

	GESTIÓN DE SERVICIOS ACADÉMICOS Y BIBLIOTECARIOS	CÓDIGO	FO-GS-15
		VERSION	02
	ESQUEMA HOJA DE RESUMEN	FECHA	03/04/2017
		PÁGINA	1 de 1
ELABORÓ	REVISÓ	APROBÓ	
Jefe División de Biblioteca	Equipo Operativo de Calidad	Líder de Calidad	

RESUMEN TRABAJO DE GRADO

AUTOR(ES): NOMBRES Y APELLIDOS COMPLETOS

NOMBRE(S): Ingrid Yuliani

APELLIDOS: Contreras Atuesta

FACULTAD: Ciencias Básicas

PLAN DE ESTUDIOS: Química Industrial

DIRECTOR

NOMBRE(S): Edwin Alberto

APELLIDOS: Murillo Ruiz

TÍTULO DEL TRABAJO (TESIS): Evaluación de un polipropileno funcionalizado con un poliéster altamente ramificado maleinizado, como agente de acoplamiento para materiales compuestos de polipropileno reciclado y celulosa de la cascarilla de arroz

RESUMEN. En el presente trabajo, fueron preparados materiales compuestos a partir de polipropileno reciclado (PPr) y celulosa de la cascarilla de arroz (Cel) empleando como agente de acoplamiento un polipropileno funcionalizado con un poliéster polioliol altamente ramificado maleinizado (PP-g-MHBP). Por otra parte, para evaluar las propiedades estructurales, térmicas, reológicas, morfológicas y mecánicas de los materiales se realizaron los siguientes análisis: infrarrojo, difracción de rayos X, termogravimétrico, calorimetría de barrido diferencial, reológico, microscopia de barrido electrónico, absorción de humedad, absorción de agua y espesor de hinchamiento, índice de fluidez, dureza, resistencia al impacto, tracción y conductividad térmica. La Cel redujo la cristalinidad del PPr, pero el PP-g-MHBP no afectó apreciablemente las fases cristalinas del PPr y la Cel. La cristalinidad, la adhesión interfacial, la resistencia al impacto y la conductividad térmica de las mezclas, incrementaron con el contenido de PP-g-MHBP. Además, el PP-g-MHBP también mejoró la estabilidad térmica y actuó como agente plastificante, y acoplante para las mezclas de PPr/Cel. La mejor interacción entre el PPr y la Cel fue obtenida empleando un 20 % del PP-g-MHBP. Además, el módulo elástico, la fuerza tensil y la elongación a la ruptura no mostraron una dependencia con el contenido de PP-g-MHBP.

PALABRAS CLAVES: Polipropileno reciclado, Celulosa Cristalina, materiales compuestos, acoplamiento, propiedades.

CARACTERÍSTICA: PÁGINAS: 157 PLANOS: ILUSTRACIONES: CD ROOM:

**EVALUACIÓN DE UN POLIPROPILENO FUNCIONALIZADO CON UN
POLIÉSTER ALTAMENTE RAMIFICADO MALEINIZADO, COMO AGENTE DE
ACOPLAMIENTO PARA MATERIALES COMPUESTOS DE POLIPROPILENO
RECICLADO Y CELULOSA DE LA CASCARILLA DE ARROZ**

INGRID YULIANI CONTRERAS ATUESTA

Universidad Francisco de Paula Santander

Facultad de ciencias básicas

Programa académico de química industrial

San José de Cúcuta

2023

**EVALUACIÓN DE UN POLIPROPILENO FUNCIONALIZADO CON UN
POLIÉSTER ALTAMENTE RAMIFICADO MALEINIZADO, COMO AGENTE DE
ACOPLAMIENTO PARA MATERIALES COMPUESTOS DE POLIPROPILENO
RECICLADO Y CELULOSA DE LA CASCARILLA DE ARROZ**

INGRID YULIANI CONTRERAS ATUESTA

*Proyecto de grado sometido al Comité Curricular de Química Industrial por “Ingrid
Yuliani Contreras Atuesta”, como requisito parcial para obtener el título de Químico
Industrial*

**Director del proyecto: Edwin Alberto Murillo Ruiz; Químico; Magister en Ciencias
Químicas; Doctor en Ciencias Químicas; Director del Grupo de Investigación en
Materiales Poliméricos (GIMAPOL)**

Universidad Francisco de Paula Santander

Facultad de ciencias básicas

Programa académico de química industrial

San José de Cúcuta

2023



**PROGRAMA QUIMICA INDUSTRIAL
ACTA DE SUSTENTACION DE TRABAJO DE GRADO**

FECHA: 22 de marzo de 2023
HORA: 8:00 am
LUGAR: Sala híbrida 305 - Edificio de Posgrados
TITULO DEL TRABAJO DE GRADO: "EVALUACIÓN DE UN POLIPROPILENO FUNCIONALIZADO CON UN POLIÉSTER ALTAMENTE RAMIFICADO MALEINIZADO, COMO AGENTE DE ACOPLAMIENTO PARA MATERIALES COMPUESTOS DE PP RECICLADO Y CELULOSA DE LA CASCARILLA DE ARROZ"
MODALIDAD: Trabajo de investigación
JURADOS EVALUADORES: Dra. Sonia Esperanza Reyes Gómez
M.Sc. John Wilmer Parra Llanos
DIRECTOR: Dr. Edwin Alberto Murillo Ruíz

Nombre(s) del(los) estudiante(s)	Código(s)	Nota	
		Número	Letra
INGRID YULIANI CONTRERAS ATUESTA	1950020	5,0	Cinco

RESULTADO DE LA EVALUACIÓN:

Reprobado () Aplazado () Aprobado ()
Meritorio () Laureado ()

FIRMA DE LOS JURADOS:

Sonia Reyes John Parra Ll.
SONIA ESPERANZA REYES GÓMEZ JOHN WILMER PARRA LLANOS

Vo. Bo.:

Juan Felipe Lopez Giraldo
JUAN FELIPE LOPEZ GIRALDO
Director Programa Química Industrial

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de grado fue realizado gracias al esfuerzo, dedicación y compromiso por parte del autor y su director, asimismo, también no hubiese sido posible de llevarse a ejecución sin la cooperación de cada una de las personas que se mencionaran a continuación, las cuales han sido un apoyo muy importante en los momentos más difíciles, de angustia y desesperanza.

Primero que nada, dar gracias a Dios por el privilegio de la vida, por la protección con su compañía, la valentía, la inteligencia y la capacidad de afrontar cada día diversos obstáculos. Así mismo, agradecerle por colocar en mi camino personas que han sido para mí como un ángel en el sendero los cuales fueron un gran apoyo y compañía durante el recorrido de esta carrera realizada fortaleciéndome y creciendo hasta convertirme en la gran profesional que soy y seré.

Agradecer siempre a mis padres y hermana por el apoyo, amor, cariño, la paciencia y felicidad que me han brindado. A mi padre por sus valiosos consejos y por enseñarme a ver siempre el lado positivo de las cosas y a mi mamá y hermana por darme la motivación de seguir adelante.

A los miembros del grupo de investigación en materiales poliméricos (GIMAPOL) a su director, el Ph D. Edwin Alberto Murillo Ruiz por darme la iniciativa y sugerirme este tema de investigación, la comprensión, la paciencia y el apoyo en todo momento en el transcurso de la elaboración de este. También a la Tecnól. Química Rosa Cantillo por su compañía en este proyecto, su colaboración, su amistad y su conocimiento para la ejecución de este.

A la profe Rosa Virginia Hernández por sus aportes y conocimiento en este trabajo en la parte de la elaboración del diseño experimental y parte estadística

A los miembros del jurado la Dra Sonia Esperanza Reyes y el M.Sc. John Wilmer Parra por la revisión del documento y sus aportaciones al mejoramiento del mismo.

Al equipo del laboratorio (Profe Ascensión Acevedo, Ing. María Eugenio Moreno, los Technol. en Química Myriam Carvajal, Gloria Medina, Yolanda Mejía, Guillermo Niño y Joel vera) y jefe del departamento de química (Profesor Juan maría torres) de la universidad Francisco de Paula Santander por darme la oportunidad de crecer, aprender y formarme a partir de la beca trabajo que realice durante 4 años que me permitió desarrollar mis capacidades y conocimientos para implementarlos en la formación como Químico Industrial.

Y a todos mis amigos, pareja y mejores amigas quienes me acompañaron, motivaron y me dieron su buena energía en todo este camino que recorrí para ser la profesional que soy hoy en día, su buena energía y exaltación que siempre me han dado ha sido para mí un pilar fundamental en la formación que recibí para ser químico industrial.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
3.	JUSTIFICACIÓN	8
4.	MARCO REFERENCIAL	12
4.1.	ESTADO DEL ARTE	12
4.2.	MARCO TEÓRICO	16
4.2.1.	PP	16
4.2.2.	Funcionalización de las poliolefinas	18
4.2.3.	Fibras naturales	20
4.2.4.	CA	21
4.2.5.	Materiales compuestos de fibras naturales	22
4.2.6.	Economía circular	24
4.2.7.	Análisis de ciclo de vida (LCA)	27
4.2.8.	ANOVA	27
4.3.	MARCO CONCEPTUAL	30
4.3.1.	Agentes de acoplamiento.	30
4.3.2.	Análisis multivariante.	30
4.3.3.	Compatibilización.	30
4.3.4.	Cradle to Cradle (C2C).	30
4.3.5.	Cradle to Grave.	30
4.3.6.	Distribución normal.	31
4.3.7.	Elongación a la ruptura.	31
4.3.8.	Fuerza ténsil.	31
4.3.9.	Funcionalización.	31
4.3.10.	Hipótesis nula (H_0).	32
4.3.11.	Hipótesis alternativa (H_a o H_1).	32
4.3.12.	Hipótesis operacional.	32
4.3.13.	Hipótesis estadística.	32
4.3.14.	Intersección.	32
4.3.15.	Material compuesto.	33
4.3.16.	Medias marginales	33
4.3.17.	Modelo ANOVA de efectos fijos	33
4.3.18.	Modelo ANOVA de efectos aleatorios	33

4.3.19.	Modelo corregido	33
4.3.20.	Modulo ténsil o tracción	34
4.3.21.	Objetivos de desarrollo sostenible	34
4.3.22.	Prueba de los efectos inter-sujetos	34
4.3.23.	Prueba F	34
4.3.24.	Reciclar	35
4.3.25.	Relleno	35
4.3.26.	Reducir	35
4.3.27.	Reutilizar	35
4.3.28.	Variable	36
4.3.29.	Variable dependiente	36
4.3.30.	Variable independiente	36
4.3.31.	Variable métrica o cuantitativas	36
4.3.32.	Variable no métrica o cualitativas	36
4.3.33.	Varianza de error	37
4.4.	MARCO LEGAL	37
4.4.1.	Legislación internacional	37
4.4.1.1.	Convenios internacionales	37
4.4.2.	Legislación nacional	39
5.	OBJETIVOS	40
5.1.	Objetivo General	40
5.2.	Objetivos específicos	40
6.	METODOLOGÍA	41
6.1.	DISEÑO EXPERIMENTAL	41
6.2.	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	41
6.2.1.	Materiales	41
6.2.2.	Preparación de los materiales	42
6.2.3.	Caracterización de los materiales	45
7.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	49
7.1.	Obtención de la Cel	49
7.2.	Análisis granulométrico	49
7.2.	Reometría de torque	50
7.3.	Análisis IR	52
7.4.	DRX	54

7.5.	TGA	56
7.6.	DSC	60
7.7.	Reología	63
7.7.1.	Análisis estático	63
7.7.1.	Energía de activación	65
7.7.2.	Amplitud sweep	68
7.7.3.	Análisis oscilatorio	69
7.7.4.	Comportamiento de G' y G''	70
7.7.5.	Regla de Cox-Merz	72
7.7.6.	Tiempos de relajación	74
7.7.7.	Diagrama de Van Gorp-Palmen	75
7.7.8.	Diagrama de Cole-Cole	76
7.8.	SEM	78
7.9.	AH	80
7.10.	AbA y el EH	82
7.11.	MFI	84
7.12.	Dureza	85
7.13.	Resistencia al impacto	86
7.14.	Tracción	87
7.15.	Conductividad térmica	89
7.16.	Resultados ANOVA	91
7.16.1.	Hipótesis Operacional	91
7.16.2.	Hipótesis Estadística	91
7.16.3.	Análisis de Resultados	91
7.17.	PROTOTIPO	103
8.	CONCLUSIONES	107
9.	PERSPECTIVAS DEL TRABAJO	108
10.	PRODUCCIÓN CIENTÍFICA	109
11.	REFERENCIAS	112

RESUMEN

En el presente trabajo, fueron preparados materiales compuestos a partir de polipropileno reciclado (PPr) y celulosa de la cascarilla de arroz (Cel) empleando como agente de acoplamiento un polipropileno funcionalizado con un poliéster polirol altamente ramificado maleinizado (PP-g-MHBP). Por otra parte, para evaluar las propiedades estructurales, térmicas, reológicas, morfológicas y mecánicas de los materiales se realizaron los siguientes análisis: infrarrojo, difracción de rayos X, termogravimétrico, calorimetría de barrido diferencial, reológico, microscopia de barrido electrónico, absorción de humedad, absorción de agua y espesor de hinchamiento, índice de fluidez, dureza, resistencia al impacto, tracción y conductividad térmica. La Cel redujo la cristalinidad del PPr, pero el PP-g-MHBP no afectó apreciablemente las fases cristalinas del PPr y la Cel. La cristalinidad, la adhesión interfacial, la resistencia al impacto y la conductividad térmica de las mezclas, incrementaron con el contenido de PP-g-MHBP. Además, el PP-g-MHBP también mejoró la estabilidad térmica y actuó como agente plastificante, y acoplante para las mezclas de PPr/Cel. La mejor interacción entre el PPr y la Cel fue obtenida empleando un 20 % del PP-g-MHBP. Además, el módulo elástico, la fuerza ténsil y la elongación a la ruptura no mostraron una dependencia con el contenido de PP-g-MHBP.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estereoquímica de (a) PPI, (b) PPs y (c) PPa.	
Fuente: (TamásBárány;József Karger-Kocsis (1950–2018), 2019)	17
Figura 2. Representación esquemática de la reacción entre el PP y el MHBP para formar el PP-g-MHBP. Fuente: Caicedo and Murillo, 2019	20
Figura 3. Esquema de la estructura química de la Cel.	
Fuente: (Acharya and Chaudhary,2012)	21
Figura 4. CA. Fuente: (Stein and Schemmel, 2020)	22
Figura 5. CA utilizada	43
Figura 6. a) PPr. b) PP-g-MHBP	44
Figura 7. Proceso de obtención de la Cel de CA a partir de la CA	49
Figura 8. a) Curvas de torque vs tiempo. b) Curvas de temperatura vs tiempo	51
Figura 9. a) Espectros de IR de las muestras tratadas y no tratadas de CA, y la Cel.	
b) Espectros de IR de los materiales compuestos de PPr/Cel	53
Figura 10. a) Difractogramas de DRX de la Cel.	
b) Difractogramas del PPr y las mezclas de PPr/Cel	55
Figura 11. Representación esquemática de la interacción entre el PPr, la Cel y el PP-g-MHBP	56
Figura 12. a) Curva de la pérdida de peso vs temperatura.	
b) Curva de la derivada de peso vs temperatura	59
Figura 13. Termogramas de DSC de la Cel, el PPr y las mezclas obtenidas con y sin PP-g-MHBP	61

Figura 14. a) Curvas de flujo a 175°C. b) Curvas de flujo a 180°C.	
c) Curvas de flujo a 190°C. d) Curvas de flujo a 200°C	64
Figura 15. Gráfico de $\ln \eta$ vs $1/T$ del PP-g-MHBP, PPr y las mezclas	66
Figura 16. Gráfico de η vs $\dot{\gamma}$ del PP-g-MHBP, PPr y las mezclas	68
Figura 17. Gráficos de G' y G'' vs. deformación del PPr y las mezclas	69
Figura 18. Gráfico de η^* vs. ω del PPr y las mezclas	69
Figura 19. Comportamiento de G' y G'' con respecto a ω del PPr y las mezclas	72
Figura 20. Gráficos de η^* y η vs $\dot{\gamma}$ y T del PPr y las mezclas	73
Figura 21. Tiempos de relajación	74
Figura 22. Diagrama de Van Gorp-Palmen del PPr y las mezclas	76
Figura 23. Diagrama de Cole-Cole del PPr y las mezclas	78
Figura 24. a) Microscopias obtenidas por SEM a) PPr/Cel10. b) PPr/Cel5.	
c) PPr/Cel10. d) PPr/Cel15 y e) PPr/Cel20	79
Figura 25. Absorción de agua de las muestras	81
Figura 26. Comportamiento de las muestras frente al agua a) AbA y b) EH	83
Figura 27. Comportamiento de las muestras en relación con el MFI	84
Figura 28. Dureza de las muestras obtenidas	85
Figura 29. Comportamiento exhibido por las muestras en relación con	
la resistencia al impacto	87
Figura 30. Ensayos de tracción de las muestras. a) El módulo ténsil,	
b) la fuerza ténsil y c) la elongación a la ruptura	89
Figura 31. Conductividad térmica del PPr y las mezclas	90
Figura 32. Distribución de las η de las muestras a un $\dot{\gamma}$ de 10^{-3} (Pa.s)	97

Figura 33. Diagrama de cajas de las η de las muestras a un $\dot{\gamma}$ de 10^{-3}	102
Figura 34. Medias marginales estimadas de valor del material compuesto	102
Figura 35. a) Prototipo del portavasos o plato pequeño elaborado en GIMAPOL.	
b) Medidas de los diámetros internos y externos del prototipo	104
Figura 36. Aplicación del portavasos o plato pequeño elaborado en GIMAPOL	105
Figura 37. Constancia de participación en el VIII SIMPOSIO DE MATERIALES POLIMERICOS	109
Figura 38. Constancia de participación en IX SEMANA INTERNACIONAL DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN	110
Figura 39. Artículo sometido en el Arabian Journal for Science and Engineering	111

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resultados del análisis granulométrico	50
Tabla 2. Resultados del TGA	60
Tabla 3. Entalpías de fusión y valores de X_{CPE} y X_{CPP}	63
Tabla 4. Valores de E_a , R^2 , η y R_1^2 de las muestras	67
Tabla 5. Prueba de Igualdad de Levene de varianzas de error	94
Tabla 6. Prueba de efectos Inter-sujetos	94
Tabla 7. Sección 1: Medias Marginales explicadas de la Variable Materiales Compuestos hacia la variable dependiente: Valor del Material Compuesto	95
Tabla 8. Sección 1: Medias Marginales explicadas de la Variable Materiales Compuestos hacia la variable dependiente: Valor del Material Compuesto	96
Tabla 9. Sección 1: Comparaciones Múltiples entre la Variable de Procesos y la variable dependiente: Valor del Material Compuesto	97
Tabla 10. Sección 2: Comparaciones Múltiples entre la Variable de Procesos y la variable dependiente: Valor del Material Compuesto	98
Tabla 11. Sección 3: Comparaciones Múltiples entre la Variable de Procesos y la variable dependiente: Valor del Material Compuesto	98
Tabla 12. Sección 4: Comparaciones Múltiples entre la Variable de Procesos y la variable dependiente: Valor del Material Compuesto	99
Tabla 13. Análisis de homogeneidad entre el factor del Mat_Compuesto y el factor de materia	100

Tabla 14. Sección 1: Comparaciones Múltiples entre el factor Cantidad agente acoplamiento

PP-g-MHBP (%) de la variable Materiales Compuestos con la variable dependiente:

Valor del Material Compuesto 100

Tabla 15. Sección 2: Comparaciones Múltiples entre el factor Cantidad agente acoplamiento

PP-g-MHBP (%) de la variable Materiales Compuestos con la variable dependiente:

Valor del Material Compuesto 101

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIMBOLOS

AA: Ácido acrílico

AbA: Absorción de agua

AH: absorción de humedad

AM: Ácido maleico

ANOVA: Análisis de la Varianza

CA: Cascarilla de arroz

CBSA: 4-carboxibencenosulfonil azida

Cel: Celulosa

CONPES: Consejo Nacional de Política Económica y Social

DNP: Plan Nacional de Desarrollo

DRX: Difracción de rayos X

DSC: Calorimetría de barrido diferencial

EH: Espesor de hinchamiento

EPDM-MA: Etileno-propileno-dieno-monómero caucho-anhídrido maleico

FPR: Materiales poliméricos mezclados con fibras naturales

HCl: Ácido clorhídrico

FT-IR: Espectroscopía infrarroja de transformada de Fourier

La: Longitud inicial de la probeta.

Lf: Longitud de la muestra a un tiempo t

M₁: Masa antes de la degradación

M₂: Masa después de la degradación

MFI: Índice de fluidez

MHBP: Poliéster altamente ramificado maleinizado

MPa: Mega pascal

NaOCl: Hipoclorito de sodio

NaOH: Hidróxido de sodio

NFC: Materiales compuestos de fibras naturales

ODS: Objetivos de desarrollo sostenible

PE: Polietileno

PEBD: Polietileno de baja densidad

PEI: Polietilenimina

PEO-g-AM: Polietilenocteno funcionalizado con AM

PP: Polipropileno

PPa: Polipropileno atáctico

PP-g-AM: Polipropileno funcionalizado con anhídrido maleico

PP-g-MHBP: Polipropileno funcionalizado con poliéster poliol altamente ramificado maleinizado

PP-g-M-TM: PP funcionalizado con isocianato de m-isopropenil α - α -dimetil-benzil-

PPi: Polipropileno isotáctico

PPr: Polipropileno reciclado

PPri: Polipropileno reciclado isotáctico

PPs: Polipropileno sindiotáctico

SEBE-g-AM: estireno-etileno-butadieno-estireno funcionalizado con AM

SEM: Microscopía electrónica de barrido

Tf₁: Temperatura de fusión asociado al PEBD

Tf₂: Temperatura de fusión asociado al PP

TGA: Análisis termogravimétrico

Tm₁: Descomposición térmica primaria

Tm₂: Descomposición térmica secundaria

Tmax₁: Temperatura máxima de descomposición primaria

Tmax₂: Temperatura máxima de descomposición secundaria

T10: Degradación del material a un 10% de su contenido total (90%)

T20: Degradación del material a un 20% de su contenido total (80%)

T50: Degradación del material a un 50% de su contenido total (50%)

W₁: Pérdida de masa en porcentaje de las muestras a la Tm₁

W₂: Pérdida de masa en porcentaje de las muestras a la Tm₂

W_r: Porcentaje de residuo

ΔHf₁: Entalpías de fusión asociada a la Tf₁

ΔHf₂: Entalpías de fusión asociada a la Tf₂

X_{CPE}: Porcentaje de cristalinidad asociado al PE

X_{CPP}: Porcentaje de cristalinidad asociado al PP

γ̇: Velocidad de cizalla (1/s)

η: Viscosidad (Pa. s)

ω: Fracuencia angular (Rad/s)

η*: Viscosidad compleja (Pa.s)

G': Modelo de almacenamiento (Pa)

G'': Modelo de perdida (Pa)

λ: Tiempos de relajación (s)

δ : Ángulo de fase ($^{\circ}$)

G^* Modulo complejo (Pa)

η'' : Parte imaginaria de la viscosidad compleja (Pa.s)

η' : Parte real de la viscosidad compleja (Pa.s)

μ : Media poblacional

EVALUACIÓN DE UN POLIPROPILENO FUNCIONALIZADO CON UN POLIÉSTER ALTAMENTE RAMIFICADO MALEINIZADO, COMO AGENTE DE ACOPLAMIENTO PARA MATERIALES COMPUESTOS DE POLIPROPILENO RECICLADO Y CELULOSA DE LA CASCARILLA DE ARROZ

1. INTRODUCCIÓN

El impacto ambiental negativo de los desechos plásticos se ha convertido en un gran problema en todo el mundo, ya que estos no se degradan fácilmente debido a que son resistentes al ataque microbiano y se acumulan en el medio ambiente representando así, una fuente importante de contaminación ambiental. Estos problemas provocados por los residuos sintéticos han despertado el interés de la industria junto con la ciencia a desarrollar nuevos materiales poliméricos mezclados con fibras naturales (FPR), tales como la cascarilla de arroz (CA) siendo estos más amigables con el medio ambiente(Burande et al., 2018).

El arroz (*Oryza sativa L.*) es una fuente primaria de alimentos para miles de millones de personas siendo uno de los principales cultivos del mundo. La CA es un subproducto del procesamiento del arroz, por cada tonelada de arroz producida se derivan alrededor de 0,23 toneladas de CA. Por consiguiente, este se acumula dentro de las industrias arroceras y se opta por utilizarla como relleno de caballerizas o se incinera. La incineración, produce cenizas, humos y gases tóxicos, lo cual genera una grave contaminación del aire(Arjmandi et al., 2015; Europe & EPRO, 2019). Una alternativa eficaz para la reutilización de este desecho orgánico es la producción de FPR a base de CA logrando con esto la biodegradabilidad del material, un peso ligero, tenacidad y resistencia a la intemperie, y también hace que los productos finales sean económicamente más competitivos(Arjmandi et al., 2015).

El polipropileno (PP) es considerado uno de los polímeros más utilizados, este material es semicristalino. El PP se ha utilizado en una amplia gama de aplicaciones, es el segundo termoplástico más vendido en el mundo, debido a características como facilidad de procesamiento, baja densidad, moldeabilidad, resistencia química y bajo costo (da Silva Barbosa Ferreira et al., 2021). Debido a la alta gama de aplicaciones, la producción y el consumo del PP ha estado creciendo a un ritmo vertiginoso. Esto ha creado un flujo de desechos insostenibles e inmanejables, lo que ha desencadenado una grave amenaza ambiental (Karaagac et al., 2021).

El PP reciclado (PPr), se ha convertido en un precursor para optimizar las prácticas de gestión de desechos, reducir la dependencia de los combustibles fósiles y adoptar principios de economía circular en todo el mundo (Karaagac et al., 2021). Sin embargo, el PPr puede sufrir degradación termo-mecánica, termo-oxidativa e inducida por cizallamiento durante la vida útil y mediante el reciclaje mecánico (Gu et al., 2016; Spicker et al., 2019). Una disminución del peso molecular y un deterioro de las propiedades mecánicas provocado por dicha degradación da como resultado una desventaja económica del PPr en comparación con el material virgen. Por ende, las prácticas comunes para mejorar las propiedades de los plásticos reciclados consiste en mezclarlo con varios rellenos, en este caso con rellenos de fibras naturales (Gu et al., 2016; Spicker et al., 2019).

En consecuencia, debido a la baja interacción entre la matriz de PPr y la fibra natural, se requiere el uso de un agente de acoplamiento para mejorar la adherencia interfacial entre los componentes de los materiales compuestos. Así, en este estudio se empleará un PP funcionalizado con un poliéster altamente ramificado maleinizado (PP-g-MHBP), como agente de acoplamiento para materiales compuestos de PPr/Celulosa (Cel). Este material no ha sido empleado como agente de acoplamiento para mezclas de PPr y Cel o de PP con otro polímero hidrofílico (da Silva Barbosa Ferreira et al., 2021).

Así pues, el objetivo principal del presente trabajo es obtener un material compuesto a partir del PPr, Cel extraída de la CA y PP-g-MHBP, y evaluar el efecto del PP-g-MHBP en las propiedades estructurales, térmicas, reológicas, morfológicas, de biodegradabilidad, absorción de agua y mecánicas del material. Así mismo, se evaluarán los resultados obtenidos de acuerdo al diseño experimental empleando un análisis de varianza (ANOVA), el cual permitirá determinar la relación funcional entre la variable del proceso (contenido del PP-g-MHBP) y las características de rendimiento final tales como temperatura de descomposición térmica (T_d), temperaturas de fusión (T_f), entalpías de fusión (ΔH_f), viscosidad compleja (η^*), viscosidad cinemática (η), propiedades mecánicas, dureza, contenido de humedad (CH), absorción de humedad (AH) y conductividad térmica de los materiales compuestos de PPr, Cel de CA y PP-g-MHBP.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En 1950 la producción mundial del plástico fue de 2 millones de toneladas, en 2015 éste valor se incrementó a 380 (Mazhandu et al., 2020). Se estima que para el año 2050, ascenderá a alrededor de 1244 millones de toneladas (López de Dicastillo et al., 2020). El gran problema es que un altísimo porcentaje de estos materiales son derivados de la industria petroquímica, no son biodegradables y perduran en el ambiente por más de 100 años (Heidbreder et al., 2019; João et al., 2020). Por otra parte, de toda la producción mundial de plástico que se ha realizado desde 1950 a 2015, un 12 % fue incinerado y solo un 9 % fue reciclado (Mazhandu et al., 2020). Además, en los últimos años se han arrojado 8 millones de toneladas por año de residuos plásticos a los océanos (Mazhandu et al., 2020). Lo anterior ha causado una gran preocupación mundial de los gobiernos e instituciones protectoras del medio ambiente (Agencia de Protección del Medio Ambiente, Greenpeace, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente,

etc), ya que el manejo que se le ha dado a los residuos está causando un impacto negativo al medio ambiente, tales como incremento del calentamiento global (debido a la producción de gases de efecto invernadero), afectación de la flora (producción de la lluvia ácida) y la fauna (ingesta de plásticos, los plásticos enredan o atrapan a los animales, etc), y a la salud humana (las sustancias químicas pueden afectar la piel, los ojos y producir cambios a largo plazo de los sistemas reproductivos, digestivos, neurológicos y respiratorios)(Greenpeace, 2019; Heidbreder et al., 2019; João et al., 2020). Además, se ha reportado que nueve de diez aves marinas, una de cada tres tortugas marinas y más de la mitad de las especies de ballenas y delfines han ingerido plásticos(Baulch & Perry, 2014; Schuyler et al., 2016).

En Colombia se consumen anualmente alrededor de 1,25 millones de toneladas de plásticos. Además, se generan 12 millones de toneladas de residuos sólidos anuales y solo se recicla el 17 % de estos materiales. Así mismo, el 74 % de los envases son llevados a rellenos sanitarios(Universidad de los Andes & Greenpeace Colombia, 2019). Estas cifras indican que hay muy poca reciclabilidad en nuestro país y baja tendencia a la aplicación de la economía circular en la industria polimérica.

En Norte de Santander existen algunas asociaciones de reciclaje de materiales poliméricos, tales como, Asociación de Recicladores de Cúcuta y su Área Metropolitana, Asociación de Recicladores de Villa del Rosario Arvo, Recicladora Salamanca, Asociación de Recicladores Emprendedores Del Norte de Santander entre otros. Sin embargo, aunque no se tienen una cifra exacta del material reciclado, se presume que esta es muy baja, ya que en este departamento no hay una separación adecuada de los residuos desde los hogares, las empresas recicladoras son muy pocas, algunos de estos materiales son incinerados y gran parte de ellos van a los rellenos sanitarios.

El PP es un plástico ampliamente empleado en la industria, ya que tiene buenas propiedades mecánicas y buena resistencia al agua. Las principales aplicaciones de este material son en interiores de automóviles, muebles, embalajes, sistemas de tuberías, ropa y otros bienes de consumo (T. Huang et al., 2020). Este material es entre los termoplásticos, el segundo de mayor consumo y de descartabilidad en el mundo después del polietileno (Pinzón et al., 2020). En el 2019, en Europa la demanda de este material fue la mayor entre todos los plásticos (alrededor de 10 millones de toneladas) (Europe & EPRO, 2019).

Con el objetivo de disminuir el impacto negativo causado por los residuos poliméricos, una baja proporción de estos materiales están siendo incorporados nuevamente en la cadena productiva. Sin embargo, en muchos casos no tienen las propiedades fisicoquímicas requeridas para cumplir con algunas prestaciones, ya que su reprocesamiento continuo, alta fuerza de cizallamiento y temperatura conduce a una degradación térmica y disminución de las propiedades mecánicas (Orji & McDonald, 2020). Esto hace que sea necesario mezclar los polímeros reciclados tales como PPr, polietilenos, etc. con polímeros vírgenes y reforzantes o rellenos para mejorar las propiedades mecánicas (Fang et al., 2020; Santiago et al., 2018).

La pandemia del COVID-19 hizo que la demanda mundial de PP incrementara, ya que éste material es utilizado para la fabricación de máscaras y tapabocas (Wibisono et al., 2020). Esto aumentará los problemas ambientales causados por los residuos polímeros, los cuales fueron mencionados anteriormente. Por lo tanto, la preocupación mundial por el daño que están causando estos residuos será mayor y se aumentará la necesidad de buscar alternativas para la incorporación del PPr en la cadena productiva y la propensión hacia una economía circular.

El PPr tiene aplicaciones en estuches de batería para los carros, luces de señalización, cables de batería, escobas, cepillos, raspadores de hielo, embudos de aceite, portabicicletas, rastrillos de jardín, contenedores de almacenamiento, láminas, bandejas, briquetas etc. (Locock et

al., 2017) Sin embargo, el retorno del PPr a la cadena productiva es muy bajo, ya que el 91 % del material plástico empleado en la producción de piezas plásticas es virgen y solo un 1 % es biobasado y el 8 % es reciclado(WWF, 2020). Por lo tanto, es importante buscar nuevas alternativas para la incorporación de los materiales plásticos a la cadena productiva.

Norte de Santander es un departamento productor de arroz. En el 2019, en la zona de los Santanderes se produjeron 189.438 toneladas de arroz(Minagricultura, 2020). Por otra parte, se ha reportado que por cada tonelada de arroz se producen 0,23 toneladas de CA(Arjmandi et al., 2015). El principal componente de este material es la Cel (entre 25-30 %) la cual es un material biodegradable(Arjmandi et al., 2015). En Norte de Santander, la CA está siendo principalmente incinerada para producir energía, esto origina una contaminación ambiental, ya que se producen cenizas, gases tóxicos y vapores(Heidbreder et al., 2019). La incorporación de la CA en la industria polimérica de esta región ha sido muy incipiente. Por lo tanto, no se le está dando valor agregado, lo cual afecta los indicadores de la migración hacia una economía circular de este material en esta región.

Hoy en día se están empleando materiales derivados de fuentes renovables (biodegradables) como una alternativa para la sustitución de polímeros no biodegradables (ejm, PP), reducción del impacto ambiental de los residuos poliméricos y para disminuir la dependencia del petróleo, la cual es una fuente no renovable. Por lo tanto, se han preparado materiales compuestos empleando fibras naturales, las cuales son más ambientalmente amigables que los rellenos de origen mineral(Santiago et al., 2018). Las fibras a base de Cel son relativamente económicas, por lo que la adición de fibras naturales, tales como, madera, CA, lino o sisal, etc. a las matrices poliméricas, puede resultar en compuestos viables desde el punto de vista mecánico y económico(Luz et al., 2008).

Un aspecto negativo de los materiales compuestos obtenidos a partir de polímeros hidrofóbicos (PP, polietilenos, etc.) y fibras naturales, es la baja interacción entre ellos, por ejemplo, el PP es hidrofóbico y la Cel tiene grupos OH en su estructura. Por lo tanto, hay una baja adhesión, lo cual conlleva a obtener malas propiedades mecánicas y alta absorción de agua especialmente cuando la matriz es hidrofílica (Santiago et al., 2018). Así, para desarrollar materiales compuestos del PP y Cel, se requiere mejorar la interacción entre ellos, para lo cual se necesita el uso de un agente de acoplamiento o algunas veces también llamado compatibilizante. Algunos agentes de acoplamiento que se han empleado para estas mezclas son los siguientes: PP funcionalizado con anhídrido maleico (PP-g-AM) (Luz et al., 2008; Wibisono et al., 2020; Zarges et al., 2017), polietilenimina (de la Orden et al., 2007), estireno-etileno-butadieno-estireno funcionalizado con AM (SEBE-g-AM) (Yeh et al., 2015), polietilenocteno funcionalizado con AM (PEO-g-AM) (Arjmandi et al., 2017) y PP funcionalizado con isocianato de m-isopropenil α - α -dimetil-benzil (PP-g-m-TMI) (Raghu et al., 2018). Por otra parte, no se han encontrado estudios donde se haya empleado un PP-g-MHBP, para el mejoramiento de la interacción y homogeneidad en mezclas de Cel y PP o Cel y PPr. Por lo tanto, este tipo de sistemas ha sido muy poco explorado. El PP-g-MHBP presenta un grado de funcionalización (GF) bastante alto (9,1 %) (Caicedo & Murillo, 2019) en comparación con los agentes compatibilizantes tradicionalmente empleados conocidos como Polybond 3200 (GF: 1,0 %), Polybond 3150 (GF: 0,50 %), G-3003 (GF: 1,2 %), E-43 (GF: 1,2 %), Bondyran 1004 (GF: 0,8 %) (Diop & Torkelson, 2013). Por lo tanto, se espera que este material pueda actuar como agente compatibilizante para las mezclas de PPr/Cel.

La pregunta de investigación que se plantea en este estudio es la siguiente:

- ¿Cuál es el efecto de la proporción del PP-g-MHBP en las propiedades estructurales, térmicas, morfológicas, reológicas y mecánicas de los materiales compuestos de PPr/Cel?

En el presente estudio se plantea la siguiente hipótesis:

- El contenido de PP-g-MHBP afecta las propiedades estructurales, térmicas, morfológicas, reológicas y mecánicas de los materiales compuestos de PPr/Cel.

