EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO MECÁNICAS DE PANELES COMPUESTOS CON FIBRA DE ARUNDO DONAX Y RESINA VEGETAL PARA SER USADOS COMO ELEMENTOS ESTRUCTURALES

TRABAJO DE GRADO

Presentado por

LINA CONSTANZA OCAMPO PRIETO

Presentado como requisito parcial para optar al título de

MAGISTER EN INGENIERÍA CIVIL

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

Bogotá D.C., Colombia

(Noviembre de 2020)

NOTA DE ADVERTENCIA

"La universidad no se hace responsable de los conceptos emitidos por sus estudiantes en sus proyectos de trabajo de grado, soló velará por la calidad académica de los mismos, en procura de garantizar su desarrollo de acuerdo a la actualidad del área disciplinar respectiva. En el caso de presentarse cualquier reclamación o acción por parte de un tercero en cuanto a los derechos de autor sobre la obra en cuestión, el estudiante – autor asumirá toda la responsabilidad y saldrá en defensa de los derechos. Para todos los derechos la universidad actúa como un tercero de buena fe". (Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995)

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por permitirme hacer este sueño realidad.

Agradezco a mi tutora de tesis, Ing. Martha Lissette Sánchez Cruz, por su paciencia apoyo y dedicación para conmigo y mi trabajo de grado, asi como también al proyecto de investigación por patrocinar la realización de este proyecto, a Juan Pablo, William y Ana Maria por toda su colaboración.

Y para finalizar, agradezco a mis padres, mi hermana y a Diego, por todo su apoyo y comprensión con mi desarrollo profesional.

DEDICATORIA

A mis padres, por hacer de mi la profesional y persona que soy.

A mi hermana, por su apoyo incondicional.

A Diego, por ser mi apoyo, mi fortaleza, porque nunca me permitio rendirme y siempre me acompaño en cada paso de este proceso.

Tabla de Contenido

Contenido

LISTA DE TABLAS ..... **V**

LISTA DE FIGURAS ..... **VI**

LISTA DE ABREVIATURAS ..... **VIII**

RESUMEN ..... **IX**

ABSTRACT ..... **X**

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN **1**

1.1 Planteamiento del problema 2

1.2 Justificación 3

1.3 Objetivos 4

1.3.1 Objetivo General 4

1.3.2 Objetivos Específicos 4

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE **5**

CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO **8**

3.1 Materiales compuestos 8

3.1.1 Características de los materiales constituyentes 8

3.1.2 Clasificación de los materiales compuestos 9

3.1.3 Compuestos reforzados por fibras 10

3.1.4 Fibras Vegetales 11

3.1.5 Características del Arundo donax y su uso como refuerzo de biocompuestos 14

3.1.6 Proceso de extracción y tratamiento de las fibras vegetales 15

3.1.7 Biopolímeros empleados como matriz de compuestos poliméricos 18

3.1.8 Propiedades del aceite de ricino para su uso como matriz de compuestos poliméricos 20

3.1.9 Métodos de elaboración de compuestos 21

3.1.10 Factores que afectan la producción de biocompuestos 24

3.1.11 Aplicaciones de biocompuestos 25

3.1.12 Velocidad de pulso ultrasónico 26

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA 27

4.1 Selección de materiales constituyentes 27

4.2 Extracción y modificación de la superficie de las fibras 28

4.3 Determinación de las propiedades físicas de las fibras. 32

4.4 Elaboración de los paneles 33

4.5 Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de los paneles compuestos 35

4.6 Análisis de Varianza 39

CAPÍTULO 5. RESULTADOS 45

5.1 Propiedades físicas de los paneles 45

5.1.1 Densidad 45

5.1.2 Absorción efectiva 47

5.1.3 Hinchamiento 49

5.1.4 Absorción superficial 50

5.1.5 Análisis de las propiedades físicas de los paneles elaborados con fibras tratadas con plasma frio de Metano 51

5.1.6 Análisis de las propiedades físicas de los paneles elaborados con fibras tratadas mediante mercerización 52

5.1.7 Análisis de las propiedades físicas de los paneles elaborados con fibras tratadas con ozono 53

5.1.8 Análisis de varianza de las propiedades físicas de los paneles 54

5.2 Propiedades mecánicas de los paneles 60

5.2.1 Módulo de elasticidad aparente dinámico 61

5.2.2 Módulo de elasticidad dinámico 62

5.2.3 Módulo de cortante 63

5.2.4 Coeficiente de Poisson 64

5.2.5 Análisis de las propiedades mecánicas de los paneles elaborados con fibras tratadas con ozono 65

5.2.6 Análisis de las propiedades mecánicas de los paneles elaborados con fibras tratadas con plasma 66

5.2.7 Análisis de las propiedades mecánicas de los paneles elaborados con fibras tratadas mediante mercerización 66

5.2.8 Análisis de varianza 67

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES 72

CAPÍTULO 7. RECOMENDACIONES 73

FINANCIACIÓN 73

BIBLIOGRAFÍA 74

APÉNDICES 79

ANEXO 1. GRÁFICAS EFECTOS PRINCIPALES E INTERACCIÓN PARA PROPIEDADES FÍSICAS 80

ANEXO 2. GRÁFICAS PROBABILIDAD Y VALORES ATIÌCOS PARA PROPIEDADES FÍSICAS 86

ANEXO 3. GRÁFICAS EFECTOS PRINCIPALES E INTERACCIÓN PARA PROPIEDADES MECÁNICAS 92

ANEXO 4. GRÁFICAS EFECTOS PROBABILIDAD Y VALORES ATÍPICOS PARA PROPIEDADES MECÁNICAS 95

Lista de Tablas

Tabla 1. Clasificación de los materiales compuestos por tipo de matriz 9
Tabla 2. Clasificación de los materiales compuestos por tipo de refuerzo. 9
Tabla 3. Composición química en porcentaje de algunas fibras. 12
Tabla 4. Clasificación del arundo donax según el European Molecular Biology Laboratory-European Bioinformatics Institute.....14
Tabla 5. Composición química del aceite de ricino. 21
Tabla 6. Composición física del aceite de ricino. 21
Tabla 7. Propiedades de la matriz del compuesto. 27
Tabla 8. Cantidad de fibra utilizada por panel.....34
Tabla 9.Masa de componentes de resina utilizada por panel 34
Tabla 10. Propiedades físicas y mecánicas a analizar 36
Tabla 11. Ecuaciones de influencia del contenido de fibra en la densidad básica 47
Tabla 12. Ecuaciones de influencia del contenido de fibra en la densidad seco al aire 47
Tabla 13. Ecuaciones de influencia de la dosificación en la absorción efectiva a las 24 horas. 49
Tabla 14. Parámetros para análisis de varianza.....55
Tabla 15. Análisis de varianza para densidad en estado seco al aire.....55
Tabla 16. Análisis de varianza para densidad básica.....55
Tabla 17. Análisis de varianza para el porcentaje de absorción efectiva 56
Tabla 18. Análisis de varianza para el porcentaje de hinchamiento.....56
Tabla 19. Análisis de varianza para la capacidad de absorción.....56
Tabla 20. Análisis de varianza para la absorción superficial 56
Tabla 21. Variables de las ecuaciones de regresión 60
Tabla 22. Ecuaciones de regresión para predecir las propiedades físicas. 60
Tabla 23. Velocidad longitudinal de los paneles 61
Tabla 24. Parámetros para análisis de varianza.....67
Tabla 25. Análisis de varianza para Módulo de elasticidad aparente dinámico (MOE_d). 68
Tabla 26. Análisis de varianza para Módulo de cortante (G).....68
Tabla 27. Análisis de varianza para Módulo de elasticidad dinámico (Ed). 69
Tabla 28. Análisis de varianza Coeficiente de Poisson (μ) 69

Lista de Figuras

Figura 1. Tipos de fibras usadas como refuerzo. **10**
Figura 2. Clasificación de las fibras naturales según su origen. **11**
Figura 3. Clasificación de las fibras vegetales. **11**
Figura 4. Planta de arundo donax. **15**
Figura 5. Tratamientos para remoción de la lignina en fibras vegetales **17**
Figura 6. Clasificación de los biopolímeros. **18**
Figura 7. Proceso de elaboración de compuestos por estratificación manual. **22**
Figura 8. Proceso de pultrusión. **24**
Figura 9. Culmos de Arundo donax empleados para la obtención de las fibras. **27**
Figura 10. Triturador UMNG. **28**
Figura 11.Fibras de Arundo donax trituradas. **28**
Figura 12.Hidróxido de sodio empleado en el proceso de mercerización. **29**
Figura 13. Fibras de arundo donax inmersas en solución de NaOH. **29**
Figura 14. Reactor de ozono. **30**
Figura 15. Fibras de arundo donax posterior al tratamiento con ozono. **30**
Figura 16. Reactor de plasma **31**
Figura 17. Fibras de arundo donax en el reactor de plasma. **31**
Figura 18. Aspecto visual de las fibras de arundo donax posterior a su tratamiento con plasma. **32**
Figura 19. Proceso de elaboración de los compuestos. **35**
Figura 20. Cuadricula para obtención de velocidades. **38**
Figura 21. Transductores para obtención de velocidades. **38**
Figura 22. Valores de F de la distribución de Fisher para una significancia del 0.10%. **40**
Figura 23. Valores de F de la distribución de Fisher para una significancia del 0.05%. **41**
Figura 24. Valores de F de la distribución de Fisher para una significancia del 0.01%. **42**
Figura 25. Densidad de los paneles proporción 60/40. ..... **45**
Figura 26. Densidad de los paneles proporción 65/35. ..... **45**
Figura 27. Densidad de los paneles proporción 70/30. ..... **46**
Figura 28. Influencia de la dosificación y tratamiento en la densidad. **46**
Figura 29. Influencia de la dosificación en la densidad básica. **46**
Figura 30. Absorción efectiva de los paneles proporción 60/40 ..... **47**
Figura 31. Absorción efectiva de los paneles proporción 65/35 ..... **48**
Figura 32. Absorción efectiva de los paneles proporción 70/30 ..... **48**
Figura 33. Influencia de la dosificación en la absorción efectiva. **48**
Figura 34. Hinchamiento de los paneles proporción 60/40. ..... **49**
Figura 35. Hinchamiento de los paneles proporción 65/35. ..... **49**
Figura 36. Hinchamiento de los paneles proporción 70/30. ..... **50**
Figura 37. Influencia de la dosificación en el hinchamiento. **50**
Figura 38. Absorción superficial de los paneles. **51**
Figura 39. Capacidad de absorción los paneles. **51**
Figura 40. Gráfica de efectos principales densidad básica. **57**
Figura 41. Gráfica de interacción densidad básica. **58**
Figura 42. Gráfica de probabilidad densidad básica. **59**
Figura 43. Gráfica de valores atípicos de densidad básica. **59**
Figura 44. Módulo de elasticidad aparente dinámico. **62**
Figura 45. Módulo de elasticidad aparente dinámico. **62**
Figura 46. Módulo de elasticidad dinámico. **63**
Figura 47. Módulo de elasticidad dinámico. **63**
Figura 48. Módulo de cortante. **64**
Figura 49. Módulo de cortante. **64**
Figura 50. Coeficiente de Poisson. **65**
Figura 51. Coeficiente de Poisson. **65**

Figura 52. Gráfica de efectos principales para Módulo de elasticidad dinámico. 70
Figura 53. Gráfica de interacción para Módulo de elasticidad dinámico. 70
Figura 54. Gráfica de probabilidad de Módulo de elasticidad dinámico. 71
Figura 55. Gráfica de valores atípicos de Módulo de elasticidad dinámico. 71
Figura 56. Gráfica de efectos principales para Densidad. 80
Figura 57. Gráfica de interacción para Densidad. 80
Figura 58. Gráfica de efectos principales para absorción efectiva 2h. 81
Figura 59. Gráfica de interacción para absorción efectiva 2h. 81
Figura 60. Gráfica efectos principales de absorción efectiva 24h. 81
Figura 61. Gráfica de interacción para absorción efectiva 24h. 82
Figura 62. Gráfica de efectos principales para hinchamiento 2h. 82
Figura 63. Gráfica de interaccion para hinchamiento 2h. 82
Figura 64. Gráfica de efectos principales para hinchamiento 24h. 83
Figura 65. Gráfica de interaccion para hinchamiento 24h. 83
Figura 66. Gráfica de efectos principales para capacidad de absorción 2h. 83
Figura 67. Gráfica de probabilidad para capacidad de absorción 2h. 84
Figura 68. Gráfica de efectos principales para capacidad de absorción 24h. 84
Figura 69. Gráfica de interacción para capacidad de absorción 24h. 84
Figura 70. Gráfica de efectos principales para absorción superficial. 85
Figura 71. Gráfica de interacción para absorción superficial. 85
Figura 72. Gráfica de probabilidad de Densidad. 86
Figura 73. Gráfica de valores atípicos de Densidad. 86
Figura 74. Gráfica de probabilidad de absorción efectiva 2h. 87
Figura 75. Gráfica de valores atipicos de absorción efectiva 2h. 87
Figura 76. Gráfica de probabilidad para absorción efectiva 24h. 87
Figura 77. Gráfica de valores atípicos de absorción efectiva 24h. 88
Figura 78. Gráfica de probabilidad de hinchamiento 2h. 88
Figura 79. Gráfica de valores atipicos de hinchamiento 2h. 88
Figura 80. Gráfica de probabilidad de hinchamiento 24h. 89
Figura 81. Gráfica de valores atipicos de hinchamiento 24h. 89
Figura 82. Gráfica de probabilidad de capacidad de absorción 2h. 89
Figura 83. Gráfica de valores atipicos de capacidad de absorción 2h. 90
Figura 84. Gráfica de probabilidad para capacidad de absorción 24h. 90
Figura 85. Gráfica de valores atípicos de capacidad de absorción 24h. 90
Figura 86. Gráfica de probabilidad de absorción superficial. 91
Figura 87. Gráfica de valores atipicos de absorción superficial. 91
Figura 88. Gráfica de efectos principales para modulo de elasticidad aparente. 92
Figura 89. Gráfica de interaccion para modulo de elasticidad aparente. 92
Figura 90. Gráfica de efectos principales de modulo de cortante. 93
Figura 91. Gráfica de interaccion de modulo de cortante. 93
Figura 92. Gráfica de efectos principales para Coeficiente de Poisson. 93
Figura 93. Gráfica de interaccion para Coeficiente de Poisson. 94
Figura 94. Gráfica de probabilidad de modulo de elasticidad aparente. 95
Figura 95. Gráfica de valores atipicos de modulo de elasticidad aparente. 95
Figura 96. Gráfica de probabilidad de modulo de cortante. 96
Figura 97. Gráfica de valores atipicos de modulo de cortante. 96
Figura 98. Gráfica de probabilidad de Coeficiente de Poisson. 96
Figura 99. Gráfica de valores atipicos de Coeficiente de Poisson. 97

Lista de abreviaturas

OT	Tratamiento ozono
MT	Tratamiento mercerización
PT	Tratamiento plasma
ST	Sin tratamiento

Resumen

En este trabajo se plantea la evaluación del efecto de la dosificación de las fibras y de los tratamientos superficiales en las propiedades físicas y mecánicas de paneles compuestos elaborados con fibras vegetales y resina vegetal. Para la elaboración del compuesto se utilizaron fibras de Arundo Donax y una resina obtenida del aceite de Higuerilla. Para el desarrollo de la propuesta se utilizaron tres proporciones fibra/matriz (60/40, 65/35, 70/30). Para el análisis del efecto de los tratamientos superficiales en el desempeño del material tres métodos de modificación superficial se aplicaron: mercerización, ozono y plasma. La determinación de las propiedades físicas consistirá en la determinación de la densidad, la capacidad de absorción, el porcentaje de hinchamiento y la porosidad del material. Para evaluar el efecto de las variables seleccionadas en el desempeño mecánico del material se realizarán ensayos de velocidad de pulso ultrasónico determinando el módulo de elasticidad dinámico, el coeficiente de Poisson y el módulo de cortante del material. Los resultados obtenidos se evaluaron utilizando un análisis de varianza (ANOVA) con el objetivo de establecer cómo afecta la proporción y modificación de las fibras en el desempeño mecánico de compuestos elaborados con materiales de origen vegetal, lo cual puede condicionar su empleo como material de construcción para la elaboración de elementos estructurales.

Palabras clave: Arundo Donax, resina vegetal, propiedades físicas, propiedades mecánicas, dosificación, tratamientos superficiales.

Abstract

In this work, the evaluation of the effect of fiber dosing and surface treatments on the physical and mechanical properties of composite panels made with vegetable fibers and resin is proposed. For the elaboration of composite, Arundo Donax fibers and resin obtained from Higuerilla oil will be used. For the development of the proposal, three fiber/matrix ratios will be used (60/40), (65/35), (70/30). To analyze the effect of surface treatment on material performance, three surface treatments will be applied: mercerization, ozone, and plasma. The determination of the physical properties consists on the determination of the density, the absorption capacity, the percentage of swelling, and the porosity of material. To assess the effect of selected variables in the mechanical behavior, ultrasonic pulse speed tests will be made. The dynamic modulus of elasticity, the poisson coefficient, and the shear modulus will be determinate. The results will be evaluated using an analysis of variance (ANOVA) establishing how to affect the proportion and modification of the fibers in the mechanical behavior of vegetal composites, for their use as material construction on the elaboration of structural elements.

Key words: Arundo Donax, vegetal resin, lignin, physical properties, mechanical properties, surface treatments.

Capítulo 1. Introducción

Actualmente, el diseño, caracterización y aplicación de polímeros reforzados con fibras de origen vegetal, ha recibido una atención cada vez mayor en varias ramas de la industria. El empleo de materiales alternativos permite el desarrollo de una tecnología de materiales sostenibles, lo cual impacta favorablemente a la sociedad y al medio ambiente. El carácter renovable y la amplia disponibilidad de los materiales de origen vegetal permiten que puedan ser considerados una opción económicamente viable cuando son comparados con materiales tradicionalmente empleados en la elaboración de materiales compuestos poliméricos (Dehouche et al, 2020).

A pesar de las múltiples ventajas, factores asociados al proceso de manufactura pueden afectar en el desempeño mecánico del material. (Raju y Shanmugaraja, 2020). De acuerdo con Gurunathan et al (2015), aspectos como el tipo y la naturaleza de las fibras, su orientación, contenido y forma pueden incidir en la resistencia, rigidez y durabilidad de compuestos elaborados a partir de la combinación de materiales vegetales.

Uno de los principales aspectos que deben ser considerados en el diseño de compuestos elaborados con materiales de origen vegetal es la baja adhesión con matrices poliméricas, lo cual puede ser asociado a su naturaleza hidrofílica (Gurunathan, 2015). Es por este motivo, que se han desarrollado varios tipos de tratamientos superficiales, los cuales contribuyen a reducir la capacidad de absorción y provocan el aumento de la rugosidad de las fibras, mejorando la interface fibra- matriz y consecuentemente favoreciendo la transmisión de esfuerzos, lo cual permite una mejoría en el desempeño mecánico del material.

Basado en lo anterior, esta propuesta plantea la evaluación del efecto de la dosificación de las fibras y de los tratamientos superficiales en las propiedades físicas y mecánicas de paneles

elaborados con fibras de Arundo Donax y resina procedente del aceite de Higuerilla. Para el desarrollo de la propuesta tres proporciones fibra/matriz serán analizadas (60/40, 65/35, 70/30).

Para analizar el efecto de los tratamientos superficiales en el desempeño del material tres métodos de modificación superficial se aplicaron: mercerización, ozono y plasma. Para evaluar el efecto de las variables seleccionadas en el desempeño mecánico del material ensayos de velocidad de pulso ultrasónico serán desarrollados. Los resultados de la caracterización experimental se evaluaron mediante un análisis de varianza.

1.1 Planteamiento del problema

El mercado actual incentiva la innovación en la industria de la construcción, promoviendo el estudio y utilización de nuevos materiales que contribuyan a mitigar el impacto al medio ambiente generado por el empleo de materiales de construcción tradicionales. Adicionalmente, el uso de materiales de amplia disponibilidad en la naturaleza, permite la reducción de costos, lo cual favorece el desarrollo de una ingeniería sostenible que puede impactar en la construcción de viviendas de interés social.

Con el estudio y aplicación de materiales compuestos elaborados con materias primas de origen vegetal, es posible generar un nuevo insumo en el sector de la construcción, aprovechando recursos renovables, ampliamente disponibles en la naturaleza, los cuales en muchas ocasiones son considerados productos de desechos. Adicionalmente la sustitución de las fibras sintéticas por fibras vegetales en el refuerzo de matrices poliméricas de origen vegetal permite reducir la generación de residuos peligrosos o contaminantes.

Para poder emplear de forma eficiente los materiales compuestos elaborados a partir de la conjugación de materiales constituyentes de origen vegetal se hace necesario analizar el efecto de

algunas de las variables que inciden en el desempeño físico mecánico del material. En vista de lo anterior se plantean las siguientes preguntas de investigación:

¿Cómo influye el porcentaje de fibras en las propiedades físicas de compuestos elaborados con fibras de Arundo Donax y resina vegetal?

¿Cómo influye el porcentaje de fibras en las propiedades mecánicas de compuestos elaborados con fibras de Arundo Donax y resina vegetal?

¿Cómo influye el tratamiento superficial de las fibras en las propiedades físicas y mecánicas de compuestos elaborados con fibras de Arundo Donax y resina vegetal?

1.2 Justificación

Los materiales alternativos empleados en el sector de la construcción requieren del estudio de todas las variables que pueden incidir en su desempeño mecánico y su durabilidad. En la literatura especializada es posible encontrar resultados que muestran el efecto de los tratamientos superficiales en las propiedades de compuestos elaborados con un porcentaje definido de fibras vegetales y resina polimérica como Castañeda et al, (2016) donde se comprobó que el tratamiento alcalino usado en fibras de yute, corteza de coco, lino y algodón favorece el mecanismo de anclaje entre las fibras y el polímero o Praveen et al, (2016) que estudiaron el efecto del tratamiento con plasma en la superficie de fibras de coco confirmando que el tratamiento cambia la superficie topográfica de las fibras. De igual manera algunos autores han determinado las propiedades mecánicas de compuestos vegetales utilizando diferentes dosificaciones de fibras tratadas de acuerdo con un mismo método de tratamiento superficial. Sin embargo, hasta la fecha no existe un modelo estadístico que permita establecer el efecto de estas variables en el desempeño del material.

Un modelo estadístico permite analizar el comportamiento de las variables seleccionadas, evaluando no solo su efecto en el desempeño mecánico del material, sino también su influencia en

sus propiedades físicas, lo cual constituye uno de los factores a tener en consideración en el estudio de la durabilidad de compuestos de origen vegetal. Por otra parte, el empleo de técnicas no destructivas en la determinación de las propiedades mecánicas de materiales puede constituir un aporte importante en la caracterización de nuevos materiales.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Evaluar las propiedades físico-mecánicas de los paneles elaborados con fibra de arundo donax (caña brava) y resina vegetal, empleando la técnica de Análisis de Varianza, para establecer su uso en construcciones.

1.3.2 Objetivos Específicos

Evaluar la influencia de la dosificación de los materiales constituyentes en las propiedades físico-mecánicas de los paneles compuestos elaborados con tres diferentes proporciones fibra/matriz (70/30), (65/35) y (60/40).

Evaluar la influencia del tratamiento superficial de las fibras en las propiedades físico-mecánicas de los paneles elaborados con fibras de Arundo Donax y resina vegetal.

Aplicar la técnica de análisis de varianza para determinar la significancia de los factores, proporción de materiales constituyentes y tratamiento de modificación superficial, en las variables del estudio (propiedades físicas y mecánicas de los paneles).

Cumplir con uno de los compromisos del Proyecto de Investigación INV-ING-2983, vigencia 2019.

Capítulo 2. Antecedentes y Estado del Arte

Los objetivos de la investigación se lograron realizando un análisis de los estudios previos sobre materiales compuestos elaborados con fibras vegetales. Estos estudios son resumidos a continuación:

Mistri et al., 2011 analizó la resistencia a flexión estudiando el impacto de compuestos elaborados con aceite de ricino como sustituto de las resinas sintéticas usadas comúnmente como matriz de compuestos poliméricos.

Fiore en al., 2014 evaluó el uso de fibras de arundo donax como refuerzo de compuestos elaborados con resina epoxica. El análisis se enfoco en la determinación de la composición química y la resistencia a la tensión de las fibras, desarrollando un modelo matemático que permitió relacionar la resistencia a la tensión con las dimensiones de las fibras.

Scalici et al., 2016 analizó la influencia de los tratamientos superficiales en la modificación de las fibras vegetales usadas como refuerzo de compuestos naturales. La investigacion se enfocó en la caracterización de fibras de arundo donax tratadas con plasma, empleando el método de termo gravimetría para analizar la degradación que ocurre en el material por efectos de la temperatura. Adicionalmente, se realizo la caracterización mecánica de las fibras mediante la realización de ensayos de tensión y la influencia del tratamiento con plasma se evaluo mediante ensayos mecánicos cuasi estáticos y dinámicos. Los resultados experimentales monstraron un incremento de las propiedade mecánicas indicando que el tratamiento con plasma mejora la adhesión de la fibra/matriz.

Sánchez et al., (2020) analizaron el efecto de la modificación de la superficie de las fibras en las propiedades físicas y mecánicas de compuestos elaborados con fibras de bambú y aceite de ricino. En este estudio tres tipos de tratamientos fueron empleados: un tratamiento de inmersión en solución de hidróxido de sodio, un tratamiento con ozono y un tratamiento con plasma frio de metano y argón. El efecto de los tratamientos en las propiedades químicas de las fibras se evaluó mediante técnicas de difracción de rayos x (DRX), espectroscopia infrarroja (IR), microscopia electrónica de barrido (SEM) y microscopia de fuerza atómica (AFM), demostrando el efecto de los tratamientos en la textura superficial y en la composición química de las fibras. Para evaluar el efecto de los tratamientos en las propiedades físicas se determinaron la capacidad de absorción y el porcentaje de hinchamiento de paneles elaborados mediante un método de compresión a temperatura ambiente. Adicionalmente, fue evaluada la influencia de la modificación de la superficie de las fibras en la resistencia y rigidez de los paneles compuestos, realizando ensayos de compresión y flexión estática. Los resultados mostraron un incremento de hasta 50% en la resistencia de compuestos elaborados con fibras tratadas con plasma.

A las fibras se les realizan tratamientos de modificación superficial que son importantes ya que permiten un mejor anclaje de las fibras a la matriz polimérica. Castañeda et al., 2016 realizaron una investigación con fibras de fique, yute, corteza de coco, lino y algodón, las cuales fueron tratadas con Hidróxido de sodio (NaOH) y se analizaron con espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y por microscopia electrónica de barrido (SEM). Los resultados de la investigación mostraron que el tratamiento alcalino logro remover ligninas, pectinas, hemicelulosa y otras impurezas de la superficie de las fibras.

Otro estudio realizado por Rodríguez et al., (2015) con fibras de platano que fueron sometidas a un tratamiento químico con epiclorhidrina y anhídrido acético y a un tratamiento con

plasma. Para obtención de los resultados se analizaron las fibras con Espectrostopia infrarroja de trasnformacion de Fourier (FTIR), Microscopía electrñonica de barrido (SEM) y análisis termogravimétrico (TGA), además, se determinó experimentalmente la resistencia a tensión. En los resultados se evidenció que en las fibras tratadas químicamente se redujo en un mayor porcentaje el contenido de lignina y de hemicelulosa. Una investigación realizada sobre fibras de piña por Sood et al., 2018 mostré que con los tratamientos químicos se incrementa la resistencia a flexión y la adhesión entre la superficie de las fibras y la matriz. Los tratamientos químicos se realizaron por medio del uso de Hidroxido de Sodio (NaOH) e Hidruro de Silicio (SiH_4).

Un estudio comparativo de diferentes fibras usadas en la elaboración de compuestos (Monsalve et al., 2018) permite comprobar que los paneles reforzados con fibras de arundo donax tienen mejores resultados de rigidez y resistencia que paneles elaborados con fibras de coco y guadua. Adicionalmente, los resultados de dicha investigación demuestran que paneles elaborados con fibras de arundo donax presentan mayor estabilidad dimensional que paneles elaborados con fibras de guadua.

