Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América

Dirección General de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Industrial
Unidad de Posgrado

Optimización del tratamiento de preservación por vacío-presión de postes agrícolas de madera de Guazuma crinita proveniente de plantaciones forestales

TESIS

Para optar el Grado Académico de Magister en Ingeniería Industrial

AUTOR

Martin ARAUJO FLORES

ASESOR

Oscar Rafael TINOCO GÓMEZ

Lima, Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Araujo, O. (2026). *Optimización del tratamiento de preservación por vacío-presión de postes agrícolas de madera de Guazuma crinita proveniente de plantaciones forestales*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Industrial, Unidad de Posgrado]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Martin Araujo Flores
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	25837476
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-5706-246X
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Oscar Rafael Tinoco Gómez
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	08606920
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-2548-2160
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Julio Alejandro Salas Bacalla
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08468620
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Jorge Luis Inche Mitma
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07506203
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Olivio Nino Castro Mandujano
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07683880
Miembro del jurado 3	
Nombres y apellidos	Jorge José Esponda Véliz
Tipo de documento	DNI

Número de documento de identidad	07673952
Datos de investigación	
Línea de investigación	12. Calidad, mejora y optimización de la producción. Calidad e inocuidad de los alimentos. ODS 12: PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLES C.17.0.12.
Grupo de investigación	No aplica
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	Edificio: Universidad Nacional Agraria La Molina - Laboratorio de Preservación de La Madera País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: La Molina Calle: Avenida La Molina 2050 Latitud: - 12.086233 Longitud: - 76.945304
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2017 -2023
URL de disciplinas OCDE	Forestal https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#4.01.02 Papel, madera https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.05.05 Ingeniería industrial https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.11.04

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Universidad del Perú. Decana de América
FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
UNIDAD DE POSGRADO

ACTA DE SUSTENTACIÓN N°031-UPG-FII-2026

SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAGÍSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

En la ciudad de Lima del día uno del mes de octubre del año dos mil veintiséis, siendo las once horas, se instaló el Jurado Examinador para la Sustentación de la Tesis titulada: **"OPTIMIZACIÓN DEL TRATAMIENTO DE PRESERVACIÓN POR VACÍO-PRESIÓN DE POSTES AGRÍCOLAS DE MADERA DE GUAZUMA CRINITA PROVENIENTE DE PLANTACIONES FORESTALES",** presentado por el **Bach. MARTIN ARAUJO FLORES,** para optar el Grado Académico de **MAGÍSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL.**

Luego de la exposición y absueltas las preguntas del Jurado Examinador se procedió a la calificación individual y secreta, habiendo sido APROBADO con la calificación de DIECISIETE (17) MUY BUENO.

El Jurado recomienda que la Facultad acuerde el otorgamiento del Grado Académico de **MAGÍSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL al Bach. MARTIN ARAUJO FLORES.**

En señal de conformidad, siendo las 12:30 **horas** se suscribe la presente acta en cuatro ejemplares, dándose por concluido el acto.

DR. JULIO ALEJANDRO SALAS BACALLA
Presidente

DR. JORGE LUIS INCHE MITMA
Miembro

DR. OLIVIO NINO CASTRO MANDUJANO
Miembro

MG. JORGE JOSÉ ESPONDA VÉLIZ
Miembro

DR. OSCAR RAFAEL TINOCO GÓMEZ
Asesor

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE
SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

Anexo 1

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, **OSCAR RAFAEL TINOCO GÓMEZ** en mi condición de asesor(a) acreditado(a) mediante **DICTAMEN N°004-UPG-FII-2015** de la tesis, cuyo título es: **"OPTIMIZACIÓN DEL TRATAMIENTO DE PRESERVACIÓN POR VACÍO-PRESIÓN DE POSTES AGRÍCOLAS DE MADERA DE GUAZUMA CRINITA PROVENIENTE DE PLANTACIONES FORESTALES",** presentado por el(la) bachiller **MARTIN ARAUJO FLORES** para optar el grado académico de **MAGÍSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**, **CERTIFICO** que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 14**%** de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional.**

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del grado académico de **MAGÍSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL.**

Lima, 27 de octubre de 2026

UNMSM
Firmado digitalmente por TINOCO GOMEZ Oscar Rafael FAU 20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 03.11.2026 20:26:59 -05:00

Firma del Asesor

Nombres y Apellidos del asesor: **OSCAR RAFAEL TINOCO GÓMEZ**

DNI: **O8606920**

La vigencia del presente certificado corresponde a un período de noventa (90) días desde la fecha de su emisión; siempre que no haya observaciones en el texto durante el proceso de revisión por el jurado informante o surja alguna contingencia.

DEDICATORIA

A mis padres, Héctor Jesús y Nelly Lucía, y a mis dos hermosos hijos, Adrián y Alexandra.

AGRADECIMIENTO

Un profundo agradecimiento a todos aquellos que contribuyeron en el desarrollo, ejecución y culminación de la presente tesis, en primer lugar a Dios, y en especial a Felipe Koechlin, Álvaro Koechlin y Godfried Van Der Horst, por su valioso apoyo desde Reforestadora Amazónica SA y Maquiwood SAC, a mi padre, Héctor Jesús Araujo Rodríguez, a mi hermano Héctor y al Dr. Óscar Rafael Tinoco Gómez, mi asesor.

INDICE GENERAL

RESUMEN ix

ABSTRACT xii

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN 1

1.1. Situación problemática 1

1.2. Formulación del problema..... 4

1.2.1. Problema General 4

1.2.2. Problemas Específicos 4

1.3. Justificación de la investigación 5

1.3.1. Justificación teórica 5

1.3.2. Justificación práctica 6

1.3.3. Justificación metodológica 7

1.4. Objetivos de la investigación 8

1.4.1. Objetivo General 8

1.4.2. Objetivos Específicos 9

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO 10

2.1. Antecedentes 10

2.2. Bases teóricas 12

2.3. Glosario 32

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA 34

3.1. Hipótesis general 34

3.2. Hipótesis específicas 34

3.3. Identificación de variables 35

3.4. Operacionalización 36

3.5. Matriz de consistencia 37

3.6. Tipo y diseño de investigación 39

3.7. Unidad de análisis 40

3.8. Población de estudio ……. 40
3.9. Tamaño de muestra …….. 41
3.10. Selección de la muestra …… 41
3.11. Técnicas de recolección de datos ……... 41
3.12. Método ……. 43
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN ……... 70
CONCLUSIONES ……..… 100
RECOMENDACIONES ……... 102

INDICE DE TABLAS

Tabla 01. Composición química de los preservadores cobre-cromo-arsénico (CCA) según proporción de óxidos activos expresados en porcentaje ….....…… 15
Tabla 02. Operacionalización de variables ……..…… 36
Tabla 03. Matriz de consistencia para los objetivos de la investigación ……... 38
Tabla 04. Técnicas e instrumentos para la recolección de datos ……. 42
Tabla 05. Matriz de arreglo ortogonal L_8 (2^7) 43
Tabla 06. Niveles de las variables independientes …… 44
Tabla 07. Niveles de las variables independientes, según el arreglo $L_8(2^7)$ para los tratamientos de preservación ..…… 45
Tabla 08. Matriz codificada del Diseño Hexagonal…… 46
Tabla 09. Matriz de X para el modelo matemático…… 49
Tabla 10. Coeficientes codificados. Matriz B = $(X^TX)^{-1}X^TY$……..…..… 49
Tabla 11. Programa de secado moderado ……. 56
Tabla 12. Características de preservación de la madera de bolaina blanca, de acuerdo al diseño experimental $L_{8(}2^7$) ……..… 71
Tabla 13. Efectos de las variables independientes en los resultados de los tratamientos de preservación, de acuerdo al diseño experimental $L_{8(}2^7$) …… 72
Tabla 14. Análisis de varianza de los resultados de retención bajo el diseño ortogonal $L_8(2^7)$ ……. 75
Tabla 15. Prueba de Tukey para los resultados de retención bajo el diseño ortogonal $L_8(2^7)$ …….. 77
Tabla 16. Matriz codificada según el diseño hexagonal …… 79
Tabla 17. Niveles de las variables independientes, según el diseño rotable hexagonal para los experimentos de preservación ……. 79
Tabla 18. Indicadores de evaluación de los experimentos de preservación, de acuerdo al diseño hexagonal ……..….. 80
Tabla 19. Análisis de varianza de los resultados de retención bajo el diseño hexagonal ……..…….. 81

Tabla 20. Prueba de Tukey para los resultados de retención bajo el diseño hexagonal……. …….. 82
Tabla 21. Matriz transpuesta de x: X^T …….. 84
Tabla 22. Producto de la matriz transpuesta de X por la matriz de X: X^TX ……... 84
Tabla 23. Inversa del producto de la matriz transpuesta de X por la matriz de X: $(X^tX)^{-1}$ ……. 85
Tabla 24. Producto de la matriz transpuesta de X por la matriz de Y: X^TY ……..…… 85
Tabla 25. Producto de la inversa del producto de la transpuesta de X por la matriz de X por el producto de la transpuesta de X por la matriz de Y: $(X^tX)^{-1}X^tY$ …….. 86
Tabla 26. Coeficientes de la ecuación natural ……..…….. 86
Tabla 27. Prueba de significancia para los coeficientes codificados …. 88
Tabla 28. Comparación de datos experimentales y datos obtenidos mediante la ecuación cuadrática de Yest …… 89
Tabla 29. Prueba F-Fisher de evaluación del ajuste del modelo matemático a los resultados experimentales ……. 90
Tabla 30. Valores de retención (kg/m^3) obtenidos con el modelo matemático entre los niveles ensayados de Concentración de solución (%) y Presión de trabajo (PSI) …….. 91
Tabla 31. Variables optimizadas por el modelo matemático, para una retención mínima de 6,4 kg/m^3, en uso agrícola …… 93
Tabla 32. Costo de solución preservante absorbida por carga de madera tratada en autoclave industrial …….. 96
Tabla 33. Costo de consumo eléctrico de la bomba de presión por carga de madera preservada …… 97
Tabla 34. Suma de costos variables de los tratamientos de preservación en autoclave industrial …….. 98

INDICE DE FIGURAS

Figura 01. Cortes de muestras de madera para la determinación del contenido de humedad……... 56
Figura 02. Medición del contenido de humedad…… 59
Figura 03. Medición del diámetro en el extremo de una pieza de madera, con el empleo de un calibrador electrónico…… 61
Figura 04. Sellado de un extremo de una pieza de madera, empleando cera parafina…… 61
Figura 05. Obtención del peso de pieza de madera en balanza digital. 62
Figura 06. Introducción de una carga de madera a la autoclave de preservación…… 63
Figura 07. Equipo de preservación de maderas…… 64
Figura 08. Etapas del proceso de preservación…….. 65
Figura 09. Ensayo de penetración de preservante en piezas de madera, con el uso de reactivo de coloración Cromo Azurol S……. 68
Figura 10. Determinación del área penetrada en porcentaje en pieza de madera preservada……... 68
Figura 11. Agrupamiento de tratamientos del diseño ortogonal $L_8(2^7)$, de acuerdo a sus similitudes estadísticas …….. 78
Figura 12. Agrupamiento de tratamientos del diseño hexagonal, de acuerdo a sus similitudes estadísticas …… 83
Figura 13. Representación tridimensional del modelo matemático …… 90
Figura 14. Gráfico tridimensional del modelo matemático para retención de preservante…….. 92

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Penetración de preservante en porcentaje (%) por tratamiento de preservación …… 110
Anexo 2. Procesamiento de resultados de los tratamientos de preservación …….…….. 131
Anexo 3. Tabla de concentraciones de solución preservante Arsenal CCA-C 60%..... 140
Anexo 4. Cotización de preservantes CCA …… 141

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo optimizar el tratamiento de preservación de postes agrícolas de madera de bolaina blanca mediante impregnación en autoclave con sales Cupro-Cromo Arsenicales (CCA). Para ello, se identificaron siete variables independientes que influyen en los resultados de preservación, a partir de las cuales se diseñó un experimento con arreglo ortogonal L8(2^7). Este diseño permitió determinar que la concentración de la solución preservante y la presión de trabajo son las variables más influyentes sobre la retención de preservante en la madera.

Posteriormente, se aplicó un diseño rotable hexagonal considerando dichas variables como factores principales, mientras que las de menor significancia se mantuvieron en su menor nivel. Este enfoque posibilitó la elaboración de un modelo matemático cuadrático para estimar la retención de preservante en la madera, cuyos coeficientes lineales resultaron estadísticamente significativos. La representación gráfica del modelo mostró una superficie de respuesta ligeramente plana, consistente con la baja influencia de los términos cuadráticos e interactivos.

El análisis económico evidenció que el costo del preservante absorbido constituye el principal componente de los costos variables. Asimismo, se observó que al incrementar la concentración de la solución preservante disminuye la cantidad absorbida necesaria para la impregnación, lo que permite optimizar insumos sin comprometer el cumplimiento normativo exigido para aplicaciones agrícolas.

La combinación óptima de los parámetros se obtuvo con una presión de trabajo de 120 PSI y una concentración de 2.34 %, alcanzando una retención de 6.4 kg/m³ al menor costo operativo. De esta manera, se definieron parámetros técnicos específicos para el proceso industrial, consolidando una propuesta aplicable a escala productiva que integra eficiencia técnica, cumplimiento regulatorio y sostenibilidad económica en la preservación de postes agrícolas de madera de bolaina blanca.

Palabras clave: optimización, bolaina blanca, preservación de maderas, experimentos ortogonales.

ABSTRACT

The present study aimed to optimize the preservation treatment of agricultural posts made of bolaina blanca wood through autoclave impregnation with Cupro-Chromium Arsenical (CCA) salts. Seven independent variables influencing preservation outcomes were identified, from which an orthogonal array experiment L8(2^7) was designed. This design allowed the determination that preservative solution concentration and working pressure are the most influential variables on preservative retention in the wood.

Subsequently, a rotatable hexagonal design was applied, considering these variables as the main factors, while those of lesser significance were kept at their lowest level. This approach enabled the development of a quadratic mathematical model to estimate preservative retention in the wood, whose linear coefficients proved statistically significant. The graphical representation of the model revealed a slightly flat response surface, consistent with the low influence of quadratic and interactive terms.

The economic analysis showed that the cost of absorbed preservative constitutes the main component of variable costs. It was also observed that increasing the concentration of the preservative solution reduces the amount absorbed required for impregnation, allowing input optimization without compromising regulatory compliance demanded for agricultural applications.

The optimal combination of parameters was obtained with a working pressure of 120 PSI and a concentration of 2.34%, achieving a retention of 6.4 kg/m³ at the lowest operating cost. In this way, specific technical parameters for the industrial process were defined, consolidating a proposal applicable at the production scale that integrates technical efficiency, regulatory compliance, and economic sustainability in the preservation of agricultural posts made of bolaina blanca wood.

Keywords: optimization, *bolaina blanca*, wood preservation, orthogonal experiments.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Situación problemática

En la actualidad, en el Perú se presenta una situación que representa una gran oportunidad para el desarrollo de la actividad forestal, a través de las plantaciones forestales. El Estado Peruano ha generado el marco legal y normativo para incentivar la inversión privada para el establecimiento de plantaciones forestales en tierras de propiedad privada con la finalidad de crear condiciones para la inversión y el desarrollo de la industria forestal, a través del DS No 017-2014-MINAGRI, Decreto supremo que aprueba el régimen de promoción de plantaciones forestales en tierras de propiedad privada.

De acuerdo con el Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR) (2019), las tierras aptas para reforestación tienen una superficie de 10500000 ha, y la reforestación acumulada nacional para el año 2018 fue de 1073917,41 ha. Asimismo, SERFOR (2020, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025, 2026), indica que, la reforestación acumulada entre los años 2019 y 2025 fue de 71105.56 ha. Estas cifras indican que queda aún, cerca del 7,28% del territorio nacional con aptitud para la reforestación, representando una gran extensión

del territorio nacional que puede ser destinada al establecimiento de plantaciones forestales que impulsen el desarrollo de la industria forestal nacional.

De acuerdo con el Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana (IIAP) (2009), la producción de bolaina blanca rolliza (en trozas) y aserrada se ha incrementado en el departamento de Ucayali, siendo los principales demandantes los reaserraderos de Pucallpa y Lima, utilizándose en forma creciente en la construcción de viviendas populares, embalajes, muebles y molduras.

Asimismo, existen iniciativas privadas para el establecimiento de plantaciones forestales con fines industriales que están aprovechando las áreas degradadas, principalmente en selva central.

El sistema empleado para el establecimiento de plantaciones forestales implica una inversión inicial alta y un tiempo de espera hasta la cosecha, que dependerá de la velocidad de crecimiento y el periodo de madurez de la especie plantada. *Guazuma crinita* (Bolaina blanca) es una de las especies más utilizadas en el establecimiento de plantaciones forestales, debido a su rápido crecimiento, y a que por sus características es muy utilizada en construcciones, acabados interiores y carpintería, principalmente.

De acuerdo a las experiencias de Revilla-Chávez et al (2022), en el estudio de valoración económica de plantaciones de Bolaina en Ucayali, las plantaciones de Bolaina blanca inician con una densidad aproximada de 1600 plantas/ha, con un distanciamiento entre plantas de 2,5 x 2,5 m. Para favorecer el incremento diamétrico, se aplican raleos progresivos que conducirán a una densidad arbórea reducida al 50%.

La madera proveniente de las actividades de raleo es poco utilizada si no alcanza diámetros comerciales. Esto representa una oportunidad para desarrollar productos a partir de la madera de raleo, que generen mayor rentabilidad a la actividad forestal.

Uno de los productos que se puede obtener de la madera de raleo son los tutores para agricultura, que se sustenta en la gran demanda en cultivos como la vid y la granadilla para agro-exportación.

De acuerdo con Junac (1988), una de las características de la Bolaina blanca es su susceptibilidad al ataque de hongos e insectos xilófagos, desvalorizando así los productos a obtener de esta especie y limitando su comercialización en mercados nacionales y extranjeros.

Dadas las condiciones de servicio de los tutores de madera, estos se encuentran clasificados dentro de la categoría de uso UC4 de la Asociación Americana de Protección de la Madera (AWPA) (2026b), productos de madera a la intemperie en contacto directo con el suelo (madera empotrada), lo cual implica un alto riesgo de deterioro de la madera a causa de hongos de pudrición y de insectos xilófagos.

La solución técnica a esta problemática se encuentra en los diferentes tratamientos preservadores que se aplican a la madera, a través de la formación de un anillo impregnado con sustancias preservantes que aseguren una adecuada protección contra la acción de organismos biológicos destructores. En el caso específico de la madera de bolaina blanca, no se han generado estudios previos de aplicación industrial que permitan preservar adecuadamente a la madera, alcanzando una retención tóxica suficiente y penetración uniforme.

Para el tratamiento de la madera de bolaina se requiere del estudio de su comportamiento bajo técnicas de impregnación y el desarrollo de procedimientos optimizados que permitan obtener el mayor rendimiento económico de esta actividad.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. *Problema General*

Concretando el interés del estudio, se plantea responder a la siguiente pregunta:

¿Cómo preservar postes agrícolas de madera de *Guazuma crinita* (Bolaina blanca), proveniente de plantaciones forestales, mediante el tratamiento de vacío-presión para su uso como postes agrícolas, de manera óptima?

1.2.2. *Problemas Específicos*

Se han identificado los siguientes problemas específicos:

1.2.2.1 ¿Qué variables influyen directa e indirectamente en los resultados de los tratamientos de preservación por vacío-presión de postes agrícolas de madera de *Guazuma crinita* (Bolaina blanca)?

1.2.2.2 ¿Cómo definir un modelo matemático de segundo orden, empleando las variables de mayor significancia, que describa el proceso óptimo de preservación por vacío-presión de postes agrícolas?

1.3. Justificación de la investigación

Actualmente, surge la necesidad de realizar estudios que revelen la aptitud de las especies nacionales para su utilización en el sector agrario y sus condiciones de tratamiento para un adecuado empleo.

La optimización del proceso de preservación de tutores de madera de *Guazuma crinita* (Bolaina blanca), de manera tal que se alcance el grado de preservación necesario para su puesta en servicio haciendo esta actividad económicamente viable, contribuirá en la mejora del desempeño y aceptación de la industria nacional de preservación de maderas tropicales en la producción de tutores de madera, y permitirá incrementar el uso de la madera de Bolaina blanca proveniente de plantaciones.

1.3.1 Justificación teórica

La bolaina blanca (*Guazuma crinita*) es una especie forestal nativa de la Amazonía peruana, valorada por su rápido crecimiento, facilidad de manejo y notable capacidad de adaptación a suelos degradados. Estas características la convierten en una alternativa atractiva para el desarrollo forestal sostenible. Sin embargo, su madera presenta una baja durabilidad natural frente al ataque de

agentes biológicos como hongos causantes de pudrición e insectos xilófagos, lo que limita su uso prolongado como tutor en el campo agrícola.

A pesar de esta limitación, la aplicación adecuada de técnicas de preservación industrial permite extender significativamente la vida útil de los productos elaborados con bolaina blanca, incluso en condiciones de alto riesgo de deterioro. Este es el caso de los tutores agrícolas, que permanecen expuestos a la intemperie y en contacto directo con el suelo y la humedad, donde una protección eficaz puede garantizar varios años adicionales de servicio.

En este contexto, la implementación de modelos de optimización, como los diseños experimentales ortogonales y los diseños rotables, ofrece configuraciones metodológicas robustas y accesibles para mejorar los procesos productivos. Estos modelos, combinados con un análisis de costos variables, permiten identificar las condiciones de tratamiento más adecuadas, maximizando la eficiencia técnica y económica con un uso mínimo de recursos. Así, se promueve una gestión racional de la madera de bolaina blanca, contribuyendo a la sostenibilidad del sector agrícola y forestal en el Perú.

1.3.2 Justificación Práctica

Los tutores de madera desempeñan un papel fundamental en el cultivo agronómico de especies trepadoras como la vid, el maracuyá, el pimiento o el tomate. La bolaina blanca, gracias a la baja densidad de su madera y amplia disponibilidad en los bosques amazónicos, representa una opción atractiva para este propósito. Sin embargo, su limitada vida útil genera costos recurrentes de reposición y contribuye a la generación de residuos forestales.

La optimización del proceso de preservación de tutores elaborados con bolaina blanca permite fomentar un uso más eficiente de los recursos forestales, reduciendo la presión sobre otras especies maderables de mayor valor ecológico en los bosques del Perú. Al mejorar la durabilidad de la madera mediante tratamientos de preservación adecuados, se disminuyen significativamente los costos operativos asociados a su reemplazo.

Además, la aplicación racional de los insumos requeridos para el tratamiento de preservación a escala industrial garantiza una protección eficaz de la madera al menor costo posible. Este enfoque también contribuye a minimizar los riesgos ambientales, al evitar la lixiviación de productos químicos en tutores con niveles excesivos de impregnación, promoviendo así prácticas sostenibles en el manejo de los recursos forestales.

1.3.3 Justificación Metodológica

La presente investigación tiene como objetivo optimizar, desde una perspectiva técnica y económica, el proceso de preservación de la madera de bolaina blanca destinada al uso de tutores agrícolas. Para lograr ello, se ha adoptado una metodología basada en el diseño experimental mediante arreglos ortogonales, con el propósito de identificar las variables del proceso que ejercen mayor influencia en los resultados.

El uso de arreglos ortogonales constituye una herramienta robusta en el diseño de experimentos, ya que posibilita la evaluación simultánea de múltiples factores y niveles con un número reducido de ensayos, logrando minimizar la variabilidad experimental e identificar con precisión los parámetros críticos del proceso.

Esta etapa se complementa con la formulación de una función objetivo, construida mediante cálculo matricial a partir de los datos obtenidos de un diseño experimental rotable, útil para estimar modelos matemáticos de segundo orden. Dicha función permite establecer la relación entre las variables más significativas y los resultados del tratamiento de preservación. A su vez, se incorpora un análisis de costos variables que contribuye a determinar la opción más rentable.

Este enfoque metodológico permite identificar no solo el tratamiento más eficaz desde el punto de vista técnico, sino también el más conveniente económicamente, asegurando su viabilidad práctica, garantizando que los hallazgos sean replicables, útiles y pertinentes para el contexto agrícola peruano.

1.4. Objetivos de la investigación

1.4.1. *Objetivo General*

Optimizar el tratamiento de preservación por vacío-presión de postes agrícolas de madera de *Guazuma crinita* (Bolaina blanca), proveniente de plantaciones forestales

1.4.2. *Objetivos Específicos*

- Analizar los factores que influyen directa e indirectamente en los resultados de los tratamientos de preservación por vacío-presión.

- Analizar las variables de mayor significancia que describan el proceso óptimo de preservación por vacío-presión mediante un modelo matemático de segundo orden.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Autores como Valdivieso (2000), Proyecto Perú Biodiverso (2009), Amaya (2009), Martel y Albán (2011), concuerdan en indicar que los cultivos agrícolas de tipo enredadera como maracuyá y sacha inchi requieren del uso de tutores de Madera para su propagación para cada planta, con un distanciamiento de 3 x 3 m. Por otro lado, MINAG (2008) en su informe de registro de productores de uva, indica que para el año 2008 se tenía una superficie cultivada de 61315 ha de vid a nivel nacional. Esta información sustenta una gran demanda por el uso de tutores de madera para agricultura.

Dourojeanni (2002), hace un análisis de las posibilidades de uso de manera sostenible de la madera de barbechos existentes en la amazonía peruana a causa de la agricultura migratoria, indicando que dentro de los múltiples usos que se le puede dar a la madera de *Guazuma crinita* destaca la madera aserrada para construcción, postes, tutores y madera para cajonería.

Cáceres (2008), menciona que en la industria nacional esta especie se usa como madera redonda, para la fabricación de viviendas,

kioscos, casetas, entre otras construcciones. En carpintería se usa como cajonería, laminado, juguetería, palos de fósforo, paletas de consultorios médicos, palitos de helados, entre otros pequeños productos. También se utiliza en pulpa para papel y su corteza sirve para ataduras diversas. Por otra parte, Valdivia y Sotelo (1993) realizaron estudios sobre la "posibilidad de uso de madera rolliza de Bolaina blanca como material estructural en construcciones de madera", evaluaron su resistencia en flexión en vigas, compresión paralela en columnas cortas y corte paralelo en probetas de cizallamiento. Los resultados indican que la especie cumple con los requisitos para uso estructural en vigas y columnas cortas, teniendo como factor limitante el bajo esfuerzo de corte.

Rochon et al (2007), indican en su estudio de crecimiento de *Guazuma crinita* en la amazonía peruana, que los árboles de esta especie maduran entre los 6 a 10 años de edad, pero que la demanda por madera hace que los extractores cosechen la madera a edades más tempranas. En cuanto a los motivos de su utilización, indican que es una especie muy empleada en sistemas agroforestales familiares.

De acuerdo a los estudios realizados por Aguilar (2019) en madera de raleo de plantaciones de bolaina blanca de 6 años en la zona de Maquizapallo, Provincia de Puerto Inca, Huánuco, la madera posee bajas propiedades, y sus valores de resistencia son más bajos que la madera de bosque natural, y no son aún adecuadas para la producción de madera aserrada, por lo que recomienda su uso para la producción de tableros, pulpa para papel y la elaboración de pequeños artículos de madera.

JUNAC (1983) indica que la madera de *Guazuma crinita* posee una moderada resistencia al ataque de organismos biológicos y presenta dificultades moderadas en el tratamiento preservador.

2.2. Bases teóricas

2.2.1 *Tratamiento de preservación para madera*

González (1986), indica que entre los tratamientos más usados para la preservación de madera se pueden mencionar al tratamiento de Inmersión, baño caliente y frío, a los tratamientos por difusión, y a los tratamientos que aplican presión en autoclave.

JUNAC (1988), menciona que los tratamientos de preservación por vacío-presión se adaptan mejor a la producción comercial en gran escala de madera tratada. Además, con ellos se puede obtener madera protegida con cantidades suficientes de preservante y penetración profunda, cuando las maderas que prestan servicio a la intemperie y están más expuestas al deterioro lo requieren.

INACAL (2018a), indica que, entre los tratamientos que consisten en impregnar preservante en la madera aplicando presión al interior de una autoclave, destaca el tratamiento de célula llena, por el cual se trata de retener en la madera la mayor cantidad de preservante que se ha introducido durante el periodo de presión.

JUNAC (1988), menciona que, mediante el método de célula llena o de vacío-presión en autoclave, se procura inyectar a la madera la mayor cantidad de líquido preservante posible, dejando la máxima concentración del producto químico en la zona tratada. Con la bomba de presión, se comprime la solución en la autoclave utilizando presiones de 8 a 14 kg/cm^2.

INACAL (2018a), y AWPA (2026a), afirman que el tratamiento por Vacío-presión ó de célula llena consta de las siguientes etapas:

- Vacío inicial: Introducida la madera en la autoclave, se realizará un vacío inicial de aproximadamente 600 mm de mercurio, por un periodo de 60 minutos.

- Llenado de la autoclave: a continuación, la madera se inunda con el preservador, tan rápido como sea posible, manteniendo en acción la bomba de vacío hasta que la autoclave quede completamente lleno y se produzca una compensación de la presión al quitar el vacío.

- Periodo de Presión: Con la bomba de presión, se comprime la solución en la autoclave y se va midiendo la cantidad de preservador que va entrando en la madera por absorción de los niveles del tanque medidor. La presión se mantiene constante hasta obtener la saturación de las células o hasta que se produzca el rechazo virtual de las maderas, lo cual se notará en el tanque de medida al no bajar su nivel de preservador en 30 minutos. Terminado el proceso de impregnación, se devuelve el preservador al tanque de trabajo o almacenamiento por el accionar de una bomba o por descenso propio.

- Vacío final: Puede hacerse un vacío final de 600 mmHg aproximadamente y de corta duración, el cual tiene por objetivo evitar que se escurra el exceso de preservador al abrir la puerta de la autoclave para retirar la madera tratada.

JUNAC (1988), señala que, como las sales humedecen la madera, es necesario dejar un periodo de tiempo de oreado de entre 4 a 6 semanas para que la madera se seque y el preservante se fije mejor en ella. Después del proceso, es conveniente almacenar la madera preservada bajo sombra hasta alcanzar un contenido de humedad de 25% aproximadamente.

2.2.2 *Preservantes para madera*

JUNAC (1988), indica que las principales características que un preservante debe tener son la toxicidad, penetrabilidad y permanencia, principalmente. Asimismo, afirma que los preservantes varían en naturaleza, eficacia y costo; por eso, en su elección se debe tener en cuenta el uso al que se va a destinar la madera preservada, la vida útil que se requiere de ella y los aspectos económicos del tratamiento.

También menciona, que los productos inorgánicos solubles en agua, tales como las sales cupro-cromo-arsenicales (CCA), son muy utilizadas en el mercado mundial ya que son muy eficaces en la protección de la madera en contacto directo con el suelo y bajo las condiciones más desfavorables como el agua de mar. Las sales inorgánicas tienen en su composición elementos fungicidas que contienen cobre, insecticidas que contienen arsénico, y fijadores como los cromatos alcalinos.

JUNAC (1988), menciona que para tener una base de comparación entre los productos que presentan diferentes concentraciones de aplicación, la toxicidad de las sales se expresa como factor óxido. La retención fijada para los diferentes usos de la madera tratada se refiere siempre a las sustancias expresadas como óxidos de los insumos que componen las sales.

INACAL (2017b), AWPA (2015b) y JUNAC (1988), concuerdan en indicar que los preservadores hidrosolubles CCA para madera deben cumplir con los requisitos de composición y pureza, como se muestra a continuación en la tabla 01.

***Tabla 01*. Composición química de los preservadores cobre-cromo-arsénico (CCA) según proporción de óxidos activos expresados en porcentaje.**

Tipo de Preservador	PROPORCIÓN PORCENTUAL					
	Elemento Activo	Proporción Elemental	Óxido	Proporción en Óxidos (%)		
				Mín.	Prom.	Máx.
CCA-A	* Cobre $^{+2}$	14,46	CuO	16,0	18,1	20,9
	* Cromo $^{+6}$	34,06	CrO_3	59,4	65,5	69,3
	* Arsénico $^{+5}$	10,69	As_2O_5	14,7	16,4	19,7
CCA-B	* Cobre $^{+2}$	15,65	CuO	14,7	19,6	22,0
	* Cromo $^{+6}$	18,36	CrO_3	18,0	35,3	38,0
	* Arsénico $^{+5}$	29,40	As_2O_5	33,0	45,1	48,0
CCA-C	* Cobre $^{+2}$	14,78	CuO	17,0	18,5	21,0
	* Cromo $^{+6}$	24,70	CrO_3	44,0	47,5	50,5
	* Arsénico $^{+5}$	22,16	As_2O_5	30,0	34,0	38,0

***Fuente.* JUNAC (1988).**

2.2.3 *Condiciones generales de la madera para el tratamiento preservador*

JUNAC (1988), menciona que antes de efectuar un tratamiento preservador, es necesario distinguir si el procedimiento empleado requiere que la madera esté húmeda o seca. Al respecto, los procesos de preservación de vacío-presión requieren que la madera se encuentre en condición seca. Por ello, es necesario secar la madera hasta alcanzar una humedad adecuada para el tratamiento. Asimismo, indica que la corteza es virtualmente impermeable, por lo que debe ser eliminada antes de llevar a cabo el tratamiento preservador. En los productos aserrados, a veces existen algunos rezagos de corteza en las aristas que deben ser eliminados.

En cuanto al labrado, taladrado u otros cortes necesarios para la instalación de los elementos de madera, el mismo autor afirma que deben ser practicados antes de realizar el tratamiento preservador. Así se evita el desperdicio de la madera impregnada y la ruptura del anillo preservado.

2.2.4 *Evaluación de la madera preservada*

JUNAC (1988), indica que la evaluación del grado de protección que se da a la madera mediante la aplicación de sustancias químicas, se realiza midiendo la absorción, penetración y retención de los preservantes empleados en los procesos de impregnación.

INACAL (2017a), indica que la absorción de sales se determina de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Abs = \%C \times \frac{(P_2 - P_1) \times 100}{V}$$

Donde:

Abs: Absorción, expresada en kg/m^3

%C: Concentración del preservador expresado en porcentaje.

P_1 : Peso en kilogramos de madera antes del tratamiento.

P_2 : Peso en kilogramos de madera después del tratamiento.

V : Volumen de la madera en m^3.

INACAL (2017a) y AWPA (2015a), mencionan que, para medir la penetración de los preservadores, se utilizan procedimientos basados en reacciones de coloración sobre la superficie de las maderas sometidas a ensayo que indican claramente la presencia del preservador. También concuerdan en que la determinación de la

penetración se realiza a partir de probetas recién extraídas, secas, lisas y libres de impurezas.

Asimismo, mencionan que la penetración se determinará por reconocimiento visual o por ensayos de coloración usando reactivos apropiados, según el preservador utilizado, examinando las secciones transversales de las probetas. Con los preservadores hidrosolubles del tipo cobre-cromo-arsénico (CCA), la penetración se determinará por la presencia de los elementos cobre y arsénico en la madera. Estos ensayos se describen a continuación:

- Ensayos para cobre: Utilizando reactivos de coloración como ácido rubínico y cromo azurol. En ambos casos se pulveriza el reactivo sobre la superficie tratada de la probeta. Un color característico (Negro verdoso con el reactivo de ácido rubínico y Azul oscuro con el reactivo de cromo azurol) indica la presencia de cobre.

- Ensayos para arsénico: Utilizando el reactivo de coloración de Molibdato de amonio. Se pulveriza el reactivo sobre la superficie tratada de la probeta. Un color verde azulado característico indicará la presencia de arsénico.

INACAL (2018b), Indica que, para realizar las determinaciones de penetración y retención, es necesaria la obtención tarugos de cada uno de los especímenes evaluados, a razón de tres por cada uno; utilizando un barreno de un diámetro menor a 5 mm. El primer tarugo se toma a un décimo del largo del poste a partir de la base; se extraen los siguientes a distancias de 0.5 m y 1 m del primero. Se evita horadar sobre nudos, bolsas de resinas, grietas, hendiduras o incisiones, dirigiendo el barreno hacia la médula.

JUNAC (1988), indica que la determinación de la penetración se realiza en la parte media de cada pieza a examinar. De acuerdo a los resultados posibles, se puede tener la siguiente escala de penetración:

- Total (PT): Cuando el preservador se distribuye uniformemente en toda la sección medida de la pieza a examinar.

- Parcial regular (PR): Cuando el preservador se distribuye a través de la sección de la probeta, mostrando pequeñas lagunas de madera no preservada.

- Parcial Irregular (PI): Cuando el preservador se distribuye parcialmente sin seguir un patrón definido.

- Nula (PN): Cuando el preservador no penetra en la madera o si lo hace, no es en cantidad significativa.