3. JUSTIFICACIÓN

Las industrias arroceras, y poliméricas de Norte de Santander producen respectivamente grandes cantidades de residuos de CA, y poliméricos. Por lo tanto, es importante contribuir con la reducción de estos residuos, la contaminación causada por ellos, y darles a estos materiales, un valor agregado mediante su uso en procesos productivos. Así, es menester encontrar nuevas alternativas de aplicación potencial de estos residuos y desarrollar procesos económicamente viables para estas aplicaciones en Norte de Santander. La Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental (CORPONOR) está interesada en lograr el mejor aprovechamiento económico, ambiental y social para el desarrollo de la región consolidando la implementación de la economía circular en el sector industrial (CORPONOR, 2019), para ellos es de vital importancia darle un valor agregado a los residuos agroindustriales y poliméricos.

La cantidad empleada de CA o Cel derivada de la CA en la industria polimérica Norte Santandereana, es muy baja, de hecho, no se tienen reportes oficiales de su uso. Sin embargo, grandes cantidades de estos materiales pueden ser incorporados en la cadena productiva polimérica, ya que ellos se emplearían como rellenos o reforzantes y son de bajo costo. Esto permitirá la reducción de los costos de producción de estas empresas. Por otra parte, la

incorporación del PPr reducirá el uso de material virgen en la cadena productiva y así contribuir con la reducción de la contaminación ambiental. Otra razón importante de la realización de este estudio es obtener una sinergia en las propiedades del PPr y de la Cel derivada de la CA, y realizar un estudio exploratorio sobre el uso del PP-g-MHBP como agente de acoplamiento para este tipo de sistemas.

Hay muchos reportes de mezclas de polímeros con fibras naturales, pero hay muy poca investigación en Colombia y en el mundo sobre el uso de la Cel derivada de la CA en la industria polimérica y el mejoramiento de la interacción entre ésta y los polímeros hidrofóbicos. Además, las propiedades reológicas de las mezclas del PP/Cel y PPr/Cel, han sido muy poco estudiadas. Por lo tanto, con este estudio se pretende incrementar el estado del arte de este tipo de materiales y llenar algunos vacíos existentes en el uso de agentes de acoplamiento para estas mezclas, ya que de acuerdo a nuestra revisión en varias bases de datos (web of science, Science Direct, Scopus, Researchgate, SAGE, Wiley, Taylor and Francis, American Chemical Society, Springer, U.S. patent, patentscope, espacenet, google patents, latipat, invenes, uspto – patft, ipsum, fpo – freepatentsonline, j-platpat, kipris, sipo, auspat, japan patents, chine patents, etc), no se encontraron reportes de un PP-g-MHBP que haya sido empleado como agente compatibilizante o de acoplamiento para mezclas de PPr y CA o de PP con otro polímero hidrofílico.

El estudio que se plantea en este proyecto es novedoso y contribuirá a la generación de nuevo conocimiento, y permitirá incrementar los indicadores de la Universidad Francisco de Paula Santander, ya que éste favorecerá el aumento de la producción científica, porque en un futuro se pretende realizar la publicación de un artículo en revistas ISI (Web of Science) o la presentación de los resultados del proyecto en un evento científico nacional o internacional.

El presente proyecto también permitirá impulsar el desempeño como profesional a través de la experiencia investigativa de la estudiante que desarrollará el mismo, lo cual además ayudará

a incrementar el conocimiento en el área de procesamiento y caracterización de materiales poliméricos, y explorar una alternativa que reducirá el impacto ambiental negativo causado por los sectores agroindustrial y del plástico.

El Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018 planteó el crecimiento verde el cual buscó el bienestar económico y social de la población de tal forma que se asegurara que la base de los recursos naturales proveería bienes y servicios ambientales que el país necesitaba para lograr un desarrollo económico sostenible (Consejo Nacional de Política Económica y Social, 2018). Esta política estaba enmarcada en el Acuerdo de París 2015 para la lucha contra el cambio climático y la estrategia de Crecimiento Verde suscrito por Colombia y otros países (García Arbeláez, C., G. Vallejo, 2016). Algunos de los objetivos de la estrategia de crecimiento verde eran avanzar hacia un crecimiento sostenible y bajo en carbono, proteger y asegurar el uso del capital natural, mejorar la calidad y gobernanza ambiental (Consejo Nacional de Política Económica y Social, 2018). Estos objetivos son de desarrollo sostenible y son importantes para cumplir con el Acuerdo de París de 2015. Por otra parte, en el Plan Nacional de Desarrollo (2018-2022) también se hace referencia a nuevas alternativas sostenibles, la conservación ambiental, el aprovechamiento de los recursos naturales y la lucha contra el cambio climático (Diop & Torkelson, 2013; Raghu et al., 2018).

El gobierno nacional es consciente de la problemática nacional relacionada con los residuos sólidos y la incipiente economía circular que se ha implementado en el país. Por lo tanto, a través del Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES), quien es la máxima autoridad nacional de planeación y organismo asesor del Gobierno en los temas de desarrollo económico y social del país, se tienen políticas encaminadas a mitigar el impacto negativo de los residuos sólidos en el medio ambiente y la migración a una economía circular.

En el documento del CONPES 3874 del 21 de noviembre de 2016(DNP, 2016) se planteó la política nacional para la gestión integral de residuos sólidos, en este documento se mencionó que en 2030 la generación de residuos sólidos urbanos y rurales será de 18,74 millones de toneladas, lo cual es una cifra muy alta. El enfoque del documento CONPES 3874 se refiere a políticas en la gestión de los residuos no peligrosos y aportar al desarrollo sostenible y a la adaptación y mitigación del cambio climático. Algunas estrategias que se plantearon en dicho documento fueron(DNP, 2016):

- Promover el avance gradual hacia una economía circular, a través del diseño de instrumentos en el marco de la gestión integral de residuos sólidos.
- Promover la cultura ciudadana, la educación e innovación en gestión integral de residuos como bases para fomentar la prevención, reutilización y adecuada separación en la fuente.
- Por otra parte, en el documento CONPES 3934 del 10 de julio de 2018 se plantearon las Políticas de Crecimiento Verde(Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES), 2018). Lo anterior se hizo con el objetivo de llevar al país a una transición hacia un modelo económico más sostenible, competitivo e inclusivo.

Las políticas trazadas en los documentos CONPES mencionados anteriormente están alineadas con la agenda 2030 (a desarrollarse entre 2018 y 2030)(Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES), 2018) y sus objetivos de desarrollo sostenible (ODS), los cuales se plantean en el documento CONPES 3918 del 15 de marzo de 2018(Consejo Nacional de Política Económica y Social, 2018), la implementación del acuerdo de Paris sobre cambio climático(García Arbeláez, C ., G . Vallejo, 2016) y el Plan Nacional de Desarrollo (2018-2022)(Vallejo Zamudio, 2019).

4. MARCO REFERENCIAL

4.1. ESTADO DEL ARTE

Muchos autores usan el término compatibilizante como sinónimo de un acoplante, pero el término compatibilizante se usa idealmente para mezclas y no para materiales compuestos.

Wang y colaboradores(Lu Wang, Douglas J. Gardner, 2017) prepararon por extrusión materiales compuestos a partir de Cel (3-10 %) y PP virgen (88-98 %), empleando como agente de acoplamiento el PP-g-AM (2 %). En este estudio se evidenció la presencia de agregados de Cel. El agente de acoplamiento incrementó η^* , el módulo elástico y η . Por otra parte, cuando las proporciones de Cel y PP fueron respectivamente de 3 y 10 % y 95 y 88 %, la adición del 2 % de PP-g-AM mejoró la interacción entre los componentes y se incrementó η . En este estudio no se hicieron caracterizaciones térmicas ni mecánicas de los materiales.

Pinzón y colaboradores(Pinzón et al., 2020) obtuvieron mezclas de PPr y CA en una extrusora sin la presencia de un agente de acoplamiento. Las proporciones de PPr fueron entre 80 y 98 % y las de CA entre 2 y 20 %. Los componentes presentaron una baja adhesión (incompatibles) y la fuerza ténsil y el módulo ténsil disminuyeron con el contenido de CA, pero el comportamiento observado del índice de fluidez (MFI) fue opuesto.

Huang y colaboradores(T. Huang et al., 2020), desarrollaron materiales compuestos a partir de Cel (30 %), PP (60 %) y PP-g-AM (10 %). Además, se obtuvieron mezclas binarias de Cel (75 %)/PP-g-AM (25 %). Las mezclas fueron preparadas por extrusión. Las mezclas de PP/PP-g-AM presentaron menores propiedades tensiles que el PP. Las mezclas de Cel/PP exhibieron mayor modulo ténsil que el PP. Sin embargo, cuando se usó PP-g-AM como compatibilizante para estas mezclas, se incrementaron el módulo y la fuerza ténsil. Además, los

análisis de microscopia de barrido electrónica (SEM) evidenciaron una baja adhesión de todas las mezclas obtenidas.

Arjmandi y colaboradores(Arjmandi et al., 2017) prepararon materiales compuestos empleando CA (20 %), PP (75 %), fosfato de amonio, usado como ignifugo (0-30 %) y polietileno octeno modificado con AM (5 %), el cual fue empleado como agente compatibilizante. El módulo y la fuerza flexural, la resistencia al impacto, la retardancia a la llama y la estabilidad térmica de los materiales mejoraron significativamente con la adición del 10 % de fosfato de amonio. Por otra parte, los autores no mencionaron el efecto del polietileno octeno modificado con AM en las propiedades evaluadas.

Lazim y colaboradores(Lazim & Samat, 2017) evaluaron el efecto compatibilizante del PPr irradiado (PPri) en materiales compuestos obtenidos a partir de PPr y Cel. La proporción utilizada de Cel fue entre 5 y 40 %, la relación de PPr: PPri fue mantenida constante (90:10). La fuerza ténsil de los materiales incrementó con la adición de PPri y Cel. Además, la presencia de PPri mejoró la interacción entre PPr y la Cel, pero la adhesión interfacial entre el PPr y la Cel fue muy baja.

Ryu y colaboradores(Ryu et al., 2020), prepararon materiales compuestos por extrusión de Cel (2-6 %), PP (91-97 %) y PP-g-AM (0-3 %). En este estudio, no se presentó una tendencia en la elongación a la ruptura, la fuerza ténsil y la fuerza de impacto con el contenido de Cel. Además, se observó agregación de las partículas de Cel y la adición de Cel a la matriz de PP redujo la estabilidad térmica del material compuesto. En este estudio no se evaluó el efecto compatibilizante del PP-g-AM.

Yang y colaboradores(Jin Yang, Shaorong Lu, Qiyun Luo, Laifu Song, Yuqi Li, 2016), elaboraron materiales compuestos a base de carbonato de calcio (40 %), PP (60 %) y Cel (5-20 % con respecto al PP y al carbonato de calcio). En este estudio fue utilizado como compatibilizante

el ácido tánico modificado con el poli(12-hidroxiestearato) en una proporción del 3 % con respecto al contenido de carbonato y Cel. La presencia del compatibilizante mejoró la resistencia al impacto, la tracción y el MFI. Las micrografías obtenidas por SEM permitieron evidenciar que la Cel fue relativamente bien dispersada en la matriz de PP. Por otra parte, la presencia del compatibilizante mejoró la interacción entre el PP y el carbonato de calcio y la fuerza ténsil de los materiales.

Orgi y colaboradores(Orji & McDonald, 2020) hicieron materiales compuestos empleando PPr (48 %), CA (50 %) y PP-g-AM (2 %). La presencia de la CA redujo la cristalinidad del PP, pero mejoró el módulo y la fuerza ténsil de los materiales compuestos.

Ummartyotin y Pechyen(Ummartyotin & Pechyen, 2016) prepararon materiales compuestos usando Cel (0-20 %) extraída del algodón, PP y PP-g-AM (10 %). Los resultados térmicos obtenidos por calorimetría de barrido diferencial (DSC) mostraron que la cantidad de Cel no afectó la cristalinidad del PP. Por otra parte, los materiales exhibieron una aglomeración de partículas de Cel, baja interacción entre la Cel y el PP, y un incremento de la fuerza compresiva al aumentar el contenido de Cel.

Por otra parte, hay un estudio importante en el mejoramiento de la interacción de mezclas de Cel y PP. Sin embargo, este reporte no es actual, pero vale la pena mencionarlo en este documento, ya que presenta un buen aporte para la investigación actual y el estado del arte de este tipo de materiales. **De la orden y colaboradores**(de la Orden et al., 2007), elaboraron mezclas de Cel y PP, las cuales fueron obtenidas por extrusión. En este estudio se utilizó polietilenimina (PEI) como acoplante. Las proporciones de Cel, PP y PEI fueron respectivamente entre 30 y 50 %, entre 50 y 70 % y 1,5 %. En este estudio se observó que la fuerza ténsil fue muy similar en las muestras preparadas sin el PEI, pero en las preparadas con este si se evidenció un

aumento del módulo ténsil con el contenido de Cel. La adhesión interfacial entre el PP y la Cel fue muy baja para las mezclas sin PEI, pero ésta mejoró con la incorporación del PEI.

En la patente **US20190241725 de 2019**, “*fiber reinforced polypropylene composite*”(Kind Code & Al., 2019), se obtuvieron materiales compuestos a partir de PP (25-92,5 %), Cel, un agente nucleante y un agente de acoplamiento (0,1-6 %). Los rangos de los valores de elongación a la ruptura, el módulo ténsil, el MFI y la resistencia al impacto de este material compuesto fueron respectivamente 2,5-7,5 %, 1000 a 6000 MPa, 3,0-140 g/10 min. y 3-160.0 kJ/m². Las aplicaciones de este material son las siguientes: Partes de automóviles (parachoques, molduras laterales, tableros, molduras interiores, etc), partes de lavadoras y partes de lavavajilla.

En la patente **CN109021398A de 2018**(刘会, n.d.) “*A kind of high-toughness high-strength polypropylene plastics and preparation method thereof*” se reportó la preparación de un material compuesto elaborado a partir de PP (50-80 %), caolim (20-40 %), Cel (12-18 %) plastificante (9-18 %), antioxidante (7-14 %) y otros aditivos. El material se obtuvo con muy buenas propiedades mecánicas, pero no se especificó el rango de éstas.

En la patente **CN107841034 de 2018**(刘桂成杨维曦马俊杰, n.d.) “*Modified polypropylene composite material with KT-1 as compatibilizer*” Se obtuvieron materiales compuestos de PP (80 %), CA (20 %) y un compatibilizante (1-10 %), un agente de acoplamiento (2 %) y aceite blanco (0,5 %). El uso del compatibilizante mejoró la interacción entre el PP y la CA. Además, las propiedades mecánicas (fuerza ténsil, fuerza flexural o de flexión y la fuerza de impacto) del material compuesto fueron mejores que las del PP.

En la patente **CN109354764 de 2018**(汪龙汪彪, n.d.) “Nano cellulose reinforced polypropylene foam material and preparation method thereof”, se prepararon materiales compuestos a partir de PP (88-97,8 %) nanocelulosa (2-10 %), compatibilizante (0,2-2,0 %) y un fluido supercrítico (1-10 %) con respecto a la cantidad de PP. El compatibilizante empleado fue el PP-g-AM, este material mejoró la adhesión entre el PP y la nanocelulosa.

En la patente **US20190177521 de 2019**(Code & Ho, 2019) “*polypropylene composite resin composition including silyated microfibrillated cellulose and vehicle pillar trim using the same*” se prepararon mezclas a partir de PP (65-85 %) y Cel (8-22 %) y un elastómero de etileno-octeno (3-13 %). Además, en este estudio se utilizó PP-g-AM como compatibilizante (1-3 %). El material compuesto obtenido presentó un MFI entre 10 y 60 g/10 min, la fuerza ténsil fue alrededor de 23 MPa, el módulo flexural fue alrededor de 1670 MPa, la fuerza al impacto fue alrededor de 39 J/m y la temperatura de deflexión al calor fue alrededor de 110 °C.

4.2. MARCO TEÓRICO

4.2.1. PP

El PP, es uno de los polímeros más versátiles disponibles con aplicaciones en prácticamente todos los mercados de uso final de plásticos(Do, 2012). Es capaz de someterse a una amplia gama de procesos de fabricación, como el moldeo por inyección, por extrusión, por extrusión-soplado y compresión(Crawford & Quinn, 2017).

La producción comercial del PP comenzó en 1957 y desde esta fecha se ha incrementado ostensiblemente su uso(Do, 2012). El PP es un polímero lineal semirrígido, translúcido, tiene buena resistencia química, a la fatiga y al calor, y tiene buena tenacidad. El PP no presenta problemas de agrietamiento por tensión y ofrece una excelente resistencia eléctrica y química a altas temperaturas(Maddah, 2016)(Hamielec & Soares, 1999).

La tacticidad de las cadenas poliméricas, se define como la disposición de los centros quirales adyacentes a lo largo de una cadena, es uno de los parámetros más importantes en el diseño de macromoléculas, ya que afecta fuertemente las propiedades de los materiales que se obtienen (Tzounis et al., 2018). La presencia de un grupo metilo en la cadena principal del PP puede proporcionar varias características diferentes a este material, dependiendo de la disposición del grupo metilo en el átomo de carbono de éste, como se muestra en la figura

1 (TamásBárány; József Karger-Kocsis (1950–2018), 2019), donde se tienen varios tipos de PP.

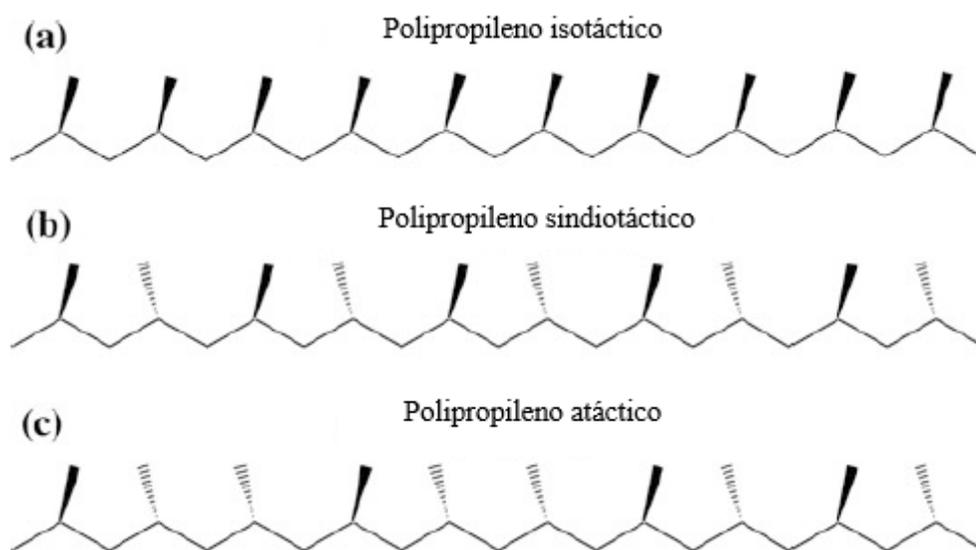


Figura 1. Estereoquímica de (a) PPI, (b) PPS y (c) PPA. **Fuente:** Barany y colaboradores (TamásBárány; József Karger-Kocsis (1950–2018), 2019).

El PP isotáctico (PPI) proporciona casi la mitad de la fibra base para telas no tejidas (Kotek et al., 2017). La configuración isotáctica es la estructura más estable, ya que el grupo metilo está dispuesto en un solo lado de la cadena principal del PPI (figura 1a). El PP atáctico (PPA) es un subproducto amorfo, los grupos metilos están ubicados de forma aleatoria en la cadena principal (figura 1b) (Resconi et al., 1996). Se usa principalmente en adhesivos, recubrimientos y compatibilizantes (Zhang et al., 2014), pero también como extensor de caucho, modificador de betún, adhesivos termofusibles, etc (Rishina et al., 2019) (Mitra et al., 2019). El

PP sindiotáctico (PPs) tiene los grupos metilo posicionados en forma alternada (figura 1c)(Kotek et al., 2017; TamásBárány;József Karger-Kocsis (1950–2018), 2019). El posicionamiento alternativo de los grupos metilo favorece una conformación de cadena extendida, lo cual conduce a propiedades mecánicas más parecidas a las del PE que a las del PPI(Haftka & Könnecke, 1991)(Hearle, 1962).

El PP es resistente al ataque de productos químicos polares como jabones, agentes humectantes y alcoholes, pero puede hincharse, ablandarse o sufrir grietas en la superficie en presencia de hidrocarburos líquidos o disolventes clorados(Song, 2015)(Braun et al., 2017).

4.2.2. Funcionalización de las poliolefinas

4.2.2.1. Funcionalización del PP

La funcionalización consiste en la modificación estructural de los polímeros mediante un proceso reactivo para introducir grupos funcionales en la estructura y a través de esos grupos funcionales se puedan dar interacciones específicas entre el polímero y otros materiales(Fink, 2005; T.C. Mike Chung, 2001).

Por otra parte, debido a la alta hidrofobicidad del PP, se han presentado algunos problemas en mezclas de PP y materiales hidrofílicos, por ejemplo, la mala adherencia entre la superficie del relleno y la matriz del PP evita la humectación del polímero fundido para ayudar a romper los agregados de las partículas del relleno, lo que da como resultado, una baja dispersión y propiedades mecánicas deficientes(Vesel & Mozetic, 2010). Los materiales fibrosos, como por ejemplo las fibras naturales lignocelulósicas se han utilizado como refuerzo en materiales termoplásticos y termoestables(Campilho, 2015; Karian, 2003; Morais et al., 2020). Sin embargo, las mezclas de PP y materiales con grupos polares son incompatibles, ya que el PP no posee grupos polares. Por lo tanto, con la introducción de estos grupos en la estructura del PP se mejora

la compatibilización (mayor interacción, mejoramiento de las propiedades mecánicas y dispersiones más homogéneas)(Yazdani-Pedram Zobeiri, Mehrdad; Calderón del Río, Katia Romina; Quijada Abarca, 2000).

El PP se modifica químicamente mediante injerto con monómeros reactivos.

Normalmente, los monómeros insaturados que contienen grupos funcionales adicionales se injertan sobre el polímero mediante un mecanismo que incluye la formación y reacción de radicales libres. Los monómeros habituales son el AM(T. Huang et al., 2020; Orji & McDonald, 2020) y el ácido acrílico (AA)(Flores-Gallardo et al., 2001), pero también se utilizan estireno y acrilatos(Beyer; & Hopmann, 2018), etileno-propileno-dieno-monómero caucho-anhídrido maleico (EPDM-MA)(da Silva Barbosa Ferreira et al., 2021), polidopamina(Thakur et al., 2014), PP-g-m-TMI(Chauhan et al., 2016), 4-carboxibencenosulfonil azida (CBSA)(Q. Li & Tzoganakis, 2007) y MHBP(Caicedo & Murillo, 2019).

4.2.2.1.1. Funcionalización del PP con MHBP

El MHBP (figura 2) surgió como una alternativa al uso de polímeros lineales en la funcionalización del PP, ya que este material tiene una alta funcionalidad, es polar y tiene baja viscosidad en fundido ($< 10 \text{ Pa. s}$)(Caicedo & Murillo, 2019). El PP-g-MHB es un material que fue obtenido en un reómetro de torque por funcionalización en estado fundido del PP (90 %) con el MHBP (10 %), usando como catalizador peróxido de dicumilo (1 %)(Caicedo & Murillo, 2019).

El PP-g-MHBP tiene las siguientes propiedades; grado de funcionalización: 9,10 % (determinado por análisis de infrarrojo, IR), ángulo de contacto: 81.45° , T_f : 162°C , ΔH_f : 64 J/g , porcentaje de cristalinidad: 32 %, temperatura de descomposición (T_{10}): 384°C , modulo ténsil: $1049\pm 23 \text{ MPa}$, fuerza tensil: $29\pm 0,4 \text{ MPa}$ y porcentaje de elongación a la ruptura : $13\pm 1 \%$. En la

figura 2 se muestra una representación esquemática de la funcionalización del PP-g-MHBP(Caicedo & Murillo, 2019).

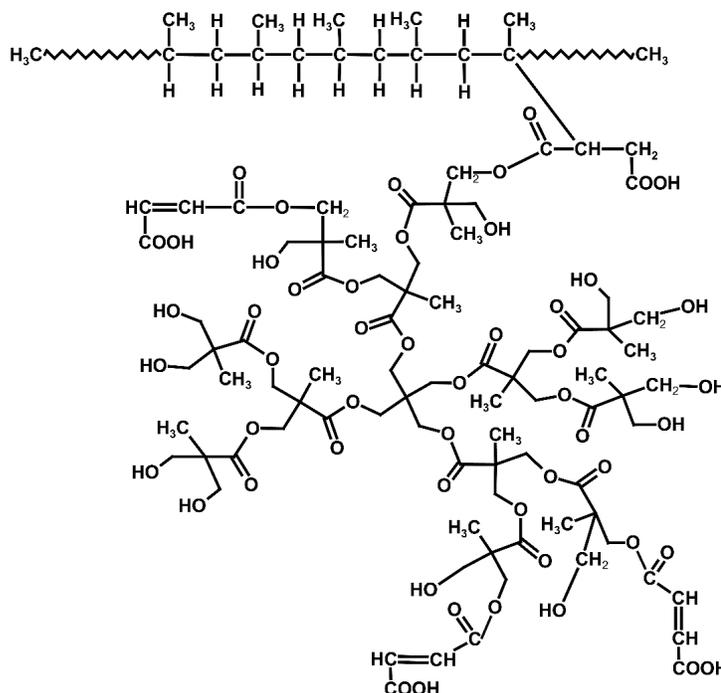


Figura 2. Representación esquemática de la reacción entre el PP y el MHBP para formar el PP-g-MHBP. **Fuente:** (Caicedo and Murillo, 2019).

4.2.3. Fibras naturales

Las fibras derivadas de fuentes biológicas como vegetales y de origen animal se denominan fibras naturales. Esta definición incluye todas las fibras celulósicas naturales (algodón, yute, sisal, bonote, lino, cáñamo, abacá, ramio, etc.) y fibras a base de proteínas como la lana y la seda. Estas fuentes biológicas se encuentran abundantemente en la tierra, y están constituidas con un alto contenido de Cel y tienen una baja densidad, alta tenacidad y buenas propiedades mecánicas(Bhattacharyya et al., 2015; Gholampour & Ozbakkaloglu, 2019; Rodríguez et al., 1989).

Las fibras vegetales también tienen un mercado importante y se componen de Cel (figura 3), hemicelulosa, lignina y pectina(Campilho, 2015). La longitud de las fibras juega un papel

importante en la resistencia del compuesto. Las fibras naturales también proporcionan un mayor grado de flexibilidad de diseño, ya que durante el procesamiento se doblan en lugar de romperse (Campilho, 2015). Además, tienen alta absorción de humedad y poca humectabilidad con algunas resinas hidrofóbicas (Campilho, 2015). La Cel se considera un compuesto orgánico lineal y tiene la fórmula $(C_6H_{10}O_5)_n$ (Faris M. AL-Oqla; Mohd S. Salit, 2017; Pasangulapati et al., 2012).

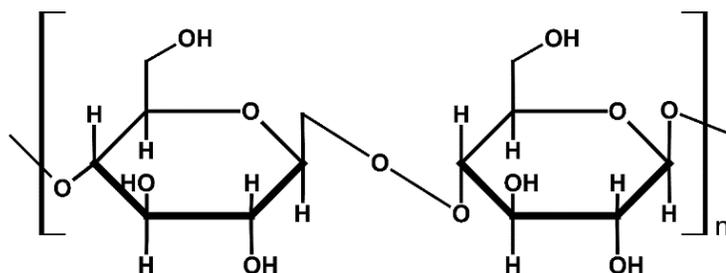


Figura 3. Esquema de la estructura química de la Cel. **Fuente:** (Acharya and Chaudhary, 2012).

4.2.4. CA

La CA (figura 4), como subproducto de la molienda del arroz, es la capa externa del arroz con una cantidad del 20 % p/p de todo el arrozal producido, por lo tanto, una tonelada de arroz origina aproximadamente 0,20 toneladas de CA y cada tonelada de esta puede producir entre 0,18 y 0,20 toneladas de ceniza de CA, esto dependerá de las condiciones climáticas, las variedades de arroz y la ubicación geográfica del campo de arroz (Kwan & Wong, 2020; Shamsollahi & Partovinia, 2019). La composición de la CA varía debido al tipo de arrozal, la variedad de arroz, el tipo de fertilizantes, la química del suelo, el clima y la ubicación geográfica (Shamsollahi & Partovinia, 2019). La CA contiene sustancias orgánicas y un 20 % de material inorgánico. Los principales componentes elementales de la CA son C 37,05 %, H 8,80 %, N 11,06 % Si 9,01 % y O 35,03 %. La composición de CA (Soltani et al., 2015) es: hemicelulosa 24,3 %, Cel 34,4 %, lignina 19,2 %, cenizas 18,85 % y otras sustancias 3,25 %. Por otra parte, la CA (Shamsollahi &

Partovinia, 2019) tiene una longitud entre 4-10 mm, una anchura entre 2,0-2,5 mm, un espesor entre 0,1-0,15 mm y una densidad aparente entre 96-160 kg/m³. La CA se puede emplear como biofertilizante, absorbente, agente de control de plagas, aislante térmico, etc(Kwan & Wong, 2020; Shamsollahi & Partovinia, 2019; S. Wang et al., 2020).



Figura 4. CA. Fuente:(Stein and Schemmel, 2020).

4.2.5. Materiales compuestos de fibras naturales

Un material compuesto es un sistema hecho de dos o más materiales de tal manera que se obtienen mejores propiedades y rendimiento mecánico que los que poseen los componentes individuales(Campilho, 2015). Los materiales compuestos en general tienen dos tipos principales de componentes; el reforzante que suele ser discontinuo, fuerte y rígido (como fibras y partículas), y el otro tipo más débil, de menor resistencia y continuo, que se conoce como matriz(Campilho, 2015). Los materiales compuestos de fibras naturales (NFC) son aquellos en los que al menos las fibras de refuerzo se derivan de recursos renovables y neutrales en dióxido de carbono, como la madera o las plantas(Y. K. Kim, 2012).

Las fibras naturales, ya ocupan un lugar importante en la industria de los materiales compuestos debido a sus excelentes propiedades fisicoquímicas y mecánicas, pues son biodegradables, biocompatibles, ecológicas y renovables(Y. K. Kim, 2012). Por lo tanto, se utilizan ampliamente en muchas aplicaciones (industrias automotriz, aeroespacial, ropa de protección personal, deportes y medicina) como reemplazantes de fibras sintéticas y no renovables como alternativas a los materiales a base de petróleo(Syduzzaman et al., 2020). Los refuerzos de fibra natural tienen muchas ventajas sobre su contraparte inorgánica, la fibra de vidrio. Por ejemplo, tienen baja densidad, altas propiedades específicas, son biodegradables, se derivan de recursos renovables, tienen una pequeña huella de carbono y proporcionan un buen aislamiento térmico y acústico(*Natural Fiber Composites: What's Holding Them Back?* | *CompositesWorld*, n.d.). Sin embargo, la baja resistencia térmica de las fibras naturales limita su compatibilidad con matrices termoplásticas con altas temperaturas de fusión(Y. K. Kim, 2012).

4.2.5.1. Ventajas y desventajas de los NFC

Debido al rápido crecimiento de las industrias manufactureras, existe la necesidad de materiales que tengan mejores propiedades en términos de resistencia, rigidez, densidad, menor costo y mayor sostenibilidad. Los materiales compuestos son uno de algunos que poseen tales propiedades(Yashas Gowda et al., 2018). Además, del bajo costo y el peso ligero, los materiales compuestos poliméricos de base biológica (compuestos reforzados con fibras naturales) ganaron más atención debido a su capacidad de renovación y biodegradabilidad. A continuación se enumeran otras ventajas de las fibras naturales(Faris M. AL-Oqla; Mohd S. Salit, 2017):

- Contribuyen al consumo de gas CO₂.
- La cantidad de emisión de CO₂ por la quema de fibras al final de su vida es neutra.
- La naturaleza poco abrasiva de las fibras hace que su procesamiento sea más fácil.

- La disponibilidad, las buenas características de aislamiento térmico y acústico, la recuperación de energía y el menor desgaste de la herramienta en las operaciones de mecanizado.

La gran desventaja de los materiales compuestos obtenidos a partir de fibras naturales es la variabilidad en las propiedades de las fibras, lo cual hace difícil la estandarización de las propiedades de dicho material (Faris M. AL-Oqla; Mohd S. Salit, 2017). Por otra parte, la baja estabilidad térmica de las fibras hace que solo sean aplicados en condiciones donde no ocurra la degradación de ésta. Por lo tanto, su aplicación se ve restringida por ello (Yashas Gowda et al., 2018).

4.2.6. Economía circular

En esencia, la economía circular consiste en reformar el actual modelo económico predominantemente lineal de producción y distribución de bienes (que se conoce como "tomar, fabricar y desechar") en un sistema en el que se minimice el desecho. En la economía lineal, las materias primas se extraen (o cultivan), se procesan, se combinan, se venden, se distribuyen, se vuelven a vender, se usan y finalmente se desechan. Además de la eliminación de productos después de su uso, hay muchos pasos en el camino en los que se pierden recursos de la economía (por ejemplo, residuos de la industria de extracción, residuos industriales, envases utilizados en todas las etapas). Una economía circular necesita evitar todas estas pérdidas potenciales de material, con energía y trabajo incorporados, encontrando usos alternativos. Este enfoque aparentemente ambicioso puede verse como un intento de restaurar las prácticas industriales anteriores o tempranas. Es decir, prácticas de recuperación que eran más comunes antes de la producción en masa, el auge del consumismo y el uso generalizado de materiales económicos pero difíciles de recuperar (como los plásticos). Estos desarrollos en gran parte del siglo XX en la

producción y el consumo dieron lugar a lo que se ha denominado la sociedad del descarte. El entusiasmo actual por la economía circular es una reacción a esta última, firmemente enraizado en las preocupaciones por el cambio climático y el exceso de emisiones de carbono generado por lo que puede considerarse un consumo excesivo junto con malas prácticas de eliminación (Deutz, 2019).

4.2.6.1. Desarrollo sostenible

Las economías han experimentado un fuerte crecimiento económico en el último siglo con los consiguientes impactos sociales y ambientales, que desafían el bienestar de las generaciones actuales y futuras. Las políticas comienzan a cambiar el enfoque del crecimiento económico a la necesidad de equilibrar este crecimiento con las preocupaciones sociales y ambientales. El desarrollo sostenible suma al crecimiento económico la preocupación por ecologizar las cuentas nacionales, al incluir el agotamiento del capital natural. La Comisión Mundial de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo Sostenible, en su informe “Nuestro Futuro Común”, incluyó la conocida definición de desarrollo sostenible, como el “desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades”(Castro & Lopes, 2022)

4.2.6.1.1. Economía Circular y Desarrollo Sostenible

La economía circular es vista como un enfoque para implementar el desarrollo sostenible. El potencial de la economía circular en este sentido es evidente, ya que debería conservar los recursos para el futuro y reducir (eventualmente eliminar) los desechos y la contaminación relacionada como cargas para las generaciones presentes y futuras. Sin embargo, la consideración de la economía circular como ruta hacia la sostenibilidad introduce expectativas de beneficios sociales y equidad que no son inherentes a las estrategias de eficiencia de recursos. Algunos de

los desafíos en torno a eso se pueden ilustrar con referencia a los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) (Deutz, 2019).

En la actualidad, las nociones globales de sostenibilidad están estrechamente ligadas a los ODS. De los 17 ODS, las prácticas de economía circular son las más directamente relevantes para la producción y el consumo responsables (número 12) y la industria, Innovación e Infraestructura (número 9). El aumento de la eficiencia de los recursos haría que la producción y el consumo fueran más sostenibles y estaría asociado con una infraestructura habilitadora (p. ej., para la recuperación y la reprocesamiento de materiales usados). La implementación efectiva de estrategias de cierre del ciclo (especialmente en el contexto de los países menos desarrollados) sería beneficiosa para la vida en la tierra (15) y la vida debajo del agua (14) (por ejemplo, ayudando a reducir los niveles extraordinarios actuales de plásticos en los océanos). Si se consideran los efectos directos e indirectos de las estrategias de economía circular sobre las emisiones de carbono al seleccionar las opciones de recuperación, también se respalda la Acción climática (13). Potencialmente, otros objetivos también podrían promoverse mediante la implementación exitosa de la EC, como Trabajo Decente y Crecimiento Económico (8), Ciudades y Comunidades Sostenibles (11), e incluso Fin de la Pobreza (1) y Acabar con el Hambre (2). Sin embargo, estos beneficios sociales implican no solo que se produzca una innovación relacionada con la EC y que se creen puestos de trabajo, sino que sean puestos de trabajo "decentes", que esos puestos de trabajo estén disponibles y sean deseables para quienes actualmente experimentan pobreza y desnutrición. No hay evidencia para juzgar la probabilidad de que esto suceda, especialmente si no se relaciona con ubicaciones específicas. Las predicciones académicas y políticas sobre el número total y los tipos de puestos de trabajo creados, por ejemplo, varían mucho, y el impacto en lugares específicos es aún más incierto (Deutz, 2019).