Otro parámetro que influye en las propiedades de materiales biocompuesto es la orientación de las fibras. Un estudio acerca del efecto de la orientación de las fibras en la resistencia a tensión de compuestos elaborados con fibras de ortiga y ácido láctico fue presentado por Kumar et al., 2018. En este trabajo los autores desarrollaron un modelo que permite predecir la resistencia a tensión del compuesto a partir de la resistencia de los materiales constituyentes (fibra y matriz). Para este estudio fueron analizadas fibras de 5 cm de longitud tratadas con hidróxido de sodio variando la orientación de las fibras entre -90 a 90 grados. Los resultados del modelo fueron validados mediante la realización de ensayos experimentales, mostrando una buena correlación.

Capítulo 3. **Marco Teórico**

3.1 Materiales compuestos

Un material compuesto es una combinación de al menos dos macro constituyentes que difieren en forma y composición química y que son insolubles entre sí, (Smith y Hashemi, 2004). Según Saja Et al., (2005), son materiales conformados por dos o más componentes que no son miscibles y que mantienen su identidad diferenciada a nivel microscópico, dando lugar a un material macroscópicamente homogéneo, que posee múltiples ventajas entre las que se destacan su elevada resistencia, baja densidad, elevada rigidez, comportamiento a la fatiga, alta resistencia a la corrosión, facilidad de fabricación y su alta estabilidad dimensional. Sin embargo, a pesar de sus ventajas, algunos aspectos, pueden constituir una limitación para su empleo, siendo un factor fundamental, el hecho de que, en dependencia de los materiales utilizados para su elaboración, en ocasiones se desconoce cuál será el desempeño mecánico del material, así como su vida útil.

3.1.1 Características de los materiales constituyentes

En los materiales compuestos es posible identificar dos fases principales constituyentes: una fase discontinua llamada refuerzo y una fase continua llamada matriz (Guerrero et al., 2011), dando lugar a un material multifásico. Cada una de estas fases juega un papel importante en el desempeño del material. El componente que actúa como refuerzo es el responsable por la resistencia y rigidez del material y la matriz permite la cohesión del material, protege al refuerzo de daños químicos, contribuye a la transferencia de las cargas aplicadas sobre la matriz hacia el refuerzo y protege al refuerzo de los efectos nocivos del medio ambiente (Guerrero et al., 2011). Las propiedades mecánicas del compuesto dependen de las propiedades de sus componentes, y de

la unión entre ambos, siendo fundamental la adhesión entre fibra y matriz y la transmisión de los esfuerzos mecánicos entre ambas (Guerrero et al., 2011).

3.1.2 Clasificación de los materiales compuestos

De acuerdo al tipo de matriz y de refuerzo empleados para la conformación del material es posible establecer su clasificación. La clasificación de los materiales compuestos de acuerdo al tipo de matriz y refuerzo es presentada en las tablas 1 y 2, respectivamente:

Tabla 1. Clasificación de los materiales compuestos por tipo de matriz

TIPO DE MATRIZ	CARACTERÍSTICAS
Metálica	Alta resistencia mecánica, elevada rigidez y bajo peso
Cerámica	Alta resistencia y tenacidad
Polimérica	Alta resistencia mecánica y alta resistencia química

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Clasificación de los materiales compuestos por tipo de refuerzo.

TIPO DE REFUERZO	CARACTERÍSTICAS
Partículas	Se subdividen en dos categorías: partículas grandes y partículas endurecidas por dispersión. El desempeño del material depende del tamaño de la partícula y de su distribución.
Fibras	Pueden ser largas o cortas. Las fibras largas pueden orientarse en una, dos, o más direcciones. Las fibras cortas pueden ser alineadas o aleatoriamente distribuidas. El desempeño del material, depende del tipo de fibra, su longitud u orientación.
	Son conformados a partir de la superposición de láminas. El desempeño mecánico depende

Estructurales	del número de láminas, su espesor y el de los ángulos de laminación.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.3 Compuestos reforzados por fibras

Fibra es el nombre genérico de un conjunto de materiales que tienen la característica de poseer un alto valor de la relación longitud/diámetro (l/d), de acuerdo con De Saja et al., (2005). Las fibras se clasifican según su origen tal y como se muestra en la Figura 1:

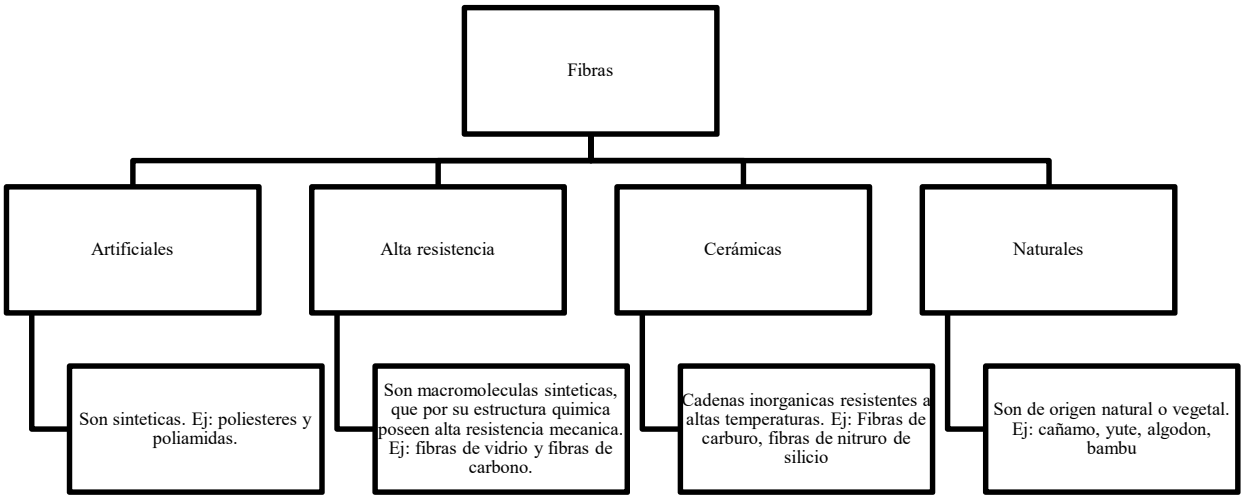

Figura 1. Tipos de fibras usadas como refuerzo.
Fuente: De Saja et al., (2005).

Las fibras naturales se clasifican según su origen en vegetal, animal o mineral (ver Figura 2). Las fibras vegetales pueden ser obtenidas de las semillas, las frutas u otras partes de las plantas y son las más antiguas en cuanto a su uso.

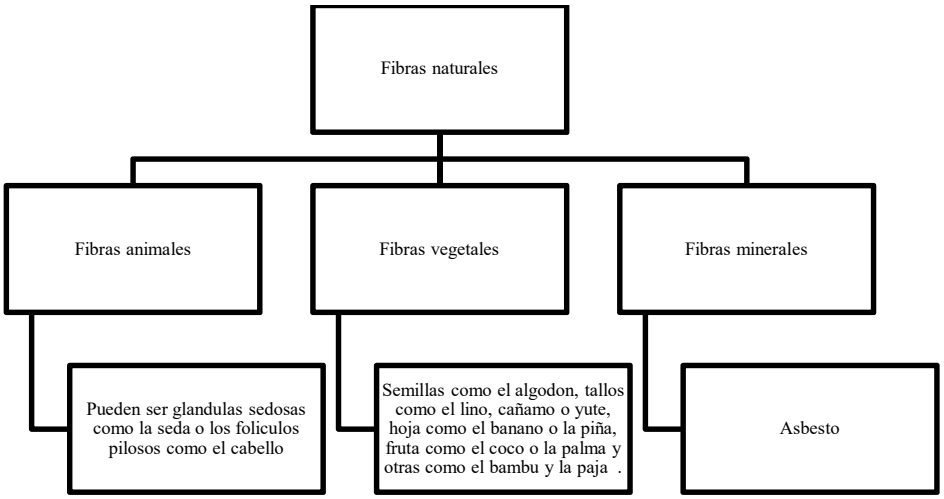

Figura 2. Clasificación de las fibras naturales según su origen.
Fuente: Velásquez et *al*., (2015).

3.1.4 Fibras Vegetales

Las fibras vegetales son filamentos lignocelulosicos que forman parte de las plantas y cumplen una función específica en ellas, como dar soporte, rigidez y la dureza (Guerrero et al., 2011). La clasificación de las fibras se da de acuerdo con la función y ubicación dentro de la planta y se muestra en la figura 3:

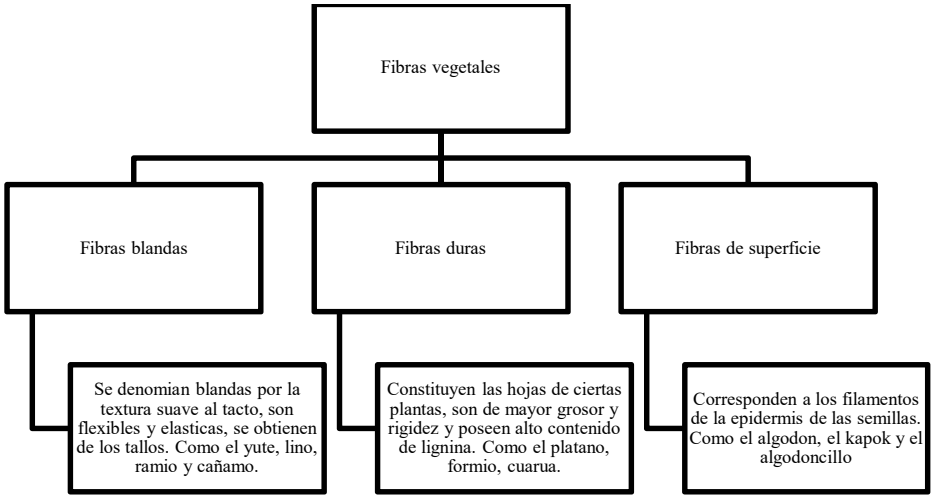

Figura 3. Clasificación de las fibras vegetales.
Fuente: Guerrero et *al*., (2011).

Según Maya et al., (2007), las fibras vegetales están compuestas principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, pero también contienen pectina y cera en menores cantidades. La celulosa está alineada a lo largo de las fibras y es la encargada de aportar esfuerzos de tensión, flexión y aportar rigidez. La celulosa es el componente que brinda las propiedades de resistencia de las fibras y según Velásquez et al., (2015), se presenta en forma de microfibras cristalinas y es resistente a los agentes oxidante. Las microfibras de la celulosa están recubiertas por hemicelulosa, que son una cadena de polisacáridos de peso molecular que permite el enlace de la celulosa con la pectina. La pectina es un polisacárido aniónico, que proporciona flexibilidad a las fibras. De acuerdo con Guerrero et al., 2011, la composición química de las fibras puede variar de acuerdo con la especie, la edad de la planta y las condiciones ambientales se producción, pero, la relación entre celulosa, hemicelulosa y lignina es de aproximadamente 4:3:3, en la tabla 3 se muestra la composición química en porcentaje de algunas fibras vegetales:

Tabla 3. Composición química en porcentaje de algunas fibras.

Fibra	Celulosa (%Peso)	Hemicelulosa (%Peso)	Lignina (%Peso)
Lino	71.2	18-20	2.2
Cáñamo	70-75	17-22	3.7-5.7
Yute	61-71	13-20	8.1-13
Kenaf	45-57	21	8-13
Ramio	68-76	13-16	0.6-0.7
Abacá	63-70	20-21	5-6
Sisal	67-78	10-14	8-14
Algodón	82-93	3-6	----
Bambú	35-61	15	27-32
Coco	32-43	0.15-0.25	40-45
Banana	63-64	10	5
Formio	71.3	----	----
Arundo donax	43.2	20.5	17.2

Fuente: Elaboración propia.

3.1.4.1 Celulosa

La celulosa es el componente fundamental de las células vegetales. Según Guerrero et al., (2011), es un polisacárido insoluble en agua, rígido y de peso molecular variable. Las cadenas de celulosa son sintetizadas en el exterior celular por la enzima celulosa sintasa, esta cumple la función de formar microfibrillas, filamentos largos y delgados que proveen a los tejidos vegetales la resistencia a las tensiones mecánicas. Las fibras con alto contenido de celulosa tienen gran capacidad de absorber humedad, poseen un bajo volumen, capacidad de soportar altas temperaturas y buen conductor de electricidad.

3.1.4.2 Hemicelulosa

Son polisacáridos fundamentales en la composición de las paredes celulares de las plantas según Guerrero et al., (2011). Las hemicelulosa son carbohidratos, un contenido alto de estos pueden facilitar el desarrollo de hongos, por lo tanto, se requiere mantener condiciones adecuadas de temperatura y humedad en su almacenamiento.

3.1.4.3 Lignina

Según Estrada (2011), la lignina es un constituyente de la materia orgánica de las plantas y otorga las propiedades de elasticidad de las fibras. Es un polímero aromático heterogéneo que forma parte de los tejidos de sostén de los vegetales y forma la lamela que adhiere las fibras entre ellas.

3.1.4.4 Ceras, grasas y resinas

Son sustancias solubles en medios acuosos que recubren la epidermis de frutos y tallos y evitan la perdida de agua por evaporación en las plantas. También protege contra daños mecánicos y repelen parásitos de acuerdo con Guerrero et al., (2011).

3.1.5 Características del Arundo donax y su uso como refuerzo de biocompuestos

Aramendez et al., (2008) indica que el Arundo donax es también llamado caña común, caña brava, carrizo, falso bambú, chusque o caña bova, pertenece a la clase liliosida, orden poales. Es una planta perenne con fuertes rizomas y es una de las gramíneas más grandes llegando a medir hasta 10 metros de altura. Crece espontáneamente en aluviones pedregosos de los ríos caudalosos de las tierras calientes y subtempladas. Es una planta que en muchos lugares se considera invasiva y generalmente sus fibras son de poco valor o aplicación, ya que por ejemplo en Colombia se usan sus hojas en la fabricación de sombreros y otras artesanías.

El arundo donax pertenece a la familia de las gramíneas (Poaceae) y taxonómicamente hace parte de la subfamilia arundinoidae, que incluye las gramíneas tropicales caracterizadas por inflorescencias plumosas. Es la especie de mayor tamaño del género y una de las gramíneas más grandes del mundo, sus hojas son de color verde glauco que pueden llegar a medir hasta un metro y pueden mantenerse verdes todo el año. No obstante, en zonas con cambios de clima, las hojas y tallos se amarillean durante la época seca del año. En la tabla 4 se muestra la clasificación del arundo donax según el European Molecular Biology Laboratory-European Bioinformatics Institute (Lino 2016):

Tabla 4. Clasificación del arundo donax según el European Molecular Biology Laboratory-European Bioinformatics Institute.

Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida
Orden	Poales
Familia	Poaceae
Género	Arundo
Especie	Arundo donax L

Fuente: Lino (2016)

Según Deltoro et al., (2012), los tallos del arundo donax son rectos y pueden llegar a tener una altura entre 5 y 6 metros, son huecos y segmentados, con nudos cada 20 a 30 centímetros y un diámetro medio de 2 centímetros como se muestra en la figura 4. La zona de los nudos con forma de anillo es rica en fibras lignificadas.

Figura 4. Planta de arundo donax.
Fuente: Deltoro et *al*., (2012).

La raíz del arundo donax está constituido por un rizoma carnoso que conserva los carbohidratos y es el responsable de la producción de nuevos tallos, Deltoro et al., (2012).

La densidad de las fibras de arundo donax es de aproximadamente 1.168 g/cm^3, según Fiore et al., (2014), y se especifica que como las fibras naturales está compuesta principalmente de celulosa, hemicelulosa y lignina. La superficie de las fibras de arundo donax están compuestas por varias fibras orientadas en el sentido largo del tallo junto con los demás componentes.

3.1.6 Proceso de extracción y tratamiento de las fibras vegetales

La utilización de las fibras vegetales como refuerzo de compuestos poliméricos requiere la selección de métodos de extracción adecuados y la realización de tratamientos de modificación

superficial mediante los cuales se elimina parcialmente la lignina, la cera y otras impurezas que el material posee. De acuerdo con Zhang et al., (2017) es importante realizar el proceso de remoción de la lignina para mejorar las propiedades mecánicas de los biocompuestos ya que fortalecen la relación fibra matriz y reduce la sensibilidad a la humedad.

El proceso de extracción de las fibras se puede realizar por medio de diferentes métodos citados a continuación:

- Método de extracción mecánica: consiste en extraer las fibras por medio de trituradores mecánicos. Este proceso puede llegar a ser poco eficiente, puede ocasionar daño a las fibras y las fibras pueden quedar mal separadas.
- Métodos de extracción biológica: en este proceso de utilizan enzimas de diferentes organismos, por ejemplo, las bacterias, organismos que descomponen la lignina adherida a las fibras. En este proceso se debe utilizar grandes cantidades de agua, la cual puede contener microorganismos que logran afectar el procedimiento de separación de las fibras, ya que puede llegar a romper las fibras o afectar sus propiedades.
- Métodos de extracción química: este procedimiento busca separar los tres componentes de la materia prima vegetal, que son, la celulosa, la hemicelulosa y la lignina. Es el proceso más efectivo para eliminar la lignina, pero también puede llegar a degradar la celulosa.

Los procesos para remover la lignina son numerosos y ampliamente investigados, pero principalmente se estudian los mostrados en la figura 5 (Zhang et al.,2017):

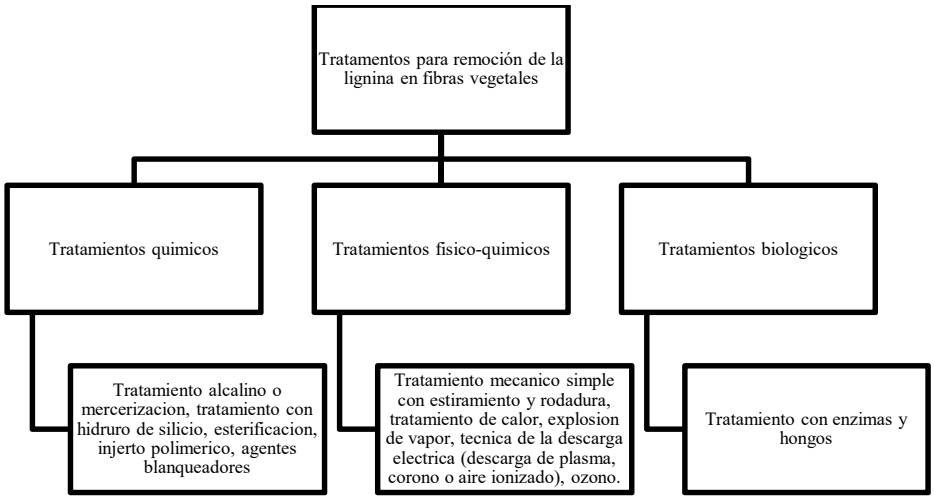

Figura 5. Tratamientos para remoción de la lignina en fibras vegetales
Fuente: Elaboración propia.

Los métodos químicos usan un mecanismo de unión mediante agentes de acoplamiento. Dentro de este método encontramos el tratamiento alcalino o también llamado mercerización. El tratamiento descompone los haces de fibras en fibras más pequeñas y cortas debido a la interrupción de los enlaces de hidrogeno y además induce un cambio en la microestructura de la celulosa aumentando la rugosidad de la superficie (Zhang et al., 2017). El procedimiento se logra por medio de la inmersión durante un periodo de tiempo de las fibras en una solución de hidróxido de sodio (NaOH). El tiempo de tratamiento, concentración y temperatura deben ser cuidadosamente seleccionados para no ocasionar la degradación mecánica del material (Gómez 2009).

Los métodos fisicoquímicos no producen cambios sustanciales en las propiedades de las fibras, pero si generan cambios en la superficie de las mismas ya que permiten modificaciones en la relación entre el oxígeno y el carbono de las fibras. Dentro de este método encontramos el tratamiento por descarga de plasma que es un proceso eléctrico que emplea aire ionizado para incrementar la tensión superficial de substratos no porosos (Alonso et al., 2017). La superficie de

las fibras es modificada de dos maneras, el primer caso se trata de limpiar o activar la superficie por medio de gases no polimerizantes y el segundo caso con gases polimerizantes (Wrobel-Kwiatkowska et al., 2017). Este tratamiento está cobrando importancia por el bajo impacto ambiental. Otro tratamiento fisicoquímico corresponde a la utilización de ozono para modificar la superficie de las fibras. El ozono (O_3) es una variedad de oxígeno, un gas de elevado poder oxidante que se obtiene a partir de la reacción química altamente endotérmica del oxígeno no espontanea (Bautista 2012).

3.1.7 Biopolímeros empleados como matriz de compuestos poliméricos

Los biopolímeros, tienen origen natural y renovable. Provienen de plantas, animales o microorganismos, son biodegradables por lo cual son capaces de descomponerse en elementos naturales por la acción de microorganismos sin afectar el medio ambiente, lo que les permite ser reabsorbidos por la naturaleza completando el ciclo de vida del material (Arrieta et al., 2016).

La producción de los biopolímeros tiene como base el ácido poli láctico, plásticos de celulosa, almidón termoplástico y/o aceites vegetales. Valero et al., (2011) clasificaron los polímeros naturales en tres categorías que se muestran en la figura 5:

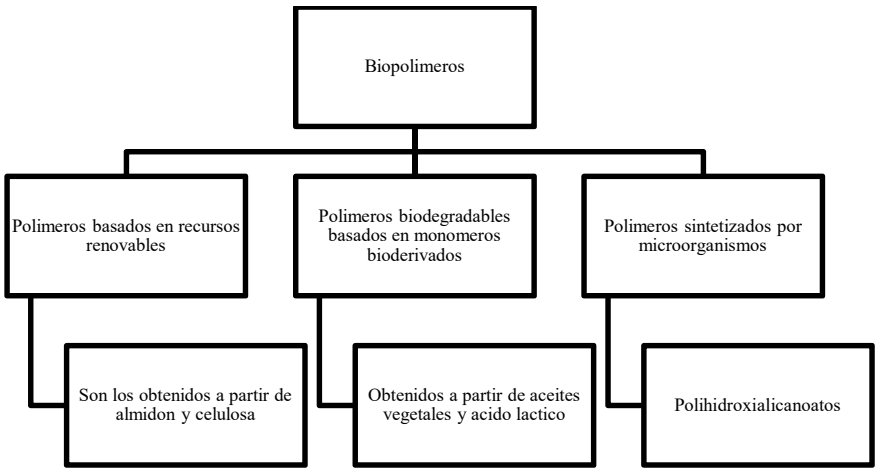

Figura 6. Clasificación de los biopolímeros.
Fuente: Valero et *al*., (2011).

Los polímeros basados en celulosa se producen mediante modificación química de la celulosa natural y se usan básicamente en la fabricación de prendas de vestir y en materiales higiénicos desechables. Los polímeros obtenidos a partir de bioderivados son aquellos cuya fuente son los aceites vegetales, pueden ser obtenidos de plantas, y básicamente están compuestos de triglicéridos, los aceites vegetales varían ampliamente en sus propiedades físicas y químicas en función de los ácidos grasos de su estructura, algunos tipos de polímeros obtenidos a partir de aceites de triglicéridos son poliésteres, poliuretanos, poliamidas, resinas acrílicas, resinas epoxi y poliéster amidas. De acuerdo con Cruz et al., (2012), se ha generado una tendencia creciente a la utilización de aceites vegetales como materia prima en la fabricación de biopolímeros por sus ventajas, entre ellas, el bajo costo, la biodegradabilidad y disponibilidad de recursos, estos son versátiles ya que están compuestos de ácidos grasos y ésteres de glicerol, esto permite aprovechar los aceites obtenidos de las semillas de linaza, ricino, soya, cártamo, entre otras. Estos aceites son triglicéridos que a temperatura ambiente se encuentran en estado líquido, los triglicéridos son ésteres compuestos por una molécula de glicerol y tres moléculas de ácidos grasos, pueden ser de origen natural o sintético y son solubles en agua. Las resinas epóxicas se producen con aceites vegetales y sus derivados. Por disponibilidad y bajo costo Valero et al., (2011) indicaron que los aceites vegetales han recibido especial atención en los últimos años, en especial el aceite de ricino, ya que se caracteriza por ser uno de los pocos aceites vegetales cuya composición se reduce casi a la de un solo componente, el 90% de este aceite corresponde al triglicérido del ácido ricinoléico.

Adicionalmente, se tienen los polímeros producidos por microorganismos, los cuales, según Valero et al., (2011) son llamados biopolímeros tipo polihidroxialcanoato que son poliésteres sintetizados por bacterias que los acumulan como reservas de carbono y energía. Una ventaja de estos biopolímeros está asociada con los sustratos utilizados para su síntesis, ya que se

pueden obtener a partir de desechos agroindustriales, que son materias primas de bajo costo (Ramirez et al., 2017).

3.1.8 Propiedades del aceite de ricino para su uso como matriz de compuestos poliméricos

El aceite de ricino o también conocido como aceite de higuerilla se obtiene a partir de la semilla de ricino de la planta Ricinus communis L, de la familia de las euforbiáceas, que son plantas herbáceas de acuerdo con Atamari et al., (2015). Esta planta crece en un estado silvestre en zonas tropicales y subtropicales, su altura varía entre 1 a 10 metros. La planta de ricino tiene grandes hojas palmeadas, divididas en lóbulos lanceolados, de diversas gotmas y de colores que van desde un verde oscuro a un verde rojizo, según la variedad. La planta de ricino requiere un buen suministro de agua en las primeras fases de crecimiento, posteriormente es muy resistente a la sequía y puede desarrollarse sin recibir más agua. Es una planta diurna y tiene mejor rendimiento a temperaturas más elevadas. La planta de ricino produce semillas ricas en aceite, dichas semillas son globulares, con espinas más o menos blandas y de color verde o verde rojizo antes de madurar. La semilla debe someterse a un proceso de retiro de la cascara, posteriormente debe prensarse o extraerse el aceite, la semilla de ricino puede dividirse en aceite, agua y bagazo o harina, en esta última obtienen elementos venenosos. Según la Publicación de las Naciones Unidas (1974) se indica que el ricino es originario de África, de donde se extendió al Oriente Medio como planta silvestre. Hace millones de años se usaba en la India y en China en lámparas de alumbrado. El mayor productor de ricino es Brasil.

El aceite de ricino es incoloro a amarillo, transparente viscoso, inflamable y de olor suave, y químicamente está constituido principalmente por un ácido graso, el ácido ricinoleico y una pequeña cantidad de diferentes ácidos saturados o insaturados (Ruiz 2017). El ácido ricinoleico es uno de los principales aceites vegetales utilizados en la química de los polímeros. La composición

química y física del aceite de ricino se muestra en las tablas 5 y 6, respectivamente (Atamari et al., 2015):

Tabla 5. Composición química del aceite de ricino.

Ácido palmítico	2.0%
Ácido dihidroxiesteártico	0.6%
Ácido oleico	7.0%
Ácido ricinoleico	87.0%
Ácido linoleico	3.0%
Ácido esteárico	1.0%

Fuente: Atamari et al., (2015)

Tabla 6. Composición física del aceite de ricino.

Peso molecular (g/mol)	895.39
Punto de fusión (ºC)	-12
Punto de ebullición (ºC)	313
Punto de inflamación (ºC)	229
Densidad, ρ g/cm^3 (25ºC)	0.955-0.968
Temperatura de ignición (ºC)	449

Fuente: Atamari et al., (2015)

El aceite de ricino se obtiene por medio de dos procesos, el primero es presión o prensado de las semillas y el segundo es extracción por solventes, también se puede obtener con una combinación de ambos métodos (Atamari et al., 2015).