Sobre la determinación de la retención, el mismo autor indica que esta se puede obtener mediante la aplicación de métodos químicos cuantitativos, espectrofotometría de absorción atómica, o espectroscopia de fluorescencia de rayos X.

2.2.5 *Factores que influyen en los resultados de los tratamientos de preservación*

JUNAC (1988), menciona que los resultados del tratamiento preservador dependen del sistema de impregnación utilizado, de las características de la madera tratada y de las características del producto químico empleado.

Según Vidal et al. (2015) las variables propias de la materia prima maderera, como su contenido de humedad, grado de permeabilidad, densidad, estructura anatómica y proporción de duramen, se consideran los principales factores que inciden directamente en la capacidad de retención de los preservantes en la madera.

Lebow (2010) señala que existen diferentes métodos para tratar la madera, pero la facilidad de tratamiento varía entre las especies, particularmente en el duramen, que generalmente resiste más el tratamiento con preservantes que en la parte de albura.

En un estudio realizado por Guedes et al. (2022), se analizaron dos genotipos de *Eucalyptus* (*E. cloeziana* y *E. camaldulensis*), y se concluyó que tanto el aumento en la concentración del preservante como un mayor tiempo de secado de la madera son factores determinantes para mejorar los niveles de retención.

Con respecto al sistema de impregnación utilizado, JUNAC (1988) menciona que los procesos que aplican presión permiten regular las condiciones del tratamiento, de modo que es posible variar la penetración y la retención del preservante para satisfacer las exigencias de utilización de la madera, haciendo más económico el uso del material.

Con respecto a las características de la madera a preservar, JUNAC (1988) y AWPA (2026a), indican que los tratamientos de vacío-presión requieren que la madera esté seca, a un contenido de humedad de 25% como máximo, para que la inyección sea profunda y el preservante pueda ser absorbido. Además, la madera debe ser descortezada, pues la corteza es impermeable e impide el ingreso de preservantes en la madera.

2.2.5.1 Efecto de la estructura de la madera.

JUNAC (1988) y Lebow (2010), concuerdan en afirmar que aquellas especies que presentan una albura de gran espesor suelen permitir una penetración profunda y uniforme de la mayoría de los preservantes, lo que contribuye significativamente a su protección a largo plazo. Por el contrario, en especies donde la albura constituye una fracción reducida del volumen total, se observa una marcada disminución en la proporción de madera tratada de manera efectiva, debido a la baja permeabilidad del duramen. A pesar de ello, la resistencia a la penetración del preservante no es uniforme entre todas las especies, ya que factores como el tipo de células, el contenido de extractivos, y la disposición anatómica de los tejidos pueden modificar sustancialmente la tratabilidad del duramen. Por lo tanto, la evaluación técnica de la estructura interna y la proporción de albura es esencial para seleccionar métodos adecuados de tratamiento y garantizar la eficacia del proceso en función de las características particulares de cada especie leñosa.

El transporte de líquidos ocurre predominantemente en dirección longitudinal, siguiendo el grano de la madera (Tarmian et al., 2020). En la mayoría de las especies de maderas duras, la penetración en sentido longitudinal es notablemente superior a la transversal. En este contexto, los elementos de vaso constituyen las principales vías de conducción del fluido. Durante el proceso de impregnación, los líquidos ingresan primero en estos vasos y posteriormente se difunden hacia las células circundantes a través de punteaduras intercelulares (Siau, 1984).

Es importante considerar los mecanismos por los cuales los líquidos preservantes se desplazan dentro de la estructura celular de la madera, ya que estos influyen directamente en la eficacia del tratamiento. Al respecto Rudman (1966), identificó dos posibles

rutas para el paso de líquidos polares entre células: una mediante las punteaduras, y otra a través de los capilares microscópicos presentes en las paredes celulares. Aunque las punteaduras pueden estar parcialmente bloqueadas, desempeñan un papel más relevante en el flujo de líquidos a mayor escala que los capilares.

Sales-Campos et al. (2003) señalan que el flujo de líquidos dentro de la madera puede verse afectado negativamente por la presencia de tilosis dentro de los vasos y la obstrucción de las punteaduras causada por extractivos naturales. Estas propiedades anatómicas específicas de los vasos son probablemente la causa de una distribución no uniforme del preservante durante el tratamiento, tal como indican Schneid et al. (2013).

De acuerdo con An (2000), la permeabilidad de las maderas blandas está fuertemente influenciada por características anatómicas específicas, como el diámetro de las aberturas de las punteaduras, la cantidad presente y el tamaño de los poros en sus membranas. Un elemento clave en este proceso son las punteaduras campo-cruzado, las cuales desempeñan un papel esencial en la penetración lateral del preservante, ya que facilitan la conexión entre las células radiales y las traqueidas longitudinales. Tanto la forma como el número y las dimensiones de estas punteaduras afectan directamente la eficiencia del tratamiento preservante. De acuerdo con Siau (1984), las membranas de las punteaduras campo-cruzado son las que reciben mayor exposición e impacto durante el tratamiento, aunque también se ha observado una buena impregnación en las punteaduras bordeadas.

En cuanto a la densidad de la madera seca con un contenido de humedad igual o inferior al 30 %, esta sirve como indicador de la cantidad de cavidades internas disponibles para alojar líquidos. Peraza (2002) destaca que una menor densidad implica una mayor

proporción de espacios libres, lo que se traduce en una mayor capacidad de absorción. Por este motivo, el proceso de secado previo a la aplicación del preservante es crucial. Lebow (2010) advierte que mientras la madera contenga agua libre, los métodos de tratamiento resultan poco efectivos, ya que esta impide la entrada del producto preservante; solo al eliminar dicha agua, la madera se vuelve apta para una impregnación adecuada.

2.2.5.2 Efecto de la humedad de la madera

Guedes et al. (2022) indican que los tratamientos de preservación industriales deben realizarse en maderas con una humedad igual o inferior al 35%, siempre y cuando no se encuentren completamente secas, ya que esto puede comprometer la efectividad del tratamiento.

Guedes et al. (2022) indican que, las piezas que presentan un contenido de humedad apenas inferior al punto de saturación de las fibras afectan negativamente la eficacia del tratamiento preservador. De acuerdo con Lebow (2010), el grado de protección en los productos forestales depende del tipo de preservante utilizado, así como de la adecuada penetración y retención de los productos químicos. Algunos preservantes son más eficaces que otros, y algunos se adaptan mejor a ciertos requerimientos de uso. Para asegurar una efectividad a largo plazo, se requiere una penetración y retención adecuadas según la especie de madera, el preservante químico y el método de tratamiento empleado.

Guedes et al. (2022) destacan que separar los lotes según el contenido de humedad y definir adecuadamente la concentración de ingredientes activos para su aplicación en autoclave son estrategias clave para mejorar la retención del preservante y,

consecuentemente, la calidad del material tratado. Este control permite optimizar el proceso, garantizando un uso más eficiente de los recursos y mejorando la durabilidad del producto final.

2.2.5.3 Efecto de la concentración del preservante

De acuerdo con Pizzi et al (1984), una de las variables que juegan un rol decisivo es la concentración de la solución preservante. Este factor no solo determina la velocidad de fijación, sino también la distribución selectiva del preservante entre los principales componentes de la pared celular, siendo necesario ajustar cuidadosamente los parámetros operativos para mejorar la durabilidad y el rendimiento funcional de la madera tratada.

Estudios realizados por Lopes et al. (2017) y Nicholas & Siau (1973) indican que, en general, un aumento en la concentración del preservante se traduce en una mayor retención del producto en la madera.

Lebow (2010) indica que la concentración del preservante constituye un factor importante para alcanzar los niveles de retención adecuados en función del destino final de la madera tratada. En general, soluciones con concentraciones más bajas permiten una mejor penetración y fijación del agente químico, especialmente cuando se emplean métodos de aplicación bajo presión. En cambio, para maderas de mayor tamaño o destinadas a condiciones más severas de exposición, es recomendable utilizar soluciones con concentraciones más elevadas junto con métodos de tratamiento a presión, a fin de asegurar tanto una adecuada penetración como una retención efectiva del preservante en el interior del sustrato leñoso.

De acuerdo con Venkatasamy y Okwara (2017), los niveles de fijación del preservante no dependen necesariamente de la concentración del preservante, sin embargo, indican que los altos niveles de concentración y retención del preservante en la madera tienden a generar niveles altos de lixiviación.

De acuerdo con Pizzi et al (1984), la interacción química entre el preservante CCA y la madera provoca un descenso inicial en el pH, el cual está condicionado por la concentración del compuesto aplicado. Esta disminución se atribuye a la fijación del cobre mediante un proceso de intercambio iónico que libera protones. Posteriormente, el pH comienza a incrementarse debido a la formación de complejos entre la lignina y los ácidos crómicos, tales como lignino-ácido crómico y lignina-cromato de cobre, mientras que también ocurre una reducción del cromo. El cobre se concentra mayoritariamente en la capa S1 de la pared celular, donde reacciona en un 80% a 90% con la lignina y en menor medida con la celulosa.

2.2.5.4 Efecto de la presión de trabajo

En estudios realizados con *Eucalyptus saligna* y *Eucalyptus cloeziana*, por Schneid et al. (2013) evidenciaron que incrementar la presión durante el proceso de impregnación conduce a una retención promedio más alta de CCA-C. Particularmente, postes sometidos a una presión de 12 kgf/cm² mostraron niveles superiores de preservante retenido. Además, la cantidad de tiempo bajo presión también influyó positivamente en la retención, con un aumento más marcado en los postes de *Eucalyptus saligna*, lo que sugiere una interacción importante entre presión y duración para optimizar el tratamiento en estas especies.

En términos generales, el incremento de la presión durante el proceso de tratamiento suele favorecer una mayor absorción de la solución preservante por parte de la madera. No obstante, esta relación no siempre es lineal ni predecible, ya que puede verse alterada por diversas propiedades del material leñoso o de la sustancia preservante utilizada (Donoso y Manríquez, 1978). Aumentar la presión contribuye a mejorar la penetración del producto, aunque este efecto tiene un límite. Por ejemplo, duplicar la presión puede llegar a incrementar entre un 150% y un 200% la penetración en dirección longitudinal. En cambio, en los planos radial y tangencial, aunque también se observa una mejora, esta es menos pronunciada (Salas, 2005).

En los tratamientos de impregnación, la presión aplicada puede variar entre aproximadamente 345 kPa y 1,723 kPa (equivalente a 50–250 psi), dependiendo principalmente del tipo de madera y su capacidad para absorber la solución preservante. Las presiones más habituales se encuentran en el rango de 862 a 1,207 kPa (125–175 psi). Es importante considerar que ciertas especies son vulnerables a presiones elevadas, especialmente si la madera se encuentra caliente al momento del tratamiento. Por esta razón, la normativa de la AWPA establece límites específicos: por ejemplo, para especies de zonas templadas como la sequoia, el pino blanco del este o la tsuga oriental, la presión no debe superar los 1,050 kPa (150 psi), mientras que en el caso del roble, se admite hasta 1,723 kPa (250 psi) (Lebow, 2010).

Por otro lado, un estudio realizado por kamdem y Chow (1999), evaluó el efecto del incremento de la presión en el tratamiento de maderas de Red Maple, Sugar Maple, Beech y Red Oak con el uso de sales CCA – Tipo C, utilizando cuatro niveles de presión. Encontraron que el incremento de la presión fue poco significativo

en el incremento de la retención de cobre, entre las presiones de 100 PSI y 400 PSI, a excepción de la madera de Beech. Además, encontraron que la resistencia a la flexión de la madera tratada con CCA se vio afectada negativamente, con una reducción en el MOE y el MOR de entre 4 y 33%, dependiendo de la especie. Un resultado similar sobre el efecto de la impregnación sobre el Módulo de ruptura y el Módulo de elasticidad, encontró Suiresz (2000) en su estudio de sobre las propiedades mecánicas de *Pinus Taeda*, en la provincia de Misiones, Argentina.

2.2.5.5 Efecto de los preservantes

La selección del preservante adecuado depende en gran medida del uso final de la madera y del nivel de exposición al que estará sometida. Cuando se trata de aplicaciones en contacto directo con el suelo o con agua, donde el riesgo de deterioro biológico es elevado, se requieren productos con gran resistencia al lixiviado y eficacia comprobada frente a diversos agentes degradadores. En condiciones menos críticas —como madera instalada por encima del nivel del suelo— pueden emplearse los mismos compuestos, pero en concentraciones reducidas. En situaciones donde la madera está parcialmente protegida de la exposición directa al clima, pueden utilizarse preservantes de menor toxicidad o durabilidad, ya que el nivel de exigencia ambiental es menor. Algunas formulaciones, por su alta susceptibilidad al lavado, solo son adecuadas para aplicaciones bajo techo o en interiores (Lebow, 2010).

Aunque existen preservantes con amplio espectro de acción que pueden funcionar en diferentes entornos, su aplicación no siempre es recomendable. Esto se debe a que, en contextos con bajo o moderado riesgo biológico, o cuando existe un contacto frecuente con personas, podrían no ser apropiados debido a su toxicidad o

efectos secundarios. Además, otros aspectos deben ser tomados en cuenta al momento de elegir un preservante: el costo del producto, la presencia de olores persistentes, el tiempo de secado en la superficie, la compatibilidad con adhesivos y la facilidad para aplicar acabados posteriores (Lebow, 2010).

La protección que proporciona un preservante no depende únicamente de su formulación química. También influyen de manera significativa el sistema de aplicación empleado, así como el nivel de penetración y la cantidad de producto retenido en la madera. Aun cuando se utilice un preservante altamente eficaz, si este no penetra adecuadamente o no alcanza los niveles mínimos requeridos, la durabilidad del tratamiento se ve comprometida. Factores como la especie de madera, la proporción de albura y duramen, la capacidad de impregnación del duramen y el contenido de humedad en el momento del tratamiento son determinantes en el resultado final (Lebow, 2010).

JUNAC (1988) indica con respecto a las características del preservante, que la viscosidad influye en la absorción y en la penetración de este en la madera. Asimismo, indica que los preservantes hidrosolubles, por ser menos viscosos que los preservantes oleosolubles, son los que se absorben en mayor cantidad y penetran de manera más rápida en la madera.

2.2.6 *Modelos de optimización de procesos*

Ayala y Pardo (1995), indican que el punto de partida básico en todo proceso de optimización es la selección y diseño de una función objetivo para la variable o criterio a optimizar, partiendo de un modelo matemático o uno físico. Mencionan también que los modelos matemáticos empíricos se emplean cuando la relación

matemática que gobierna el proceso se desconoce o es muy compleja y depende únicamente de las variables de entrada y de salida, por lo que dichos modelos no están basados en leyes físicas. Así mismo, señalan que la mejor manera de construir este tipo de modelos es a través de Diseños Experimentales.

Los mismos autores, señalan que un experimento diseñado es una prueba o serie de pruebas de experimentación activa en las cuales se inducen cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema, de manera que sea posible observar e identificar las causas de los cambios en el criterio de optimización. Ello permite evaluar simultáneamente todas las variables consideradas y la interacción entre las variables para reducir el número de experimentos a llevarse a cabo.

Box et al (1993), acerca del papel de los diseños de experimentos, mencionan que el diseño elegido debe investigar las zonas oscuras que se tienen con el conocimiento actual del problema y cuya solución se considera un avance importante. Si el diseño experimental está mal elegido, poco se podrá extraer de él por más sofisticado que sea el análisis.

Ayala y Pardo (1995), afirman que la optimización de un proceso por medio de diseños experimentales requiere del uso de una estrategia adecuada para llegar a encontrar los valores óptimos del proceso de manera segura. Asimismo, describen una estrategia que consiste en tres etapas fundamentales:

1. Screening, donde se debe identificar a aquellas variables que son significativas para el proceso a partir de una lista preliminar, lo cual es conveniente porque permite reducir el número de pruebas experimentales en las etapas posteriores. Generalmente se emplean para esta etapa, diseños de primer orden como Factorial,

Factorial fraccionado, Ortogonales, Plackett y Burman, entre otros.

2. Escalamiento, la cual se realiza cuando la región óptima se encuentra lejos de los resultados iniciales, por lo que se debe escalar sucesivamente hacia la región óptima. Para ello son más apropiados los diseños secuenciales como Simplex Serch. Cuando, en base a la experiencia del investigador, se conoce aproximadamente la región donde se encuentra el óptimo, la etapa de escalamiento se puede obviar, para pasar directamente a la optimización final.

3. Optimización final, donde se emplean las variables de mayor significancia, definiéndose un modelo matemático de segundo orden que pueda describir el óptimo del proceso en una superficie de respuesta. Los diseños experimentales más apropiados para estos casos son los Diseños Rotables y los Diseños compuestos. Finalmente, se encontrarán los valores óptimos del proceso a partir de un análisis de Máximos y Mínimos.

2.2.7 *Arreglos ortogonales.*

Cevallos (1999), menciona que el Dr. Genichi Taguchi desarrolló métodos de ingeniería de la calidad que permiten lograr mejoras de la calidad desde el punto de vista del consumidor. Entre ellos, destacan los arreglos ortogonales. Estos son diseños de experimentos construidos para permitir una matemática evaluación independiente de los efectos de cada factor sobre los resultados obtenidos. Además, indica que estos tipos de diseños de experimentos fraccionales son usados para evaluar el efecto de los factores con respecto a la robustez.

El mismo autor indica además que los arreglos ortogonales son un conjunto especial de cuadrados latinos, construidos por Taguchi para planear los experimentos del diseño del producto. El propósito que se tiene en el diseño del producto es encontrar aquella combinación de factores que nos proporcione el desempeño más estable y confiable al precio de manufactura más bajo.

Asimismo, menciona que el análisis del arreglo ortogonal es usado para producir los mejores parámetros para el diseño óptimo del proceso, con el mínimo número de experimentos. Los resultados obtenidos para los arreglos ortogonales son analizados para obtener los siguientes objetivos:

A) Estimar la contribución de los factores individuales que influyen en la calidad en la etapa del diseño del producto.

B) Ganar la mejor condición para un proceso o un producto, así que las características en una buena calidad puedan ser sostenidas.

2.2.8 *Diseños rotables*

Ayala y Pardo (1995), mencionan que un diseño experimental rotable tiene igual facultad de predicción en todas las direcciones a partir de un punto experimental central y donde otros puntos experimentales están a una distancia constante del punto central. El diseño permanece inalterado si este es rotado a un ángulo arbitrario tomando al punto central como eje de rotación, lo cual es muy útil cuando las unidades de las variables controlables están dadas en escala natural, dado que los cambios en la magnitud de estas unidades cambiarán la localización de los puntos experimentales a una distancia constante del origen.

Así mismo, indican que el diseño rotable hexagonal es el más utilizado por los investigadores, muy útil para estimar modelos de segundo orden, consistente en seis puntos experimentales correspondientes a un hexágono regular, más los puntos necesarios replicados en el centro para estimar la varianza del error experimental.

Acerca de la estimación de los modelos matemáticos de segundo orden que se ajusten al diseño experimental, los mismos autores, mencionan que pueden ser estimados por varios métodos, entre los cuales menciona a las técnicas de regresión múltiple por mínimos cuadrados, tanto en forma de ecuaciones normales, forma matricial y el método de correlación múltiple, técnicas de búsqueda directa (Nelder y Mead), polinomios de Chevyshev, entre otros. El método matricial es el más recomendado, desde el punto de vista de la facilidad para poder programar computadoras.

2.2.9 *Superficies de respuesta*

Box et al (1993), mencionan que la metodología de la superficie de respuesta es un grupo de técnicas utilizadas en los estudios empíricos de las relaciones entre una o varias respuestas. Estas técnicas se han utilizado para contestar a preguntas referentes a la influencia de las variables en respuestas de interés, niveles de las variables que permitan satisfacer especificaciones deseadas, valores de las variables de control conducentes al máximo en una respuesta, entre otras.

Ayala y Pardo (1995), definen una Superficie de respuesta como la representación geométrica del modelo matemático obtenido. Asimismo, señalan que un modelo nunca representa completamente

a un proceso, debido principalmente a la omisión de cierto número de variables, conocimiento inexacto de dichas variables y a la simplificación necesaria del modelo debido a las complejidades matemáticas, por lo tanto, con la superficie de respuesta predicha solo podremos aproximarnos a los valores reales.

2.3. Glosario

A continuación, se presentan definiciones de términos básicos empleados en el presente trabajo.

Absorción. Es la cantidad total de preservante absorbida por la madera luego de haber realizado el tratamiento preservador.

Factor óxido. Es la sumatoria de los pesos porcentuales de cada componente, expresados como óxidos ya que son estos los que determinan la actividad tóxica de la sal.

Incisiones. Son perforaciones de forma variada que se hacen en las superficies de maderas difíciles de preservar, con el objetivo de incrementar la penetración en la madera.

Penetración. Es la profundidad que alcanza el preservante en la madera tratada. Cuanto más profunda sea la zona penetrada por el preservante, mejor será la protección de la madera.

Preservante. Es una sustancia que, adecuadamente aplicada, es capaz de prevenir o contrarrestar durante un cierto periodo de tiempo

la acción de uno o de varios organismos capaces de destruir o deteriorar a la madera.

Retención. Es la cantidad de óxidos del preservante que ha quedado en la madera después del tratamiento preservador. Es equivalente a la absorción y se expresa en kilos de óxidos del preservante por metro cúbico de madera tratada.

Tutor o poste agrícola. Elemento de madera, de forma cónica o cilíndrica que se utiliza en el campo agrícola para la guía o soporte de la parte aérea de un cultivo.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. Hipótesis general

La optimización del tratamiento preservador por vacío-presión de postes agrícolas de madera de *Guazuma crinita* (Bolaina blanca) permitirá alcanzar el grado mínimo de preservación aceptable para su uso.

3.2. Hipótesis específicas

- Los resultados del tratamiento preservador de postes agrícolas de madera de *Guazuma crinita* (Bolaina blanca) se explican significativamente por las variables de magnitud de Presión de trabajo y el contenido de humedad de la madera.

- El modelo matemático de segundo orden elaborado con las variables de mayor significancia describe el proceso óptimo para los resultados de los tratamientos de preservación de postes agrícolas de madera de *Guazuma crinita* (Bolaina blanca).

3.3. Identificación de variables

3.3.1 *Variables dependientes*

Las variables dependientes son los resultados de los tratamientos preservadores, que se expresan como la penetración y la retención del preservante en la madera “Bolaina blanca” empleada en la elaboración de postes agrícolas.

3.3.2 *Variables independientes*

Las variables independientes que influyen en el grado de preservación de la madera de “Bolaina blanca” son aquellas que rigen el proceso de preservación de vacío-presión, siendo identificadas como de mayor importancia las siguientes:

- Contenido de humedad de la madera
- Concentración de la solución preservadora
- Periodo de vacío inicial
- Magnitud de vacío de trabajo
- Magnitud de la presión de trabajo
- Periodo de presión aplicada
- Periodo de vacío final aplicado

3.4. Operacionalización

A continuación, en la tabla 02 se presenta la operacionalización de las variables.

***Tabla 02*. Operacionalización de variables**

Variables	**Definición conceptual**	**Definición operacional**
Contenido de humedad de la madera	Cantidad de agua contenida en la madera en relación a su masa seca, expresada en porcentaje.	Mediante el uso de un xilohigrómetro eléctrico de clavos aislados, los cuales penetran en la madera.
Concentración de la solución preservadora	Propiedad física de la solución preservante medida por la relación entre la masa de preservante diluido y el volumen de la solución.	Mediante el uso de un densímetro para soluciones acuosas, el cual se sumerge en una muestra de esta, para determinar la concentración, de acuerdo a la tabla de concentraciones del fabricante.
Periodo de vacío inicial	Tiempo durante el cual se generará un vacío de trabajo al interior de la autoclave para extraer el aire de la madera al inicio del tratamiento.	Mediante el uso de un vacuómetro, se verificará la magnitud de vacío de trabajo y se contabilizará el tiempo transcurrido en su generación.
Magnitud de vacío de trabajo	Presión negativa o vacío generado en el interior de la autoclave a una magnitud establecida.	Mediante el uso de un vacuómetro analógico, se verificará la magnitud de vacío de trabajo.

Magnitud de la presión de trabajo	Presión positiva de trabajo generada al interior de la autoclave a una magnitud establecida.	Mediante el uso de un manómetro analógico, se verificará la magnitud de la presión de trabajo.
Periodo de presión aplicada	Tiempo durante el cual se generará presión en el interior de la autoclave, con el objetivo de impregnar a la madera con solución preservante.	Mediante el uso de un manómetro analógico, se verificará la magnitud de la presión de trabajo y se contabilizará el tiempo transcurrido en su generación.
Periodo de vacío final aplicado	Tiempo durante el cual se generará un vacío al interior de la autoclave al finalizar el tratamiento.	Mediante el uso de un vacuómetro, se verificará la magnitud de vacío de trabajo y se contabilizará el tiempo transcurrido en su generación.

Fuente. **Elaboración propia**

3.5. Matriz de consistencia

A continuación, se presenta en un esquema la matriz de consistencia del presente estudio en la tabla 03.

Tabla 03. **Matriz de consistencia para los objetivos de la investigación**

Formulación del problema	**Objetivo**	**Formulación de la hipótesis**	**Variables Dependientes**	**Técnicas de colección de datos**
¿Cómo preservar postes agrícolas de madera de *Guazuma crinita* (Bolaina blanca), proveniente de plantaciones forestales, mediante el tratamiento de vacío-presión para su uso como postes agrícolas, de manera óptima?	Optimizar el tratamiento de preservación por vacío-presión de postes agrícolas de madera de *Guazuma crinita* (Bolaina blanca), proveniente de plantaciones forestales.	La optimización del tratamiento preservador por vacío-presión de postes agrícolas de madera de *Guazuma crinita* (Bolaina blanca) permitirá alcanzar el grado mínimo de preservación aceptable para su uso.	Penetración de preservante en la madera. Retención de preservante en la madera. Costos del tratamiento preservador.	Observación de Campo. Análisis Documental.
¿Qué variables influyen directa e indirectamente en los resultados de los tratamientos de preservación por vacío-presión de postes agrícolas de madera de *Guazuma crinita* (Bolaina blanca)?	Analizar los factores que influyen directa e indirectamente en los resultados de los tratamientos de preservación por vacío-presión.	Los resultados del tratamiento preservador de postes agrícolas de madera de *Guazuma crinita* (Bolaina blanca) se explican significativamente por las variables de magnitud de Presión de trabajo y el	Penetración de preservante en la madera. Retención de preservante en la madera.	Observación de Campo. Análisis Documental.

		contenido de humedad de la madera.		
¿Cómo definir un modelo matemático de segundo orden, empleando las variables de mayor significancia, que describa el proceso óptimo de preservación por vacío-presión de postes agrícolas?	Analizar las variables de mayor significancia que describan el proceso óptimo de preservación por vacío-presión mediante un modelo matemático de segundo orden.	El modelo matemático de segundo orden elaborado con las variables de mayor significancia describe el proceso óptimo para los resultados de los tratamientos de preservación de postes agrícolas de madera de *Guazuma crinita* (Bolaina blanca).	Penetración de preservante en la madera. Retención de preservante en la madera.	Análisis Documental

Fuente. **Elaboración propia**

3.6. Tipo y diseño de investigación

En el presente trabajo se hará empleo de la Investigación Aplicada o Tecnológica, ya que se buscará la obtención de nuevos conocimientos técnicos que ayudarán a mejorar los procesos de preservación de la madera, con aplicación inmediata a la problemática del sector agrario.

Asimismo, el tipo de investigación es experimental, ya que se basa en la manipulación deliberada de las variables experimentales no comprobadas, bajo condiciones controladas, con el fin de observar y describir de qué modo se puede producir una situación o acontecimiento particular.

3.7. Unidad de análisis

Tutores de madera de *Guazuma crinita* (Bolaina blanca) de 3 pulgadas de diámetro y 2.4 m de longitud.

3.8. Población de estudio

Para los efectos de la presente investigación, se considerará como población objeto de estudio a la plantación de *Guazuma crinita* (Bolaina blanca) de 07 años de edad de la empresa Reforestadora Amazónica SA (Ramsa) ubicada en la provincia de Puerto Inca, entre los distritos de Puerto inca y Yuyapichis, en el departamento de Huánuco, correspondiente al sector Maquizapallo, con una superficie plantada de 287,63 ha., con un distanciamiento entre plantas de 3 x 3 m y mantenimiento por raleos.

3.9. Tamaño de muestra

De esta población se obtuvo una muestra representativa proporcionada por la empresa RAMSA, por medio de la empresa Maquiwood Sac., ubicada en Carretera Federico Basadre Km 85.5 – Pucallpa, consistente en 204 tutores de madera, que para efectos del estudio se emplearon en condición húmeda.

3.10. Selección de la muestra

La muestra fue seleccionada al azar, entre aquellos elementos de crecimiento recto, libres de defectos estructurales como grietas y rajaduras, y ataques de organismos biológicos.

3.11. Técnicas de recolección de datos

Como base para esta investigación se realizó un análisis documental referente a los antecedentes y a la situación actual de la preservación de tutores de madera de Bolaina blanca.

Asimismo, se utilizaron las técnicas de observación de campo para observar y registrar lo que sucede cuando se llevan a cabo los procedimientos de trabajo. Como técnica de investigación, la

observación tiene amplia aceptación científica; ya que permite al analista determinar que se está haciendo, como se está haciendo, quien lo hace, cuándo se hace, cuánto tiempo toma, dónde se hace y por qué se hace.

En el presente trabajo, se realizaron ensayos de preservación de maderas; por ello, se necesitó de la observación de campo para obtener y registrar la información que posteriormente fue procesada para el análisis respectivo.

Se hizo uso de fichas bibliográficas para el análisis documental del trabajo. Se citaron libros y revistas científicas especializadas en el tema de la preservación de maderas.

Se elaboró una guía de observación de datos del trabajo compuesta por formatos y fichas de registro.

La tabla 04 muestra un esquema sobre las técnicas, instrumentos y fuentes utilizadas para la recolección de datos.

Tabla 04. **Técnicas e instrumentos para la recolección de datos**

Técnicas	Instrumentos	Fuentes	Método de Investigación
• Análisis Documental. • Observación de Campo.	• Fichas Bibliográficas. • Guía de Observación de campo.	• Libros, revistas científicas, páginas de Internet. • El propio Investigador.	• Investigación Experimental

Fuente. Elaboración propia

3.12 Método

3.12.1 *Tratamientos de optimización*

Para la presente investigación, se ha propuesto realizar experimentos para la optimización de la preservación de postes agrícolas, en dos etapas, como se indica a continuación:

3.12.1.1 ***Etapa 1: Identificación de variables significativas***. Se empleó un diseño experimental basado en un arreglo ortogonal L8(2^7), según la metodología de optimización propuesta por G. Taguchi, según Roy (2010). Este diseño factorial fraccionado incluye 8 tratamientos, 7 variables independientes y dos niveles para cada una. Empleando el arreglo ortogonal que se muestra en la tabla 05, se definieron los tratamientos experimentales.

Tabla 05. **Matriz de arreglo ortogonal L_8 (2^7)**

Nº Exp.	**Variables Independientes**						
	A	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**	**G**
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Fuente: **Roy (2010). Donde: el número 1 corresponde al nivel superior de cada variable y el número 2 corresponde al nivel inferior de cada variable.**

En la tabla 06, se muestran los niveles asignados a las variables independientes identificadas en el proceso de preservación.

Tabla 06. **Niveles de las variables independientes**

	Variables independientes	**NIVEL 1**	**NIVEL 2**
A	Contenido de humedad de la madera (%)	16	22
B	Concentración de la solución preservadora (%)	1,5	3,0
C	Magnitud de vacío del tratamiento (pulg.Hg)	19,5	22
D	Periodo de vacío inicial aplicado (min)	10	20
E	Magnitud de presión del tratamiento (PSI)	120	180
F	Periodo de presión aplicado (min)	20	30
G	Periodo de vacío final aplicado (min)	3	7

Fuente. **Elaboración propia**

Siguiendo la matriz de arreglo ortogonal $L_8(2^7)$, en la tabla 07 se muestran los tratamientos a realizar, conducentes a determinar las variables de mayor significancia.

Tabla 07. **Niveles de las variables independientes, según el arreglo $L_8(2^7)$ para los tratamientos de preservación**

Variables	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
Contenido de Humedad (%)	16	16	16	16	22	22	22	22
Concentración de Solución (%)	1,5	1,5	3,0	3,0	1,5	1,5	3,0	3,0
Magnitud de vacío (pulgadas de Hg)	19,5	19,5	19,5	22	22	22	19,5	19,5
Periodo de vacío inicial (min)	10	20	10	20	10	20	10	20
Magnitud de presión (PSI)	120	180	120	180	180	120	180	120
Periodo de presión (min)	20	30	30	20	20	30	30	20
Periodo de vacío final (min)	3	7	7	3	7	3	3	7

Fuente**. Elaboración propia. Donde: T1 a T8 son las denominaciones de los tratamientos ordenados del 1 al 8.**

De acuerdo a lo indicado por Ayala y Pardo (1995), con los resultados obtenidos, se elaboró una tabla de respuestas promedios de los efectos para cada variable dependiente, obtenidos en cada nivel según el experimento realizado, empleando la siguiente ecuación:

$$Ex_i = \frac{\Sigma Y_{(+)} - \Sigma Y_{(-)}}{(N/2) \times r}$$

Donde:

Ex_i : Efectos

$\Sigma Y_{(+)}$: Sumatoria de las respuestas correspondientes al nivel superior de la variable.

$\Sigma Y_{(-)}$: Sumatoria de las respuestas correspondientes al nivel inferior de la variable

N : Número de pruebas experimentales

r : Número de réplicas del experimento

Luego, se compararon los efectos y se asignó un número de orden a cada variable independiente. Se consideraron de mayor significancia a aquellas variables que tienen un menor número de orden y se seleccionaron como criterios de optimización. De acuerdo al ordenamiento, se emplearon a las dos variables de mayor efecto para realizar la siguiente etapa de optimización.

3.12.1.2 ***Etapa 2: Optimización final de las variables.*** En esta etapa se empleó un diseño hexagonal con 6 tratamientos y 3 repeticiones de un tratamiento como punto central para la estimación de la varianza, según lo señalado por Ayala y Pardo (1995). Para las variables de menor significancia se utilizó el nivel inferior, mientras que, para las dos variables de mayor significancia encontradas en la Etapa 1, se empleó la matriz codificada del diseño hexagonal para estimar sus valores, como se muestra en la tabla 08.

Tabla 08. **Matriz codificada del Diseño Hexagonal.**

Nº de Experimento	**Z1**	**Z2**
1	1,0	0,000
2	0,5	0,866
3	-0,5	0,866
4	-1,0	0,000
5	-0,5	-0,866
6	0,5	-0,866
7	0,0	0,000
8	0,0	0,000
9	0,0	0,000

Fuente. **Ayala y Pardo. 1995. Optimización por Diseños Experimentales. Concytec. Perú.**

Donde:

1, -1 : Representan al límite superior y al límite inferior respectivamente del intervalo de prueba de las variables.

0 : Representa el punto central del intervalo de prueba de las variables.

0.5, -0.5, 0.866, - 0.866 : Representan las coordenadas de los ángulos del hexágono, según el modelo.