4.2.7. Análisis de ciclo de vida (LCA)

LCA es una herramienta científica completa y sólida que aborda los aspectos y los impactos ambientales potenciales de cualquier producto o proceso a lo largo de su ciclo de vida, desde la extracción de la materia prima hasta la eliminación final o el reciclaje. Este enfoque “de la cuna a la tumba” se refiere a una visión holística de las interacciones ambientales que recopila todos los datos de entrada y salida asociados con cualquier sistema o proceso de producto y analiza las cargas ambientales a lo largo de su ciclo de vida vinculados a entradas y salidas relevantes. Estas entradas pueden ser enumeradas como materias primas extraídas de la tierra requeridas para cualquier proceso o flujo de productos, así como la energía y el agua utilizadas, mientras que las salidas incluyen las emisiones a la tierra, el aire y el agua; desechos sólidos; subproductos; y otras emisiones. Al final de la evaluación, LCA resume el impacto ambiental de los productos o procesos en el área de los recursos utilizados, los peligros para la salud humana y el daño al ecosistema. La evaluación de todas las fases del ciclo de vida de un producto permite a LCA estimar los resultados del impacto acumulativo; esto, a su vez, permite seleccionar el producto o la ruta de producción más amigable con el medio ambiente. Por lo tanto, LCA tiende a proporcionar conclusiones comparativas, lo que ayuda a los formuladores de políticas a encontrar mejores alternativas al comparar todos los impactos ambientales clave (Mannan & Al-Ghamdi, 2021).

4.2.8. ANOVA

El análisis de la varianza simple es una técnica estadística utilizada para analizar la relación entre una variable dependiente (o endógena) métrica y varias variables independientes (o exógenas) no métricas (Pérez, 2004). El objetivo esencial de los modelos ANOVA es determinar si diversas muestras proceden de poblaciones con igual media. Los valores no métricos de las

variables independientes determinarán una serie de grupos en la variable dependiente(Pérez, 2004). De modo que el modelo ANOVA mide la significación estadística de las diferencias entre las medias de los grupos determinados en la variable dependiente por los valores de las variables independientes.(Pérez, 2004)

La expresión funcional del modelo del ANOVA es la siguiente(Pérez, 2004):

$$y = F(X_1, X_2 \dots \dots X_n) \quad (1)$$

La variable dependiente y es métrica y las variables independientes son no métricas(Pérez, 2004)

El resultado de un experimento puede ser diferente al realizarlo varias veces, aunque las condiciones bajo las que se hace sean siempre las mismas (aparentemente). Ello es consecuencia de las variaciones de muchos factores fuera de control que no permanecen exactamente constantes, y que influyen en el resultado del experimento. Si además se cambian las condiciones de realización variando los factores que influyen sustancialmente en el experimento, el resultado de este cambiará en mayor medida(Pérez, 2004). El ANOVA descompone la variabilidad del resultado de un experimento en componentes independientes (variación total descompuesta en variaciones particulares) (Pérez, 2004).

Teóricamente, es posible dividir la variabilidad del resultado de un experimento en dos partes: la originada por los factores que influyen directamente en el resultado del experimento, estudiados en sus distintos niveles, y la producida por el resto de los factores con influencia en el resultado del experimento, variabilidad desconocida o no controlable, que se conoce con el nombre de *error experimental*.(Pérez, 2004)

El ANOVA se presenta cuando tenemos un solo factor (estudiado en sus distintos niveles) que influye sobre una *variable de respuesta* que mide el resultado del experimento, y el resto de los factores forman el error experimental influyendo sobre la variable de respuesta de forma no

controlable(Pérez, 2004). El factor se presenta con I niveles. Dentro de cada nivel se analiza una serie de observaciones del experimento (unidades experimentales) y su efecto sobre la variable de respuesta; es decir, para cada nivel se repite el experimento varias veces (replicación)(Pérez, 2004).

Así, X_{ij} será la observación j -ésima de la variable de respuesta relativa al i -ésimo nivel de factor (resultado obtenido para la variable respuesta en la repetición j -ésima del experimento para el i -ésimo nivel de factor).(Pérez, 2004)

Así mismo, para el análisis de dicha metodología cuantitativa como esta estadística descriptiva, se emplean diferentes softwares y programas cuantitativos que hacen posible la recopilación completa de los datos y los resultados idóneos esperados(Pérez, 2004).

4.2.8.1. SPSS

Se trata de un producto modular perfectamente integrado, indicado para todas las etapas del proceso analítico: planificación, recogida de datos, acceso y tratamiento de estos, y presentación de los resultados(Lucio, 2014). Constituye el software ideal para resolver los problemas que surgen diariamente en las empresas e instituciones recurriendo al análisis estadístico. Permite sacar el máximo provecho a los datos, por medio de una completa gama de herramientas estadísticas. Asimismo, ofrece un amplio abanico de posibilidades para llevar a cabo todo el proceso analítico, proporcionando las respuestas que las hojas de cálculo y las bases de datos no pueden facilitar(Lucio, 2014). Además, produce la información que se necesita para tomar las decisiones más acertadas, usando potentes estadísticos, entendiendo y presentando los resultados en formato de tablas de gran calidad o bien en forma de gráficos, pudiendo compartir los resultados con otras personas por medio de diferentes métodos, incluyendo la publicación de los datos en la Web(Lucio, 2014).

4.3. MARCO CONCEPTUAL

4.3.1. Agentes de acoplamiento.

Son materiales que incrementan la interacción entre la fibra y la matriz, mejorando así la adhesión interfacial, las propiedades mecánicas y la homogeneidad(Beyer; & Hopmann, 2018).

4.3.2. Análisis multivariante.

Son todas aquellas técnicas estadísticas que simultáneamente analizan múltiples resultados en los individuos u objetos bajo investigación(Sancho, 2012).

4.3.3. Compatibilización.

Acción que realiza el agente de acoplamiento propiciando la interacción entre la parte hidrofílica (fibras naturales) e hidrofóbica (matriz polimérica)(Santiago et al., 2018).

4.3.4. Cradle to Cradle (C2C).

El patrón C2C representa un nuevo punto de vista para el diseño y desarrollo de productos y servicios, ya que "el diseño de la cuna a la cuna permite la creación de sistemas industriales totalmente beneficiosos impulsados por la búsqueda sinérgica de objetivos económicos, ambientales y sociales positivos. La política C2C sugiere que la industria debe proteger y enriquecer los ecosistemas y que el metabolismo biológico de la naturaleza debe ser seguro. Así mismo, se establece aprovechar al máximo el producto reciclándolo y reintroduciéndolo en nuevas formas y usos para servir tanto a la economía como al medio ambiente(Mohajan, 2022).

4.3.5. Cradle to Grave.

El término de la (Cradle to grave “cuna a la tumba”) se utiliza en referencia a la perspectiva de una empresa sobre el impacto ambiental creado por sus productos o actividades desde el comienzo de su ciclo de vida hasta su finalización o eliminación. El objetivo principal de

la cuna a la tumba es ayudar a una organización a determinar si el flujo de desechos se puede reciclar, tal vez incluso reutilizar, ya que el último recurso será el vertedero/eliminación. La mejor ruta para determinar su cuna a la tumba es establecer un ciclo de vida de los procesos organizacionales. Solo una vez que haya reducido su proceso, podrá ver con precisión qué flujos de desechos tiene dentro de su organización(Kingly, 2015).

4.3.6. Distribución normal.

Es una distribución de puntuaciones o medidas que se representa gráficamente adoptando forma de campana. En una distribución normal las puntuaciones o medidas se distribuyen simétricamente entorno a la media, y a las frecuencias correspondientes van disminuyendo a medida que los valores se alejan de ella, según una ley matemática exacta(Uribe, 2003).

4.3.7. Elongación a la ruptura.

El alargamiento a la rotura, también conocido como tensión de fractura, es la relación entre la longitud modificada y la longitud inicial después de la rotura de la muestra. Expresa la capacidad del material para resistir cambios de forma sin formación de grietas(Djafari Petroudy, 2017).

4.3.8. Fuerza ténsil.

Es la cantidad máxima de tensión que un material puede soportar antes de fallar(Yalcin, 2021).

4.3.9. Funcionalización.

Consiste en introducir grupos funcionales en la estructura del polímero para conferir propiedades específicas(Fink, 2005; Passaglia et al., 2009).

4.3.10. Hipótesis nula (H_0).

La hipótesis nula denotada por H_0 , es la pretensión de que inicialmente se supone cierta (la pretensión de “creencia previa”).(JAY L. DEVORE California, 2008)

4.3.11. Hipótesis alternativa (H_a o H_1).

La hipótesis alternativa denotada por H_a , es la aseveración contradictoria a H_0 . La hipótesis nula será rechazada en favor de la hipótesis alternativa sólo si la evidencia muestral sugiere que H_0 es falsa. Si la muestra no contradice fuertemente a H_0 , se continuará creyendo en la verdad de la hipótesis nula. Las dos posibles conclusiones derivadas de un análisis de prueba de hipótesis son entonces rechazar H_0 o no rechazar H_0 (JAY L. DEVORE California, 2008).

4.3.12. Hipótesis operacional.

Es la hipótesis que se deriva a través de un proceso deductivo de hipótesis teóricas o más generales. Estas hipótesis contienen indicadores y referentes empíricos suficientes y necesarios para dirigir la observación y la medición de los fenómenos a través de las técnicas que se consideran idóneas y del diseño de instrumentos adecuados y precisos(Uribe, 2003).

4.3.13. Hipótesis estadística.

Una hipótesis estadística o simplemente hipótesis es una pretensión o aseveración sobre el valor de un solo parámetro (característica de una población o característica de una distribución de probabilidad), sobre los valores de varios parámetros o sobre la forma de una distribución de probabilidad completa(JAY L. DEVORE California, 2008).

4.3.14. Intersección.

Informa sobre la constante del modelo. Esta constante forma parte del modelo y es necesaria para obtener las estimaciones de las medias de cada casilla. Además, permite

contrastar, la hipótesis de que la media total de la variable dependiente vale cero en la población(Martín-Alvarez, 2006).

4.3.15. Material compuesto.

Es un material formado por una fibra y una matriz polimérica(Arjmandi et al., 2015).

4.3.16. Medias marginales

Las distribuciones de la variable fila y de la variable columna, de forma separada, se llaman distribuciones marginales, ya que aparecen en los márgenes derecho e inferior de la tabla de contingencia(Caceres, 2007).

4.3.17. Modelo ANOVA de efectos fijos

Un modelo ANOVA es de efectos fijos cuando los resultados obtenidos sólo son válidos para esos determinados niveles de factor estudiados en el momento actual (factores constantes). Lo que ocurra a otros niveles de factor puede ser diferente(Pérez, 2004).

4.3.18. Modelo ANOVA de efectos aleatorios

Un modelo ANOVA es de efectos aleatorios cuando los resultados obtenidos son válidos sean cuales sean los niveles de factor empleados. Los factores son aleatorios (factores variables aleatorios), y los niveles estudiados de factor son una muestra de la población de niveles, que se supone infinita(Pérez, 2004).

4.3.19. Modelo corregido

La fila modelo corregido se refiere a todos los efectos del modelo tomados juntos (el efecto de los dos factores, el de la interacción y el de la constante o intersección)(Martín-Alvarez, 2006).

4.3.20. Modulo ténsil o tracción

El módulo de Young, también conocido como módulo elástico, módulo de tracción o módulo de elasticidad en tensión, es la relación entre la tensión y la deformación y es igual a la pendiente de un diagrama de tensión-deformación del material(Licari & Swanson, 2011).

4.3.21. Objetivos de desarrollo sostenible

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), también conocidos como Objetivos Globales, son un conjunto de objetivos dentro de un acuerdo universal para poner fin a la pobreza, proteger todo lo que hace que el planeta sea habitable y garantizar que todas las personas disfruten de paz y prosperidad, ahora y en el futuro. futuro. Los Objetivos fueron adoptados por todos los estados miembros de las Naciones Unidas formalmente en 2015, para el período 2016–30 para abordar la abrumadora evidencia empírica y científica de que el mundo necesita un enfoque radicalmente más sostenible(Stephen Morton, David Pencheon & Sustainability, 2017).

4.3.22. Prueba de los efectos inter-sujetos

El cuadro prueba de los efectos inter-sujetos proporciona el cuadro ANOVA. Lo suministra para dos posibles descomposiciones de la suma de cuadrados global, la respuesta aparezca en bruto (Suma de Cuadrados Total) o con la constante sustraída (Suma de Cuadrados Corregida)(Departamento de estadística, 2021).

4.3.23. Prueba F

El contraste de H_0 en contra de H_a , se llama prueba F del análisis de la varianza(Caceres, 2007). Así pues, para cada efecto existe una hipótesis y para cada hipótesis un estadístico F que permite contrastarla. Por otra parte, al igual que en el ANOVA de un factor, el nivel crítico

asociado a cada estadístico F es quien nos permite decidir si podemos mantener o debemos rechazar una hipótesis(Martín-Alvarez, 2006).

4.3.24. Reciclar

Cualquier operación de valorización mediante la cual los materiales de desecho se reprocessan en productos, materiales o sustancias, ya sea para los fines originales o para otros. Incluye el reprocessamiento de materiales orgánicos, pero no incluye la recuperación de energía y el reprocessamiento en materiales que se utilizarán como combustibles o para operaciones de relleno (Minimisation, 2014).

4.3.25. Relleno

Termino que se define como aquel material que se agregan a las matrices poliméricas para cumplir objetivos o requisitos específicos(Arjmandi et al., 2015).

4.3.26. Reducir

La mejor manera de gestionar los residuos es tomando medidas para reducir la generación de residuos. Cuando se disminuye la generación de residuos con el cambio de hábitos de consumo, se hará una importante contribución a la reducción de la contaminación ambiental. Al mismo tiempo, el consumo de energía y materias primas disminuirá(Waste et al., 2015).

4.3.27. Reutilizar

Es el proceso de utilizar los residuos una y otra vez para los mismos o diferentes fines hasta completar su vida económica sin más tratamiento que el de limpieza y reparación(Waste et al., 2015).

4.3.28. Variable

Las variables son cualidades, propiedades o características de las personas, cosas o situaciones que cambian o varían. Las variables se clasifican en varios tipos para explicar su uso en la investigación(Quispe, 2016).

4.3.29. Variable dependiente

Una variable dependiente expresa la respuesta, el comportamiento o el resultado que el investigador desea predecir o explicar(Quispe, 2016).

4.3.30. Variable independiente

Es un estímulo o actividad que es manipulable por el investigador para crear un efecto sobre la variable dependiente(Quispe, 2016).

4.3.31. Variable métrica o cuantitativas

Son variables que toman valores numéricos y que se dividen a su vez en dos categorías: variables continuas, asociadas a procesos de medición como la edad, el peso, etc., y variables discretas, asociadas a procesos de conteo, por ejemplo, número de hijos, de casos de sida, etc(Quispe, 2016).

4.3.32. Variable no métrica o cualitativas

Son variables que representan una cualidad, no pueden medirse numéricamente, pero pueden clasificarse en una o varias categorías. A su vez las variables cualitativas se dividen en ordinales y nominales, dependiendo de que esas categorías admitan cierto orden. Por ejemplo, el estado de un paciente (leve, moderado, grave) es una variable cualitativa ordinal y la variable sexo (hombre mujer) es una variable cualitativa nominal(Quispe, 2016).

4.3.33. Varianza de error

Es la variabilidad de medidas debida a las fluctuaciones aleatorias cuya característica básica es que son autocompensantes, variando a una forma, luego en otra; ahora positiva, después negativa ahora hacia arriba, después hacia abajo(Uribe, 2003).

4.4. MARCO LEGAL

4.4.1. Legislación internacional

4.4.1.1. Convenios internacionales

Dentro de los acuerdos internacionales que hace parte Colombia se encuentra el tratado de París, el cual en 2015 con la suscripción de este sobre el Cambio Climático (ratificado en Colombia por la Ley 1844 de 2017), establece en su Artículo 2 la necesidad de “aumentar la capacidad de adaptación a los efectos adversos del cambio climático y promover la resiliencia al clima y un desarrollo con bajas emisiones de gases de efecto invernadero”. Para lograr esto, cada país cuenta con dos instrumentos principales que deben formar parte de una misma estrategia de acción, por un lado, las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC), que son instrumentos jurídicamente vinculantes para establecer la ruta de acción inmediata (corto plazo) para empezar a reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y adaptarse a los efectos del aumento de las temperaturas (Artículo 3). De otro lado, “todas las partes deberían esforzarse por formular y comunicar estrategias a largo plazo para un desarrollo con bajas emisiones de gases de efecto invernadero, teniendo presente el artículo 2 y tomando en consideración sus responsabilidades comunes pero diferenciadas y sus capacidades respectivas, a la luz de las diferentes circunstancias nacionales” (Artículo 4.19)(Gobierno de Colombia, 2021).

Para lograr dichas necesidades y objetivos, dentro del documento específicamente en la apuesta número 3, se encuentran las medidas específicas relacionadas con el uso y consumo del plástico (producción y consumo sostenible para una economía innovadora e incluyente), ya que este entra como participe a la contaminación ambiental y el cambio climático. Dicha apuesta nos indica que, todos las empresas y hogares del país harán separación de residuos en la fuente, permitiendo un mejor aprovechamiento de los residuos sólidos, contando con ejercicios pedagógicos que permitan transitar hacia nuevos hábitos en la disposición de los residuos(Gobierno de Colombia, 2021).

Por otra parte, Colombia ratificó bajo la Ley 164 de 1994 la convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático y el protocolo de Kioto bajo la ley 629 del 27 de diciembre del año 2000; en ese mismo año el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible) coordinó la elaboración de un Estudio de Estrategia Nacional para la implementación en Colombia, el cual tuvo por objetivos evaluar el potencial de Colombia frente al nuevo mercado, identificar las restricciones y limitaciones, y conforme a esto, desarrollar estrategias para superar las limitaciones, así como promover los beneficios potenciales para el país(Minambiente.gov.co, n.d.).

Por otra parte, un país que haya asumido los compromisos en virtud del Protocolo de Kioto, de reducir o limitar las emisiones, debe poner en práctica proyectos de reducción de las emisiones. A través de tales proyectos se pueden conseguir créditos por Reducciones Certificadas de las Emisiones (CER). Es el primer plan mundial de inversión y crédito ambiental de su clase, y sirve de instrumento para compensar las emisiones normalizadas CER. Gracias a este proyecto países como Colombia pueden lograr una inversión del exterior para cumplir con los propósitos trazados con el protocolo y sobre todo aumentar la calidad del medio ambiente, y con esto

incrementar la mano de obra en sectores específicos lo que afecta positivamente la calidad de vida de muchas personas(Minambiente.gov.co, n.d.).

Asimismo, también es indispensable abarcar la unión que tiene el país con la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) siendo oficialmente el 37° miembro de la organización. Los países miembros de la OCDE invitaron oficialmente a Colombia a adherirse a la organización en mayo de 2018, tras un proceso de adhesión de cinco años durante el cual se sometió a exámenes a fondo por parte de 23 comités de la OCDE e introdujo importantes reformas para ajustar su legislación, sus políticas y sus prácticas a las normas de la OCDE, en particular en lo que respecta a las cuestiones laborales, el establecimiento de una política nacional sobre los productos químicos industriales y la gestión de los desechos, entre otras(OCDE, 2020).

4.4.2. Legislación nacional

El ministerio de ambiente y desarrollo sostenible mediante la resolución 1342 de 2020, siendo la modificación de la resolución 1407 del 2018, establece la inclusión de nuevas definiciones como aprovechamiento de residuos de envases y empaques, envase multilateral, envases reutilizables y reciclaje(Minambiente, 2020). Así mismo, esta regulación implementa la obligación de las empresas transformadoras y productoras de plásticos a la inscripción ante la autoridad ambiental regional con el objetivo de llevar un indicador cuantitativo de eficiencia de retornabilidad (la fracción de envases y empaques efectivamente retornados por el productor al mercado sobre el total de envases y empaques retornables puestos en el mercado) y el compromiso del consumidor final, el cual debe separar de forma correcta en la fuente los residuos de envases y empaques(Minambiente, 2020).

Así mismo, dentro de la Estrategia Nacional de Economía Circular del Gobierno Nacional se propende por un nuevo modelo de desarrollo económico que incluya la valorización continua

de los recursos, el cierre de ciclos de materiales, agua y energía, la creación de nuevos modelos de negocio, la promoción de la simbiosis industrial y la consolidación de ciudades sostenibles, con el fin, entre otros, de optimizar la eficiencia en la producción y consumo de materiales, y reducir la huella hídrica y de carbono. Esta introducción a la Estrategia Nacional de Economía Circular describe su contexto, público, objetivo y metodología de desarrollo e implementación(MADS, 2019).

Por último, se hará mención de la documentación ya tratada en el ítem 3 de este documento que se considera como una fortaleza jurídica para este trabajo de investigación, los cuales son los protocolos CONPES y el Plan Nacional de Desarrollo (DNP)(Departamento Nacional de Planeación, n.d.).

5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo General

Obtener un material compuesto a partir de PPr, Cel de la CA y PP-g-MHBP, y evaluar el efecto acoplante del PP-g-MHBP en esta mezcla.

5.2. Objetivos específicos

- Obtener la Cel a partir de la CA.
- Determinar el efecto del PP-g-MHBP en las propiedades estructurales, térmicas, reológicas, morfológicas, absorción de agua y mecánicas de las mezclas.
- Establecer cuál es la proporción del PP-g-MHBP con la cual se obtiene la mejor interacción u homogeneidad de las mezclas.
- Obtener un prototipo (un plato pequeño) a partir del material con las mejores propiedades mecánicas.

6. METODOLOGÍA

6.1. DISEÑO EXPERIMENTAL

El ANOVA fue realizado para estimar los coeficientes de la ecuación polinomial de la respuesta y para evaluar la significancia de los coeficientes de regresión de las variables independientes. Las tablas ANOVA fueron utilizadas para determinar la importancia de los términos de primer grado, segundo grado y productos cruzados del polinomio. En este caso la adecuación del modelo se confirmó con la probabilidad (F) menor a 0.05. El presente estudio se hizo para determinar el contenido óptimo del PP-g-MHBP y validar los resultados obtenidos del experimento. Por lo tanto, se adoptó la metodología ANOVA, para determinar la relación funcional entre las variables del proceso (contenido del PP-g-MHBP) y las características de rendimiento final (T_d , ΔH_f , T_f , η , η^* , propiedades mecánicas, dureza, AbA Y EH, AH y conductividad térmica, entre otros) de los materiales compuestos de PPr, Cel y PP-g-MHBP, para lo cual se utilizó la prueba F y la ecuación polinomial. Por otra parte, como en el estudio se tiene un solo factor a varios niveles (contenido de PP-g-MHBP: 5, 10, 15 y 20 %) y que es probable que se presenten comportamientos no lineales en las variables de respuestas, entonces, el método polinomial de segundo orden se ajustó a los resultados experimentales (Journal et al., 2013) (Montgomery, 2017).

6.2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

6.2.1. Materiales

La CA fue suministrada por COAGRONORTE (figura 5), el PPr (figura 6a) fue proveído por la asociación de recicladores emprendedores de Norte de Santander. El PP-g-MHBP (figura 6b) fue proporcionado por el Grupo de Investigación en Materiales Poliméricos (GIMAPOL), este material ya fue obtenido en dicho grupo y las propiedades fisicoquímicas fueron previamente

reportadas(Caicedo & Murillo, 2019). El hidróxido de sodio (NaOH), hipoclorito de sodio (NaOCl) sulfato de cobre pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) y el ácido clorhídrico (HCl) fueron proveídos por Sigma Aldrich (Merck). Todos los materiales se emplearon sin ninguna purificación adicional.

6.2.2. Preparación de los materiales

6.2.2.1. Obtención de la Cel

La metodología empleada en este proceso fue basada en las reportadas por Yunus y colaboradores(Yunus et al., 2019) y Onoja y colaboradores(Onoja & Ahemen, 2019).

Inicialmente fue sometida la CA (figura 5) a un proceso de secado durante 24 h a una temperatura de 80 °C, luego se molió para obtener un material granulado. Posteriormente, se llevaron 100 g de material granulado y 1 L de una solución de NaOH al 18 % a un reactor de cinco bocas (provisto de un sensor de temperatura, un condensador y un agitador mecánico) y la mezcla fue mantenida a 80 °C durante 3 h y bajo agitación mecánica a 200 rpm.

Posteriormente, la mezcla fue filtrada y luego se lavó el sólido con agua destilada hasta pH neutro. Subsiguientemente, el residuo fue llevado al reactor y se mezcló con 1 L de solución de NaOCl al 2.5 % (p/v) y se calentó a 80 °C bajo agitación mecánica (200 rpm) durante 1 h. Luego se realizó la filtración y lavado con agua destilada hasta pH neutro. Finalmente, se realizó un tratamiento del sólido con 1 L de una solución de HCl al 10 % durante 2 h, bajo agitación mecánica (200 rpm) y luego se efectuó la filtración y lavado con agua destilada hasta pH neutro. El material obtenido fue llevado a una estufa y se mantuvo a 50 °C durante 24.



Figura 5. CA utilizada.

6.2.2.2. Análisis granulométrico

El análisis granulométrico permitió determinar los tamaños de los gránulos de Cel después de haber sido sometidos al proceso de molienda. Por lo tanto, una vez obtenido el material secado del último tratamiento con HCl se transfirió a un molino de bolas y se molió durante 2 horas. Finalmente, se tamizó usando tamices en acero inoxidable mallas 50, 100, 200 y 325 con el objetivo de seleccionar el tamaño de 45 μm y evitar así la dispersión de los resultados por la heterogeneidad en tamaño. Los resultados obtenidos de la preparación de la Cel se muestran en la figura 7 en la parte de los análisis y discusión de los resultados.

6.2.2.3. Preparación de las mezclas

En la figura 6 se muestra el PPr y el PP-g-MHBP empleados en la preparación de los materiales. Para la selección del PPr (Figura 6a) se tuvo en cuenta sus propiedades, la gran producción, y contaminación de este material en Norte de Santander y en el mundo. El PP-g-MHBP (figura 6b) fue escogido debido a su novedad en este sistema, ya que presenta un mayor grado de funcionalización (9.01 %)(Caicedo & Murillo, 2019) que los que se encuentran comercialmente disponibles, los cuales no superan el 3 % de AM injertado. En el caso de las condiciones de procesamiento, estas se eligieron teniendo en cuenta las temperaturas de

procesamiento que usualmente se reportan para estos materiales (Y. K. Kim, 2012; Syduzzaman et al., 2020). Las proporciones de PPr y Cel fueron seleccionadas de acuerdo a lo usualmente reportado en la literatura para estas mezclas y en el caso de la proporción del PP-g-MHBP, también se hizo lo mismo.

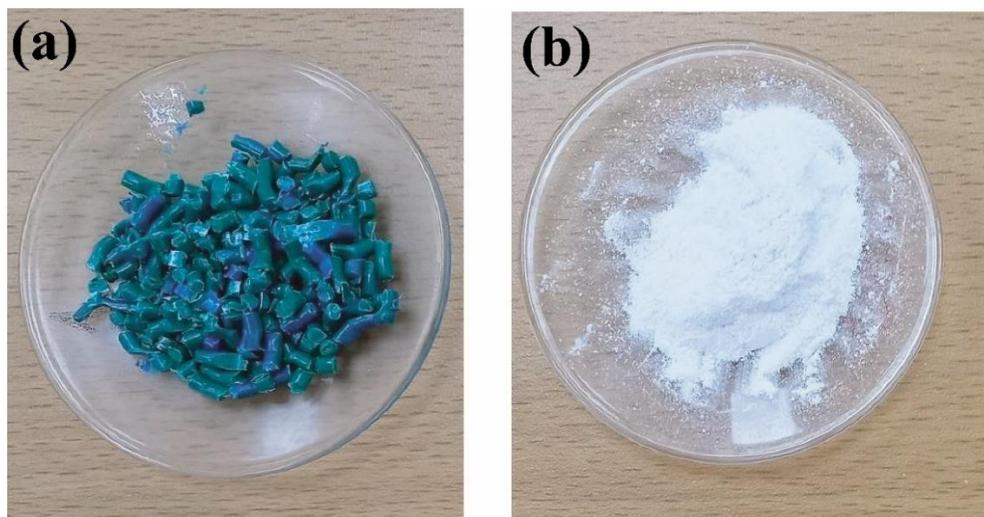


Figura 6. a) PPr. b) PP-g-MHBP

Inicialmente fue obtenida la mezcla control, para ello fueron llevadas las respectivas proporciones de PPr (70 %) y Cel (30 %) cuyo tamaño de partícula fue de $45\mu\text{m}$ a un reómetro de torque Thermo Scientific HAAKE Rheomix, el cual se mantuvo a $190\text{ }^{\circ}\text{C}$, una velocidad de 50 rpm y un tiempo de mezclado de 7 minutos. Posteriormente, fueron obtenidos los materiales compuestos con el PP-g-MHBP (5, 10, 15 y 20 % con respecto al PPr y a la Cel) bajo las mismas condiciones de la mezcla control. Es importante aclarar que las proporciones de PPr, Cel y PP-g-MHBP fueron escogidas teniendo en cuenta que están en el rango reportado por diferentes estudios donde se han empleado agentes de acoplamiento o compatibilizantes (Jin Yang, Shaorong Lu, Qiyun Luo, Laifu Song, Yuqi Li, 2016; Kind Code & Al., 2019; Ryu et al., 2020; Ummartyotin & Pechyen, 2016).

6.2.2.4. Obtención del prototipo

El material obtenido con las mejores propiedades mecánicas se empleó para obtener un plato pequeño (moldeo por compresión). Para ello, se utilizó una prensa con calentamiento y presión (elaborada por la marca INDELPA S.A.S). La temperatura utilizada fue de 190 °C y la presión de 1000 Psi. Las medidas del molde fueron: diámetro interno: 8,8 cm, diámetro externo: 10,3 cm y su espesor: 1,2 cm.

6.2.3. Caracterización de los materiales

A la Cel se le realizaron análisis de IR, difracción de rayos X (DRX), Análisis termogravimétrico (TGA), DSC y SEM. En el caso de las demás muestras, a estas se le efectuaron todos estos análisis y los demás mencionados en este numeral.

6.2.3.1. Análisis IR

Este análisis se realizó para evidenciar las interacciones entre los componentes, ya que se espera que haya desplazamiento de señales. Todas las mezclas fueron analizadas por reflectancia total atenuada en un espectrómetro Shimadzu Prestige 21, realizando 16 barridos y empleando una resolución de 4 cm⁻¹ en un rango de número de onda entre 400 y 4000 cm⁻¹.

6.2.3.2. Análisis de DRX

Este análisis se realizó a la Cel, al PPr y a todas las mezclas, para identificar las fases cristalinas y evidenciar los cambios en ellas. Los difractogramas de las mezclas fueron obtenidos en un difractómetro PANalytical X'Pert PRO MPD, utilizando radiación de Cu K α = 1,5406 Å. El voltaje y la corriente de operación fueron respectivamente 45 kV y 40 mA. Los difractogramas se obtuvieron en un intervalo de ángulo de Bragg (2 θ) entre 4 y 70°. Los análisis de la CA y la Cel se hicieron a los gránulos y en el caso de las mezclas y el PPr, estos se realizaron a películas, las cuales se obtuvieron en una prensa a 200 °C y una presión 1500 Psi.

6.2.3.3. Análisis TGA

Este análisis permitió determinar la estabilidad térmica de todas las mezclas obtenidas. El análisis fue realizado en un equipo TA Instruments SDT Q-600 a una velocidad de calentamiento de 20 °C/min. desde temperatura ambiente hasta 600 °C, empleando una purga de nitrógeno.

6.2.3.4. Análisis de DSC

Este análisis se hizo para identificar las transiciones térmicas de los materiales. Este análisis se efectuó en un equipo TA Instruments SDT Q-600 a una velocidad de calentamiento de 20 °C/min. en un rango de temperaturas entre 30 y 250 °C usando una purga de nitrógeno.

6.2.3.5. Análisis reológico

Este análisis se realizó a todas las mezclas obtenidas, para evaluar las propiedades viscoelásticas de los materiales. Los análisis reológicos fueron efectuados en un reómetro rotacional marca Anton Paar a una temperatura de 175, 180, 190 y 200 °C, bajo condiciones estáticas (análisis rotacional) en un rango de $\dot{\gamma}$ entre 0,001 y 1000 s⁻¹ empleando una frecuencia angular (ω) de 1 Hz. Los análisis oscilatorios fueron hechos en la región viscoelástica lineal, para ello previamente se hizo un análisis de amplitud *sweep*, para determinar la región viscoelástica lineal. Los análisis oscilatorios se efectuaron en un rango de ω entre 0,01 y 100 Hz, una deformación inferior a la crítica identificada en los análisis de amplitud *sweep* y a una temperatura de 200 °C.

6.2.3.6. Análisis de SEM

El análisis de SEM permitió evaluar el tipo de fractura que experimentaron las mezclas. Además, se determinó el efecto compatibilizante o acoplante, mediante la observación de las fases apreciadas en las micrografías. Los análisis de SEM de las muestras criofracturadas con nitrógeno y cubiertas con oro, fueron realizados en un microscopio electrónico de barrido marca Jeol JSM-6490LV. Se empleó una aceleración del voltaje del haz de 10 a 20 kV.

6.2.3.7. Absorción de humedad (AH)

Este análisis permitió evaluar la AH de las muestras. Para este análisis se emplearon muestras cuya área fue de 1cm *1cm. Las muestras se colocaron en una estufa marca Binder a 100°C durante 12 h, después fueron pesadas y finalmente se acondicionaron en un desecador conteniendo CuSO₄ · 5H₂O (humedad relativa de 98%). El peso de las muestras fue calculado de acuerdo a la siguiente expresión:

$$AH = \frac{Mt - Mo}{Mo} * 100 \quad (2)$$

Donde Mt es el peso de la muestra en el tiempo t y Mo es el peso de la muestra antes de la exposición a la humedad relativa de 98%. Este análisis se realizó por duplicado

6.2.3.8. Absorción de agua (AbA) y el espesor de hinchamiento (EH)

Este análisis se realizó para evaluar la resistencia de las mezclas al agua y se hizo basado en la norma ASTM D 570 (João et al., 2020). Las dimensiones del molde fueron las siguientes: largo (L): 27 mm, ancho (A) 22 mm y espesor (E) 4 mm. Las probetas se obtuvieron en una prensa a 200 °C y una presión de 1500 Psi. Antes de la prueba, se midió el peso y las dimensiones de las probetas (longitud, ancho y espesor). Las probetas fueron sumergidas en agua destilada a 25 °C por 24 h. Los pesos de las probetas antes y después fueron calculados para la determinación cuantitativa del AbA y EH. Para este análisis, se realizaron 4 repeticiones. La AbA fue calculada empleando la siguiente ecuación:

$$AbA = 100 \frac{W_f - W_a}{W_a} \quad (3)$$

Donde W_f , es el peso de la probeta húmeda y W_a , es el peso de la probeta antes de la inmersión en agua. Los valores de EH, en porcentaje, fueron calculados usando la siguiente ecuación:

$$EH = 100 \frac{L_f - L_a}{L_a} \quad (4)$$

Donde L_f , es la longitud de la muestra a un tiempo t y L_a es la longitud inicial de la probeta.

6.2.3.9. Análisis de MFI

Este análisis se realizó para determinar el MFI de las mezclas. Este análisis se hizo bajo la norma ASTM D-1238 (ASTM, 2010). Este análisis se efectuó por triplicado.

6.2.3.10. Análisis de dureza

El análisis fue realizado para determinar la resistencia a la penetración de las mezclas de acuerdo a la norma ASTM D-2240 (ASTM-D2240, 2017). Este análisis se realizó por cuadruplicado.

6.2.3.11. Pruebas de impacto

Este análisis permitió determinar la capacidad de absorción de energía de las mezclas y su posible aplicación como parachoques. Este análisis se realizó de acuerdo a la norma ASTM D-256 (Molding & Materials, 2004). Para ello se obtuvieron probetas bajo norma empleando las mismas condiciones de procesamiento de la sección 6.2.3.7. Estos análisis se realizaron por triplicado.

6.2.3.12. Tracción

Este análisis permitió determinar las propiedades mecánicas de las mezclas. Para los ensayos de tracción de las muestras, se emplearon probetas tipo I, las cuales se obtuvieron en una prensa bajo las mismas condiciones utilizadas para los análisis de AbA. Los ensayos de tracción, se realizaron bajo la norma ASTM D-638 a una velocidad de 5 mm/min (ASTM D638, 2014). Estos análisis se efectuaron por quintuplicado.

6.2.3.13. Conductividad térmica

Las conductividades térmicas de las muestras fueron determinadas en un equipo P.A Hilton, el cual está basado en la técnica de fuente plana transigente. Dos muestras con 25 mm de

diámetro y 4 mm de espesor fueron puestas en el disco sensor Kapton. La cantidad de calor transferido (Q) fue de 9 W. Los análisis se llevaron a cabo por duplicado.

7. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

7.1. Obtención de la Cel

En la figura 7 se presentan las fotografías de los materiales obtenidos en el proceso de extracción de la Cel a partir de la CA. Aquí se pueden apreciar las diferentes coloraciones de los materiales antes y después de cada proceso. La Cel presentó menor coloración que los materiales obtenidos en los anteriores procesos.