3.1.9 Métodos de elaboración de compuestos

Los compuestos son una mezcla de dos materiales en los cuales ocurre una sinergia por medio de la cual se obtienen propiedades específicas para diferentes aplicaciones (Belchor et al., 2017). Teniendo en cuenta que los compuestos se conforman por una mezcla de dos materiales debe tenerse claro el proceso de fabricación para satisfacer los requerimientos del producto. La selección del proceso más adecuado depende de factores como: la matriz, el tipo y geometría del refuerzo, la aplicación del compuesto, las limitaciones y costos de fabricación. Dávila et al., (2011) indican que los procesos más utilizados en la elaboración de compuestos son estratificación manual, moldeo por aspersión, extrusión, inyección, moldeo por compresión, pultrusión,

estratificación de impregnados y moldeo por transferencia de resina, los cuales se describen a continuación:

- Estratificación manual: en este proceso debe utilizarse una resina termoestable que permita su fácil procesamiento y una impregnación adecuada en las fibras. Esta resina se usa en forma líquida, es manejable a temperatura ambiente y en su estructura tendrá un monómero reactivo que proporcionará la viscosidad requerida además formará entrecruzamientos entre las cadenas poliméricas durante el curado para lo cual se adiciona un iniciador, el cual desencadena la reacción y posteriormente un catalizador para promover su aceleración. El refuerzo del compuesto podrá ser fibra corta, fibra larga, tejido o no tejido. Las etapas del proceso se muestran en la figura 7.

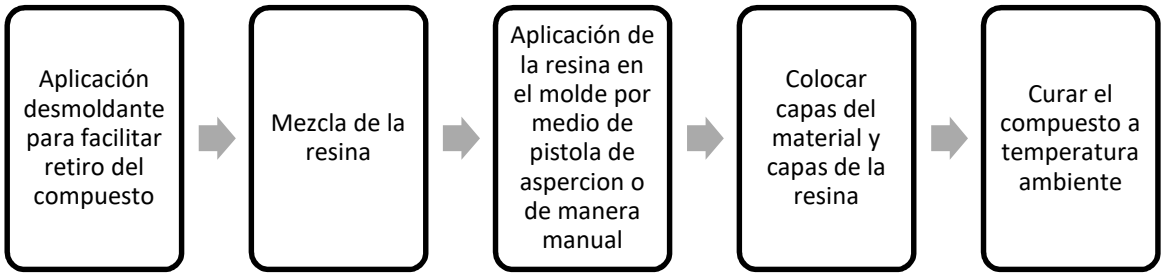

Figura 7. Proceso de elaboración de compuestos por estratificación manual.
Fuente: Elaboración propia.

Este proceso tiene como ventajas principales que es simple y permite fabricar compuestos de diferentes tamaños y con diferentes relaciones fibra/matriz. La limitación es que requiere alta mano de obra y en ocasiones es difícil controlar el espesor final del compuesto y el buen acabado del mismo (Guerrero et al., 2011).

- Estratificación de pre impregnados: el pre impregnado corresponde a una mezcla de refuerzo dispuestos en forma de tejido el cual es impregnado con un polímero que puede ser termoestable y termoplástico. El producto se presenta en forma de láminas por medio de fusión en caliente, apilamiento de láminas o deposición electrostática.

- Moldeo por aspersión: este procedimiento es similar al de estratificación manual, la diferencia radica en que debe utilizarse una pistola de aspersión para depositar en el molde la fibra corta y la matriz, no requiere aplicación de calor ni presión.

- Moldeo por compresión: se emplea un molde en acero inoxidable o aluminio tipo macho-hembra, diseñado de tal forma que se aplique presión en el proceso de moldeo. Se utiliza con materiales termoplásticos y/o termoestables y consiste en intercalar láminas de refuerzo impregnados en la matriz en un molde que posteriormente es prensado. Este procedimiento puede requerir calor o no dependiendo de la resina empleada. Se debe garantizar un diseño adecuado del molde en el cual se evite el aire atrapado. Este procedimiento da acabados lisos y permite la fabricación de compuestos que generalmente son de bajo peso y gran resistencia a la flexión. Es una herramienta útil para el desarrollo de la investigación ya que se puede trabajar a pequeña escala, su gran limitación es que solo se pueden elaborar elementos simples como placas planas de espesores constantes.

- Extrusión: en este procedimiento el material se expulsa por medio de un orificio para darle una forma determinada. Generalmente se usa en la industria plástica para obtener compuestos de sección constante por medio de extrusoras de tornillo o extrusoras de pistón.

- Inyección: este proceso se realiza transportando el polímero por un molde cerrado donde se solidifica tomando la forma del molde, las fibras se pueden involucrar en el molde de manera que cuando se adicione el polímero se incorporan o por medio de pultrusión.

- Moldeo por transferencia de resina: también se conoce como transferencia liquida y consiste en inyectar la resina en un molde cerrado en el cual previamente se ha dispuesto el refuerzo, la inyección puede ser múltiple o sencilla.

- Moldeo por pultrusión: consiste en impregnar las fibras en la matriz y conducirlas por una boquilla a velocidad constante. El compuesto que se obtiene es de forma constante y depende de la sección transversal del molde. En la figura 8 se puede observar un esquema del proceso de pultrusión:

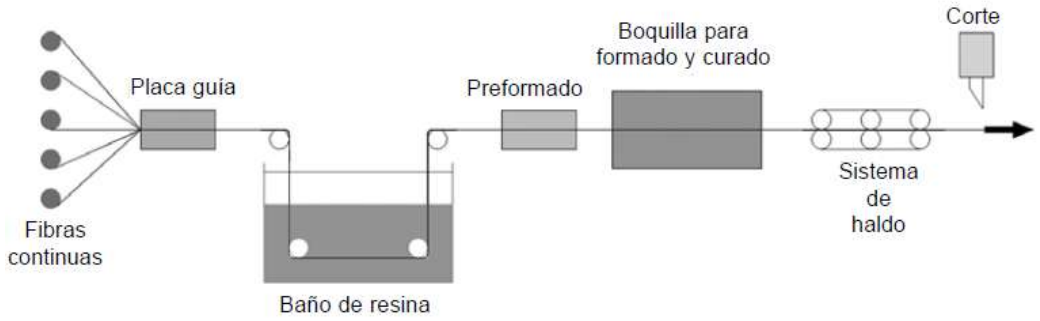

Figura 8. Proceso de pultrusión.
Fuente: Dávila et al, (2011).

3.1.10 Factores que afectan la producción de biocompuestos

Los biocompuestos al ser materiales que dependen de las características de la fibra y matriz utilizadas enfrentan factores que afectan su producción. El primer factor es la variabilidad de las propiedades de las fibras de acuerdo con la zona y época de producción. La variación en las propiedades físicas de las fibras afecta directamente las propiedades mecánicas de los biocompuestos. De acuerdo con AL-Oqla et al., (2017), las propiedades de las fibras naturales dependen de factores como tipo de suelo y proceso de cosecha, clima de la zona, madurez de la planta al momento de extracción de las fibras, parte de la planta para extracción de las fibras y tratamiento aplicado a la fibra. Otro factor que afecta el uso de fibras naturales y por lo tanto la

producción de biocompuestos es que las fibras absorben humedad, lo cual provoca cambios dimensionales y afecta las propiedades físicas y mecánicas de los compuestos. Otro factor para tener en cuenta es que puede presentarse incompatibilidad entre la matriz y las fibras provocado por la falta de adhesión entre los dos materiales, es por esto que deben realizarse tratamientos para modificar la superficie de las fibras, pero esto conlleva a otro desafío que es la escogencia del mejor tratamiento y la fibra más adecuada de acuerdo al propósito del biocompuesto (AL-Oqla et al., 2017).

La selección del material es un factor importante, deben tenerse en cuenta las características dimensionales, la forma y las propiedades requeridas en función del bajo costo. Este es el paso principal en el diseño de un material biocompuesto (AL-Oqla et al., 2017).

La orientación de las fibras es otro factor a tener en cuenta en la elaboración de compuestos ya que afecta la resistencia a la tensión de las mismas (Kumar et al., 2018).

3.1.11 Aplicaciones de biocompuestos

Los biocompuestos son ampliamente utilizados en la industria de la construcción, Niaz et al., (2017) establece en su investigación que los biocompuestos a base de fibras de kenaf son usados en la industria de la construcción en muros y techos. De acuerdo con Singh et al., (2005) indican que desde el año 1972 se ha intentado usar materiales compuestos con fibras naturales, por ejemplo, en Bangladesh se realizó la construcción de edificios económicos para escuelas en los cuales se usó fibra de yute reforzada en poliéster. De la misma manera en la década de 1980 en Ghana, Jamaica y Filipinas se realizó la construcción de paneles y láminas para techos conformadas con bagazo de caña. También indican que se han realizado esfuerzos por implementar materiales de construcción de bajo costo como paneles, tejas, losas y vigas con fibras naturales como refuerzo en una matriz de cemento.

En la construcción se usan paneles laminados tipo sándwich realizado con fibras naturales de yute y sisal, estos paneles son livianos y poseen buena rigidez a flexión, además tienen excelente aislamiento acústico y térmico los cuales pueden ser usados para paredes y puertas o como alternativa para formaletas de concreto (Singh et al., 2005). Se ha buscado la manera de reemplazar las fibras de vidrio por fibras naturales especialmente en los encofrados para la construcción (Singh et al., 2005).

3.1.12 Velocidad de pulso ultrasónico

El método del pulso ultrasónico fue desarrollado en Canadá entre los años 1945 y 1949 y esta basado en el fenómeno físico de la propagación de ondas en un material. Según Vidaud et al, (2016) las ondas se propagan en los medios solidos a partir de excitaciones vibratorias en forma de ondas longitudinales o de compresión y ondas trasversales o de cortante, ondas superficiales y las ondas de Lamb en un medio infinito, homogéneo, isotrópico y elástico. La velocidad de dichas ondas depende de las propiedades elásticas del material en el cual se propagan y por lo tanto, conociendo la velocidad del sonido y la masa del sólido, se pueden obtener las propiedades elásticas del medio y que están relacionadas con los parámetros de calidad del material.

El ensayo se basa en medir el tiempo que tarda un pulso ultrasónico en una frecuencia ente 20 y 150 kHz en recorrer una determinada distancia entre un transductor emisor y un transductor receptor, ambos acoplados al elemento, por medio de un circuito electrónico se mide el tiempo de tránsito o de propagación en el material.

El ensayo de velocidad de pulso ultrasónico es un método de ensayo no destructivo que permite examinar los materiales y sus componentes sin afectar sus propiedades, su integridad y en algunos casos su utilidad final.

Capítulo 4. **Metodología**

4.1 Selección de materiales constituyentes

Para la obtención de las fibras se seleccionaron culmos de Arundo Donax, una especie vegetal de amplia disponibilidad en Colombia. Los culmos utilizados se obtuvieron en el municipio de Valle de Tenza, Departamento de Boyacá. Mediante un proceso de clasificación visual, se seleccionaron culmos sanos, con diámetro promedio igual a 10mm. El material adquirido tenía aproximadamente 2 años de edad y fue previamente inmunizado por el proveedor, de acuerdo a las recomendaciones de la NTC 5301:2018. La figura 9 muestra los culmos de Arundo Donax empleados para la obtención de las fibras.

Figura 9. Culmos de Arundo donax empleados para la obtención de las fibras.
Fuente: Elaboración propia.

Como matriz del compuesto se seleccionó un poliuretano vegetal, comercializado por una empresa brasileña con amplia experiencia en el procesamiento y comercialización de resinas poliméricas obtenidas a partir del procesamiento de aceites vegetales. La selección de la resina se realizó con base a la información técnica del producto, una vez verificados los catálogos de resinas vegetales disponibles en el mercado. Las propiedades de la resina se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Propiedades de la matriz del compuesto.

Densidad (kg/m^3)	1120
Temperatura de ebullición (ºC)	240
Temperatura de fusión (ºC)	-12
Tiempo de secado(minutos)	60-90
Tiempo de cura (horas)	24

Fuente: Elaboración propia.

4.2 Extracción y modificación de la superficie de las fibras

Para la extracción de las fibras se utilizó un triturador mecánico (ver figura 10). Uno de los inconvenientes del empleo de este método es la dificultad de obtener fibras de igual longitud (ver figura 11). Para solucionar esta limitación las fibras fueron revisadas y cortadas manualmente a una longitud promedio igual a 15mm.

Figura 10. Triturador UMNG.
Fuente: Elaboración propia.

Figura 11.Fibras de Arundo donax trituradas.
Fuente: Elaboración propia.

Para modificar la superficie de las fibras tres métodos de tratamientos fueron aplicados: mercerización, ozono y plasma. La descripción de cada uno de los tratamientos es presentada a continuación:

- Mercerización: Las fibras fueron sumergidas en una solución al 10% de hidróxido de sodio, durante 48 horas. El proceso fue seguido de un lavado con agua a temperatura ambiente e inmersión durante 24 horas en agua destilada. Posteriormente fue realizado un segundo lavado, para retirar los residuos de la solución alcalina. El proceso finalizó con un secado a temperatura ambiente por 72 horas, con el objetivo de que el material adquiriera su humedad natural. Las figuras 12 y 13 muestran el hidróxido de sodio empleado y la inmersión de las fibras en la solución alcalina.

Figura 12.Hidróxido de sodio empleado en el proceso de mercerización.
Fuente: Elaboración propia.

Figura 13. Fibras de arundo donax inmersas en solución de NaOH.
Fuente: Elaboración propia.

- Tratamiento con ozono: Para la realización de este tratamiento se utilizó un reactor de tubo cilíndrico tipo Batch, de vidrio boro-silicato. El reactor posee una altura de 733mm, un diámetro externo de 55mm, un diámetro interno de 45mm y una capacidad de 1 litro. Para proveer

el ozono al reactor se empleó un generador Microzone 300P 120V/60HZ de la marca Clearwater Tech. El ozono no utilizado se transfirió a un frasco con una solución de Yoduro de Potasio al 2%, para posteriormente ser destruido. Las fibras fueron tratadas por 120 minutos y posteriormente se secaron a temperatura ambiente durante 72 horas. Las figuras 14 y 15 muestran el ozonificador empleado y las fibras una vez finalizado el tratamiento.

Figura 14. Reactor de ozono.
Fuente: Elaboración propia.

Figura 15. Fibras de arundo donax posterior al tratamiento con ozono.
Fuente: Elaboración propia.

- Tratamiento con plasma: consistió en someter las fibras a la acción del plasma frio de gas metano a una presión de 27Pa durante 10 minutos, utilizando un potencial DC de 700V y una corriente de 0.05A, un flujo de 10 sccm. La temperatura del tratamiento vario entre 18-26ºC.

Las figuras 16, 17 y 18 ilustran el reactor empleado, la colocación de las fibras en el reactor y la apariencia de la superficie de las fibras tratadas con plasma.

Figura 16. Reactor de plasma.
Fuente: Elaboración propia.

Figura 17. Fibras de arundo donax en el reactor de plasma.
Fuente: Elaboración propia.

Figura 18. Aspecto visual de las fibras de arundo donax posterior a su tratamiento con plasma.
Fuente: Elaboración propia.

4.3 Determinación de las propiedades físicas de las fibras.

La densidad de las fibras se determinó por medio de un picnómetro de acuerdo con las recomendaciones del método C de la ASTM D3800-16. El procedimiento indica lo siguiente: llenar el picnómetro con agua, colocar la tapa al brazo lateral del picnómetro, limpiar adecuadamente el exterior de este y pesar el elemento lleno al 0.2mg más cercano, luego se debe colocar la fibra dentro del picnómetro y por medio del volumen desplazado de agua se calcula la densidad mediante la ecuación (1):

$$\rho_l = \frac{b-e}{w-e} \qquad (1)$$

Donde,

ρ_l= es la densidad, en g/cm^3.

b =peso aparente del picnómetro con agua, en g.

e=peso aparente del picnómetro con el líquido, en g.

El contenido de humedad se determinó de acuerdo con lo especificado en la ASTM D1576-13. Primero debe pesarse la muestra y registrar la masa neta seca (W), posteriormente el espécimen se coloca dentro del horno y se deben tomar el peso tres veces consecutivas hasta que se determine una disminución progresiva de la masa superior al 0.10%, sacando la muestra del horno dentro de

una capsula, la cual deberá ser abierta y enfriada a temperatura ambiente y debe pesarse la muestra con el contenedor incluido, hasta que se observe una disminución de la masa indicada anteriormente. El contenido de humedad se determina de acuerdo con la ecuación (2):

$$CH = \left(1 - \frac{W*D}{M*B}\right) * 100 \qquad (2)$$

Donde:

M= masa neta de la muestra en el momento del muestreo, en g.

W= masa neta de la muestra en el momento de la medición, en g.

B= masa neta de la muestra antes del secado, en g.

D= Masa de muestra secada al horno, en g.

4.4 Elaboración de los paneles

La dosificación de los materiales constituyentes se realizó usando un molde de acero de 300mm de ancho y 300mm de largo. El espesor promedio de los paneles fue establecido de 8 mm. La masa de las fibras se determinó en función de la densidad promedio, determinada experimentalmente y las fracciones volumétricas establecidas para cada dosificación, de acuerdo con la ecuación (3).

$$Wf = \delta_f * Vol_f \qquad (3)$$

Donde,

Wf = masa de las fibras, en g.

δ_f=densidad promedio de las fibras, en g/cm^3.

Vol_f= Volumen de fibras, en cm^3.

En la tabla 8 se presenta la masa de fibras para cada proporción de diseño:

Tabla 8. Cantidad de fibra utilizada por panel

Proporción	Peso fibras (g)
60:40	263.52
65:35	285.48
70:30	307.44

Fuente: Elaboración propia.

Debido a que la resina vegetal empleada como matriz es bicomponente, sus proporciones de mezcla, fueron previamente determinadas, de acuerdo con las recomendaciones de su proveedor, empleando una relación 1:1.5 (componente A: componente B). El uso de estas proporciones permite un periodo de trabajabilidad de aproximadamente 20 minutos antes de iniciar el proceso de secado. Para obtener la masa de cada componente de la resina se trabaja la regla de las mezclas sabiendo que la densidad del componente A es 1.22g/cm^3 y la densidad del componente B es de 0.98g/cm^3, para las 2.5 partes de resina a utilizar es necesario realizar una regla de tres para obtener la masa de cada componente a usar de acuerdo a las partes y a la densidad.

En la tabla 9 se presenta la masa de cada uno de los componentes de la resina a utilizar en la elaboración del panel de acuerdo con la proporción de diseño:

Tabla 9.Masa de componentes de resina utilizada por panel

Proporción	Peso resina componente A (g)	Peso resina componente B (g)
60:40	140.54	169.34
65:35	122.97	148.17
70:30	105.41	127.01

Fuente: Elaboración propia.

Para la elaboración de los paneles, las fibras fueron aleatoriamente distribuidas en la resina vegetal. Para la fabricación del compuesto se adoptó el método de moldeado manual y compactación por compresión a temperatura ambiente. El método consistió en la aplicación de capas sucesivas de material en un molde de acero de 300 mm de ancho, 300 mm de largo y 50mm de altura, impregnado la resina manualmente y realizando una compactación previa en cada capa por aproximadamente 2 minutos para eliminar grumos de fibras y burbujas de aire atrapadas,

esparciendo la resina de manera uniforme. Una vez completado el proceso de moldeo, el molde se colocó en la prensa, se cerró y se aplicó una carga de compactación. El espesor de los paneles se estableció igual a 8mm. Para el proceso de prensado, se empleó una prensa hidráulica. La carga de compactación utilizada fue de 12 toneladas. El tiempo de prensado fue de 18 horas para capa panel. Una vez completado el proceso de compactación, prensado y pasadas las 18 horas, los paneles se desencofraron y se curaron a temperatura ambiente durante siete días.

La figura 19 muestra el procedimiento experimental de elaboración de los paneles.

Figura 19. Proceso de elaboración de los compuestos.
Fuente: Elaboración propia.

4.5 Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de los paneles compuestos

Las propiedades físicas y mecánicas a determinar en los paneles son las mostradas en la tabla 10.

Tabla 10. Propiedades físicas y mecánicas a analizar

Propiedades Físicas	Propiedades Mecánicas
Densidad en estado seco al aire	Módulo de elasticidad aparente
Densidad básica	Módulo de elasticidad dinámico
Absorción efectiva 2h	Módulo de cortante
Absorción efectiva 24h	Coeficiente de Poisson
Capacidad de absorción 2h	
Capacidad de absorción 24h	
Absorción superficial	
Hinchamiento 2h	
Hinchamiento 24h	

Fuente: Elaboración propia.

Para el estudio de las propiedades físicas, se realizaron ensayos de acuerdo con las especificaciones de las normas ASTM D4442-16 y ASTM D2395-14.

Para establecer el contenido de humedad se halló la masa inicial del espécimen y posteriormente se determinó la masa despiece de colocados en un horno a una temperatura de 103º±2ºC, hasta alcanzar la condición de masa constante. A partir de los resultados obtenidos se determina el contenido de humedad (ver ecuación 4):

$$CH(\%) = \frac{A-B}{B} * 100 \qquad (4)$$

Donde:

A= masa inicial en g.

B= masa seca al horno en g.

Para obtener la densidad de los especímenes se utilizó el procedimiento descrito en la ASTM D2395-17. El primer paso consistió en obtener el volumen del espécimen midiendo el largo, ancho y espesor del elemento. Para el espesor se deben tomar un número suficiente de medidas para mayor precisión en la obtención del volumen, en este estudio se tomaron 3 medidas por cada lado del panel en una cuadricula realizada para un total de 12 medidas en cada panel.

Para el cálculo de la densidad se utilizó la ecuación (5):

$$\rho_M = \frac{m_M}{V_M} \qquad (5)$$

Donde:

ρm=densidad en g/cm^3.

M_m=masa inicial en g.

V_m= volumen del espécimen en cm^3.

La estabilidad dimensional se evalúa analizando el porcentaje de hinchamiento producido a partir de la variación del espesor de probetas cuadradas luego de ser sumergidas en agua por un periodo de 2 horas y 24 horas. El hinchamiento fue determinado según la ecuación (6):

$$H(\%) = \frac{e_2 - e_1}{e_1} * 100 \qquad (6)$$

Donde:

H=Hinchamiento (%)

e_1= espesor inicial del panel en mm.

e_2= espesor del panel húmedo en mm.

Las propiedades mecánicas a evaluar se obtuvieron por medio de la técnica del ultrasonido de la cual se obtendrá la velocidad longitudinal de los paneles, a partir del segundo pico de velocidad longitudinal se obtiene la velocidad transversal. El método usado es de trasmisión directa con transductores del dispositivo Pundit PL-200 de la marca PROCEQ. Para determinar las velocidades se colocan los transductores a cada lado del panel en 16 zonas distintas, por medio de una cuadricula realizada en cada panel como se muestra en la figura 20:

Figura 20. Cuadricula para obtención de velocidades.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 21 se presenta el procedimiento por medio del cual se colocan los transductores a cada lado del panel para medir la velocidad longitudinal.

Figura 21. Transductores para obtención de velocidades.
Fuente: Elaboración propia.

Las ecuaciones (7), (8), (9) y (10), permiten la determinación de él módulo de elasticidad dinámico aparente, módulo de elasticidad dinámico, el módulo de cortante y el coeficiente de Poisson, respectivamente.

$$MOE_d = \rho v^2 \qquad (7)$$

Donde:

MOE_d es el módulo de elasticidad aparente dinámico en MPa.

ρ= densidad básica en g/cm^3.

v= velocidad longitudinal en m/s.

$$E_d = \frac{\rho v_s^2 (3v^2 - 4v_s^2)}{v^2 - v_s^2} \qquad (8)$$

Donde:

Ed es el módulo de elasticidad dinámico en MPa.

ρ= densidad básica unidades g/cm^3.

v= velocidad longitudinal en m/s.

v_s=velocidad transversal en m/s.

$$G = \rho v_s^2 \qquad (9)$$

Donde:

G es el módulo de cortante en Pa.

ρ= densidad básica g/cm^3.

v_s=velocidad transversal en m/s.

$$\mu = \frac{(v^2 - 2v_s^2)}{2(v^2 - v_s^2)} \qquad (10)$$

Donde:

μ es el coeficiente de Poisson.

v= velocidad longitudinal en m/s.

v_s=velocidad transversal en m/s.

4.6 Análisis de Varianza

Para el análisis fue seleccioneado un modelo multifacotial, considerando significancias iguales a 0.01%, 0.05% y 0.1%. En el análisis fue evaluado el efecto de dos factores de diseño:

proporciones de mezlca y tratamiento superficial de las fibras asi como el efecto de la interaccion entre ellos. Para el estudio fueron planteadas dos hipótesis para cada una de las propiedades físicas mecánicas evaluadas:

Hipótesis nula (H0): El factor o la interacción de factores no influye en la propiedad.

Hipótesis alterna (H1): El factor o interacción de factores influye en la propiedad.

Para la verificación del cumplimiento de las hipótesis fue utilizada la variable de distribución estadística de Fisher (F), la cual permite detectar la existencia de diferencias significativas entre muestras diferentes. Para una confiabilidad de 90%, 95% y 99% fueron utilizadas las tablas presentadas en las figuras 22, 23 y 24, respectivamente.