Para decodificar el diseño se emplearon las siguientes ecuaciones:

$$EN = Z_j° + (Cod \times \blacktriangle Z_j)$$

$$Z_j° = \frac{N_{(+)} + N_{(-)}}{2}$$

$$\blacktriangle Z_j = \frac{N_{(+)} - N_{(-)}}{2}$$

Donde:

EN : Escala Natural

Cod. : Valor codificado de la variable independiente

$Z_j°$: Valor central del intervalo de la variable independiente

$\blacktriangle Z_j$: Radio, distancia entre el valor central y los niveles del intervalo

$N_{(+)}$: Límite superior del intervalo de prueba de la variable independiente

$N_{(-)}$: Límite inferior del intervalo de prueba de la variable independiente

3.12.2 *Modelo matemático de optimización*

Empleando las dos variables independientes más significativas usadas en la etapa 2, se procedió a la elaboración de un modelo matemático de segundo orden, según lo señalado por Ayala y Pardo (1995), como se muestra a continuación:

$$Y = b_o + \Sigma\, b_j X_j + \Sigma\, b_{uj} X_u X_j + \Sigma\, b_{jj} X_j^2$$

Donde:

Y : Criterio de optimización

b_o, b_j, b_{uj}, b_{jj} : Coeficientes de la ecuación

X_j, X_u, X^2_j : Variables controlables

$u \neq j$

Con los resultados promedio de retención obtenidos en la etapa 2, se procedió al cálculo de la ecuación de segundo orden, mediante el cálculo de matrices. Los coeficientes de la ecuación fueron determinados, de acuerdo a lo señalado por Ayala y Pardo (1995), con la definición de la siguiente fórmula matricial:

$$B = (X^T X)^{-1} X^T Y$$

Donde:

B : Coeficientes ordenados para la ecuación del modelo matemático de segundo orden

X : Matriz de diseño

X^T : Transpuesta de la matriz de diseño

Y : Resultados observados, respuestas

En la tabla 09, se muestra la matriz de X del diseño:

Tabla 09. **Matriz de X para el modelo matemático**

X_0	X_1	X_2	X_1^2	X_2^2	X_1X_2
1	1	0	1	0	0
1	0.5	0.866	0.25	0.75	0.433
1	-0.5	0.866	0.25	0.75	-0.433
1	-1	0	1	0	0
1	-0.5	-0.866	0.25	0.75	0.433
1	0.5	-0.866	0.25	0.75	-0.433
1	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0

Fuente. **Ayala y Pardo. 1995. Optimización por Diseños Experimentales. Concytec. Perú.**

Los coeficientes b_j de la ecuación codificada de segundo orden están dados por la matriz B, con 06 resultados, como se muestra a continuación en la tabla 10:

Tabla 10. **Coeficientes codificados. Matriz B = $(X^TX)^{-1}X^TY$.**

b_0 =	Coeficiente del término independiente
b_1 =	Coeficiente del término lineal de la variable independiente Z_1
b_2 =	Coeficiente del término lineal de la variable independiente Z_2
b_{11} =	Coeficiente del término cuadrático de la variable independiente Z_1
b_{22} =	Coeficiente del término cuadrático de la variable independiente Z_2
b_{12} =	Coeficiente del término multiplicativo de las variables independientes Z_1 y Z_2

Fuente. **Adaptado de Ayala y Pardo. 1995. Optimización por Diseños Experimentales. Concytec. Perú.**

De manera que la ecuación codificada queda definida de la siguiente forma:

$$Y = b_0 + b_1Z_1 + b_2Z_2 + b_{11}Z_1^2 + b_{22}Z_2^2 + b_{12}Z_1Z_2$$

Para decodificar la ecuación se determinan los coeficientes de la ecuación natural, como se indica a continuación:

$$a_0 = b_0 – (b_1\varepsilon_1) – (b_2\varepsilon_2) + (b_{11}\varepsilon_1^2) + (b_{22}\varepsilon_2^2) + (b_{12}\varepsilon_1\varepsilon_2)$$

$$a_1 = (b_1 – 2b_{11}\varepsilon_1 – b_{12}e_2)/\blacktriangle Z_1$$

$$a_2 = (b_2 – 2b_{22}\varepsilon_2 – b_{12}\varepsilon_1)/\blacktriangle Z_2$$

$$a_{11} = b_{11}/\blacktriangle Z_1^2$$

$$a_{22} = b_{22}/\blacktriangle Z_2^2$$

$$a_{12} = b_{12}/(\blacktriangle Z_1 \blacktriangle Z_2)$$

$$\varepsilon_j = Z_j°/\blacktriangle Z_j$$

Donde:

a_0 : Coeficiente del término independiente

a_1 : Coeficiente del término lineal de la variable independiente Z_1

a_2 : Coeficiente del término lineal de la variable independiente Z_2

a_{11} : Coeficiente del término cuadrático de la variable independiente Z_1

a_{22} : Coeficiente del término cuadrático de la variable independiente Z_2

a_{12} : Coeficiente del término multiplicativo de las variables independientes Z_1 y Z_2

$Z_j°$: Valor central del intervalo de la variable independiente

$\blacktriangle Z_j$: Radio, distancia entre el valor central y los niveles del intervalo

ε_j : Cociente del valor central del intervalo de la variable independiente entre el radio del intervalo.

De manera que la ecuación natural (decodificada) queda definida de la siguiente forma:

$$Y = a_0 + a_1Z_1 + a_2Z_2 + a_{11}Z_1^2 + a_{22}Z_2^2 + a_{12}Z_1Z_2$$

3.12.2.1 ***Análisis de significancia del modelo.*** Los coeficientes del modelo matemático son evaluados para analizar su significancia mediante el test de student, de acuerdo a lo señalado por Ayala y Pardo (1995), definido por:

$$T_j = b_j/Sb_j$$

Donde:

Tj : Valor de la prueba de Student (test t-calculado)

b_j : Coeficientes del modelo matemático

Sb_j : Desviación standard asociada a los coeficientes

$$Sb_j = Se.C_{ij}^{1/2}$$

Donde:

Se : Desviación estándar del error experimental

C_{ij} : Elementos de la diagonal de la matriz de correlación $(X^TX)^{-1}$

$$Se = (\Sigma\ (Y_j° - \bar{Y}°)^2 / gl_E)^{1/2}$$

Donde:

$\bar{Y}°$: promedio de las respuestas

$Y_j°$: respuestas

gl_E : grados de libertad del error (n-1, n: número de tratamientos replicados del punto central)

De acuerdo con Ayala y Pardo (1995), para analizar la significancia de los coeficientes se compara el test t-calculado (T_j) con el test t-tabular, para un nivel de significancia de 95% (p=0.05) y dos grados de libertad (gl_E = n-1). La variable será significativa para el proceso estudiado si el t-calculado es mayor al t-tabular.

3.12.2.2 ***Evaluación del modelo matemático.*** Para ver el grado de ajuste del modelo matemático a los datos experimentales, de acuerdo a lo señalado por Ayala y Pardo (1995), nos valemos de una prueba F-Fisher, definido por:

$$Fcal = (SS_{FA}/gl_{FA})/(SS_E/gl_E)$$

$$SS_{FA} = SS_R - SS_E$$

$$gl_{FA} = gl_R - gl_E$$

$$gl_R = n$$

Donde:

Fcal : F-calculado
SS_{FA} : Suma de cuadrados de la falta de ajuste
SS_R : Suma de cuadrados de los residuos
SS_E : Suma de cuadrados del error
gl_{FA} : grados de libertad de la falta de ajuste
gl_R : grados de libertad de los residuos
gl_E : grados de libertad del error (n-1, n: número de tratamientos replicados del punto central)

El modelo matemático se ajusta a los resultados experimentales si F-calculado es menor al F-tabular, para un nivel de significancia de 95% y grados de libertad de la falta de ajuste y del error (gl_{FA}, gl_E).

Finalmente, utilizando la ecuación natural se determinó las combinaciones de los valores de las variables Z1 y Z2 para el valor de retención (variable dependiente Y) de 6,4 kg/m3 como valor mínimo estipulado para madera a la intemperie en contacto directo con el suelo, según norma AWPA U1, considerando los niveles superiores e inferiores de las variables independientes, de manera que se estimen los costos variables de cada combinación y establecer hallar la combinación de menor costo.

3.12.3 *Análisis de costos variables*

Las combinaciones óptimas encontradas del proceso de preservación se contrastaron con un análisis de costos variables (los costos fijos no se tomaron en consideración, pues son los mismos en cada tratamiento) para encontrar la combinación óptima desde el punto de vista económico, minimizando los costos.

El costo total variable para cada combinación fue determinado con el empleo de las siguientes relaciones:

$$CTV = CP + CA + CE$$
$$CP = Cup \times Qp$$
$$CA = Cua \times Qa$$
$$CE = Cue \times Qe$$

Donde:

CTV : Costo total variable (S/.)
CP : Costo de preservante (S/.)
CA : Costo de agua (S/.)
CE : Costo de energía eléctrica (S/.)
Cup : Costo unitario de preservante (S/kg)
Qp : Cantidad de preservante utilizado (kg)

Cua : Costo unitario de agua (S/m^3)
Qa : Cantidad de agua utilizada (m^3)
Cue : Costo de energía eléctrica (S/KWh)
Qe : Cantidad de energía consumida (KWh)

Finalmente, la combinación que presenta el menor costo variable queda identificada como la combinación óptima.

3.13 Procedimiento

3.13.1 *Muestreo*

Se seleccionaron al azar 380 trozas de madera a partir de un lote de 3 pulgadas de diámetro y 2,40 metros de longitud, ubicadas en el patio de trozas, las cuales fueron codificadas con un número correlativo desde 1 hasta 380.

3.13.2 *Preparación de la muestra*

Las trozas codificadas se llevaron a la línea de procesamiento, pasando por la máquina cilindradora, con el propósito de descortezar la madera y dejarlas con un diámetro uniforme de 3 pulgadas en toda su longitud.

Posteriormente, las trozas de madera fueron empaquetadas y trasladadas en camión hasta el laboratorio de Secado y Preservación de la madera, de la facultad de Ciencias Forestales, de la Universidad Nacional Agraria La Molina. En el laboratorio, la madera fue despuntada hasta una longitud de 50 cm.

3.13.3 *Secado de la madera*

Las piezas de madera fueron divididas en tres grupos para secarlas al horno. Los dos primeros grupos, de 95 piezas de madera cada uno, se secaron al horno a un contenido de humedad de 16% y 22% respectivamente, para ser empleadas en los tratamientos de preservación iniciales de dos niveles, de acuerdo al diseño experimental $L_8(2^7)$. El tercer grupo de 190 piezas se mantuvo reservado para secarse al horno de acuerdo a los resultados que se obtendrían luego de evaluar la significancia de la variable Contenido de humedad. Si resultara poco significativa, se emplearía el nivel de mayor contenido de humedad para los tratamientos de optimización, por ser de menor costo. Si resulta significativa, la madera se secaría de acuerdo al diseño de optimización para esta variable.

El proceso de secado de la madera se llevó a cabo en el horno de secado por convección del laboratorio. Para ello, la madera fue apilada en su interior por grupos, con el empleo de listones separadores de 1 pulgada de espesor, en un sistema de apilado horizontal que incluyó a tres muestras de control. Se empleó un programa de secado moderado, de acuerdo a lo sugerido por González (1996), para madera con tendencia a grietas y rajaduras, como se indica en la tabla 11.

Tabla 11. **Programa de secado moderado**

Humedad (%)	Temperatura de bulbo seco (°C)	Temperatura de bulbo húmedo (°C)	Depresión (°C)	Humedad Relativa (%)
Verde	40.5	38.0	2.5	85
60	40.5	37.0	3.5	80
40	43.5	39.5	4.5	75
35	43.5	38.0	5.5	70
30	46.0	39.5	6.5	65
25	51.5	43.0	8.5	60
20	60.0	47.5	12.5	50
15	65.5	49.0	16.5	40

Fuente. **González, R. 1996. Secado de la Madera. Universidad Nacional Agraria La Molina. Concytec. Perú.**

Las muestras de control de humedad fueron elaboradas a partir de piezas de madera de cada lote, como se muestra en la figura 01.

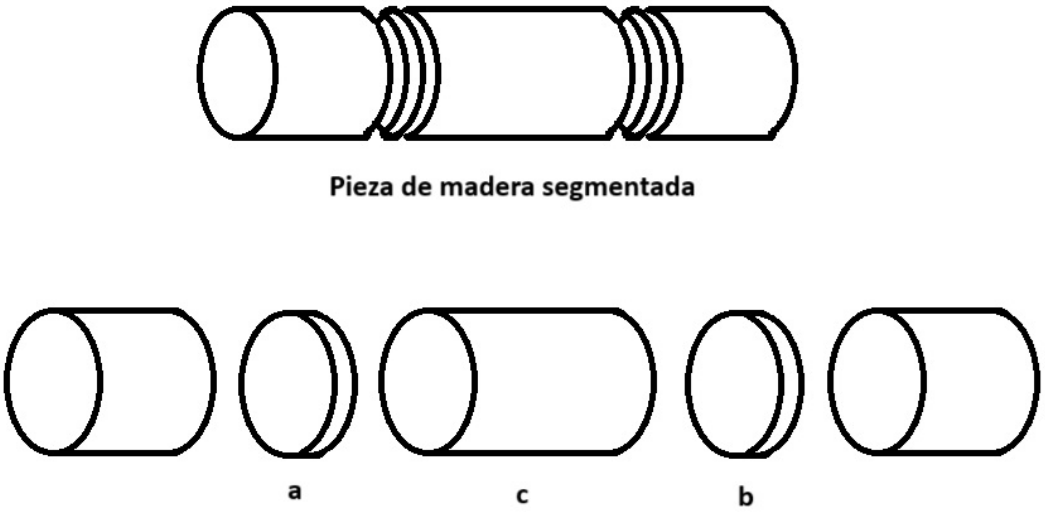


Figura 01. **Cortes de muestras de madera para la determinación del contenido de humedad. Donde: a y b, son muestras para la determinación del contenido de humedad inicial, y c, es la muestra de control del contenido de humedad durante el proceso de secado.**

Fuente. **Elaboración propia**

Las secciones a y b fueron pesadas y luego llevadas a una estufa para determinar su contenido de humedad en base seca, según la norma técnica peruana de INACAL (2020): NTP 251.010:2020, empleando la siguiente ecuación:

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

Donde:

%CH: Contenido de humedad (%)

Ph: peso húmedo de la madera (g)

Ps: peso seco (anhidro o constante) de la madera (g)

Luego se determinó el contenido de humedad promedio de la muestra de madera:

$$\%CHp = \frac{\%CHa + \%CHb}{2}$$

Donde:

%CHp: Contenido de humedad promedio (%)

%CHa: Contenido de humedad de la muestra “a”

%CHb: Contenido de humedad de la muestra “b”

Con el contenido de humedad promedio, se determinó el Peso seco (anhidro) de la Muestra de Control (“c”) mediante la siguiente relación:

$$Psc = Phc / (1+\%CHp/100)$$

Donde:

Psc: Peso seco de la muestra “c”

Phc: Peso húmedo de la muestra “c”

%CHp: Contenido de humedad promedio (%)

Las muestras de control de secado (“c”) fueron pesadas periódicamente cada 8 horas, con el propósito de determinar su contenido de humedad, de acuerdo a la siguiente relación:

$$\%CHc = \frac{Phc - Psc}{Psc} \times 100\%$$

Donde:

%CHc: Contenido de humedad de la muestra “c” (%)

Psc: Peso seco de la muestra “c”

Phc: Peso húmedo de la muestra “c”

Con el promedio aritmético del contenido de humedad de las muestras, se condujo el proceso de secado de manera manual, realizando los cambios en las condiciones ambientales de la cámara de secado, de acuerdo al nivel de humedad que presentaron las muestras en promedio. Al finalizar, se obtuvieron dos grupos de madera de 22% y 16% de contenido de humedad en promedio, respectivamente.

Asimismo, se verificó el contenido de humedad a una profundidad de la cuarta parte del diámetro de las piezas de madera, utilizando un detector de humedad electrónico para madera y el uso de clavos aislados, como se muestra en la figura 02.

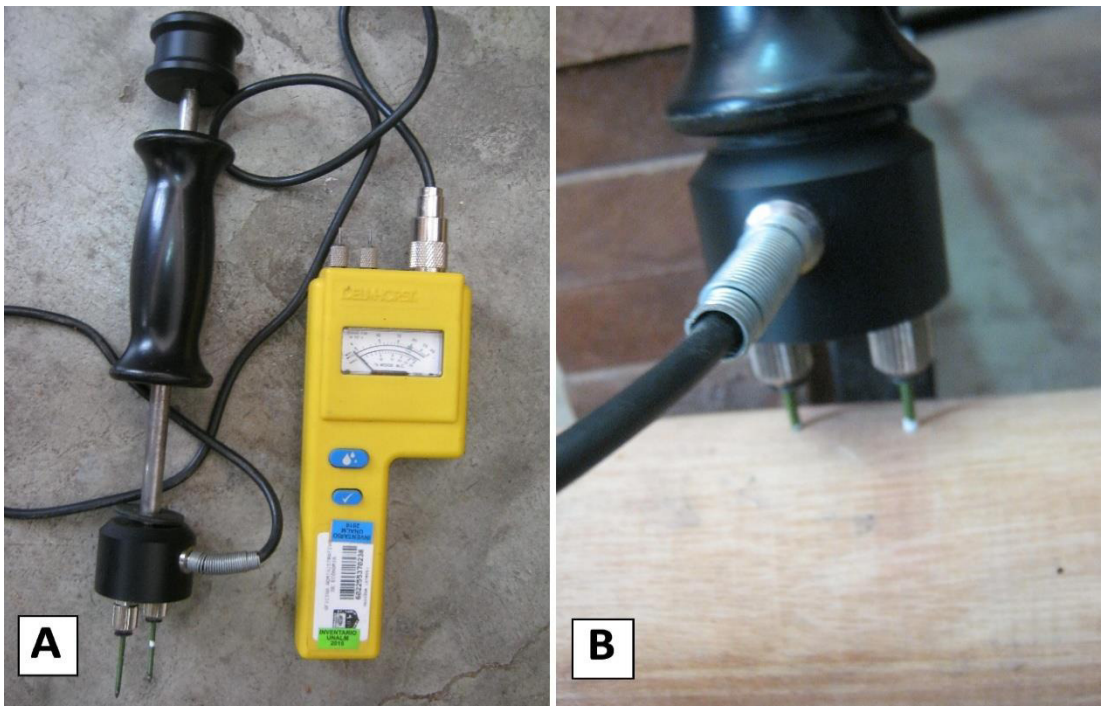


***Figura 02*. Medición del contenido de humedad. Donde: A) Equipo de medición del contenido de humedad (Delmhorst J-4), B) medición con clavos aislados en pieza de madera.**

***Fuente*: Laboratorio de preservación de la madera. Universidad Nacional Agraria La Molina.**

3.13.3 *Preservación*

Se empleo el método de preservación de Célula llena o de Bethell. Dicho proceso está diseñado para el tratamiento de madera seca, impregnándola con una solución acuosa preservadora. Para llevar a cabo el proceso de preservación, se realizaron las siguientes actividades:

3.13.3.1 *Preparación de la solución preservadora*. La sal preservante fue diluida en agua a una concentración correspondiente a cada experimento diseñado. Para ajustar la

concentración de la solución preservadora se utilizó la tabla de concentraciones del preservante, proporcionada por el fabricante, la cual se muestra en el Anexo 3. Con ayuda de un densímetro y de un termómetro se determinó la densidad y la temperatura de la solución, respectivamente. Estos valores se extrapolaron en la tabla para determinar la concentración de la solución.

Para determinar la cantidad de agua requerida para preparar la solución, se utilizó la siguiente ecuación:

$$\%C_i \times V_i = \%C_f \times V_f$$

Donde:

$\%C_i$: Concentración inicial de la solución

$\%C_f$: Concentración deseada de la solución

V_i : Volumen inicial de la solución

V_f : Volumen final de la solución

3.13.3.2 ***Preparación de la carga de madera para el tratamiento preservador*****.** Las piezas de madera fueron medidas en diámetro y longitud para la determinación del volumen de cada pieza, como se muestra en la figura 03. Luego, como se muestra en la figura 04, con el empleo de cera parafina, se sellaron los extremos de cada pieza, con el propósito de limitar la impregnación por los extremos y evaluar posteriormente la impregnación lateral.

A continuación, se pesaron individualmente las piezas de madera, como se muestra en la figura 05, con el objetivo de evaluar por diferencia de pesos, cuánto preservante es absorbido al término del tratamiento preservador.



***Figura 03*. Medición del diámetro en el extremo de una pieza de madera, con el empleo de un calibrador electrónico.**

***Fuente*: Laboratorio de preservación de la madera. Universidad Nacional Agraria La Molina.**



***Figura 04.* Sellado de un extremo de una pieza de madera, empleando cera parafina.**

***Fuente*: Laboratorio de preservación de la madera. Universidad Nacional Agraria La Molina.**



Figura 05. **Obtención del peso de pieza de madera en balanza digital**
Fuente**: Laboratorio de preservación de la madera. Universidad Nacional Agraria La Molina.**

Se prepararon cargas de madera utilizando 12 probetas de madera en cada carga. Para evitar que la carga de madera se disperse en el interior de la autoclave, se sujetaron los extremos empleando pabilo. Luego, las cargas de madera se introdujeron en la autoclave, como se muestra en la figura 06, de acuerdo al tratamiento a realizar, cerrando herméticamente la puerta de ingreso.



Figura 06. **Introducción de una carga de madera a la autoclave de preservación.**

Fuente**: Laboratorio de preservación de la madera. Universidad Nacional Agraria La Molina.**

3.13.3.3 ***Tratamiento de preservación*****.** Contando con el equipo de preservación del laboratorio, el cual se muestra en la figura 07, se procedió a realizar el tratamiento preservador, de acuerdo a lo señalado por JUNAC (1988), el cual consistió de las siguientes etapas:

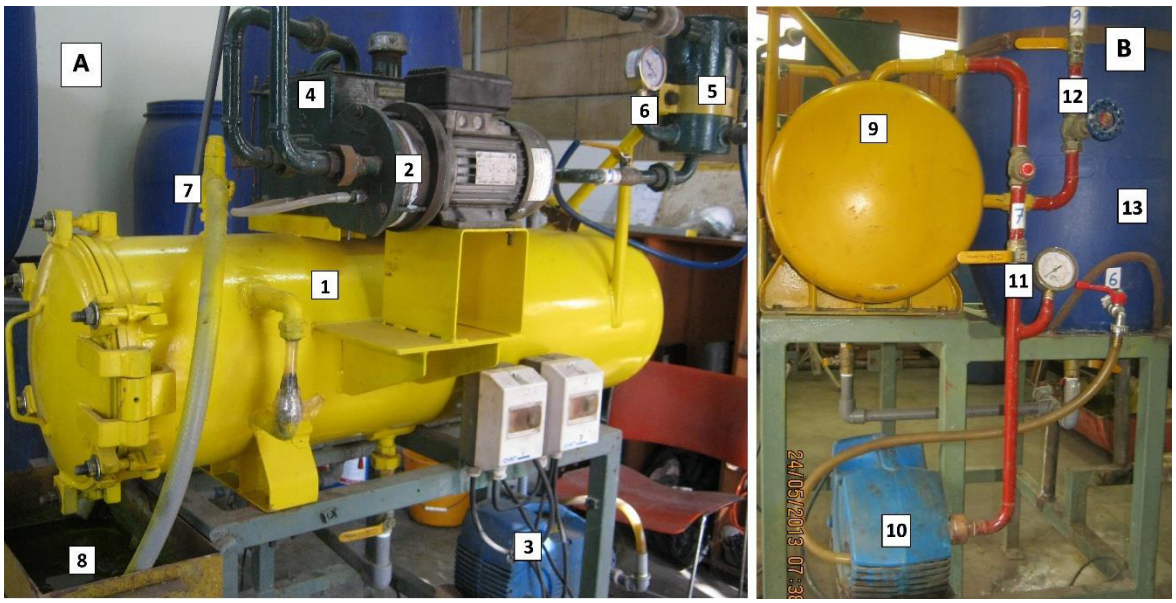


***Figura 07*. Equipo de preservación de maderas. Donde: A) Vista lateral: 1) autoclave, 2) bomba de vacío, 3) bomba de presión, 4) tanque refrigerante, 5) tanque acumulador, 6) vacuómetro, 7) válvula de seguridad; B) Vista posterior: 9) autoclave, 10) bomba de presión, 11) manómetro, 12) válvula de presión, 13) tanque de almacenamiento.**
***Fuente:* Laboratorio de preservación de la madera. Universidad Nacional Agraria La Molina.**

a. Vacío Inicial. Habiendo introducido la carga de madera al interior de la autoclave, y cerrando herméticamente la puerta de ingreso de la misma, se generó vacío al interior con la acción de una bomba, hasta alcanzar una magnitud establecida y durante un periodo de tiempo correspondientes a cada tratamiento, según el diseño experimental. El tiempo de vacío se contabilizó a partir de que se alcanzó la magnitud de vacío de trabajo.

b. Llenado. Manteniendo accionada la bomba de vacío, se incorporó por gravedad la solución preservadora preparada desde el tanque de almacenamiento a la autoclave, hasta quedar completamente llena.

c. Presión. Con la autoclave llena, se encendió la bomba de presión, la cual llevó la solución preservante desde el tanque de almacenamiento hasta la autoclave, incrementando la presión. La presión se regula mediante una válvula de alivio, manteniéndose constante de acuerdo a la magnitud de trabajo establecida para cada tratamiento. El tiempo de presión se empezó a contabilizar a partir de que se alcanzó la magnitud de trabajo.

d. Recuperación de solución preservante. Finalizada la etapa de presión, se accionó la bomba de transferencia para retirar el preservante remanente de la autoclave. En esta etapa se reestablece la presión atmosférica y la solución preservadora contenida en la madera es expulsada por la diferencia de presiones.

e. Vacío final. Esta etapa tiene por propósito acondicionar la madera antes de que se retire de la autoclave. Durante la etapa anterior, la presión en la autoclave se reestablece a la atmosférica, sin embargo, la solución preservante absorbida por la madera se encuentra a una mayor presión, lo que provoca su movimiento hacia el exterior de la madera. El vacío aplicado ayuda a recuperar la solución preservante absorbida en exceso. En la figura 08 se muestra un esquema de las etapas anteriormente descritas:

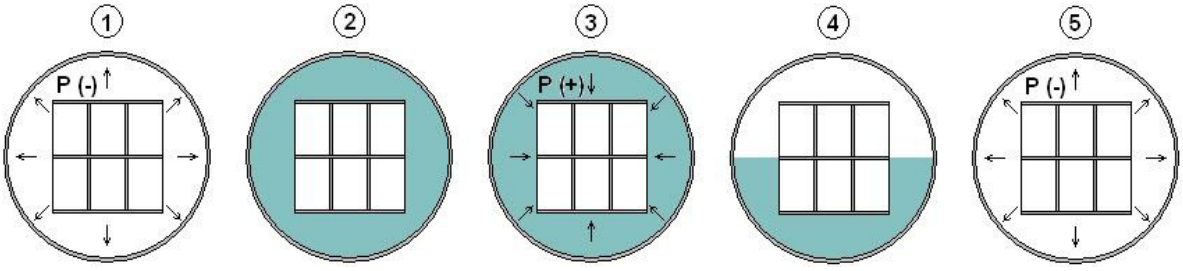


***Figura 08*. Etapas del proceso de preservación. 1) Vacío inicial, 2) llenado, 3) presión, 4) recuperación de preservante, y 5) vacío final.**
***Fuente*. Elaboración propia.**

3.13.3.4 ***Evaluación de la madera preservada.*** Para evaluar los resultados del tratamiento preservador, de acuerdo a lo señalado por JUNAC (1988), se recurrió a la determinación de los siguientes indicadores, para cada uno de los elementos tratados:

a) ***Absorción bruta.*** Al término del tratamiento, la madera se dejó escurrir durante 1 hora, luego cada probeta se pesó en la balanza electrónica. La absorción bruta se determinó de la siguiente manera:

$$Abs_B = Pf - Pi / (Vm * D)$$

Donde:

Abs_B : Absorción bruta (L/m^3)
Pf : Peso de la probeta al final del tratamiento (kg)
Pi : Peso de la probeta al inicio del tratamiento (kg)
Vm : Volumen de la probeta de madera (m^3)
D : Densidad de la solución preservante (kg/L)

b) ***Absorción Neta.*** Utilizando el valor de concentración, la absorción neta se determinará de la siguiente manera:

$$Abs_N = \%C \times (Pf - Pi) / (100\% \times Vm)$$

Donde:

Abs_N : Absorción neta (kg/m^3)
%C : Concentración de solución preservante (%)
Pf : Peso de la probeta al final del tratamiento (kg)
Pi : Peso de la probeta al inicio del tratamiento (kg)
Vm : Volumen de la probeta de madera (m^3)

c) *Penetración.* Después de determinarse la absorción se orearon las probetas durante 48 horas. Luego, utilizando la sierra circular portátil, las probetas fueron cortadas por la mitad, perpendicularmente a su longitud. A continuación, se aplicó por aspersión el reactivo de coloración de Cromo azurol S sobre la sección de corte expuesta, como se muestra en la figura 09. La reacción resultante es de color azul intenso en aquella porción que ha sido impregnada con preservante, específicamente con el elemento de cobre bivalente (Cu^{+2}). La zona de madera donde no se logró absorber solución preservante se queda del color del reactivo (ligeramente rojizo).

Posteriormente, se tomó una imagen fotográfica digitalizada de cada pieza y se registró el porcentaje de la superficie coloreada de azul mediante un algoritmo de procesamiento masivo utilizando el software de *Python* (versión 3.13) y las bibliotecas OpenCV y Pandas, como se muestra en la figura 10. En el procesamiento de las imágenes para cada probeta, se definió automáticamente una región de interés (ROI) de geometría circular aislando así la sección transversal de la muestra. La detección espacial del tratamiento se abordó mediante una estrategia por exclusión en el espacio de color HSV (Hue, Saturation, Value); en este proceso, se identificaron y aislaron los rangos tonales correspondientes a la madera impregnada (tonalidades azules-verdosas). El área preservada se calculó mediante una operación lógica bidimensional, restando las zonas limpias de la máscara circular total. Finalmente, el algoritmo cuantificó el porcentaje de impregnación individual a partir de la relación de píxeles y consolidó los resultados de todas las muestras en una matriz de datos exportada en formato Excel para su posterior evaluación estadística.



Figura 09. **Ensayo de penetración de preservante en piezas de madera, con el uso de reactivo de coloración Cromo Azurol S. La coloración azul indica la zona impregnada por el preservante en la madera. La pieza 209 presentó penetración total, mientras que las piezas 288 y 289 presentaron penetración parcial, con formación de anillo irregular.**



Figura 10. **Determinación del área penetrada en porcentaje en pieza de madera preservada, mediante el uso del software Python Versión 3.13 para el procesamiento de imágenes. A la derecha, capa monocromática, penetración de preservante de color blanco.**

d) *Retención.* Con el resultado de la penetración, se determinó el volumen de la madera efectivamente impregnada. Luego, se determinó la retención del preservante de la siguiente manera:

$$Ret = \%C \times (Pf - Pi) / (100\% \times Ve)$$

Donde:

Ret : Retención (kg/m^3)

%C : Concentración de solución preservante (%)

Pf : Peso de la probeta al final del tratamiento (kg)

Pi : Peso de la probeta al inicio del tratamiento (kg)

Ve : Volumen de madera efectivamente impregnada (m^3)

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Tratamientos de optimización

4.1.1 *Etapa 1: Determinación de las variables más significativas*

Luego de realizar los tratamientos de preservación de la madera en la autoclave, siguiendo el arreglo ortogonal de experimentos de $L_8(2^7)$, se evaluó cada tratamiento determinando los indicadores de impregnación descritos en el acápite 3.13.3.4. La tabla 12 presenta los indicadores de evaluación promedio para cada tratamiento, de acuerdo al arreglo de experimentos. En el Anexo 1 se presentan los resultados de penetración en porcentaje por cada probeta ensayada para cada tratamiento realizado. En el Anexo 2 se presentan los resultados por cada probeta ensayada para cada tratamiento realizado.

Con los resultados de la tabla 12, se midieron los efectos de las variables independiente en los indicadores de impregnación, como se indica en el acápite 3.12.1.1. Los efectos de las variables se muestran en la tabla 13.

Tabla 12. **Características de preservación de la madera de bolaina blanca, de acuerdo al diseño experimental $L_{8(}2^{7})$**

N° Tratamiento	Abs Bruta (L/m³)	Abs Neta (kg/m³)	Penetración (%)	Retención (kg/m³)
T1	499.41	7.62	84.20	5.63
T2	626.27	9.55	85.31	6.98
T3	435.42	13.52	84.45	9.69
T4	578.91	17.98	84.04	13.16
T5	460.65	7.03	69.22	6.44
T6	403.12	6.15	65.05	5.88
T7	398.89	12.39	69.57	11.48
T8	258.51	8.03	60.70	8.21

Donde: **Abs Bruta = absorción bruta y Abs Neta = absorción neta.**

La tabla 13 muestra que, para el indicador de absorción bruta, las variables más relevantes bajo las condiciones de los tratamientos aplicados son el contenido de humedad de la madera y la magnitud de la presión de trabajo. De acuerdo a JUNAC (1988), un alto contenido de humedad en la madera suele dificultar la penetración de los preservantes. Además, indica que los tratamientos por vacío-presión requieren que la madera esté seca, es decir, con un contenido de humedad inferior al punto de saturación de las fibras, para que el preservante pueda ser absorbido de manera efectiva. Esto se debe a que, durante el tratamiento, la solución preservante ocupa los espacios vacíos que deja el agua al evaporarse durante el secado previo. Por lo tanto, bajo las mismas condiciones de tratamiento, la madera con menor contenido de humedad absorbe más preservante que aquella con mayor humedad. Asimismo, la aplicación de presión favorece significativamente la impregnación de la solución preservante en la estructura celular de la madera, al facilitar su penetración hacia zonas más profundas. Este mecanismo permite superar la resistencia natural de las paredes celulares,

logrando una distribución más uniforme y eficaz del preservante en el interior del sustrato leñoso.

Tabla 13. **Efectos de las variables independientes en los resultados de los tratamientos de preservación, de acuerdo al diseño experimental $L_8(2^7)$**

Indicadores		**Variables independientes**						
	Límites	**%CH**	**%C**	**mV**	**tVi**	**mPres**	**tPres**	**tVf**
Abs Bruta	Max.	1521.17	1671.73	1878.10	295.10	2064.72	1863.70	31.33
(L/m3)	Min.	2140.01	1989.45	1783.08	307.45	1596.46	1797.48	36.16
	Efectos	-88.41	-45.39	13.57	-1.76	66.89	9.46	-0.69
	Orden	**1**	**3**	**4**	**6**	**2**	**5**	**6**
Abs Neta	Max.	33.59	51.91	44.67	41.71	46.94	41.61	38.13
(kg/m3)	Min.	48.67	30.35	37.59	40.55	35.32	40.65	44.13
	Efectos	-2.15	3.08	1.01	0.16	1.66	0.14	-0.86
	Orden	**2**	**1**	**4**	**6**	**3**	**7**	**5**
Penetración	Max.	264.55	298.76	302.77	295.10	308.15	304.38	299.68
%	Min.	338.00	303.79	299.78	307.45	294.40	298.17	302.87
	Efectos	-12.24	-0.84	0.50	-2.06	2.29	1.04	-0.53
	Orden	**1**	**5**	**7**	**3**	**2**	**4**	**6**
Retención	Max.	32.02	42.55	35.18	34.24	38.08	34.04	31.33
(kg/m3)	Min.	35.47	24.94	32.31	33.25	29.42	33.45	36.16
	Efectos	-0.57	2.94	0.48	0.16	1.44	0.10	-0.80
	Orden	**4**	**1**	**5**	**6**	**2**	**7**	**3**

Donde:
%CH : Contenido de humedad de la madera (%)
%C : Concentración de la solución preservante (%)
mV : Magnitud de vacío de trabajo
tVi : Tiempo de aplicación de vacío inicial
mPres : Magnitud de presión de trabajo
tPres : Tiempo de aplicación de presión de trabajo
tVf : Tiempo de aplicación de vacío final

En el caso del indicador de absorción neta, las variables más determinantes bajo las condiciones de los tratamientos aplicados

son la concentración de solución preservante y el contenido de humedad de la madera. A diferencia de la absorción bruta, la absorción neta cuantifica exclusivamente la masa del preservante activo absorbido, excluyendo el peso del solvente. Por esta razón, su ecuación de determinación incorpora explícitamente la concentración de la solución preservante, lo que implica una relación directamente proporcional entre dicha concentración y la masa de preservante absorbida. Así, a mayor concentración de solución, mayor será la cantidad de preservante absorbido bajo las mismas condiciones de tratamiento. Asimismo, el contenido de humedad de la madera continúa siendo una variable significativa, al igual que en el caso de la absorción bruta. Esto se debe a que el preservante se aplica en forma de solución acuosa, la cual penetra en la madera ocupando los espacios capilares y vacíos celulares presentes en la estructura de la madera seca. Por lo tanto, una menor humedad inicial favorece una mayor capacidad de absorción, al disponer de mayor volumen interno para el ingreso de la solución preservante.

En cuanto al indicador de penetración del preservante en la madera, se determinó que las variables de mayor influencia son el contenido de humedad de la madera y la magnitud de la presión de trabajo. Este indicador evalúa tanto la profundidad de impregnación alcanzada por el preservante como su distribución dentro del sustrato leñoso. La efectividad del proceso depende, por un lado, de la presencia de espacios vacíos generados por la evaporación del agua en la madera seca, los cuales facilitan el ingreso del preservante; y por otro, del flujo forzado del preservante a través de los capilares de la madera, impulsado por la presión aplicada durante el tratamiento. Una mayor presión y una menor humedad inicial favorecen una penetración más profunda y uniforme del producto preservante.

En relación con el indicador de retención de preservante en la madera, se identificó que las variables independientes de mayor influencia son la concentración de la solución preservante y la magnitud de la presión de trabajo. La retención se define como la cantidad de sustancia activa efectivamente retenida en un volumen determinado de madera, y está estrechamente vinculada con los indicadores de absorción neta y penetración. En este sentido, los niveles de retención dependen directamente de la dosis de aplicación del preservante, es decir, a mayor concentración, mayor será la cantidad de sustancia activa disponible para ser retenida. Asimismo, una mayor presión favorece el transporte profundo del preservante, incrementando su fijación en las zonas internas de la madera. Por tanto, la retención refleja no solo la cantidad aplicada, sino también la eficacia del tratamiento en términos de distribución y fijación del producto preservante.