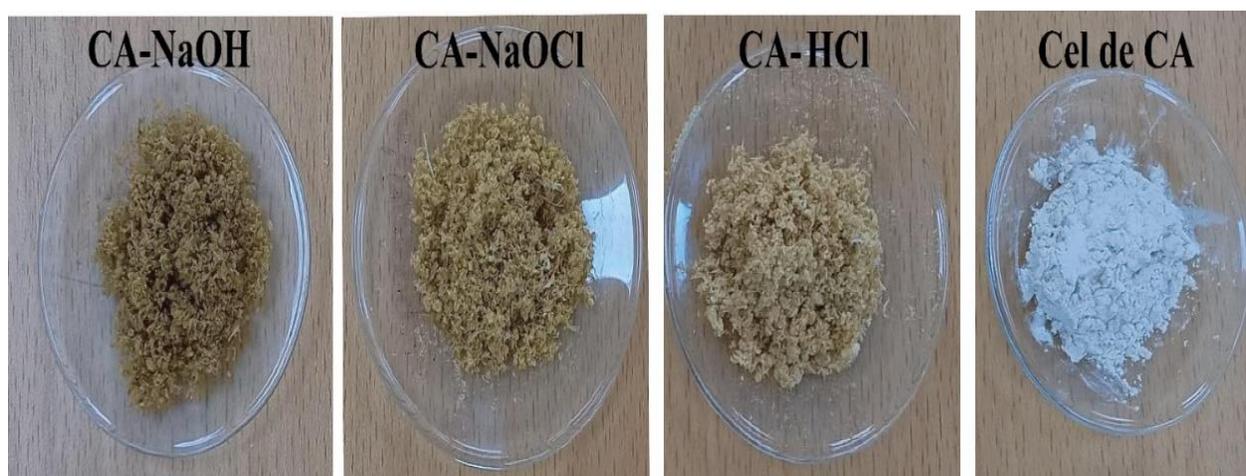


Figura 7. Proceso de obtención de la Cel de CA a partir de la CA.

7.2. Análisis granulométrico

El análisis granulométrico (Tabla 1) mostró que los gránulos presentaron tamaños de 300 μm (3,50 %), 150 μm (6,46 %), 75 μm (12,88 %), 45 μm (20,27 %) y menores a 45 μm (56,90 %).

Tabla 1. Resultados del análisis granulométrico

Tipo de poro (μ)	Retenido (g)	Porcentaje de retención (%)	Retenido acumulado (%)	%Porcentaje pasante
300	1,845	3,50	3,50	96,50
150	3,41	6,46	9,96	90,04
75	6,796	12,88	22,83	77,17
45	10,701	20,27	43,10	56,90
≤ 45	30,032	56,90	100,00	0,00
Total	52,784	100,00		

Al no disponer de tamices para seleccionar tamaños de gránulos menores a 45 μm , entonces se decidió emplear para la preparación de los materiales gránulos de 45 μm , para evitar la dispersión en los resultados debido a la heterogeneidad en el tamaño de los gránulos y porque con este tamaño se pueden obtener materiales con mejores propiedades mecánicas que con los de mayor tamaño, ya que tienen un área superficial más grande. Los resultados obtenidos permiten evidenciar el cumplimiento del primer objetivo específico del trabajo de grado (obtener la Cel a partir de CA, lo cual también se permitirá evidenciar más adelante en la discusión de los resultados de análisis de IR).

7.2. Reometría de torque

En la figura 8 se presenta el comportamiento reológico de los materiales durante el procesamiento. La figura 8a y la figura 8b muestran respectivamente las curvas de torque vs tiempo y de temperatura vs tiempo. En la figura 8a se observa que la muestra PPr/Cel0 inicialmente presentó menor resistencia al mezclado que las obtenidas con el PP-g-MHBP. Así mismo, se evidenció un ligero incremento en el valor máximo del torque con el aumento de la proporción del PP-g-MHBP, estos comportamientos posiblemente están asociados con las interacciones entre el PP-g-MHBP y los demás componentes de la mezcla, y a la presencia de éste (material termoplástico).

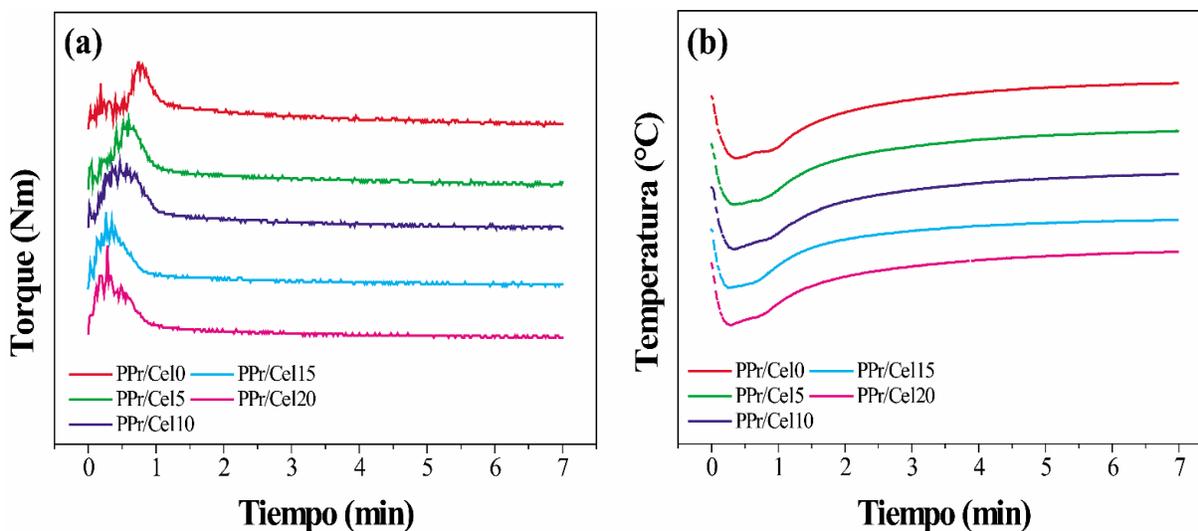


Figura 8. a) Curvas de torque vs tiempo. b) Curvas de temperatura vs tiempo.

Por otra parte, se puede apreciar, que en todos los casos se presentó un aumento y posterior reducción en el valor del torque, lo cual fue debido a la fusión de los materiales termoplásticos (Ismail et al., 2011) (PPr, PP-g-MHBP). El mismo comportamiento ha sido observado por otros investigadores para materiales compuestos (Ismail et al., 2011), mezclas poliméricas (Santiago et al., 2018) y polímeros termoplásticos (Caicedo & Murillo, 2019). La estabilización del torque fue menor para las mezclas obtenidas con PP-g-MHBP y ello se redujo con el contenido de éste (PPr/Cel0 \geq 6,06 min, PPr/Cel5 = 5,08 min, PPr/Cel10 = 4,53 min, PPr/Cel15 = 3,93 min y PPr/Cel20 = 3,20 min). Estos resultados indican que el PP-g-MHBP mejoró la procesabilidad de los materiales, lo cual posiblemente se debió a su alta fluidez, ya que este material (Caicedo & Murillo, 2019) tiene una baja viscosidad. Los resultados obtenidos son muy importantes, ya que la presencia del PP-g-MHBP redujo los tiempos de procesamiento, lo cual se reflejará en una reducción de costos.

Todas las muestras presentaron una reducción en la temperatura (figura 8b), lo cual fue debido a que el proceso de fusión es endotérmico, una vez se ha llevado a cabo este proceso,

entonces la temperatura incrementó hasta alcanzar el valor inicial al cual se había acondicionado el equipo.

Los resultados permiten inferir que con la proporción del 20 % de PP-g-MHBP (PPr/Cel20) se obtiene el menor tiempo de procesamiento, ya que se observó un menor tiempo de estabilización del torque.

7.3. Análisis IR

En la figura 9 se presentan los espectros IR de las muestras tratadas y no tratadas de CA, y la Cel (figura 9a), y las de los materiales compuestos de PPr/Cel (figura 9b). En el espectro de la cascarilla se observan diferentes bandas de absorción, la señal a 3338 cm^{-1} corresponde a la vibración del estiramiento del enlace O-H (Shukla & Bharadvaja, 2015), la señal a 2920 cm^{-1} está asociada con la vibración de estiramiento de los enlaces de $-\text{CH}_2$ (L. Huang, Wu, Wang, & Wolcott, 2020a), la señal a 2854 cm^{-1} corresponde a la vibración de los enlaces de $-\text{CH}$ de la hemicelulosa (Huner, 2017), la señal a 1730 cm^{-1} es debida a la vibración de estiramiento de grupos carbonilo de la hemicelulosa (Ahmad et al., 2016), pectina y ceras (Elkhaoulani et al., 2013), la señal a 1635 cm^{-1} es atribuida a la vibración de enlaces O-H (agua presente en la estructura) (Ahmad et al., 2016), la señal a 1377 cm^{-1} está asociada con la vibración de flexión del enlace C-O-H (Huner, 2017), alrededor de 1555 cm^{-1} se observan unos hombros los cuales corresponden a enlaces de la sílice presente en la CA (Huner, 2017), la señal a 1510 cm^{-1} está asociada con la vibración de los dobles enlaces del anillo aromático (lignina y hemicelulosa) (Rosa et al., 2012). La señal localizada a 1033 cm^{-1} está relacionada con la vibración de los enlaces C-O-C del enlace glicosídico 1,4- β del anillo de la piranosa que contiene la estructura de la Cel (Yunus, 2019). La señal a 798 cm^{-1} es debida a la absorción del enlace Si-O-Si (Huner, 2017; Ludueña et al., 2011) y la señal a 457 cm^{-1} corresponde a la vibración del enlace O-Si-O (Ludueña et al., 2011).

En el espectro IR de la muestra tratada con NaOH se observó la ausencia de la señal debida a grupos carbonilo de hemicelulosa y la presencia de la señal a 1510 cm^{-1} de anillos aromáticos de la lignina. Esta señal presentó una menor intensidad que la observada para la CA no tratada, lo cual indica que disminuyó el contenido de lignina en este material, lo cual también se evidenció por la coloración inicial de esta muestra (café) debida a la lignina residual (Yunus, 2019). Además, se observaron unos desplazamientos de algunas señales (grupos OH, vibraciones C-H).

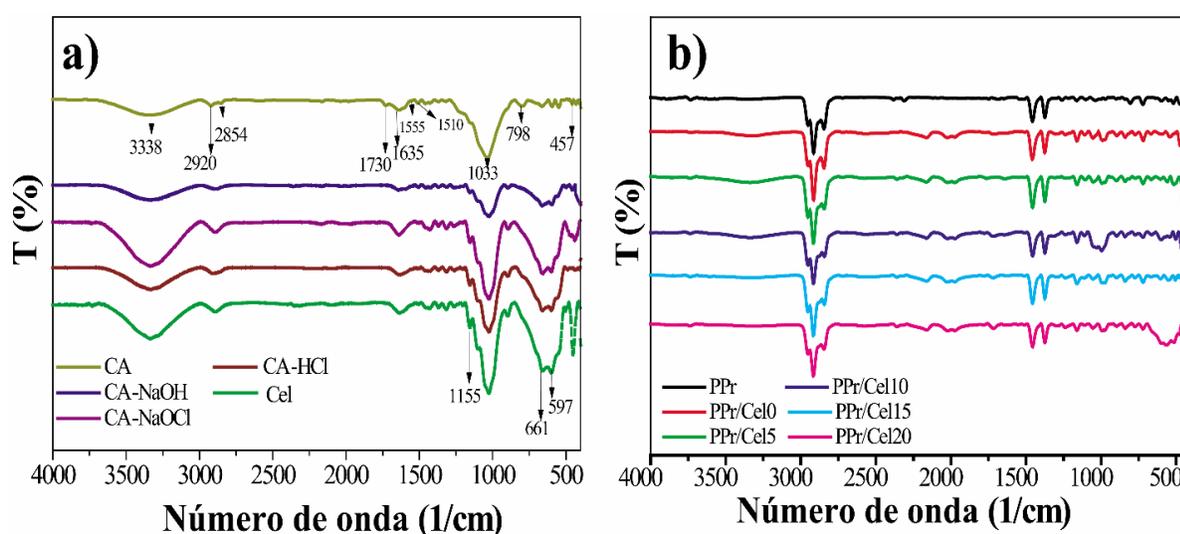


Figura 9. a) Espectros de IR de las muestras tratadas y no tratadas de CA, y la Cel. b) Espectros de IR de los materiales compuestos de PPr/Cel.

El hombro que aparecía en la CA a 1155 cm^{-1} , se transformó en un pico de mayor intensidad lo cual está asociado con un mayor contenido de sílice, esto se atribuye a la eliminación de hemicelulosa (Huner, 2017). Además, esto es corroborado por el incremento de la intensidad de las señales observadas. Los resultados también indican que el tratamiento con NaOH no afectó la estructura de la Cel, ya que no hay diferencias significativas en las muestras tratadas (Yuanita et al., 2017). Las dos señales que aparecen a 661 cm^{-1} y 597 cm^{-1} también se apreciaron para la CA, pero con menor intensidad y menores valores de número de onda lo cual

posiblemente se debió a la remoción de hemicelulosa y parte de la lignina o que el NaOH reaccionó con la sílice (Panthapulakkal et al., 2005).

El espectro IR de las mezclas obtenidas con y sin PP-g-MHBP (figura 9b) no presentaron diferencias significativas en cuanto a intensidad o el desplazamiento de las señales, lo mismo ha sido observado para mezclas de PP/Cel preparadas con PP-g-AM (Qiu et al., 2005). Esto ha sido atribuido a una baja interacción, la cual no es detectada por análisis IR. Por lo tanto, los análisis de SEM permitirán evidenciar la efectividad del PP-g-MHBP en el mejoramiento de la adhesión interfacial entre el PPr y la Cel. Sin embargo, se evidenció un incremento y desplazamiento de la señal debida a la vibración del enlace O-Si-O.

7.4. DRX

En la figura 10 se presentan los difractogramas de DRX de la Cel (figura 10a), el PPr y las mezclas de PPr/Cel (figura 10b). La Cel presentó tres picos ($2\theta=15,57^\circ$, $22,46^\circ$ y $34,65^\circ$), los cuales han sido respectivamente atribuidos a planos cristalográficos (110), (002) y (004) (Dahlem et al., 2019; Rasheed et al., 2020). La presencia de estos planos indica que el tipo de Cel es I (Dahlem et al., 2019; Rasheed et al., 2020). Los mismos picos han sido observados para Cel extraída de fibras de bamboo (Rasheed et al., 2020). El pico de alta intensidad a $2\theta=22,46^\circ$ indica que la Cel tiene un alto grado de cristalinidad (Rasheed et al., 2020), lo cual se atribuye a que la hidrólisis ácida solubilizó las regiones amorfas (Dahlem et al., 2019). El PPr presentó diferentes señales agudas (figura 10b) a $2\theta=14,40^\circ$ (110), $17,20^\circ$ (140), $18,81^\circ$ (130), $21,88^\circ$ (111), las cuales son atribuidas a las reflexiones de los planos de la fase α del PP (L. Huang, Wu, Wang, & Wolcott, 2020b). Esta es la fase cristalina más abundante y estable del PP (Franciszczak et al., 2019). Además, la ausencia del pico a $2\theta=16,3^\circ$ (300, 301) indica la ausencia de la fase β (Ariyoshi et al., 2021). Los picos a $24,15^\circ$ (110), $29,71^\circ$ y $31,46^\circ$ (020) corresponden a los

planos de difracción del sistema cristalino ortorrómbico del polietileno(D. Wwaang et al., 2019) presente en el PPr.

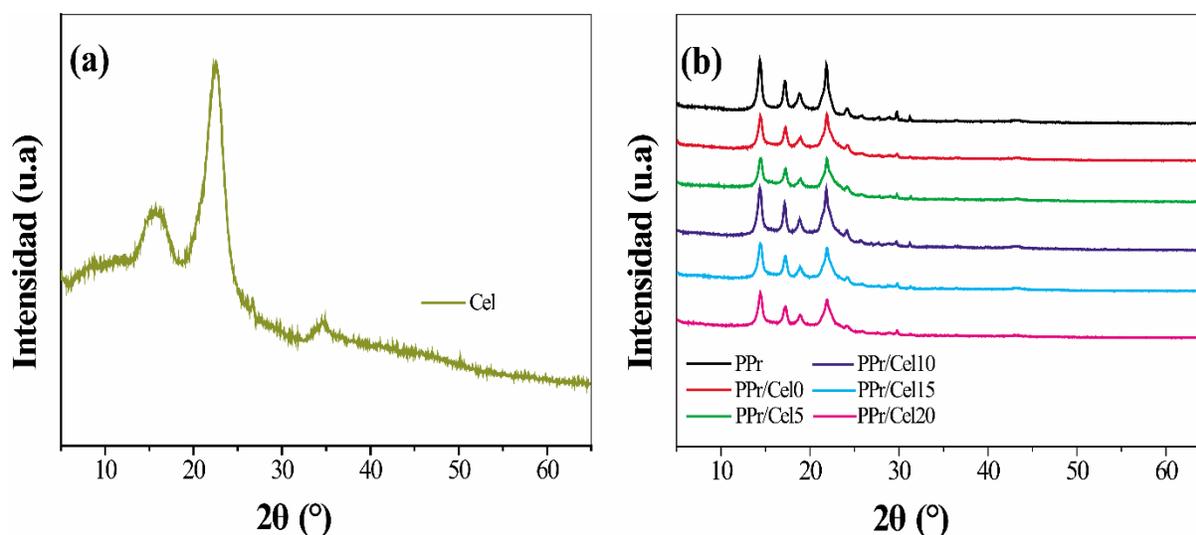


Figura 10. a) Difractogramas de DRX de la Cel. **b)** Difractogramas del PPr y las mezclas de PPr/Cel.

La muestra PPr/Cel0 (figura 10b) presentó las mismas señales que el PPr, pero la intensidad se redujo, el mismo comportamiento fue reportado para mezclas de PP/Cel(Ariyoshi et al., 2021; Ryu et al., 2020), esto permite inferir que se presentó una disminución en la cristalinidad del PP debido a la presencia de la Cel. Por otra parte, en los difractogramas de las mezclas de PP/Cel obtenidas con y sin PP-g-MHBP no se evidenciaron los picos de la Cel, lo cual posiblemente fue debido a la presencia del PPr, al solapamiento de la Cel con el PPr o a interacciones que se llevaron a cabo. En las muestras preparadas con el PP-g-MHBP no se observó un desplazamiento de las señales con respecto a las mismas evidenciadas para la muestra PPr/Cel0, pero si se apreciaron ligeros cambios en la intensidad de algunas de ellas, las cuales fueron independientes de la proporción del PP-g-MHBP, esto posiblemente fue debido a un diferente grado de interacción entre el PPr y el PP-g-MHBP, y entre la Cel y el PP-g-MHBP (Figura 11). En ninguna mezcla se evidenció la formación de la fase β por lo tanto, la Cel ni el

PP-g-MHBP actuaron como agentes nucleantes para el PPr, ya que a estos se ha atribuido la presencia de dicha fase (Franciszczak et al., 2019; J. Huang et al., 2017), lo cual si ha sido evidenciado para mezclas de PP/Cel (L. Huang, Wu, Wang, & Wolcott, 2020b). Finalmente, se puede concluir que la Cel afectó la cristalinidad del PPr, pero las fases cristalinas de las mezclas de PPr/Cel obtenidas con PP-g-MHBP fueron afectadas ligeramente.

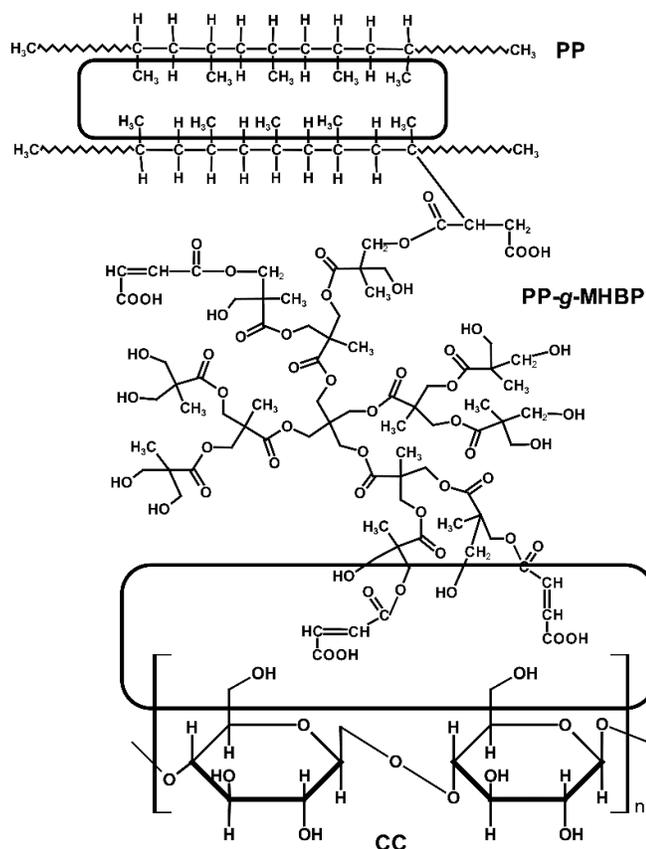


Figura 11. Representación esquemática de la interacción entre el PPr, la Cel y el PP-g-MHBP.

7.5. TGA

En la figura 12 se muestran los termogramas de TGA. La figura 12a presenta la curva de la pérdida de peso vs temperatura y la figura 12b exhibe la curva de la derivada de peso vs temperatura. La Cel exhibió menor estabilidad térmica que el PPr y la mezcla PPr/Cel0 (figura 12). La descomposición térmica de la Cel se dio en varios pasos, el primero ha sido asignado a la

disociación de enlaces glicosídicos causada por la transglicosilación (no produce pérdida de masa), el segundo paso se debe a la deshidratación del anillo de la piranosa para producir anhidrocelulosa (se presenta una pérdida de masa)(Spoljaric et al., 2009). Además, la degradación de la piranosa produce CO₂, gases y compuestos cíclicos insaturados(Spoljaric et al., 2009). La tabla 2 muestra los valores de las temperaturas cuando se ha degradado el 10 (T₁₀), el 20 (T₂₀) y el 50 % (T₅₀) de las muestras. La T₂₀ y la T₅₀ de la Cel son comparables con las reportadas respectivamente para nanofibras de Cel (310.47 °C)(Ravindran et al., 2019) y Cel microcristalina (350 °C) (Spoljaric et al., 2009). Sin embargo, la T₁₀ es comparable con la reportada para una nanofibra de Cel (235 °C)(Tabak et al., 2020). Además, se ha reportado que la descomposición térmica de la Cel se lleva a cabo entre 275 y 350 °C(Vineta Srebrenkoska, Gordana Bogoeva Gaceva, Maurizio Avella & Gentile, 2008). Sin embargo, otros autores afirman que materiales celulósicos empiezan a degradarse desde los 200 °C(Zander et al., 2019).

El PPr presentó una descomposición térmica en un solo paso, la cual ha sido atribuida a un mecanismo de descomposición térmica donde ocurre la ruptura de la cadena y formación de radicales(Raghu et al., 2018). Por otra parte, como era de esperarse, los materiales compuestos presentaron una cinética de descomposición térmica en dos pasos (figura 12), la primera pérdida es atribuida a la Cel y la segunda al PPr y al PP-g-MHBP (T₂₀ y T₅₀ fueron respectivamente 409 y 470 °C)(Caicedo & Murillo, 2019; Raghu et al., 2018). La descomposición térmica en dos pasos también ha sido observada para mezclas de PP/Cel microcristalina(Spoljaric et al., 2009) y PP/CA(Pinzón et al., 2020; Rosa et al., 2009). Las mezclas obtenidas con PP-g-MHBP presentaron mayor valor de T₁₀ y T₂₀ que la mezcla PPr/Cel₀, pero los valores de la T₅₀ fueron comparables. Además, la T₁₀ y T₅₀ no mostraron una tendencia con el contenido del PP-g-MHBP, pero en la T₂₀ solo se observó ésta en un rango de concentraciones del PP-g-MHBP entre el 5 y el 15 %. Dichos comportamientos están asociados con los diferentes mecanismos de

descomposición térmica exhibidos por la Cel y el PPr en presencia del PP-g-MHBP, la formación de una red polimérica interpenetrada y a la interacción entre los componentes de la mezcla (Jin Yang, Shaorong Lu, Qiyun Luo, Laifu Song, Yuqi Li, 2016; Vineta Srebrenkoska, Gordana Bogoeva Gaceva, Maurizio Avella & Gentile, 2008). Lo anterior es corroborado por los resultados exhibidos por la temperatura a la máxima descomposición ($T_{\max 1}$ y $T_{\max 2}$) que se aprecian en la Tabla 2 y la figura 12b, donde se puede observar una similitud en los valores de las muestras obtenidas con y sin PP-g-MHBP. Por otra parte, los valores de T_{10} y T_{20} de las mezclas preparadas con PP-g-MHBP fueron superiores a los de la mezcla PP/Cel0, lo cual indica que la cantidad del PP-g-MHBP es suficiente para mantener la red polimérica interpenetrada (Vineta Srebrenkoska, Gordana Bogoeva Gaceva, Maurizio Avella & Gentile, 2008).

Los valores de las temperaturas a la cual ocurre la primera (T_{m1}) y la segunda (T_{m2}) descomposición térmica y los valores del porcentaje de la pérdida de masa de las muestras a estas temperaturas (W_1 y W_2) aparecen en la tabla 2. Los valores de T_{m1} y T_{m2} fueron independientes de la cantidad de PP-g-MHBP. Además, fueron diferentes a los de la Cel y el PPr, lo cual indica que se presentó una interacción entre los componentes. Por otra parte, también se puede apreciar que los valores de W_1 y W_2 fueron diferentes al contenido de Cel y de PPr, lo cual se atribuye a la presencia del PP-g-MHBP. A partir de estos resultados, se puede inferir que el PP-g-MHBP mejoró la estabilidad térmica de las mezclas.

Sosa y colaboradores tampoco observaron una tendencia en el comportamiento de la estabilidad térmica de mezclas del PP/CA preparadas empleando PP-g-AM como agente de acoplamiento (Rosa et al., 2009). Sin embargo, los estudios de Raghu y colaboradores relacionados con estas mezclas evidenciaron un comportamiento opuesto al reportado por Sosa y colaboradores (Raghu et al., 2018). El mejoramiento de la estabilidad térmica de las mezclas obtenidas usando un agente de acoplamiento con respecto a las preparadas sin éste ha sido

atribuido al aumento de la adhesión interfacial entre la matriz polimérica y el relleno (Cel)(Duy Tran et al., 2013). Además, se ha reportado que, durante el proceso de descomposición térmica, el PP se encuentra rodeando al relleno (Cel), reduciendo así el contacto entre ésta y la fuente de calor, lo cual mejora la estabilidad térmica(Duy Tran et al., 2013).

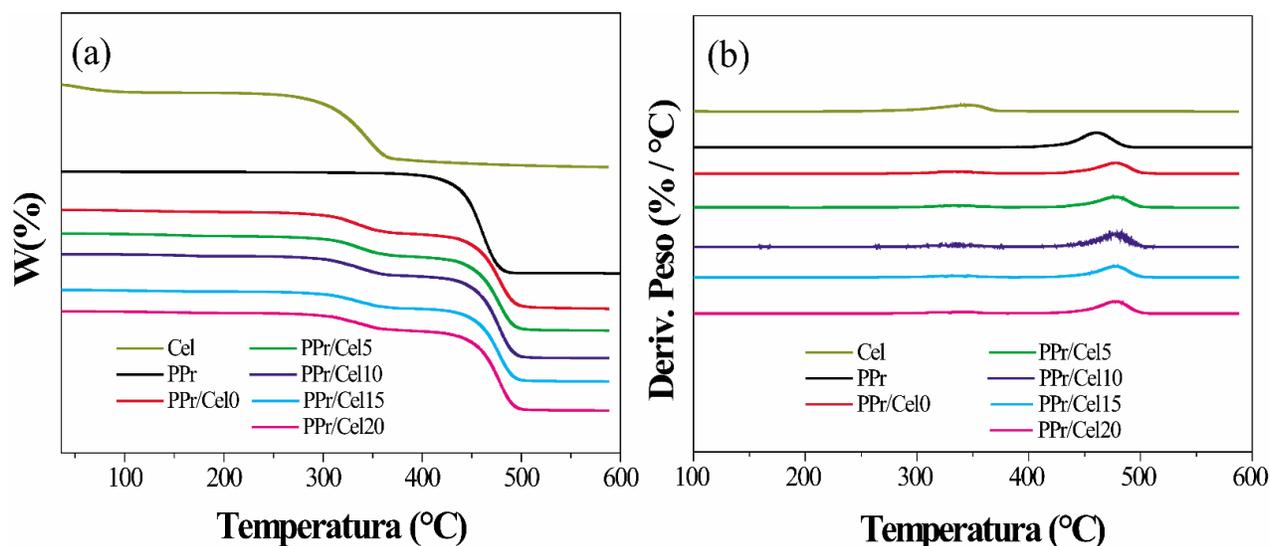


Figura 12. a) Curva de la pérdida de peso vs temperatura. b) Curva de la derivada de peso vs temperatura.

La Cel presentó el mayor porcentaje de residuo (W_R) y el PPr el menor, lo cual se debe a la mayor estabilidad de los enlaces presentes en la Cel. En el caso de los materiales compuestos preparados con y sin PP-g-MHBP, solo la mezcla preparada con el 20 % de PP-g-MHBP exhibió menor W_R que la muestra PPr/Cel0, lo cual pudo ser debido a la mayor cantidad de PP-g-MHBP. Sin embargo, no se observó una tendencia en W_R con el contenido de PP-g-MHBP, lo cual probablemente fue debido a diferentes mecanismos de degradación térmica o interacción entre los componentes.

Los valores de T_{10} y T_{50} de las mezclas obtenidas en el presente estudio son inferiores a las reportadas para mezclas de PP/nanofibra de Cel preparadas con PP-g-AM, cuyos valores fueron respectivamente superiores a 442 y 484 °C (Tabak et al., 2020). Además, también son

menores a los reportados para mezclas del PP/microcelulosa cristalina preparadas con PP-g-AM (mayores a 474 °C)(Spoljaric et al., 2009). Sin embargo, son mayores a los obtenidos para una mezcla de PP/Cel microcristalina preparadas usando como agente de acoplamiento ácido tánico modificado con un hidroxistearato, cuyos valores de T_{10} , T_{50} y T_{max} fueron respectivamente 260, 362 y 365 °C(Jin Yang, Shaorong Lu, Qiyun Luo, Laifu Song, Yuqi Li, 2016).

Tabla 2. Resultados del TGA.

Muestras	T₁₀ (°C)	T₂₀ (°C)	T₅₀ (°C)	T_{max1} (°C)	T_{max2} (°C)	T_{m1} (°C)	T_{m2} (°C)	W₁ (%)	W₂ (%)	W_{Re} (%)
Cel	230	300	341	56	344	218		68		32
PPr	426	440	457		461		350		99	1
PPr/Cel0	322	354	467	333	478	248	409	22	69	9
PPr/Cel5	325	361	467	336	476	254	396	19	71	10
PPr/Cel10	325	366	467	332	477	261	421	16	68	15
PPr/Cel15	330	421	471	335	477	241	417	17	67	14
PPr/Cel20	330	409	469	336	478	222	418	18	75	7

Los resultados permiten concluir que el PP-g-MHBP mejoró la estabilidad térmica de las mezclas y que la proporción óptima para mejorar dicha propiedad es la del 15% (PP/Cel15).

7.6. DSC

La figura 13 muestra los termogramas de DSC de la Cel, el PPr y las mezclas obtenidas con y sin PP-g-MHBP. La Cel presentó un pico endotérmico, el cual está asociado con la evaporación de la humedad(El-Sakhawy et al., 2019). El PPr mostró dos picos endotérmicos (fusiones), el primer pico (T_{f1}) está asociado con la presencia de polietileno, y el segundo (T_{f2}) con el PPr(N. H. Lazim, 2017). Lo mismo fue observado para un PPr(Zander et al., 2019). El polietileno presente corresponde al de baja densidad (PEBD), ya que el de alta densidad (PEAD) tiene una T_f igual o mayor a 130 °C(Juan et al., 2020). La mezcla PPr/Cel0 también mostró los mismos picos endotérmicos, pero a mayor temperatura (Tabla 3).

Esto indica que, en esta mezcla, la Cel mejoró el empaquetamiento estructural, y el espesor y tamaño de los cristales del PPr (Tabak et al., 2020), lo cual ya ha sido observado para mezclas de PP/Cel (Bogataj et al., 2019; Ummartyotin & Pechyen, 2016; Zander et al., 2019). Por otra parte, las mezclas preparadas con PP-g-MHBP presentaron los mismos picos endotérmicos.

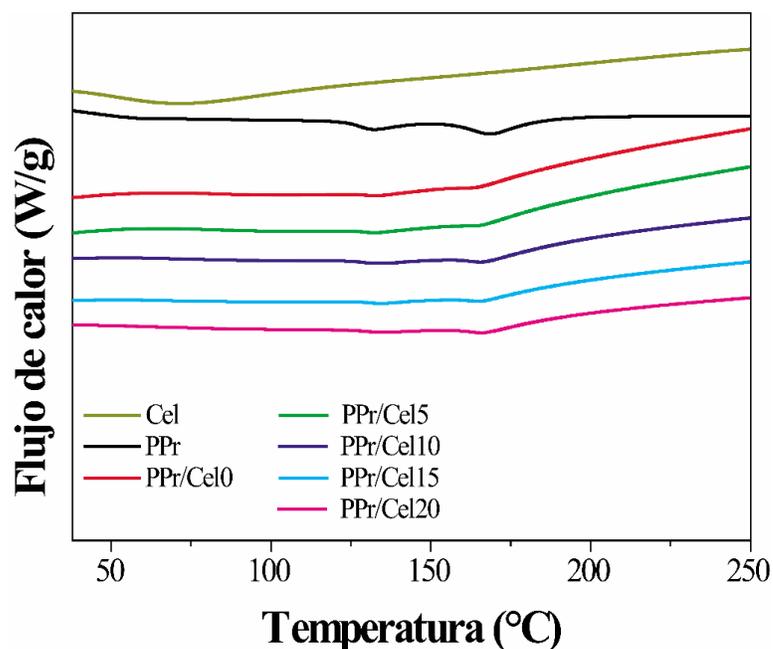


Figura 13. Termogramas de DSC de la Cel, el PPr y las mezclas obtenidas con y sin PP-g-MHBP.

La T_{f1} y la T_{f2} de estas mezclas (Tabla 3) son muy similares a las de la mezcla PPr/Cel0, lo cual indica que el PP-g-MHBP no tiene un efecto importante en este proceso de fusión, aunque la T_f de éste es de 159 °C (Caicedo & Murillo, 2019). El mismo comportamiento fue obtenido para mezclas del PP/Cel microcristalina preparadas usando PP-g-AM como agente de acoplamiento (Spoljaric et al., 2009) y mezclas de PP/fibras naturales (CA, madera y kenaf) (Tajvidi & Takemura, 2010).

En la tabla 3 se presentan las ΔH_f asociados con las T_{f1} (ΔH_{f1} , PEBD) y T_{f2} (ΔH_{f2} , PP) de las muestras. El PPr presentó los mayores valores de ΔH_{f1} y ΔH_{f2} , esto indica que exhibió la

mayor cristalinidad. Por otra parte, excepto para la mezcla PPr/Cel5, la mezcla PPr/Cel0 mostró menor valor de ΔH_{f1} que las mezclas obtenidas con PP-g-MHBP. Esto infiere que la cristalinidad de las mezclas siguió en algunos casos el mismo orden en lo referente a la asociada con el PEBD presente en las mismas. Este comportamiento es posiblemente debido a que, en esta mezcla, la pequeña proporción de PEBD presente exhibió una menor dispersión y adhesión interfacial (H. S. Kim et al., 2007; Zander et al., 2019). En el caso de la ΔH_{f2} , los valores de las muestras obtenidas con PP-g-MHBP fueron superiores a la mezcla PP/Cel0 e incrementaron con el contenido de éste. Esto significa que el PP-g-MHBP tiene un efecto nucleante para el PPr a cualquier concentración de éste, pero en el caso del PEBD solo se cumple para las concentraciones del 10, 15 y 20 %. El mismo efecto nucleante ha sido observado para el PP-g-MA en mezclas del PP/fibras naturales (CA, madera y kenaf)(Tajvidi & Takemura, 2010). Por otra parte, el mejoramiento en la cristalinidad del PP-g-MHBP en las mezclas también está asociada con el alto valor de ΔH_f (66 J/g) que presenta este material(Caicedo & Murillo, 2019).