$1 - \alpha = 0.9$ $\quad$ v_1 = grados de libertad del numerador

$1 - \alpha = P(F \leq f_{\alpha, v_1, v_2})$ $\quad$ v_2 = grados de libertad del denominador

v_2 \ v_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	39.864	49.500	53.593	55.833	57.240	58.204	58.906	59.439	59.857	60.195	60.473	60.705	60.902	61.073	61.220	61.350	61.465	61.566	61.658	61.740
2	8.526	9.000	9.162	9.243	9.293	9.326	9.349	9.367	9.381	9.392	9.401	9.408	9.415	9.420	9.425	9.429	9.433	9.436	9.439	9.441
3	5.538	5.462	5.391	5.343	5.309	5.285	5.266	5.252	5.240	5.230	5.222	5.216	5.210	5.205	5.200	5.196	5.193	5.190	5.187	5.184
4	4.545	4.325	4.191	4.107	4.051	4.010	3.979	3.955	3.936	3.920	3.907	3.896	3.886	3.878	3.870	3.864	3.858	3.853	3.848	3.844
5	4.060	3.780	3.619	3.520	3.453	3.405	3.368	3.339	3.316	3.297	3.282	3.268	3.257	3.247	3.238	3.230	3.223	3.217	3.212	3.207
6	3.776	3.463	3.289	3.181	3.108	3.055	3.014	2.983	2.958	2.937	2.920	2.905	2.892	2.881	2.871	2.863	2.855	2.848	2.842	2.836
7	3.589	3.257	3.074	2.961	2.883	2.827	2.785	2.752	2.725	2.703	2.684	2.668	2.654	2.643	2.632	2.623	2.615	2.607	2.601	2.595
8	3.458	3.113	2.924	2.806	2.726	2.668	2.624	2.589	2.561	2.538	2.519	2.502	2.488	2.475	2.464	2.454	2.446	2.438	2.431	2.425
9	3.360	3.006	2.813	2.693	2.611	2.551	2.505	2.469	2.440	2.416	2.396	2.379	2.364	2.351	2.340	2.330	2.320	2.312	2.305	2.298
10	3.285	2.924	2.728	2.605	2.522	2.461	2.414	2.377	2.347	2.323	2.302	2.284	2.269	2.255	2.244	2.233	2.224	2.215	2.208	2.201
11	3.225	2.860	2.660	2.536	2.451	2.389	2.342	2.304	2.274	2.248	2.227	2.209	2.193	2.179	2.167	2.156	2.147	2.138	2.130	2.123
12	3.177	2.807	2.606	2.480	2.394	2.331	2.283	2.245	2.214	2.188	2.166	2.147	2.131	2.117	2.105	2.094	2.084	2.075	2.067	2.060
13	3.136	2.763	2.560	2.434	2.347	2.283	2.234	2.195	2.164	2.138	2.116	2.097	2.080	2.066	2.053	2.042	2.032	2.023	2.014	2.007
14	3.102	2.726	2.522	2.395	2.307	2.243	2.193	2.154	2.122	2.095	2.073	2.054	2.037	2.022	2.010	1.998	1.988	1.978	1.970	1.962
15	3.073	2.695	2.490	2.361	2.273	2.208	2.158	2.119	2.086	2.059	2.037	2.017	2.000	1.985	1.972	1.961	1.950	1.941	1.932	1.924
16	3.048	2.668	2.462	2.333	2.244	2.178	2.128	2.088	2.055	2.028	2.005	1.985	1.968	1.953	1.940	1.928	1.917	1.908	1.899	1.891
17	3.026	2.645	2.437	2.308	2.218	2.152	2.102	2.061	2.028	2.001	1.978	1.958	1.940	1.925	1.912	1.900	1.889	1.879	1.870	1.862
18	3.007	2.624	2.416	2.286	2.196	2.130	2.079	2.038	2.005	1.977	1.954	1.933	1.916	1.900	1.887	1.875	1.864	1.854	1.845	1.837
19	2.990	2.606	2.397	2.266	2.176	2.109	2.058	2.017	1.984	1.956	1.932	1.912	1.894	1.878	1.865	1.852	1.841	1.831	1.822	1.814
20	2.975	2.589	2.380	2.249	2.158	2.091	2.040	1.999	1.965	1.937	1.913	1.892	1.875	1.859	1.845	1.833	1.821	1.811	1.802	1.794
21	2.961	2.575	2.365	2.233	2.142	2.075	2.023	1.982	1.948	1.920	1.896	1.875	1.857	1.841	1.827	1.815	1.803	1.793	1.784	1.776
22	2.949	2.561	2.351	2.219	2.128	2.060	2.008	1.967	1.933	1.904	1.880	1.859	1.841	1.825	1.811	1.798	1.787	1.777	1.768	1.759
23	2.937	2.549	2.339	2.207	2.115	2.047	1.995	1.953	1.919	1.890	1.866	1.845	1.827	1.811	1.796	1.784	1.772	1.762	1.753	1.744
24	2.927	2.538	2.327	2.195	2.103	2.036	1.983	1.941	1.906	1.877	1.853	1.832	1.814	1.797	1.783	1.770	1.759	1.748	1.739	1.730
25	2.918	2.528	2.317	2.184	2.092	2.024	1.971	1.929	1.895	1.866	1.841	1.820	1.802	1.785	1.771	1.758	1.746	1.736	1.726	1.718
26	2.909	2.519	2.307	2.174	2.082	2.014	1.961	1.919	1.884	1.855	1.830	1.809	1.790	1.774	1.760	1.747	1.735	1.724	1.715	1.706
27	2.901	2.511	2.299	2.165	2.073	2.005	1.952	1.909	1.874	1.845	1.820	1.799	1.780	1.764	1.749	1.736	1.724	1.714	1.704	1.695
28	2.894	2.503	2.291	2.157	2.064	1.996	1.943	1.900	1.865	1.836	1.811	1.790	1.771	1.754	1.740	1.726	1.715	1.704	1.694	1.685
29	2.887	2.495	2.283	2.149	2.057	1.988	1.935	1.892	1.857	1.827	1.802	1.781	1.762	1.745	1.731	1.717	1.705	1.695	1.685	1.676
30	2.881	2.489	2.276	2.142	2.049	1.980	1.927	1.884	1.849	1.819	1.794	1.773	1.754	1.737	1.722	1.709	1.697	1.686	1.676	1.667
40	2.835	2.440	2.226	2.091	1.997	1.927	1.873	1.829	1.793	1.763	1.737	1.715	1.695	1.678	1.662	1.649	1.636	1.625	1.615	1.605
50	2.809	2.412	2.197	2.061	1.966	1.895	1.840	1.796	1.760	1.729	1.703	1.680	1.660	1.643	1.627	1.613	1.600	1.588	1.578	1.568
60	2.791	2.393	2.177	2.041	1.946	1.875	1.819	1.775	1.738	1.707	1.680	1.657	1.637	1.619	1.603	1.589	1.576	1.564	1.553	1.543
70	2.779	2.380	2.164	2.027	1.931	1.860	1.804	1.760	1.723	1.691	1.665	1.641	1.621	1.603	1.587	1.572	1.559	1.547	1.536	1.526
80	2.769	2.370	2.154	2.016	1.921	1.849	1.793	1.748	1.711	1.680	1.653	1.629	1.609	1.590	1.574	1.559	1.546	1.534	1.523	1.513
90	2.762	2.363	2.146	2.008	1.912	1.841	1.785	1.739	1.702	1.670	1.643	1.620	1.599	1.581	1.564	1.550	1.536	1.524	1.513	1.503
100	2.756	2.356	2.139	2.002	1.906	1.834	1.778	1.732	1.695	1.663	1.636	1.612	1.592	1.573	1.557	1.542	1.528	1.516	1.505	1.494
200	2.731	2.329	2.111	1.973	1.876	1.804	1.747	1.701	1.663	1.631	1.603	1.579	1.558	1.539	1.522	1.507	1.493	1.480	1.468	1.458
500	2.716	2.313	2.095	1.956	1.859	1.786	1.729	1.683	1.644	1.612	1.583	1.559	1.537	1.518	1.501	1.485	1.471	1.458	1.446	1.435
1000	2.711	2.308	2.089	1.950	1.853	1.780	1.723	1.676	1.638	1.605	1.577	1.552	1.531	1.511	1.494	1.478	1.464	1.451	1.439	1.428

Figura 22. Valores de F de la distribución de Fisher para una significancia del 0.10%.
Fuente: Irene Patricia Valdez y Alfaro.

$1 - \alpha = 0.95$

$1 - \alpha = P(F \leq f_{\alpha, v_1, v_2})$

v_2 \ v_1	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	40	50	60	70	80	90	100	200	500	1000
1	248.307	248.579	248.823	249.052	249.260	249.453	249.631	249.798	249.951	250.096	251.144	251.774	252.196	252.498	252.723	252.898	253.043	253.676	254.062	254.186
2	19.448	19.450	19.452	19.454	19.456	19.457	19.459	19.460	19.461	19.463	19.471	19.476	19.479	19.481	19.483	19.485	19.486	19.491	19.494	19.495
3	8.654	8.648	8.643	8.638	8.634	8.630	8.626	8.623	8.620	8.617	8.594	8.581	8.572	8.566	8.561	8.557	8.554	8.540	8.532	8.529
4	5.795	5.787	5.781	5.774	5.769	5.763	5.759	5.754	5.750	5.746	5.717	5.699	5.688	5.679	5.673	5.668	5.664	5.646	5.635	5.632
5	4.549	4.541	4.534	4.527	4.521	4.515	4.510	4.505	4.500	4.496	4.464	4.444	4.431	4.422	4.415	4.409	4.405	4.385	4.373	4.369
6	3.865	3.856	3.849	3.841	3.835	3.829	3.823	3.818	3.813	3.808	3.774	3.754	3.740	3.730	3.722	3.716	3.712	3.690	3.678	3.673
7	3.435	3.426	3.418	3.410	3.404	3.397	3.391	3.386	3.381	3.376	3.340	3.319	3.304	3.294	3.286	3.280	3.275	3.252	3.239	3.234
8	3.140	3.131	3.123	3.115	3.108	3.102	3.095	3.090	3.084	3.079	3.043	3.020	3.005	2.994	2.986	2.980	2.975	2.951	2.937	2.932
9	2.926	2.917	2.908	2.900	2.893	2.886	2.880	2.874	2.869	2.864	2.826	2.803	2.787	2.776	2.768	2.761	2.756	2.731	2.717	2.712
10	2.764	2.754	2.745	2.737	2.730	2.723	2.716	2.710	2.705	2.700	2.661	2.637	2.621	2.609	2.601	2.594	2.588	2.563	2.548	2.543
11	2.636	2.626	2.617	2.609	2.601	2.594	2.588	2.582	2.576	2.570	2.531	2.507	2.490	2.478	2.469	2.462	2.457	2.431	2.415	2.410
12	2.533	2.523	2.514	2.505	2.498	2.491	2.484	2.478	2.472	2.466	2.426	2.401	2.384	2.372	2.363	2.356	2.350	2.323	2.307	2.302
13	2.448	2.438	2.429	2.420	2.412	2.405	2.398	2.392	2.386	2.380	2.339	2.314	2.297	2.284	2.275	2.267	2.261	2.234	2.218	2.212
14	2.377	2.367	2.357	2.349	2.341	2.333	2.326	2.320	2.314	2.308	2.266	2.241	2.223	2.210	2.201	2.193	2.187	2.159	2.142	2.136
15	2.316	2.306	2.297	2.288	2.280	2.272	2.265	2.259	2.253	2.247	2.204	2.178	2.160	2.147	2.137	2.130	2.123	2.095	2.078	2.072
16	2.264	2.254	2.244	2.235	2.227	2.220	2.212	2.206	2.200	2.194	2.151	2.124	2.106	2.093	2.083	2.075	2.068	2.039	2.022	2.016
17	2.219	2.208	2.199	2.190	2.181	2.174	2.167	2.160	2.154	2.148	2.104	2.077	2.058	2.045	2.035	2.027	2.020	1.991	1.973	1.967
18	2.179	2.168	2.159	2.150	2.141	2.134	2.126	2.119	2.113	2.107	2.063	2.035	2.017	2.003	1.993	1.985	1.978	1.948	1.929	1.923
19	2.144	2.133	2.123	2.114	2.106	2.098	2.090	2.084	2.077	2.071	2.026	1.999	1.980	1.966	1.955	1.947	1.940	1.910	1.891	1.884
20	2.112	2.102	2.092	2.082	2.074	2.066	2.059	2.052	2.045	2.039	1.994	1.966	1.946	1.932	1.922	1.913	1.907	1.875	1.856	1.850
21	2.084	2.073	2.063	2.054	2.045	2.037	2.030	2.023	2.016	2.010	1.965	1.936	1.916	1.902	1.891	1.883	1.876	1.845	1.825	1.818
22	2.059	2.048	2.038	2.028	2.020	2.012	2.004	1.997	1.990	1.984	1.938	1.909	1.889	1.875	1.864	1.856	1.849	1.817	1.797	1.790
23	2.036	2.025	2.014	2.005	1.996	1.988	1.981	1.973	1.967	1.961	1.914	1.885	1.865	1.850	1.839	1.830	1.823	1.791	1.771	1.764
24	2.015	2.003	1.993	1.984	1.975	1.967	1.959	1.952	1.945	1.939	1.892	1.863	1.842	1.828	1.816	1.808	1.800	1.768	1.747	1.740
25	1.995	1.984	1.974	1.964	1.955	1.947	1.939	1.932	1.926	1.919	1.872	1.842	1.822	1.807	1.796	1.787	1.779	1.746	1.725	1.718
26	1.978	1.966	1.956	1.946	1.938	1.929	1.921	1.914	1.907	1.901	1.853	1.823	1.803	1.788	1.776	1.767	1.760	1.726	1.705	1.698
27	1.961	1.950	1.940	1.930	1.921	1.913	1.905	1.898	1.891	1.884	1.836	1.806	1.785	1.770	1.758	1.749	1.742	1.708	1.686	1.679
28	1.946	1.935	1.924	1.915	1.906	1.897	1.889	1.882	1.875	1.869	1.820	1.790	1.769	1.754	1.742	1.733	1.725	1.691	1.669	1.662
29	1.932	1.921	1.910	1.901	1.891	1.883	1.875	1.868	1.861	1.854	1.806	1.775	1.754	1.738	1.726	1.717	1.710	1.675	1.653	1.645
30	1.919	1.908	1.897	1.887	1.878	1.870	1.862	1.854	1.847	1.841	1.792	1.761	1.740	1.724	1.712	1.703	1.695	1.660	1.637	1.630
40	1.826	1.814	1.803	1.793	1.783	1.775	1.766	1.759	1.751	1.744	1.693	1.660	1.637	1.621	1.608	1.597	1.589	1.551	1.526	1.517
50	1.771	1.759	1.748	1.737	1.727	1.718	1.710	1.702	1.694	1.687	1.634	1.599	1.576	1.558	1.544	1.534	1.525	1.484	1.457	1.448
60	1.735	1.722	1.711	1.700	1.690	1.681	1.672	1.664	1.656	1.649	1.594	1.559	1.534	1.516	1.502	1.491	1.481	1.438	1.409	1.399
70	1.709	1.696	1.685	1.674	1.664	1.654	1.646	1.637	1.629	1.622	1.566	1.530	1.505	1.486	1.471	1.459	1.450	1.404	1.374	1.364
80	1.689	1.677	1.665	1.654	1.644	1.634	1.626	1.617	1.609	1.602	1.545	1.508	1.482	1.463	1.448	1.436	1.426	1.379	1.347	1.336
90	1.675	1.662	1.650	1.639	1.629	1.619	1.610	1.601	1.593	1.586	1.528	1.491	1.465	1.445	1.429	1.417	1.407	1.358	1.326	1.314
100	1.663	1.650	1.638	1.627	1.616	1.607	1.598	1.589	1.581	1.573	1.515	1.477	1.450	1.430	1.415	1.402	1.392	1.342	1.308	1.296
200	1.609	1.596	1.583	1.572	1.561	1.551	1.542	1.533	1.524	1.516	1.455	1.415	1.386	1.364	1.346	1.332	1.321	1.263	1.221	1.205
500	1.577	1.563	1.551	1.539	1.528	1.518	1.508	1.499	1.490	1.482	1.419	1.376	1.345	1.322	1.303	1.288	1.275	1.210	1.159	1.138
1000	1.566	1.553	1.540	1.528	1.517	1.507	1.497	1.488	1.479	1.471	1.406	1.363	1.332	1.308	1.289	1.273	1.260	1.190	1.134	1.110

Figura 23. Valores de F de la distribución de Fisher para una significancia del 0.05%.
Fuente: Irene Patricia Valdez y Alfaro.

$1 - \alpha = 0.99$ $\quad$ v_1 = grados de libertad del numerador

$1 - \alpha = P(F \leq f_{\alpha, v1, v2})$ $\quad$ v_2 = grados de libertad del denominador

v_2 \ v_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	4052.185	4999.340	5403.534	5624.257	5763.955	5858.950	5928.334	5980.954	6022.397	6055.925	6083.399	6106.682	6125.774	6143.004	6156.974	6170.012	6181.188	6191.432	6200.746	6208.662
2	98.502	99.000	99.164	99.251	99.302	99.331	99.357	99.375	99.390	99.397	99.408	99.419	99.422	99.426	99.433	99.437	99.441	99.444	99.448	99.448
3	34.116	30.816	29.457	28.710	28.237	27.911	27.671	27.489	27.345	27.228	27.132	27.052	26.983	26.924	26.872	26.826	26.786	26.751	26.719	26.690
4	21.198	18.000	16.694	15.977	15.522	15.207	14.976	14.799	14.659	14.546	14.452	14.374	14.306	14.249	14.198	14.154	14.114	14.079	14.048	14.019
5	16.258	13.274	12.060	11.392	10.967	10.672	10.456	10.289	10.158	10.051	9.963	9.888	9.825	9.770	9.722	9.680	9.643	9.609	9.580	9.553
6	13.745	10.925	9.780	9.148	8.746	8.466	8.260	8.102	7.976	7.874	7.790	7.718	7.657	7.605	7.559	7.519	7.483	7.451	7.422	7.396
7	12.246	9.547	8.451	7.847	7.460	7.191	6.993	6.840	6.719	6.620	6.538	6.469	6.410	6.359	6.314	6.275	6.240	6.209	6.181	6.155
8	11.259	8.649	7.591	7.006	6.632	6.371	6.178	6.029	5.911	5.814	5.734	5.667	5.609	5.559	5.515	5.477	5.442	5.412	5.384	5.359
9	10.562	8.022	6.992	6.422	6.057	5.802	5.613	5.467	5.351	5.257	5.178	5.111	5.055	5.005	4.962	4.924	4.890	4.860	4.833	4.808
10	10.044	7.559	6.552	5.994	5.636	5.386	5.200	5.057	4.942	4.849	4.772	4.706	4.650	4.601	4.558	4.520	4.487	4.457	4.430	4.405
11	9.646	7.206	6.217	5.668	5.316	5.069	4.886	4.744	4.632	4.539	4.462	4.397	4.342	4.293	4.251	4.213	4.180	4.150	4.123	4.099
12	9.330	6.927	5.953	5.412	5.064	4.821	4.640	4.499	4.388	4.296	4.220	4.155	4.100	4.052	4.010	3.972	3.939	3.910	3.883	3.858
13	9.074	6.701	5.739	5.205	4.862	4.620	4.441	4.302	4.191	4.100	4.025	3.960	3.905	3.857	3.815	3.778	3.745	3.716	3.689	3.665
14	8.862	6.515	5.564	5.035	4.695	4.456	4.278	4.140	4.030	3.939	3.864	3.800	3.745	3.698	3.656	3.619	3.586	3.556	3.529	3.505
15	8.683	6.359	5.417	4.893	4.556	4.318	4.142	4.004	3.895	3.805	3.730	3.666	3.612	3.564	3.522	3.485	3.452	3.423	3.396	3.372
16	8.531	6.226	5.292	4.773	4.437	4.202	4.026	3.890	3.780	3.691	3.616	3.553	3.498	3.451	3.409	3.372	3.339	3.310	3.283	3.259
17	8.400	6.112	5.185	4.669	4.336	4.101	3.927	3.791	3.682	3.593	3.518	3.455	3.401	3.353	3.312	3.275	3.242	3.212	3.186	3.162
18	8.285	6.013	5.092	4.579	4.248	4.015	3.841	3.705	3.597	3.508	3.434	3.371	3.316	3.269	3.227	3.190	3.158	3.128	3.101	3.077
19	8.185	5.926	5.010	4.500	4.171	3.939	3.765	3.631	3.523	3.434	3.360	3.297	3.242	3.195	3.153	3.116	3.084	3.054	3.027	3.003
20	8.096	5.849	4.938	4.431	4.103	3.871	3.699	3.564	3.457	3.368	3.294	3.231	3.177	3.130	3.088	3.051	3.018	2.989	2.962	2.938
21	8.017	5.780	4.874	4.369	4.042	3.812	3.640	3.506	3.398	3.310	3.236	3.173	3.119	3.072	3.030	2.993	2.960	2.931	2.904	2.880
22	7.945	5.719	4.817	4.313	3.988	3.758	3.587	3.453	3.346	3.258	3.184	3.121	3.067	3.019	2.978	2.941	2.908	2.879	2.852	2.827
23	7.881	5.664	4.765	4.264	3.939	3.710	3.539	3.406	3.299	3.211	3.137	3.074	3.020	2.973	2.931	2.894	2.861	2.832	2.805	2.780
24	7.823	5.614	4.718	4.218	3.895	3.667	3.496	3.363	3.256	3.168	3.094	3.032	2.977	2.930	2.889	2.852	2.819	2.789	2.762	2.738
25	7.770	5.568	4.675	4.177	3.855	3.627	3.457	3.324	3.217	3.129	3.056	2.993	2.939	2.892	2.850	2.813	2.780	2.751	2.724	2.699
26	7.721	5.526	4.637	4.140	3.818	3.591	3.421	3.288	3.182	3.094	3.021	2.958	2.904	2.857	2.815	2.778	2.745	2.715	2.688	2.664
27	7.677	5.488	4.601	4.106	3.785	3.558	3.388	3.256	3.149	3.062	2.988	2.926	2.872	2.824	2.783	2.746	2.713	2.683	2.656	2.632
28	7.636	5.453	4.568	4.074	3.754	3.528	3.358	3.226	3.120	3.032	2.959	2.896	2.842	2.795	2.753	2.716	2.683	2.653	2.626	2.602
29	7.598	5.420	4.538	4.045	3.725	3.499	3.330	3.198	3.092	3.005	2.931	2.868	2.814	2.767	2.726	2.689	2.656	2.626	2.599	2.574
30	7.562	5.390	4.510	4.018	3.699	3.473	3.305	3.173	3.067	2.979	2.906	2.843	2.789	2.742	2.700	2.663	2.630	2.600	2.573	2.549
40	7.314	5.178	4.313	3.828	3.514	3.291	3.124	2.993	2.888	2.801	2.727	2.665	2.611	2.563	2.522	2.484	2.451	2.421	2.394	2.369
50	7.171	5.057	4.199	3.720	3.408	3.186	3.020	2.890	2.785	2.698	2.625	2.563	2.508	2.461	2.419	2.382	2.348	2.318	2.290	2.265
60	7.077	4.977	4.126	3.649	3.339	3.119	2.953	2.823	2.718	2.632	2.559	2.496	2.442	2.394	2.352	2.315	2.281	2.251	2.223	2.198
70	7.011	4.922	4.074	3.600	3.291	3.071	2.906	2.777	2.672	2.585	2.512	2.450	2.395	2.348	2.306	2.268	2.234	2.204	2.176	2.150
80	6.963	4.881	4.036	3.563	3.255	3.036	2.871	2.742	2.637	2.551	2.478	2.415	2.361	2.313	2.271	2.233	2.199	2.169	2.141	2.115
90	6.925	4.849	4.007	3.535	3.228	3.009	2.845	2.715	2.611	2.524	2.451	2.389	2.334	2.286	2.244	2.206	2.172	2.142	2.114	2.088
100	6.895	4.824	3.984	3.513	3.206	2.988	2.823	2.694	2.590	2.503	2.430	2.368	2.313	2.265	2.223	2.185	2.151	2.120	2.092	2.067
200	6.763	4.713	3.881	3.414	3.110	2.893	2.730	2.601	2.497	2.411	2.338	2.275	2.220	2.172	2.129	2.091	2.057	2.026	1.997	1.971
500	6.686	4.648	3.821	3.357	3.054	2.838	2.675	2.547	2.443	2.356	2.283	2.220	2.166	2.117	2.075	2.036	2.002	1.970	1.942	1.915
1000	6.660	4.626	3.801	3.338	3.036	2.820	2.657	2.529	2.425	2.339	2.265	2.203	2.148	2.099	2.056	2.018	1.983	1.952	1.923	1.897

Figura 24. Valores de F de la distribución de Fisher para una significancia del 0.01%.
Fuente: Irene Patricia Valdez y Alfaro.

El proceso de toma de decisiones se realizó mediante la comparación de la distribución estadística F y el valor de probabilidad p para cada uno de los análisis de varianza realizado, de acuerdo con los siguientes resultados:

- Si el valor de p es menor o igual que el nivel de significancia establecido se rechaza la hipótesis nula y se afirma categóricamente el cumplimiento de la hipótesis alternativa.
- Si el valor de p es mayor que el nivel de significancia, no se rechaza la hipótesis nula y no se puede afirmar categóricamente la hipótesis alterna. En ese caso se

verifica el valor de la distribución estadística F. Si F_{Fisher}>Fmodelo. Se verifica el cumplimiento de la hipótesis alterna (H1).

Para identificar la presencia de valores atípicos en los datos obtenidos experimentalmente, fue realizada la prueba de Grubbs Murphy et al., (2008), considerando las siguientes hipótesis:

Hipótesis nula (H0): No hay valores atípicos.

Hipótesis alterna (H1): El valor mas pequeño o grande de los datos es un valor atípico.

Para visualizar si el efecto de los factores de estudio es significatico para los niveles de significancia seleccionados, se analizó el patrón de los gráficos de efectos principales de acuerdo con las hipótesis:

Hipótesis nula (H0): Si la línea que representa el factor de estudio es horizontal, no hay efecto principal.

Hipótesis alterna (H1): Si la línea que representa el factor de estudio no es horizontal, hay efecto principal.

Para visualizar la interaccion entre los factores de significancia para los niveles de significancia seleccionados, se realizaron las graficas de interacción, el análisis de realizó de acuerdo con las siguientes hipótesis:

Hipótesis nula (H0): si las líneas que representan a los factores de estudio son paralelas, no hay interaccion entre los factores.

Hipótesis alterna (H1): Si las líneas que representan a los factores de estudio no son paralelas, hay una interacción entre los factores.

Para analizar el ajuste de la distribución de los datos fue utilizada una gráfica de probabilidad. Para verificar si los datos siguen una distribución normal se establecieron las siguientes hipótesis:

Hipótesis nula (H0): si el valor P es mayor que el nivel de significancia, los datos pueden tener una distribución normal.

Hipótesis alterna (H1): si el valor de P es menor o que igual al nvel de significancia, los datos no siguen la distribución normal.

Capítulo 5. **RESULTADOS**

5.1 Propiedades físicas de los paneles

5.1.1 Densidad

En la figura 25, 26, 27, 28 y 29 se presenta el efecto de los tratamientos superficiales y de las proporciones fibra/matriz en la densidad básica y la densidad en estado seco al aire de los paneles elaborados.

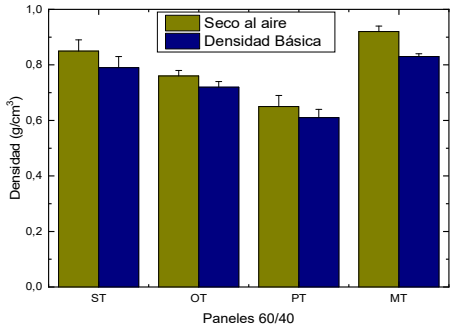

Figura 25. Densidad de los paneles proporción 60/40.
Fuente: Elaboración propia.

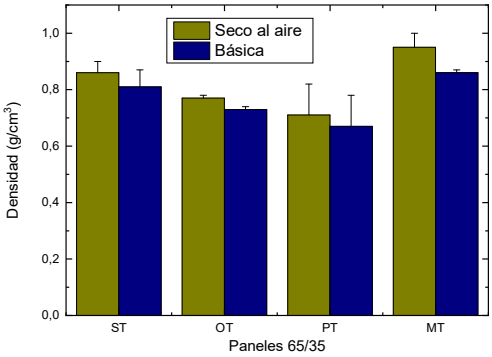

Figura 26. Densidad de los paneles proporción 65/35.
Fuente: Elaboración propia.

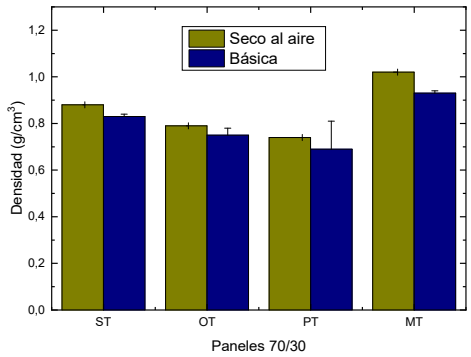

Figura 27. Densidad de los paneles proporción 70/30.
Fuente: Elaboración propia.

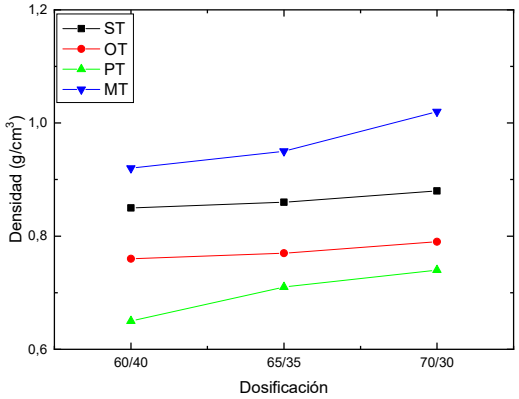

Figura 28. Influencia de la dosificación y tratamiento en la densidad.
Fuente: Elaboración propia.

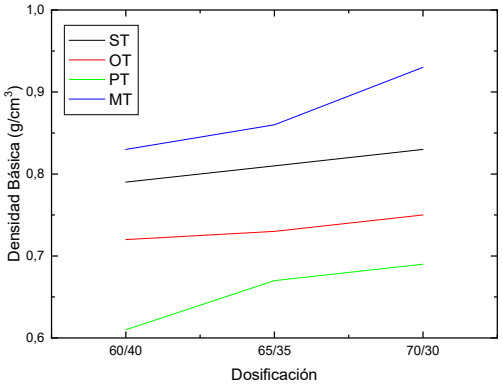

Figura 29. Influencia de la dosificación en la densidad básica.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11. Ecuaciones de influencia del contenido de fibra en la densidad básica

Tratamiento	Ecuación lineal	Coeficiente correlación
ST	y = 0.018x + 0.77	0.99
OT	y = 0.016x + 0.70	0.98
PT	y = 0.035x + 0.58	0.90
MT	y = 0.048x + 0.77	0.95

Fuente. Elaboración propia

Tabla 12. Ecuaciones de influencia del contenido de fibra en la densidad seco al aire

Tratamiento	Ecuación lineal	Coeficiente correlación
ST	y = 0.019x + 0.82	0.96
OT	y = 0.014x + 0.74	0.99
PT	y = 0.041x + 0.61	0.94
MT	y = 0.052x + 0.85	0.94

Fuente. Elaboración propia

5.1.2 Absorción efectiva

En la figura 30, 31, 32 y 33 se presenta el efecto de los tratamientos superficiales y de las proporciones fibra/matriz en la absorción efectiva de los paneles elaborados.