Si bien los indicadores de absorción resultan útiles para evaluar los tratamientos de impregnación directamente en planta, en función de las características propias de la madera tratada, no son empleados en los procesos de comercialización de productos preservados, ya que no reflejan la dosis del ingrediente activo aplicado. Por ello, en la siguiente etapa de optimización se dará mayor énfasis al indicador de retención (de óxidos), el cual proporciona, para el caso de las sales CCA, una medida más precisa del contenido de ingredientes activos del preservante impregnado.

Por otro lado, la tabla 14 presenta el análisis de varianza (ANOVA) aplicado a los resultados de retención correspondientes a los tratamientos de impregnación, considerando un nivel de significancia de 0.05. Dado que el valor calculado de la prueba F (F-cal = 39.69) supera al valor crítico tabulado (F-tab = 2.12), se cuenta con evidencia estadística suficiente para afirmar que al menos uno de los

tratamientos difiere significativamente del resto de tratamientos realizados.

Tabla 14. **Análisis de varianza de los resultados de retención bajo el diseño ortogonal $L_8(2^7)$**

Fuentes de Variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	Valor F-cal	95% Significancia
Entre grupos	645.072	7	92.15	39.69	2.12
Dentro del grupo	204.315	88	2.32		
Total	849.387	95	8.941		

Para encontrar las diferencias entre los tratamientos se recurrió a la prueba de comparaciones múltiples de Tukey aplicada a los valores de retención de los tratamientos de impregnación, bajo un nivel de significancia de 0.05, el cual se presenta en la tabla 15. En la columna correspondiente al valor p se indican los niveles de significancia para cada par de tratamientos evaluados. Se considera que existe una diferencia estadísticamente significativa entre tratamientos cuando el valor p es menor a 0.05.

Con base en los resultados de significancia obtenidos, y tras ordenar de mayor a menor los valores de retención de los tratamientos evaluados, se elaboró la Figura 03. Esta figura permite agrupar los tratamientos según sus similitudes estadísticas. En este sentido, los tratamientos T4 y T7, al no presentar diferencias significativas entre sí, conforman el grupo A; T4, T7 y T3 integran el grupo B; T7, T3 y T8, el grupo C; T3, T8, T2 y T5, el grupo D; T8, T2, T5, T6 y T1, el grupo E; mientras que T2, T5, T6 y T1 conforman el grupo F.

Al comparar los tratamientos que presentan diferencias significativas en los valores de retención, se observa que los tratamientos T3 y T4 se encuentran asignados a grupos distintos (C y A, respectivamente), siendo superiores los resultados obtenidos en T4. Ambos tratamientos comparten niveles similares de contenido de humedad y concentración de la solución preservante; sin embargo, difieren en el nivel de presión aplicada (120 y 180 PSI, respectivamente), siendo esta última mayor en T4. Esta diferencia sugiere una influencia significativa de la presión en los resultados de retención.

De manera similar, los tratamientos T6 y T8 están asignados en los grupos F y D, respectivamente, con resultados más elevados en T8. Aunque ambos coinciden en el contenido de humedad y la presión aplicada, difieren en la concentración de la solución preservante (1,5 % en T6 y 3,0 % en T8), lo que evidencia la relevancia de esta variable en los niveles de retención alcanzados.

Por otro lado, los tratamientos T1 y T8, que también presentan diferencias significativas en los resultados de retención, pertenecen a los grupos F y D, respectivamente, siendo T8 nuevamente el tratamiento con mayor retención. A pesar de que el tratamiento T1 presenta un menor contenido de humedad (16 %), condición que favorece una mayor absorción de solución preservante, los resultados indican una retención superior en T8, que cuenta con un contenido de humedad mayor (22 %). Esto refuerza la conclusión de que, bajo las condiciones evaluadas, la concentración de la solución preservante tiene una mayor influencia en los resultados de retención que el contenido de humedad. Estos hallazgos coinciden con la tabla 13, que presenta los efectos de las variables en los resultados de retención de preservante.

***Tabla 15*. Prueba de Tukey para los resultados de retención bajo el diseño ortogonal $L_8(2^7)$**

Vs Tratamientos	Diferencia de medias	Error estándar	Significancia (valor p)	Intervalo de confianza al 95%	
				Límite inferior	Límite superior
T2 vs T1	1.353	0.622	0.376	-0.578	3.285
T3 vs T1	4.063	0.622	0.000	2.132	5.995
T4 vs T1	7.533	0.622	0.000	5.602	9.465
T5 vs T1	0.815	0.622	0.893	-1.117	2.747
T6 vs T1	0.250	0.622	1.000	-1.682	2.182
T7 vs T1	5.855	0.622	0.000	3.923	7.787
T8 vs T1	2.583	0.622	0.002	0.651	4.514
T3 vs T2	2.710	0.622	0.001	0.778	4.642
T4 vs T2	6.180	0.622	0.000	4.248	8.112
T5 vs T2	-0.538	0.622	0.988	-2.470	1.393
T6 vs T2	-1.103	0.622	0.639	-3.035	0.828
T7 vs T2	4.502	0.622	0.000	2.570	6.433
T8 vs T2	1.229	0.622	0.504	-0.702	3.161
T4 vs T3	3.470	0.622	0.000	1.538	5.402
T5 vs T3	-3.248	0.622	0.000	-5.180	-1.317
T6 vs T3	-3.813	0.622	0.000	-5.745	-1.882
T7 vs T3	1.792	0.622	0.089	-0.140	3.723
T8 vs T3	-1.481	0.622	0.264	-3.412	0.451
T5 vs T4	-6.718	0.622	0.000	-8.650	-4.787
T6 vs T4	-7.283	0.622	0.000	-9.215	-5.352
T7 vs T4	-1.678	0.622	0.137	-3.610	0.253
T8 vs T4	-4.951	0.622	0.000	-6.882	-3.019
T6 vs T5	-0.565	0.622	0.985	-2.497	1.367
T7 vs T5	5.040	0.622	0.000	3.108	6.972
T8 vs T5	1.768	0.622	0.098	-0.164	3.699
T7 vs T6	5.605	0.622	0.000	3.673	7.537
T8 vs T6	2.333	0.622	0.007	0.401	4.264
T8 vs T7	-3.273	0.622	0.000	-5.204	-1.341

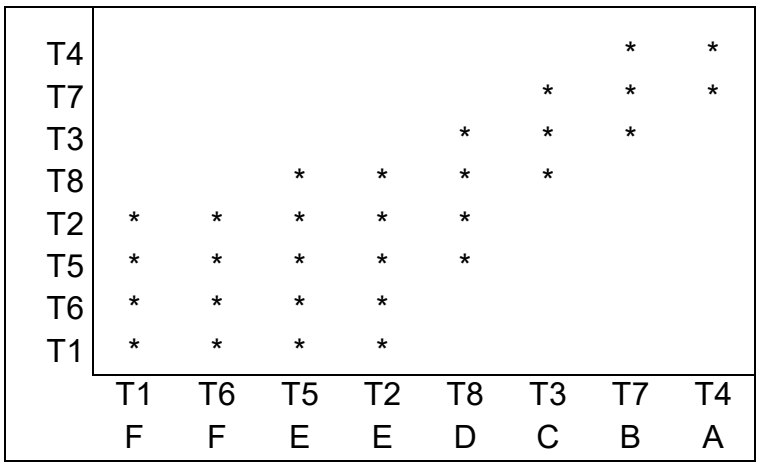


Figura 11. **Agrupamiento de tratamientos del diseño ortogonal $L_8(2^7)$, de acuerdo a sus similitudes estadísticas**
Fuente. **Elaboración propia.**

4.1.2 *Etapa 2: Optimización final de las variables*

Con respecto al indicador de retención, se observó que las variables con mayor influencia fueron la concentración de la solución y la magnitud de la presión. Por ello, en la segunda etapa de optimización, los experimentos de impregnación se centraron en estas dos variables, con el objetivo de determinar sus valores óptimos. Las demás variables independientes se mantuvieron en su nivel inferior, decisión que también se justifica por su menor costo de implementación y menor consumo energético.

Con las dos variables seleccionas, se elaboró una matriz codificada, según el diseño rotable hexagonal indicado en el acápite 3.12.1.2. La tabla 16 muestra la codificación de las variables, siendo Z1 la variable magnitud de la presión y Z2 la variable concentración de solución.

Tabla 16. **Matriz codificada según el diseño hexagonal. Donde X1 y X2 son las variables codificadas, Z1 es la variable magnitud de la presión y Z2 es la variable concentración de solución. La columna No se refiere al número de experimentos realizados**

No	X1	X2	Z1	Z2
1	1	0	180	2.25
2	0.5	0.866	165	2.9
3	-0.5	0.866	135	2.9
4	-1	0	120	2.25
5	-0.5	-0.866	135	1.6
6	0.5	-0.866	165	1.6
7	0	0	150	2.25
8	0	0	150	2.25
9	0	0	150	2.25

La tabla 17 muestra a los niveles de las variables independientes que se emplearon en los experimentos de impregnación.

Tabla 17. **Niveles de las variables independientes, según el diseño rotable hexagonal para los experimentos de preservación**

Variables	**E1**	**E2**	**E3**	**E4**	**E5**	**E6**	**E7**	**E8**	**E9**
Contenido de Humedad (%)	22	22	22	22	22	22	22	22	22
Concentración de Solución (%)	2,25	2,9	2,9	2,25	1,6	1,6	2,25	2,25	2,25
Magnitud de vacío (pulgadas de Hg)	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5
Periodo de vacío inicial (min)	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Magnitud de presión (PSI)	180	165	135	120	135	165	180	180	180
Periodo de presión (min)	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Periodo de vacío final (min)	3	3	3	3	3	3	3	3	3

Fuente. **Elaboración propia. Donde: E1 a E9 son las denominaciones de los experimentos ordenados del 1 al 9.**

Luego de realizar los experimentos, de acuerdo a lo señalado en la tabla 17, se obtuvieron los resultados mostrados en el tabla 18, la cual muestra los indicadores promedio para cada experimento. Se observa que los valores más altos de retención se obtuvieron en los experimentos E2 (presión de 165 PSI y concentración de solución preservante del 2.9%) y E3 (presión de 135 PSI y concentración del 2.9%). En contraste, los valores más bajos de retención se registraron en los experimentos E5 (presión de 135 PSI y 1.6% de concentración) y E6 (presión de 165 PSI y 1.6% de concentración). Dado que las presiones de trabajo coinciden en ambos pares de experimentos, se evidencia que la concentración de la solución preservante tiene un impacto más significativo en la retención que la magnitud de la presión aplicada.

Tabla 18. **Indicadores de evaluación de los experimentos de preservación, de acuerdo al diseño hexagonal**

Experimentos	Presión (PSI)	Concentración (%)	AbsBruta (L/m^3)	AbsNeta (kg/m^3)	Penetración (%)	Retención (kg/m^3)
E1	180	2.25	362.04	8.15	68.85	7.45
E2	165	2.90	323.65	9.39	68.70	8.58
E3	135	2.90	283.90	8.23	66.25	7.74
E4	120	2.25	288.10	6.48	64.47	6.19
E5	135	1.60	375.19	6.00	67.08	5.57
E6	165	1.60	385.39	6.17	68.01	5.66
E7	150	2.25	324.09	7.29	67.57	6.45
E8	150	2.25	303.39	6.83	68.21	6.31
E9	150	2.25	320.56	7.21	67.28	6.73

La tabla 19 presenta el análisis de varianza (ANOVA) aplicado a los resultados de retención correspondientes a los tratamientos de impregnación del diseño hexagonal, considerando un nivel de significancia de 0.05. Dado que el valor calculado de la prueba F (F-cal = 15.72) supera al valor crítico tabulado (F-tab = 2.365), se cuenta con evidencia estadística suficiente para afirmar que al menos uno de los tratamientos difiere significativamente del resto de tratamientos realizados.

Tabla 19. **Análisis de varianza de los resultados de retención bajo el diseño hexagonal**

Fuente de Variaciones	**Suma de cuadrados**	**Grados de libertad**	**Media cuadrática**	**Valor F-cal**	**95% Significancia**
Entre grupos	91.925	5	18.385	15.720	2.365
Dentro del grupo	77.173	66	1.169		
Total	169.098	71	2.382		

En la tabla 20 se presenta la prueba de comparaciones múltiples de Tukey aplicada a los valores de retención de los tratamientos de impregnación, bajo un nivel de significancia de 0.05. En la columna correspondiente al valor p se indican los niveles de significancia para cada par de tratamientos evaluados. Se considera que existe una diferencia estadísticamente significativa entre tratamientos cuando el valor p es menor a 0.05.

***Tabla 20*. Prueba de Tukey para los resultados de retención bajo el diseño hexagonal**

Vs	Diferencia	Error	Significancia	Intervalo de confianza al 95%	
Tratamientos	de medias	estándar	(valor p)	Límite inferior	Límite superior
2 vs 1	1.129	0.441	0.123	-0.167	2.425
3 vs 1	0.289	0.441	0.986	-1.007	1.585
4 vs 1	-1.264	0.441	0.060	-2.560	0.032
5 vs 1	-1.887	0.441	0.001	-3.182	-0.591
6 vs 1	-1.793	0.441	0.002	-3.089	-0.498
3 vs 2	-0.840	0.441	0.410	-2.136	0.456
4 vs 2	-2.393	0.441	0.000	-3.689	-1.098
5 vs 2	-3.016	0.441	0.000	-4.312	-1.720
6 vs 2	-2.923	0.441	0.000	-4.218	-1.627
4 vs 3	-1.553	0.441	0.010	-2.849	-0.258
5 vs 3	-2.176	0.441	0.000	-3.472	-0.880
6 vs 3	-2.083	0.441	0.000	-3.378	-0.787
5 vs 4	-0.623	0.441	0.721	-1.918	0.673
6 vs 4	-0.529	0.441	0.836	-1.825	0.767
6 vs 5	0.093	0.441	1.000	-1.202	1.389

Con base en los resultados de significancia obtenidos, y tras ordenar de mayor a menor los valores de retención de los experimentos evaluados, se elaboró la Figura 04. Esta figura permite agrupar los experimentos según sus similitudes estadísticas. En este sentido, los experimentos E2, E3 y E1, al no presentar diferencias significativas entre sí, conforman el grupo A; E2, E3, E1 y E4 integran el grupo B; E1, E4, E6 y E5, el grupo C; mientras que E4, E6 y E5 conforman el grupo D.

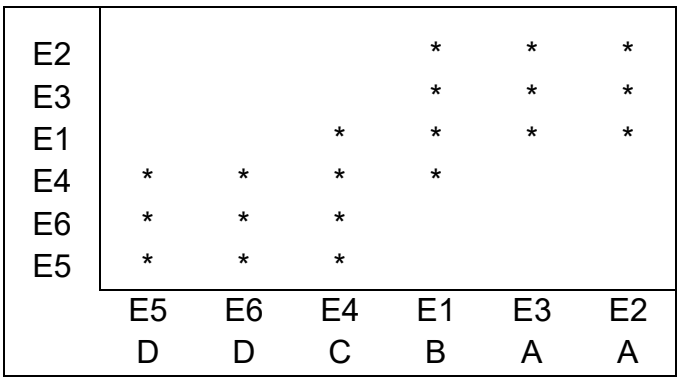


Figura 12. **Agrupamiento de tratamientos del diseño hexagonal, de acuerdo a sus similitudes estadísticas**
Fuente. **Elaboración propia.**

Al comparar los experimentos que presentan diferencias significativas en los valores de retención, se observa que los experimentos E2 y E6 se encuentran asignados a grupos distintos (A y C, respectivamente), siendo superiores los resultados obtenidos en E2. Ambos tratamientos comparten niveles similares de presión de trabajo; sin embargo, difieren en el nivel de concentración de solución (2,9% y 1,6%, respectivamente). Esta diferencia sugiere una relación directamente proporcional entre la variable concentración de solución y la variable dependiente de retención, bajo las condiciones y niveles empleados en los experimentos. Una relación similar es observada al comparar los experimentos E2 y E4 (2,9% y 2,25%, respectivamente), E2 y E5 (2,9% y 1,6%, respectivamente). Al comparar los experimentos E1 y E2, no muestran diferencias significativas pese a que emplearon presiones de trabajo y concentración de solución distintas (180 PSI y 2.25% para E1; y 165PSI y 2,9% para E2). Esto sugiere que existe un efecto combinado de ambas variables sobre los resultados.

4.2 Modelo matemático de optimización

Siguiendo el procedimiento indicado en el acápite 3.12.2, se realizó el cálculo de la Matriz B = $(X^TX)^{-1}X^TY$ para la obtención de los coeficientes codificados de la ecuación de forma cuadrática $Y = b_0 + b_1Z_1 + b_2Z_2 + b_{11}Z_1^2 + b_{22}Z_2^2 + b_{12}Z_1Z_2$. Se partió de la matriz de X indicada en la tabla 09. A continuación, mediante el cálculo matricial se determinó: la matriz Transpuesta de X, presentada en la tabla 21; el producto de la matriz transpuesta de X por la matriz de X, presentada en la tabla 22; y, la inversa del producto de la transpuesta de X por la matriz de X, presentada en la tabla 23.

***Tabla 21*. Matriz transpuesta de x: X^T**

1	1.0000	1	1	1	1	1	1	1
1	0.5000	-0.5	-1	-0.5	0.5	0	0	0
0	0.866	0.866	0	-0.866	-0.866	0	0	0
1	0.25	0.25	1	0.25	0.25	0	0	0
0	0.749956	0.749956	0	0.749956	0.749956	0	0	0
0	0.433	-0.433	0	0.433	-0.433	0	0	0

***Tabla 22*. Producto de la matriz transpuesta de X por la matriz de X: X^TX**

9	0	0	3	2.999824	0
0	3	0	0	0	0
0	0	2.999824	0	0	0
3	0	0	2.25	0.749956	0
2.999824	0	0	0.749956	2.249736	0
0	0	0	0	0	0.749956

Tabla 23. **Inversa del producto de la matriz transpuesta de X por la matriz de X: $(X^tX)^{-1}$**

0.333333	0	0	-0.33333	-0.33335	0
0	0.333333	0	0	0	0
0	0	0.333353	0	0	0
-0.33333	0	0	0.833333	0.166676	0
-0.33335	0	0	0.166676	0.833431	0
0	0	0	0	0	1.333412

Luego, se usaron los resultados del indicador retención del diseño hexagonal, indicados en la columna de Retención en la tabla 18, como matriz de la variable dependiente Y. A continuación, se realizó el cálculo del producto de la matriz transpuesta de X por la matriz de Y, la cual se muestra en la tabla 24; y el producto de la inversa del producto de la matriz transpuesta de X por la matriz de X por el producto de la transpuesta de X por la matriz de Y, el cual se muestra en la tabla 25, definiendo los coeficientes de la ecuación codificada.

Tabla 24. **Producto de la matriz transpuesta de X por la matriz de Y: X^TY**

60.67826
1.732845
4.413448
20.52831
20.66126
0.322912

***Tabla 25*. Producto de la inversa del producto de la transpuesta de X por la matriz de X por el producto de la transpuesta de X por la matriz de Y: $(X^tX)^{-1}X^tY$**

b_0 =	6.50
b_1 =	0.58
b_2 =	1.47
b_3 =	0.32
b_4 =	0.41
b_5 =	0.43

Reemplazando los coeficientes en la ecuación cuadrática, se obtuvo la ecuación codificada:

$$Y = 6.5 + 0.58X_1 + 1.47X_2 + 0.32X_1^2 + 0.41X_2^2 + 0.43X_1X_2$$

A continuación, se procedió a decodificar los coeficientes de la ecuación cuadrática, empleado las ecuaciones indicadas en el acápite 3.12.2, cuyo resultado se muestra en la tabla 26.

***Tabla 26*. Coeficientes de la ecuación natural**

a_0=	19.0431
a_1=	-0.1386
a_2=	-5.4587
a_3=	0.0004
a_4=	0.9800
a_5=	0.0221

Reemplazando los coeficientes en la ecuación cuadrática, se obtuvo la ecuación natural:

$$Yest = 19.043 - 0.139Z_1 - 5.459Z_2 + 0.0004Z_1^2 + 0.98Z_2^2 + 0.022Z_1Z_2$$

Donde:

Yest : Variable dependiente Retención (kg/m^3)

Z_1 : Variable independiente Presión de trabajo (PSI)

Z_2 : Variable independiente Concentración de preservante (%)

4.2.1 *Análisis de significancia del modelo matemático*

Los coeficientes del modelo matemático son evaluados para analizar su significancia mediante la prueba de *T-Student*, definido en el acápite 3.12.2.1, mediante la determinación del cociente de cada coeficiente codificado y la desviación estándar asociada al coeficiente, como valor de la prueba de *T- Student* (test t-calculado). Para la determinación de la Desviación estándar asociada a los coeficientes se tomó los resultados de los experimentos repetidos (tres réplicas) del punto central del diseño hexagonal, para determinar la desviación estándar del error experimental. Finalmente, el valor de t-calculado asociado a cada coeficiente se compara con el valor crítico de la prueba (t-tabular), el cual se determinó para un nivel de significancia de 95% (p=0.05) y los grados de libertad del error experimental (gl_E = n-1) que es 2. Los coeficientes son considerados significativos si el valor de t-calculado es mayor al t-tabular.

La tabla 27 muestra los resultados de la prueba de T-Student para determinar la significancia de los coeficientes codificados. Se observa que los coeficientes para los términos lineales de las

variables independientes son significativos, lo cual indica que ambas variables independientes son significativas para el proceso estudiado en sus niveles de prueba. Es importante resaltar la alta significancia del término lineal para la variable Concentración de solución.

***Tabla 27*. Prueba de significancia para los coeficientes codificados**

Coeficientes	C_{ij}	Sbj^2	Sb_j	b_j	t_j	t_{tab} (95%; 2gl)	Significancia
x_1	0.33	0.01	0.12	0.58	4.728	2.92	Si
x_2	0.33	0.01	0.12	1.47	12.041	2.92	Si
x_1^2	0.83	0.04	0.19	0.32	1.680	2.92	No
x_2^2	0.83	0.04	0.19	0.41	2.143	2.92	No
x_1x_2	1.33	0.06	0.24	0.43	1.762	2.92	No

4.2.2 *Evaluación del modelo matemático*

El modelo matemático se evaluó con el empleo de las ecuaciones señaladas en el acápite 3.12.2.2 a través de una prueba F de Fisher con el objetivo de evaluar el ajuste del modelo matemático a los datos experimentales.

En la tabla 28 se observa la comparación entre los datos experimentales y los datos obtenidos con la ecuación cuadrática de Yest, de acuerdo a los niveles de las variables independientes para cada experimento realizado.

***Tabla 28*. Comparación de datos experimentales y datos obtenidos mediante la ecuación cuadrática de Yest**

No	X_1	X_2	Z_1	Z_2	Y	Yest	Y-Yest
1	1	0	180	2.25	7.45	7.40	0.06
2	0.5	0.866	165	2.90	8.58	8.97	-0.39
3	-0.5	0.866	135	2.90	7.74	7.96	-0.22
4	-1	0	120	2.25	6.19	6.24	-0.06
5	-0.5	-0.866	135	1.60	5.57	5.45	0.12
6	0.5	-0.866	165	1.60	5.66	5.59	0.07
7	0	0	150	2.25	6.45	6.50	-0.04
8	0	0	150	2.25	6.31	6.50	-0.19
9	0	0	150	2.25	6.73	6.50	0.23

Donde: X1 y X2 son los niveles codificados del modelo hexagonal; Z1 es la variable presión de trabajo; Z2 es la variable concentración de preservante; Y corresponde a los datos experimentales, Columna Yest corresponde a los datos obtenidos mediante la ecuación cuadrática, Columna Y-Yest corresponde a la diferencia entre ambos tipos de datos.

A continuación, se determinó el valor de F-tabular en las tablas correspondientes de la prueba de Fisher a un nivel de significancia del 95%, con los grados de libertad de los cuadrados medios de la falta de ajuste (gl_{FA}=1) y los grados de libertad de los cuadrados medios del error (gl_E=2), siendo que el modelo matemático se ajusta si el valor de F-calculado es menor al valor crítico F-tabular (1,2, 95%).

En la tabla 29 se presentan los resultados de la prueba de Fisher, donde el valor de F-calculado (4.92) es menor al valor de F-tabular (18.51), por lo que se concluye que el modelo matemático representa adecuadamente a los datos experimentales.

Tabla 29. **Prueba F-Fisher de evaluación del ajuste del modelo matemático a los resultados experimentales**

Parámetros estadísticos	Valores calculados
SS_R =	0.31
MS_R =	0.10
SS_{FA} =	0.22
MS_{FA} =	0.22
Fcal =	4.92
Ftab(1,2,95%) =	18.51

La Figura 13, muestra la representación gráfica de la ecuación natural de retención, empleando la herramienta de gráficos en 3D de geogebra.org, en el sitio web https://www.geogebra.org/classic#3d.

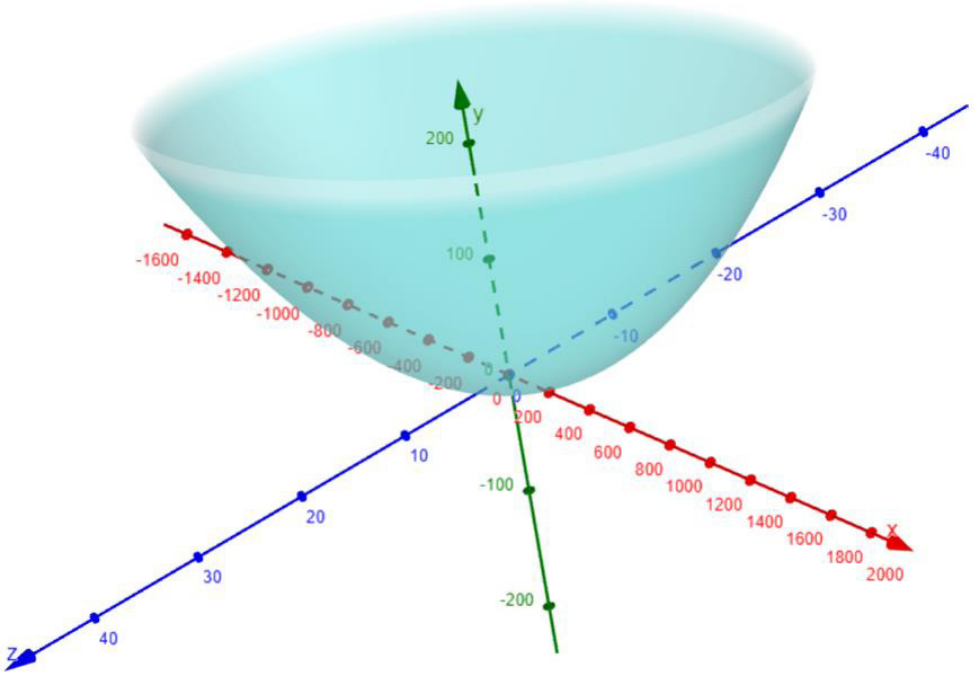


Figura 13. **Representación tridimensional del modelo matemático. Donde: eje y es la retención (kg/m^3); eje x es la presión (PSI), y; eje z es la concentración de la solución preservante (%)**
Fuente. **Elaboración propia**

La representación gráfica del modelo matemático en 3D muestra una parábola en rotación que tiende al infinito, considerando todos los valores numéricos que se pueden asignar a las variables. Por ello se hace necesario restringir la gráfica a los niveles de las variables empleados en el estudio.

En la tabla 30 se muestran las respuestas de retención obtenidas con el modelo matemático empleando valores para las variables independientes de Presión de trabajo y Concentración de preservante, dentro de los niveles usados en el estudio.

***Tabla 30*. Valores de retención (kg/m^3) obtenidos con el modelo matemático entre los niveles ensayados de Concentración de solución (%) y Presión de trabajo (PSI)**

Csol	**Presión (PSI)**												
(%)	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175	180
1.5	5.59	5.51	5.44	5.39	5.36	5.35	5.35	5.37	5.41	5.47	5.55	5.64	5.75
1.6	5.62	5.54	5.48	5.45	5.43	5.42	5.44	5.47	5.52	5.59	5.68	5.79	5.91
1.7	5.66	5.60	5.55	5.52	5.51	5.52	5.55	5.59	5.65	5.74	5.83	5.95	6.09
1.8	5.72	5.67	5.63	5.62	5.62	5.64	5.68	5.73	5.80	5.90	6.01	6.13	6.28
1.9	5.80	5.76	5.74	5.73	5.74	5.78	5.82	5.89	5.97	6.08	6.20	6.34	6.49
2.0	5.90	5.87	5.86	5.87	5.89	5.93	5.99	6.07	6.16	6.28	6.41	6.56	6.73
2.1	6.02	6.01	6.00	6.02	6.06	6.11	6.18	6.27	6.37	6.50	6.64	6.80	6.98
2.2	6.17	6.16	6.17	6.19	6.24	6.30	6.39	6.48	6.60	6.74	6.89	7.06	7.25
2.3	6.33	6.33	6.35	6.39	6.44	6.52	6.61	6.72	6.85	7.00	7.16	7.35	7.55
2.4	6.50	6.52	6.55	6.60	6.67	6.75	6.86	6.98	7.12	7.28	7.45	7.65	7.86
2.5	6.70	6.73	6.77	6.83	6.91	7.01	7.12	7.26	7.41	7.58	7.76	7.97	8.19
2.6	6.92	6.96	7.01	7.08	7.17	7.28	7.41	7.55	7.71	7.89	8.09	8.31	8.54
2.7	7.16	7.21	7.27	7.36	7.46	7.58	7.71	7.87	8.04	8.23	8.44	8.67	8.91
2.8	7.42	7.48	7.55	7.65	7.76	7.89	8.04	8.20	8.39	8.59	8.81	9.05	9.30
2.9	7.70	7.77	7.85	7.96	8.08	8.22	8.38	8.56	8.75	8.97	9.20	9.45	9.71
3.0	7.99	8.07	8.17	8.29	8.42	8.57	8.74	8.93	9.14	9.36	9.61	9.87	10.14

Con las respuestas obtenidas del modelo matemático se elaboró la figura 14, con ayuda de la herramienta gráfica en 3D del programa informático de Microsoft Excel 2024.

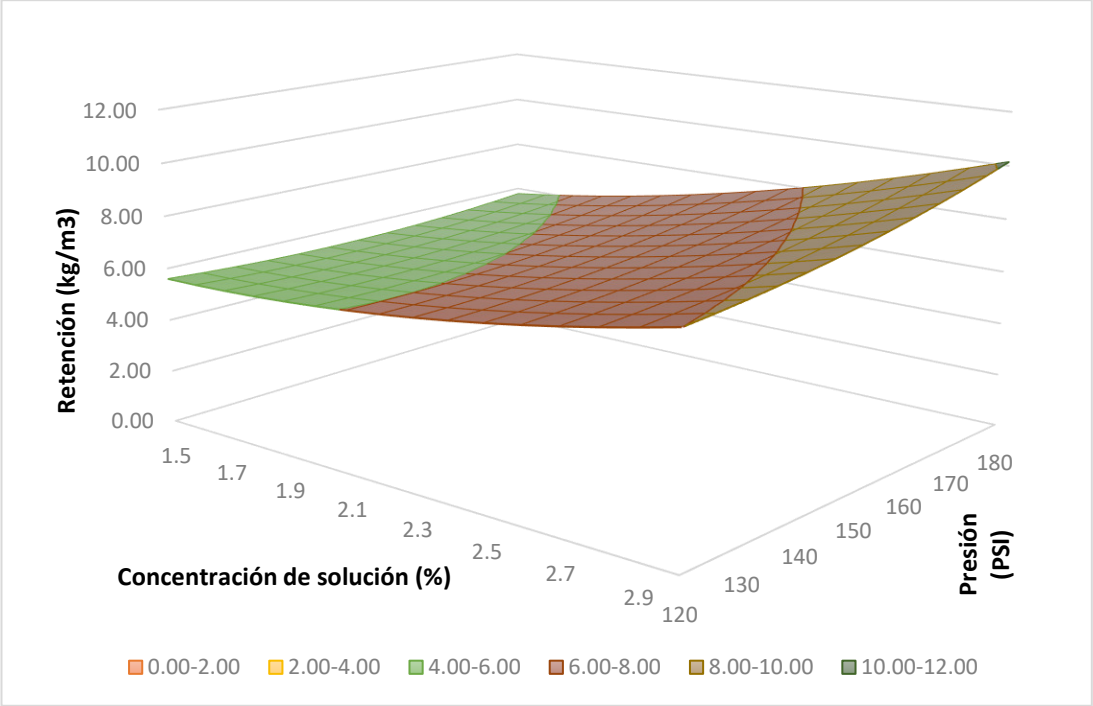


Figura 14. **Gráfico tridimensional del modelo matemático para retención de preservante, considerando los valores de las variables independientes entre los niveles superior e inferior del ensayo**
Fuente. Elaboración propia

La forma ligeramente plana de la figura 06 concuerda con el análisis de significancia del modelo matemático para los coeficientes, donde las variables independientes resultaron significativas en su término lineal, mas no significativas en sus términos cuadráticos y en el término multiplicativo, para los niveles de prueba empleados para las variables independientes.

4.3 Análisis de costos variables

Los postes para uso agrícola preservados con sales CCA requieren una retención mínima de 6,4 kg/m^3, de acuerdo a los requisitos de la madera preservada normados por AWPA U1. La tabla 31 presenta valores optimizados de las variables independientes de presión de trabajo y concentración de preservante para la retención mínima indicada, obtenidas a partir de la ecuación cuadrática.

***Tabla 31*. Variables optimizadas por el modelo matemático, para una retención mínima de 6,4 kg/m^3, en uso agrícola**

N° de Combinación	Presión de trabajo (PSI)	Concentración de preservante (%)
1	180	1.858
2	175	1.930
3	170	1.996
4	165	2.057
5	160	2.112
6	155	2.163
7	150	2.207
8	145	2.247
9	140	2.280
10	135	2.307
11	130	2.327
12	125	2.339
13	120	2.343

***Fuente*. Elaboración propia**

Con el objetivo de analizar los costos variables asociados a las combinaciones presentadas en la tabla 31, y determinar la opción de menor costo, se han considerado supuestos basados en los costos de los recursos e insumos requeridos para la operación de preservación en planta industrial, así como en las características de consumo energético de los equipos utilizados. Estos supuestos son los siguientes:

1. Tarifa de energía, categoría MT4, de acuerdo a OSINERGMIN, tarifa con simple medición de energía activa y contratación o medición de una potencia 1E1P (no se consideran los cargos fijos y cargo de energía reactiva por exceso del 30% de energía total): tomado de: https://www.osinergmin.gob.pe/Tarifas/Electricidad/PliegoTarifario?Id=150000

   - Cargo por energía activa: 28.68 ctm.S/kW.h + IGV (18%) = 33.84 ctm.S/kW.h Turno de trabajo fuera de horas punta

2. Tarifa de agua, Sedapal, categoría Industrial, grupo tarifario 1 (Lima metropolitana): tomado de: https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/4242599/3989288-estructura-tarifaria-agua-potable-y-alcantarillado-publicada-el-31-12-2024.pdf?v=1735925139

   - Consumo de agua potable: 7.846 S/m^3 + IGV (18%) = 9.258 S/m^3 ó 0.009258 S/L

3. Costo de preservante: Inquifesac, producto preservante CCA-C, tanque de 1800 kg, según cotización adjunta en Anexo 4:

   - Precio de venta: S/. 21768.84 + IGV (18%) = S/. 25687.23 Costo por kilogramo = S/. 14.27

4. Capacidad de autoclave industrial de 10 m de longitud y 1,25 m de diámetro, considerando el 50% del volumen total = 6.136 m^3

5. Características de la bomba de presión (centrífuga): Potencia = 5.5 kW; Caudal = 62 gpm (US) ó 234.695 L/min

Asimismo, siguiendo el mismo procedimiento para la obtención del modelo matemático para retención, se obtuvo una ecuación cuadrática para la variable dependiente Absorción bruta, como se indica a continuación:

$$Yest = 1205.307 - 3.847Z_1 - 540.956Z_2 + 0.01Z_1^2 + 76.177Z_2^2 + 0.865Z_1Z_2$$

Donde:
Yest : Variable dependiente Absorción bruta (kg/m^3)
Z1 : Variable independiente Presión de trabajo (PSI)
Z2 : Variable independiente Concentración de preservante (%)

En esta ecuación se reemplazaron los valores de las combinaciones mostradas en la tabla 31, obteniéndose como resultado los valores de absorción bruta que se presentan en la tabla 32. En este último se determinaron los costos referidos al uso de preservante y agua para cada combinación de las variables independientes. Se observa que los costos resultantes son menores a medida que aumenta la concentración de preservante en solución, debido a que también disminuye la absorción bruta de preservante en la madera. Esto se puede explicar ya que en cada combinación se trata de cumplir el requisito mínimo de retención de 6.4 kg/m^3, en consecuencia, para satisfacer dicho requisito, al disminuir la absorción bruta, también debe disminuir la penetración, por lo que la cantidad de insumos empleados en la impregnación es menor y genera menos costos.