Los porcentajes de cristalinidad (X_c) de las muestras en relación con el PE (X_{CPE})(Alqahtani et al., 2021; D. Li et al., 2019) y al PP (X_{CPP})(H. S. Kim et al., 2007; Tajvidi & Takemura, 2010) fueron determinados a partir de las siguientes ecuaciones:

$$X_{CPE} = \frac{\Delta H_{f1}}{\Delta H_{fPEBD}^o} \times 100 \quad (5)$$

$$X_{CPP} = \frac{\Delta H_{f2}}{\Delta H_{fPP}^o \times m} \times 100 \quad (6)$$

Donde, ΔH_{fPEBD}^o y ΔH_{fPP}^o son respectivamente las ΔH_f del PEBD (293 J/g) y del PP (138 J/g) 100 % cristalinos y m es la fracción en masa del PP en los materiales compuestos. Los valores de X_{CPE} y X_{CPP} (Tabla 3) del PPr son superiores a los de las mezclas, lo cual permite inferir que la presencia de la Cel afectó la cristalización del PPr y que el PP-g-MHBP incrementó

el número de cristales en las mezclas de PPr/Cel, lo cual también está asociado con la alta cristalinidad que presenta dicho material (33 %)(Caicedo & Murillo, 2019). Los valores de X_{CPP} son menores a los reportados para mezclas del PP/fibras naturales (CA, madera y kenaf)(Tajvidi & Takemura, 2010), cuyos valores fueron superiores a 36 %. En un estudio realizado con mezclas del PP/CA, fibra de madera empleando diferentes PP-g-AM(H. S. Kim et al., 2007) (Epolene G-3003, E-43, Polybond 3150, Polybond 3200, and Polyram) no se observaron cambios significativos en la T_f , pero si en los valores de X_{CPP} .

Tabla 3. Entalpías de fusión y valores de X_{CPE} y X_{CPP}

Muestras	T_{f1} (°C)	T_{f2} (°C)	ΔH_{f1} (J/g)	ΔH_{f2} (J/g)	X_{CPE}	X_{CPP}
Cel	33		436			
PPr	122	156	28	42	10	31
PPr/Cel0	134	164	10	9	4	9
PPr/Cel5	133	165	10	10	3	11
PPr/Cel10	134	165	12	11	4	13
PPr/Cel15	135	166	12	12	4	14
PPr/Cel20	135	166	14	12	5	16

7.7. Reología

7.7.1. Análisis estático

En la figura 14 se presenta la curva de flujo de las muestras. En dicha figura se puede apreciar las diferentes curvas de flujo de los materiales a 175 °C (figura 14a), 180 °C (figura 14b), 190 °C (figura 14c) y 200 °C (figura 14d). Los diferentes comportamientos reológicos a dichas temperaturas fueron evaluados con el objetivo de determinar la energía de activación de flujo de los materiales (E_a), lo cual se analizará luego. Inicialmente haremos la discusión sobre el comportamiento exhibido por las muestras a 200 °C (figura 14d), ya que a esta temperatura se presenta la menor viscosidad de las muestras. A bajos valores (10^{-3} y 10^{-1} s^{-1}) de velocidad de

cizalla ($\dot{\gamma}$), las mezclas obtenidas con PP-g-MHBP presentaron menor η que la mezcla PPr/Cel0. Esto indica que el PP-g-MHBP actuó como agente plastificante para estas mezclas, lo cual puede ser también evidenciado por la reducción de η con el incremento del contenido de este material en este rango de valores de $\dot{\gamma}$ para todas las temperaturas (figura 14). Los resultados de estos análisis están en concordancia con los obtenidos por Reometría de torque, ya que se evidenció la reducción de η con el incremento del contenido de PP-g-MHBP. Todos los materiales obtenidos con PP-g-MHBP presentaron una zona estable (aproximadamente entre 10^{-3} y 10^{-1} s^{-1}), es decir un comportamiento Newtoniano (Mihai et al., 2007).

Dicho comportamiento cambió a pseudoplástico (reducción de η con el incremento de la $\dot{\gamma}$) (J. S. Kim et al., 2021; Orji & McDonald, 2020), en el caso del PPr y del PP-g-MHBP se debió al desenmarañamiento de las cadenas (Chen et al., 2018), pero en el caso de las mezclas obtenidas con PP-g-MHBP, ello posiblemente fue resultado de esto y de la disociación de interacciones entre los componentes de la mezcla (PP-g-MHBP con el PPr y de la Cel con el PP-g-MHBP) (J. S. Kim et al., 2021). Los resultados permiten concluir que el PP-g-MHBP mejoró la procesabilidad de las mezclas, ya que su presencia en ellas redujo η (Jayanta Bera, 2008). Esto fue debido al bajo valor de η que presenta este material en comparación a las mezclas. El mismo comportamiento reológico observado para las mezclas obtenidas en el presente estudio con PP-g-MHBP, fue presentado por mezclas del PP (88-95%) /nanofibras de Cel (3-10%) preparadas con PP-g-AM (2%) (Lu Wang, Douglas J. Gardner, 2017) y mezclas de PP (70-90%) /fibras de linaza (10-30 %) (Sojoudiasli et al., 2014) y PP-g-AM (5, 10 y 50 % con respecto al contenido de la fibra) (Sojoudiasli et al., 2014). Los valores de η de dichos materiales a una $\dot{\gamma}$ de 10^{-2} s^{-1} fueron respectivamente entre 10^6 y 10^7 mPa.s (Lu Wang, Douglas J. Gardner, 2017) y mayores a 10^7 mPa.s (Sojoudiasli et al., 2014).

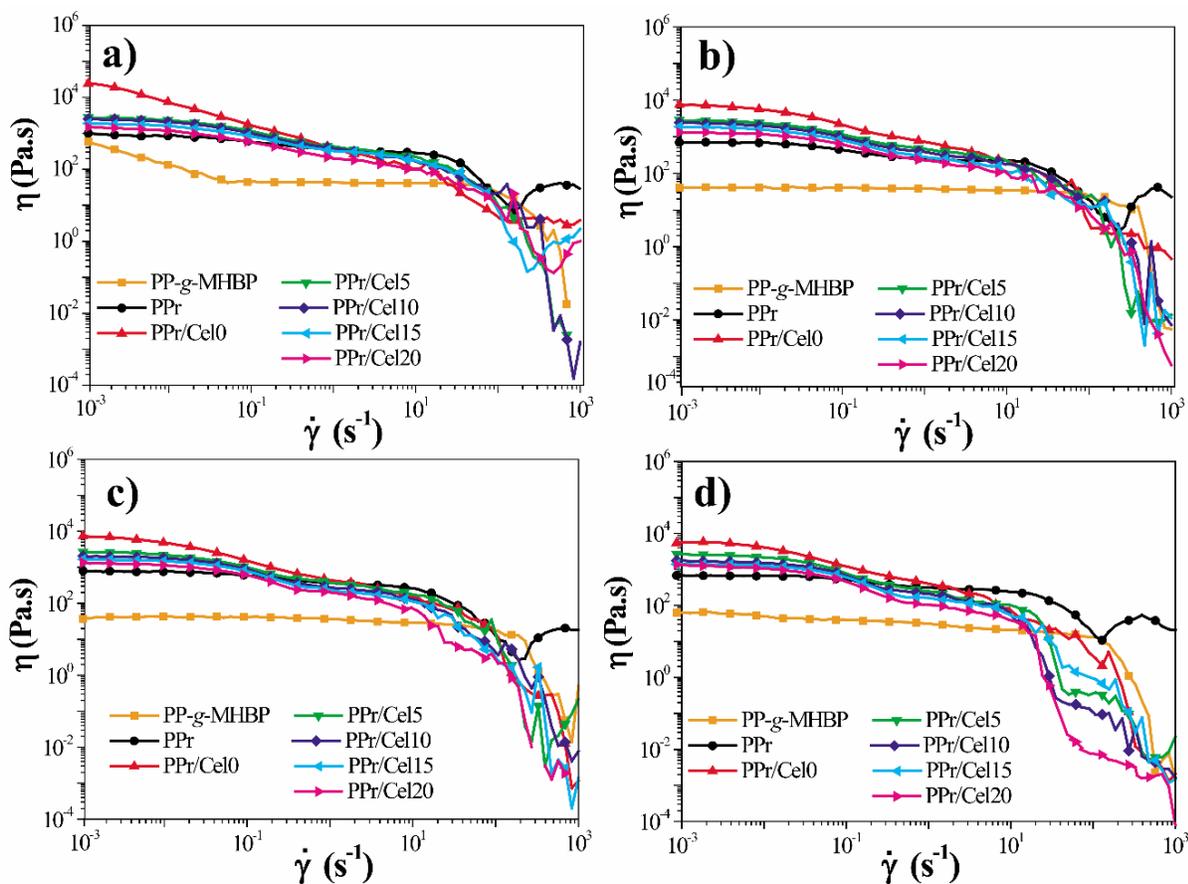


Figura 14. a) Curvas de flujo a 175°C. b) Curvas de flujo a 180°C. c) Curvas de flujo a 190°C. d) Curvas de flujo a 200°C.

7.7.1. Energía de activación

Se ha demostrado que la dependencia de η con la temperatura puede seguir una ecuación tipo Arrhenius (Hsieh et al., 2001):

$$\eta = A \times e^{E_a/RT} \quad (7)$$

Donde, A es una constante, R es la constante de los gases y T es la temperatura. A partir de un gráfico de $\ln \eta$ vs $1/T$ (°K) se puede obtener la pendiente (E_a/R) y así determinar el valor de la E_a .

Por lo tanto, a partir de la figura 14 se obtuvieron los valores de η para cada una de las mezclas a diferentes temperaturas a una $\dot{\gamma}$ de 10^{-3} s^{-1} (tabla 4) y se construyó dicha gráfica (figura 15). Todas las figuras presentaron una buena linealidad, ya que los valores del factor de correlación (R^2) fueron altos (tabla 4). Los valores de E_a de las mezclas obtenidas con PP-g-MHBP fueron inferiores al de la mezcla PPr/Cel0 (tabla 4) y ello se redujo con el contenido del PP-g-MHBP.

Esto indica que las mezclas obtenidas con PP-g-MHBP requieren menos energía para fluir que la mezcla PPr/Cel0 (Koay et al., 2018), lo cual fue también evidenciado por el estudio del comportamiento reológico durante el procesamiento de los materiales (reometrías de torque).

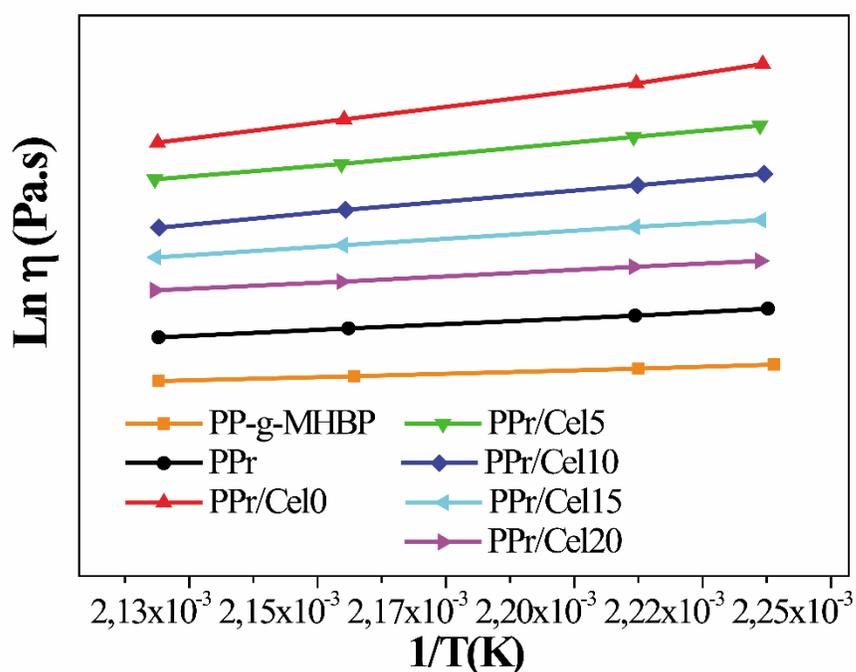


Figura 15. Gráfico de $\ln \eta$ vs $1/T$ del PP-g-MHBP, PPr y las mezclas.

Los valores de E_a son menores que los reportados (12,5-15,0 Kcal/g.mol) para materiales compuestos del PP/cascarilla de coco (Koay et al., 2018). A partir de la figura 14d, para cada muestra se extrajeron los valores de η y $\dot{\gamma}$ en el punto de inflexión, para construir un gráfico de la parte lineal de dichas figuras en esta región (figura 16) y poder obtener los valores del índice

de la ley de potencia (n) y así determinar el orden de pseudoplasticidad de las muestras (V. Mazzanti, F. Mollica, 2015). La ecuación que representa el modelo de la ley de potencia es la siguiente (V. Mazzanti, F. Mollica, 2015):

$$\eta = m\dot{\gamma}^{n-1} \quad (4)$$

Donde, m es el índice de consistencia. El valor de n de las mezclas obtenidas con PP-g-MHBP fue mayor que el de la muestra PPr/Cel0 y ello incrementó con el contenido de este material (tabla 4). Este comportamiento confirma el efecto plastificante que tiene el PP-g-MHBP para estas mezclas, lo cual ha sido también reportado para PP-g-AM (nombre comercial: Epolene E43) en mezclas del PP/fibra de linaza (Sojoudiasli et al., 2014). De acuerdo con los resultados obtenidos, la muestra PP/Cel20 presentó el mayor comportamiento pseudoplástico. Todas las curvas presentaron una buena linealidad (alto factor de correlación, R_1^2), lo cual permite inferir que los resultados son confiables.

Tabla 4. Valores de E_a , R^2 , η y R_1^2 de las muestras.

Muestras	$E_a \times 10^{-2}$ (Kcal/g.mol)	R^2	n	R_1^2
PP-g-MHBP	0,35	0,9994	0,09	0,9619
PPr	0,61	0,9990	0,24	0,9990
PPr/Cel0	2,39	0,9994	0,50	0,9969
PPr/Cel5	1,18	0,9996	0,55	0,9940
PPr/Cel10	1,16	0,9961	0,77	0,9967
PPr/Cel15	0,82	0,9929	0,81	0,9961
PPr/Cel20	0,65	1	0,85	0,7100

Los valores de n obtenidos en el presente estudio para las mezclas preparadas con PP-g-MHBP son superiores a los reportados para mezclas de PP (70 %)/fibra de linaza (30%), compatibilizadas con PP-g-AM (10 %) cuyo valor fue de 0.42 (Sojoudiasli et al., 2014), y para las mezclas del PP (70 %)/mica (30 %) y PP (70 %)/talco (30 %) preparadas usando como agente de acoplamiento el PP-g-AM (5 %), cuyos valores fueron respectivamente 0,43 y 0,40 Kcal/g.mol

(Jahani, 2011), pero también inferiores a los obtenidos para mezclas de PP/cascarilla de cacao(Koay et al., 2018) cuyos valores fueron entre 12 y 16 Kcal/g.mol.

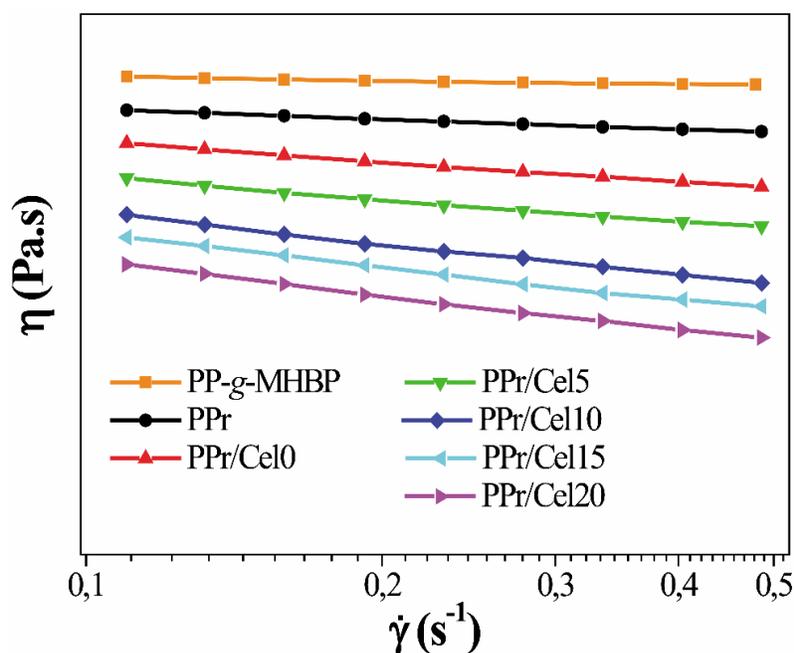


Figura 16. Gráfico de η vs $\dot{\gamma}$ del PP-g-MHBP, PPr y las mezclas.

7.7.2. Amplitud sweep

En la figura 17 se presentan las curvas del módulo de almacenamiento (G') y el módulo de pérdida (G'') vs deformación. Los valores de G' y G'' se mantuvieron constantes entre 0.01 y 1 % de deformación, lo cual indica que esta es la región viscoelástica lineal(Soury et al., 2012), ya que a mayores valores se observa una reducción en G' y G'' . Estos valores difieren con los reportados para mezclas del PP/madera cuya región se encuentra entre 0.01 y 0.1%(Soury et al., 2012).

En todos los casos G' fue menor que G'' , estos valores fueron mayores para la mezcla Pr/Cel0, pero el PP exhibió el menor valor entre todas las mezclas. En el caso de las mezclas obtenidas con PP-g-MHBP, estos valores disminuyeron con la cantidad empleada de éste, lo cual indica que en el mismo sentido se incrementó el comportamiento viscoso de los materiales.

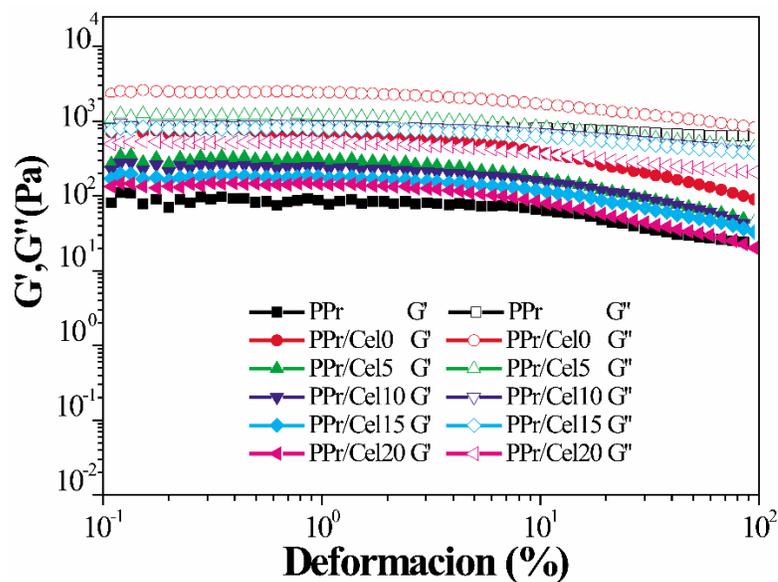


Figura 17. Gráficos de G' y G'' vs. deformación del PPr y las mezclas.

7.7.3. Análisis oscilatorio

Las mezclas presentaron una reducción de η^* con el aumento de ω (figura 18), este fue el mismo comportamiento exhibido por ellas en las curvas de flujo (seudoplástico), lo cual ya fue discutido.

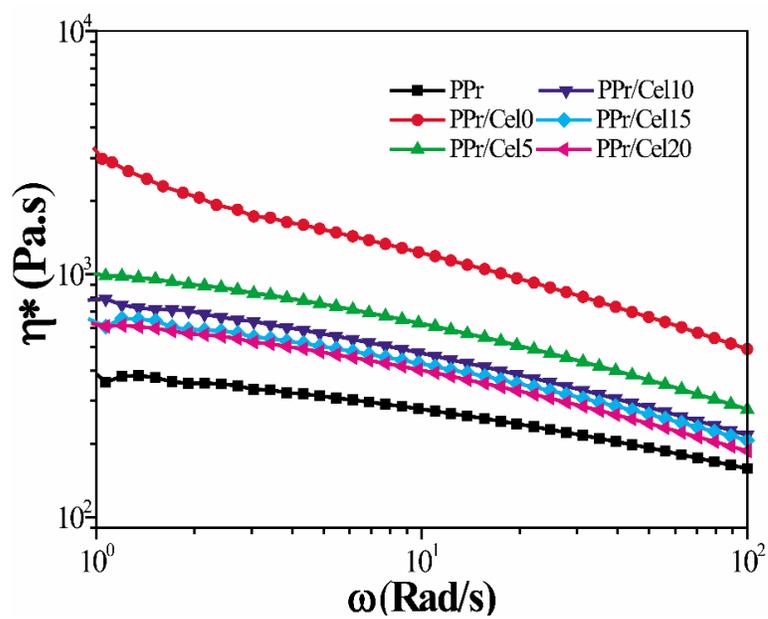


Figura 18. Gráfico de η^* vs. ω del PPr y las mezclas.

El mismo comportamiento pseudoplástico fue observado para mezclas de PPr/CA, polietileno de alta densidad reciclado/CA(Orji & McDonald, 2020), mezclas de PP/fibra de linaza compatibilizadas con PP-g-MA(Sojoudiasli et al., 2014) y mezclas de PP/fibra de cáñamo/anhídrido de aceite de tung(Wu et al., 2020), las cuales presentaron valores de η^* entre 10^2 y 10^5 Pa.s, a una frecuencia angular de 1 rad/s. De acuerdo con los resultados se puede evidenciar nuevamente que la presencia del PP-g-MHBP en los materiales compuestos de PPr/Cel, mejoró la procesabilidad.

7.7.4. Comportamiento de G' y G''

La figura 19 presenta G' y G'' con respecto a ω . G' está relacionado con el carácter elástico del material o la energía almacenada durante la deformación en el proceso de cizalla. G'' está relacionada con la cantidad de energía disipada en el flujo en forma de calor o consumida para realizar cambios estructurales en el material(Codou et al., 2018). Por lo tanto, G' corresponde a la sumatoria de los procesos reversibles y G'' a los irreversibles. El PPr y los materiales compuestos obtenidos con PP-g-MHBP presentaron un comportamiento reológico principalmente viscoso como los líquidos ($G'' > G'$)(Fourati et al., 2018). En el rango de los valores de ω evaluados, solo la muestra PPr/Cel0 presentó una transición de viscoso a elástico ($G'' < G'$) lo cual indica que fue la más elástica. La transición posiblemente fue debida a la formación de una estructura la cual es capaz de deformarse elásticamente (semejante a un gel)(Fourati et al., 2018; Suzuki et al., 2017). El mismo comportamiento fue observado para una mezcla de polióxido de etileno/nanocelulosa(Safdari et al., 2017). El comportamiento mostrado por la muestra PPr/Cel0 indica que la presencia de Cel afectó las propiedades reológicas del PPr, como así se evidenció en los análisis estáticos. Además, que la muestra PPr/Cel0 presentó el mayor carácter elástico.

Todas las muestras presentaron un incremento de G' y G'' con ω , el cual fue monotónico para las mezclas obtenidas con PP-g-MHBP, pero diferente para el PPr y la mezcla PPr/Cel0. El aumento se debe a que a bajas ω hay poco tiempo para el desenmarañamiento de las cadenas, lo cual produce una gran relajación y valores bajos de G' y G'' , pero cuando la muestra es deformada a altos valores de ω las cadenas no tienen tiempo para relajarse y los módulos incrementan(Hwang et al., 2006).

La muestra PPr/Cel0 presentó un mayor valor de G' y G'' que el PPr y las mezclas obtenidas con PP-g-MHBP. En el caso del PPr, esto se debió a la ausencia de la Cel en dicha muestra, ya que se ha reportado que la incorporación de partículas en la matriz polimérica cambia las propiedades reológicas(K. Wang et al., 2019), como así se demostró en los resultados estáticos y dinámicos (figuras 14 y 18). El mismo resultado fue reportado para mezclas del PP/Cel(Suzuki et al., 2017) donde se evidenció la formación de una red asociada a la presencia de Cel a la cual se le atribuyó el incremento en G' y G'' . Por otra parte, en el caso de las mezclas preparadas con PP-g-MHBP, ello fue producto de la menor interacción entre las partículas de la Cel(Patti et al., 2021) en este material con respecto a las presentadas en el PPr/Cel0. A pesar de que se ha reportado(Liu et al., 2004; K. Wang et al., 2019) que al incrementar las interacciones también se aumentan los valores de G' y G'' , el comportamiento opuesto exhibido por las mezclas obtenidas con PP-g-MHBP fue principalmente debido al efecto plastificante y compatibilizante del PP-g-MHBP y a la disociación de las interacciones entre los grupos OH de las partículas de Cel, lo cual también ha sido reportado para mezclas de almidón (contiene un alto número de grupos OH) y polibutileno de adipate-tereftalato obtenidas empleando AM y ácido cítrico (AC) como compatibilizantes(Fourati et al., 2018). En este mismo estudio se observó una disminución de G' con el contenido de compatibilizante. El G' de las mezclas obtenidas con y sin PP-g-MHBP es comparable con el reportado para materiales compuestos de fibra de linaza y PP obtenidos

usando PP-g-AM como compatibilizante(Sojoudiasli et al., 2014), cuyos valores en el mismo rango de T fueron entre 10^2 y 10^5 Pa. Los valores de G' y G'' de los materiales obtenidos con PP-g-MHBP son comparables con los exhibidos por mezclas del PP/Cel compatibilizadas con PP-g-AM y un polímero catiónico conteniendo un grupo amino primario (CPPA)(Suzuki et al., 2017) cuyos valores de G' y G'' en el mismo rango de T fueron entre 10^2 y 10^5 .

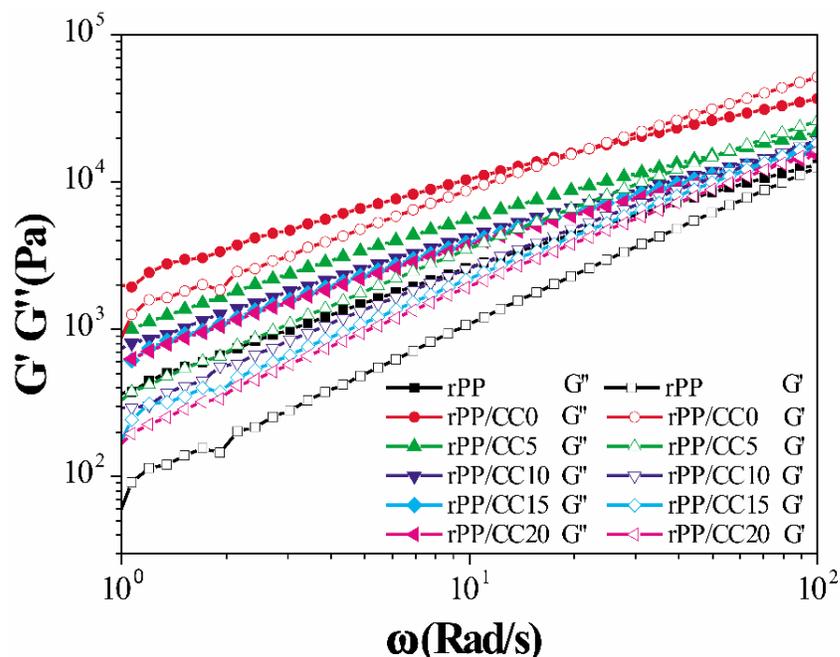


Figura 19. Comportamiento de G' y G'' con respecto a ω del PPr y las mezclas.

7.7.5. Regla de Cox-Merz

Con el objetivo de determinar si los materiales obtenidos satisfacen la regla de Cox Merz, la cual predice que $\eta^*(T)$ y $\eta(\dot{\gamma})$ tienen el mismo valor a la misma velocidad de deformación (cuando $\omega = \dot{\gamma}$) (Hsieh et al., 2001), entonces se obtuvo un gráfico para verificar si los materiales cumplen dicha condición:

$$|\eta^*(\omega)| = \eta(\dot{\gamma}) \quad (8)$$

Ninguno de los materiales cumplió la regla de Cox Merz (figura 20), ya que en el rango de ω y $\dot{\gamma}$ los valores de η y η^* de cada muestra no fueron iguales. En el caso de la mezcla PP/Cel0, esto se debió a la orientación de los gránulos de Cel en la dirección del flujo o interacciones entre el PPr y los pigmentos(Sojoudiasli et al., 2014).

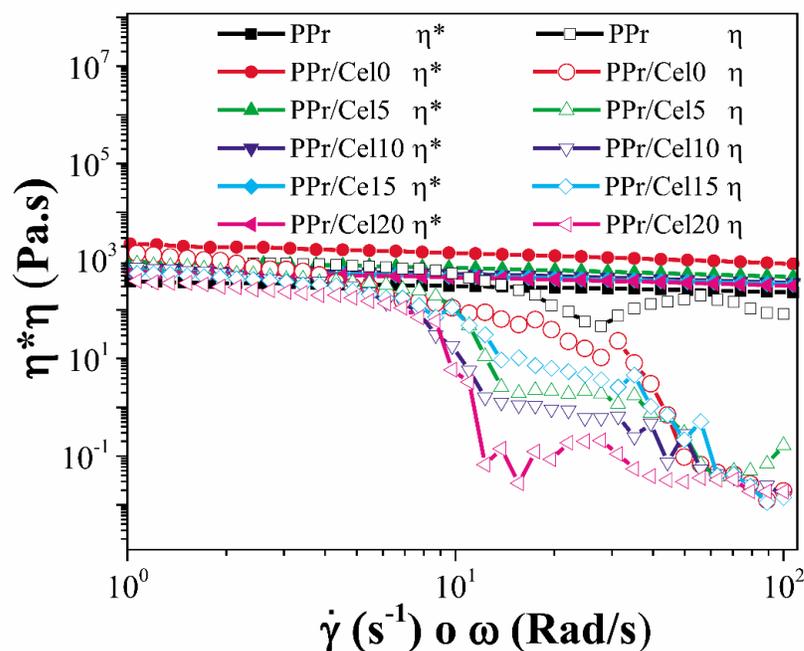


Figura 20. Gráficos de η^* y η vs $\dot{\gamma}$ y ω del PPr y las mezclas.

En el caso de las mezclas preparadas con PP-*g*-MHBP el incumplimiento de la regla de Cox Merz se atribuye principalmente a las interacciones entre los componentes (PPr y Cel) y a la orientación de los gránulos de Cel, lo cual también ha sido observado para materiales compuestos del PP/fibra de linaza compatibilizadas con un PP-*g*-AM (Epolene E43)(Sojoudiasli et al., 2014). La regla de Cox Merz ha sido válida para polímeros lineales isotrópicos (dendrímico, HBP, etc.), pero no para materiales compuestos, ya que ellos presentan cambios en microestructuras y efectos morfológicos (orientaciones)(Hsieh et al., 2001).

7.7.6. Tiempos de relajación

En la figura 21 se muestra el comportamiento del tiempo de relajación (λ) presentado por las muestras a una ω de 11 rad/s. Los valores de λ fueron obtenidos a partir de la siguiente ecuación (Hsieh et al., 2001).

$$\lambda = G' / |\eta^*| \times \omega^2 \quad (9)$$

Los valores de λ de las muestras obtenidas con PP-g-MHBP fueron inferiores a los de la muestra PP/Cel0 y disminuyeron con el contenido de éste.

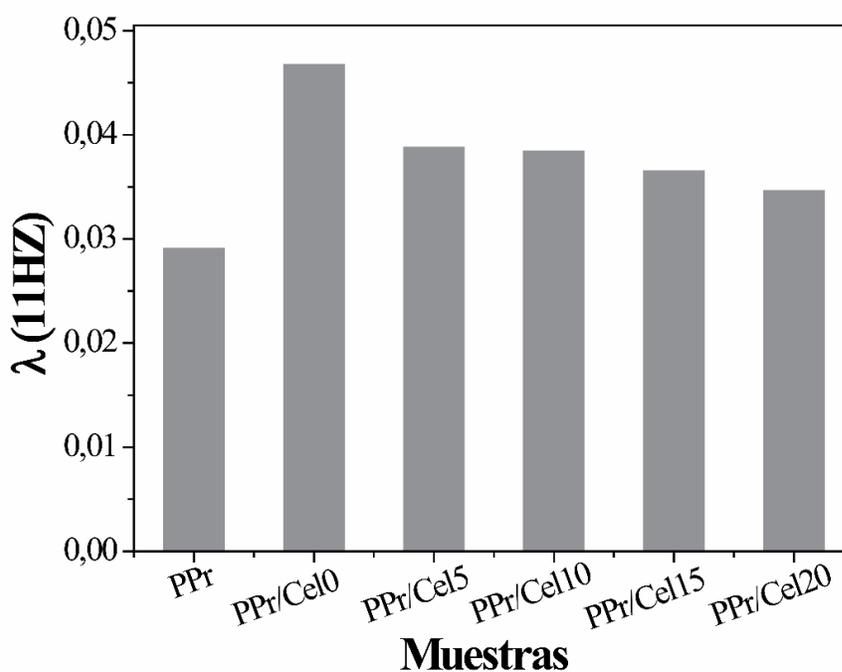


Figura 21. Tiempos de relajación

Este comportamiento es opuesto a lo observado por la ley de potencia, ya que se esperaba que λ fuera menor para esta mezcla, la cual presentó menor valor de n y enmarañamiento de las cadenas (limita la movilidad molecular) (Hsieh et al., 2001). Lo anterior se debe probablemente a varias razones:

- 1) Los valores de λ se determinaron a partir de un valor de T y no en todo el rango de ella.
- 2) Los análisis estáticos son realizados en la región viscoelástica lineal y no lineal.
- 3) El PP-g-MHBP redujo el enmarañamiento de las cadenas del material compuesto y por ende a λ , esto posiblemente fue debido a la interacción entre los materiales y a que la estructura del PP-g-MHBP contiene el MHBP el cual es amorfo y altamente ramificado.

7.7.7. Diagrama de Van Gulp-Palmen

El ángulo de fase (δ) puede ser usado para evaluar estructuras que hacen parte de los materiales compuestos empleando el gráfico de Van Gulp-Palmen el cual consiste en obtener una curva del δ vs el módulo complejo (G^*)(Khajeheian & Rosling, 2015; Zhang et al., 2012), esta figura permite evidenciar cambios en los λ de sistemas poliméricos como una consecuencia de la restricción en movilidad. La figura 22 muestra la curva de Van Gulp-Palmen de las muestras. Inicialmente todos los materiales exhibieron cierto grado de estabilidad en δ , pero luego se presentó una reducción con el aumento de G^* , este comportamiento es típico para polímeros lineales¹⁷⁴ y ello ha sido atribuido al comportamiento elástico de la mezcla(Rinawa et al., 2022).

El punto de enmarañamiento de la muestra PPr/Cel0 fue más alto que el de las muestras preparadas con PP-g-MHBP (mayor valor de δ), indicando que las muestras obtenidas con este material fueron menos elásticas (más viscosas) que el PPr/Cel0, lo cual se evidencia por el mayor valor de G^* exhibido por dichas mezclas. No se observó una gran variación en los valores de δ a bajos valores de G^* , pero a altos valores, se apreció una pequeñísima reducción en los valores de δ con el contenido del PP-g-MHBP, lo cual ha sido asociado a la presencia de más porción elástica en el fundido(Zhang et al., 2012). Esta porción elástica posiblemente está relacionada con el MHBP injertado en el PP, ya que este material es amorfo(Ararat et al., 2019).

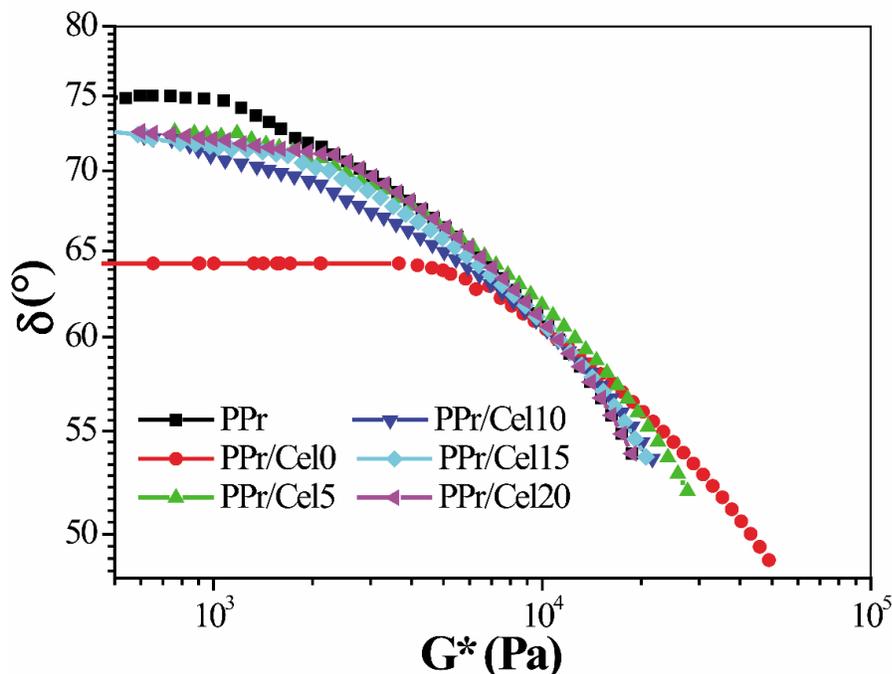


Figura 22. Diagrama de Van Gurp-Palmen del PPr y las mezclas.