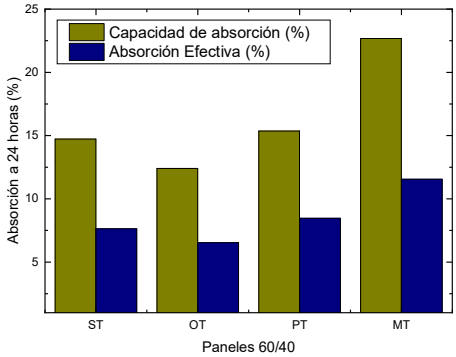

Figura 30. Absorción efectiva de los paneles proporción 60/40.
Fuente: Elaboración propia.

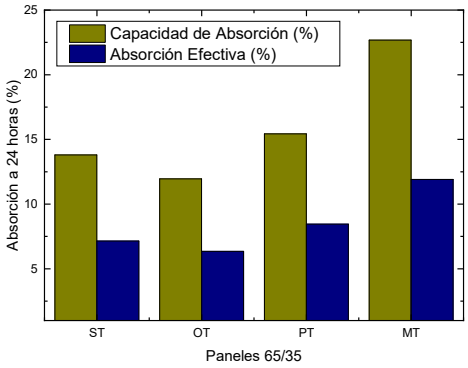

Figura 31. Absorción efectiva de los paneles proporción 65/35.
Fuente: Elaboración propia.

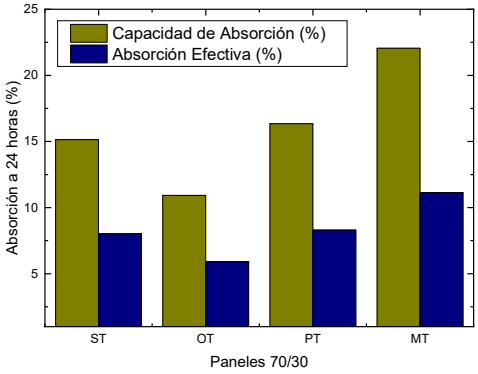

Figura 32. Absorción efectiva de los paneles proporción 70/30.
Fuente: Elaboración propia.

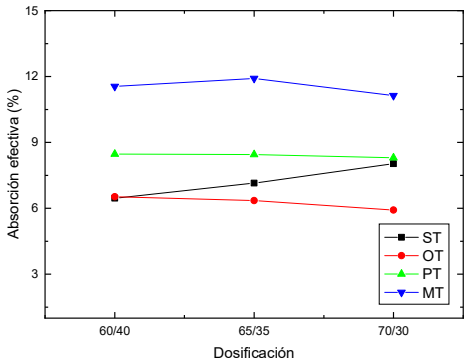

Figura 33. Influencia de la dosificación en la absorción efectiva.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13. Ecuaciones de influencia de la dosificación en la absorción efectiva a las 24 horas.

Tratamiento	Ecuación lineal	Coeficiente correlación
ST	$y = 0.095x^2 – 0.405x + 5.96$	1.00
OT	$y = -0.125x^2 + 0.195x + 6.46$	1.00
PT	$y = -0.65x^2 + 0.175x + 8.36$	1.00
MT	$y = -3.065x^2 – 16.105x + 31.86$	1.00

Fuente. Elaboración propia

5.1.3 Hinchamiento

En la figura 34, 35, 36 y 37 se presenta el efecto de los tratamientos superficiales y de las proporciones fibra/matriz el hinchamiento de los paneles elaborados.

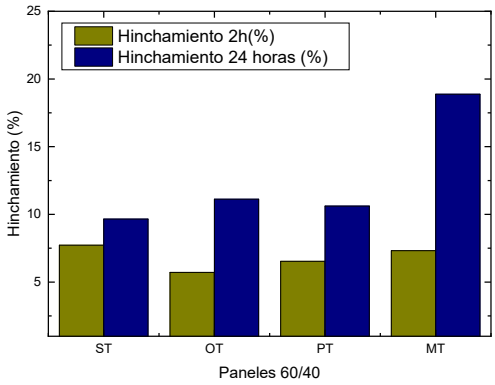

Figura 34. Hinchamiento de los paneles proporción 60/40.
Fuente: Elaboración propia.

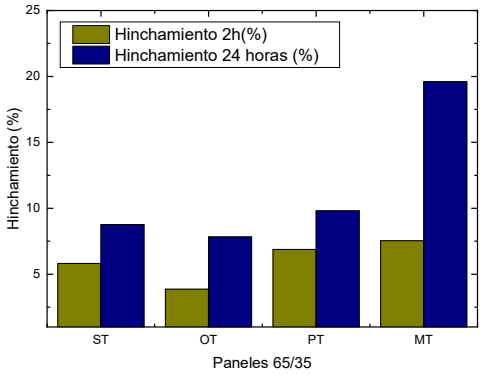

Figura 35. Hinchamiento de los paneles proporción 65/35.
Fuente: Elaboración propia.

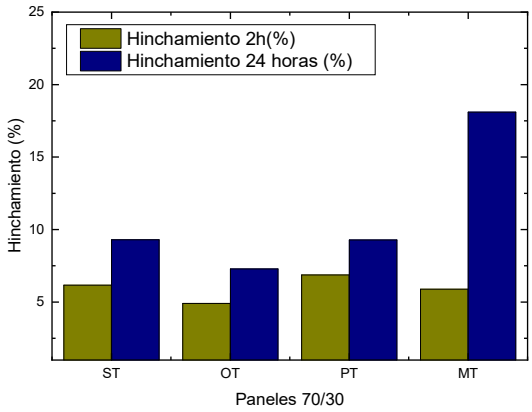

Figura 36. Hinchamiento de los paneles proporción 70/30.
Fuente: Elaboración propia.

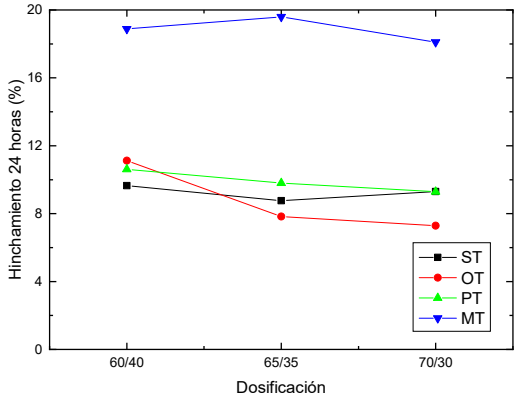

Figura 37. Influencia de la dosificación en el hinchamiento.
Fuente: Elaboración propia.

5.1.4 Absorción superficial

En la figura 38 se presenta la absorción superficial de acuerdo al efecto de los tratamientos superficiales y de las proporciones fibra/matriz de los paneles elaborados.

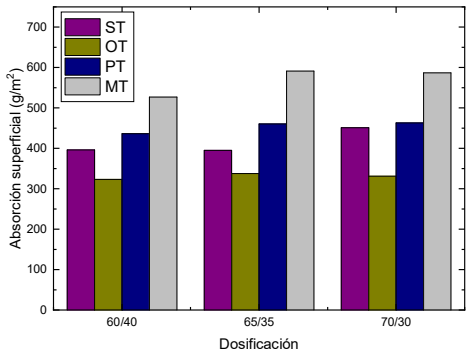

Figura 38. Absorción superficial de los paneles.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 39 se presenta la capacidad de absorción de acuerdo al efecto de los tratamientos superficiales y de las proporciones fibra/matriz de los paneles elaborados.

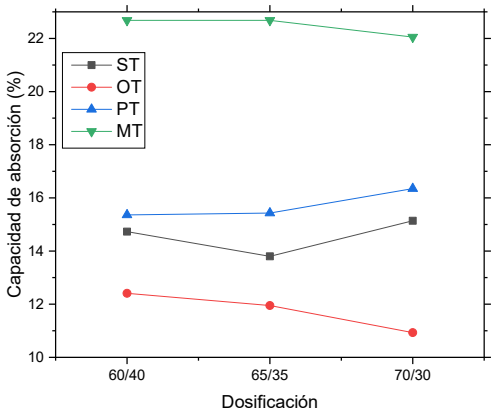

Figura 39. Capacidad de absorción los paneles.
Fuente: Elaboración propia.

5.1.5 Análisis de las propiedades físicas de los paneles elaborados con fibras tratadas con plasma frio de Metano

Analizando los resultados presentados en las figuras 25, 26 y 27 es posible observar una reducción entre 15% a 25% en la densidad de compuestos elaborados con fibras tratadas con plasma con respecto a los elaborados con fibras sin tratamiento. Resultados similares fueron obtenidos por Macedo et al (2020), y pueden ser asociados a la erosión que provoca el tratamiento

en la superficial de las fibras, lo que da como resultado la pérdida de masa de las fibras empleadas como refuerzo.

Por otra parte, los resultados permiten comprobar un incremento en la capacidad de absorción de paneles elaborados con fibras tratadas con plasma. En el caso de la absorción efectiva este incremento es de aproximadamente 30% en paneles elaborados con una proporción 60/40 (fibra/matriz). Para la absorción superficial de agua y el porcentaje de hinchamiento es posible observar un incremento de hasta 10% en ambas propiedades. De acuerdo con Praveen et al (2016), los tratamientos superficiales con plasma frío que utilizan gases reactivos como el metano provocan cambios químicos en las fibras como la generación de radicales en su superficie. Además de remover las impurezas adheridas a la superficie de las fibras y reducir su rugosidad, la exposición a este tipo de tratamiento puede remover parcialmente la capa hidrofóbica de las fibras, pudiendo provocar su rompimiento y la generación de distorsiones, conllevando a un incremento en la hidrofilicidad de la fibra. Este incremento también puede ser asociado a la inclusión de las funcionalidades oxigenadas y a la formación de cavidades en la superficie de la fibra como producto del tratamiento realizado. Analizando el efecto del porcentaje de fibras en las propiedades físicas del material es posible notar que el incremento del porcentaje de fibras provoca un aumento de aproximadamente 10% en la densidad del compuesto y una reducción de aproximadamente 10% en los valores de absorción efectiva y absorción superficial. Las variaciones en la capacidad de absorción y en el porcentaje de hinchamiento fueron inferiores al 5%.

5.1.6 Análisis de las propiedades físicas de los paneles elaborados con fibras tratadas mediante mercerización

Analizando los resultados presentados en las figuras 25, 26 y 27, es posible observar una reducción entre 6 % a 20% en la densidad de compuestos elaborados con fibras tratadas mediante mercerizacion con respecto a los elaborados con fibras sin tratamiento. Resultados similares fueron

presentados por Cai et al (2015), quien asoció el aumento de la densidad del compuesto a la remoción de las sustancias no celulósicas presentes en las fibras, las cuales se caracterizan por poseer polisacáridos de bajo peso molecular que forman estructuras amorfas, aleatorias y ramificadas que afectan la densidad del material.

En el caso de la absorción efectiva puede observarse un incremento de 78% en paneles elaborados con una proporción 60/40 (fibra/matriz). Para la absorción superficial de agua es posible observar un incremento de hasta 50% en paneles con dosificación 65/35, mientras que el porcentaje de hinchamiento presentó un aumento de más del 90%, independientemente del porcentaje de fibras empleado. El aumento de la absorción del compuesto puede ser asociada a la presencia de vacíos o defectos en el interior de las fibras, como resultado tanto a la remoción de los compuestos no celulósicos en el material como al porcentaje de solución de hidróxido de sodio y los tiempos de tratamiento seleccionados para la realización del tratamiento.

Analizando el efecto del porcentaje de fibras en las propiedades físicas del material es posible notar que el incremento del porcentaje de fibras provoca un aumento de aproximadamente 10% en la densidad del compuesto y una reducción de aproximadamente 15% en el valor del porcentaje absorción superficial. Las variaciones en la capacidad de absorción y en el porcentaje de hinchamiento fueron inferiores al 5%. No obstante, la absorción efectiva se redujo en más del 90% con el incremento de la fracción volumétrica de fibras.

5.1.7 Análisis de las propiedades físicas de los paneles elaborados con fibras tratadas con ozono

Analizando los resultados presentados en las figuras 25, 26 y 27 es posible observar un incremento entre 8 % a 15% en la densidad de compuestos elaborados con fibras tratadas mediante ozono con respecto a los elaborados con fibras sin tratamiento. Resultados similares fueron

presentados por Bautista (2012), quien asoció la disminución de la densidad al proceso de oxidación en las fibras y a la eliminación de impurezas principalmente pectinas y grasas.

En el caso de la absorción efectiva puede observarse una disminución de entre el 15% y el 25% en todos los paneles. Para la absorción superficial de agua es posible observar una disminución de entre 16% al 22% en paneles con dosificación fibra/matriz, 60/40 y 65/35, el porcentaje de hinchamiento también presentó una disminución de más del 20%, independientemente del porcentaje de fibras empleado. La disminución del porcentaje de hinchamiento y de la absorción superficial puede deberse a que las especies hidrófilas presentes en la fibra como son celulosa, pectina y proteínas como los espacios intermicelares se encuentran saturados de agua por el tratamiento.

Analizando el efecto del porcentaje de fibras en las propiedades físicas del material es posible notar que el incremento del porcentaje de fibras provoca un aumento de aproximadamente 10% en la densidad del compuesto y una reducción de aproximadamente 15% en el valor del porcentaje absorción superficial. Las variaciones en la capacidad de absorción y en el porcentaje de hinchamiento del orden del 15%. No obstante, la absorción efectiva se redujo en 20% con el incremento de la fracción volumétrica de fibras.

5.1.8 Análisis de varianza de las propiedades físicas de los paneles

Con el objetivo de conocer si las variables de estudio ejercen efectos significativos sobre las propiedades físicas de los paneles se realizó un análisis de varianza utilizando niveles de significancia iguales a 0,01%, 0,05% y 0,10% y porcentaje de confiabilidad de 99%, 95% y 90 %. La Tabla 14 presenta los parámetros para el análisis de varianza.

Tabla 14. Parámetros para análisis de varianza

Parámetro	
Dosificación 1	60% fibras-40% resina
Dosificación 2	65% fibras-35% resina
Dosificación 3	70% fibras-30% resina
ST	Sin tratamiento
OT	Tratamiento con ozono
PT	Tratamiento con plasma
MT	Tratamiento de mercerización

Fuente. Elaboración propia

Por medio de una prueba de hipótesis y prueba de normalidad fueron establecidos los efectos del tratamiento superficial, el porcentaje de fibras y la interacción de los dos factores en las propiedades físicas de los paneles. El análisis se realizó comparando el valor de p crítico obtenido para los niveles de significancia establecidos y mediante la comparación de la distribución de Fisher con la determinación de F crítico obtenido para cada caso de estudio.

Los resultados son presentados en las tablas 15 a 20.

Tabla 15. Análisis de varianza para densidad en estado seco al aire

Densidad en estado seco al aire					R^2	87.53%
Factor	**Grados de Libertad**	**Valor F**	**Valor p**	**90%**	**95%**	**99%**
Dosificación	2	3.97	0.031	H_1	H_1	H_0
Tratamiento superficial	3	38.68	0.00	H_1	H_1	H_1
Interacción Mat*Trat	6	0.73	0.63	H_0	H_0	H_0
Error	27					

Fuente. Elaboración propia

Tabla 16. Análisis de varianza para densidad básica

Densidad básica					R^2	83.36%
Factor	**Grados de Libertad**	**Valor F**	**Valor p**	**90%**	**95%**	**99%**
Dosificación	2	2.42	0.131	H_0	H_0	H_0
Tratamiento superficial	3	18	0.00	H_1	H_1	H_1
Interacción Mat*Trat	6	0.22	0.964	H_0	H_0	H_0
Error	12					

Fuente. Elaboración propia

Tabla 17. Análisis de varianza para el porcentaje de absorción efectiva

Absorción efectiva					R^2	82.01%
Factor	**Grados de Libertad**	**Valor F**	**Valor p**	**90%**	**95%**	**99%**
Dosificación	2	0.37	0.698	H_0	H_0	H_0
Tratamiento superficial	3	24.12	0.00	H_1	H_1	H_1
Interacción Mat*Trat	6	0.56	0.761	H_0	H_0	H_0
Error	23					

Fuente. Elaboración propia

Tabla 18. Análisis de varianza para el porcentaje de hinchamiento

Hinchamiento					R^2	75.02%
Factor	**Grados de Libertad**	**Valor F**	**Valor p**	**90%**	**95%**	**99%**
Dosificación	2	0.57	0.571	H_0	H_0	H_0
Tratamiento superficial	3	4.8	0.009	H_1	H_1	H_1
Interacción Mat*Trat	6	2.8	0.033	H_1	H_1	H_0
Error	17					

Fuente. Elaboración propia

Tabla 19. Análisis de varianza para la capacidad de absorción

Capacidad de absorción					R^2	91.31%
Factor	**Grados de Libertad**	**Valor F**	**Valor p**	**90%**	**95%**	**99%**
Dosificación	2	2.22	0.361	H_0	H_0	H_0
Tratamiento superficial	3	24.57	0.014	H_1	H_1	H_1
Interacción Mat*Trat	6	3.17	0.187	H_0	H_0	H_0
Error	9					

Fuente. Elaboración propia

Tabla 20. Análisis de varianza para la absorción superficial

Absorción superficial					R^2	91.48%
Factor	**Grados de Libertad**	**Valor F**	**Valor p**	**90%**	**95%**	**99%**
Dosificación	2	1.65	0.224	H_0	H_0	H_0
Tratamiento superficial	3	37.11	0.00	H_1	H_1	H_1
Interacción Mat*Trat	6	15.29	0.00	H_1	H_1	H_1
Error	16					

Fuente. Elaboración propia

A partir de los resultados presentados en las tablas 15-20, es posible observar que los factores analizados (dosificación y tipo de tratamiento superficial) afectan de manera diferente cada una de las propiedades físicas evaluadas. Los resultados obtenidos en el análisis de varianza, permitieron comprobar que el tipo de tratamiento superficial afecta de manera significativa todas las propiedades fiicas del compuesto, independientemente del nivel de confiablidad analizado. Sin embargo, la variación de las proporciones de mezcla solo presentó un efecto significativo para los valores de densidad de paneles en estado de seco al aire, con niveles de confabilidad de 90% y 95%. Por otra parte, pudo verificarse que la interacción entre los factores analizados no produce un efecto significativo para propiedades como la densidad, la capacidad de absorción y la absorción efectiva. No obstante, para el caso del porcentaje de hinchamiento se logró verificar que la interacción entre el tipo de tratamiento superficial y el porcentaje de fibras afecta de manera significativa la estabilidad dimensional de los paneles (para una confiabilidad de 90% y 95%), mientras que en el caso de la absorción superficial pudo verificarse la significancia de la interaccion entre los dos factores para los tres niveles de confiabilidad establecidos.

El efecto de cada uno de los factores analizados y su interaccion puede ser visualizado mediante las gráficas presentadas en las Figuras 40 y 41 para la densidad básica de los paneles.

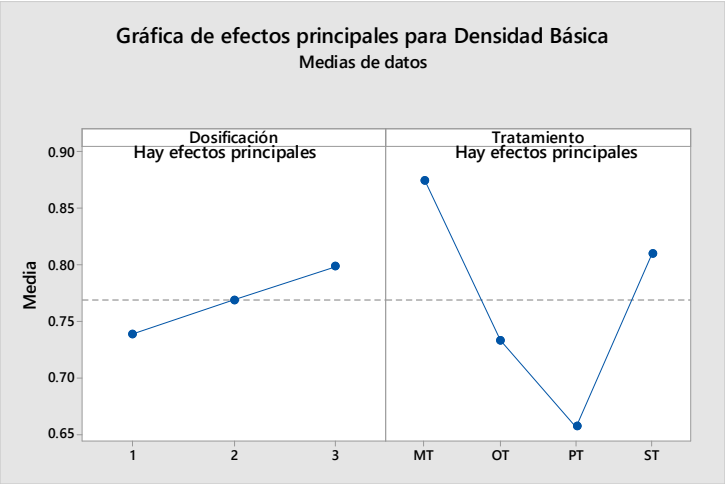

Figura 40. Gráfica de efectos principales densidad básica.
Fuente: Elaboración propia.

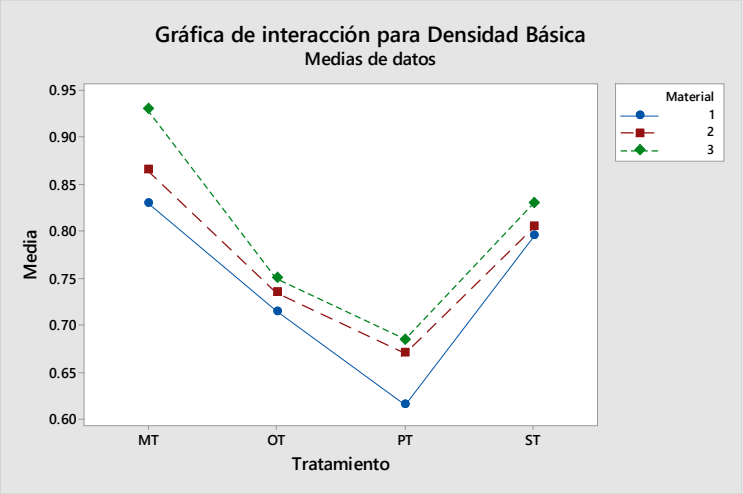

Figura 41. Gráfica de interacción densidad básica.
Fuente: Elaboración propia.

A partir de las figuras 40 y 41 se puede comprobar el efecto significativo del tratamiento superficial de las fibras en la densidad básicas del material. En el caso del efecto del porcentaje de mezcla, puede observarse, que el gráfico presenta una línea con una pendiente cercana al eje horizontal, lo cual puede ser relacionado con un efecto muy bajo de este factor en la propiedad física analizada, verificándose el cumplimiento de la hipótesis nula (H0). Por otra parte, los resultados obtenidos en el gráfico de interacción, muestran que las líneas de los factores son paralelas, con lo cual es posible verificar el cumplimiento de la hipótesis alterna. Los gráficos de efectos principales y de interacción fueron obtenidos para cada una de las propiedades físicas analizadas y son presentadas en el Anexo 1.

Un análisis de distribución de los datos se realizó para cada una de las propiedades físicas analizadas. En el caso de la densidad básica, pudo observarse que los datos experimentarles siguen una distribución normal (Ver figura 42). Adicionalmente, para la detección de valores atípicos fue realizada la prueba de Grubbs (Ver Figura 43), mediante la cual fue posible comprobar que no hay valores atípicos. Los resultados de la distribución de datos y de valores atípicos para todas las propiedades físicas analizadas son presentadas en el Anexo 2.

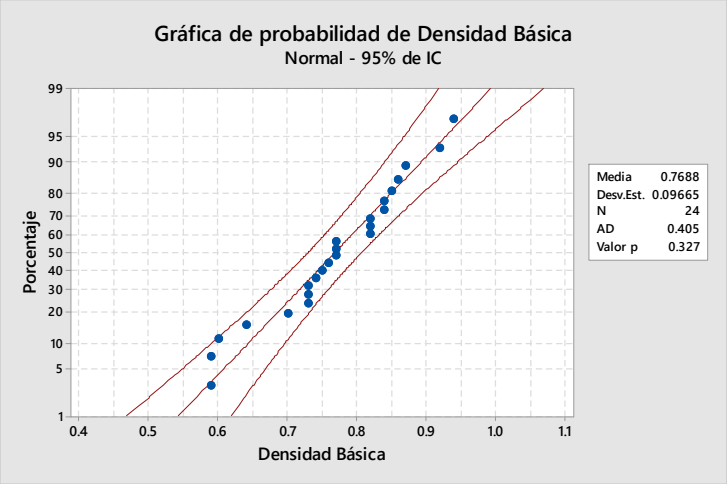

Figura 42. Gráfica de probabilidad densidad básica.
Fuente: Elaboración propia.

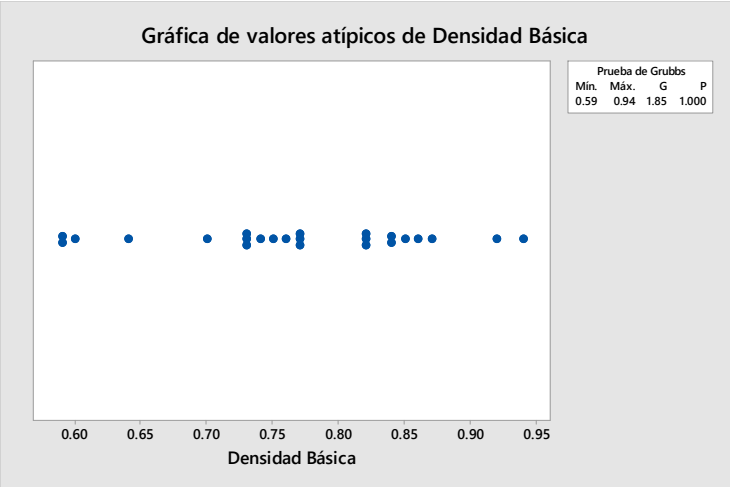

Figura 43. Gráfica de valores atípicos de densidad básica.
Fuente: Elaboración propia.

A partir de los resultados del análisis de varianza fue posible establecer las ecuaciones de regresión las cuales pueden ser utilizadas para predecir las propiedades físicas de las fibras en función del porcentaje de fibras y del tratamiento superficial para una confiabiliad de 90%, 95% y 99%, estas se presentan en la tabla 22 y fueron simplificadas a partir de las variables establecidas en la tabla 21.

Tabla 21. Variables de las ecuaciones de regresión

Parámetro	
X_1	60% fibras-40% resina
X_2	65% fibras-35% resina
X_3	70% fibras-30% resina
Y_1	Sin tratamiento
Y_2	Tratamiento con ozono
Y_3	Tratamiento con plasma
Y_4	Tratamiento de mercerización

Fuente. Elaboración propia

Tabla 22. Ecuaciones de regresión para predecir las propiedades físicas.

Ecuaciones de regresión para predecir las propiedades fisicas	
Densidad	$0.7688+ 0.1063Y_4- 0.0354 Y_2- 0.1121 Y_3+0.0412 Y_1- 0.0300 X_1+ 0.0000 X_2+ 0.0300 X_3- 0.0150 Y_4*X_1- 0.0100 Y_4*X_2+0.0250 Y_4*X_3+ 0.0117 Y_2*X_1+ 0.0017 Y_2*X_2- 0.0133 Y_2*X_3- 0.0117 Y3*X1+ 0.0133 Y_3*X_2- 0.0017 Y_3*X_3+ 0.0150 Y_1*X_1- 0.0050 Y_1* X_2- 0.0100 Y_1*X_3$
Absorción efectiva	$8.871+ 4.335 Y_4- 2.604 Y_2- 0.464 Y_3- 1.267 Y_1+ 0.459 X_1- 0.408 X_2- 0.051 X_3+ 1.029 Y_4*X_1- 0.89 Y_4*X_2- 0.141 Y_4*Y_3- 0.20 Y_2* X_1+ 0.49 Y_2*X_2- 0.29 Y_2*X_3- 0.40 Y_3*X_1+ 0.45 Y_3*X_2- 0.05Y_3*X_3-0.44 Y_1*X_1 - 0.05 Y_1*X_2 + 0.48 Y_1*X_3$
Hinchamiento	$10.702+ 4.23 Y_4- 1.96 Y_2- 0.80 Y_3- 1.46 Y_1- 0.10 X_1+ 0.80 X_2- 0.70 X_3- 3.78Y_4*X_1 + 3.87 Y_4*X_2 - 0.09 Y_4*X_3+ 2.46 Y_2*X_1 - 1.70Y_2*X_2- 0.76 Y_2*X_3 + 0.81Y_3*X_1 - 0.90 Y_3*X_2 + 0.09 Y_3*X_1 +0.51Y_1*X_1 - 1.27Y_1*X_2 + 0.76 Y_1*X_3$
Capacidad de absorción	$16.12+ 6.35 Y_4- 4.38 Y_2- 0.41 Y_3- 1.57 Y_1+ 0.17 X_1- 0.16 X_2- 0.02X_3+0.04 Y_4*X_1 + 0.37Y_4*X_2- 0.40Y_4*X_3+ 0.50 Y_2*X_1+0.37 Y_4*X_2-0.86Y_2*X_3 - 0.53 Y_1*X_1- 0.13Y_3*X_2+ 0.66 Y_3*X_3- 0.00Y_1*X_1- 0.60 Y_1*X_2+ 0.61 Y_1*X_3$

Fuente: Elaboración propia.