Tabla 32. **Costo de solución preservante absorbida por carga de madera tratada en autoclave industrial**

N° Comb	ConPres (%)	Abs Buta (L/m^3)	D sol (kg/L)	mPres (kg)	Costo Pres (S/.)	mAgua (Kg)	costo agua (S/.)	Costo sol abs (S/.)
1	1.858	382.846	1.0079	43.993	627.78	2323.77	21.51	649.29
2	1.930	369.087	1.0083	44.072	628.91	2239.44	20.73	649.64
3	1.996	356.529	1.0087	44.043	628.50	2162.53	20.02	648.52
4	2.057	344.985	1.0090	43.933	626.93	2091.87	19.37	646.30
5	2.112	334.459	1.0093	43.744	624.23	2027.49	18.77	643.00
6	2.163	324.725	1.0096	43.509	620.88	1968.02	18.22	639.10
7	2.207	315.965	1.0098	43.207	616.57	1914.54	17.72	634.29
8	2.247	307.908	1.0100	42.878	611.87	1865.37	17.27	629.14
9	2.280	300.752	1.0102	42.495	606.41	1821.74	16.87	623.27
10	2.307	294.407	1.0104	42.098	600.74	1783.09	16.51	617.24
11	2.327	288.952	1.0105	41.681	594.79	1749.89	16.20	610.99
12	2.339	284.490	1.0106	41.260	588.79	1722.77	15.95	604.74
13	2.343	281.081	1.0106	40.837	582.74	1702.09	15.76	598.50

Donde:

N° Comb : Número de combinación de variables independientes, referido a la tabla 31

ConPres : Concentración de preservante en solución acuosa (%)

Abs Bruta : Absorción bruta (kg/m^3), obtenido de la ecuación del acápite 4.3

D sol : Densidad de solución preservante (kg/L), obtenido de la tabla de concentraciones de preservante CCA, anexo 3

mPres : Masa de preservante (kg), producto de la absorción bruta por el volumen de madera de una carga por la concentración de preservante

Costo Pres: Costo de preservante (S/.)

mAgua : Masa de agua en solución absorbida (kg), la diferencia entre la masa de solución y la masa de preservante

Costo sol abs : Costo de la solución preservante absorbida

La tabla 33 presenta los costos de consumo eléctrico de la bomba de presión en niveles desde 120 a 180 PSI. Considera a la potencia útil, estimada mediante la siguiente ecuación:

$$P\ útil = \frac{Q \times p}{600}$$

Donde:

P útil : Potencia útil (kW)

Q : Caudal (L/min)

p : Presión (bar)

El consumo eléctrico se determinó considerando un tiempo de funcionamiento de la bomba de presión de 20 minutos.

***Tabla 33*. Costo de consumo eléctrico de la bomba de presión por carga de madera preservada**

N° Comb	Presión (PSI)	Presión (bar)	Potencia útil kW	Consumo kW(20 min)	Costo S/. MT4
1	180	12.410	4.854	1.618	0.548
2	175	12.066	4.720	1.573	0.532
3	170	11.721	4.585	1.528	0.517
4	165	11.376	4.450	1.483	0.502
5	160	11.032	4.315	1.438	0.487
6	155	10.687	4.180	1.393	0.472
7	150	10.342	4.045	1.348	0.456
8	145	9.997	3.910	1.303	0.441
9	140	9.653	3.776	1.259	0.426
10	135	9.308	3.641	1.214	0.411
11	130	8.963	3.506	1.169	0.395
12	125	8.618	3.371	1.124	0.380
13	120	8.274	3.237	1.079	0.365

En la tabla 33 se observa que existe una relación directa entre la presión aplicada y la potencia útil de la bomba de presión, lo cual implica un menor consumo eléctrico y un menor costo de operación a menores presiones.

La tabla 34 presenta la suma de los costos variables analizados para las diferentes combinaciones de las variables independientes en tratamientos de preservación en autoclave industrial. Se observa que el componente costo de solución preservante absorbida es mucho mayor al costo de consumo eléctrico; y por lo tanto, de suma importancia para el análisis de optimización.

***Tabla 34*. Suma de costos variables de los tratamientos de preservación en autoclave industrial**

N° Comb	Presión (PSI)	ConPres (%)	Costo sol abs (S/.)	Costo S/. Energía	Suma S/. Costo variable
1	180	1.858	649.12	0.548	649.67
2	175	1.930	649.46	0.532	649.99
3	170	1.996	648.34	0.517	648.86
4	165	2.057	646.12	0.502	646.62
5	160	2.112	642.83	0.487	643.32
6	155	2.163	638.92	0.472	639.39
7	150	2.207	634.12	0.456	634.58
8	145	2.247	628.97	0.441	629.41
9	140	2.280	623.10	0.426	623.53
10	135	2.307	617.07	0.411	617.48
11	130	2.327	610.81	0.395	611.21
12	125	2.339	604.57	0.380	604.95
13	120	2.343	598.33	0.365	598.70

Asimismo, se observa una relación directa entre la suma de costos variables y la variable presión de trabajo, y una relación inversa entre la suma de costos variables y la variable concentración de preservante en solución. Estos resultados se explican debido a que el componente de mayor importancia en los costos es la absorción de solución preservante, la cual se absorbe en menores cantidades al aplicar presiones de trabajo menores.

En consecuencia, la combinación que cumple con una retención mínima de 6.4 kg/m^3 para uso agrícola y representa la menor suma de costos variables es la combinación 13, es decir aquella que aplica una presión de trabajo de 120 PSI y una concentración de preservante en solución de 2.343 %.

Finalmente, el proceso optimizado de preservación de tutores agrícolas de madera de bolaina blanca impregnadas con Sales CCA, presenta los siguientes valores ajustados para sus variables de tratamiento:

A.	Contenido de humedad de la madera	:	22 %
B.	Concentración de solución preservante	:	2.343 %
C.	Magnitud de vacío de trabajo	:	19.5 inHg
D.	Tiempo de vacío inicial de trabajo	:	10 min
E.	Magnitud de presión de trabajo	:	120 PSI
F.	Tiempo de presión de trabajo	:	20 min
G.	Tiempo de vacío final de trabajo	:	3 min

CONCLUSIONES

1. La concentración de la solución preservante demostró ser la variable independiente de mayor influencia sobre el indicador de retención de ingredientes activos, lo que la posiciona como el principal parámetro de optimización en los tratamientos de impregnación evaluados.

2. Si bien la presión de trabajo incide favorablemente en la penetración del preservante en la estructura celular de la madera, su efecto sobre la retención fue secundario en relación con la concentración, permitiendo una gestión más eficiente de los recursos energéticos.

3. El modelo matemático cuadrático aplicado al indicador de retención presentó coeficientes lineales estadísticamente significativos y un adecuado nivel de ajuste según la prueba de Fisher, lo que valida su uso como herramienta predictiva dentro del rango experimental evaluado.

4. El análisis de costos variables reveló que el insumo con mayor peso económico en el proceso de preservación fue el preservante absorbido, superando ampliamente al consumo energético y al consumo de agua requerida para la preparación de la solución.

5. Se evidenció que, al incrementar la concentración de la solución preservante, disminuye la absorción bruta, lo que permite reducir el

volumen de insumos utilizados y optimizar el costo sin comprometer los niveles de retención requeridos por la norma AWPA U1.

6. La combinación experimental más eficiente, en términos técnicos y económicos, correspondió a una presión de trabajo de 120 PSI y una concentración de 2.343 %, logrando cumplir con los criterios normativos al menor costo operativo.

7. Los parámetros de operación definidos constituyen una propuesta viable para la aplicación industrial del tratamiento en postes agrícolas de bolaina blanca, integrando desempeño técnico, cumplimiento normativo y optimización de costos.

RECOMENDACIONES

1. Dado que los modelos matemáticos demostraron validez dentro del rango experimental, se sugiere ampliar el estudio hacia una escala industrial, a fin de evaluar el comportamiento del tratamiento a mayor escala de operación y validar la reproducibilidad de los resultados obtenidos.

2. Establecer controles precisos sobre el contenido de humedad de la madera antes del proceso de impregnación, asegurando que este se mantenga por debajo del punto de saturación de las fibras y se distribuya de manera más uniforme. Esto no solo mejora la absorción efectiva del preservante, sino que también optimiza la distribución interna del producto químico, reduciendo variabilidad en los resultados y asegurando la homogeneidad del tratamiento.

3. Se recomienda priorizar el monitoreo de la concentración de la solución preservante durante el proceso, dado que este parámetro tiene una influencia significativa no solo en la eficacia técnica del tratamiento, sino también en la eficiencia económica, siendo el componente más costoso en términos de insumos.

4. Se sugiere incorporar variables adicionales en futuras investigaciones, como la edad de los árboles usados para postes agrícolas, la zona de procedencia de la madera o el tiempo de reposo post-tratamiento para la fijación del preservante, con el propósito de fortalecer el modelo predictivo y extender su aplicabilidad a otras condiciones de preservación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguilar (2019). *Propiedades mecánicas de madera de raleo de 6 años provenientes de plantaciones de Guazuma crinita en Puerto Inca-Huánuco*. [Tesis de ingeniería, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio institucional. https://repositorio.lamolina.edu.pe/items/2002d86c-1bee-466a-be89-f9babaf7d0cd

Amaya, J. (2009). *El cultivo del maracuyá Passiflora edulis form. Flavicarpa*. Gerencia Regional Agraria La Libertad, Trujillo-Perú.

American Wood Protection Association (AWPA) (2015a). *A3-15 Standard for determining the penetration of preservatives and fire retardants.* AWPA, Inc.

American Wood Protection Association (AWPA) (2015b). *P5-15 Standard for waterborne preservatives*. AWPA, Inc.

American Wood Protection Association (AWPA) (2026a). *T1-26 Use Category system: Processing and treatment standard*. AWPA, Inc.

American Wood Protection Association (AWPA) (2026b). *U1-26 Use Category system: User Specification for Treated Wood*. AWPA, Inc.

An, Y. (2000). *Influence of drying processes on the treatability and CCA distribution in the heartwood of five Canadian softwoods* (T). University of British Columbia. Retrieved from https://open.library.ubc.ca/collections/ubctheses/831/items/1.0099424

Ayala, J. y Pardo, R. (1995). *Optimización por diseños experimentales*. Consejo nacional de ciencia, tecnología e innovación tecnológica (CONCYTEC, Perú).

Box, G., Hunter, W. y Hunter, J. (1993). *Estadística para investigadores. Introducción al diseño de experimentos, análisis de datos y construcción de modelos.* Edit. Reverté S.A.

Cáceres, N. (2008). *Compendio de Información Técnica de 32 Especies Forestales – Tomo II*. CITEmadera. Lima - Perú.

Cevallos, J. (1999). *12 técnicas para trabajar con calidad total*. C.A.C. Perú.

Donoso, J., Manríquez, L. (1978). *Estudio de la impregnación a vacío presión de maderas refractarias*. Boletín Técnico Nº 53. Facultad de Ciencias Forestales. Departamento de Ciencia y Tecnología de la Madera. Universidad de Chile.

Dourojeanni, M. (2002). Aprovechamiento del barbecho forestal en áreas de agricultura migratoria en la amazonía peruana. *Revista Forestal del Perú.* Vol. 14(2):1-33.

DS No 017-2014-MINAGRI. Que aprueba el régimen de promoción de plantaciones forestales en tierras de propiedad privada. Diario oficial El peruano (2014). https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/marcolegal/normaslegales/decretossupremos/2014/ds17-2014-minagri.pdf

González, R. (1986). *Preservación y secado de la madera*. Universidad Nacional Agraria La Molina.

González, R. (1996). *Secado de la Madera*. Universidad Nacional Agraria La Molina. Concytec. Perú.

Greaves, H. (1972). Structural distribution of chemical components in preservative-treated wood by energy dispersion X-ray analysis. Material un organismen, 7(4):277-286

Guedes, D. P., Brito, T. R., Silva, J. R. M., Baraúna, E. E. P., Andrade, A. C. A., Setter, C., & Trugilho, P. F. (2022). Effect of moisture and active ingredient concentration on CCA-C retention. *Scientia Forestalis*, *50*, e3919.

https://doi.org/10.18671/scifor.v50.46

Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana (IIAP) (2009). Evaluación económica de parcelas de regeneración natural y plantaciones de Bolaina blanca en el departamento de Ucayali. *Avances económicos N° 11.* *https://repositorio.iiap.gob.pe/bitstream/20.500.12921/225/1/Alvarez_documentotecnico_2009_11.pdf*

Instituto Nacional de la Calidad (INACAL) (2017a). *Norma técnica peruana NTP 251.026:1974 (revisada el 2017). Preservación de madera. Penetración y retención de los preservadores de la madera*. *1era edición.*

Instituto Nacional de la Calidad (INACAL) (2017b). *Norma técnica peruana NTP 251.035:1987 (revisada el 2017). Preservación de madera. Composición química de los preservadores para madera. 1era edición.*

Instituto Nacional de la Calidad (INACAL) (2018a). *Norma técnica peruana NTP 251.034:2018. Preservación de madera. Preservación de postes de madera. Tratamientos de preservación a presión*. 2da edición.

Instituto Nacional de la Calidad (INACAL) (2018b). *Norma técnica peruana NTP 251.025:2008 (revisada el 2018). Preservación de maderas. Extracción de muestras de madera preservada. 2da edición.*

Instituto Nacional de la Calidad (INACAL) (2020). *Norma técnica peruana NTP 251.010:2020. Madera.Métodos para determinar el contenido de humedad. 4ta edición.*

Junta del Acuerdo de Cartagena (JUNAC) (1983). *Secado y preservación de 105 maderas del grupo andino.* JUNAC

Junta del Acuerdo de Cartagena (JUNAC) (1988). *Manual del grupo andino para la preservación de maderas.* JUNAC

Kamdem, D. P., & Chow, P. (1999). The effect of pressure on retention and bending properties of copper naphthenate and CCA type C treated hardwoods. *Wood and fiber science*, 128-135.

Lebow, S. T. (2010). Wood preservation. Wood handbook: wood as an engineering material: chapter 15. Centennial ed. General technical report FPL; GTR-190. Madison, WI: US Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010: p. 15.1-15.28., 190, 15-1.

Lopes, D. J. V., Paes, J. B., Jankowsky, I. P., Segundinho, P. G. A., & Vidaurre, G. B. (2017). Influências do diâmetro e umidade da madeira na qualidade do tratamento preservativo. Floresta e Ambiente, 24(1), 1-10. http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.020716.

Martel, E., y Alván, G. 2011. *Manual técnico para el desarrollo forestal del valle del Palcazú.* Proyecto especial Pichis Palcazú-Perú.

Ministerio de Agricultura (MINAG). 2008. *Informe de registro de productores de uva en las regiones de Ica, Arequipa, Moquegua, Tacna y Lima provincias.* https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/herramientas/boletines/DocumentoFinalVid.pdf

Nicholas, D. D., & Siau, J. F. (1973). Factors influencing the treatability of wood. In D. D. Nicholas (Ed.), Wood deterioration and its prevention by preservative treatments (Vol. II, pp. 299-343). Syracuse: Syracuse University Press

Peraza, F (2002). Protección preventiva de la madera. AITIM. cEspaña.

Pizzi Pizzi, A., Orovan, E., Singmin, M., Jansen, A., Vogel, M. (1984). Experimental variations in the distribution of CCA preservative in lignin and holocellulose as a function of treating conditions (temperature, concentration, Ph, species and time). Holzforschung und Holzverwertung. 36v.4:67/77. http://wwwresearchgate.net/journal/Holzforschung-und-Holzverwertung-0018-3849

Proyecto Perú Biodiverso (PDB). (2009). *Manual de producción del Sacha inchi para el biocomercio y agroforestería sostenible*. Cooperación Alemana al Desarrollo (GTZ).

https://cooperacionalemana.pe/GD/280/manualproducciondesachainchi.pdf

Revilla-Chávez, J., López-Galán, E., Gonzáles-Alvarado, A., Manturano Pérez, R., Saenz-Ramírez, L., Guerra-Arévalo, H., Rojas-Mego, K. y Mori-Vásquez, J. (2022). Valoración económica de plantaciones de bolaina blanca (*Guazuma crinita* Mart.) en Ucayali, Perú. *Folia Amazónica*, *31*(2), 243-257.

Rochon, C., Margolis, H., Weber, J. (2007). Genetic variation in growth of *Guazuma crinita* (Mart.) Trees at an early age in the Peruvian Amazon. *Forest Ecology and Management 243*(2-3), 291-298p.

Roy, Ranjit K. (2010) *A primer on the Taguchi method*. Second edition. Society of Manufacturing Engineers. EEUU.

Rudman, P. (1966). Studies in wood preservation. Pt. III. The penetration of the fine structure of wood by inorganic solutions, including wood preservatives. Holzforschung 20:60–67

SALAS, V. (2005). Impregnabilidad de la madera eucalyptus nitens. Chile, Valdivia.

Sales-Campos C, Vianez BF, Mendonça MS. (2003). Estudo da variabilidade da retenção do preservante CCA tipo A na madeira de Brosimum rubescens Taub. Moraceae – (pau-rainha) uma espécie madeireira da Região Amazônica. *Revista Árvore*; 27(6): 845-853 http://www.scielo.br/j/rarv/a/RhhySTzFf4ZWPp93QJNsfqc/?lang=pt

Schneid, E., Gatto, D. A., & de Cademartori, P. H. G. (2013). Avaliação do tratamento sob pressão de postes de Eucalyptus saligna e Eucalyptus cloeziana com CCA-C Evaluation of the treatment with CCA-C under pressure on Eucalyptus saligna and Eucalyptus cloeziana Wood poles. Sci. For., Piracicaba, v. 41, n. 100, p. 541-547

Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR). (2019). *Anuario Forestal y de Fauna Silvestre 2018*. Ministerio de Desarrollo y Riego.

Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR). (2020). *Anuario Forestal y de Fauna Silvestre 2019*. Ministerio de Desarrollo y Riego.

Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR). (2021). *Anuario Forestal y de Fauna Silvestre 2020*. Ministerio de Desarrollo y Riego.

Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR). (2022). *Anuario Forestal y de Fauna Silvestre 2021*. Ministerio de Desarrollo y Riego.

Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR). (2023). *Anuario Forestal y de Fauna Silvestre 2022*. Ministerio de Desarrollo y Riego.

Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR). (2024). *Anuario Forestal y de Fauna Silvestre 2023*. Ministerio de Desarrollo y Riego.

Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR). (2025). *Anuario Forestal y de Fauna Silvestre 2024*. Ministerio de Desarrollo y Riego.

Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR). (2026). *Anuario Forestal y de Fauna Silvestre 2025*. Ministerio de Desarrollo y Riego.

Siau, J.F. (1984). Transport processes in wood. Springer, Heidelberg

Suiresz, J. (2000). Efecto de la impregnación con CCA (cromo-cobre-arsénico) sobre las propiedades físicas y mecánicas de la madera de Pinus Taeda L. implantado en la provincia de Misiones. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Misiones. https://rid.unam.edu.ar/bitstream/handle/20.500.12219/2473/SUIRESZ%20Teresa%20María%20_2000_%20Efecto%20de%20la%20impregnación%20con%20CCA.pdf?sequence=1

Tarmian, A., Zahedi Tajrishi, I., Oladi, R., & Efhamisisi, D. (2020). Treatability of wood for pressure treatment processes: a literature review. *European Journal of Wood and Wood Products*, *78*, 635-660.

Valdivia, A. y Sotelo, M. (1993). Posibilidad de uso de la madera rolliza de Bolaina blanca como material estructural en construcciones de madera. *Revista Forestal del Perú.*

Valdivieso, M. (2000). *Proyecto productivo integrado pimienta*. Proyecto Desarrollo de Agroempresas Rurales. http://www.ciat.cgiar.org/agroempresas/espanol/inicio.htm

Venkatasamy, R., Okwara, D.N. (2017). Fixation, permanency, and leaching of copper chrome arsenate (CCA) wood preservatives: an overview of theories, mechanisms, and implications. Moi University. Eldoret – Kenya http://zenodo.org/records/813783

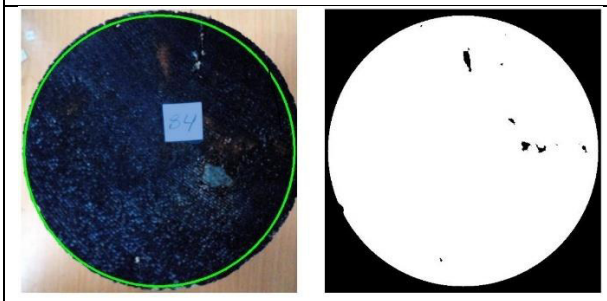
Vidal, J., Envangelista, W., De Castro Silva, J., Jankowsky, I. (2015). Preservação de madeiras no brasil: Histórico, cenário atual e tendencias. *Ciencia Florestal (2015) 25(1) 257-270* http://www.mendeley.com/catalogue/07eaaa42-d8d9-3c79-9943-db735a737c94/

Anexo 1

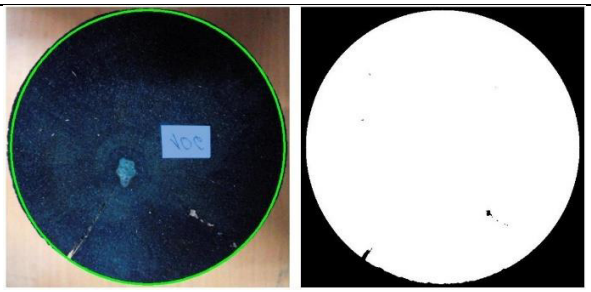
Penetración de preservante en porcentaje (%) por tratamiento de preservación

A. Tratamientos del arreglo Ortogonal de experimentos $L_8(2^7)$:

Tratamiento T1



Probeta N° 84, penetración = 99.85%



Probeta N° 106, penetración = 100%



Probeta N° 148, penetración = 48.34%



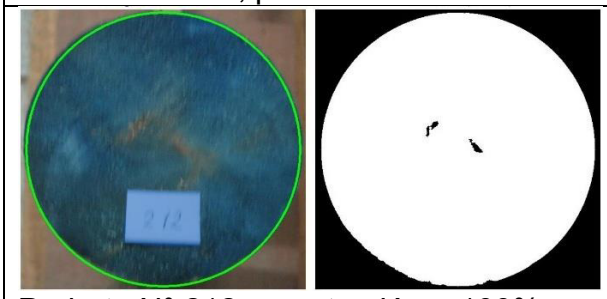
Probeta N° 155, penetración = 65.41%



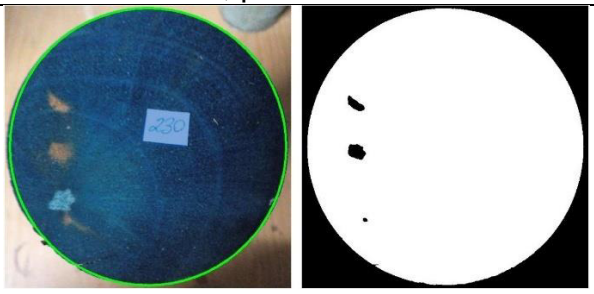
Probeta N° 190, penetración = 72.15%



Probeta N° 207, penetración = 79.45%



Probeta N° 212, penetración = 100%



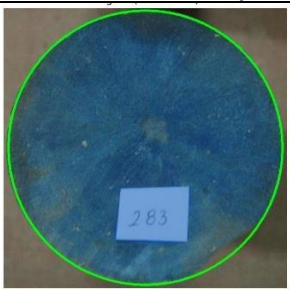
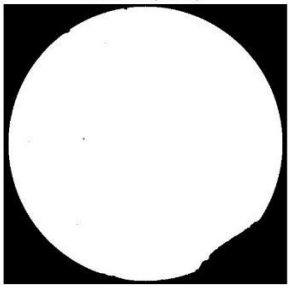
Probeta N° 230, penetración = 99.34%



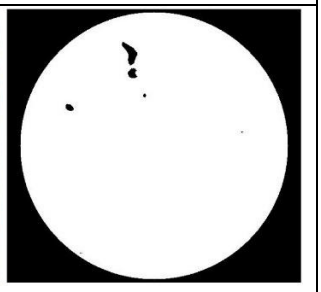

Probeta N° 236, penetración = 90.74%




Probeta N° 259, penetración = 55%

Probeta N° 283, penetración = 100%

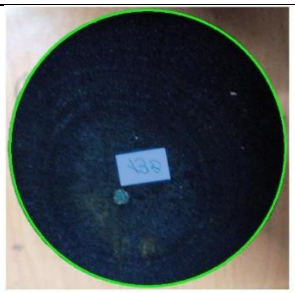
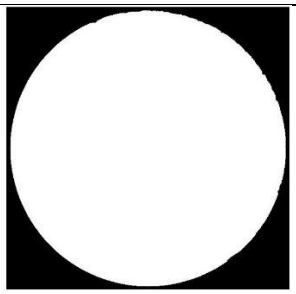



Probeta N° 292, penetración = 99.70%

Tratamiento T2




Probeta N° 66, penetración = 73.7%

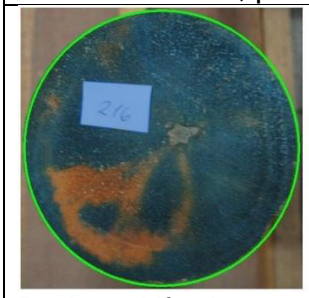
Probeta N° 138, penetración = 100%



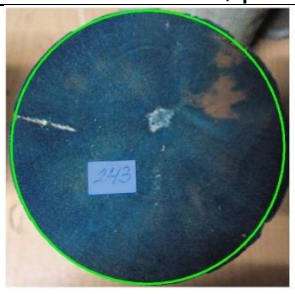
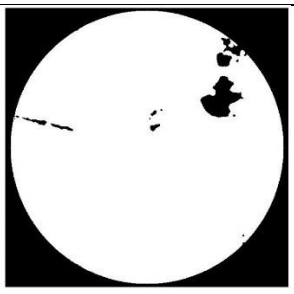

Probeta N° 159, penetración = 50.43%



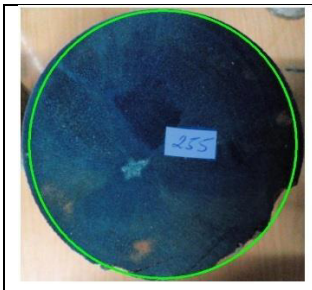

Probeta N° 172, penetración = 59.74%

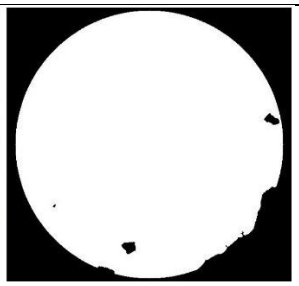



Probeta N° 216, penetración = 82.5%

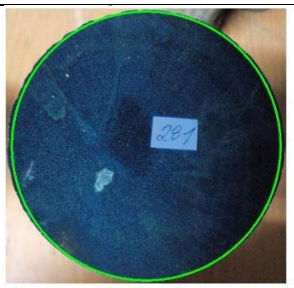



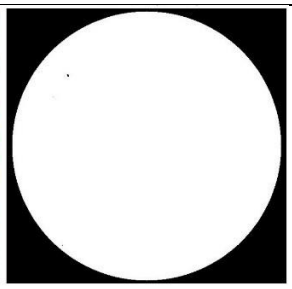
Probeta N° 243, penetración = 94.8%





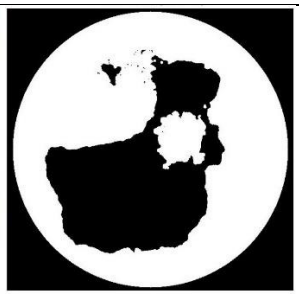
Probeta N° 255, penetración = 99.6%



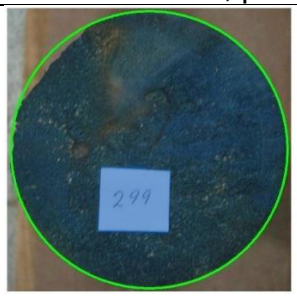


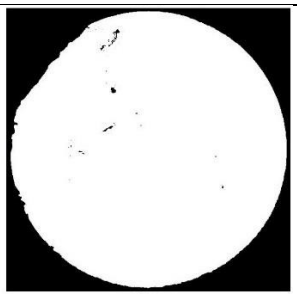
Probeta N° 281, penetración = 100%



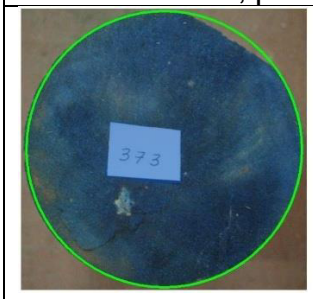


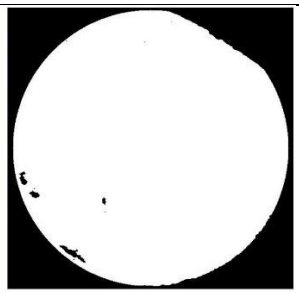
Probeta N° 288, penetración = 62.55%



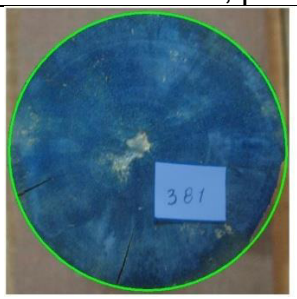


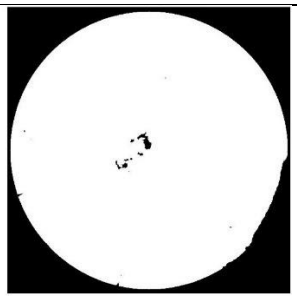
Probeta N° 299, penetración = 100%





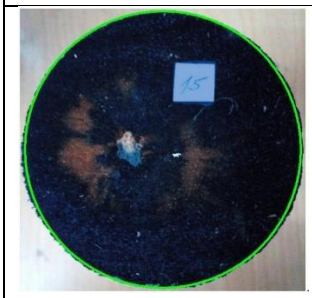
Probeta N° 373, penetración = 100%

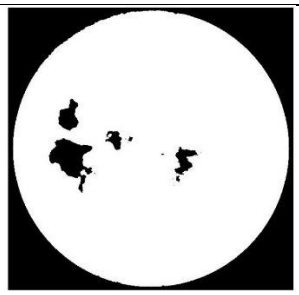




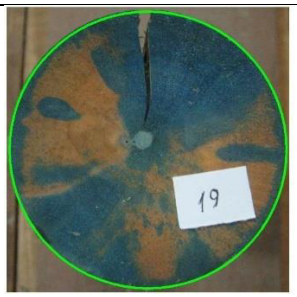
Probeta N° 381, penetración = 100%

Tratamiento T3





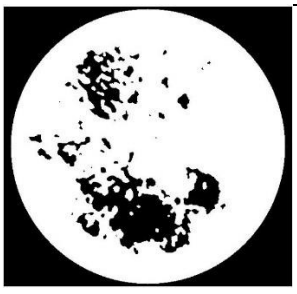
Probeta N° 15, penetración = 91.52%



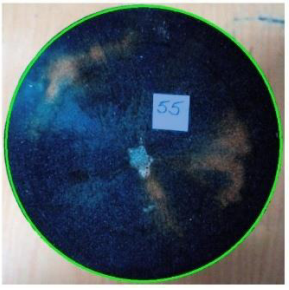


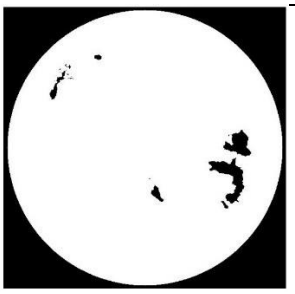
Probeta N° 19, penetración = 59.45%



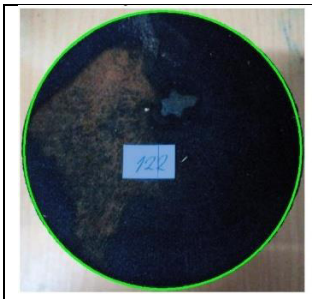


Probeta N° 21, penetración = 51.04%

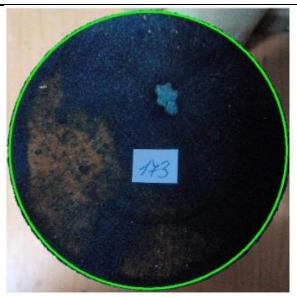
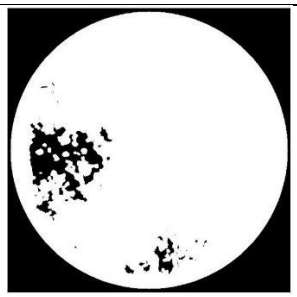


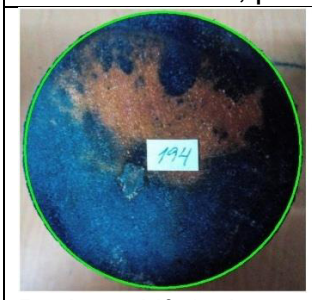
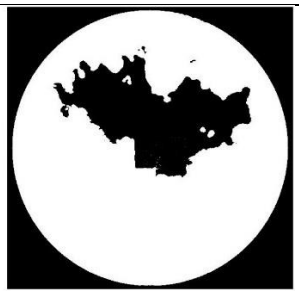


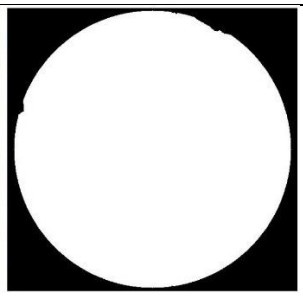
Probeta N° 55, penetración = 91.48%

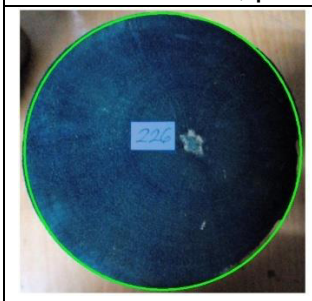
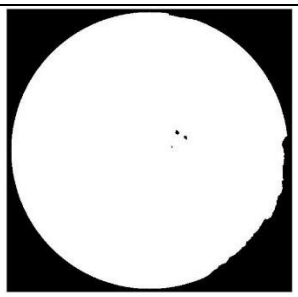


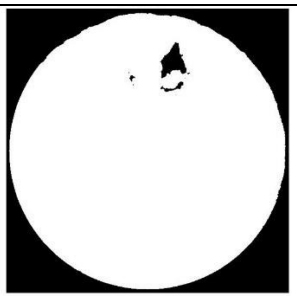
Probeta N° 122, penetración = 78.32%

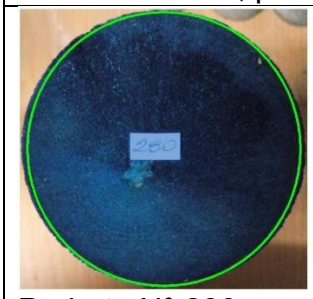
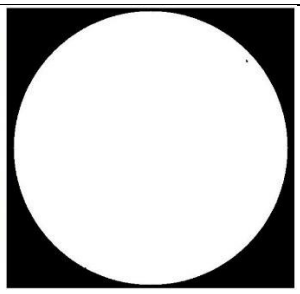


Probeta N° 173, penetración = 82.61%

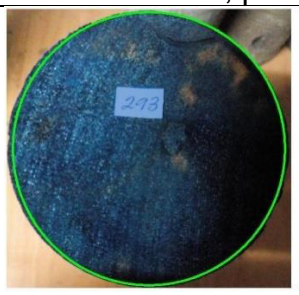
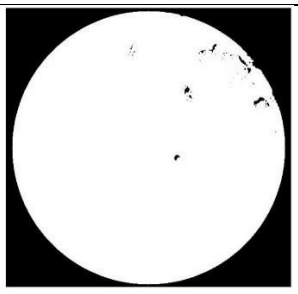