7.7.8. Diagrama de Cole-Cole

El diagrama de Cole-Cole ha sido usado para determinar cambios estructurales (morfológicos), miscibilidad, homogeneidad de mezclas y materiales compuestos (Ivanova & Kotsilkova, 2018; Kracalik, 2018). Este diagrama también es usado para describir las propiedades viscoelásticas de materiales teniendo una alta distribución de λ , resaltando los cambios de separación de fase (Codou et al., 2018; Ivanova & Kotsilkova, 2018). Las mezclas homogéneas forman un arco o una cola, pero una línea o dos arcos aparecen para composiciones de diferentes λ (mezclas heterogéneas) (Codou et al., 2018). La parte real (η') e imaginaria (η'') de η^* se obtienen de las siguientes expresiones matemáticas¹⁷⁷:

$$\eta' = \frac{G''}{\omega} \quad (10)$$

$$\eta'' = \frac{G'}{\omega} \quad (11)$$

La muestra PPr/Cel0 presentó el mayor comportamiento lineal (menor interacción entre los componentes), pero las muestras obtenidas con PP-g-MHBP exhibieron una curvatura, la cual incrementó con el contenido de éste (Figura 23), esto se atribuye a una mayor compatibilización o mejor morfología dispersada (Kracalik, 2018; Rinawa et al., 2022). La desviación de la forma circular mostrada por la muestra PPr/Cel0 indica que el comportamiento reológico de esta muestra es principalmente elástico como un sólido (Kracalik, 2018; Rinawa et al., 2022), lo cual también se evidenció en el gráfico de Van Gorp-Palmen (mayor región estable de δ). Por otra parte, se ha reportado que un diagrama de Cole-Cole con forma de arco es una medida de la buena compatibilización o acoplamiento y entre más grande sea la curvatura, mayor será ésta (Kracalik, 2018; Rinawa et al., 2022).

Los resultados indican que la homogeneidad de las mezclas incrementó con el contenido del PP-g-MHBP, lo cual también será analizado posteriormente por análisis de SEM. Este comportamiento también ha sido observado para mezclas de poliácido láctico/poliamidas compatibilizadas con PP-g-AM (Codou et al., 2018). Por otra parte, ninguna mezcla presentó un doble arco, lo cual también indica una buena interacción entre la Cel y el PPr (Codou et al., 2018). Además, se apreció una disminución de λ con la cantidad del PP-g-MHBP, lo cual es concordante con el resultado obtenido de la ecuación 6 (figura 21). En la figura 23 se puede apreciar que η'' se redujo con el incremento de la proporción del PP-g-MHBP, lo cual indica que se mejoró la movilidad de las cadenas y la homogeneidad (Hidalgo-Salazar et al., 2020). La mezcla que presentó la mayor curvatura fue la PPr/Cel20, por lo tanto, exhibió la mayor homogeneidad. El comportamiento exhibido por el PPr es muy similar al reportado para PP (Hammani et al., 2020; Zhang et al., 2012), pero difiere al de un PPr (presentó una forma de arco) (Nguyen-tri et al., 2020). Además, se ha reportado que en materiales compuestos de PPr,

fibras de bambu y PP-g-AM, el semicírculo se deforma con el incremento del contenido de la fibra(Nguyen-tri et al., 2020) y con contenidos del 30 % de la fibra, se obtiene una alta linealidad (pobre compatibilidad y uniformidad de los componentes) (Nguyen-tri et al., 2020).

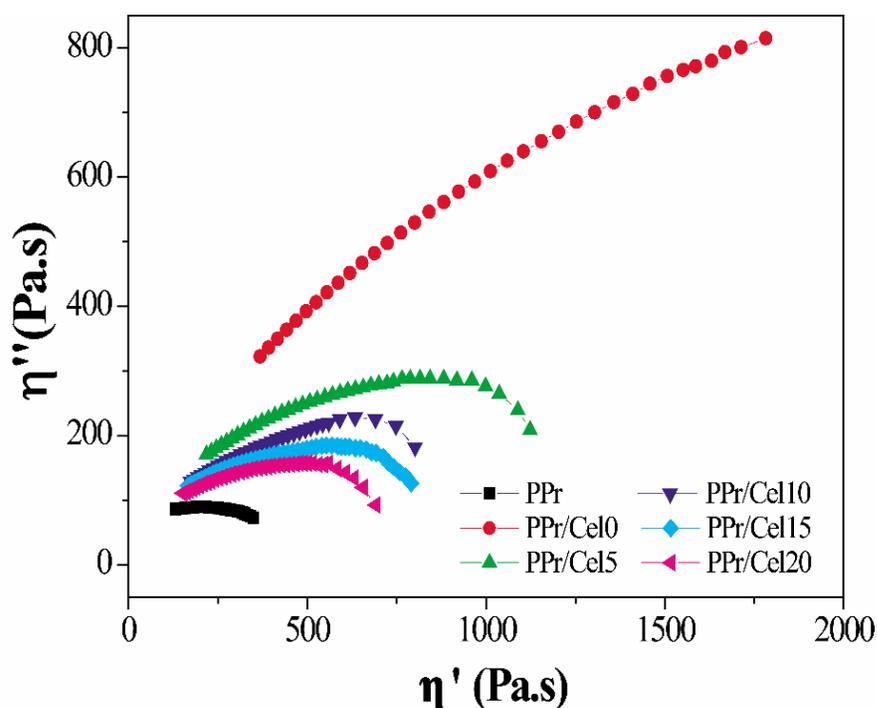


Figura 23. Diagrama de Cole-Cole del PPr y las mezclas.

7.8. SEM

Esta técnica ha sido usada ampliamente para evaluar el efecto de acoplamiento o compatibilizante de mezclas(Codou et al., 2018; Qiu et al., 2003). Las micrografías obtenidas por SEM para las muestras (figura 24) evidencian que la muestra PPr/Cel0 (figura 24a) exhibió cavidades (huecos) de un gran tamaño. Además, se observan agregados de partículas de Cel (parte inferior de la micrografía). Lo anterior indica una baja adherencia o interacción entre el PPr y la Cel(Kaynak et al., 2018; Qiu et al., 2003). Este comportamiento es típico de materiales con una pobre adhesión interfacial(Qiu et al., 2003; Reale Batista et al., 2020). En la figura 24 se puede observar que los materiales obtenidos con PP-g-MHBP presentaron una mejor adhesión

interfacial que la muestra PPr/Cel0 y ésta incrementó con el contenido de éste, ya que se observó una tendencia en la disminución de la rugosidad (superficies más lisas y homogéneas) (Kaynak et al., 2018), agregados, vacíos y el tamaño de las cavidades con la cantidad de PP-g-MHBP. En todas las muestras obtenidas con PP-g-MHBP se observa que las partículas de Cel fueron cubiertas con la matriz de PPr y están dispersas en ésta, lo cual es otra prueba de una mejor adherencia interfacial entre los componentes (Kaynak et al., 2018; Qiu et al., 2004).

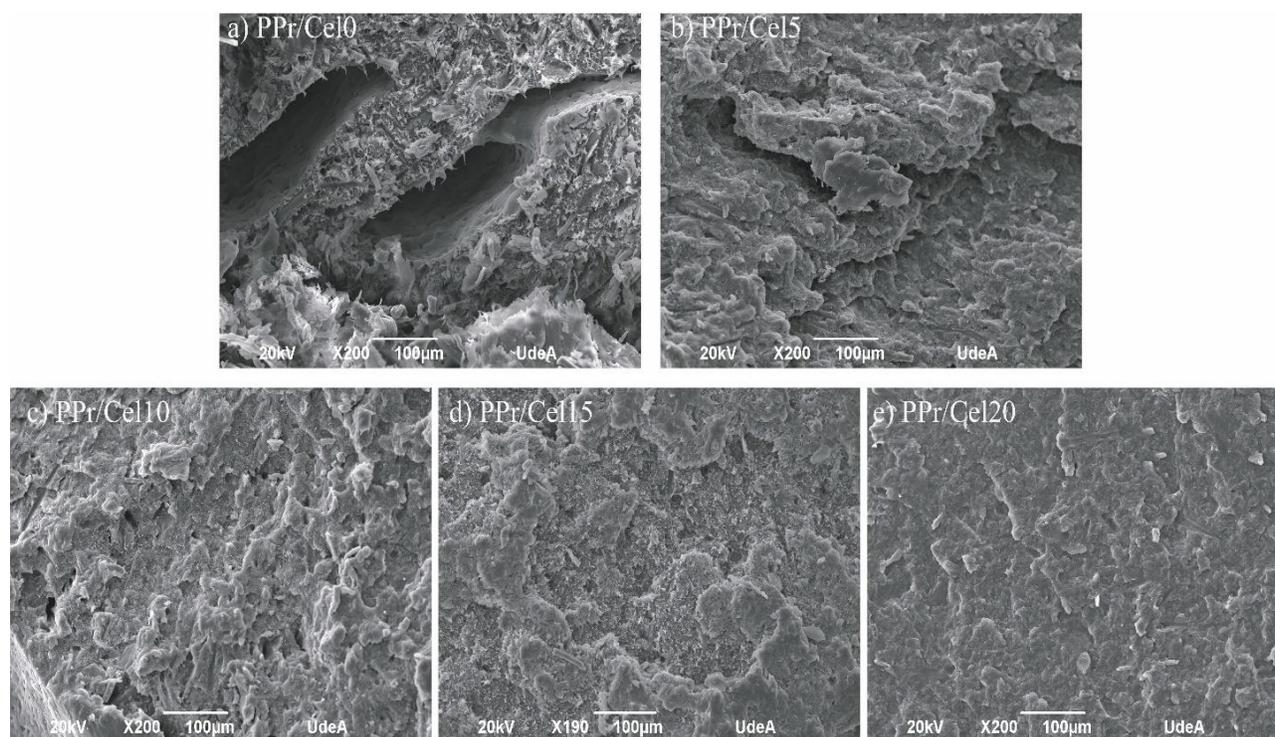


Figura 24. a) Microscopias obtenidas por SEM a) PPr/Cel0. b) PPr/Cel5. c) PPr/Cel10. d) PPr/Cel15 y e) PPr/Cel20.

Los resultados de SEM permiten concluir que el PP-g-MHBP tiene un efecto positivo en el mejoramiento de la adhesión interfacial entre el PPr y la Cel. Por lo tanto, actuó como un agente de acoplamiento para estas mezclas (posiblemente se localizó en la interface entre el PPr y la Cel)(Qiu et al., 2003), así que se espera que también mejore las propiedades mecánicas (Reale Batista et al., 2020), lo cual se verificará posteriormente. De acuerdo a los resultados de SEM y el

diagrama de Cole-Cole, se puede concluir que la mezcla PPr/Cel20 presentó la mejor interacción y homogeneidad, lo cual permite cumplir el tercer objetivo de este trabajo de grado “Establecer cuál es la proporción de PP-g-MHBP con la cual se obtiene la mejor interacción u homogeneidad de las mezclas”

Por otra parte, a diferencia de un estudio realizado para mezclas del PP/nanofibras de Cel usando PP-g-AM como agente de acoplamiento(Lu Wang, Douglas J. Gardner, 2017), en el presente estudio si se observó que el PP-g-MHBP cambió la distribución de la Cel en el PPr, lo cual posiblemente se debió al mayor grado de funcionalización y a la estructura del MHBP presente en el PP-g-MHBP. La miscibilidad de las mezclas obtenidas con PP-g-MHBP en el presente estudio es mejor que la reportada para mezclas de PP/Cel (se observaron grandes cavidades)(Zander et al., 2019), mezclas de PP/Cel preparadas empleando como agente de acoplamiento el PP-g-AM (grandes cavidades)(Qiu et al., 2004), mezclas de PP/Cel microcristalina modificada con perfluorooctiltrietoxisilano, n-octiltrietoxisilano y aminopropiltrietoxisilano (presentaron grandes agregados)(Kaynak et al., 2018) y mezclas de PP/Cel preparadas usando como agente de acoplamiento polietilenimina (las fibras de celulosa se fragmentaron, pero con baja dispersión)(de la Orden et al., 2007).

7.9. AH

La exposición a la humedad facilita el ataque de hongos y afecta la estabilidad dimensional. Además, los procesos de absorción y desorción aceleran el envejecimiento del material y disminuye el tiempo de vida(Yeh et al., 2015). Por lo tanto, es importante la evaluación de la resistencia de los materiales frente al agua.

La AH del PP-g-MHBP fue superior a la del PPr, lo cual era esperado por la presencia de grupos polares en la estructura de este material. La mezcla PPr/Cel0 presentó mayores valores de AH que las mezclas obtenidas con el PP-g-MHBP (figura 25). En estas mezclas, se observó una

ligera reducción del AH con el contenido del PP-g-MHBP hasta la concentración del 15 % de éste, pero luego incrementó para la concentración del 20 %. Por otra parte, la interpretación estadística de los resultados que aparecen en la figura 25, permite inferir que solo las muestras PPr/Cel15 y PPr/Cel20 presentaron diferencias significativas con la mezcla PPr/Cel0 (sus barras de error no se interceptan con las de la mezcla PPr/Cel0). Por lo tanto, estas mezclas presentaron una mejor resistencia a la AH que la mezcla PPr/Cel0.

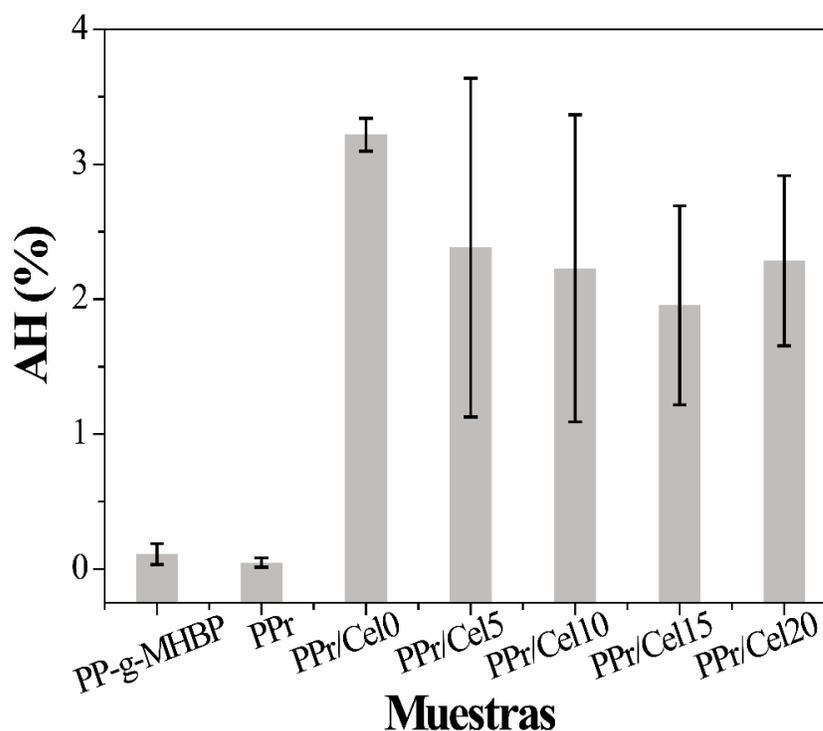


Figura 25. Absorción de agua de las muestras.

Los resultados permiten inferir que para las mezclas PPr/Cel15 y PPr/Cel20, el PP-g-MHBP protege a la fibra contra el vapor de agua dentro de la matriz polimérica. Por otra parte, las desviaciones observadas son posiblemente debidas a que algunas mezclas presentaban cierta porosidad, la cual fue también exhibida por el PPr, esto se atribuye a la presencia de aditivos en éste. Los valores de AH de las mezclas preparadas en el presente estudio son inferiores a los de

mezclas de PP (90 %)/Cel (10 %)(L. Huang, Wu, Wang, Ou, et al., 2020), cuyos valores fueron inferiores a 1.5 %

7.10. AbA y el EH

La figura 26 presenta los resultados de la AbA (figura 26a) y EH (figura 26b) de las muestras. El PPr presentó menor AbA que el PP-g-MHBP, esto era esperado, ya que el PP-g-MHBP contiene grupos polares (figura 2). La muestra PPr/Cel0 presentó mayor valor de AbA que el PPr y las mezclas preparadas con PP-g-MHBP; el primer comportamiento fue debido a la hidrofiliidad de la Cel y el segundo a que el PP-g-MHBP a pesar de formar enlaces de hidrógeno con el agua, es menos hidrofílico que la Cel. Este comportamiento también ha sido reportado para mezclas de PP y raquis de la palma de aceite obtenidas empleando como agente de acoplamiento PP-g-AM(Rozman et al., 2000) y para mezclas de PP/Cel preparadas con un 30 % de Cel y entre 0 y 10 % de PP-g-AM(Qiu et al., 2003).

La AbA de las mezclas preparadas con PP-g-MHPB fue independiente del contenido de éste (los valores de las barras de error se interceptan para algunas muestras). Dicho resultado difiere de los obtenidos para la AH, lo cual está asociado con la diferente porosidad exhibida por las probetas, la dispersión e interacción entre el PP-g-MHBP, la Cel y el PPr(Radzi et al., 2019). Las cavidades hacen que el agua sea atrapada y se incremente el peso de la muestra(Radzi et al., 2019). Otro aspecto importante a tener en cuenta en la variación de los análisis de los resultados de AH y AbA es el área de contacto entre las mezclas y el vapor de agua (análisis de AH) y entre éstas y el agua durante la inmersión en la misma (AbA).

El valor de AbA del PP-g-MHBP es superior al de PP-g-MA (aprox. 0.8 %)(Huner, 2017). Los valores de AbA de las mezclas preparadas con PP-g-MHBP, son comparables con los obtenidos para mezclas de PP/raquis de la palma de aceite empleando como agente de

acoplamiento PP-g-AM (mayores del 5 % durante un tiempo de absorción de 13 días) (Rozman et al., 2000) , y PP modificado con ácido acrílico (menores del 1 %)(Jayanta Bera, 2008). En dichos estudios fueron empleadas proporciones de raquis del 20 % (Jayanta Bera, 2008), y 40 y 60 % (Rozman et al., 2000), respectivamente. Por otra parte, los valores de AbA obtenidos para las mezclas del presente estudio son inferiores a los reportados para mezclas de PP/Cel obtenidas con un 30 % de Cel y entre 0 y 2 % de PP-g-AM, cuyos valores fueron entre 0 y 2 % a las 24 h de inmersión (Qiu et al., 2003).

En el caso del PPr/Cel0 y las muestras preparadas con PP-g-MHBP, las medidas del EH siguieron el mismo comportamiento observado para la AbA (figura 26b), ya que el EH fue independiente de la cantidad del PP-g-MHBP y el EH de las muestras preparadas con éste fue inferior al de la muestra PPr/Cel0. En el caso de las muestras PPr/Cel10, PPr/Cel15 y PPr/Cel20 se puede inferir que se observó un mejoramiento en la EH con respecto a la muestra PPr/Cel0. Por lo tanto, dichas muestras presentaron la mayor estabilidad dimensional.

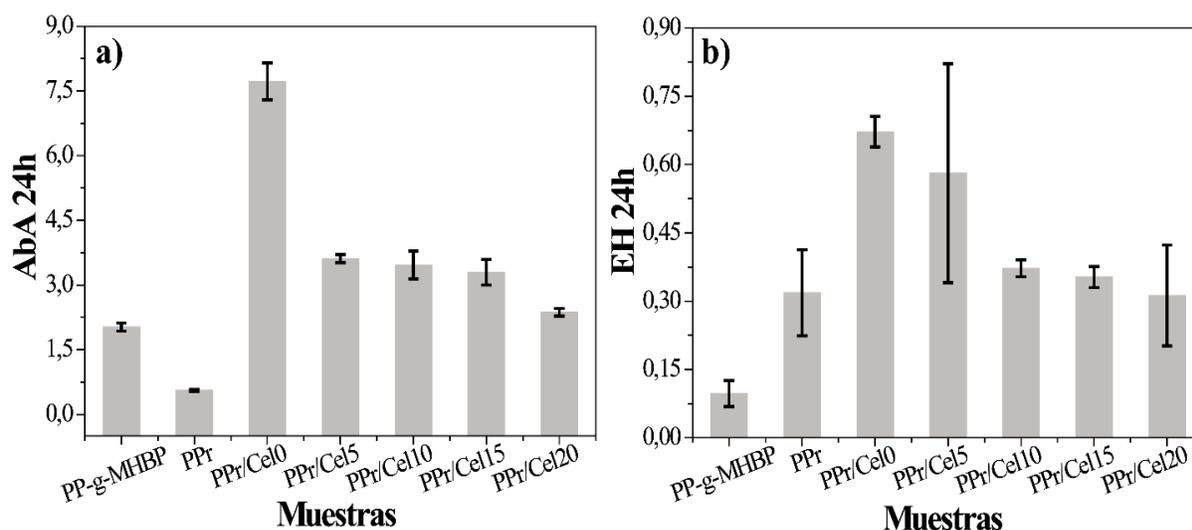


Figura 26. Comportamiento de las muestras frente al agua **a)** AbA y **b)** EH.

Los valores de EH obtenidos en el presente estudio son inferiores a los reportados para materiales compuestos de PP/raquis de la palma de aceite/caucho acrilonitrilo-butadieno (Ismail et

al., 2011), PP/raquis de la palma de aceite(Rozman et al., 2000), cuyos valores fueron respectivamente entre 1.7 y 3.1 %, y entre 1 y 2 %.

7.11. MFI

En la figura 27 se presenta el comportamiento de las muestras en relación con el MFI. El PPr presentó mayor MFI que la mezcla PPr/Cel0, lo cual se debió a que la Cel le restringió la movilidad al PPr, ya que éste material no funde y no fluye por si mismo(Cardona Uribe et al., 2018). El mismo comportamiento se ha observado para mezclas del PP/CA(Jayanta Bera, 2008). Por otra parte, todas las mezclas obtenidas con PP-g-MHBP presentaron mayor fluidez que la mezcla PPr/Cel0, lo cual indica que este material mejoró la procesabilidad de las mezclas. Estos resultados son acordes con los obtenidos en las reometrías de torque y en los análisis reológicos. El ligero incremento en el valor del MFI ha sido atribuido a la naturaleza no compatible y al deslizamiento entre la matriz polimérica (PPr) y las partículas del relleno o refuerzo(Jayanta Bera, 2008).

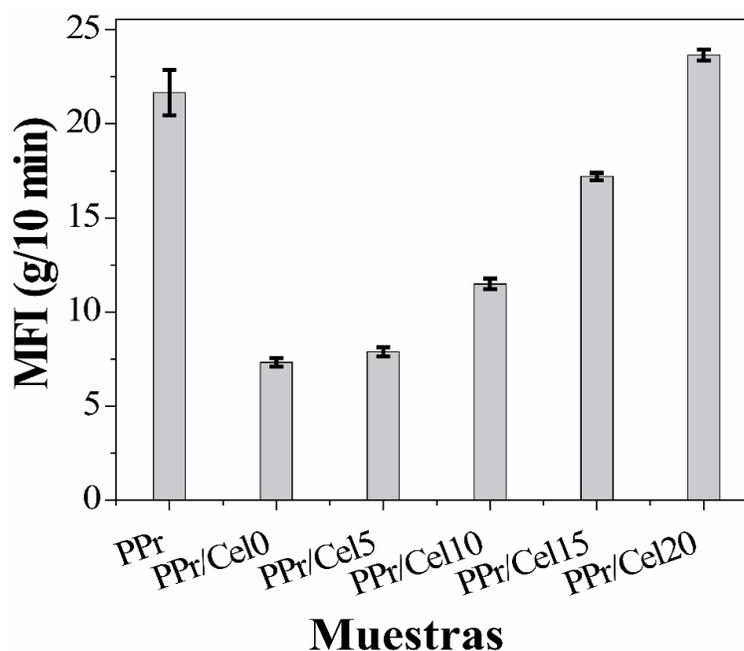


Figura 27. Comportamiento de las muestras en relación con el MFI.

Los valores de MFI presentados por las mezclas obtenidas con y sin PP-g-MHBP fueron mayores que los reportados para mezclas de PP/CA (5-30%) y PP/CA (10-40%) obtenidas con PP-g-AM cuyos valores fueron respectivamente entre 3.2 y 11.5 g/10 min (Jayanta Bera, 2008), y entre 0 y 5 g/10 min (Rosa et al., 2009). Sin embargo, es importante considerar que el PP utilizado en dicho estudio presentó un MFI de 3.0 g/10 min, a esto se debe la diferencia.

7.12. Dureza

La dureza del PP-g-MHBP no presentó diferencias significativas con la del PPr y la del PPr/Cel0, pero si se evidenciaron variaciones entre las mezclas PPr/Cel10, PPr/Cel15 y PPr/Cel20 con la mezcla PPr/Cel0 (Figura 28).

Por lo tanto, para estas mezclas el PP-g-MHBP mejoró la dureza. Esto puede estar asociado con la mayor cantidad usada de este material y a las mayores interacciones entre el PPr y la Cel.

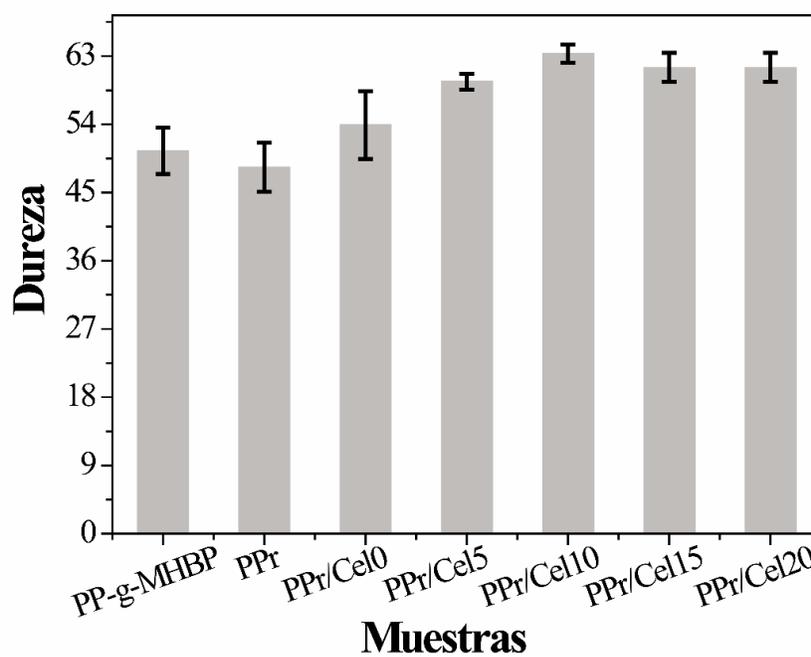


Figura 28. Dureza de las muestras obtenidas.

7.13. Resistencia al impacto

La resistencia al impacto es la energía total que soporta la muestra o la absorción de energía por área de sección transversal. La resistencia al impacto de un material puede ser una referencia a su tenacidad(Lin et al., 2020). En la figura 29 se muestra el comportamiento exhibido por las muestras en relación a la resistencia al impacto. El PPr presentó una mayor resistencia al impacto que el PPr/Cel0, este resultado fue debido a que la Cel no resiste la propagación de grietas con la misma eficacia que lo hace la matriz del PPr(Huner, 2017; Zurina et al., 2004). Además, la propagación de grietas en la región interfacial de mezclas inmiscibles reduce la resistencia al impacto(Esra Erbas Kiziltas, Alper Kiziltas, 2017). En mezclas de poliestireno/caucho estireno-butadieno (SBR) reforzadas con CA, se observó una disminución en la resistencia al impacto al incrementar el contenido de la CA(Zurina et al., 2004). La resistencia al impacto de las mezclas obtenidas con PP-g-MHBP fue superior a la de la mezcla PPr/Cel0 y esta aumentó con el contenido de este material. Este comportamiento está asociado con la mejor interacción entre el PPr y la Cel y la mejor dispersión de la Cel en la matriz polimérica, ya que ello aumentó la transferencia de esfuerzo(Bengtsson et al., 2007; Zurina et al., 2004). Este resultado es concordante con los obtenidos por análisis de SEM, ya que se observaron macrocavidades en la mezcla PPr/Cel0, las cuales redujeron ostensiblemente su tamaño (casi imperceptibles para las mezclas PPr/Cel10, PPr/Cel15 y PPr/Cel20), estos defectos debilitan las mezclas y consumen la energía de impacto(Lin et al., 2020). Por otra parte, también se ha considerado que la acción lubricante tiene un efecto en el mejoramiento de la resistencia al impacto(Zurina et al., 2004), lo cual en este caso también está relacionado con la presencia del PP-g-MHBP en estas mezclas.

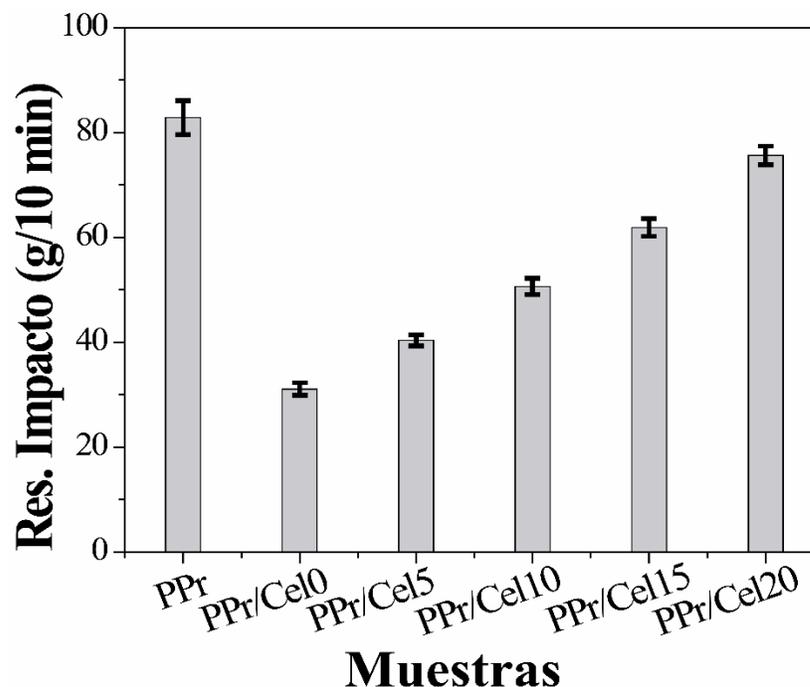


Figura 29. Comportamiento exhibido por las muestras en relación con la resistencia al impacto.

Los valores de resistencia al impacto de las mezclas obtenidas en el presente estudio con PP-g-MHBP son mayores que los reportados para mezclas de PP/Cel (10-50 %), y PP (91-97%) /celulosa microcristalina (2-6%) compatibilizada con PP-g-AM cuyos valores fueron respectivamente entre 26 y 30 J/m(Khalid et al., 2008), y 30 y 42 J/m(Ryu et al., 2020), pero comparables con los de mezclas de poliamida reciclada/PPr/Cel compatibilizadas con PP-g-AM cuyos valores fueron entre 10 y 50 J/m(Esra Erbas Kiziltas, Alper Kiziltas, 2017).

7.14. Tracción

El módulo ténsil, la fuerza ténsil y la elongación a la ruptura del PP-g-MHBP son respectivamente 1182 ± 40 MPa, 32.4 ± 0.5 MPa y 12 ± 1 % (Caicedo & Murillo, 2019). En la Figura 30 se muestran los resultados de los ensayos de tracción. El módulo ténsil (figura 30a) del PPr fue inferior al del PPr/Cel0, esto indica que la Cel actuó como un reforzante para el PPr, lo cual también ha sido observado para mezclas de PP/fibra de cañamo(Elkhaoulani et al.,

2013)(Wu et al., 2021) y PP y otras fibras. Esto se atribuye a la reducción de la movilidad de la matriz polimérica, lo cual incrementa la rigidez(Tabak et al., 2020). El módulo ténsil de las mezclas obtenidas con el PP-g-MHBP fue inferior al de la mezcla PPr/Cel0 e independiente del contenido de éste. Este comportamiento posiblemente fue resultado de las menores propiedades mecánicas del PP-g-MHBP y del carácter más amorfo de este material y a la diferente porosidad y dispersión de los materiales. En un estudio realizado sobre mezclas de PP/CA no se observó una variación en el módulo ténsil con la cantidad de PP-g-AM, pero si disminuyó con la proporción del polímero estireno-etileno-butadieno-estireno modificado con AM (SEBS-g-MA)(Yeh et al., 2015) empleado como agente de acoplamiento.

Por otra parte debido a que las probetas que se utilizaron para el análisis de tracción fueron tipo V, entonces fue imposible encontrar artículos similares para efectos comparativos. Sin embargo, pudimos encontrar unos relacionados con mezclas de PP y otras fibras. Los materiales obtenidos en este estudio tienen módulo ténsil superiores a los reportados para mezclas de polietileno de baja densidad y polietileno de alta densidad con residuos de madera (aserrín), cuyos valores fueron entre 2.87 y 3.43 MPa(Nukala et al., 2022). La fuerza ténsil última del PPr fue superior a la de la mezcla PPr/Cel0. La fuerza ténsil y la elongación a la ruptura no mostraron una dependencia con el contenido del PP-g-MHBP. El comportamiento mecánico exhibido por las mezclas fue probablemente debido a la diferencia entre la fuerza interfacial del PPr y la Cel, el tamaño de las partículas (pudo ocurrir agregación durante el procesamiento) y la porosidad.

Por otra parte, no se observaron grandes diferencias en los valores de fuerza ténsil, modulo ténsil y elongación a la ruptura de las mezclas obtenidas con y sin PP-g-MHBP, lo cual es un indicativo de que las interacciones entre la Cel y el PPr no fueron fuertes, ya que se ha demostrado que cuando hay una buena adhesión interfacial hay una eficiente transferencia de esfuerzos en la interface partícula/polímero que incrementan la fuerza del material(Tabak et al.,

2020) (máximo esfuerzo que el material puede soportar bajo una carga ténsil uniaxial); lo mismo se ha observado para mezclas de PP/nanocelulosa obtenidas usando como agente de acoplamiento el PP-g-AM y silanos (Tabak et al., 2020). La diferencia del comportamiento observado en el módulo ténsil y la fuerza ténsil, se debe a que la adhesión interfacial determina la efectividad de la transferencia de esfuerzos entre la matriz y el relleno, pero el módulo elástico no es afectado por ese parámetro, ya que para pequeñas cargas o desplazamientos la pérdida de adhesión no es observada (Tabak et al., 2020).

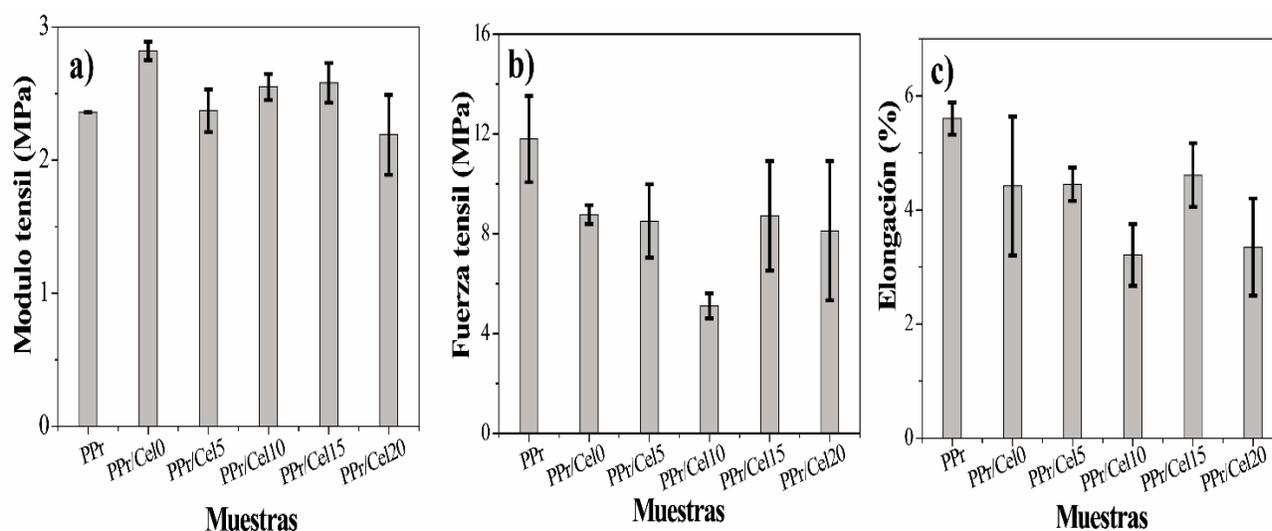


Figura 30. Ensayos de tracción de las muestras. **a)** El módulo ténsil, **b)** la fuerza ténsil y **c)** la elongación a la ruptura

7.15. Conductividad térmica

La conductividad térmica de la Cel tiene un valor de 0.03 W/m*K (Wu et al., 2021). La conductividad térmica de la mezcla PPr/Cel0 fue superior a la del PPr (figura 31) y a la Cel. Este comportamiento no era de esperarse, ya que las fibras naturales son malas conductoras del calor y por ello se han empleado como aislantes térmicos (Nukala et al., 2022; Yeh et al., 2015). Este comportamiento fue debido al tamaño y concentración de las partículas de la Cel y reducción de la porosidad (Guna et al., 2020).