5.2 Propiedades mecánicas de los paneles

En la tabla 23 se presentan los resultados consolidados de velocidad longitudinal obtenidos por medio del ensayo de ultrasonido. A partir de la velocidad longitudinal se obtienen las propiedades mecánicas de manera experimental.

Tabla 23. Velocidad longitudinal de los paneles

Dosificación	Tratamiento	Velocidad longitudinal (m/s)
1	ST	1970.25
1	ST	1934.06
1	OT	1747.88
1	OT	1849.94
1	PT	1414.31
1	PT	1391.91
1	MT	2891.53
1	MT	2302.38
2	ST	1712.94
2	ST	1991.31
2	OT	1619.88
2	OT	1703.31
2	PT	1270.25
2	PT	1277.13
2	MT	2481.94
2	MT	3052.27
3	ST	1568.31
3	ST	1659.25
3	OT	1396.06
3	OT	1281.06
3	PT	1224.94
3	PT	1197.00
3	MT	2231.25
3	MT	2856.25

Fuente: Elaboración propia.

5.2.1 Módulo de elasticidad aparente dinámico

En la figura 44 y 45 se representa gráficamente el efecto del tratamiento superficial de las fibras y proporciones de mezcla en el valor del módulo de elasticidad aparente obtenido mediante la técnica de ultrasonido.

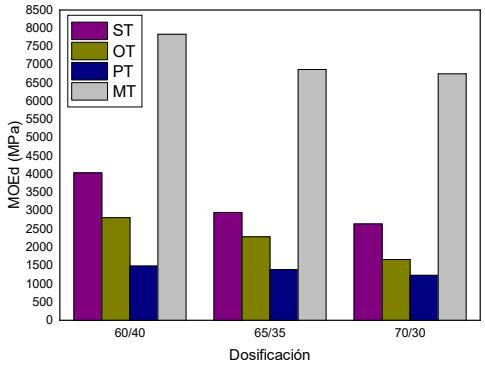

Figura 44. Módulo de elasticidad aparente dinámico.
Fuente: Elaboración propia.

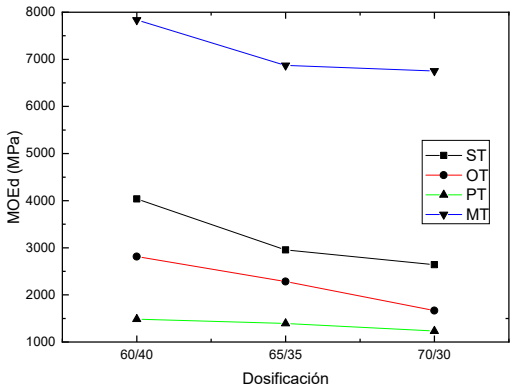

Figura 45. Módulo de elasticidad aparente dinámico.
Fuente: Elaboración propia.

5.2.2 Módulo de elasticidad dinámico

En la figura 46 y 47 se representa gráficamente el efecto del tratamiento superficial de las fibras y el porcentaje de mezcla en el valor del módulo de elasticidad longitudinal obtenido mediante la técnica de ultrasonido.

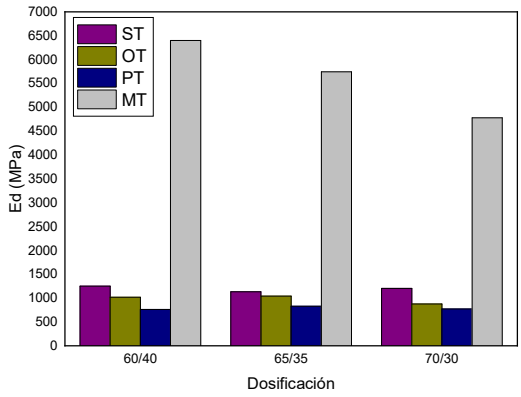

Figura 46. Módulo de elasticidad dinámico.
Fuente: Elaboración propia.

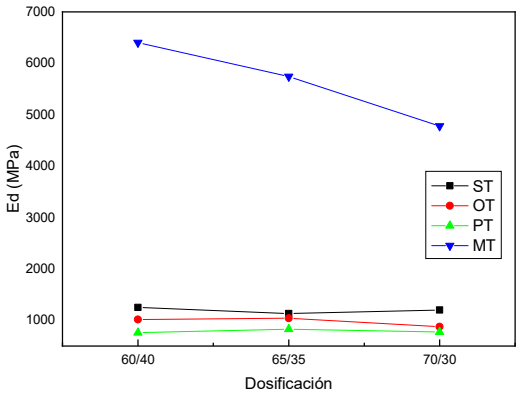

Figura 47. Módulo de elasticidad dinámico.
Fuente: Elaboración propia.

5.2.3 Módulo de cortante

En la figura 48 y 49 se representa gráficamente el resultado del módulo de cortante de acuerdo con el tipo de tratamiento superficial y de las proporciones fibra/matriz utilizadas en la elaboración de los paneles.

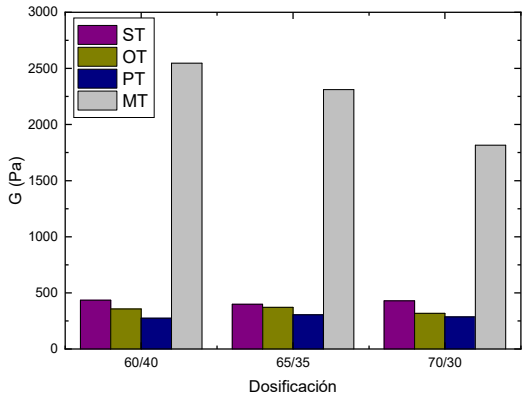

Figura 48. Módulo de cortante.
Fuente: Elaboración propia.

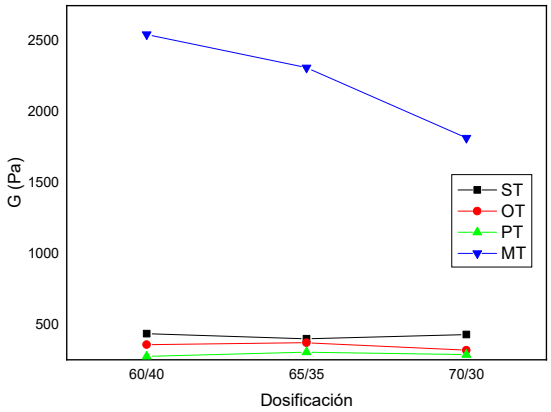

Figura 49. Módulo de cortante.
Fuente: Elaboración propia.

5.2.4 Coeficiente de Poisson

En la figura 50 y 51 se representa gráficamente el resultado del coeficiente de Poisson de acuerdo con el tipo de tratamiento superficial y con las proporciones fibra/matriz utilizadas en la elaboración de los paneles.

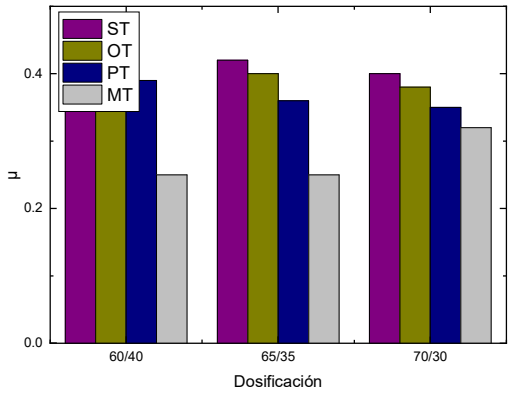

Figura 50. Coeficiente de Poisson.
Fuente: Elaboración propia.

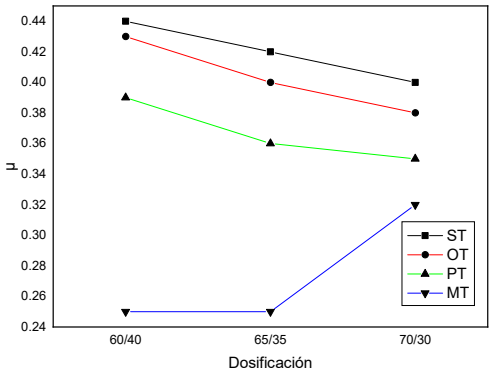

Figura 51. Coeficiente de Poisson.
Fuente: Elaboración propia.

5.2.5 Análisis de las propiedades mecánicas de los paneles elaborados con fibras tratadas con ozono

A partir de los resultados presentados en las figuras 46, 48, 50 y 52, es posible observar una reducción en las propiedades mecánicas de compuestos elaborados con fibras tratadas con ozono, con respecto a las propiedades obtenidas para paneles elaborados con fibras sin tratar. Los resultados demuestran una reducción de aproximadamente un 15% en el valor del módulo de elasticidad longitudinal, una reducción de hasta 30% para el módulo aparente, una reducción aproximadamente igual a 18% para el módulo de cortante. En el caso del coeficiente de Poisson,

pudo observarse que las diferencias entre los valores obtenidos no superaron el 5%. Los resultados obtenidos son coherentes a los presentados por Richet et al., (2011) y pueden ser asociados a la concentración de ozono empleada en el tratamiento de la superficie de las fibras. Analizando el efecto de la dosificación (porcentaje fibra/matriz) empleados en la elaboración del compuesto se encuentran diferencias inferiores al 29%.

5.2.6 Análisis de las propiedades mecánicas de los paneles elaborados con fibras tratadas con plasma

A partir de los resultados presentados en las figuras 46, 48, 50 y 52, es posible observar una reducción en las propiedades mecánicas de compuestos elaborados con fibras tratadas con plasma, con respecto a las propiedades obtenidas para paneles elaborados con fibras sin tratar. Los resultados demuestran una reducción de aproximadamente un 35% en el valor del módulo de elasticidad longitudinal, una reducción de hasta 60% para el módulo aparente, una reducción aproximadamente igual a 30% para el módulo de cortante. En el caso del coeficiente de Poisson, pudo observarse que las diferencias entre los valores obtenidos no superaron el 15%.

Los resultados obtenidos son coherentes a los encontrados en la bibliografia consultada (Barra et al, 2015 y Praveen et al., 2016) y pueden ser asociados a la posible ocurrencia de daño estructural en las fibras debido a su exposición prolongada a un plasma reactivo o a la frecuencia de descarga del plasma aplicado. Analizando el efecto de la dosificación (porcentaje fibra/matriz) empleados en la elaboracion del compuesto se encuentran diferencias ingeriores al 20% en los resultados obtenidos.

5.2.7 Análisis de las propiedades mecánicas de los paneles elaborados con fibras tratadas mediante mercerización

Los resultados presentados en las figuras 46, 48, 50 y 52, permiten comprobar un incremento de aproximadamente el 79% en el valor de módulo de elasticidad longtitudinal, 81%

en el módulo de cortante y 55% para el módulo aparente, comparado con los resultados obtenidos para paneles elaborados con fibras no tratadas. En el caso del coeficiente de Poisson, se observa una diferencia entre los valores de casi el 35% en promedio.

A partir de los resultados obtenidos, es posible comprobar el efecto del método de mercerización en el desempeño mecánico del material, particularmente, su efecto sobre la interfaz fibra-matriz, favoreciendo el mecanismo de anclaje de la resina a las fibras, lo que incide en la transferencia de carga entre la matriz y el refuerzo, provocando un aumento de la resistencia mecánica y la rigidez del material. Analizando el efecto de la dosificación (porcentaje fibra/matriz) empleados en la elaboración del compuesto se encuentran diferencias inferiores al 20% en los resultados obtenidos.

5.2.8 Análisis de varianza

Con el objetivo de conocer si existen efectos significativos sobre las propiedades mecánicas de los paneles se realizó un análisis de varianza para niveles de significancia de 0,01%, 0,05% y 0,10% y porcentaje de confiabilidad de 99%, 95% y 90 %. La Tabla 24 presenta los parámetros para el análisis de varianza.

Tabla 24. Parámetros para análisis de varianza

Parámetro	
Dosificación 1	60% fibras-40% resina
Dosificación 2	65% fibras-35% resina
Dosificación 3	70% fibras-30% resina
ST	Sin tratamiento
OT	Tratamiento con ozono
PT	Tratamiento con plasma
MT	Tratamiento de mercerización

Fuente. Elaboración propia

Por medio de una prueba de hipótesis (Inzunsa et al., 2013) y una prueba de normalidad (Cerron 2016) fue establecido el efecto del tratamiento superficial, el porcentaje de fibras y la

interacción entre los dos factores en las propiedades mecánicas de los paneles. El análisis se realizó comparando el valor de p crítico obtenido para los niveles de significancia seleccionados y mediante la comparación de la distribución de Fisher con la determinación de F crítico obtenido para cada caso de estudio.

En las tablas 25 a 28 se presentan los resultados del análisis de varianza con niveles de significancia de 0,01%, 0,05% y 0,10% y porcentaje de confiabilidad de 99%, 95% y 90%, respectivamente, verificando el cumplimiento de las hipótesis en cada un de las propiedades mecánicas analizadas.

Tabla 25. Análisis de varianza para Módulo de elasticidad aparente dinámico (MOE_d).

MOEd						R^2	80.95%
Factor	**Grados de Libertad**	**Valor F**	**Valor p**	**90%**	**95%**		**99%**
Dosificación	2	1.76	0.214	H_0	H_0		H_0
Tratamiento superficial	3	34.78	0.00	H_1	H_1		H_1
Interacción Mat*Trat	6	0.15	0.986	H_0	H_0		H_0
Error	12						

Fuente. Elaboración propia

Tabla 26. Análisis de varianza para Módulo de cortante (G)

G						R^2	88.51%
Factor	**Grados de Libertad**	**Valor F**	**Valor p**	**90%**	**95%**		**99%**
Dosificación	2	0.89	0.438	H_0	H_0		H_0
Tratamiento superficial	3	60.56	0.00	H_1	H_1		H_1
Interacción Mat*Trat	6	0.78	0.60	H_0	H_0		H_0
Error	12						

Fuente. Elaboración propia

Tabla 27. Análisis de varianza para Módulo de elasticidad dinámico (Ed).

Ed					R^2	87.52%
Factor	**Grados de Libertad**	**Valor F**	**Valor p**	**90%**	**95%**	**99%**
Dosificación	2	0.71	0.513	H_0	H_0	H_0
Tratamiento superficial	3	55.90	0.00	H_1	H_1	H_1
Interacción Mat*Trat	6	0.54	0.769	H_0	H_0	H_0
Error	12					

Fuente. Elaboración propia

Tabla 28. Análisis de varianza Coeficiente de Poisson (μ)

μ					R^2	91.14%
Factor	**Grados de Libertad**	**Valor F**	**Valor p**	**90%**	**95%**	**99%**
Dosificación	2	2.03	0.175	H_0	H_0	H_0
Tratamiento superficial	3	72.46	0.00	H_1	H_1	H_1
Interacción Mat*Trat	6	4.35	0.015	H_1	H_1	H_0
Error	17					

Fuente. Elaboración propia

De los resultados obtenidos para las propiedades mecánicas de los paneles se puede evidenciar que las proporciones de fibras empleadas como refuerzo no influyen de manera significativa en las propiedades dinámicas de los paneles.

Los resultados obtenidos en el análisis de varianza, permitieron comprobar que el tipo de tratamiento superficial afecta de manera significativa todas las propiedades dinámicas del compuesto, independientemente del nivel de confiablidad analizado. Tambien, pudo verificarse que la interacción entre los factores analizados no produce un efecto significativo para propiedades como módulo de elasticidad apartente, módulo de cortante y módulo de elasticidad dinámico. No obstante, para el caso del coeficiente de Poisson se logró verificar que la interacción entre el tipo de tratamiento superficial y el porcentaje de fibras afecta de manera significativa para significancias del 90% y 95%.

El efecto de cada uno de los factores analizados y su interacción puede ser visualizado mediante las gráficas presentadas en las Figuras 52 y 53 para el módulo de elasticidad dinámico.

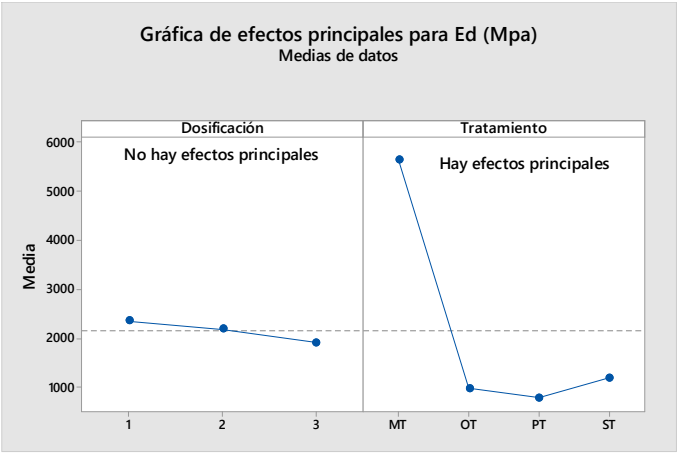

Figura 52. Gráfica de efectos principales para Módulo de elasticidad dinámico.
Fuente: Elaboración propia.

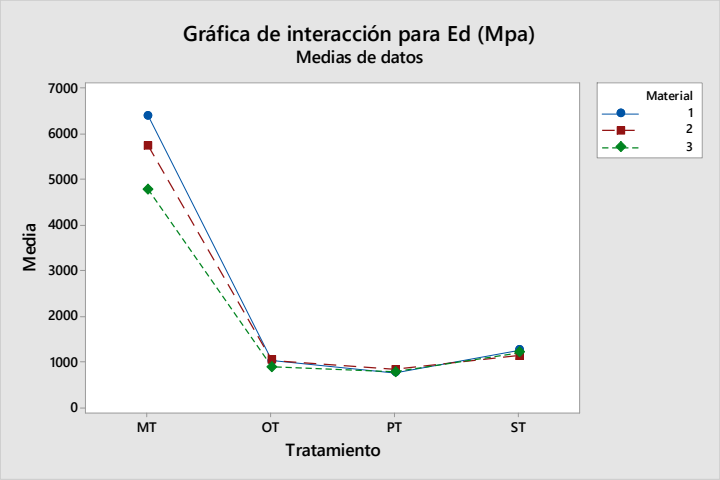

Figura 53. Gráfica de interacción para Módulo de elasticidad dinámico.
Fuente: Elaboración propia.

A partir de las figuras 52 y 53 se puede comprobar el efecto significativo del tratamiento superficial de las fibras en el módulo de elasticidad dinámico del material. En el caso del efecto del porcentaje de mezcla, puede observarse, que el gráfico presenta una línea con una pendiente cercana al eje horizontal, lo cual puede ser relacionado con un efecto muy bajo de este factor en la propiedad mecánica analizada, verificándose el cumplimiento de la hipótesis nula (H0). Por otra parte, los resultados obtenidos en el gráfico de interacción, permiten comprobar el cumplimiento

de la hipótesis alterna. Los gráficos de efectos principales y de interaccion fueron obtenidos para cada una de las propiedades mecánicas analizadas y son presentadas en el Anexo 3.

Un análisis de distribución de los datos se realizó para cada una de las propiedades mecánicas analizadas. En el caso del módulo de elasticidad, pudo observarse que algunos de los datos experimentales siguen una distribución normal (Ver figura 54). Adicionalmente, para la detección de valores atípicos fue realizada la prueba de Grubbs (Ver Figura 55), mediante la cual fue posible comprobar que no hay valores atípicos. Los resultados de la distribución de datos y de valores atípicos para todas las propiedades mecánicas analizadas son presentadas en el Anexo 4.

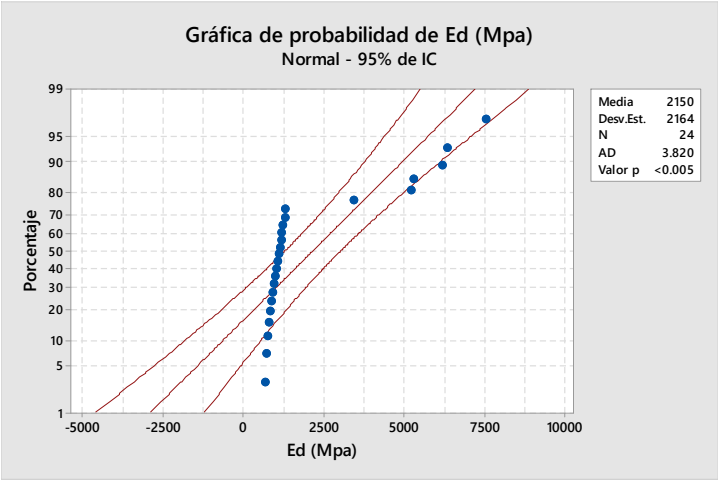

Figura 54. Gráfica de probabilidad de Módulo de elasticidad dinámico.
Fuente: Elaboración propia.

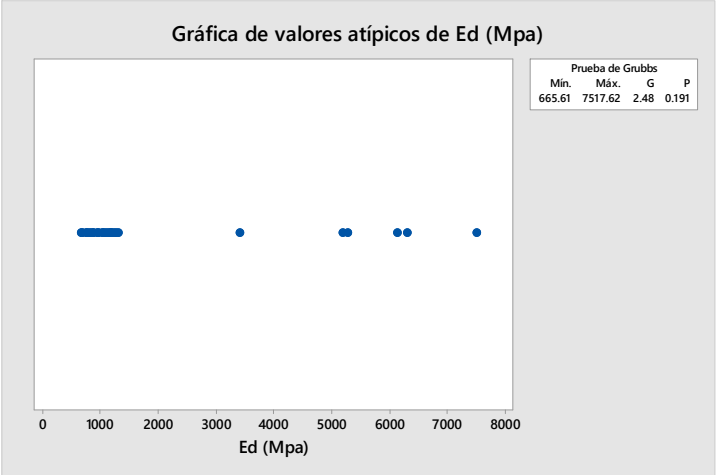

Figura 55. Gráfica de valores atípicos de Módulo de elasticidad dinámico.
Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 6. **Conclusiones**

A partir del análisis es posible plantear las siguientes conslusiones:

- Los porcentajes de fibras utilizados en la elaboracion de los paneles con fibras de arundo donax y resina vegetal no influyó de manera significatuva en las propiedades físicas y mecánicas de los compuestos.
- Los tratamientos superficiales realizados para modificar la superficie de las fibras afectaron de manera significativa las propiedades físicas y mecánicas del biocompuesto.
- El tratamiento de mercerización provocó un incremento de las propiedades mecánicas del material.
- Los compuestos elaborados con fibras tratadas superficialmente con plasma y ozono presentaron resultados inferiores a los de los paneles elaborados con fibras sin tratar y con fibras mercerizadas.
- De acuerdo con los resultados del análisis de varianza no se observa una interaccion significativa entre los facrores analizados (tratamiento superficial y dosificación de materiales constituyentes).

Capítulo 7. **Recomendaciones**

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo se propine profundizar en el estudio de los factores que afectan el diseño y desempeño de materiales compuestos reforzados con materiales de origen vegetal. Para dar continuidad a este tema se propinen los siguientes estudios:

- Análisis del efecto del tiempo y temperatura de tratamiento en las propiedades del material.
- Análisis del efecto del tipo de gas empleado en el tratamiento con gas.
- Análisis del efecto de la concentración de ozono empleado en el tratamiento con ozono.
- Análisis del efecto de la concentración de hidróxido de sodio utilizado en el tratamiento de mercerización.
- Análisis de la influencia de la relación de aspecto (longitud/diámetro) de las fibras y de su orientación en las propiedades físicas y mecánicas del compuesto.
- Análisis del efecto de las condiciones de compactación (presión y tiempo de compactación) durante el proceso de fabricación.

Financiación

- Este trabajo de grado es un producto derivado del proyecto (INV-ING-2983) financiado por la Vicerrectoria de Investigaciones de la Universidad Militar Nueva Granada, vigencia 2019.

Bibliografía

(1) Alonso. Narro. Castañeda. (2017). Efectos de la modificación superficial por plasma en fibras lignocelulosas y su aplicación. Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila. Vol. 9. Pp 21-26. Recuperado de: http://www.biochemtech.uadec.mx/2017/12/18/efectos-de-la-modificacion-superficial-por-plasma-en-fibras-lignocelulosicas-y-su-aplicacion/

(2) AL-Oqla Faris M. Omari Mohammad. (2017). Sustainable Biocomposites: Challenges, potencial and barriers for development. Green Biocomposites. Manufacturing and properties. (Pp. 13-30). Springer.

(3) Aramendiz, Espitia, Cardona. (2008). Valoración de los recursos filogenéticos de caña flecha en el Caribe Colombiano. Monteria, Córdoba: Produmedios.

(4) Arrieta, M. P., Ferrándiz Bou, S., López Martínez, J., & Rayón Encinas, E. (2016). Correlación entre las propiedades macro, micro y nanomecánicas en polímeros termoplásticos biodegradables. Modelling in Science Education and Learning, 9(2), 25-40.

(5) Askeland Donald. Fulay Pradeep. Wright Wendelin. (2012). Materiales compuestos. Ciencia e ingeniería de materiales. 4ª edición. (Pp. 651-687). Mexico D.F. Cengage Learning Editores S.A.

(6) ASTM. (2017). Standar test methods for density and specific gravity of wood and wood-based materials. (D2395-17). https://compass-astm-org.ezproxyegre.uniandes.edu.co:8843/CUSTOMERS/index.html

(7) ASTM. (2013). Standar test methods for moisture in wool by oven-drying. (D1576-13). https://compass-astm-org.ezproxyegre.uniandes.edu.co:8843/CUSTOMERS/index.html

(8) ASTM. (2008). Standar test methods laboratory determination of ùlse velocities and ultrasonic elastic constants of rock. (D2845-08). https://compass-astm-org.ezproxyegre.uniandes.edu.co:8843/CUSTOMERS/index.html

(9) ASTM. (2016). Standar test method direct moisture content measurement of wood and wood-based materials. (D4442-16). https://compass-astm-org.ezproxyegre.uniandes.edu.co:8843/CUSTOMERS/index.html

(10) ASTM. (2016). Standar test method for density of high-modulus fibers. (D3800-16). https://compass-astm-org.ezproxyegre.uniandes.edu.co:8843/CUSTOMERS/index.html

(11) Armas-Ruiz, D., & Ruiz-Galarza, M. P. (2016). Caracterización de propiedades mecánicas de las fibras de banano de la corteza y el cuerpo del tallo. Científica, 20(1), 21-31.