Probeta N° 194, penetración = 66.01%



Probeta N° 218, penetración = 100%

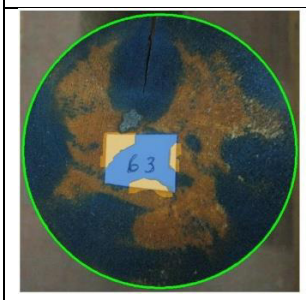


Probeta N° 226, penetración = 100%



Probeta N° 237, penetración = 92.95%

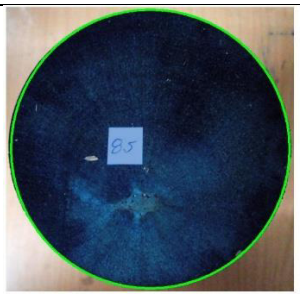
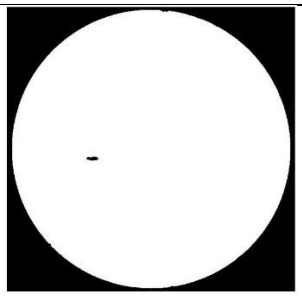


Probeta N° 280, penetración = 100%

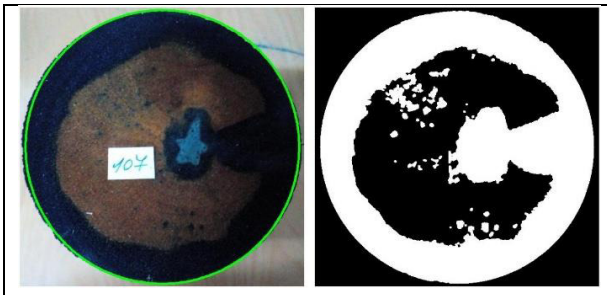


Probeta N° 293, penetración = 99.7%

Tratamiento T4

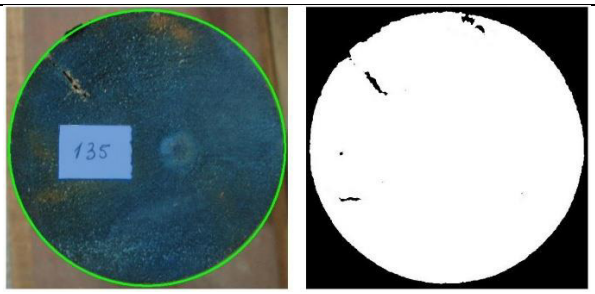


Probeta N° 63, penetración = 48.74%



Probeta N° 85, penetración = 100%



Probeta N° 107, penetración = 54.33%



Probeta N° 135, penetración = 99.92%



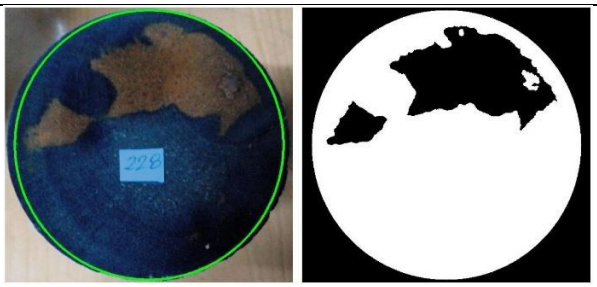
Probeta N° 185, penetración = 92.73%



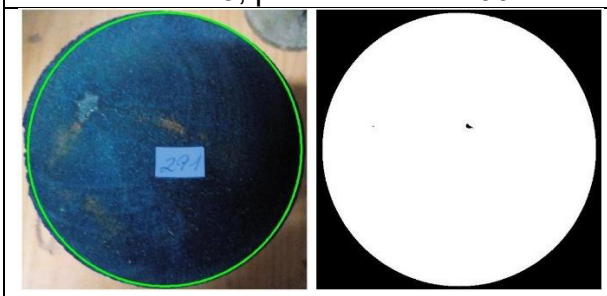
Probeta N° 200, penetración = 62.53%



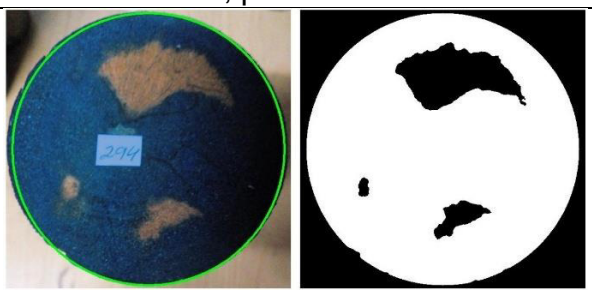
Probeta N° 213, penetración = 100%



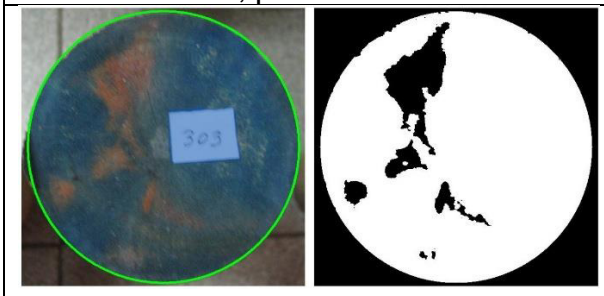
Probeta N° 228, penetración = 77%



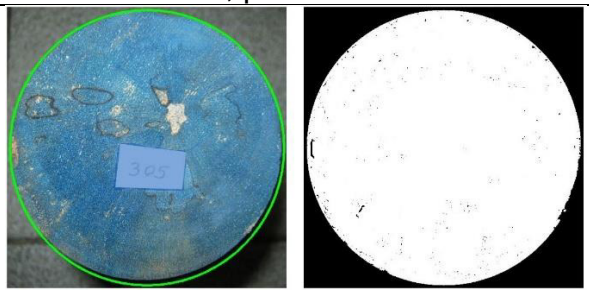
Probeta N° 291, penetración = 100%



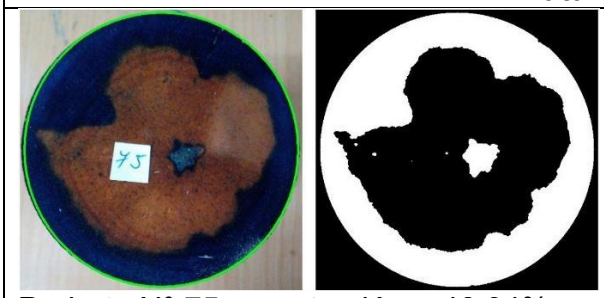
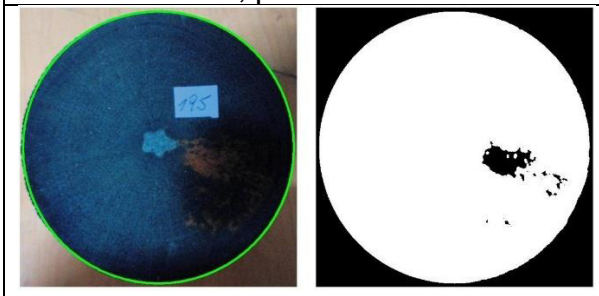
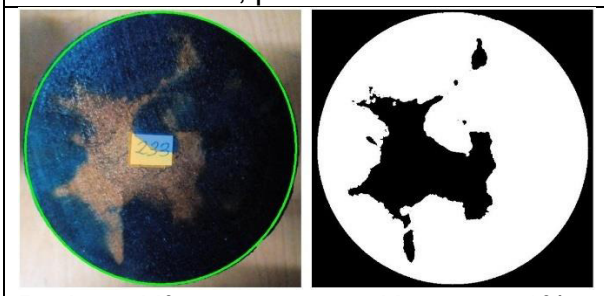
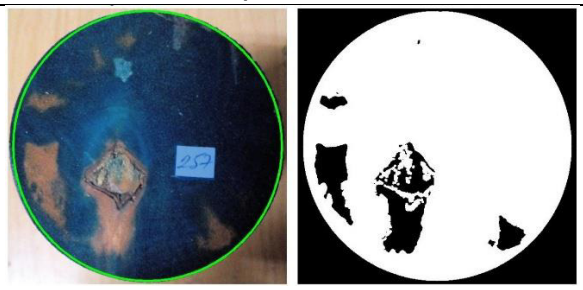
Probeta N° 294, penetración = 85.88%

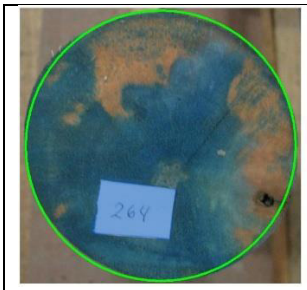


Probeta N° 303, penetración = 87.29%



Probeta N° 305, penetración = 100%

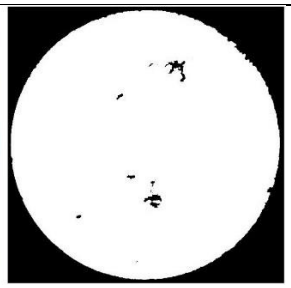
Tratamiento T5	
 Probeta N° 75, penetración = 46.04%	 Probeta N° 90, penetración = 56.23%
 Probeta N° 114, penetración = 44.02%	 Probeta N° 130, penetración = 54.31%
 Probeta N° 169, penetración = 42.06%	 Probeta N° 187, penetración = 91.13%
 Probeta N° 195, penetración = 96.11%	 Probeta N° 208, penetración = 71.97%
 Probeta N° 233, penetración = 76.51%	 Probeta N° 257, penetración = 82.87%





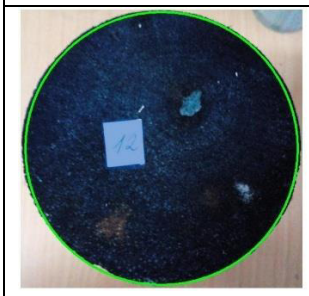
Probeta N° 264, penetración = 69.47%

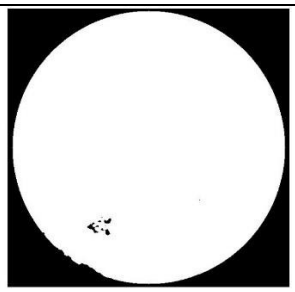




Probeta N° 357, penetración = 99.82%

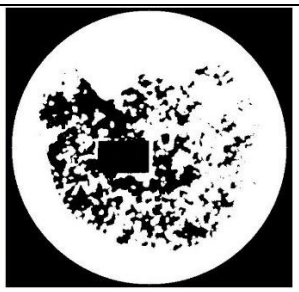
Tratamiento T6





Probeta N° 12, penetración = 98.38%





Probeta N° 121, penetración = 45.67%





Probeta N° 174, penetración = 71.90%





Probeta N° 181, penetración = 58.77%



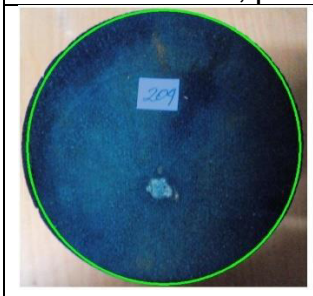


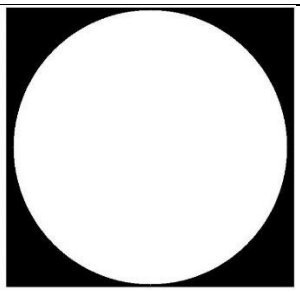
Probeta N° 197, penetración = 48.51%





Probeta N° 204, penetración = 43.64%





Probeta N° 209, penetración = 100%

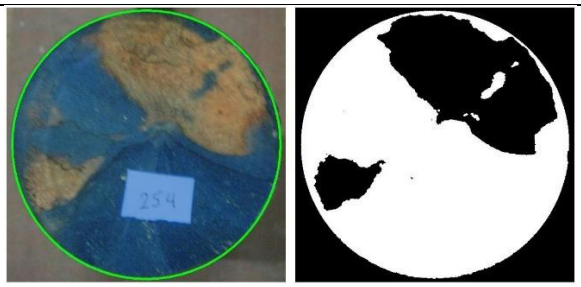




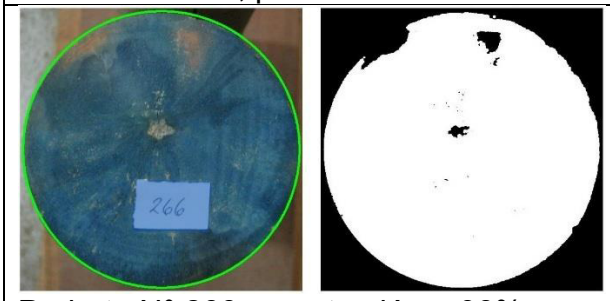
Probeta N° 220, penetración = 40.40%



Probeta N° 232, penetración = 36.13%



Probeta N° 254, penetración = 64.83%

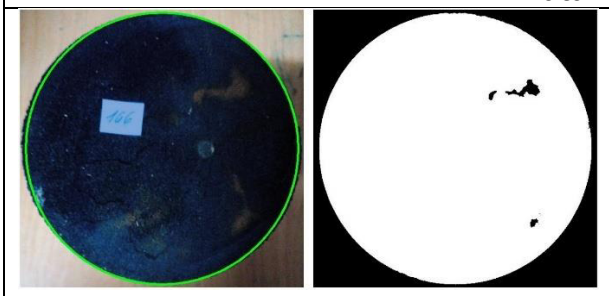


Probeta N° 266, penetración = 98%



Probeta N° 308, penetración = 73.42%

Tratamiento T7



Probeta N° 166, penetración = 97.68%



Probeta N° 176, penetración = 79.82%



Probeta N° 192, penetración = 48.56%



Probeta N° 206, penetración = 99%



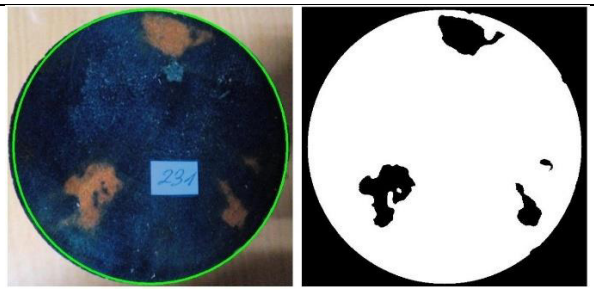
Probeta N° 210, penetración = 42.02%



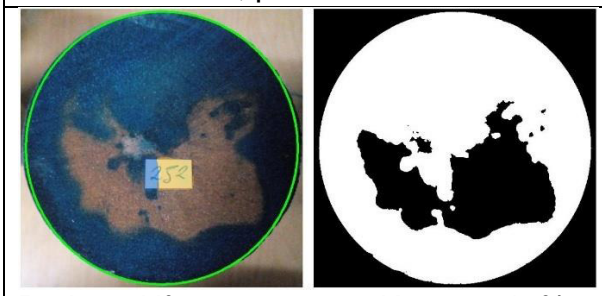
Probeta N° 215, penetración = 44.43%



Probeta N° 219, penetración = 45.94%



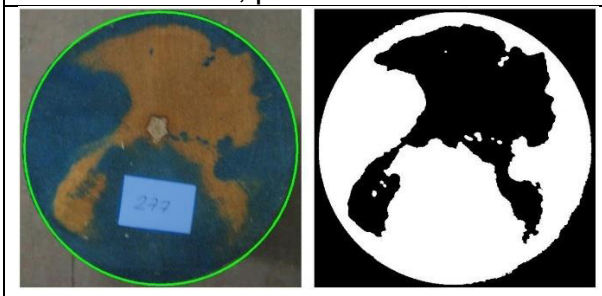
Probeta N° 231, penetración = 90.71%



Probeta N° 252, penetración = 69.17%



Probeta N° 256, penetración = 96.66%

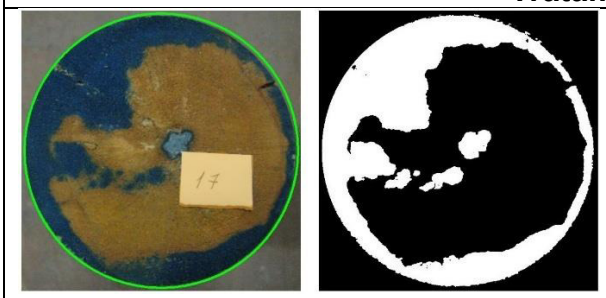


Probeta N° 277, penetración = 64.37%

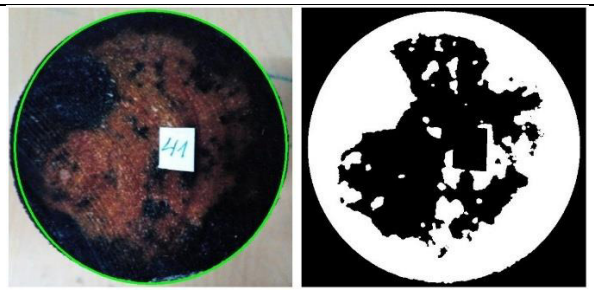


Probeta N° 374, penetración = 56.57%

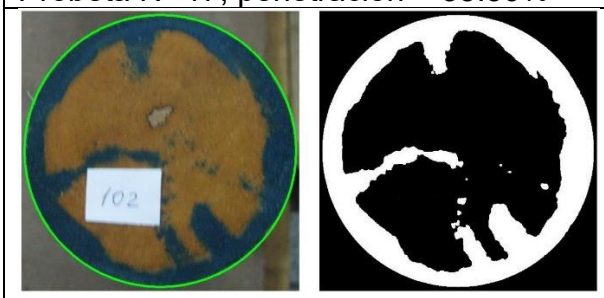
Tratamiento T8



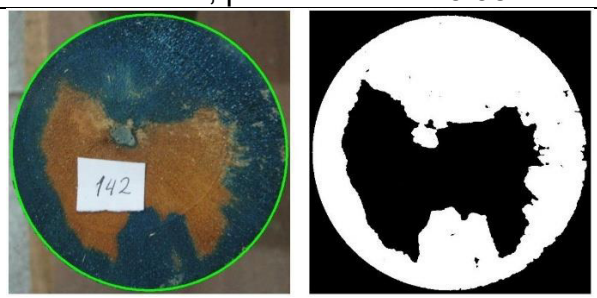
Probeta N° 17, penetración = 35.30%



Probeta N° 41, penetración = 43.98%



Probeta N° 102, penetración = 35.86%



Probeta N° 142, penetración = 63.82%



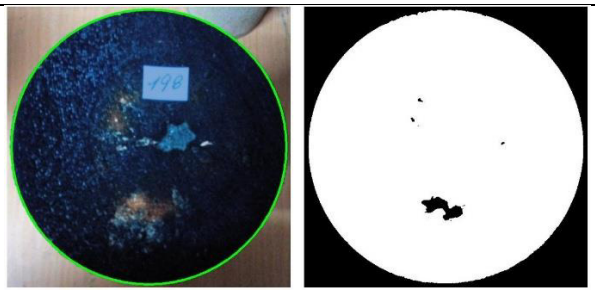
Probeta N° 154, penetración = 39.85%



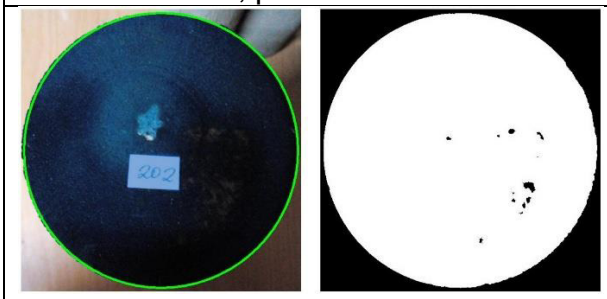
Probeta N° 165, penetración = 51.64%



Probeta N° 182, penetración = 69.89%



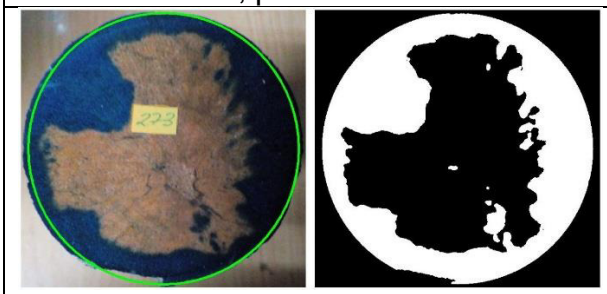
Probeta N° 198, penetración = 93.41%



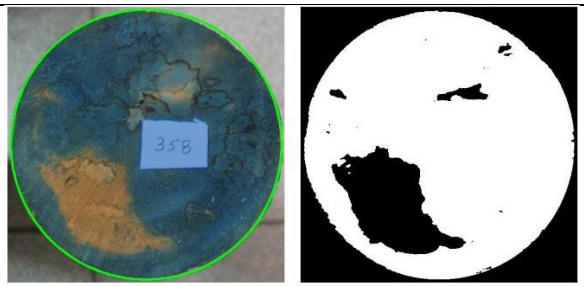
Probeta N° 202, penetración = 96.45%



Probeta N°247, penetración = 61.70%



Probeta N° 273, penetración = 48.09%



Probeta N° 358, penetración = 87.89%

Anexo 1

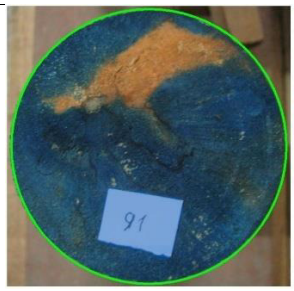
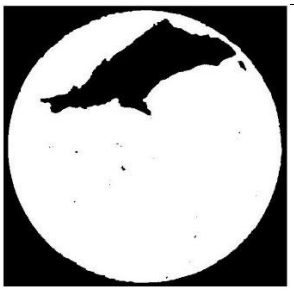
Penetración de preservante en porcentaje (%) por tratamiento de preservación

A. Tratamientos del diseño Hexagonal de experimentos:

Tratamiento E1




Probeta N° 70, penetración = 43.14%

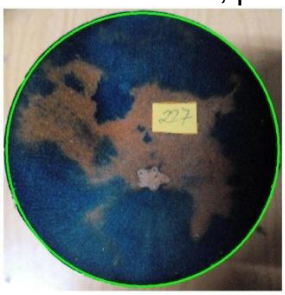
Probeta N° 91, penetración = 85.65%



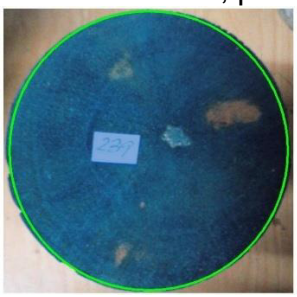
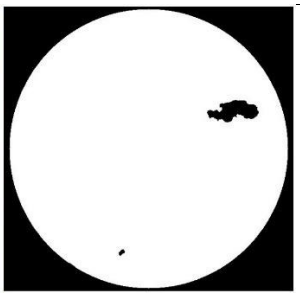

Probeta N° 145, penetración = 49.48%



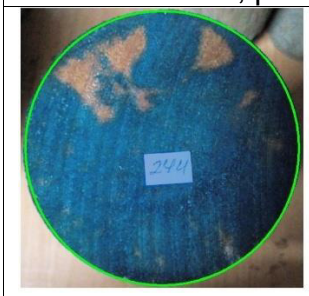
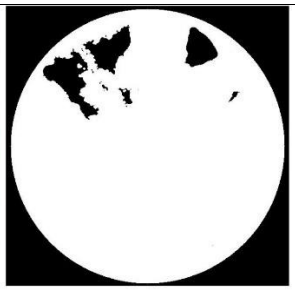

Probeta N° 189, penetración = 60.57%



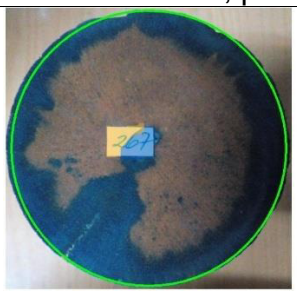

Probeta N° 227, penetración = 69.17%

Probeta N° 239, penetración = 98.28%

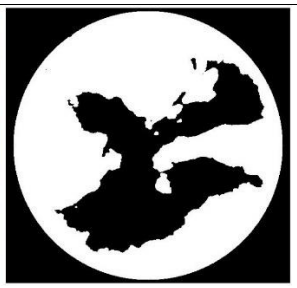



Probeta N° 244, penetración = 91.53%

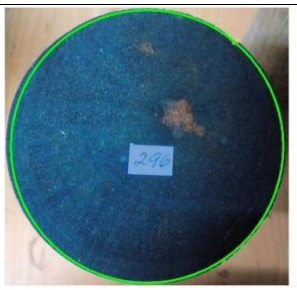


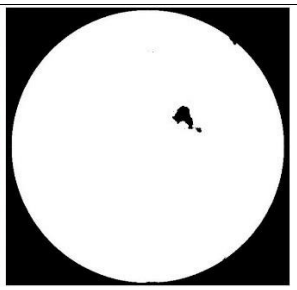

Probeta N° 267, penetración = 46.88%



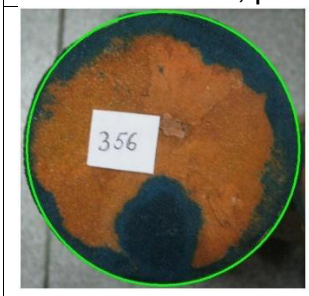


Probeta N° 275, penetración = 64.55%



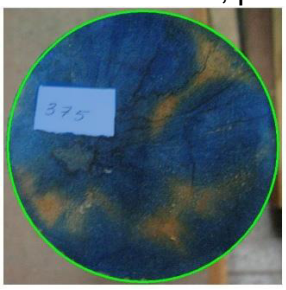


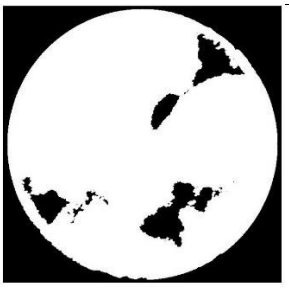
Probeta N° 296, penetración = 99.71%





Probeta N° 356, penetración = 37.99%

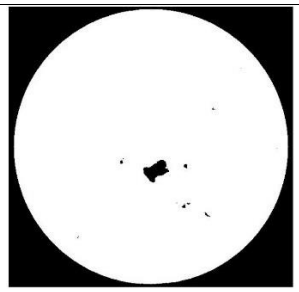




Probeta N° 375, penetración = 78.99%

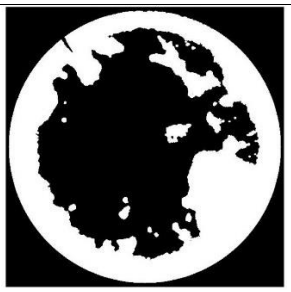
Tratamiento E2



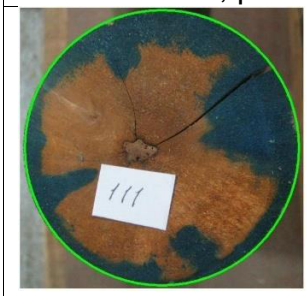


Probeta N° 37, penetración = 91.27%





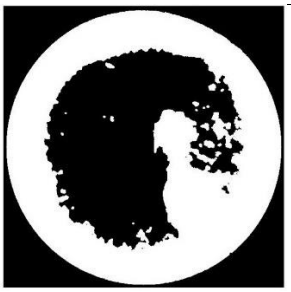
Probeta N° 52, penetración = 36.14%



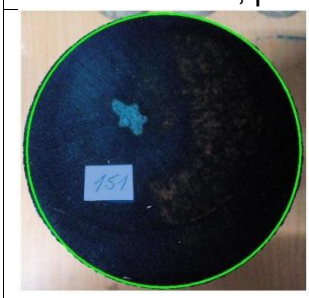


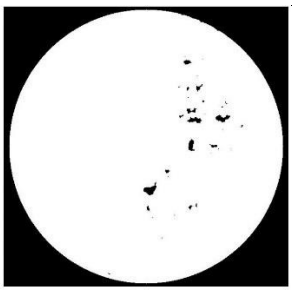
Probeta N° 111, penetración = 43.02%





Probeta N° 120, penetración = 47.36%





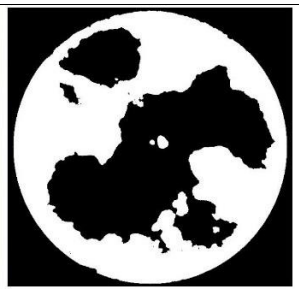
Probeta N° 151, penetración = 95.26%



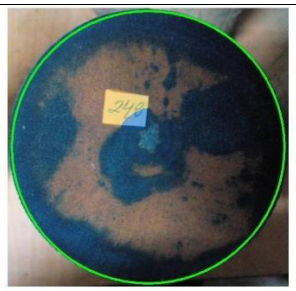


Probeta N° 223, penetración = 71.56%





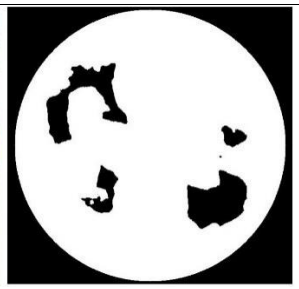
Probeta N° 238, penetración = 49.89%





Probeta N° 248, penetración = 60.69%



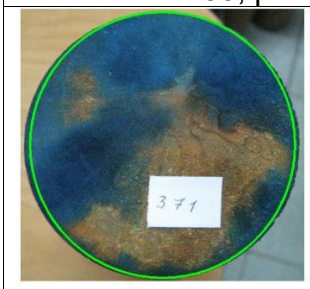


Probeta N° 286, penetración = 87.60%



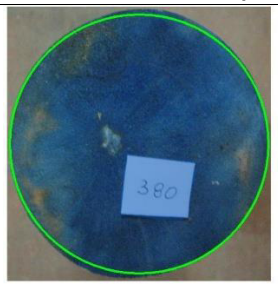


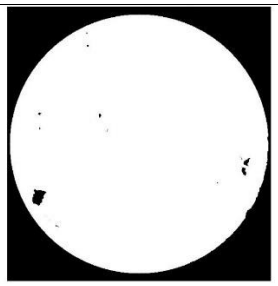
Probeta N° 307, penetración = 78.50%





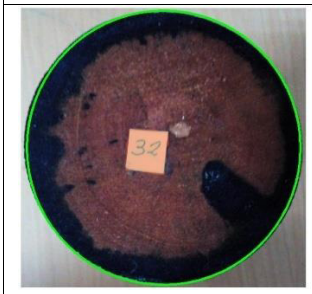
Probeta N° 371, penetración = 63.14%





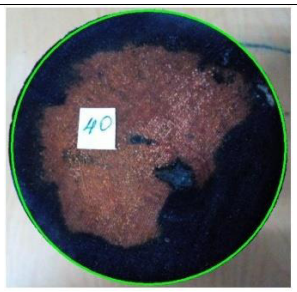
Probeta N° 380, penetración = 99.49%

Tratamiento E3



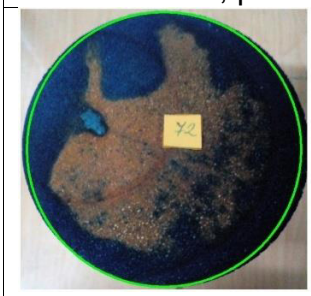


Probeta N° 32, penetración = 34.02%





Probeta N° 40, penetración = 49.21%





Probeta N° 72, penetración = 57.51%





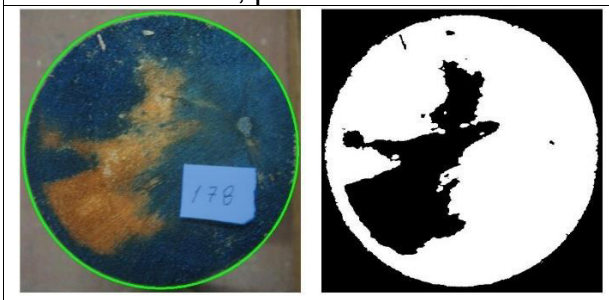
Probeta N° 94, penetración = 41.85%



Probeta N° 103, penetración = 43.70%



Probeta N° 125, penetración = 92.09%



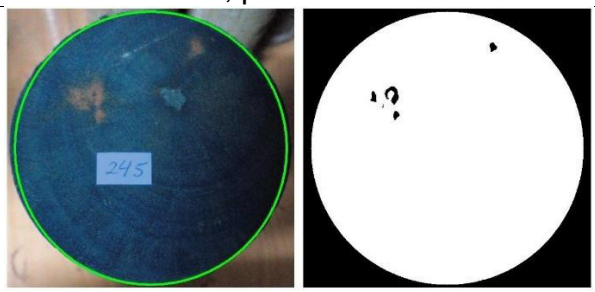
Probeta N° 178, penetración = 68.65%



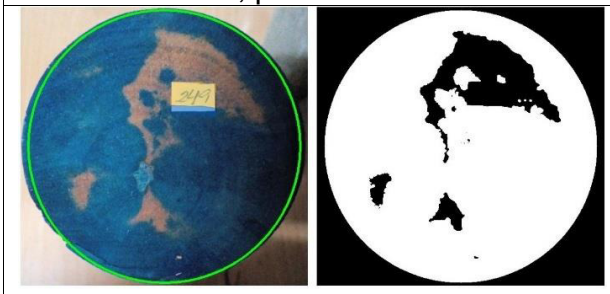
Probeta N° 201, penetración = 75.05%



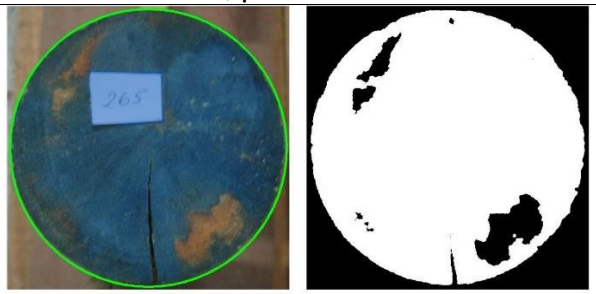
Probeta N° 241, penetración = 62.09%



Probeta N° 245, penetración = 98.29%



Probeta N° 249, penetración = 80.66%



Probeta N° 265, penetración = 91.92%

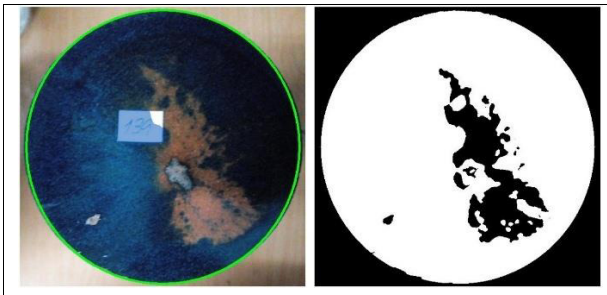
Tratamiento E4



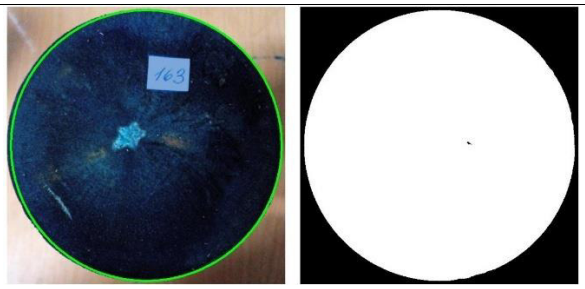
Probeta N° 35, penetración = 35.05%



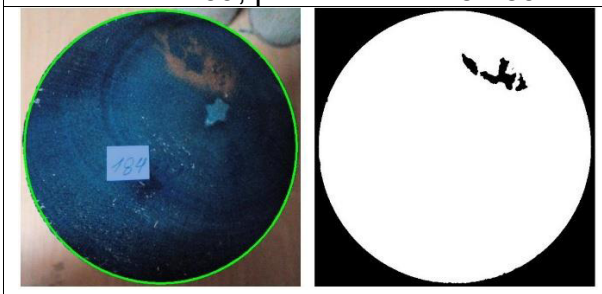
Probeta N° 78, penetración = 48.19%



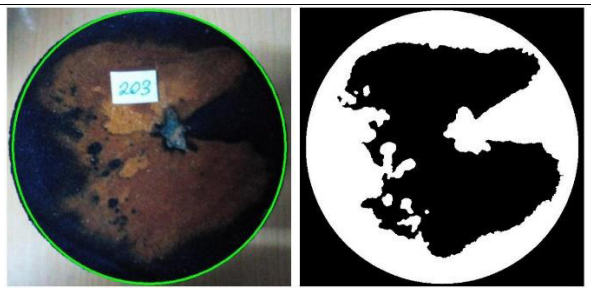
Probeta N° 139, penetración = 81.83%



Probeta N° 163, penetración = 100%



Probeta N° 184, penetración = 95.75%



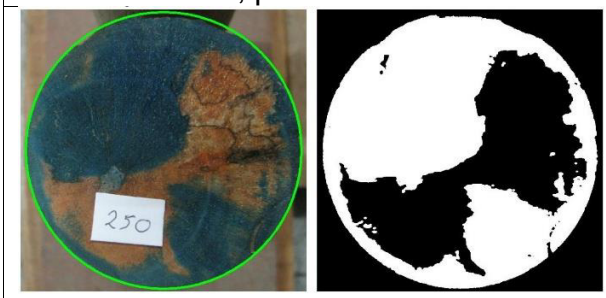
Probeta N° 203, penetración = 45.19%



Probeta N° 234, penetración = 44.35%



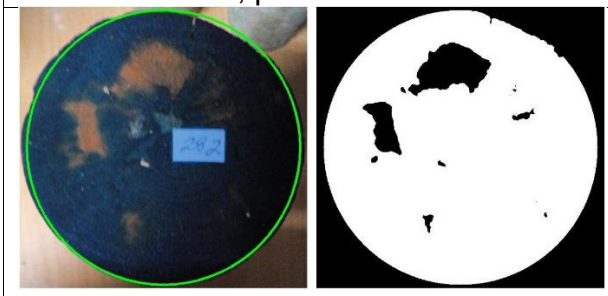
Probeta N° 246, penetración = 74.16%



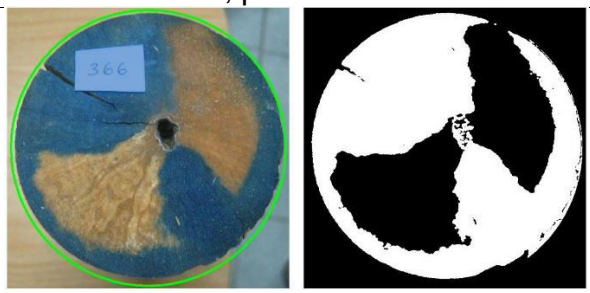
Probeta N° 250, penetración = 60.03%



Probeta N° 271, penetración = 41.54%



Probeta N° 282, penetración = 89.26%

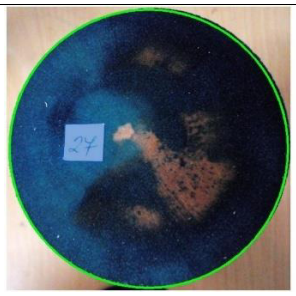
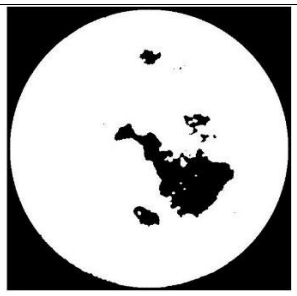