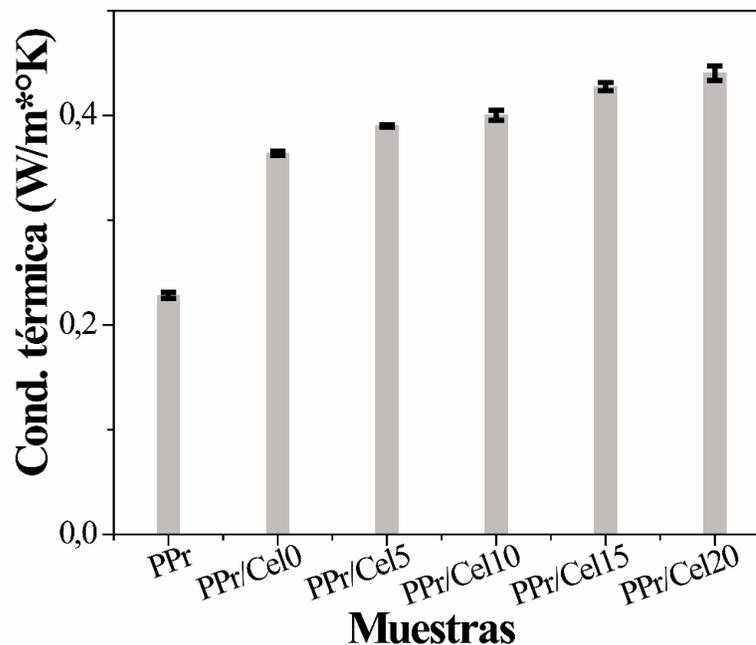


Figura 31. Conductividad térmica del PPr y las mezclas.

El mismo comportamiento fue observado para mezclas de polímeros reciclados (PPr, PEBDr y PEADr) y fibras de hojas de palma (Yeh et al., 2015). La conductividad del PPr es comparable con la reportada para un PPr (0.25 W/m*°K) (L. Huang, Wu, Wang, Ou, et al., 2020). Por otra parte, se observó un incremento en la conductividad térmica con respecto a la muestra PPr/Cel0 y con el aumento de la cantidad de PP-g-MHBP, esto se debió posiblemente a una mejor dispersión, empaquetamiento interfacial y menor número de cavidades (Rozman et al., 2000), lo cual fue evidenciado por los resultados de SEM. Los valores de conductividad térmica de las muestras obtenidas en el presente estudio son superiores a los de mezclas de PP ramificado/nanofibra de Cel (5-10 %) cuyos valores fueron entre 0.1 y 0.22 W/m*°K (Radzi et al., 2019).

Teniendo en cuenta las diferentes caracterizaciones realizadas y los análisis, y discusión de los resultados se evidencia el cumplimiento del segundo objetivo específico (determinar el

efecto del PP-g-MHBP en las propiedades estructurales, térmicas, reológicas, morfológicas, absorción de agua y mecánicas).

7.16. Resultados ANOVA

7.16.1. Hipótesis Operacional

Cuál es el efecto del PP-g-MHBP en las propiedades estructurales, térmicas, reológicas, morfológicas, absorción de agua y mecánicas de materiales compuestos de PPr/Cel.

7.16.2. Hipótesis Estadística

$H_0: \mu_{15-19} = \mu_{20-34} = \mu_{35-49} = \mu_{50-65}$ vs $H_1: \mu_j \neq \mu_k$ para al menos dos grupos j y k

donde μ_j denota el consumo promedio del PP-g-MHBP al grupo de muestras j .

7.16.3. Análisis de Resultados

7.16.3.1. Análisis Multivariante

Es un conjunto de técnicas estadísticas que tienen como objetivo analizar e interpretar las relaciones entre diversas variables de manera simultánea por lo cual permite describir, explicar o predecir los fenómenos objeto de estudio en la investigación.

7.16.3.2. Análisis de Correspondencias de más de dos factores SPSS

Para intentar dar respuesta al segundo objetivo específico (determinar el efecto del PP-g-MHBP en las propiedades estructurales, térmicas, reológicas, morfológicas, absorción de agua y mecánicas de las mezclas) de una forma estadística se realizó un estudio de ANOVA de 2 factores uno llamado Material, compuesto por 8 variables y la otra llamada Mat_Compuesto determinada por 26 variables de la siguiente forma:

7.16.3.2.1. Factor 1:

Factor material: en este factor se definieron 8 valores (contenidos del PP-g-MHBP, variable independiente) que son los que se presentan a continuación:

- 1: Celulosa
- 2: PPr-g-MHBP
- 3: PPr
- 4: PPr/Cel0
- 5: PPr/Cel5
- 6: PPr/Cel10
- 7: PPr/Cel15
- 8: PPr/Cel20

7.16.3.2.2. Factor 2

Factor Mat_Compuesto: en este factor se definieron 26 variables (dependiente, respuestas).

- 1: Cantidad de PPr reciclado (g)
- 2: Cantidad de celulosa (tamaño de 45 μ m) (g)
- 3: Cantidad agente acoplamiento PP-g-MHBP (%)
- 4: T₂₀
- 5: T_{d1}
- 6: T_{d2}
- 7: T_{f1}
- 8: T_{f2}
- 9: ΔH_{1f}
- 10: ΔH_{2f}

- 11: X_{CPEBD}
- 12: (X_{cPP})
- 13: η a un $\dot{\gamma}$ de 10^{-3} a 175 °C
- 14: η a un $\dot{\gamma}$ de 10^{-3} a 180 °C
- 15: η a un $\dot{\gamma}$ de 10^{-3} a 190 °C
- 16: η a un $\dot{\gamma}$ de 10^{-3} a 200 °C
- 17: $E_a \times 10^{-2}$ (Kcal/g,mol)
- 18: η^*
- 19: Módulo elástico (Mpa)
- 20: Deformación a la rotura (%)
- 21: Resistencia a la tensión (Mpa)
- 22: Dureza
- 23: AH a los 15 días (%)
- 24: AbA (%)
- 25: EH (%)
- 26: Conductividad térmica (W/m*K)

7.16.3.3. Prueba de Levene de Varianzas de error

La prueba de Levene se utiliza para verificar que las varianzas entre los factores sean iguales para todas las muestras cuando los datos de cada variable del estudio que se analizaron no provienen de una distribución normal. Por lo tanto, la Tabla 5 permite verificar si las varianzas entre los dos factores Material y Mat_Compuesto son homogéneas.

Tabla 5. Prueba de Igualdad de Levene de varianzas de error

Variable dependiente: Valor del Material Compuesto			
F	df1	df2	Sig.
.	206	1	.

De acuerdo con la tabla 5, al obtener un $p = 0,00$ se aprueba la hipótesis nula; esto quiere decir que no existen diferencias significativas; es decir, se evidencia la interacción entre la varianza de las variables entre los grupos de factores Material y Material Compuesto comprobando que estos son homogéneos garantizando, así, la efectividad del diseño de experimento.

Tabla 6. Prueba de efectos Inter-sujetos

Variable dependiente: Valor del Material Compuesto

Pruebas de efectos inter-sujetos						
Variable dependiente: Valor del Material Compuesto						
Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Cuadrático promedio	F	Sig.	Eta parcial al cuadrado
Modelo corregido	772301270,033 ^a	206	3749035,291	63,930	,099	1,000
Interceptación	39843149,380	1	39843149,380	679,420	,024	,999
Material	58444154,707	7	8349164,958	142,373	,064	,999
Mat_Comp	201763805,647	25	8070552,226	137,622	,067	1,000
Material * Mat_Comp	512169971,580	174	2943505,584	50,194	,112	1,000
Error	58642,850	1	58642,850			
Total	812580126,204	208				
Total, corregido	772359912,883	207				

a. R al cuadrado = 1,000 (R al cuadrado ajustada = ,984)

Para la Tabla 6, se genera una variable dependiente llamada Valor del Material Compuesto; permitiendo analizar conjuntamente las dos factores Material y Mat_Compuesto donde se observa que el modelo corregido tiene un nivel de significancia de 0,099 menor a 0,5 y el nivel de significancia entre la interacción entre los dos factores es de 0,112 menor a 0,5. Por lo

tanto si existen diferencias significativas entre los promedios de valores; es decir, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna, donde se evidencia que la *variable independiente PP-g-MHBP* actúa como agente de acoplamiento para los materiales de PPr/Cel teniendo un efecto entre las propiedades (T_{mx} , T_{fx} , η , MFI, tracción, resistencia al impacto, dureza, AH, AbA, EH y conductividad térmica) de los materiales compuestos de PPr, Cel y PP-g-MHBP.

Tabla 7. Sección 1: Medias Marginales explicadas de la Variable Materiales Compuestos hacia la variable dependiente: Valor del Material Compuesto.

Materiales Compuestos	Media	Error estándar	Intervalo de confianza al 95%	
			Límite inferior	Límite superior
Cantidad de PPr reciclado (g)	8,566	85,618	-1079,307	1096,44
Cantidad de celulosa (tamaño de 45 μ m) (g)	3,671	85,617	-1084,202	1091,545
Cantidad agente acoplamiento PP-g-MHBP (%)	1,375	85,618	-1086,498	1089,248
T ₂₀ (20%)	331,375	85,618	-756,498	1419,248
T _{m1} °C	216,061	85,618	-871,812	1303,935
T _{m2} -C	377,359	82,899	-675,97	1430,688
T _{f1}	98,792 ^a	91,529	-1064,194	1261,778
T _{f2}	122,735	85,618	-965,138	1210,608
ΔH_{1f} (J/g)	65,309	85,617	-1022,564	1153,182
ΔH_{2f} (J/g)	12,059	85,617	-1075,814	1099,933

Las medias marginales explicadas de la variable Materiales Compuestos (tabla 7 y 8) son simplemente las medias de los 26 valores promediados en cada nivel del Valor del Material Compuesto (Variable dependiente y). Por lo tanto, la media más alta corresponde a la η (Pa,s) a un $\dot{\gamma}$ de 10^{-3} a 175°C con 4333,971 y la menor media es la conductividad térmica con 0,281. Además, todas las variables tienen desviación estándar de 85,61; esto garantiza que se ajustan las variables η (Pa,s) a un $\dot{\gamma}$ de 10^{-3} a 175 °C, 180 °C, 190 °C y 200 °C respectivamente con la *variable independiente PP-g-MHBP*.

Tabla 8. Sección 2: Medias Marginales explicadas de la Variable Materiales Compuestos

hacia la variable dependiente: Valor del Material Compuesto.

X _{CPP}	3,681	85,618	-1084,192	1091,555
X _{CPEB}	11,600	85,618	-1076,273	1099,473
η a un $\dot{\gamma}$ de 10^{-3} a 175 °C	4333,971	85,617	3246,098	5421,845
η a un $\dot{\gamma}$ de 10^{-3} a 180°C	2078,444	85,618	990,571	3166,317
η a un $\dot{\gamma}$ de 10^{-3} a 190°C	1990,172	85,618	902,298	3078,045
η a un $\dot{\gamma}$ de 10^{-3} a 200°C	1683,524	85,617	595,651	2771,397
Ea X10 ⁻² (Kcal/g,mol)	,895	85,617	-1086,978	1088,768
η	,577	85,618	-1087,296	1088,451
Módulo elástico (MPa)	1,859	85,617	-1086,015	1089,732
Deformación a la rotura (%)	3,936	85,617	-1083,938	1091,809
Resistencia a la tensión (MPa)	6,378	85,617	-1081,495	1094,252
Dureza	49,836	85,618	-1038,037	1137,710
AH a los 15 días (%)	1,529	85,618	-1086,345	1089,402
AbA (%)	2,880	85,618	-1084,993	1090,754
EH (%)	,338	85,618	-1087,535	1088,212
Conductividad térmica	,281	85,617	-1087,592	1088,155

a. Se basa en la media marginal de población modificada.

Así mismo, como los datos tienden a comportarse de acuerdo con una distribución normal, el resultado de las medias marginales representada en la tabla 7 y 8 para las η de 175 a 200 °C de acuerdo con dicha distribución se presentan en la figura 32 (obtenidas del programa STATKEY, Paquete estadístico). Por consiguiente, en dicha figura se puede apreciar con un nivel de significancia del 95% que la estimación del promedio poblacional (μ) de las η a un $\dot{\gamma}$ de 10^{-3} de 175 °C (figura 32a) está entre -11689,025 hasta 20156,968, 180 °C (figura 32b) está entre -2611,658 hasta 6768,546, 190 °C (figura 32c) está entre -2645,501 hasta 6625,84 y 200 °C (figura 32d) está entre -1852,985 hasta 5220,033.

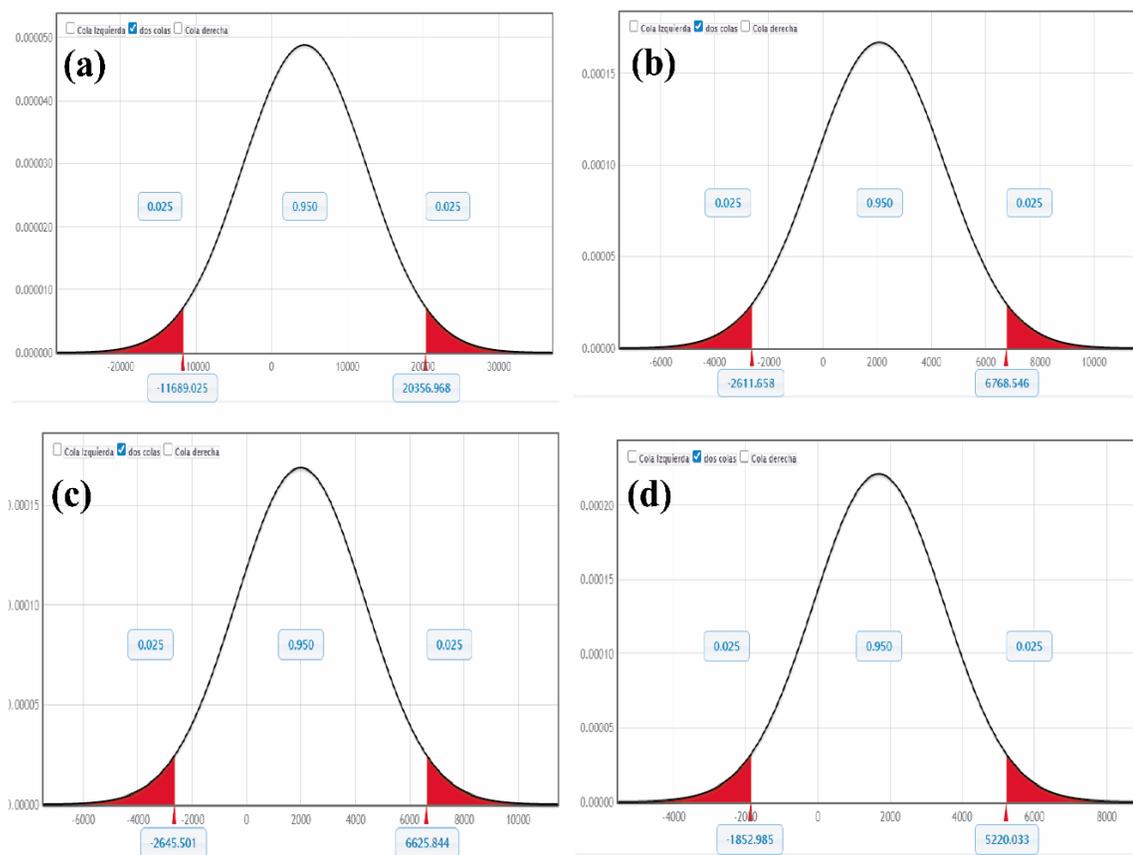


Figura 32. Distribución de las η de las muestras a un γ de 10^{-3} (Pa.s)

Tabla 9. Sección 1: Comparaciones Múltiples entre la Variable de Procesos y la variable dependiente: Valor del Material Compuesto.

(I) Variable de proceso	(J) Variable de proceso	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
Cel	PP-g-MHBP	15,221973	67,1638928	1,000	-2140,796404	2171,240350
	PPr	-129,520969	67,1638928	,683	-2285,539346	2026,497408
	PPr/Cel0	-1739,254450	67,1638928	,062	-3895,272827	416,763927
	PPr/Cel5	-437,559231	67,1638928	,242	-2593,577608	1718,459146
	PPr/Cel10	-353,792092	67,1638928	,296	-2509,810469	1802,226285
	PPr/Cel15	-283,419569	67,1638928	,363	-2439,437946	1872,598808
	PPr/Cel20	-229,708400	67,1638928	,438	-2385,726777	1926,309977

Tabla 10. Sección 2: comparaciones Múltiples entre la Variable de Procesos y la variable dependiente: Valor del Material Compuesto

	Cel	-15,221973	67,1638928	1	-2171,24035	2140,796404
	PPr	-144,742942	67,1638928	0,633	-2300,761319	2011,275435
	PPr/Cel0	-1754,476423	67,1638928	0,061	-3910,4948	401,541954
PP-g-MHBP	PPr/Cel5	-452,781204	67,1638928	0,234	-2608,799581	1703,237173
	PPr/Cel10	-369,014065	67,1638928	0,284	-2525,032442	1787,004312
	PPr/Cel15	-298,641542	67,1638928	0,346	-2454,659919	1857,376835
	PPr/Cel20	-244,930373	67,1638928	0,414	-2400,94875	1911,088004
	Cel	129,520969	67,1638928	0,683	-2026,497408	2285,539346
	PP-g-MHBP	144,742942	67,1638928	0,633	-2011,275435	2300,761319
	PPr/Cel0	-1609,733481	67,1638928	0,067	-3765,751858	546,284896
PPr	PPr/Cel5	-308,038262	67,1638928	0,337	-2464,056639	1847,980115
	PPr/Cel10	-224,271123	67,1638928	0,447	-2380,2895	1931,747254
	PPr/Cel15	-153,8986	67,1638928	0,606	-2309,916977	2002,119777
	PPr/Cel20	-100,187431	67,1638928	0,792	-2256,205808	2055,830946

Tabla 11. Sección 3: comparaciones Múltiples entre la Variable de Procesos y la variable dependiente: Valor del Material Compuesto

	Cel	1739,25445	67,1638928	0,062	-416,763927	3895,272827
	PP-g-MHBP	1754,476423	67,1638928	0,061	-401,541954	3910,4948
	PPr	1609,733481	67,1638928	0,067	-546,284896	3765,751858
PPr/Cel0	PPr/Cel5	1301,695219	67,1638928	0,083	-854,323158	3457,713596
	PPr/Cel10	1385,462358	67,1638928	0,078	-770,556019	3541,480735
	PPr/Cel15	1455,834881	67,1638928	0,074	-700,183496	3611,853258
	PPr/Cel20	1509,54605	67,1638928	0,071	-646,472327	3665,564427
	Cel	437,559231	67,1638928	0,242	-1718,459146	2593,577608
	PP-g-MHBP	452,781204	67,1638928	0,234	-1703,237173	2608,799581
	PPr	308,038262	67,1638928	0,337	-1847,980115	2464,056639
PPr/Cel5	PPr/Cel0	-1301,695219	67,1638928	0,083	-3457,713596	854,323158
	PPr/Cel10	83,767138	67,1638928	0,858	-2072,251239	2239,785515
	PPr/Cel15	154,139662	67,1638928	0,605	-2001,878715	2310,158039
	PPr/Cel20	207,850831	67,1638928	0,477	-1948,167546	2363,869208

Tabla 12. Sección 4: comparaciones Múltiples entre la Variable de Procesos y la variable dependiente: Valor del Material Compuesto.

	Cel	353,792092	67,1638928	0,296	-1802,226285	2509,810469
	PP-g-MHBP	369,014065	67,1638928	0,284	-1787,004312	2525,032442
	PPr	224,271123	67,1638928	0,447	-1931,747254	2380,2895
PPr/Cel10	PPr/Cel0	-1385,462358	67,1638928	0,078	-3541,480735	770,556019
	PPr/Cel5	-83,767138	67,1638928	0,858	-2239,785515	2072,251239
	PPr/Cel15	70,372523	67,1638928	0,91	-2085,645854	2226,3909
	PPr/Cel20	124,083692	67,1638928	0,702	-2031,934685	2280,102069
	Cel	283,419569	67,1638928	0,363	-1872,598808	2439,437946
	PP-g-MHBP	298,641542	67,1638928	0,346	-1857,376835	2454,659919
	PPr	153,8986	67,1638928	0,606	-2002,119777	2309,916977
PPr/Cel15	PPr/Cel0	-1455,834881	67,1638928	0,074	-3611,853258	700,183496
	PPr/Cel5	-154,139662	67,1638928	0,605	-2310,158039	2001,878715
	PPr/Cel10	-70,372523	67,1638928	0,91	-2226,3909	2085,645854
	PPr/Cel20	53,711169	67,1638928	0,963	-2102,307208	2209,729546
	Cel	229,7084	67,1638928	0,438	-1926,309977	2385,726777
	PP-g-MHBP	244,930373	67,1638928	0,414	-1911,088004	2400,94875
	PPr	100,187431	67,1638928	0,792	-2055,830946	2256,205808
PPr/Cel20	PPr/Cel0	-1509,54605	67,1638928	0,071	-3665,564427	646,472327
	PPr/Cel5	-207,850831	67,1638928	0,477	-2363,869208	1948,167546
	PPr/Cel10	-124,083692	67,1638928	0,702	-2280,102069	2031,934685
	PPr/Cel15	-53,711169	67,1638928	0,963	-2209,729546	2102,307208

La Tabla 9, 10, 11 y 12 evidencia que no existen diferencias significativas por obtener un p -valor menor a 0,5 del material PP-g-MHBP en relación con los compuestos PPr/Cel0, PPr/Cel5, PPr/Cel10, PPr/Cel15 y PPr/Cel20; mientras que si se presentan diferencias significativas (p -valor $> 0,5$) del material PP-g-MHBP con los compuestos de Cel y PPr.

Tabla 13. Análisis de homogeneidad entre el factor del Mat_Compuesto y el factor de material

Variable de proceso	N	Subconjunto
		1
PP-g-MHBP	26	29,758412
Cel	26	44,980385
PPr	26	174,501354
PPr/Cel20	26	274,688785
PPr/Cel15	26	328,399954
PPr/Cel10	26	398,772477
PPr/Cel5	26	482,539615
PPr/Cel0	26	1784,234835
Sig.		,061

De acuerdo con la Tabla 13 al utilizar las medias para los grupos de los subconjuntos se obtiene un nivel de significancia de 0,061 menor a 0,5; esto evidencia que los materiales compuestos son homogéneos al ser representados en un solo grupo corroborando con lo que se estipula en la tabla 5. Es decir, se está garantizando que los resultados pueden generar un análisis global con cada uno de estos factores.

Tabla 14. Sección 1: Comparaciones Múltiples entre el factor Cantidad agente acoplamiento PP-g-MHBP (%) de la variable Materiales Compuestos con la variable dependiente: Valor del Material Compuesto

(J) Materiales Compuestos	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
				Límite inferior	Límite superior
Cantidad de PPr reciclado (g)	-7,191250	121,0814297	1,000	-5419,989451	5405,606951
Cantidad de cel (tamaño de 45 μ m) (g)	-2,296250	121,0814297	1,000	-5415,094451	5410,501951
20%	-330,000000	121,0814297	,688	-5742,798201	5082,798201
T _{ml} °C	-214,686250	121,0814297	,872	-5627,484451	5198,111951

Tabla 15. Sección 2: Comparaciones Múltiples entre el factor Cantidad agente

acoplamiento PP-g-MHBP (%) de la variable Materiales Compuestos con la variable dependiente: Valor del Material Compuesto

$T_{m2}^{\circ}\text{C}$	-368,046111	117,6699986	,624	-5628,340433	4892,248210
T_{f1}	-97,417143	125,3311867	,998	-5700,195571	5505,361285
T_{f2}	-121,360000	121,0814297	,989	-5534,158201	5291,438201
ΔH_{1f} (J/g)	-63,934000	121,0814297	1,000	-5476,732201	5348,864201
ΔH_{2f} (J/g)	-10,684175	121,0814297	1,000	-5423,482376	5402,114026
X_{cpe}	-2,306250	121,0814297	1,000	-5415,104451	5410,491951
X_{cpp}	-10,225000	121,0814297	1,000	-5423,023201	5402,573201
η a un $\dot{\gamma}$ de 10-3 a 175 °C	-4332,596250	121,0814297	,062	-9745,394451	1080,201951
η a un $\dot{\gamma}$ de 10-3 a 180 °C	-2077,069000	121,0814297	,130	-7489,867201	3335,729201
η a un $\dot{\gamma}$ de 10-3 a 190 °C	-1988,796750	121,0814297	,135	-7401,594951	3424,001451
η a un $\dot{\gamma}$ de 10-3 a 200 °C	-1682,149000	121,0814297	,160	-7094,947201	3730,649201
$E_a \times 10^{-2}$ (Kcal/g.mol)	,480000	121,0814297	1,000	-5412,318201	5413,278201
H	,797500	121,0814297	1,000	-5412,000701	5413,595701
Módulo elástico (MPa)	-,483875	121,0814297	1,000	-5413,282076	5412,314326
Deformación a la rotura (%)	-2,560875	121,0814297	1,000	-5415,359076	5410,237326
Resistencia a la tensión (MPa)	-5,003375	121,0814297	1,000	-5417,801576	5407,794826
Dureza	-48,461450	121,0814297	1,000	-5461,259651	5364,336751
Ah a los 15 días (%)	-,153575	121,0814297	1,000	-5412,951776	5412,644626
AbA (%)	-1,505113	121,0814297	1,000	-5414,303314	5411,293089
EH (%)	1,036663	121,0814297	1,000	-5411,761539	5413,834864
Conductividad térmica	1,093750	121,0814297	1,000	-5411,704451	5413,891951

Según la Tabla 14 y 15, al comparar el factor agente acoplamiento PP-g-MHBP (%) de la variable Material Compuesto con los otros factores, se observa que se presentan diferencias significativas al obtener un p-valor menor a 0,5 con los factores de η (Pa.s) a un $\dot{\gamma}$ de 10^{-3} a 175 °C, 180 °C, 190 °C y 200 °C, respectivamente. Dicho lo anterior, esto puede observarse en la figura 33 y 34, en el cual, se muestra en un diagrama de cajas (figura 33) como los datos de la η a un $\dot{\gamma}$ de 10^{-3} de 175 °C, 180 °C, 190 °C y 200 °C están distanciados y distribuidos uniformemente.

El mayor promedio muestral lo genera la viscosidad de 175 °C con resultados muy densos; sin embargo, se identifica un valor de η de 24433 Pa.s relacionado con el PPr/Cel0 muy alejado de los demás resultados. Los promedios muestrales de las η de 180 °C y 190 °C están alrededor de 1500 Pa.s y el menor promedio η lo presenta las mezclas analizadas a 200 °C.

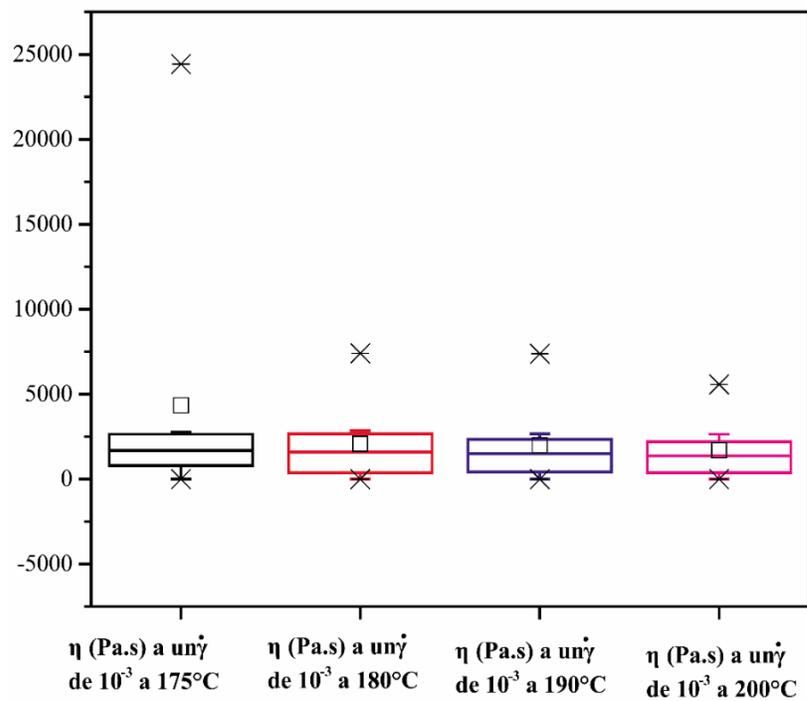


Figura 33. Diagrama de cajas de las η de las muestras a un $\dot{\gamma}$ de 10^{-3} .

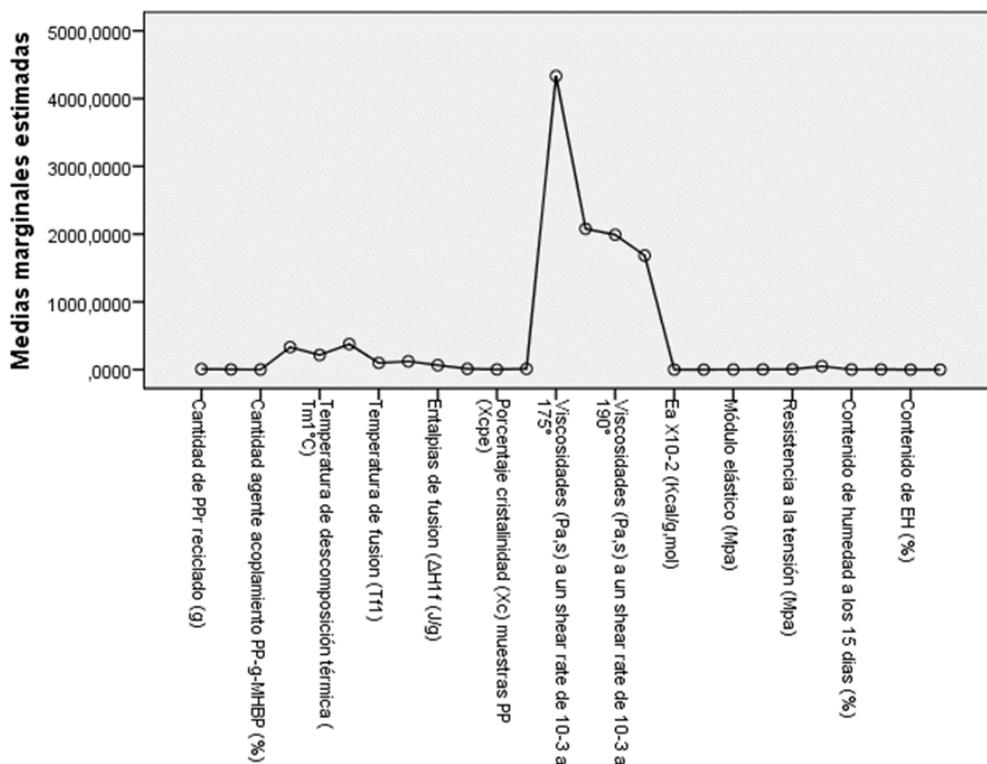


Figura 34. Medias marginales estimadas de valor del material compuesto

La figura 34 muestra una similitud de curva normal o campana de gauss en el cual se evidencia que la mayor concentración de los resultados del material compuesto se encuentran en las η (Pa.s) a un $\dot{\gamma}$ de 10^{-3} a 175° , 180° , 190° y 200° respectivamente, acorde con los niveles de significancia de las Tablas 7 y 8

7.17. PROTOTIPO

En la figura 35 se presenta el prototipo (plato pequeño o portavasos), el cual, fue obtenido en forma satisfactorio. Para ello se empleó la muestra PPr/Cel20, el material presentó una superficie parcialmente lisa en la parte inferior (figura 35 a), pero una superficie porosa en la parte superior, esto se debió al método de procesamiento (moldeo por compresión) usado y a la dificultad de sacar el material a pesar de que se empleó desmoldante. El prototipo, es de color verde oscuro, con una pequeña formación de concavidad, con un peso estimado de 19,50 g, practico y funcional. En dicha figura se puede apreciar el diseño obtenido en forma de portavasos o plato pequeño y las respectivas medidas de los diámetros internos y externos (figura 35b). Por consiguiente, se estima que la aplicación que este puede llegar tener en la vida cotidiana es en el hogar o como artículo de juguetería. En consecuencia, de acuerdo con lo mencionado, su aplicación queda demostrado como portavasos (Figura 36)

Por consiguiente, también cabe aludir que la mezcla utilizada puede ser empleada para la fabricación de otro tipo de objetos de acuerdo con un uso en específico que se pretenda como, por ejemplo, un tenedor, un cuchillo, una cuchara, envases etc. Ya que, al ser un material compuesto de polímeros reforzado con fibra natural y termoplástico, sus aplicaciones y beneficios (economía en la fabricación y apoyo a la disminución del impacto negativo al ambiente de los plásticos) tienden a que este pueda expandirse en términos de producción a una gama de diversos usos. Por tanto, considerando que este utensilio es la primera edición del material mencionado, así que cabe

mencionar que para mejorar a futuro su diseño se recomienda que el prototipo sea obtenido por inyección.

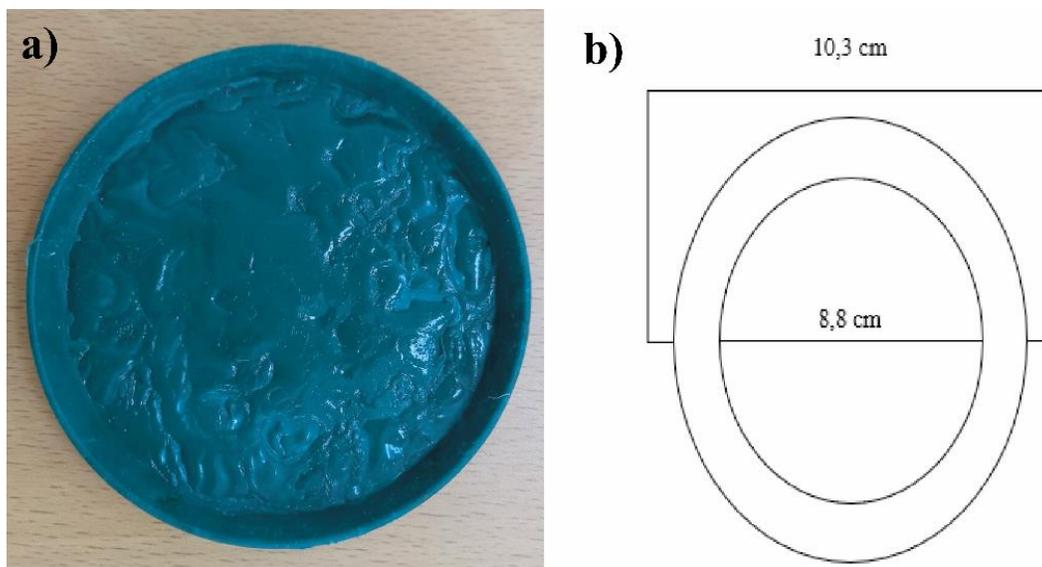


Figura 35. a) Prototipo del portavasos o plato pequeño elaborado en GIMAPOL. **b)**

Medidas de los diámetros internos y externos del prototipo

El prototipo obtenido, es un material compuesto novedoso desde el punto de vista económico y mecánico, esto es debido a que proviene de materiales que hoy en día representan un problema de contaminación que perjudica al medio ambiente y a las propiedades mejoradas debido a la acción del agente de acoplamiento utilizado. Al elaborar este prototipo podemos evidenciar alternativas de uso como metodología de aplicación de la economía circular en sustitución a la lineal aplicada en el sector industrial. Así mismo, el uso del PP-g-MHBP como agente de acoplamiento dentro de este material, se pudo demostrar que las propiedades mecánicas son mejoradas y con ello las aplicaciones en el que este puede ser utilizado. Por ende, en comparación con otras investigaciones en el que se ha obtenido también materiales compuestos con fibras naturales con y sin agente de acoplamiento, se evidencia que dentro de las mezclas no tienen una buena dispersión de los componentes, con ello, no se obtiene una mejor adhesión

interfacial que permita que las propiedades fisicoquímicas sean óptimas para su uso dando como resultado que en ocasiones requieren cambiar la técnica de fabricación que permita obtener los mejores efectos (Dahy, 2017; T. Huang et al., 2020; Ummartyotin & Pechyen, 2016).



Figura 36. Aplicación del portavasos o plato pequeño elaborado en GIMAPOL.

Al obtener este material derivado de la combinación de dos residuos diferentes (residuo agroindustrial y polimérico) se beneficiara 2 industrias que son la base fundamental de nuestra vida cotidiana en la parte de los alimentos (producción de arroz) y materiales de amplio uso (plásticos), y a su vez el cambio de pensamiento de una economía lineal (se obtienen las materias primas, se produce el modelo y luego se desecha después de su uso, sin tener en cuenta el impacto medioambiental negativo que puede tener al momento de ser desechado y sus consecuencias) por uno circular. En el caso de la industria agro, esta podrá beneficiarse en obtener un producto demás para la venta (considerándose actualmente como un desecho sin un fin en específico), en el que pueda optimizarse los costos incrementando sus ganancias mediante la aplicación de este como relleno o reforzante en matrices poliméricas recicladas para mejorar sus propiedades mecánicas, térmicas, morfológicas, reológicas, entre otro.