(12) Atamari Peña, Gisuel Consuelo. Anco Apaza, María Jesús. (2015). Obtención del poliéster de ricino a partir del aceite de ricino y ácido ricinoleico, determinando su rendimiento óptimo para su aplicación en el champú de aloe vera. Tesis de grado, Universidad Nacional San Agustín de Arequipa. Recuperado http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/4032/IQatpegc064.pdf?sequence=1&isAllowed=y

(13) Banco Central Hipotecario. (1983). Vivienda en Buenaventura, Tecnología de paneles estructurales en madera. Bogotá, Colombia.
(14) Baquero, Monsalve, Sánchez. (2018). Caracterización experimental de paneles compuestos elaborados con fibras de Arundo Donax y resina vegetal. Revista Scientia et Técnica, Año XXII, Vol. 23. Pp. 119-125. Recuperado de https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/17041/11591.
(15) Bautista Pérez, Lorenzo. (2012). Tratamiento de tejidos de algodón con ozono: Análisis de las variables de proceso, aproximación cinética, estudio del envejecimiento y caracterización superficial. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Recuperado de https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/94924/TLBP1de1.pdf?sequence=1&isAllowed=y
(16) Cai, M., Takagi, H., Nakagaito, A. N., Katoh, M., Ueki, T., Waterhouse, G. I., & Li, Y. (2015). Influence of alkali treatment on internal microstructure and tensile properties of abaca fibers. Industrial Crops and Products, 65, 27-35.
(17) Carrillo, J., Ramirez, J., & Lizarazo-Marriaga, J. (2019). Modulus of elasticity and Poisson's ratio of fiber-reinforced concrete in Colombia from ultrasonic pulse velocities. Journal of Building Engineering, 23, 18-26.
(18) Cerron, J. C. P. (2016). Comparación de pruebas de normalidad multivariada. In Anales Científicos (Vol. 77, No. 2, pp. 141-146). Universidad Nacional Agraria La Molina.
(19) Dávila, J. L., Galeas, S., Guerrero, V. H., Pontón, P., Rosas, N. M., Sotomayor, V., & Valdivieso, C. (2011). Nuevos materiales: aplicaciones estructurales e industriales.
(20) Dehouche Nadjet, Idres Celia, Kaci Mustapacha, Zembouai Idris, Bruzaud Stephane. (2020). Effects of various surface treatments on Aloe Vera fibers used as reinforcement in poly (3-hydroxibutyrate-co-3-hydroxyhexanoate) biocomposites. Polymer Degradation and stability. Vol. 175. Recuperado de: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014139102030063X
(21) Deltoro, Jiménez, Vilan. (2012). Bases para el manejo y control de Arundo Donax L (caña común). Fondo Europeo agrícola de Desarrollo Rural. Valencia. España. 69 p. Recuperado de www.conservacionvegetal.org/upload/publicaciones/47/Manual-Arundo-web.pd.
(22) Díaz Espinosa, Díaz Triana, Vargas. (2012). Catálogo de plantas invasoras de los humedales de Bogotá. Grupo de Restauración Ecológica de la Universidad Nacional de Colombia y Secretaria de Ambiente. Bogotá D.C., Colombia. 248 p. Recuperado de http://ambientebogota.gov.co/es/web/publicaciones-sda/catalogo-de-plantas-invasoras-de-los-humedales-de-bogota.
(23) Egala. Gangi. (2018). Effect of short and randomly oriented Ricinus Communis L plant on mechanical behaviour of Ricinus Communis L. Materials Today: Proceedings. Vol. 5. Pp 8065-8072. Recuperado de: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785317327621.
(24) Enciso, B., de Armentia, S. L., Abenojar, J., & Martínez, M. A. (2018). Influencia del tratamiento superficial en la resistencia y adhesión entre fibras naturales de lino y una matriz termoplástica. Materiales Compuestos, 2(3), 40-43.

(25) Faruk, Bledzki, Fink y Sain. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. Progress in polymer science. Vol. 37. Pp 1552-1596. Recuperado de http://www.sciencedirect.com/science/journal/00796700.
(26) Fernández y Mendoca de Carvalho (2004). Los usos de Arundo Donax L. (POACEAE) en el concejo de Beja, Alentejo, Portugal. Etnobiología. Vol. 4. Pp. 67-72. Recuperado de https://dialnet-unirioja-es.ezproxy.umng.edu.co:2518/revista/23677/V/4.
(27) Fiore, Scalici, Vitale y Valenza. (2014). Static and dynamic mechanical properties of Arundo donax fillers-epoxy composites. Materials and Design. Vol. 57. Pp 456-464. Recuperado de https://www.journals.elsevier.com/materials-and-design.
(28) Fiore, Scalici, y Valenza. (2014). Characterizacion of new natural fiber from Arundo donax L. as potential reinforcement of polymer composites. Carbohydrate polymers. Recuperado de https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144861714001374
(29) Fuentes, Gordillo, Mendoza y Amezquita. (2011). Respuesta mecánica de compositos con Arundo donax como refuerzo en resinas polyester. Revista Enlace Químico. Vol. 3. Recuperado de http://quimica.ugto.mx/index.php/nyt/article/download/54/pdf1.
(30) García Ortuño, Rodríguez, Fernández García, Fernández Villena y Fernández García. (2011). Evaluation of the physical and mechanical properties of particleboard made from giant reed (arundo donax L.). BioResources. Vol. 6. Pp. 477-486. Recuperado de http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_06_1_0477_GarciaO_AFFF_Eval_Particalboard_Giant_Reed_Arundo_D
(31) Gómez, José Santiago. (2009). Diseño de un material compuesto con fibra natural para sustituir la utilización de la fibra de vidrio. Tesis de grado. Recuperado de https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/297/JoseSantiago_GomezP._2009.pdf
(32) González Ávila, William. (2016). Ensayos para determinar y comparar las propiedades Físico-Mecánicas de la guadua angustifolia de Pacho Cundinamarca frente a la de Silvania Cundinamarca. Tesis de Pregrado. Recuperado de http://repository.unimilitar.edu.co.
(33) Gurunathan. Mohanty. Nayak. (2015). A review of the recent developments in biocomposites based on natural fibers and their application perspectives. Composites: Part A 77. Pp 1-25. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/281786325.
(34) Inzunsa Cazares, S., & Jiménez Ramírez, J. V. (2013). Caracterización del razonamiento estadístico de estudiantes universitarios acerca de las pruebas de hipótesis. Revista latinoamericana de investigación en matemática educativa, 16(2), 179-211.
(35) Kumar. Das. Neckar. (2018). Effect of fiber orientation on tensile behavior of biocomposites prepared from nettle and poly (lactid acid) fibers: Modeling & Experiment. Composites Part B. Vol. 138. Pp. 113-121. Recuperado de: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836817318656
(36) Lázaro León, K. C., Gonzáles Mora, H. E., & Cárdenas Oscanoa, A. J. (2016). Propiedades mecánicas del material compuesto elaborado con bambú (Guadua angustifolia Kunth) y polipropileno. Revista mexicana de ciencias forestales, 7(38), 95-110.

(37) Lino Villanueva, Gladys Liliana. (2016). Arundo Donax L. como gramínea perenne para la producción de biomasa en ambiente Mediterráneo. Tesis de Doctorado. Recuperado de https://www.tdx.cat/handle/10803/398126#page=1
(38) Macedo, M. J., Silva, G. S., Feitor, M. C., Costa, T. H., Ito, E. N., & Melo, J. D. (2020). Surface modification of kapok fibers by cold plasma surface treatment. Journal of Materials Research and Technology.
(39) Materiales. Estructura, propiedades y aplicaciones (2005). (1th ed.). Madrid, España. De Saja Sáenz. Rodríguez Pérez. Rodríguez Méndez. Pp. 281-297.
(40) Mistri, Routh, Ray, Sahoo, Misra. (2011). Green composites from maleated castor oil and jute fibers. Industrial Crops and Products. Vol 34. Pp 900-906. Recuperado de: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926669011000495.
(41) Monsalve. Sanchez. Baquero. (2018). Evaluación de las propiedades físico-mecánicas de paneles reforzados con fibras de caña brava. INGE CUC, vol. 14, no. 1, Pp. 66-74, 2018. DOI: http://doi.org/10.17981/ingecuc.14.1.2018.06
(42) Mora Rodríguez, L., Álvarez Garcia, E., & Hernández González, J. R. (2009). Determinación de propiedades mecánicas de las fibras de Bambusa Vulgaris a utilizar en tableros prensados. Revista ingeniería de construcción, 24(2), 153-166.
(43) Niaz Majid. Bakar Abu. Shahid Muhammad. Majeed Khaliq. Fadzly Khairul. Farhani Nur. Rafi Muhammad. (2017). Kenaf-Biocomposites: Manufacturing, characterization and applications. Green Biocomposites. Manufacturing and properties. (Pp. 225-254). Springer.
(44) Praveen, K. M., Thomas, S., Grohens, Y., Mozetič, M., Junkar, I., Primc, G., & Gorjanc, M. (2016). Investigations of plasma induced effects on the surface properties of lignocellulosic natural coir fibres. Applied Surface Science, 368, 146-156.
(45) Raju. Shanmugaraja. (2020). Recent researches in fiber reinforced composite materials: A review. Materials Today: Proceedings. In Press. Recuperado de: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320308920
(46) Ramírez Colorado y Triana Arroyave. (2017). Caracterización de un material compuesto matriz termoestable reforzado con fibra de guadua. Tesis de Pregrado. Recuperado de http://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/6505.
(47) Rodríguez Lady. Fangueiro Raúl. Orrego Carlos (2015). Efecto de tratamientos químicos y de plasma DBD en las propiedades de fibras seudo tallo de plátano. Revista latinoamericana de metalurgia y materiales. 35(2). Pp. 295-304. ISSN 2244-7113.
(48) Ruiz Villán, Lorena. (2017). Valorización del aceite de ricino en química de polímeros: Síntesis de poliésteres y poliuretanos a partir de heptanal. Tesis doctoral. Universitat Rovira i Virgili. Recuperado de https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=226825
(49) Sánchez. Patiño. Cardenas. (2020). Physical-mechanical properties of Bamboo fibers-reinforced biocomposites: Influence of surface treatment of fibers. Journal of building engineering. Recuperado de: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710219307776.
(50) Smith William. Hashemi Javad. (2004). Materiales compuestos. Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. México. The McGraw-Hill Companies, Inc.

(51) Suarez Castañeda, J. L., Restrepo Montoya, J. W., & Quinchía Figueroa, A. (2017). Fibras vegetales colombianas como refuerzo en compuestos de matriz polimérica. Tecnura, 21(51), 57-66.
(52) Sebnem Sargin. Ekinhan. Onur. Buket. Mehmet. Serdal. (2016). Utilization of Arundo donax in hot mix asphalt as a fiber. Recuperado de https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061816314106
(53) Singh Brajeshwar. Gupta Manorama, (2005). Natural Fiber composites for building applications. Natural Fiber-Based Biocomposites. Green Biocomposites: Manufacturing and properties. (Pp. 272-301). Springer International Publishing.
(54) Sood Mohit, Dwivedi Guarav. Effect of fiber treatment on flexural properties of natural fiber reinforced composites: A review. Egyptian journal of petroleum. Vol 27. Pp 775-783. Recuperado de: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110062117301939
(55) Valero. Ortegón. Uscategui. (2011). Biopolímeros: avances y perspectivas. DYNA, Vol. 80, Número 181, Pp. 171-180, 2013. ISSN electrónico 2346-2183. ISSN impreso 0012-7353. Recuperado de https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/20642/45329
(56) Valero. Pulido. Ramírez. Camargo. Navas. (2011). Caracterización físico-mecánica, térmica y morfológica de polímeros de redes interpenetradas con base en poliuretano obtenido a partir de aceite de ricino y almidón modificados. Polímeros [online]. 2011, vol.21, n.4, Pp.293-298. Epub Oct 14, 2011. ISSN 0104-1428. http://dx.doi.org/10.1590/S0104-14282011005000050. Recuperado de http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-14282011000400009&script=sci_abstract&tlng=es
(57) Velásquez Restrepo. Peláez Arroyave. Giraldo Vásquez. (2015). Uso de fibras vegetales en materiales compuestos de matriz polimérica: una revisión con miras a su aplicación en diseño de nuevos productos. Informador Técnico. Centro Nacional de asistencia Técnica en la Industria (ASTIN-SENA). Vol. 80(1), 77-86. Recuperado de https://dialnet.unirioja.es/revista/13110/V/80.
(58) Vidaud, E., & Vidaud, I. N. (2016). Ultrasonido: Aplicación para la determinación del módulo de elasticidad dinámico. Construcción y tecnología en concreto, 31-35.
(59) Wrobel-Kwiarkowska Magdalena. Kropiwnicki Mateusz. Rymowicz Waldemar. (2017). Green Biodegradable Composites Based on Natural Fibers. (Pp. 283-295). Scrivener Publishing.
(60) Zhang Longhe. Zhong Jing, Ren Xiaofeng, (2017). Natural Fiber-Based Biocomposites. Green Biocomposites: Manufacturing and properties. (Pp. 31-70). Springer International Publishing.

Apéndices

Anexo 1. Gráficas efectos principales e interacción para propiedades físicas

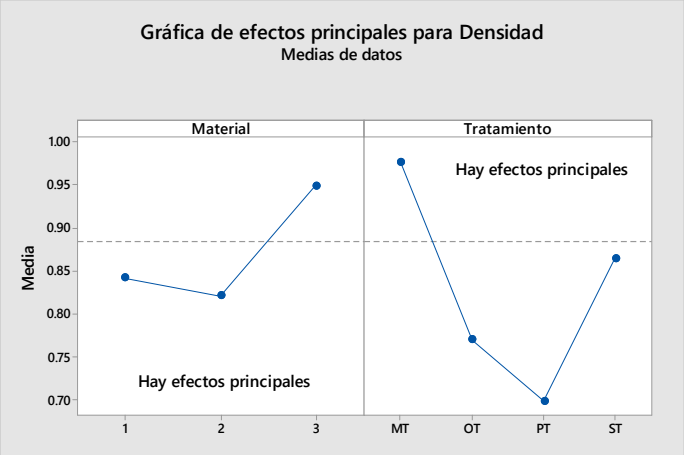

Figura 56. Gráfica de efectos principales para Densidad.
Fuente: Elaboración propia.

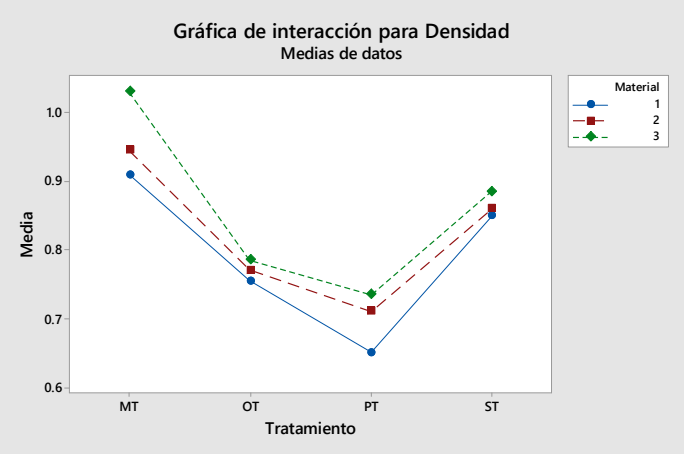

Figura 57. Gráfica de interacción para Densidad.
Fuente: Elaboración propia.

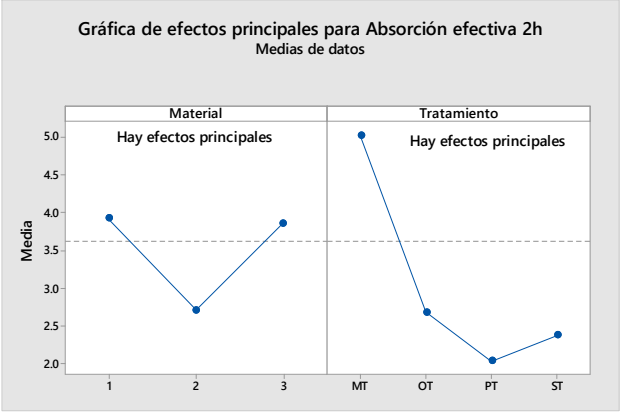

Figura 58. Gráfica de efectos principales para absorción efectiva 2h.
Fuente: Elaboración propia.

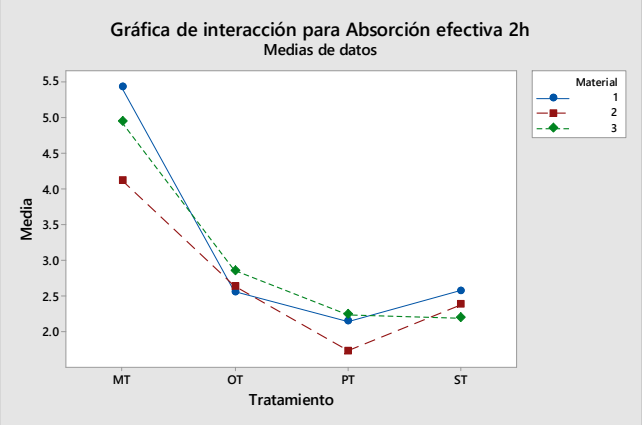

Figura 59. Gráfica de interacción para absorción efectiva 2h.
Fuente: Elaboración propia.

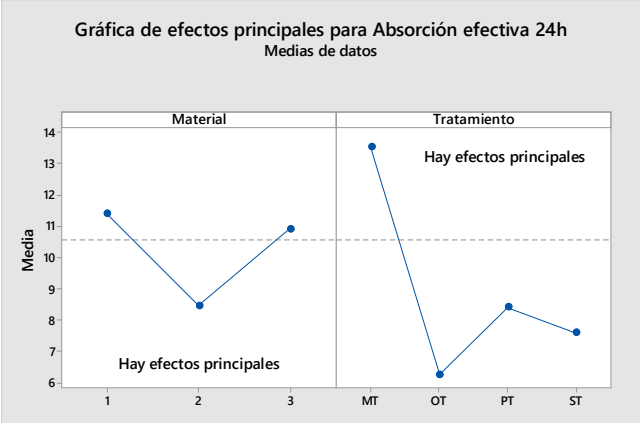

Figura 60. Gráfica efectos principales de absorción efectiva 24h.
Fuente: Elaboración propia

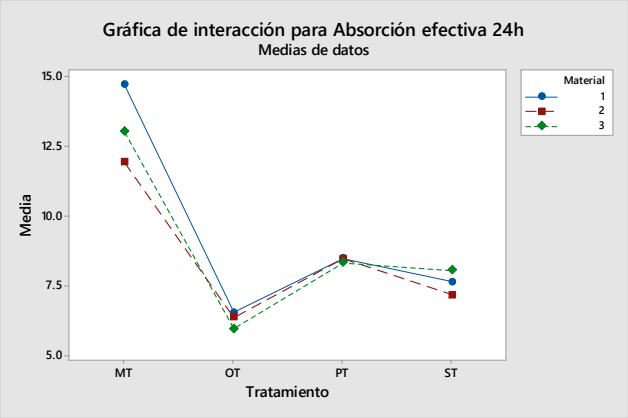

Figura 61. Gráfica de interacción para absorción efectiva 24h.
Fuente: Elaboración propia

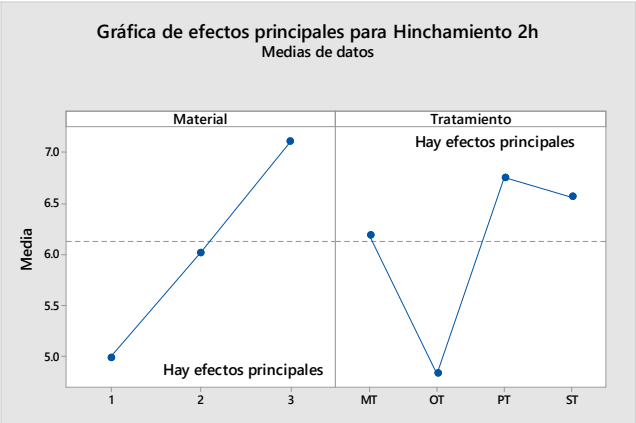

Figura 62. Gráfica de efectos principales para hinchamiento 2h.
Fuente: Elaboración propia.

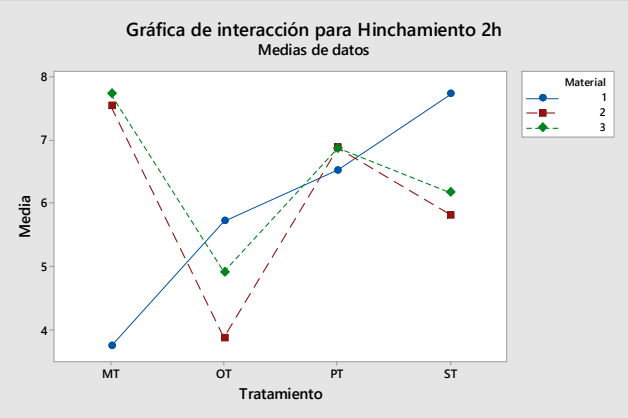

Figura 63. Gráfica de interaccion para hinchamiento 2h.
Fuente: Elaboración propia.

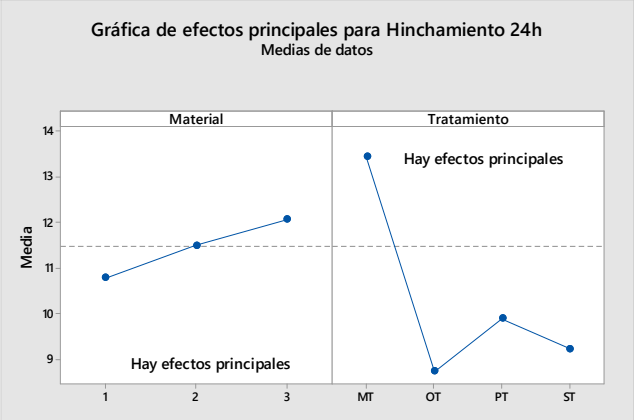

Figura 64. Gráfica de efectos principales para hinchamiento 24h.
Fuente: Elaboración propia.

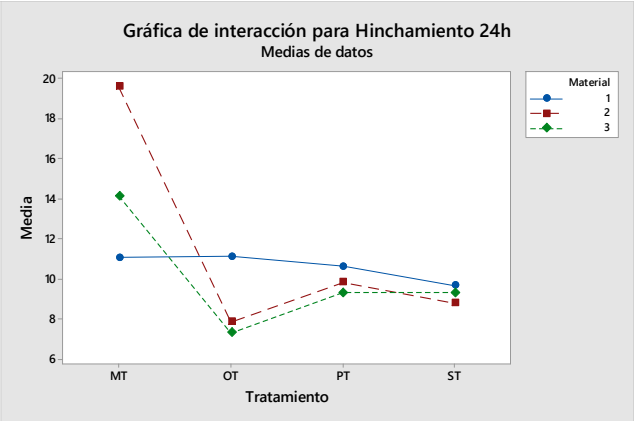

Figura 65. Gráfica de interaccion para hinchamiento 24h.
Fuente: Elaboración propia.

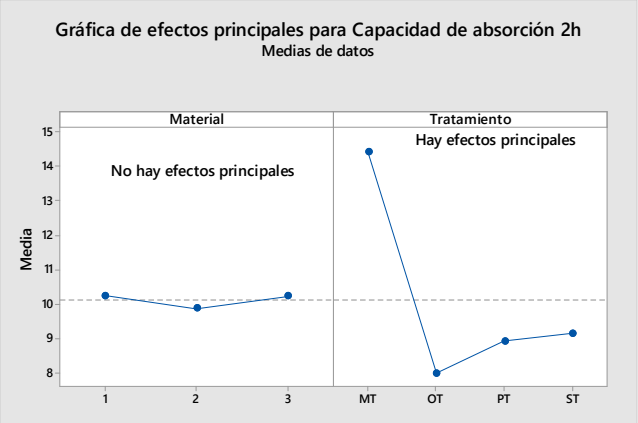

Figura 66. Gráfica de efectos principales para capacidad de absorción 2h.
Fuente: Elaboración propia.

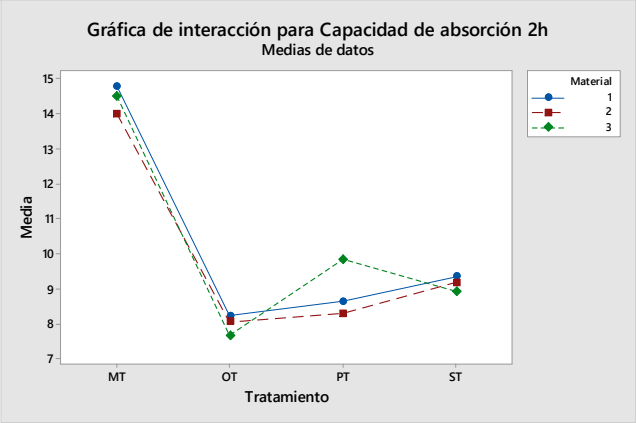

Figura 67. Gráfica de probabilidad para capacidad de absorción 2h.
Fuente: Elaboración propia.

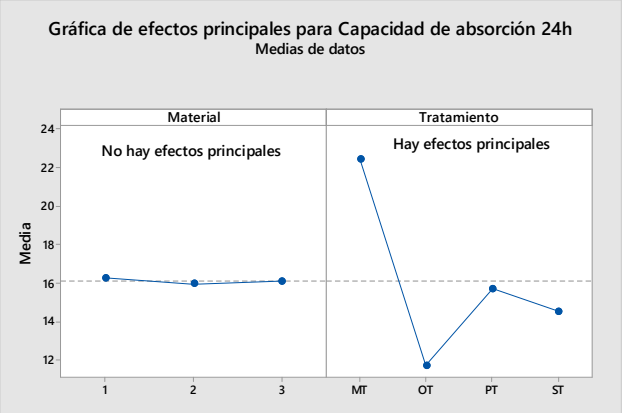

Figura 68. Gráfica de efectos principales para capacidad de absorción 24h.
Fuente: Elaboración propia.

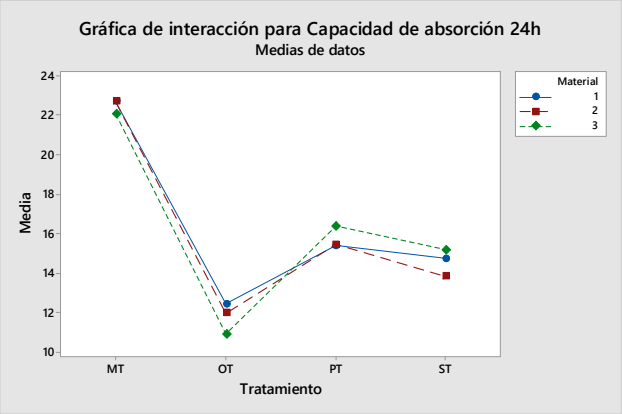

Figura 69. Gráfica de interacción para capacidad de absorción 24h.
Fuente: Elaboración propia.

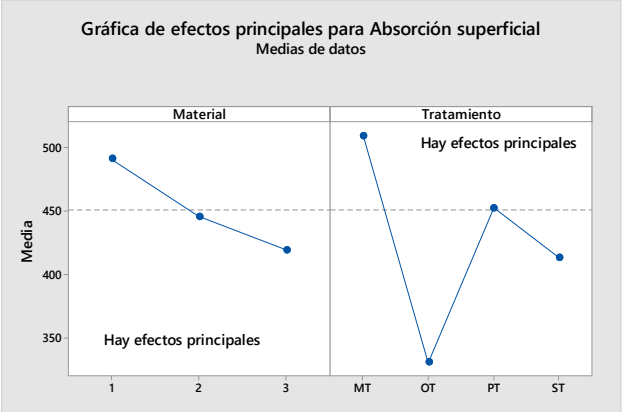

Figura 70. Gráfica de efectos principales para absorción superficial.
Fuente: Elaboración propia.

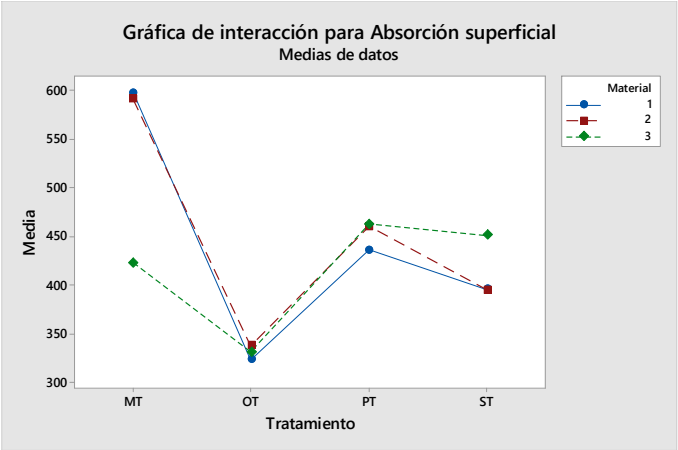

Figura 71. Gráfica de interacción para absorción superficial.
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2. Gráficas probabilidad y valores atìcos para propiedades físicas

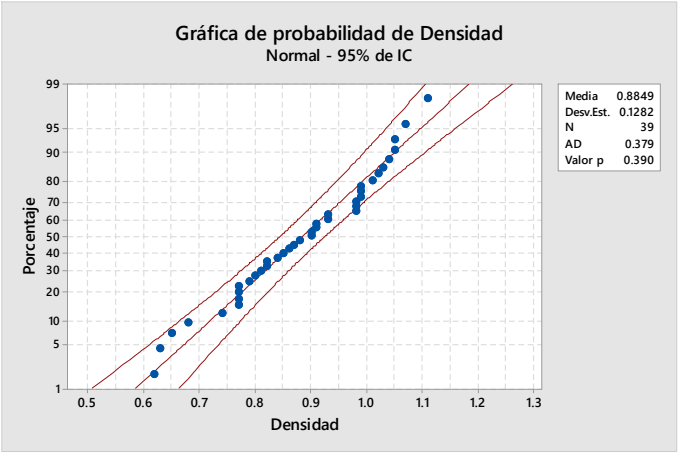

Figura 72. Gráfica de probabilidad de Densidad.
Fuente: Elaboración propia.