Probeta N° 366, penetración = 58.22%

Tratamiento E5



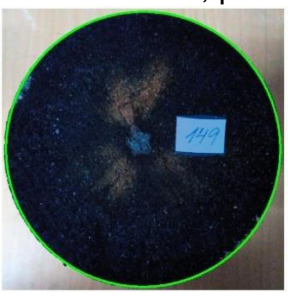
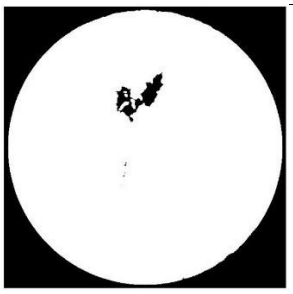

Probeta N° 3, penetración = 56%

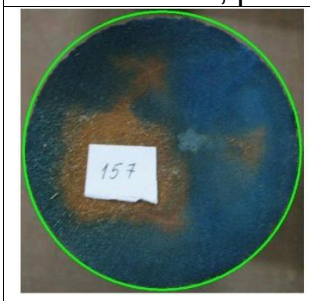
Probeta N° 27, penetración = 88.17%



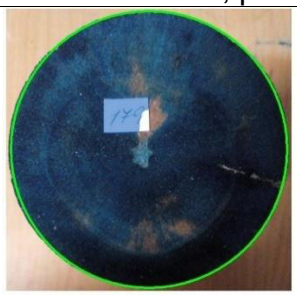
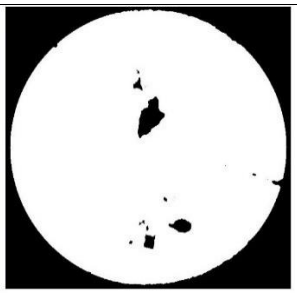

Probeta N° 71, penetración = 37.50%

Probeta N° 149, penetración = 90.60%



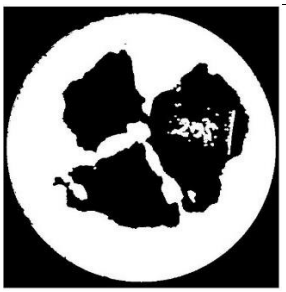

Probeta N° 157, penetración = 73.82%

Probeta N° 179, penetración = 97.68%




Probeta N° 196, penetración = 46.87%

Probeta N° 205, penetración = 63.82%



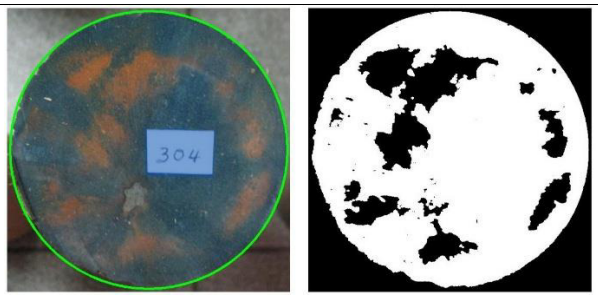

Probeta N° 211, penetración = 93.87%




Probeta N° 217, penetración = 35.75%

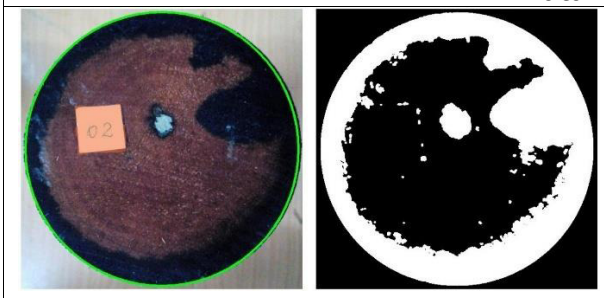


Probeta 225, penetración = 50.21%



Probeta N° 304, penetración = 70.63%

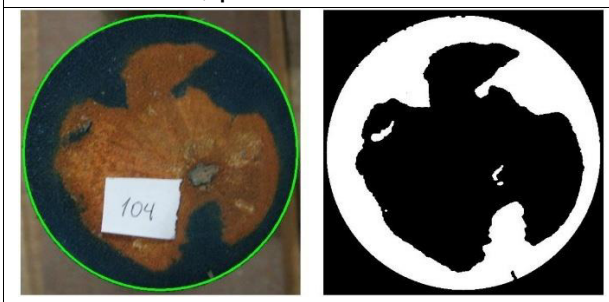
Tratamiento E6



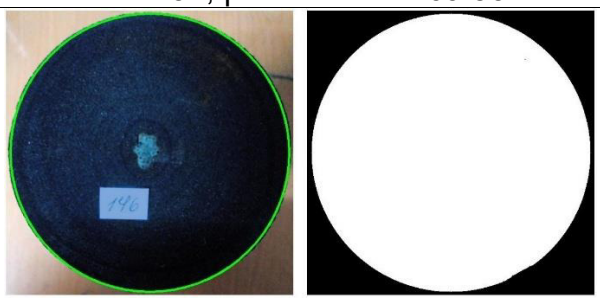
Probeta N° 2, penetración = 61.26%



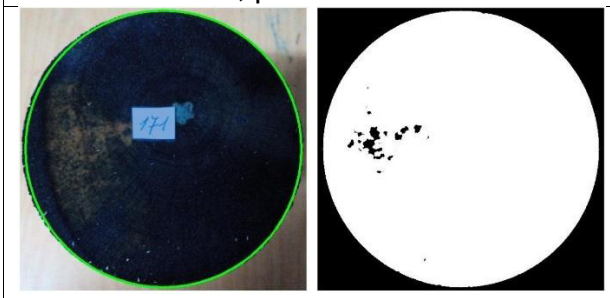
Probeta N° 31, penetración = 69.53%



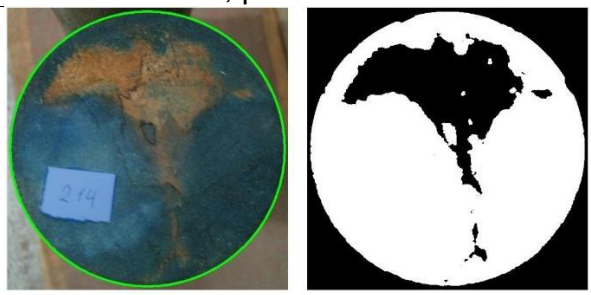
Probeta N° 104, penetración = 47.9%



Probeta N° 146, penetración = 100%



Probeta N° 171, penetración = 90.82%



Probeta N° 214, penetración = 87.06%



Probeta N° 224, penetración = 59.30%



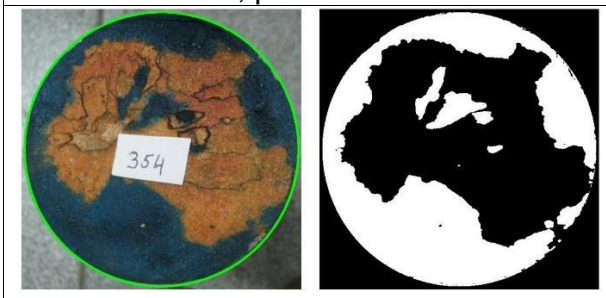
Probeta N° 272, penetración = 76.59%



Probeta N° 285, penetración = 38.70%



Probeta N° 290, penetración = 51.46%

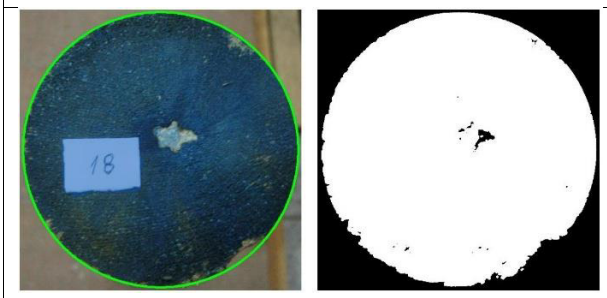


Probeta N° 354, penetración = 44.08%

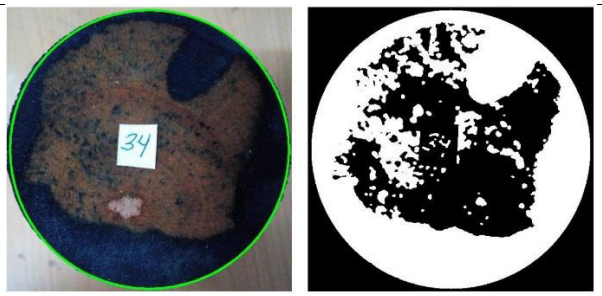


Probeta N° 379, penetración = 89.41%

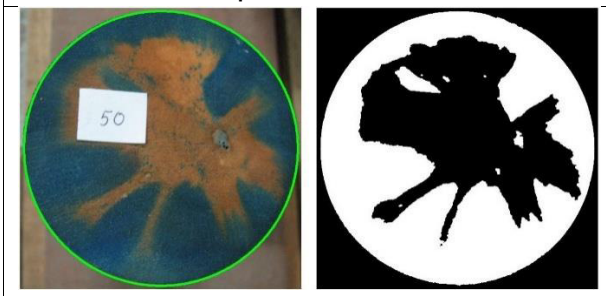
Tratamiento E7



Probeta N° 18, penetración = 99.85%



Probeta N° 34, penetración = 41.50%



Probeta N° 50, penetración = 54.93%



Probeta N° 129, penetración = 83.03%



Probeta N° 147, penetración = 67.62%

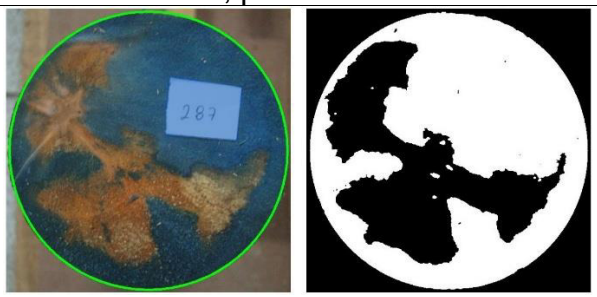


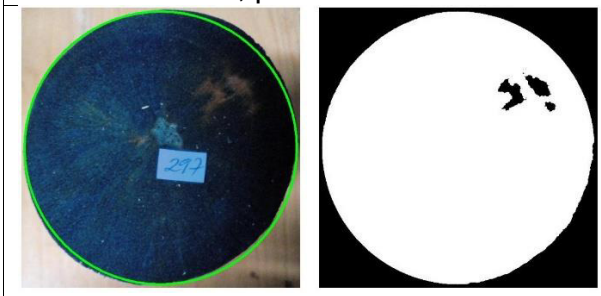
Probeta N° 167, penetración = 46.12%

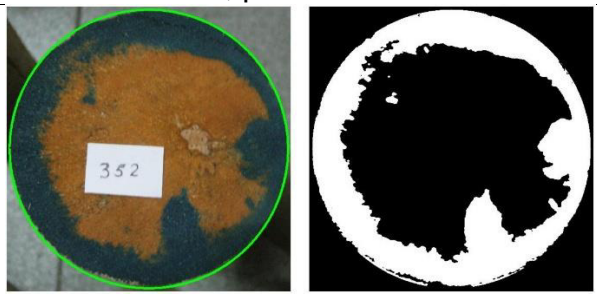

Probeta N° 222, penetración = 70.14%


Probeta N° 253, penetración = 88.59%


Probeta N° 260, penetración = 53.27%


Probeta N° 287, penetración = 66.09%


Probeta N° 297, penetración = 95.27%

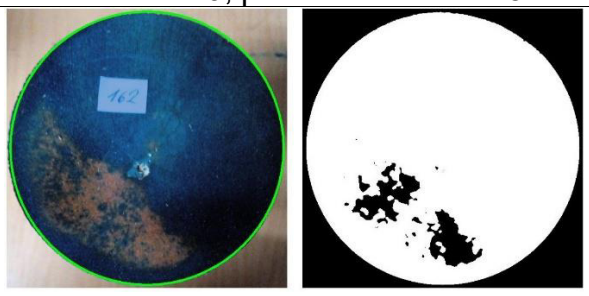

Probeta N° 352, penetración = 44.30%

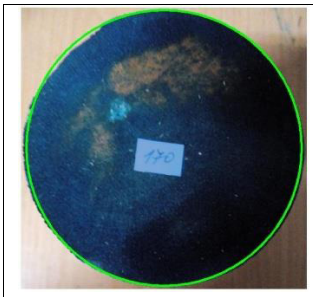
Tratamiento E8


Probeta N° 48, penetración = 72.75%

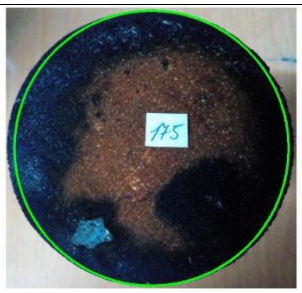

Probeta N° 140, penetración = 42.15%


Probeta N° 158, penetración = 61.72%

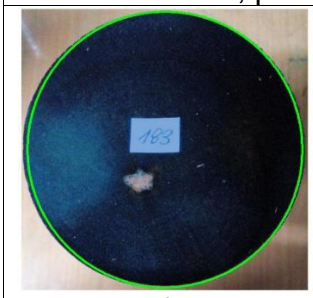
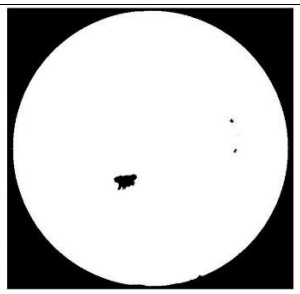

Probeta N° 162, penetración = 68.58%

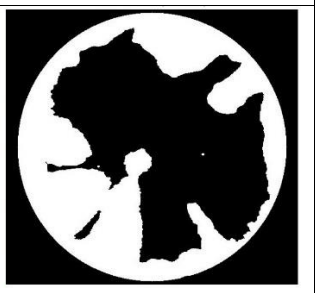


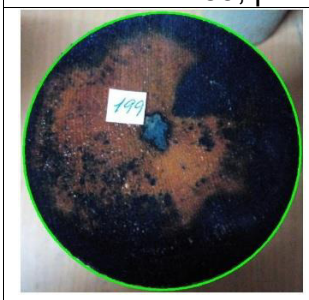
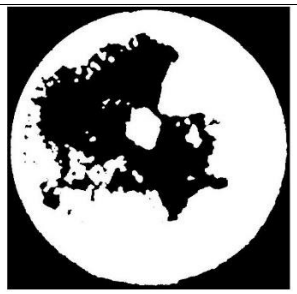
Probeta N° 170, penetración = 94.62%

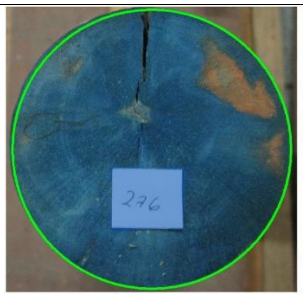
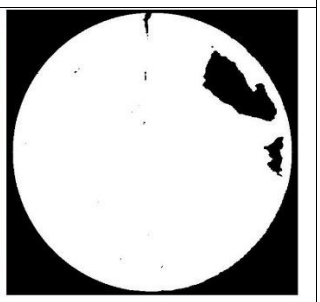


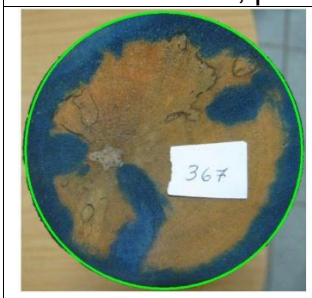
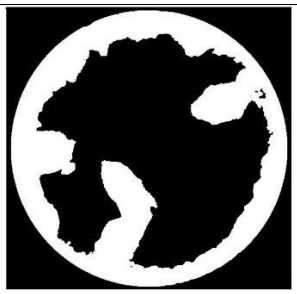
Probeta N° 175, penetración = 60.13%

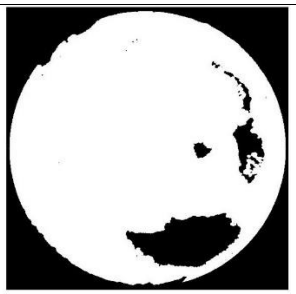


Probeta N° 183, penetración = 99.08%



Probeta N° 188, penetración = 46.38%



Probeta N° 199, penetración = 52.77%



Probeta N° 276, penetración = 91.72%

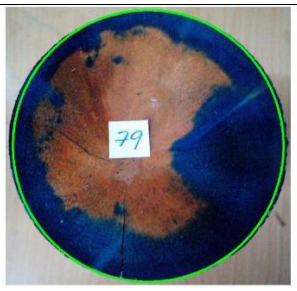


Probeta N° 367, penetración = 36.95%



Probeta N° 369, penetración = 88.75%

Tratamiento E9



Probeta N° 45, penetración = 43.59%



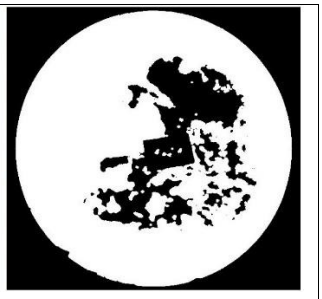
Probeta N° 79, penetración = 52.85%





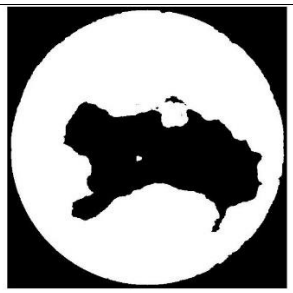
Probeta N° 137, penetración = 37.55%



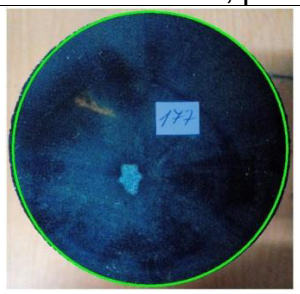


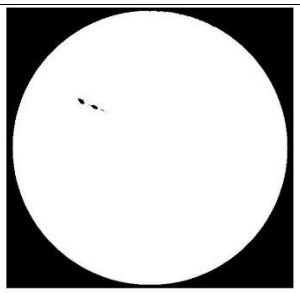
Probeta N° 141, penetración = 63.95%





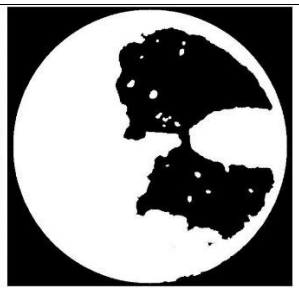
Probeta N° 168, penetración = 72.28%





Probeta N° 177, penetración = 99.35%





Probeta N° 186, penetración = 60.48%



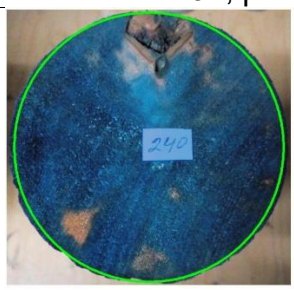


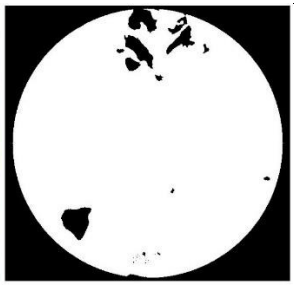
Probeta N° 191, penetración = 46.79%



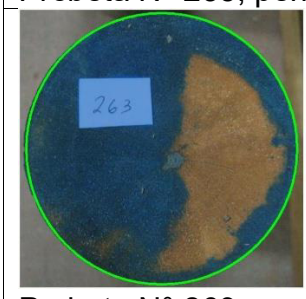


Probeta N° 235, penetración = 79.15%





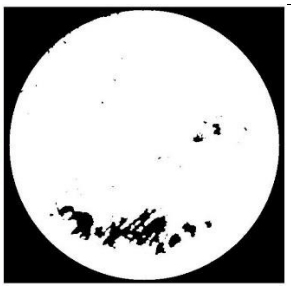
Probeta N° 240, penetración = 88.75%





Probeta N° 263, penetración = 71.42%





Probeta N° 279, penetración = 91.17%

Anexo 2: Procesamiento de resultados de los tratamientos de preservación:

A. Tratamientos del arreglo Ortogonal de experimentos $L_8(2^7)$:

Tratamiento	Código de probeta	Longitud (cm)	Extremo 1 (mm)		Extremo 2 (mm)		Volumen (m^3)	Peso inicial (kg)	Peso final (kg)	Diferencia de peso (kg)	Densidad sol (kg/L)	C sol. (%)	Abs Bruta (L/m^3)	Abs Neta (kg/m^3)	penetración (%)	Retención (kg/m^3)
			Dmayor	Dmenor	Dmayor	Dmenor										
	84	50.35	72.96	72.91	72.95	72.78	0.00210	0.6246	1.8643	1.2397	1.0064	1.5	586.1	8.85	99.85	5.32
T1	106	50.40	72.56	72.44	72.39	72.21	0.00207	0.6926	1.8760	1.1834	1.0064	1.5	566.7	8.56	100.00	5.13
	148	48.95	73.05	72.74	72.79	71.92	0.00203	0.6025	1.4650	0.8625	1.0064	1.5	422.6	6.38	48.34	7.92
CH=16%	155	50.60	72.58	72.42	72.94	72.06	0.00209	0.6827	1.6278	0.9451	1.0064	1.5	449.6	6.79	65.41	6.23
%C=1.5%	190	50.05	73.02	72.79	72.93	72.46	0.00208	0.6418	1.6961	1.0543	1.0064	1.5	502.8	7.59	72.15	6.31
Vac=19.5"Hg	207	50.05	73.16	72.55	73.42	72.47	0.00209	0.6379	1.6169	0.9790	1.0064	1.5	465.7	7.03	79.45	5.31
Tvi=10 min	212	51.20	72.86	72.69	72.87	72.18	0.00212	0.6223	1.8235	1.2012	1.0064	1.5	562.4	8.49	100.00	5.09
Pres= 120 PSI	230	49.15	73.23	73.01	73.32	72.44	0.00206	0.5821	1.6679	1.0858	1.0064	1.5	524.5	7.92	99.34	4.78
Tpres=20 min	236	50.35	72.51	72.49	72.57	72.43	0.00208	0.6379	1.6756	1.0377	1.0064	1.5	496.1	7.49	90.74	4.95
Tvf=3 min	259	50.80	72.78	72.72	72.37	72.13	0.00210	0.7804	1.6740	0.8936	1.0064	1.5	423.4	6.39	55.00	6.97
	283	49.20	73.49	72.97	72.86	72.28	0.00205	0.6976	1.8163	1.1187	1.0064	1.5	541.3	8.17	100.00	4.90
	292	50.25	73.66	72.33	73.80	71.81	0.00210	0.5406	1.6288	1.0882	1.0064	1.5	515.5	7.78	99.70	4.68
											Promedio		**504.7**	**7.62**	**84.17**	**5.63**

Tratamiento	Código de probeta	Longitud (cm)	Extremo 1 (mm)		Extremo 2 (mm)		Volumen (m^3)	Peso inicial (kg)	Peso final (kg)	Diferencia de peso (kg)	Densidad sol (kg/L)	C sol. (%)	Abs Bruta (L/m^3)	Abs Neta (kg/m^3)	penetración (%)	Retención (kg/m^3)
			Dmayor	Dmenor	Dmayor	Dmenor										
	66	50.50	72.49	72.21	73.03	72.27	0.00208	0.5628	1.8322	1.2694	1.0064	1.5	605.0	9.13	73.70	7.44
T2	138	50.05	73.68	72.67	73.83	72.42	0.00210	0.6369	2.0904	1.4535	1.0064	1.5	686.6	10.37	100.00	6.22
	159	50.90	73.15	72.47	72.22	70.96	0.00208	0.7061	1.8410	1.1349	1.0064	1.5	541.1	8.17	50.43	9.72
CH=16%	172	50.60	73.26	72.45	73.33	72.96	0.00212	0.7427	1.9725	1.2298	1.0064	1.5	577.0	8.71	59.74	8.75
%C=1.5%	216	49.15	73.43	71.79	73.58	72.80	0.00205	0.6246	1.9098	1.2852	1.0064	1.5	622.5	9.40	82.50	6.83
Vac=19.5"Hg	243	50.95	72.92	72.43	72.78	71.87	0.00210	0.6996	2.0218	1.3222	1.0064	1.5	624.6	9.43	94.80	5.97
Tvi=20 min	255	47.80	73.21	73.13	72.94	72.72	0.00200	0.6006	2.0155	1.4149	1.0064	1.5	702.7	10.61	99.60	6.39
Pres= 180 PSI	281	49.35	73.19	72.84	73.45	72.52	0.00207	0.6207	2.0198	1.3991	1.0064	1.5	673.1	10.16	100.00	6.10
Tpres=30 min	288	50.45	73.56	72.43	72.95	72.66	0.00211	0.7645	2.0130	1.2485	1.0064	1.5	589.1	8.89	62.55	8.53
Tvf=7 min	299	50.05	73.37	72.05	73.40	72.78	0.00209	0.6041	1.9706	1.3665	1.0064	1.5	650.0	9.81	100.00	5.89
	373	50.60	72.83	71.04	72.42	71.71	0.00206	0.6110	1.9801	1.3691	1.0064	1.5	660.3	9.97	100.00	5.98
	381	49.45	73.15	72.56	73.47	72.42	0.00206	0.5982	1.9754	1.3772	1.0064	1.5	663.0	10.01	100.00	6.01
												Promedio	**632.9**	**9.55**	**85.28**	**6.98**

Tratamiento	Código de probeta	Longitud (cm)	Extremo 1 (mm)		Extremo 2 (mm)		Volumen (m^3)	Peso inicial (kg)	Peso final (kg)	Diferencia de peso (kg)	Densidad sol (kg/L)	C sol. (%)	Abs Bruta (L/m^3)	Abs Neta (kg/m^3)	penetración (%)	Retención (kg/m^3)
			Dmayor	Dmenor	Dmayor	Dmenor										
	15	48.85	72.78	72.45	71.98	72.39	0.00201	0.5709	1.4867	0.9158	1.0135	3.0	449.3	13.66	91.52	8.96
T3	19	50.30	72.87	72.33	72.54	72.26	0.00208	0.7675	1.4595	0.6920	1.0135	3.0	328.8	10.00	59.45	10.09
	21	50.30	72.32	72.08	72.34	72.12	0.00206	0.6681	1.3490	0.6809	1.0135	3.0	326.1	9.91	51.04	11.66
CH=16%	55	50.50	72.58	72.46	72.51	72.45	0.00208	0.7663	1.6885	0.9222	1.0135	3.0	436.5	13.27	91.48	8.70
%C=3.0%	122	50.15	73.04	72.83	72.91	72.42	0.00209	0.7799	1.6225	0.8426	1.0135	3.0	398.3	12.11	78.32	9.28
Vac=22"Hg	173	50.15	72.99	72.65	72.82	72.74	0.00209	0.6597	1.5236	0.8639	1.0135	3.0	408.3	12.42	82.61	9.02
Tvi=10 min	194	50.90	72.78	72.39	72.77	72.06	0.00210	0.7486	1.5305	0.7819	1.0135	3.0	367.2	11.16	66.01	10.15
Pres= 120 PSI	218	49.00	73.43	72.80	72.88	72.49	0.00205	0.6579	1.7347	1.0768	1.0135	3.0	519.5	15.79	100.00	9.48
Tpres=30 min	226	50.10	72.71	72.38	72.76	72.15	0.00207	0.6440	1.9293	1.2853	1.0135	3.0	613.2	18.64	100.00	11.19
Tvf=7 min	237	48.70	73.16	72.72	72.95	72.77	0.00203	0.6421	1.5933	0.9512	1.0135	3.0	461.7	14.04	92.95	9.06
	280	50.30	73.24	72.86	72.93	72.97	0.00211	0.7150	1.8627	1.1477	1.0135	3.0	537.9	16.35	100.00	9.81
	293	50.00	73.22	72.71	72.94	72.73	0.00209	0.6293	1.6641	1.0348	1.0135	3.0	489.2	14.88	99.70	8.95
												Promedio	**444.7**	**13.52**	**84.42**	**9.69**

Tratamiento	Código de probeta	Longitud (cm)	Extremo 1 (mm)		Extremo 2 (mm)		Volumen (m^3)	Peso inicial (kg)	Peso final (kg)	Diferencia de peso (kg)	Densidad sol (kg/L)	C sol. (%)	Abs Bruta (L/m^3)	Abs Neta (kg/m^3)	penetración (%)	Retención (kg/m^3)
			Dmayor	Dmenor	Dmayor	Dmenor										
	63	50.70	72.54	72.23	72.18	72.05	0.00208	0.7219	1.6397	0.9178	1.0135	3.0	435.7	13.25	48.74	16.31
T4	85	49.15	72.88	72.75	72.87	72.70	0.00205	0.5800	2.0084	1.4284	1.0135	3.0	688.9	20.95	100.00	12.57
	107	49.05	73.12	72.69	72.64	72.55	0.00204	0.5751	1.5510	0.9759	1.0135	3.0	472.3	14.36	54.33	15.86
CH=16%	135	49.00	72.73	72.62	72.69	72.56	0.00203	0.6253	2.0289	1.4036	1.0135	3.0	681.8	20.73	99.92	12.45
%C=3.0%	185	49.25	73.25	72.88	72.94	72.53	0.00206	0.6820	2.0163	1.3343	1.0135	3.0	640.5	19.47	92.73	12.60
Vac=22"Hg	200	50.15	73.25	72.60	72.62	72.53	0.00208	0.6627	1.7865	1.1238	1.0135	3.0	531.9	16.17	62.53	15.52
Tvi=20 min	213	50.10	72.96	72.41	72.67	72.56	0.00208	0.6718	2.0537	1.3819	1.0135	3.0	656.5	19.96	100.00	11.98
Pres= 180 PSI	228	50.10	72.84	72.78	72.76	72.62	0.00208	0.5931	1.7284	1.1353	1.0135	3.0	537.9	16.35	77.00	12.74
Tpres=20 min	291	50.50	72.37	72.14	72.23	71.86	0.00206	0.7718	2.1230	1.3512	1.0135	3.0	645.7	19.63	100.00	11.78
Tvf=3 min	294	50.35	72.97	72.86	72.93	72.84	0.00210	0.6477	1.9445	1.2968	1.0135	3.0	608.9	18.51	85.88	12.93
	303	50.30	73.08	72.86	72.89	72.77	0.00210	0.6270	1.7962	1.1692	1.0135	3.0	549.5	16.71	87.29	11.48
	305	50.10	72.97	72.64	72.85	72.74	0.00209	0.6203	1.9832	1.3629	1.0135	3.0	644.8	19.61	100.00	11.76
												Promedio	**591.2**	**17.98**	**84.04**	**13.16**

Tratamiento	Código de probeta	Longitud (cm)	Extremo 1 (mm)		Extremo 2 (mm)		Volumen (m^3)	Peso inicial (kg)	Peso final (kg)	Diferencia de peso (kg)	Densidad sol (kg/L)	C sol. (%)	Abs Bruta (L/m^3)	Abs Neta (kg/m^3)	penetración (%)	Retención (kg/m^3)
			Dmayor	Dmenor	Dmayor	Dmenor										
	75	50.45	70.27	69.95	70.22	70.06	0.00195	0.7356	1.5575	0.8219	1.0064	1.5	419.1	6.33	46.04	8.25
T5	90	49.90	72.58	72.46	72.53	72.43	0.00206	0.7441	1.6638	0.9197	1.0064	1.5	443.6	6.70	56.23	7.15
	114	50.35	72.42	72.23	72.52	72.43	0.00207	0.8460	1.6680	0.8220	1.0064	1.5	394.0	5.95	44.02	8.11
CH=22%	130	50.40	72.36	72.14	72.37	72.33	0.00207	0.8315	1.7244	0.8929	1.0064	1.5	428.8	6.47	54.31	7.15
%C=1.5%	169	50.80	72.46	72.32	72.85	72.57	0.00210	0.8070	1.6280	0.8210	1.0064	1.5	388.5	5.86	42.03	8.37
Vacío=22"Hg	187	50.65	72.91	72.79	72.86	72.64	0.00211	0.6847	1.7600	1.0753	1.0064	1.5	506.8	7.65	91.13	5.04
Tvi=10 min	195	50.80	73.01	72.84	72.63	72.52	0.00211	0.7401	1.8465	1.1064	1.0064	1.5	520.6	7.86	96.11	4.91
Pres= 180 PSI	208	51.00	72.57	72.24	72.68	72.51	0.00211	0.8891	1.9141	1.0250	1.0064	1.5	483.7	7.30	71.97	6.09
Tpres=20 min	233	50.00	72.81	72.82	72.95	72.62	0.00208	0.7235	1.7637	1.0402	1.0064	1.5	496.6	7.50	76.51	5.88
Tvf=7 min	257	50.40	72.85	72.78	72.86	72.71	0.00210	0.8170	1.8771	1.0601	1.0064	1.5	502.1	7.58	82.87	5.49
	264	50.20	72.95	72.67	72.88	72.70	0.00209	0.7440	1.7101	0.9661	1.0064	1.5	459.4	6.94	69.47	5.99
	357	50.30	72.50	72.38	72.64	72.48	0.00208	0.8410	1.9763	1.1353	1.0064	1.5	543.3	8.20	99.82	4.93
												Promedio	**465.5**	**7.03**	**69.21**	**6.44**

Tratamiento	Código de probeta	Longitud (cm)	Extremo 1 (mm)		Extremo 2 (mm)		Volumen (m^3)	Peso inicial (kg)	Peso final (kg)	Diferencia de peso (kg)	Densidad sol (kg/L)	C sol. (%)	Abs Bruta (L/m^3)	Abs Neta (kg/m^3)	penetración (%)	Retención (kg/m^3)
			Dmayor	Dmenor	Dmayor	Dmenor										
	12	50.00	72.64	72.50	72.84	72.62	0.00207	0.8035	1.9186	1.1151	1.0064	1.5	534.6	8.07	98.38	4.92
T6	121	50.50	73.15	72.84	73.18	72.83	0.00211	0.7621	1.5170	0.7549	1.0064	1.5	354.9	5.36	45.67	7.04
	174	49.85	72.96	72.65	72.88	72.71	0.00207	0.8186	1.7126	0.8940	1.0064	1.5	428.1	6.46	71.90	5.39
CH=22%	181	50.70	73.06	72.85	73.21	72.88	0.00212	0.7841	1.6159	0.8318	1.0064	1.5	389.5	5.88	59.77	5.90
%C=1.5%	197	50.25	72.85	72.68	73.13	72.94	0.00210	0.9256	1.7124	0.7868	1.0064	1.5	372.7	5.63	48.51	6.96
Vac=22"Hg	204	50.30	73.16	72.77	73.21	72.86	0.00211	0.8708	1.5311	0.6603	1.0064	1.5	311.6	4.70	43.64	6.47
Tvi=20 min	209	50.30	73.07	72.87	72.91	72.75	0.00210	0.8115	1.9953	1.1838	1.0064	1.5	560.3	8.46	100.00	5.07
Pres= 120 PSI	220	50.70	73.13	72.96	73.04	72.87	0.00212	0.8060	1.4641	0.6581	1.0064	1.5	308.2	4.65	40.40	6.91
Tpres=30 min	232	50.75	73.24	72.88	73.16	72.72	0.00212	0.8000	1.2602	0.4602	1.0064	1.5	215.3	3.25	36.13	5.40
Tvf=3 min	254	50.45	72.66	72.43	72.54	72.37	0.00208	0.7906	1.6313	0.8407	1.0064	1.5	401.1	6.05	64.83	5.60
	266	50.35	72.38	72.22	72.59	72.41	0.00207	0.6562	1.7232	1.0670	1.0064	1.5	511.5	7.72	98.00	4.73
	308	50.65	72.52	72.37	72.48	72.23	0.00209	0.8462	1.8978	1.0516	1.0064	1.5	501.1	7.56	73.42	6.18
												Promedio	**407.4**	**6.15**	**65.05**	**5.88**

