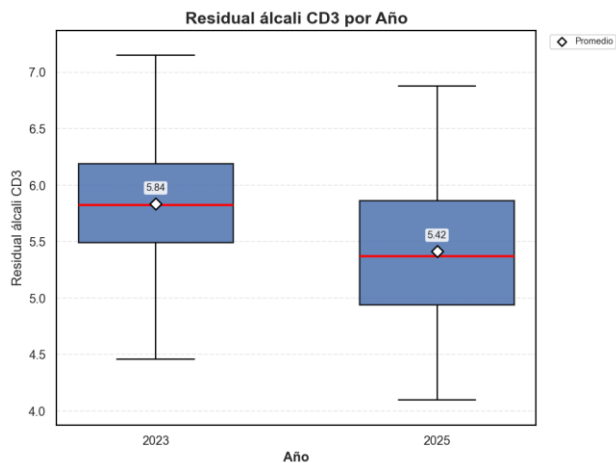


Figura 8.12. Boxplot comparativo (2023 vs 2025) de residual de álcali en CD3.

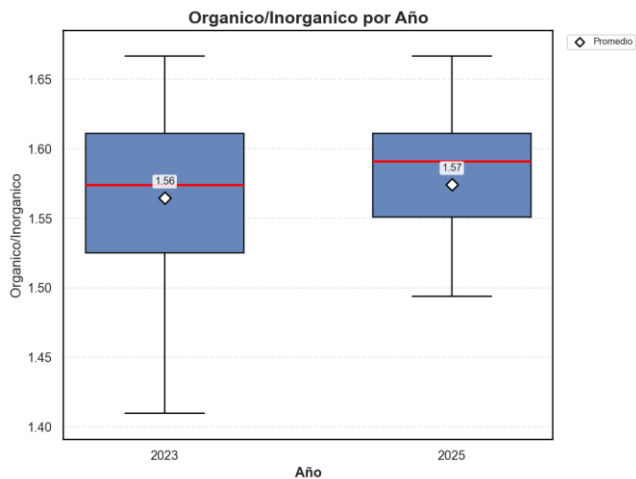


Figura 8.13. Boxplot comparativo (2023 vs 2025) de orgánico/inorgánico.

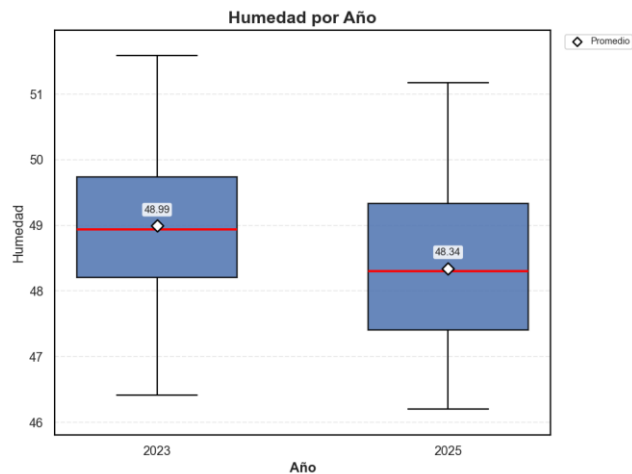


Figura 8.14. Boxplot comparativo (2023 vs 2025) de humedad.

8.8. Anexo 8: Resumen FI

UNIVERSIDAD DE CONCEPCION – FACULTAD DE INGENIERIA RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO

Departamento:	Departamento de Ingeniería Química.
Carrera:	Ingeniería Civil Química.
Nombre del memorista:	Javiera Rodríguez Neira
Título de la memoria:	Evaluación del impacto de las características de la madera y la generación de TSS/ADt en el proceso de cocción SF2.
Fecha de presentación oral:	
Profesor(es) Guía:	Miguel Ángel Pereira
Profesional Supervisor:	Matías Cofré/Juan Lagos
Profesor (es) Revisor (es)	Romel Jiménez
Concepto:	
Calificación:	

Resumen:

El presente estudio evalúa el impacto de las características de la madera sobre la generación de TSS/ADt en el área de cocción de la línea Santa Fe 2 (SF2) de CMPC, ante la variabilidad del indicador y la necesidad de determinar si los factores de la materia prima podrían explicarla. Este se desarrolla mediante una revisión bibliográfica, levantamiento del estado de la planta y análisis de datos operacionales mediante depuración, cálculo de indicadores y herramientas estadísticas (descriptiva, correlaciones y pruebas de hipótesis). Con estos resultados se construye un modelo causal que vincula propiedades de la madera con variables de operación y de resultado.

Los resultados muestran que 2023 es un periodo estable y comparable con 2025 en términos de producción. Se observa una disminución sostenida del TSS/ADt hasta 2023 y un aumento leve pero consistente en 2024–2025, asociado a una nueva condición operacional más que a un evento puntual. El modelo causal sugiere un efecto principalmente indirecto de la madera, al condicionar variables operacionales del digestor vinculadas a hidráulica y severidad (temperatura y factor H), con impacto en el TSS/ADt. Finalmente, se recomienda fortalecer el monitoreo de humedad y densidad básica, junto con variables operacionales (temperatura de cocción, extracción y recirculación), además de aumentar la frecuencia del indicador orgánico/inorgánico e incorporar criterios del fabricante para un seguimiento más representativo del desempeño.