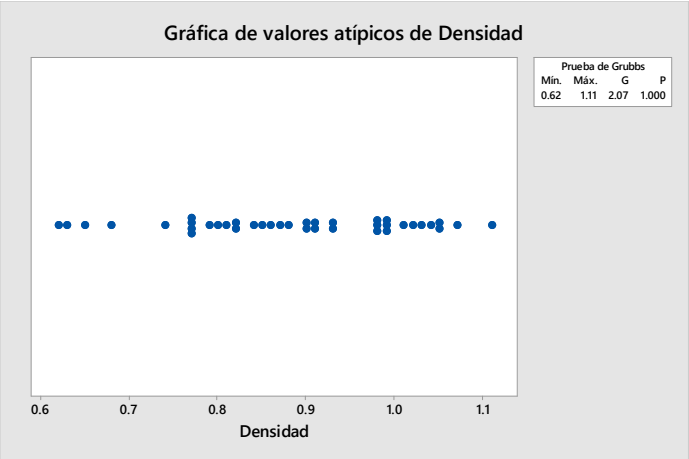

Figura 73. Gráfica de valores atípicos de Densidad.
Fuente: Elaboración propia.

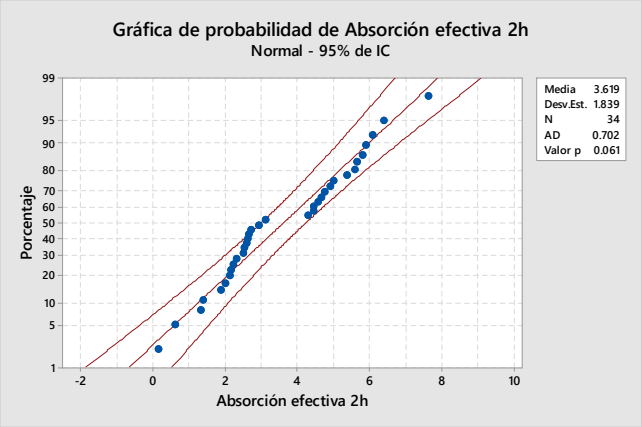

Figura 74. Gráfica de probabilidad de absorción efectiva 2h.
Fuente: Elaboración propia

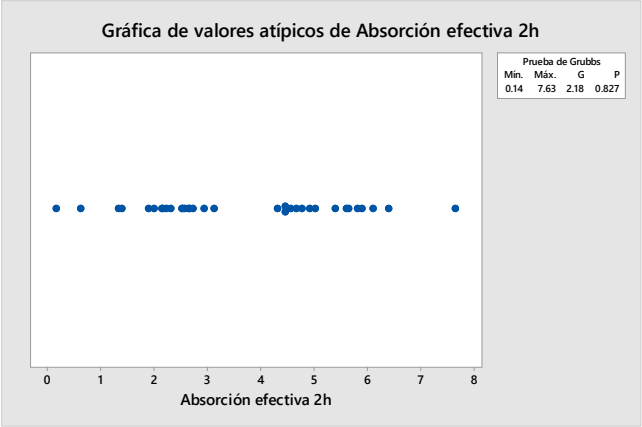

Figura 75. Gráfica de valores atipicos de absorción efectiva 2h.
Fuente: Elaboración propia

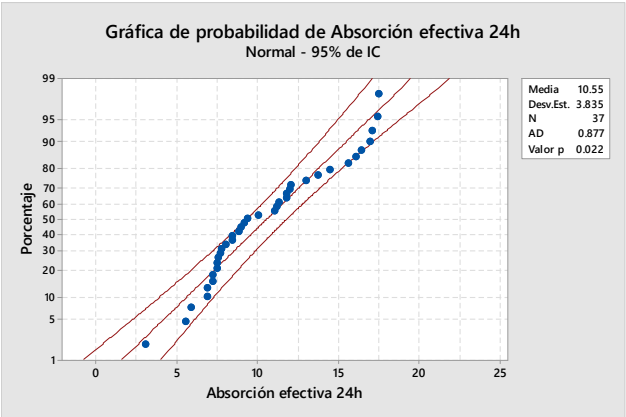

Figura 76. Gráfica de probabilidad para absorción efectiva 24h.
Fuente: Elaboración propia

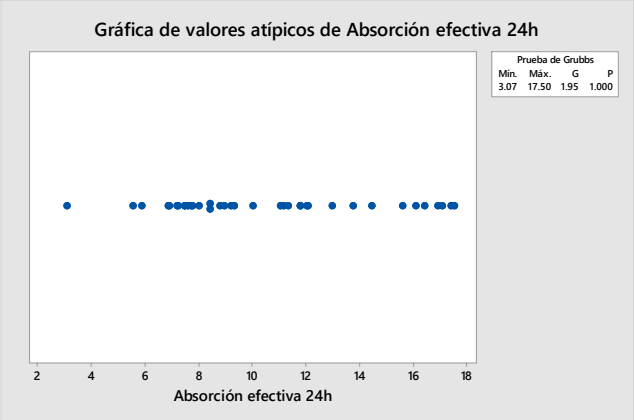

Figura 77. Gráfica de valores atípicos de absorción efectiva 24h.
Fuente: Elaboración propia

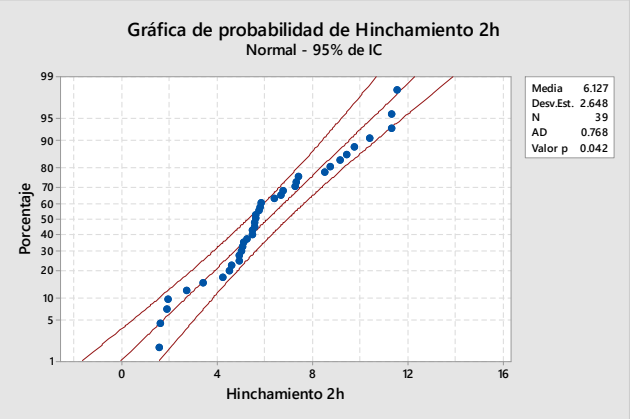

Figura 78. Gráfica de probabilidad de hinchamiento 2h.
Fuente: Elaboración propia.

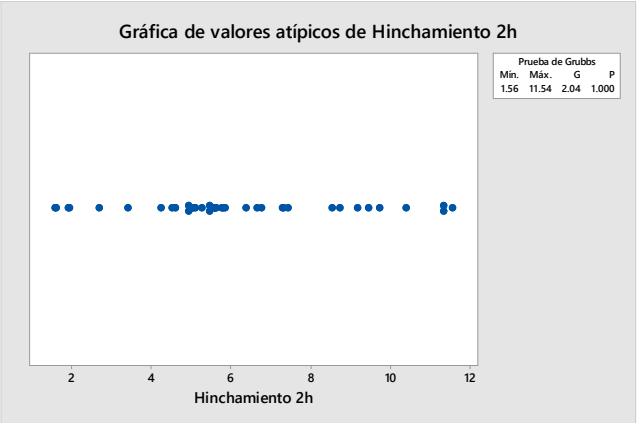

Figura 79. Gráfica de valores atipicos de hinchamiento 2h.
Fuente: Elaboración propia.

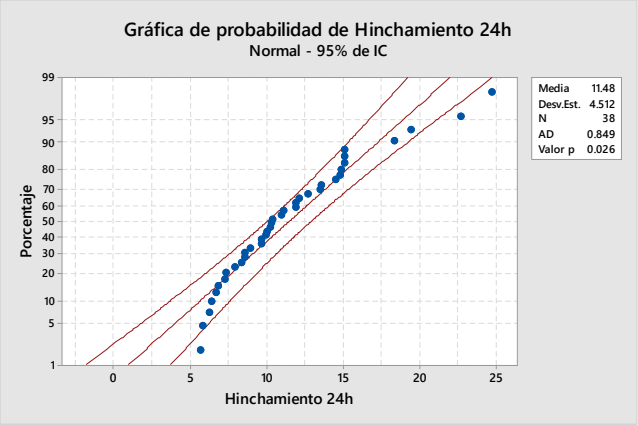

Figura 80. Gráfica de probabilidad de hinchamiento 24h.
Fuente: Elaboración propia.

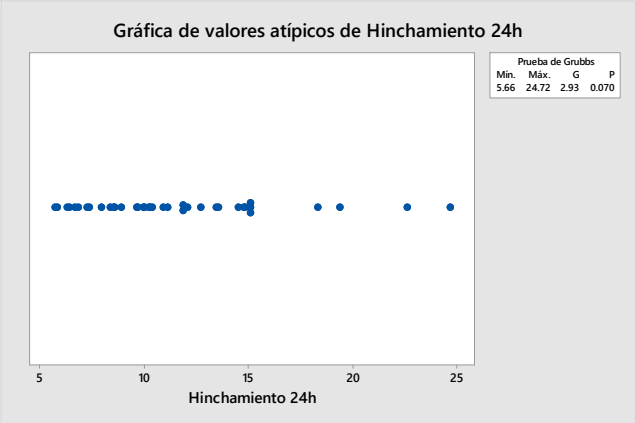

Figura 81. Gráfica de valores atipicos de hinchamiento 24h.
Fuente: Elaboración propia.

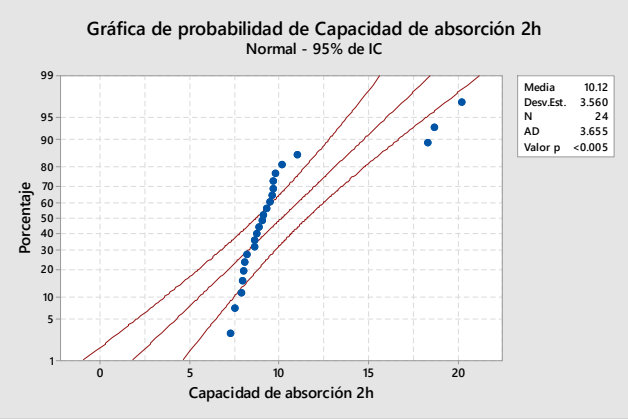

Figura 82. Gráfica de probabilidad de capacidad de absorción 2h.
Fuente: Elaboración propia.

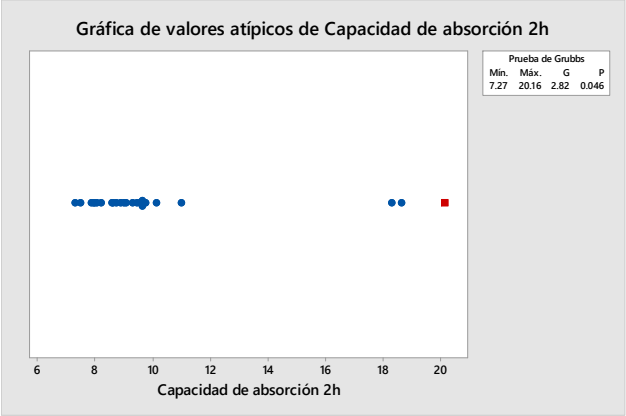

Figura 83. Gráfica de valores atipicos de capacidad de absorción 2h.
Fuente: Elaboración propia.

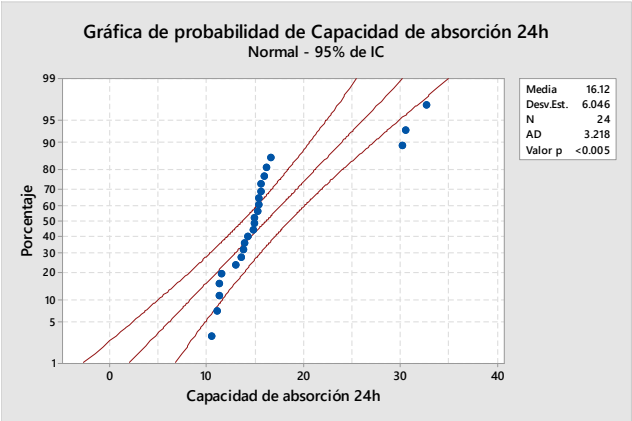

Figura 84. Gráfica de probabilidad para capacidad de absorción 24h.
Fuente: Elaboración propia

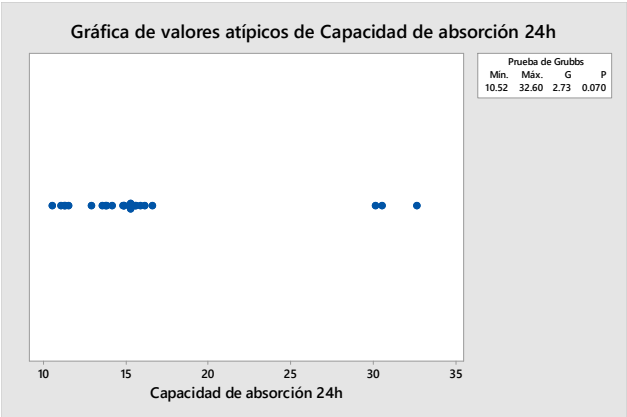

Figura 85. Gráfica de valores atípicos de capacidad de absorción 24h.
Fuente: Elaboración propia

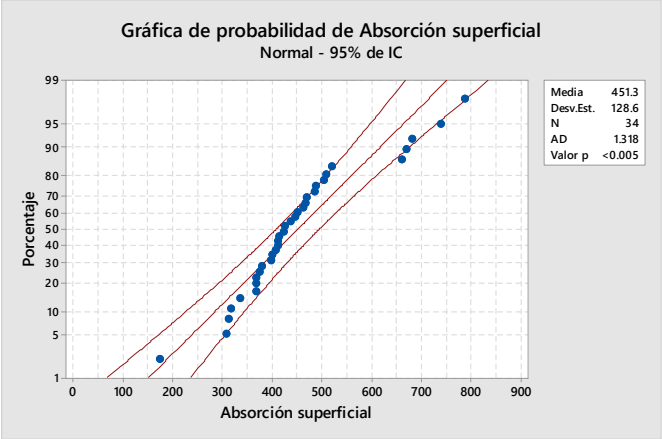

Figura 86. Gráfica de probabilidad de absorción superficial.
Fuente: Elaboración propia.

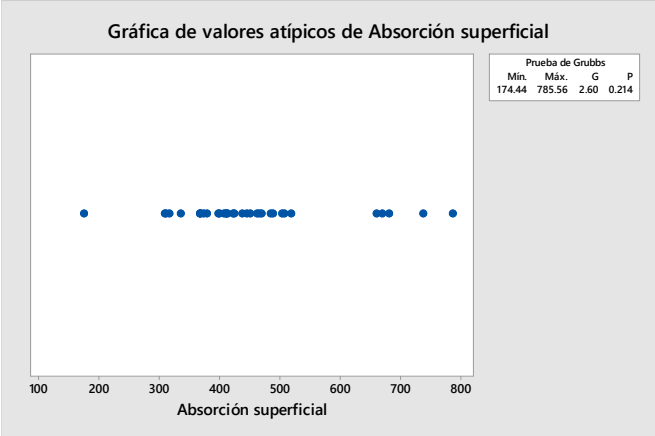

Figura 87. Gráfica de valores atipicos de absorción superficial.
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 3. Gráficas efectos principales e interacción para propiedades mecánicas

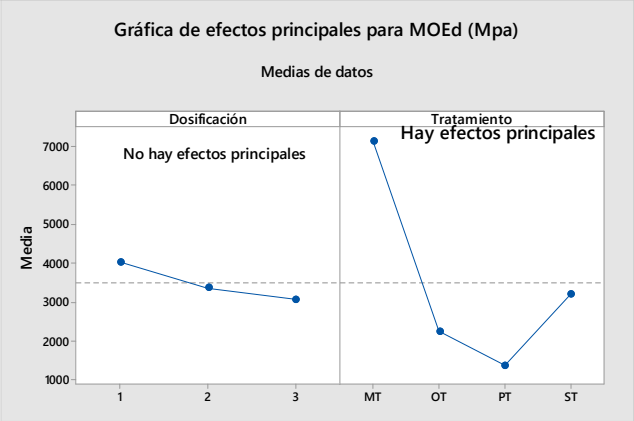

Figura 88. Gráfica de efectos principales para modulo de elasticidad aparente.
Fuente: Elaboración propia.

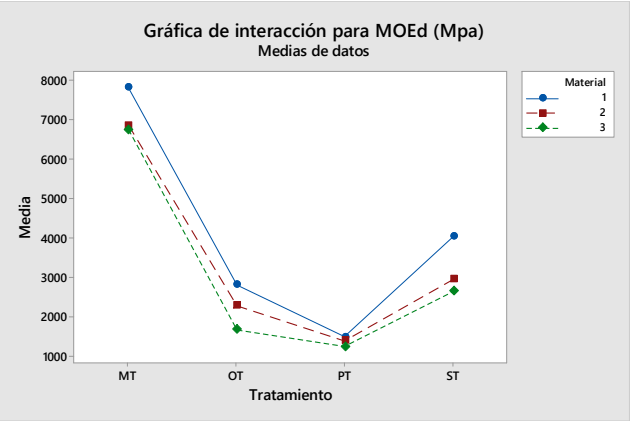

Figura 89. Gráfica de interaccion para modulo de elasticidad aparente.
Fuente: Elaboración propia.

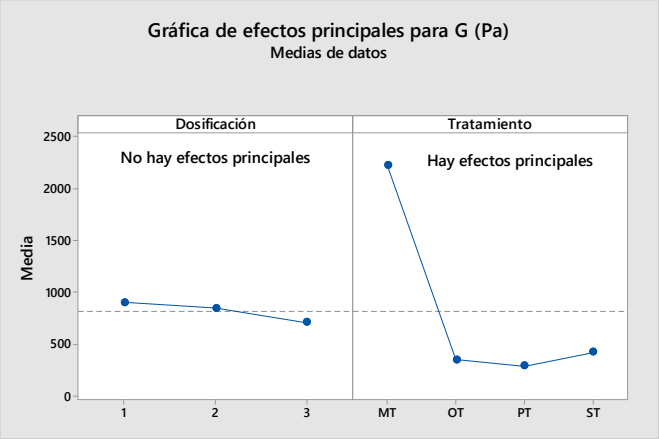

Figura 90. Gráfica de efectos principales de modulo de cortante.
Fuente: Elaboración propia

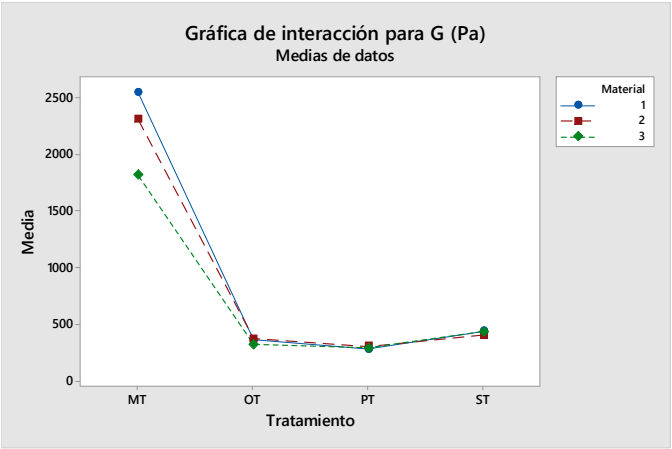

Figura 91. Gráfica de interaccion de modulo de cortante.
Fuente: Elaboración propia

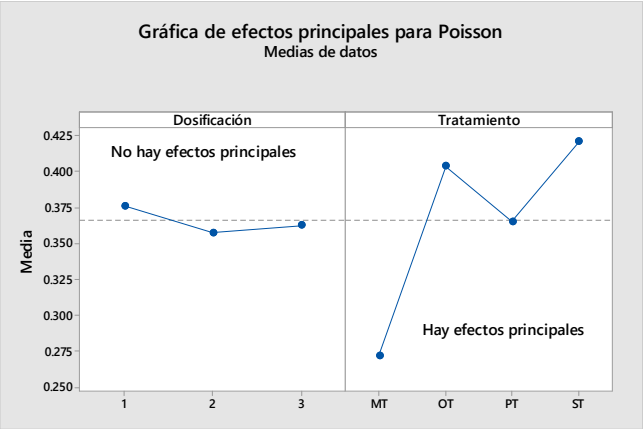

Figura 92. Gráfica de efectos principales para Coeficiente de Poisson.
Fuente: Elaboración propia

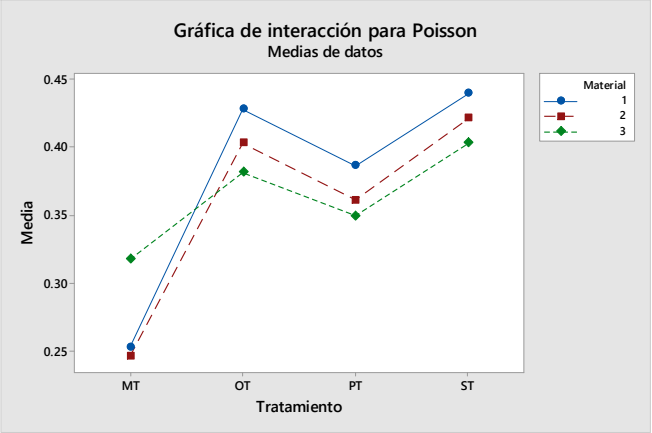

Figura 93. Gráfica de interaccion para Coeficiente de Poisson.
Fuente: Elaboración propia

Anexo 4. Gráficas efectos probabilidad y valores atípicos para propiedades mecánicas

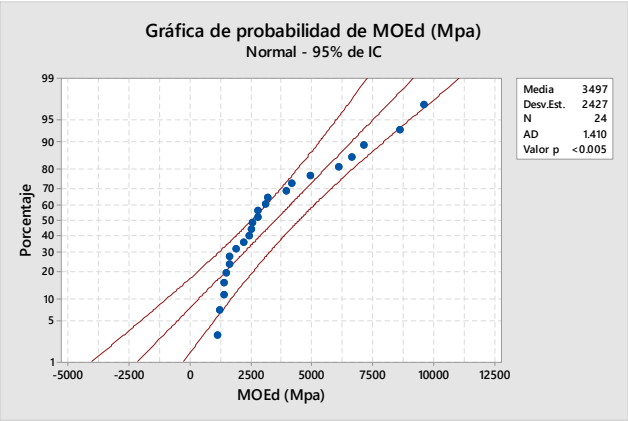

Figura 94. Gráfica de probabilidad de modulo de elasticidad aparente.
Fuente: Elaboración propia.

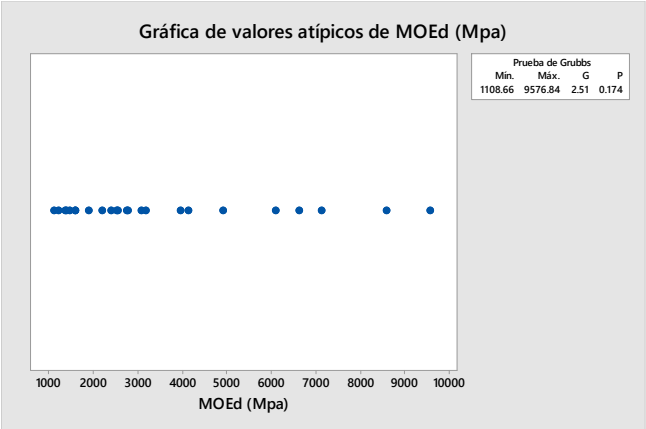

Figura 95. Gráfica de valores atipicos de modulo de elasticidad aparente.
Fuente: Elaboración propia.

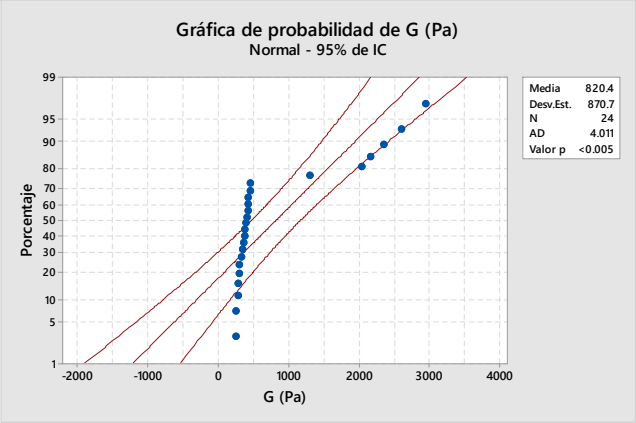

Figura 96. Gráfica de probabilidad de modulo de cortante.
Fuente: Elaboración propia

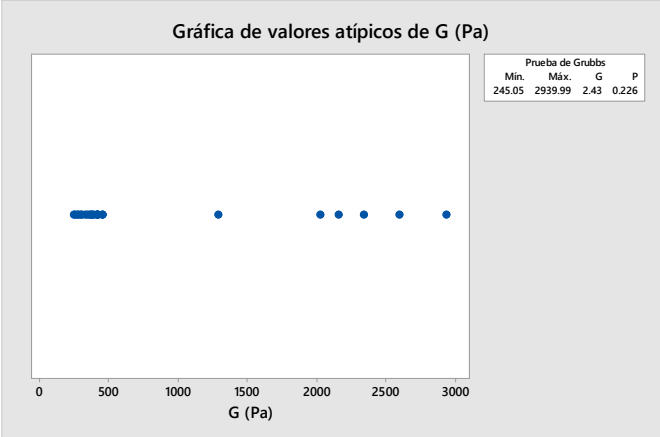

Figura 97. Gráfica de valores atipicos de modulo de cortante.
Fuente: Elaboración propia

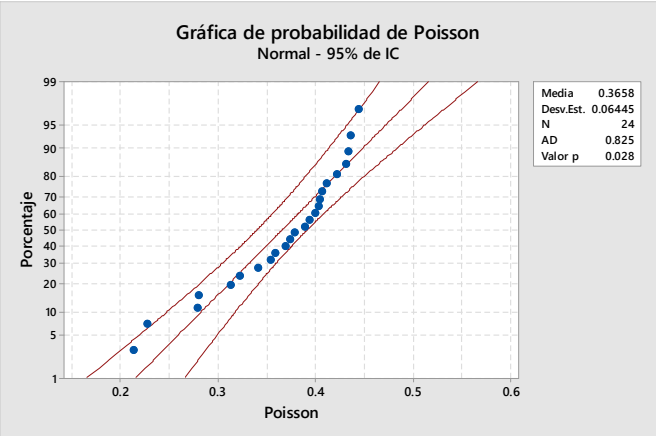

Figura 98. Gráfica de probabilidad de Coeficiente de Poisson.
Fuente: Elaboración propia

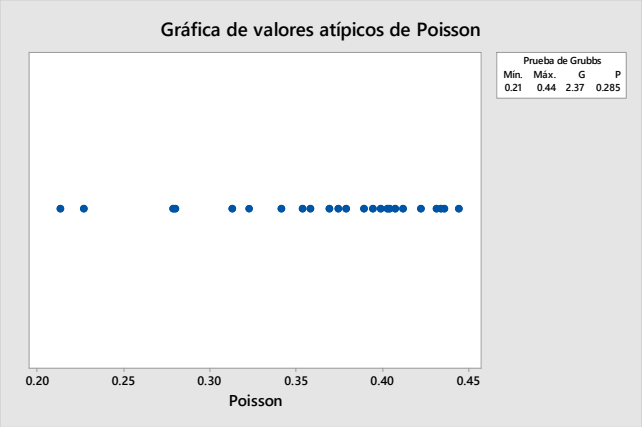

Figura 99. Gráfica de valores atipicos de Coeficiente de Poisson.
Fuente: Elaboración propia