Tratamiento	Código de probeta	Longitud (cm)	Extremo 1 (mm)		Extremo 2 (mm)		Volumen (m^3)	Peso inicial (kg)	Peso final (kg)	Diferencia de peso (kg)	Densidad sol (kg/L)	C sol. (%)	Abs Bruta (L/m^3)	Abs Neta (kg/m^3)	penetración (%)	Retención (kg/m^3)
			Dmayor	Dmenor	Dmayor	Dmenor										
	166	50.00	73.05	72.78	73.19	72.98	0.00209	0.7649	1.7337	0.9688	1.0135	3.0	456.8	13.89	97.68	8.53
T7	176	50.75	72.23	71.91	72.12	71.74	0.00207	0.7879	1.6665	0.8786	1.0135	3.0	419.6	12.76	79.82	9.59
	192	50.75	72.52	72.35	72.49	72.24	0.00209	0.8065	1.6097	0.8032	1.0135	3.0	379.3	11.53	48.56	14.25
CH=22%	206	50.20	72.61	72.32	72.36	72.31	0.00207	0.7851	1.7459	0.9608	1.0135	3.0	458.7	13.95	99.00	8.45
%C=3.0%	210	50.55	72.39	72.36	72.57	72.28	0.00208	0.9030	1.6379	0.7349	1.0135	3.0	348.4	10.59	42.02	15.13
Vac=19.5"Hg	215	50.35	72.73	72.59	72.61	72.66	0.00209	0.7491	1.5105	0.7614	1.0135	3.0	360.0	10.94	44.43	14.78
Tvi=10 min	219	50.50	72.58	72.34	72.91	72.77	0.00209	0.8887	1.6774	0.7887	1.0135	3.0	371.7	11.30	45.94	14.76
Pres= 180 PSI	231	50.40	71.23	71.15	70.90	70.72	0.00200	0.7796	1.6440	0.8644	1.0135	3.0	427.4	13.00	90.71	8.60
Tpres=30 min	252	50.50	72.44	72.32	72.48	72.36	0.00208	0.8510	1.7287	0.8777	1.0135	3.0	416.6	12.67	69.17	10.99
Tvf=3 min	256	50.30	72.83	72.65	73.08	72.64	0.00209	0.7319	1.6805	0.9486	1.0135	3.0	447.0	13.59	96.66	8.44
	277	49.30	72.54	72.48	72.66	72.32	0.00204	0.7860	1.6283	0.8423	1.0135	3.0	408.4	12.42	64.30	11.59
	374	50.15	73.11	72.82	73.16	72.91	0.00210	0.8330	1.6721	0.8391	1.0135	3.0	394.5	11.99	56.57	12.72
												Promedio	**407.4**	**12.39**	**69.57**	**11.48**

Tratamiento	Código de probeta	Longitud (cm)	Extremo 1 (mm)		Extremo 2 (mm)		Volumen (m^3)	Peso inicial (kg)	Peso final (kg)	Diferencia de peso (kg)	Densidad sol (kg/L)	C sol. (%)	Abs Bruta (L/m^3)	Abs Neta (kg/m^3)	penetración (%)	Retención (kg/m^3)
			Dmayor	Dmenor	Dmayor	Dmenor										
	17	50.15	72.55	72.49	72.62	72.34	0.00207	0.7932	1.0683	0.2751	1.0135	3.0	131.1	3.99	35.30	6.78
T8	41	50.15	72.42	72.34	72.35	72.09	0.00206	0.6807	1.1815	0.5008	1.0135	3.0	240.0	7.30	43.98	9.96
	102	49.15	72.41	72.33	72.51	72.35	0.00202	0.7754	1.0780	0.3026	1.0135	3.0	147.6	4.49	35.86	7.51
CH=22%	142	50.70	73.08	72.91	72.84	72.77	0.00212	0.9325	1.5575	0.6250	1.0135	3.0	291.4	8.86	63.82	8.33
%C=3%	154	50.35	72.47	72.26	72.08	72.19	0.00206	0.8450	1.3080	0.4630	1.0135	3.0	221.3	6.73	39.85	10.13
Vac=19.5"Hg	165	50.20	72.41	72.33	72.16	72.10	0.00206	0.8446	1.4028	0.5582	1.0135	3.0	267.6	8.14	51.64	9.45
Tvi=20 min	182	50.50	72.59	72.36	72.42	72.23	0.00208	0.7440	1.4045	0.6605	1.0135	3.0	313.5	9.53	69.89	8.18
Pres= 120 PSI	198	51.05	73.14	72.77	72.59	72.50	0.00212	0.7913	1.5028	0.7115	1.0135	3.0	330.8	10.06	93.91	6.43
Tpres=20 min	202	50.00	72.66	72.48	72.52	72.34	0.00206	0.9401	1.6836	0.7435	1.0135	3.0	355.4	10.81	96.45	6.72
Tvf=7 min	247	50.85	72.42	72.37	72.49	72.32	0.00209	0.8314	1.4175	0.5861	1.0135	3.0	276.2	8.40	61.70	8.17
	273	49.75	73.16	72.82	72.87	72.75	0.00208	0.6602	1.2224	0.5622	1.0135	3.0	267.1	8.12	48.09	10.13
	358	50.40	72.76	72.67	73.19	72.98	0.00210	0.7885	1.4832	0.6947	1.0135	3.0	325.8	9.91	87.89	6.76
												Promedio	**264.0**	**8.03**	**60.70**	**8.21**

Anexo 2: Procesamiento de resultados de los tratamientos de preservación:

B. Tratamientos del diseño Hexagonal de experimentos:

Tratamiento	Código Probeta	Extremo 1 (mm) Dmayor	Extremo 1 (mm) Dmenor	Extremo 2 (mm) Dmayor	Extremo 2 (mm) Dmenor	Longitud (cm)	Volumen (m^3)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	AbsBruta (L/m^3)	AbsNeta (kg/m^3)	penetración (%)	Retención (kg/m^3)
	70	73.22	73.09	73.36	73.42	50.45	0.00213	0.8263	1.4069	270.22	6.14	43.14	8.54
E1	91	73.18	73.28	72.94	73.28	50.60	0.00213	0.7743	1.6035	385.86	8.77	85.65	6.14
	145	73.15	73.51	72.86	72.56	50.40	0.00211	0.8806	1.6221	347.84	7.90	49.48	9.59
CH=22%	189	73.23	72.85	73.24	73.42	50.60	0.00213	0.7251	1.4942	357.75	8.13	60.57	8.05
%C=2.25%	227	73.47	73.38	73.55	73.49	50.45	0.00214	0.7436	1.5242	361.33	8.21	69.17	7.12
Vac=19.5"Hg	239	73.18	73.52	73.25	73.67	49.25	0.00208	0.5834	1.4976	434.28	9.87	98.28	6.03
Tvi=10 min	244	73.04	73.61	73.25	73.51	49.90	0.00211	0.9064	1.7839	412.01	9.36	91.53	6.14
Pres= 180 PSI	267	72.36	73.52	72.31	73.74	50.30	0.00210	0.9504	1.6330	321.18	7.30	46.88	9.34
Tpres=20 min	275	73.07	73.28	73.41	73.76	50.60	0.00214	0.9091	1.6687	351.45	7.99	64.55	7.42
Tvf=3 min	296	72.39	73.11	72.08	72.51	50.55	0.00209	0.6003	1.5530	451.73	10.27	99.71	6.18
	356	72.87	72.84	72.96	73.18	50.50	0.00211	0.7900	1.2957	237.13	5.39	37.99	8.51
	375	73.17	73.48	73.54	73.5	50.95	0.00216	0.7631	1.5708	370.71	8.42	78.99	6.40
	Prom	**73.03**	**73.29**	**73.06**	**73.34**	**50.38**	**0.00**	**0.7877**	**1.5545**	**358.46**	**8.15**	**68.83**	**7.45**

Tratamiento	Código Probeta	Extremo 1 (mm) Dmayor	Extremo 1 (mm) Dmenor	Extremo 2 (mm) Dmayor	Extremo 2 (mm) Dmenor	Longitud (cm)	Volumen (m^3)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	AbsBruta (L/m^3)	AbsNeta (kg/m^3)	penetración (%)	Retención (kg/m^3)
	37	73.87	72.75	72.72	73.43	50.10	0.00211	0.7803	1.5529	362.89	10.63	91.27	6.99
E2	52	71.64	72.30	72.84	72.66	50.50	0.00208	0.9113	1.4200	242.53	7.10	36.14	11.79
	111	73.25	73.80	73.56	73.81	50.35	0.00214	0.7660	1.3104	251.59	7.37	43.02	10.28
CH=22%	120	73.03	73.70	73.13	73.61	50.20	0.00212	0.9306	1.4972	264.33	7.74	47.36	9.81
%C=2.90%	151	73.41	73.51	73.31	73.47	50.10	0.00212	0.8194	1.6458	385.70	11.30	95.26	7.12
Vac=19.5"Hg	223	73.40	73.44	73.07	72.96	49.55	0.00209	0.7796	1.4763	330.64	9.68	71.56	8.12
Tvi=10 min	238	73.51	73.34	73.17	73.32	49.50	0.00209	0.7828	1.3565	271.67	7.96	49.89	9.57
Pres= 165 PSI	248	72.18	72.89	72.61	72.60	50.05	0.00207	0.7086	1.2885	277.35	8.12	60.69	8.03
Tpres=20 min	286	72.75	72.29	73.27	73.22	50.55	0.00211	0.6966	1.4130	336.34	9.85	87.60	6.75
Tvf=3 min	307	73.29	73.73	72.65	72.24	50.90	0.00213	0.7600	1.4729	331.53	9.71	78.50	7.42
	371	73.82	73.10	73.04	73.66	50.70	0.00215	0.7733	1.4505	312.50	9.15	63.14	8.70
	380	73.31	73.05	72.58	73.55	50.45	0.00212	0.6379	1.6613	478.27	14.01	99.49	8.45
	Prom	**73.12**	**73.16**	**73.00**	**73.21**	**50.25**	**0.00**	**0.7789**	**1.4621**	**320.44**	**9.39**	**68.66**	**8.58**

Tratamiento	Código Probeta	Extremo 1 (mm) Dmayor	Extremo 1 (mm) Dmenor	Extremo 2 (mm) Dmayor	Extremo 2 (mm) Dmenor	Longitud (cm)	Volumen (m^3)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	AbsBruta (L/m^3)	AbsNeta (kg/m^3)	penetración (%)	Retención (kg/m^3)
	32	73.65	73.84	73.35	73.77	50.20	0.00214	0.8787	1.2988	194.47	5.70	34.02	10.05
E3	40	72.95	72.98	72.91	72.56	50.70	0.00211	0.7613	1.3127	258.34	7.57	49.21	9.23
	72	72.40	72.08	72.34	72.93	50.00	0.00206	0.7409	1.2640	251.35	7.36	57.51	7.68
CH=22%	94	73.47	72.87	73.17	72.59	50.25	0.00210	0.8524	1.2988	210.01	6.15	41.85	8.82
%C=2.90%	103	73.05	72.97	73.48	72.83	50.95	0.00214	0.7408	1.1938	209.85	6.15	43.70	8.44
Vac=19.5"Hg	125	71.88	72.86	72.64	72.67	50.20	0.00207	0.8056	1.5590	359.82	10.54	92.09	6.87
Tvi=10 min	178	73.62	73.78	72.85	72.97	50.23	0.00212	0.7989	1.4064	283.73	8.31	68.65	7.26
Pres= 135 PSI	201	73.69	73.64	73.29	73.49	49.95	0.00212	0.7675	1.3757	283.92	8.32	75.05	6.65
Tpres=20 min	241	73.66	73.06	72.56	73.57	50.30	0.00212	0.8744	1.4137	252.16	7.39	62.09	7.14
Tvf=3 min	245	72.85	73.88	73.00	73.12	50.25	0.00212	0.5890	1.4473	401.72	11.77	98.29	7.18
	249	72.98	73.56	73.77	73.31	50.75	0.00215	0.6819	1.3548	310.21	9.09	80.66	6.76
	265	72.44	72.94	72.81	72.95	50.20	0.00209	0.7824	1.5365	357.46	10.47	91.92	6.83
	Prom	**73.05**	**73.21**	**73.01**	**73.06**	**50.33**	**0.00**	**0.7728**	**1.3718**	**281.09**	**8.23**	**66.25**	**7.74**

Tratamiento	Código Probeta	Extremo 1 (mm) Dmayor	Extremo 1 (mm) Dmenor	Extremo 2 (mm) Dmayor	Extremo 2 (mm) Dmenor	Longitud (cm)	Volumen (m^3)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	AbsBruta (L/m^3)	AbsNeta (kg/m^3)	penetración (%)	Retención (kg/m^3)
	35	73.63	73.39	73.27	73.41	50.05	0.00212	0.8879	1.2679	177.53	4.03	35.05	6.91
E4	78	73.10	72.87	73.33	73.06	50.45	0.00212	0.6977	1.2169	242.85	5.52	48.19	6.87
	139	73.27	73.52	73.36	72.49	49.70	0.00209	0.6300	1.3090	321.78	7.31	81.83	5.36
CH=22%	163	73.43	73.64	73.42	73.60	49.20	0.00209	0.7935	1.7081	433.52	9.85	100.00	5.91
%C=2.25%	184	73.36	73.19	72.93	72.85	50.20	0.00211	0.5414	1.3820	395.23	8.98	95.76	5.63
Vac=19.5"Hg	203	73.24	73.85	73.02	73.29	50.60	0.00214	0.7835	1.2743	227.27	5.16	45.19	6.86
Tvi=10 min	234	73.16	73.00	73.60	73.12	50.20	0.00211	0.7943	1.2268	202.59	4.60	44.35	6.23
Pres= 120 PSI	246	73.56	73.22	73.12	73.27	49.30	0.00208	0.6756	1.3118	302.84	6.88	74.16	5.57
Tpres=20 min	250	73.15	73.20	72.82	73.23	50.55	0.00212	0.8201	1.4300	284.64	6.47	60.03	6.47
Tvf=3 min	271	73.44	73.13	73.54	73.07	50.45	0.00213	0.8911	1.3055	192.75	4.38	41.54	6.33
	282	72.68	72.88	72.81	73.09	50.40	0.00210	0.8113	1.5696	357.24	8.12	89.26	5.46
	366	73.16	73.44	73.15	73.24	50.05	0.00211	0.6963	1.3027	284.68	6.47	58.22	6.67
	Prom	**73.27**	**73.28**	**73.20**	**73.14**	**50.10**	**0.00211**	**0.7519**	**1.3587**	**285.24**	**6.48**	**64.47**	**6.19**

Tratamiento	Código Probeta	Extremo 1 (mm) Dmayor	Extremo 1 (mm) Dmenor	Extremo 2 (mm) Dmayor	Extremo 2 (mm) Dmenor	Longitud (cm)	Volumen (m^3)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	AbsBruta (L/m^3)	AbsNeta (kg/m^3)	penetración (%)	Retención (kg/m^3)
	3	73.06	73.02	72.98	72.84	50.60	0.00212	0.7098	1.3941	321.19	5.17	56.00	5.54
E5	27	72.11	72.54	72.73	72.49	50.60	0.00209	0.6066	1.5094	429.70	6.92	88.17	4.71
	71	72.27	72.89	72.78	72.89	49.95	0.00207	0.7732	1.3571	279.67	4.50	37.50	7.21
CH=22%	149	73.25	73.50	73.39	72.85	50.20	0.00212	0.8451	1.7740	436.20	7.03	90.60	4.65
%C=1.60%	157	73.57	73.62	73.44	72.86	50.40	0.00213	0.7859	1.6112	384.70	6.20	73.82	5.04
Vac=19.5"Hg	179	72.51	72.69	72.52	72.10	49.15	0.00203	0.7141	1.8414	552.57	8.90	97.68	5.47
Tvi=10 min	196	73.57	73.61	73.08	73.59	50.15	0.00213	0.6527	1.2847	295.34	4.76	46.87	6.09
Pres= 135 PSI	205	73.71	73.20	73.48	73.56	50.25	0.00213	0.7281	1.4720	346.71	5.58	63.82	5.25
Tpres=20 min	211	72.76	73.06	73.02	73.05	49.95	0.00209	0.6265	1.6534	488.30	7.87	93.87	5.03
Tvf=3 min	217	73.21	73.52	73.57	73.19	48.90	0.00207	0.5794	1.0777	239.40	3.86	35.75	6.47
	225	73.73	73.85	73.88	73.47	50.00	0.00213	0.9056	1.5949	320.72	5.17	50.21	6.17
	304	73.69	73.38	73.53	72.96	50.15	0.00212	0.7431	1.5499	377.77	6.08	70.63	5.17
	Prom	**73.12**	**73.24**	**73.20**	**72.99**	**50.03**	**0.00210**	**0.7225**	**1.5100**	**372.69**	**6.00**	**67.08**	**5.57**

Tratamiento	Código Probeta	Extremo 1 (mm) Dmayor	Extremo 1 (mm) Dmenor	Extremo 2 (mm) Dmayor	Extremo 2 (mm) Dmenor	Longitud (cm)	Volumen (m^3)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	AbsBruta (L/m^3)	AbsNeta (kg/m^3)	penetración (%)	Retención (kg/m^3)
	2	73.17	73.24	72.82	73.19	49.40	0.00207	0.5988	1.3684	368.68	5.94	61.26	5.82
E6	31	73.14	72.88	73.36	73.61	50.05	0.00211	0.7942	1.6271	392.29	6.32	69.53	5.45
	104	72.39	72.60	72.75	72.50	50.20	0.00208	0.7275	1.3730	308.89	4.98	47.90	6.23
CH=22%	146	69.95	72.77	71.13	73.58	49.10	0.00199	0.7042	1.7387	516.08	8.31	100.00	4.99
%C=1.60%	171	72.18	72.24	71.94	72.07	50.05	0.00204	0.5959	1.5513	464.33	7.48	90.82	4.94
Vac=19.5"Hg	214	72.72	73.23	73.12	73.14	49.45	0.00207	0.9031	1.7716	416.24	6.70	87.06	4.62
Tvi=10 min	224	72.55	72.29	72.47	72.39	50.20	0.00207	0.7848	1.5038	345.35	5.56	59.30	5.63
Pres= 165 PSI	272	73.52	73.14	73.22	73.06	50.35	0.00212	0.8235	1.6732	397.96	6.41	76.59	5.02
Tpres=20 min	285	73.49	72.66	73.02	73.18	50.45	0.00212	0.7275	1.3728	302.85	4.88	38.70	7.56
Tvf=3 min	290	73.06	73.21	73.27	73.18	50.05	0.00211	0.6160	1.3101	327.52	5.28	51.46	6.15
	354	72.32	73.41	73.27	73.30	49.80	0.00209	0.7688	1.4048	302.48	4.87	44.08	6.63
	379	73.58	73.07	73.40	73.34	49.35	0.00209	0.6741	1.6214	451.27	7.27	89.41	4.88
	Prom	**72.67**	**72.90**	**72.81**	**73.05**	**49.87**	**0.00208**	**0.7265**	**1.5264**	**382.83**	**6.17**	**68.01**	**5.66**

Tratamiento	Código Probeta	Extremo 1 (mm) Dmayor	Extremo 1 (mm) Dmenor	Extremo 2 (mm) Dmayor	Extremo 2 (mm) Dmenor	Longitud (cm)	Volumen (m^3)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	AbsBruta (L/m^3)	AbsNeta (kg/m^3)	penetración (%)	Retención (kg/m^3)
	18	72.93	73.22	72.97	73.21	50.25	0.00211	0.7939	1.9222	529.97	12.04	99.85	7.24
E7	34	73.43	73.28	73.46	73.22	50.30	0.00213	0.7433	1.1692	198.41	4.51	41.50	6.52
	50	72.86	73.41	73.20	73.17	50.20	0.00211	0.6749	1.1403	218.35	4.96	54.93	5.42
CH=22%	129	73.40	73.52	73.59	73.62	48.90	0.00208	0.6936	1.5242	396.02	9.00	83.03	6.50
%C=2.25%	147	72.96	72.84	73.43	72.85	50.65	0.00212	0.8726	1.5248	304.44	6.92	67.62	6.14
Vac=19.5"Hg	167	72.44	72.85	72.58	73.36	50.45	0.00210	0.7802	1.2702	230.98	5.25	46.12	6.83
Tvi=10 min	222	73.03	72.88	73.09	73.29	49.80	0.00209	0.7580	1.4340	320.48	7.28	70.14	6.23
Pres= 150 PSI	253	73.12	73.08	73.00	73.31	50.15	0.00211	0.6583	1.5195	404.82	9.20	88.59	6.23
Tpres=20 min	260	73.28	73.53	73.23	73.25	50.65	0.00214	0.6762	1.2485	264.95	6.02	53.27	6.78
Tvf=3 min	287	73.52	73.81	73.53	73.28	49.90	0.00212	0.6291	1.2746	301.57	6.85	66.09	6.22
	297	73.65	73.76	73.41	73.92	47.80	0.00204	0.5605	1.5104	461.40	10.49	95.27	6.60
	352	72.52	73.15	73.13	73.58	50.30	0.00211	0.7317	1.1989	219.15	4.98	44.30	6.75
	Prom	**73.10**	**73.28**	**73.22**	**73.34**	**49.95**	**0.00**	**0.7144**	**1.3947**	**320.88**	**7.29**	**67.56**	**6.45**

Tratamiento	Código Probeta	Extremo 1 (mm) Dmayor	Extremo 1 (mm) Dmenor	Extremo 2 (mm) Dmayor	Extremo 2 (mm) Dmenor	Longitud (cm)	Volumen (m^3)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	AbsBruta (L/m^3)	AbsNeta (kg/m^3)	penetración (%)	Retención (kg/m^3)
	48	71.55	72.63	72.52	71.69	50.45	0.00206	0.6918	1.3241	303.96	6.91	72.75	5.70
E8	140	73.39	73.42	73.62	72.79	50.70	0.00214	0.7798	1.3350	256.90	5.84	42.15	8.31
	158	73.36	72.57	73.68	73.51	51.00	0.00215	0.7808	1.3483	261.22	5.94	61.72	5.77
CH=22%	162	73.23	73.35	73.14	73.26	51.00	0.00215	0.7545	1.3770	286.81	6.52	68.58	5.70
%C=2.25%	170	73.23	73.54	73.55	73.59	48.85	0.00207	0.6250	1.3774	359.64	8.17	94.62	5.18
Vac=19.5"Hg	175	73.34	73.39	73.44	73.46	49.75	0.00211	0.7334	1.2781	256.14	5.82	60.13	5.81
Tvi=10 min	183	72.50	72.92	72.95	73.27	50.00	0.00209	0.6115	1.5235	432.55	9.83	99.08	5.95
Pres= 150 PSI	188	73.16	73.09	72.40	72.53	50.60	0.00211	0.7722	1.3209	257.97	5.86	46.38	7.58
Tpres=20 min	199	73.38	73.35	72.65	73.41	50.15	0.00211	0.7221	1.2825	262.92	5.97	52.77	6.79
Tvf=3 min	276	73.63	73.06	73.18	73.35	50.05	0.00211	0.6758	1.3945	336.87	7.66	91.62	5.01
	367	73.51	73.18	73.02	73.03	50.40	0.00212	0.7233	1.2739	257.13	5.84	39.95	8.78
	369	73.29	73.56	73.66	73.25	50.50	0.00214	0.7854	1.5038	332.50	7.56	88.75	5.11
	Prom	**73.13**	**73.17**	**73.15**	**73.10**	**50.29**	**0.00211**	**0.7213**	**1.3616**	**300.38**	**6.83**	**68.21**	**6.31**

Tratamiento	Código de probeta	Extremo 1 (mm)		Extremo 2 (mm)		Longitud (cm)	Volumen (m^3)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	AbsBruta (L/m^3)	AbsNeta (kg/m^3)	penetración (%)	Retención (kg/m^3)
		Dmayor	Dmenor	Dmayor	Dmenor								
	45	72.72	72.31	72.96	72.95	50.25	0.00209	0.8287	1.3471	245.83	5.59	43.59	7.69
E9	79	73.53	73.63	73.68	73.83	49.20	0.00210	0.7175	1.3658	306.09	6.96	52.85	7.90
	137	73.55	73.44	73.60	73.39	49.00	0.00208	0.6132	1.1147	238.86	5.43	37.55	8.67
CH=22%	141	72.95	73.24	73.40	73.58	50.05	0.00211	0.6929	1.3816	322.92	7.34	63.95	6.89
%C=2.25%	168	73.02	73.34	73.32	73.53	50.10	0.00211	0.9051	1.6491	348.41	7.92	72.28	6.57
Vac=19.5"Hg	177	72.88	73.56	73.11	73.54	50.45	0.00213	0.6431	1.4186	360.93	8.20	99.35	4.95
Tvi=10 min	186	73.29	67.08	68.92	72.95	49.70	0.00194	0.7781	1.3800	306.65	6.97	60.48	6.91
Pres= 150 PSI	191	72.76	72.77	72.83	73.03	50.20	0.00209	0.7830	1.3266	257.24	5.85	46.79	7.50
Tpres=20 min	235	73.69	73.59	73.48	73.56	50.80	0.00216	0.8744	1.6867	372.32	8.46	79.15	6.41
Tvf=3 min	240	73.66	73.64	73.22	73.41	50.35	0.00214	0.7388	1.5508	376.51	8.56	88.75	5.78
	263	71.77	72.06	72.53	72.41	50.25	0.00206	0.6387	1.3222	329.01	7.48	71.42	6.28
	279	72.47	72.59	72.41	72.68	49.85	0.00206	0.5571	1.2726	343.88	7.81	91.17	5.14
	Prom	**73.02**	**72.60**	**72.79**	**73.24**	**50.02**	**0.00209**	**0.7309**	**1.4013**	**317.39**	**7.21**	**67.28**	**6.73**

Donde:
CH: Contenido de humedad en porcentaje (%)
%C : Concentración de solución preservante en porcentaje (%)
Vac: Vacío en pulgadas de mercurio (“Hg)
Tvi: Tiempo de vacío inicial en minutos (min)
Pres: Presión en libras por pulgada cuadrada (PSI)
Tpres: Tiempo de aplicación de la presión en minutos (min)
Tvf : Tiempo de vacío final en minutos (min)
Dmayor: Diámetro mayor en milímetros (mm)
Dmenor: Diámetro menor en milímetros (mm)
Densidad sol: Densidad de solución en kilogramos por litro (kg/L)
Csol: Concentración de solución en porcentaje (%)
AbsBruta: Absorción bruta en litros por metro cúbico (L/m^3)
AbsNeta: Absorción neta en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3)

***Anexo 3*: Tabla de concentraciones de solución preservante Arsenal CCA-C 60%**

ARSENAL CCA-C 60% STD — INQUIFESA | WOOD PROTECTION

60% OXIDOS
TABLA DE CONCENTRACION SEGÚN DENSIDAD Y TEMPERATURA DE LA SOLUCION

CONCENTRACION

TEMP	OXIDOS ACTIVOS:	0,60	0,70	0,84	0,98	1,12	1,26	1,40	1,54	1,68	1,82	1,96	2,10	2,24	2,38	2,52	2,66	2,80	2,94	3,08
Cº	PRODUCTO:	1,00	1,17	1,40	1,63	1,87	2,10	2,33	2,57	2,80	3,03	3,27	3,50	3,73	3,97	4,20	4,43	4,67	4,90	5,13
5		1,0060	1,0070	1,0080	1,0090	1,0102	1,0115	1,0128	1,0140	1,0150	1,0160	1,0172	1,0185	1,0195	1,0205	1,0215	1,0225	1,0240	1,0255	1,0260
6		1,0059	1,0069	1,0079	1,0089	1,0102	1,0114	1,0127	1,0139	1,0149	1,0159	1,0171	1,0184	1,0194	1,0204	1,0214	1,0224	1,0239	1,0254	1,0259
7		1,0058	1,0068	1,0078	1,0088	1,0101	1,0113	1,0126	1,0138	1,0148	1,0158	1,0170	1,0183	1,0193	1,0203	1,0213	1,0223	1,0238	1,0253	1,0258
8		1,0057	1,0067	1,0077	1,0087	1,0100	1,0112	1,0124	1,0137	1,0147	1,0157	1,0170	1,0182	1,0192	1,0202	1,0212	1,0222	1,0237	1,0252	1,0257
9		1,0056	1,0066	1,0076	1,0086	1,0099	1,0111	1,0123	1,0136	1,0146	1,0156	1,0169	1,0181	1,0191	1,0201	1,0211	1,0221	1,0236	1,0251	1,0256
10		1,0055	1,0065	1,0075	1,0085	1,0098	1,0110	1,0122	1,0135	1,0145	1,0155	1,0168	1,0180	1,0190	1,0200	1,0210	1,0220	1,0235	1,0250	1,0255
11		1,0054	1,0064	1,0074	1,0084	1,0097	1,0109	1,0121	1,0134	1,0144	1,0153	1,0166	1,0178	1,0188	1,0199	1,0209	1,0219	1,0234	1,0248	1,0254
12		1,0053	1,0063	1,0073	1,0083	1,0096	1,0108	1,0120	1,0133	1,0142	1,0151	1,0164	1,0176	1,0187	1,0198	1,0208	1,0218	1,0232	1,0246	1,0253
13		1,0052	1,0062	1,0072	1,0082	1,0094	1,0107	1,0120	1,0132	1,0141	1,0149	1,0162	1,0174	1,0185	1,0197	1,0207	1,0217	1,0231	1,0244	1,0252
14		1,0051	1,0061	1,0071	1,0081	1,0093	1,0106	1,0119	1,0131	1,0139	1,0147	1,0160	1,0172	1,0184	1,0196	1,0206	1,0216	1,0229	1,0242	1,0251
15		1,0050	1,0060	1,0070	1,0080	1,0092	1,0105	1,0118	1,0130	1,0138	1,0145	1,0158	1,0170	1,0182	1,0195	1,0205	1,0215	1,0228	1,0240	1,0250
16		1,0049	1,0059	1,0068	1,0078	1,0091	1,0104	1,0117	1,0129	1,0137	1,0144	1,0156	1,0168	1,0180	1,0193	1,0202	1,0212	1,0225	1,0238	1,0248
17		1,0048	1,0058	1,0067	1,0076	1,0089	1,0103	1,0116	1,0128	1,0136	1,0143	1,0155	1,0166	1,0178	1,0191	1,0200	1,0209	1,0223	1,0236	1,0246
18		1,0047	1,0057	1,0066	1,0074	1,0088	1,0102	1,0114	1,0127	1,0134	1,0142	1,0153	1,0164	1,0176	1,0189	1,0197	1,0206	1,0220	1,0234	1,0244
19		1,0046	1,0056	1,0064	1,0072	1,0086	1,0101	1,0113	1,0126	1,0133	1,0141	1,0152	1,0162	1,0174	1,0187	1,0195	1,0203	1,0218	1,0232	1,0242
20		1,0045	1,0055	1,0062	1,0070	1,0085	1,0100	1,0112	1,0125	1,0132	1,0140	1,0150	1,0160	1,0172	1,0185	1,0192	1,0200	1,0215	1,0230	1,0240
21		1,0042	1,0053	1,0061	1,0069	1,0082	1,0096	1,0109	1,0122	1,0130	1,0138	1,0148	1,0159	1,0171	1,0183	1,0189	1,0196	1,0211	1,0226	1,0236
22		1,0039	1,0051	1,0060	1,0068	1,0080	1,0092	1,0105	1,0119	1,0127	1,0136	1,0147	1,0158	1,0169	1,0181	1,0186	1,0192	1,0207	1,0222	1,0232
23		1,0036	1,0049	1,0058	1,0067	1,0077	1,0088	1,0101	1,0116	1,0125	1,0134	1,0145	1,0157	1,0168	1,0179	1,0184	1,0188	1,0203	1,0218	1,0228
24		1,0033	1,0047	1,0056	1,0066	1,0075	1,0084	1,0098	1,0113	1,0122	1,0132	1,0144	1,0156	1,0166	1,0177	1,0181	1,0184	1,0199	1,0214	1,0224
25		1,0030	1,0045	1,0055	1,0065	1,0072	1,0080	1,0095	1,0110	1,0120	1,0130	1,0142	1,0155	1,0165	1,0175	1,0178	1,0180	1,0195	1,0210	1,0220
26		1,0029	1,0042	1,0052	1,0062	1,0070	1,0078	1,0092	1,0099	1,0117	1,0127	1,0139	1,0152	1,0162	1,0172	1,0175	1,0178	1,0192	1,0207	1,0216
27		1,0028	1,0039	1,0049	1,0059	1,0067	1,0076	1,0090	1,0098	1,0114	1,0124	1,0136	1,0149	1,0159	1,0169	1,0173	1,0176	1,0190	1,0204	1,0212
28		1,0027	1,0036	1,0046	1,0056	1,0065	1,0074	1,0087	1,0097	1,0111	1,0121	1,0134	1,0146	1,0156	1,0166	1,0170	1,0174	1,0188	1,0201	1,0208
29		1,0026	1,0033	1,0043	1,0053	1,0062	1,0072	1,0085	1,0096	1,0108	1,0118	1,0131	1,0143	1,0153	1,0163	1,0168	1,0172	1,0184	1,0198	1,0204
30		1,0025	1,0030	1,0040	1,0050	1,0060	1,0070	1,0082	1,0095	1,0105	1,0115	1,0128	1,0140	1,0150	1,0160	1,0165	1,0170	1,0182	1,0195	1,0200
31		1,0024	1,0027	1,0037	1,0047	1,0058	1,0068	1,0079	1,0094	1,0103	1,0112	1,0125	1,0137	1,0147	1,0157	1,0162	1,0168	1,0180	1,0192	1,0196
32		1,0023	1,0024	1,0034	1,0044	1,0055	1,0066	1,0077	1,0093	1,0100	1,0109	1,0122	1,0134	1,0144	1,0154	1,0160	1,0166	1,0178	1,0189	1,0192

Anexo 4: Cotización de preservantes CCA

INQUIFESAC
INDUSTRIAL QUÍMICA FERRE S.A.C.

AV. INDUSTRIAL 8264 URB. PRO INDUSTRIAL - S.M.P. - LIMA
Telf. +51 1 537 5957

FECHA	COTIZACION
14/07/2025	IQ. 109196358

RUC	CLIENTE	CONTACTO
	MARTIN ARAUJO	
TELEFONO	**DIRECCION DE ENTREGA**	**EMAIL**

DESCRIPCION	PRESENTACION	CANTIDAD	UNIDAD	P. UNITARIO	TOTAL
ARSENAL 60% STD PRESERVANTE HIDROSOLUBLE CCA-C	TANQUE x 1800 KG (Peso Neto)	1800	KG	S/ 12.09	S/ 21,768.84
ARSENAL 60% STD PRESERVANTE HIDROSOLUBLE CCA-C	TAMBOR x 340 KG (Peso Neto)	340	KG	S/ 12.45	S/ 4,232.83
OBSERVACION:				SUB TOTAL	S/ 26,001.67
				IGV 18%	S/ 4,680.30
				TOTAL SOLES	**S/ 30,681.97**

Nuestras Cuenta:
Cta Cte Soles BCP: 193-0645876-0-98 / CCI 00219300064587609817
Cta Cte Dolares BCP: 191-2231392-1-22 / CCI 00219100223139212257
Cta Cte Soles Continental: 0011-0253-0100017012
Razon Social: INQUIFESAC - Industrial Quimica Ferre SAC
RUC: 20136808681

CONDICIONES DE PAGO	TIEMPO DE ENTREGA	VALIDEZ
CONTADO	PREVIA COORDINACION	10 DIAS
GARANTIA		
12 MESES		

Garantizamos la calidad de este material y su concordancia con nuestras especificaciones. Sin embargo, puesto que el uso y aplicación de este producto está fuera de nuestro control, no asumimos responsabilidad alguna por su manipuleo, uso, almacenaje y resultados obtenidos.

ATENTAMENTE
María Torres
Asesora Comercial
T. +51 995 742 965

.....

ventas@inquifesa.pe WWW.INQUIFESA.PE inquifesa@hotmail.com
FABRICACIÓN - IMPORTACIÓN - EXPORTACIÓN