En el caso de la industria polimérica, la incorporación del PPr a su cadena productiva contribuirá a la disminución de fabricación de productos a base de petróleo (fuente no renovable) reduciendo la contaminación ambiental, la disminución de costos de producción, y con ello, a la elaboración de nuevos productos que extenderá su portafolio de ventas y con esto la obtención de ganancias. Así mismo, cabe aludir que el sector del reciclaje en materiales poliméricos también será beneficiado, ya que al ser uno de los sectores encargados del tratamiento, organización y distribución de estos materiales, estas empresas, pueden llegar a formar acuerdos con multinacionales o industrias encargadas de la fabricación de este tipo de materiales y vender el producto reciclado obteniendo de esto el aprovechamiento en términos de costos.

Finalmente es importante mencionar que con la obtención del prototipo se le da cumplimiento al cuarto objetivo específico de este trabajo de grado.

8. CONCLUSIONES

En este estudio se empleó un PP-g-MHBP como agente de acoplamiento para mezclas de PPr/Cel.

Este trabajo permitió el uso de una nueva alternativa de preparación de materiales compuestos empleando un nuevo agente de acoplamiento e incorporando materiales reciclados y subproductos de la industria agrícola. Por lo tanto, se contribuyó con la economía circular y a la reducción del impacto negativo de los materiales reciclados y de los residuos agroindustriales.

De acuerdo a los resultados se pudo constatar que la hipótesis inicialmente planteada en esta investigación no fue nula, ya que se pudo demostrar que el PP-g-MHBP actuó como agente de acoplamiento para los materiales compuestos de PPr/Cel y tuvo un efecto en las propiedades estructurales, térmicas, morfológicas, reológicas, mecánicas y de estos materiales.

El análisis reométrico permitió evidenciar que el tiempo de estabilización del torque de las mezclas obtenidas con PP-g-MHBP fue menor que el de la mezcla control y disminuyó con el contenido de éste, mostrando que este material mejoró la procesabilidad de las mezclas.

Los materiales compuestos preparados con PP-g-MHBP presentaron menor energía de activación de flujo que la muestra control y ello disminuyó con el contenido de éste (mejor procesabilidad).

El comportamiento reológico de las mezclas fue pseudoplástico y el PP-g-MHBP actuó como agente plastificante para las mezclas de PPr/Cel.

Los resultados de SEM y el diagrama de Cole-Cole permitieron evidenciar que el PP-g-MHBP mejoró la interacción entre el PPr y la Cel, siendo esta mayor para la mezcla obtenida con el 20 % de este material (PPr/Cel20). Por lo tanto, el PP-g-MHBP también actuó como agente de acoplamiento.

El PP-g-MHBP mejoró la estabilidad térmica, la resistencia al impacto y la conductividad térmica de las mezclas, pero las propiedades mecánicas fueron independientes del contenido de éste.

Los resultados dados por el ANOVA muestran que los datos obtenidos de los factores analizados son homogéneos y que existen diferencias significativas donde se evidencia que la *variable independiente PP-g-MHBP* actúa como agente de acoplamiento para los materiales de PPr/Cel teniendo un efecto entre las propiedades (T_{mx} , T_{fx} , η , MFI, tracción, resistencia al impacto, dureza, AH, AbA, EH y conductividad térmica) de los materiales compuestos de PPr, Cel y PP-g-MHBP.

La obtención del prototipo fue algo importante de esta investigación, ya que ello permitió demostrar que a partir de las materias primas utilizadas se pueden obtener materiales con mayor valor agregado y que posiblemente pueden incursionar en algunos mercados. Así mismo, se recomienda que aun futuro se le sea realizado el LCA a este material, con el objetivo de conocer el impacto que podrá tener sobre el medio ambiente y qué medidas tomar en cuanto al proceso productivo para que su efecto sea el mínimo.

9. PERSPECTIVAS DEL TRABAJO

- Gestionar con algunas empresas de la región o el país el desarrollo de este tipo de materiales a escala piloto.
- Obtener prototipos por el método de inyección.
- Someter artículos derivados de este estudio en revistas Q1 o Q2.
- Continuar con la socialización de los resultados del estudio.
- Realizar un estudio económico para conocer la rentabilidad de su fabricación.

10. PRODUCCIÓN CIENTÍFICA

1. Participación como ponente en el VIII SIMPOSIO DE MATERIALES POLIMÉRICOS (Figura 37) de la ciudad de Cali con el trabajo de investigación titulado “*EVALUACIÓN DE UN POLIPROPILENO FUNCIONALIZADO CON UN POLIÉSTER ALTAMENTE RAMIFICADO MALEINIZADO, COMO AGENTE DE ACOPLAMIENTO PARA MATERIALES COMPUESTOS DE POLIPROPILENO RECICLADO Y CELULOSA DE LA CASCARILLA DE ARROZ*”, el cual, el evento se desarrolló del 2 al 4 de noviembre del año 2022



Figura 37. Constancia de participación en el VIII SIMPOSIO DE MATERIALES POLIMERICOS.

2. Participación como ponente en el evento IX SEMANA INTERNACIONAL DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN (figura 38), con el trabajo de investigación titulado “*PROPIEDADES REOLÓGICAS DE COMPOSITOS OBTENIDOS A PARTIR DE*

POLIPROPILENO RECICLADO Y CELULOSA USANDO POLIPROPILENO

FUNCIONALIZADO CON UN POLIESTER POLIOL MALEINIZADO ALTAMENTE

RAMIFICADO, “el cual, el evento se desarrolló del 29 de noviembre al 02 de diciembre del año 2022



Figura 38. Constancia de participación en IX SEMANA INTERNACIONAL DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN.

3. De acuerdo a la justificación de este trabajo, uno de los propósitos es que este estudio contribuya a la investigación en Colombia y en el mundo sobre el uso de la Cel derivada de la CA en la industria polimérica y el mejoramiento de la interacción entre ésta y los polímeros hidrofóbicos, así que, con base en eso, se encuentra un artículo sometido en un journal Q1 (figura 39) que lleva por nombre *RHEOLOGICAL PROPERTIES OF RECYCLED*

*POLYPROPYLENE/CELLULOSE COMPOSITES PREPARED USING POLYPROPYLENE
FUNCTIONALIZED WITH A HYPERBRANCHED MALEINIZED POLYESTER POLYOL AS
COUPLING AGENT.*

Arabian Journal for Science and Engineering
**Rheological properties of recycled polypropylene/crystalline cellulose composites
 prepared using polypropylene functionalized with a hyperbranched maleinized
 polyester polyol as coupling agent**
 --Manuscript Draft--

Manuscript Number:	AJSE-D-23-02188
Full Title:	Rheological properties of recycled polypropylene/crystalline cellulose composites prepared using polypropylene functionalized with a hyperbranched maleinized polyester polyol as coupling agent
Article Type:	SCI / ENG - Research Article
Section/Category:	SCI-Chemistry
Keywords:	recycled polypropylene; crystalline cellulose; coupling agent; rheological properties
Corresponding Author:	Edwin A Murillo, Ph D Universidad Francisco de Paula Santander COLOMBIA
Corresponding Author Secondary Information:	
Corresponding Author's Institution:	Universidad Francisco de Paula Santander
Corresponding Author's Secondary Institution:	
First Author:	Ingrid Y. Contreras-Atuesta
First Author Secondary Information:	
Order of Authors:	Ingrid Y. Contreras-Atuesta Edwin A Murillo, Ph D

Figura 39. Artículo sometido en el Arabian Journal for Science and Engineering

11. REFERENCIAS

- Acharya, S., & Chaudhary, A. (2012). Bioprospecting thermophiles for cellulase production: A review. *Brazilian Journal of Microbiology*, *43*(3), 844–856. <https://doi.org/10.1590/S1517-83822012000300001>
- Ahmad, Z., Rozaizan, N. N., Rahman, R., Mohamad, A. F., & Wan Ismail, W. I. N. (2016). Isolation and characterization of Microcrystalline Cellulose (MCC) from Rice Husk (RH). *MATEC Web of Conferences*, *47*(January). <https://doi.org/10.1051/matecconf/20164705013>
- Alqahtani, N., Alejji, M., & Labidi, S. (2021). Influence of Compatibilizers on Date Palm Fiber and High Density Polyethylene Composite. *American Journal of Engineering, Science and Technology (AJEST)*, *10*(MARCH 2021), 62–81.
- Ararat, C. A., Quiñonez, W., & Murillo, E. A. (2019). Maleinized Hyperbranched Polyol Polyester: Effect of the Content of Maleic Anhydride in the Structural, Thermal and Rheological Properties. *Macromolecular Research*, *27*(7), 693–702. <https://doi.org/10.1007/s13233-019-7089-1>
- Ariyoshi, S., Hashimoto, S., Ohnishi, S., Negishi, S., Mikami, H., Hayashi, K., Tanaka, S., & Hiroshiba, N. (2021). Broadband terahertz spectroscopy of cellulose nanofiber-reinforced polypropylenes. *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, *265*, 115000. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2020.115000>
- Arjmandi, R., Hassan, A., Majeed, K., & Zakaria, Z. (2015). Rice Husk Filled Polymer Composites. *International Journal of Polymer Science*, *2015*. <https://doi.org/10.1155/2015/501471>
- Arjmandi, R., Ismail, A., Hassan, A., & Abu Bakar, A. (2017). Effects of ammonium polyphosphate content on mechanical, thermal and flammability properties of kenaf/polypropylene and rice husk/polypropylene composites. *Construction and Building*

- Materials*, 152, 484–493. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.052>
- ASTM-D2240. (2017). Standard method for Rubber Property - Durometer Hardness. In *Annual Book of ASTM Standards* (p. 13).
- ASTM. (2010). D1238-13 Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer. *Norma*, 08, 1–16. <https://doi.org/10.1520/D1238-13>.
- ASTM D638. (2014). Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. In *ASTM Standards* (Vol. 08).
- Baulch, S., & Perry, C. (2014). Evaluating the impacts of marine debris on cetaceans. *Marine Pollution Bulletin*, 80(1–2), 210–221. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.12.050>
- Bengtsson, M., Baillif, M. Le, & Oksman, K. (2007). Extrusion and mechanical properties of highly filled cellulose fibre-polypropylene composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(8), 1922–1931. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.03.004>
- Beyer, D. G., & Hopmann, P. D. C. (2018). Reactive Extrusion: Principles and Applications. In *Encyclopedia of Polymer Science and Engineering*, Vol. 14.
- Bhattacharyya, D., Subasinghe, A., & Kim, N. K. (2015). Natural fibers: Their composites and flammability characterizations. In *Multifunctionality of Polymer Composites: Challenges and New Solutions*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-26434-1.00004-0>
- Bogataj, V., Fajs, P., Peñalva, C., Omahen, M., Čop, M., & Henttonen, A. (2019). Utilization of recycled polypropylene, cellulose and newsprint fibres for production of green composites. *Detritus*, 7(September), 36–43. <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2019.13857>
- Braun, J., Edler, M., Emig, J., Gahleitner, M., Kahlen, S., Sandholzer, M., Scriba, M., & Tranninger, M. (2017). Polypropylene (PP). *Kunststoffe International*, 107(10), 14–19. <https://doi.org/10.4324/9780429447341-59>
- Burande, B. C., Dhakite, P. A., & Rawat, S. G. (2018). Study of Biopolymers Based on Renewable

- Resources - A Review . *International Journal of Scientific Research in Science and Technology* , July. <http://ijsrst.com/IJSRST4111>
- Caceres, R. alvarez. (2007). *Estadística aplicada a las ciencias de la salud - Rafael Álvarez Cáceres* - Google Libros. Diaz de Santos. https://books.google.com.co/books?id=V2ZosgPYI0kC&pg=PA16&dq=variable+cualitativa&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwj7g9r7y_v8AhWERDABHUfhDecQ6AF6BAgFEAI#v=onepage&q=variable+cualitativa&f=false
- Caicedo, C., & Murillo, E. A. (2019). Structural, thermal, rheological, morphological and mechanical properties of polypropylene functionalized in molten state with maleinized hyperbranched polyol polyester. *European Polymer Journal*, 118(June), 254–264. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.06.005>
- Campilho, R. D. S. G. (2015). Natural fiber composites. In *Natural Fiber Composites*. <https://doi.org/10.1201/b19062>
- Cardona Uribe, N., Arenas Echeverry, C., Betancur Velez, M., Jaramillo, L., & Martinez, J. (2018). Possibilities of rice husk ash to be used as reinforcing filler in polymer sector -a review. *Revista UIS Ingenierías*, 13(1), 127–142. <https://doi.org/10.18273/revuin.v17n1-2018012>
- Castro, C., & Lopes, C. (2022). Digital Government and Sustainable Development. *Journal of the Knowledge Economy*, 13(2), 880–903. <https://doi.org/10.1007/s13132-021-00749-2>
- Chauhan, S., Aggarwal, P., & Karmarkar, A. (2016). The effectiveness of m-TMI-grafted-PP as a coupling agent for wood polymer composites. *Journal of Composite Materials*, 50(25), 3515–3524. <https://doi.org/10.1177/0021998315622050>
- Chen, Y., Wang, N., Tong, G., Wu, D., Jin, X., & Zhu, X. (2018). Synthesis of Multiarm Star Polymer Based on Hyperbranched Polyester Core and Poly(ϵ -caprolactone) Arms and Its

- Application in UV-Curable Coating. *ACS Omega*, 3(10), 13928–13934.
<https://doi.org/10.1021/acsomega.8b02128>
- Code, K., & Ho, H. J. (2019). *POLYPROPYLENE COMPOSITE RESIN COMPOSITION INCLUDING SILYATED MICROFIBRILLATED CELLULOSE AND VEHICLE PILLAR TRIM USING THE SAME*. US patent.
- Codou, A., Anstey, A., Misra, M., & Mohanty, A. K. (2018). Novel compatibilized nylon-based ternary blends with polypropylene and poly(lactic acid): Morphology evolution and rheological behaviour. *RSC Advances*, 8(28), 15709–15724.
<https://doi.org/10.1039/c8ra01707g>
- Consejo Nacional de Política Económica y Social. (2018). Conpes 3918. Estrategia para la implementación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en Colombia. *Documento Conpes 3918*, 74.
- Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES). (2018). Política de Crecimiento Verde (CONPES 3934). *Departamento Nacional de Planeación*, 114.
- CORPONOR. (2019). *CORPONOR evalúa alternativas económicas para el Catatumbo*. - *Corponor*. <https://corponor.gov.co/web/index.php/2019/05/17/corponor-evalua-alternativas-economicas-para-el-catatumbo/>
- Crawford, C. B., & Quinn, B. (2017). Physiochemical properties and degradation. In *Microplastic Pollutants*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-809406-8.00004-9>
- da Silva Barbosa Ferreira, E., Luna, C. B. B., Araújo, E. M., Siqueira, D. D., & Wellen, R. M. R. (2021). Polypropylene/wood powder/ethylene propylene diene monomer rubber-maleic anhydride composites: Effect of PP melt flow index on the thermal, mechanical, thermomechanical, water absorption, and morphological parameters. *Polymer Composites*, 42(1), 484–497. <https://doi.org/10.1002/pc.25841>

- Dahlem, M. A., Borsoi, C., Hansen, B., & Catto, A. L. (2019). Evaluation of different methods for extraction of nanocellulose from yerba mate residues. *Carbohydrate Polymers*, 218, 78–86. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.04.064>
- Dahy, H. (2017). Biocomposite materials based on annual natural fibres and biopolymers – Design, fabrication and customized applications in architecture. *Construction and Building Materials*, 147, 212–220. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.079>
- de la Orden, M. U., González Sánchez, C., González Quesada, M., & Martínez Urreaga, J. (2007). Novel polypropylene-cellulose composites using polyethylenimine as coupling agent. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(9), 2005–2012. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.05.008>
- Departamento de estadística, análisis matemático y optimización. (2021). Diseño y Análisis de Experimentos en el SPSS. In http://eio.usc.es/eipc1/BASE/BASEMASTER/FORMULARIOS-PHP/MATERIALESMATER/Mat_12_Apunte%20SPSS.pdf.
- [http://eio.usc.es/eipc1/BASE/BASEMASTER/FORMULARIOS-PHP/MATERIALESMATER/Mat_12_Apunte SPSS.pdf](http://eio.usc.es/eipc1/BASE/BASEMASTER/FORMULARIOS-PHP/MATERIALESMATER/Mat_12_Apunte%20SPSS.pdf)
- Departamento Nacional de Planeación. (n.d.). *El Consejo Nacional de Política Económica y Social, CONPES*. Gov.Co.
- Deutz, P. (2019). Circular Economy. In *International Encyclopedia of Human Geography, Second Edition* (Second Edi, Vol. 2). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102295-5.10630-4>
- Diop, M. F., & Torkelson, J. M. (2013). Maleic anhydride functionalization of polypropylene with suppressed molecular weight reduction via solid-state shear pulverization. *Polymer*, 54(16), 4143–4154. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2013.06.003>
- Djafari Petroudy, S. R. (2017). Physical and mechanical properties of natural fibers. In *Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction*. Elsevier Ltd.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100411-1.00003-0>

DNP. (2016). Documento CONPES 3874. Política Nacional Para La Gestión Integral De Residuos Solidos. *Consejo Nacional de Política Económica y Social República De Colombia. Departamento Nacional De Planeación (DNP)*, 73.

Do, F. (2012). *POLYPROPYLENE*.

Duy Tran, T., Dang Nguyen, M., Thuc, C. N. H., Thuc, H. H., & Dang Tan, T. (2013). Study of mechanical properties of composite material based on polypropylene and Vietnamese rice husk filler. *Journal of Chemistry*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/752924>

El-Sakhawy, M., Tohamy, H. A. S., Salama, A., & Kamel, S. (2019). Thermal properties of carboxymethyl cellulose acetate butyrate. *Cellulose Chemistry and Technology*, 53(7–8), 667–675. <https://doi.org/10.35812/CelluloseChemTechnol.2019.53.65>

Elkhaoulani, A., Arrakhiz, F. Z., Benmoussa, K., Bouhfid, R., & Qaiss, A. (2013). Mechanical and thermal properties of polymer composite based on natural fibers: Moroccan hemp fibers/polypropylene. *Materials and Design*, 49, 203–208. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.01.063>

Esra Erbas Kiziltas, Alper Kiziltas, 2 Ellen C. Lee. (2017). Structure and Properties of Compatibilized Recycled Polypropylene/Recycled Polyamide 12 Blends with Cellulose Fibers Addition. *Polymers and Polymer Composites*, 16(2), 101–113. <https://doi.org/10.1002/pc>

Europe, P., & EPRO. (2019). *Plastics - the Facts 2019*.

Fang, W., Yang, X., Li, Q., Li, M., & Xiao, G. (2020). Improved mode I interlaminar fracture toughness of random polypropylene composite laminate via multiscale reinforcing formed by introducing functional nanofibrillated cellulose. *Composites Part B: Engineering*, 203, 108481. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108481>

- Faris M. AL-Oqla; Mohd S. Salit. (2017). Materials Selection for Natural Fiber Composites. In Charlotte Cockle (Ed.), *Woodhead Publishing* (Vol. 53, Issue 9).
- Fink, J. K. R. polymers fundamentals and applications : a concise guide to industrial polymer. (2005). *reactive polymers fundamentals and applications*. William Andrew Pub.
- Flores-Gallardo, S. G., Sánchez-Valdes, S., & Ramos De Valle, L. F. (2001). Polypropylene/polypropylene-grafted acrylic acid blends for multilayer films: Preparation and characterization. *Journal of Applied Polymer Science*, 79(8), 1497–1505. [https://doi.org/10.1002/1097-4628\(20010222\)79:8<1497::AID-APP170>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/1097-4628(20010222)79:8<1497::AID-APP170>3.0.CO;2-3)
- Fourati, Y., Tarrés, Q., Mutjé, P., & Boufi, S. (2018). PBAT/thermoplastic starch blends: Effect of compatibilizers on the rheological, mechanical and morphological properties. *Carbohydrate Polymers*, 199(July), 51–57. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.07.008>
- Franciszczak, P., Wojnowski, J., Kalniņš, K., & Piesowicz, E. (2019). The influence of matrix crystallinity on the mechanical performance of short-fibre composites – Based on homopolypropylene and a random polypropylene copolymer reinforced with man-made cellulose and glass fibres. *Composites Part B: Engineering*, 166, 516–526. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.02.046>
- García Arbeláez, C ., G . Vallejo, M. . L. . H. y E. . M. . E. (2016). *EL ACUERDO DE PARÍS ASÍ ACTUARÁ COLOMBIA FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO*.
- Gholampour, A., & Ozbakkaloglu, T. (2019). A review of natural fiber composites: properties, modification and processing techniques, characterization, applications. In *Journal of Materials Science* (Vol. 55, Issue 3). Springer US. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03990-y>
- Gobierno de Colombia. (2021). *ESTRATEGIA CLIMÁTICA DE LARGO PLAZO DE COLOMBIA PARA CUMPLIR CON EL ACUERDO DE PARÍS*. <https://acmineria.com.co/acm/wp->

content/uploads/2021/05/040521-DOCUMENTO-LTS-E2050-COLOMBIA.pdf

Greenpeace. (2019). *Branded. Vol. II: Identifying the World's top corporate plastic polluters. II*, 77.

Gu, F., Hall, P., & Miles, N. J. (2016). Performance evaluation for composites based on recycled polypropylene using principal component analysis and cluster analysis. *Journal of Cleaner Production*, 115, 343–353. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.062>

Guna, V., Ilangovan, M., Rather, M. H., Giridharan, B. V., Prajwal, B., Vamshi Krishna, K., Venkatesh, K., & Reddy, N. (2020). Groundnut shell / rice husk agro-waste reinforced polypropylene hybrid biocomposites. *Journal of Building Engineering*, 27, 100991. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100991>

Haftka, S., & Könnecke, K. (1991). Physical Properties of Syndiotactic Polypropylene. *Journal of Macromolecular Science, Part B*, 30(4), 319–334. <https://doi.org/10.1080/00222349108219480>

Hamielec, A. E., & Soares, J. B. P. (1999). *Metallocene catalyzed polymerization: industrial technology*. 446–453. https://doi.org/10.1007/978-94-011-4421-6_62

Hammani, S., Moulai-mostefa, N., Samyn, P., Bechelany, M., Dufresne, A., & Barhoum, A. (2020). Morphology, Rheology and Crystallization in Relation to the Viscosity Ratio of Polystyrene/Polypropylene Polymer Blends. *Materials*, 13(926), 1–20.

Hearle, J. W. S. (1962). The structure and mechanical properties of fibres. *Journal of the Textile Institute Proceedings*, 53(8), P449–P464. <https://doi.org/10.1080/19447016208688781>

Heidbreder, L. M., Bablok, I., Drews, S., & Menzel, C. (2019). Tackling the plastic problem: A review on perceptions, behaviors, and interventions. *Science of the Total Environment*, 668, 1077–1093. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.437>

Hidalgo-Salazar, M. A., Correa-Aguirre, J. P., García-Navarro, S., & Roca-Blay, L. (2020).

- Injection molding of coir coconut fiber reinforced polyolefin blends: Mechanical, viscoelastic, thermal behavior and three-dimensional microscopy study. *Polymers*, 12(7), 1–20. <https://doi.org/10.3390/polym12071507>
- Hsieh, T. T., Tiu, C., & Simon, G. P. (2001). Melt rheology of aliphatic hyperbranched polyesters with various molecular weights. *Polymer*, 42(5), 1931–1939. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(00\)00441-9](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(00)00441-9)
- Huang, J., Xu, C., Wu, D., & Lv, Q. (2017). Transcrystallization of polypropylene in the presence of polyester/cellulose nanocrystal composite fibers. In *Carbohydrate Polymers* (Vol. 167). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.03.046>
- Huang, L., Wu, Q., Wang, Q., Ou, R., & Wolcott, M. (2020). Solvent-free pulverization and surface fatty acylation of pulp fiber for property-enhanced cellulose/polypropylene composites. *Journal of Cleaner Production*, 244. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118811>
- Huang, L., Wu, Q., Wang, Q., & Wolcott, M. (2020a). *Interfacial crystals morphology modification in cellulose fiber / polypropylene composite by mechanochemical method*. 130(August 2019). <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105765>
- Huang, L., Wu, Q., Wang, Q., & Wolcott, M. (2020b). Interfacial crystals morphology modification in cellulose fiber/polypropylene composite by mechanochemical method. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 130(January). <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105765>
- Huang, T., Kwan, I., Li, K. D., & Ek, M. (2020). Effect of cellulose oxalate as cellulosic reinforcement in ternary composites of polypropylene/maleated polypropylene/cellulose. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 134(November 2019), 105894. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105894>
- Huner, U. (2017). Effect of chemical treatment and maleic anhydride grafted polypropylene

- coupling agent on rice husk and rice husk reinforced composite. *Materials Express*, 7(2), 134–144. <https://doi.org/10.1166/mex.2017.1359>
- Hwang, K. J., Park, J. W., Kim, I., Ha, C. S., & Kim, G. H. (2006). Effect of a compatibilizer on the microstructure and properties of partially biodegradable LDPE/aliphatic polyester/organoclay nanocomposites. *Macromolecular Research*, 14(2), 179–186. <https://doi.org/10.1007/BF03218506>
- Ismail, H., Rangunathan, S., & Hussin, K. (2011). Tensile properties, swelling, and water absorption behavior of rice-husk-powder-filled polypropylene/(recycled acrylonitrile-butadiene rubber) composites. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 17(3), 190–197. <https://doi.org/10.1002/vnl.20261>
- Ivanova, R., & Kotsilkova, R. (2018). Rheological study of poly(lactic) acid nanocomposites with carbon nanotubes and graphene additives as a tool for materials characterization for 3D printing application. *Applied Rheology*, 28(5), 1–10. <https://doi.org/10.3933/ApplRheol-28-54014>
- Jahani, Y. (2011). Comparison of the effect of mica and talc and chemical coupling on the rheology, morphology, and mechanical properties of polypropylene composites. *Polymers for Advanced Technologies*, 22(6), 942–950. <https://doi.org/10.1002/pat.1600>
- JAY L. DEVORE California. (2008). *probabilidad y estadistica para ingeniera y ciencias* (S. R. C. Gonzales (Ed.); septima).
- Jayanta Bera, D. D. K. (2008). Properties of Polypropylene Filled with Chemically Treated Rice Husk Jayanta. *Journal of Applied Polymer Science*, 110(5), 1271–1279. <https://doi.org/10.1002/app.28747>
- Jin Yang, Shaorong Lu, Qiyun Luo, Laifu Song, Yuqi Li, J. Y. (2016). Enhanced Mechanical and Thermal Properties of Polypropylene/Cellulose Fibers Composites With Modified Tannic as

- a Compatibilizer. *Polymers and Polymer Composites*, 39, 2036–2045.
<https://doi.org/10.1002/pc.24165>
- João, P. D. C., Teresa, R.-S., & Armando, C. D. (2020). The environmental impacts of plastics and micro-plastics use , waste and pollution: EU and national measures. *European Union*, October.
- Journal, M. P., Subbaiah, K. V., & Devi, K. D. (2013). Optimization Studies on Mechanical Properties of Montmorillonite (Mmt) Clay Filled Epoxy / Polyester. *Polymer Journal*, 8(2), 34–40.
- Juan, R., Domínguez, C., Robledo, N., Paredes, B., & García-Muñoz, R. A. (2020). Incorporation of recycled high-density polyethylene to polyethylene pipe grade resins to increase close-loop recycling and Underpin the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 276.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124081>
- Karaagac, E., Jones, M. P., Koch, T., & Archodoulaki, V. (2021). Polypropylene Contamination in Post-Consumer Polyolefin Waste : Characterisation , Consequences and Compatibilisation. *Polymers*, 13. <https://doi.org/10.3390/ polym13162618>
- Karian, H. G. (2003). *HANDBOOK POLYPROPYLENE AND POLYPROPYLENE Second Edition, Revised and Expanded COMPOSITES*.
- Kaynak, B., Spoerk, M., Shirole, A., Ziegler, W., & Sapkota, J. (2018). Polypropylene/Cellulose Composites for Material Extrusion Additive Manufacturing. *Macromolecular Materials and Engineering*, 303(5), 1–8. <https://doi.org/10.1002/mame.201800037>
- Khajeheian, M. B., & Rosling, A. (2015). Rheological and Thermal Properties of Peroxide-Modified Poly(l-lactide)s for Blending Purposes. *Journal of Polymers and the Environment*, 23(1), 62–71. <https://doi.org/10.1007/s10924-014-0693-4>
- Khalid, M., Ratnam, C. T., Chuah, T. G., Ali, S., & Choong, T. S. Y. (2008). Comparative study

- of polypropylene composites reinforced with oil palm empty fruit bunch fiber and oil palm derived cellulose. *Materials and Design*, 29(1), 173–178.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.11.002>
- Kim, H. S., Lee, B. H., Choi, S. W., Kim, S., & Kim, H. J. (2007). The effect of types of maleic anhydride-grafted polypropylene (MAPP) on the interfacial adhesion properties of bio-flour-filled polypropylene composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(6), 1473–1482. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.01.004>
- Kim, J. S., Kim, D. H., & Lee, Y. S. (2021). Various properties of PP/EVOH blends applying itaconic acid based compatibilizer according to ethylene content in the EVOH. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 60(11), 1176–1184.
<https://doi.org/10.1080/25740881.2021.1882492>
- Kim, Y. K. (2012). Natural fibre composites (NFCs) for construction and automotive industries. In *Handbook of Natural Fibres* (Issue 2000). Woodhead Publishing Limited.
<https://doi.org/10.1533/9780857095510.2.254>
- Kind Code, & Al., L. T.; et. (2019). *Fiber reinforced polypropylene composite* (Patent No. 20190241725).
- Kingly. (2015). *Impact Measurement & Cradle To Grave*.
- Koay, S. C., Chan, M. Y., Pang, M. M., & Tshai, K. Y. (2018). Influence of filler loading and palm oil-based green coupling agent on torque rheological properties of polypropylene/cocoa pod husk composites. *Advances in Polymer Technology*, 37(6), 2246–2252.
<https://doi.org/10.1002/adv.21883>
- Kotek, R., Afshari, M., Avci, H., & Najafi, M. (2017). Production of polyolefins. In *Polyolefin Fibres: Structure, Properties and Industrial Applications: Second Edition*. Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101132-4.00007-2>

- Kracalik, M. (2018). New approach for investigation of reinforcement in polymer nanocomposites using oscillatory shear flow data. *Epitoanyag - Journal of Silicate Based and Composite Materials*, 70(2), 42–47. <https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2018.9>
- Kwan, W. H., & Wong, Y. S. (2020). Acid leached rice husk ash (ARHA) in concrete: A review. *Materials Science for Energy Technologies*, 3, 501–507. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2020.05.001>
- Lazim, N. H., & Samat, N. (2017). Effects of Irradiated Recycled Polypropylene Compatibilizer on the Mechanical Properties of Microcrystalline Cellulose Reinforced Recycled Polypropylene Composites. *Procedia Engineering*, 184(Mcc), 538–543. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.124>
- Li, D., Zhou, L., Wang, X., He, L., & Yang, X. (2019). Effect of crystallinity of polyethylene with different densities on breakdown strength and conductance property. *Materials*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/ma12111746>
- Li, Q., & Tzoganakis, C. (2007). Functionalization of PP with Sulfonyl Azide through Reactive Processing. *International Polymer Processing*, 22(3), 311–319. <https://doi.org/10.3139/217.2039>
- Licari, J. J., & Swanson, D. W. (2011). Test and Inspection Methods. In *Adhesives Technology for Electronic Applications*. <https://doi.org/10.1016/b978-1-4377-7889-2.10007-5>
- Lin, T. A., Lin, M. C., Lin, J. Y., Lin, J. H., Chuang, Y. C., & Lou, C. W. (2020). Modified polypropylene/ thermoplastic polyurethane blends with maleic-anhydride grafted polypropylene: blending morphology and mechanical behaviors. *Journal of Polymer Research*, 27(2). <https://doi.org/10.1007/s10965-019-1974-3>
- Liu, H., Xie, T., Ou, Y., Fang, X., & Yang, G. (2004). Dynamic rheological properties of polypropylene/polyamide-6 blends modified with a maleated thermoplastic elastomer.

- Polymer Journal*, 36(9), 754–760. <https://doi.org/10.1295/polymj.36.754>
- Locock, K. E., Deane, J., Kosior, E., Prabakaran, H., Skidmore, M., & Hutt, O. E. (2017). *The Recycled Plastics Market: Global Analysis and Trends*.
- López de Dicastillo, C., Velásquez, E., Rojas, A., Guarda, A., & Galotto, M. J. (2020). The use of nanoadditives within recycled polymers for food packaging: Properties, recyclability, and safety. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(4), 1760–1776. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12575>
- Lu Wang, Douglas J. Gardner, D. W. B. (2017). Cellulose Nanofibril-Reinforced Polypropylene Composites for Material Extrusion: Rheological Properties. *Society*, 1–10. <https://doi.org/10.1002/pen.24615>
- Lucio, N. Q. (2014). Estadística con SPSS 22. In *วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย* (Macro E.I., Vol. 4, Issue 1).
- Ludueña, L., Fasce, D., Alvarez, V. A., & Stefani, P. M. (2011). Nanocellulose from rice husk following alkaline treatment to remove silica. *BioResources*, 6(2), 1440–1453. <https://doi.org/10.15376/biores.6.2.1440-1453>
- Luz, S. M., Del Tio, J., Rocha, G. J. M., Gonçalves, A. R., & Del'Arco, A. P. (2008). Cellulose and cellulignin from sugarcane bagasse reinforced polypropylene composites: Effect of acetylation on mechanical and thermal properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(9), 1362–1369. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.04.014>
- Maddah, H. A. (2016). Polypropylene as a Promising Plastic : A Review. *American Journal of Polymer Science*, 6(1), 1–11. <https://doi.org/10.5923/j.ajps.20160601.01>
- MADS. (2019). Estrategia Nacional de Economía Circular. In *Gobierno de Colombia*. <http://www.andi.com.co/Uploads/Estrategia Nacional de Economía Circular-2019>

Final.pdf_637176135049017259.pdf

- Mannan, M., & Al-Ghamdi, S. G. (2021). Complementing circular economy with life cycle assessment: Deeper understanding of economic, social, and environmental sustainability. *Circular Economy and Sustainability: Volume 1: Management and Policy, September 2021*, 145–160. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819817-9.00032-6>
- Martín-Alvarez, P. J. (2006). Análisis de varianza factorial. El procedimiento Modelo lineal general: Univariante. *Prácticas de Tratamiento Estadístico de Datos Con El Programa SPSS Para Windows: Aplicaciones En El Área de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 27, 260.
- Mazhandu, Z. S., Muzenda, E., Mamvura, T. A., Belaid, M., & Nhubu, T. (2020). Integrated and consolidated review of plastic waste management and bio-based biodegradable plastics: Challenges and opportunities. *Sustainability (Switzerland)*, 12(20), 1–57. <https://doi.org/10.3390/su12208360>
- Mihai, M., Huneault, M. A., Favis, B. D., & Li, H. (2007). Extrusion foaming of semi-crystalline PLA and PLA/thermoplastic starch blends. *Macromolecular Bioscience*, 7(7), 907–920. <https://doi.org/10.1002/mabi.200700080>
- Minagricultura. (2020). *Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural*. 16.
- Minambiente.gov.co. (n.d.). *Protocolo de Kioto | Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*.
Minambiente.Gov.Co. Retrieved June 9, 2021, from <https://www.minambiente.gov.co/index.php/convencion-marco-de-naciones-unidas-para-el-cambio-climatico-cmnucc/protocolo-de-kioto>
- Minambiente. (2020). *1342 24 Dic 2020*.
- Minimisation, W. (2014). *The Definition of Recycling What is Recycling ?* 1–12.
- Mitra, N., Prasad, D., & Banerjee, S. (2019). Identification of molecular vibrations associated with tacticity in polypropylene: Density functional theory-based simulations. *Journal of Polymer*

- Science, Part B: Polymer Physics*, 57(20), 1378–1385. <https://doi.org/10.1002/polb.24880>
- Mohajan, H. K. (2022). Cradle to Cradle is a Sustainable Economic Policy for the Better Future. *Annals of Spiru Haret University*, 4(January), 11. <https://doi.org/10.26458/21433>
- Molding, T., & Materials, E. (2004). Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of. In *Methods* (Issue January).
- Montgomery, D. C. A. S. U. (2017). *Design and Analysis of Experiments Ninth Edition*. www.wiley.com/go/permissions.%0Ahttps://lccn.loc.gov/2017002355
- Morais, D. S., Ávila, B., Lopes, C., Rodrigues, M. A., Vaz, F., Machado, A. V., Fernandes, M. H., Guedes, R. M., & Lopes, M. A. (2020). Surface functionalization of polypropylene (PP) by chitosan immobilization to enhance human fibroblasts viability. *Polymer Testing*, 86(February). <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106507>
- N. H. Lazim, N. S. (2017). The Influence of Irradiated Recycled Polypropylene Compatibilizer on the Impact Fracture Behavior of Recycled Polypropylene/Microcrystalline Cellulose Composites. *Polymer Composites*, 16(2), 1–10. <https://doi.org/10.1002/pc.24430>
- Natural fiber composites: What's holding them back? | CompositesWorld*. (n.d.). Retrieved February 4, 2021, from <https://www.compositesworld.com/articles/natural-fiber-composites-whats-holding-them-back>
- Nguyen-tri, P., Sollogoub, C., Guinault, A., Nguyen-tri, P., Sollogoub, C., Guinault, A., Phuong, N. T., Sollogoub, C., & Guinault, A. (2020). *Relationship between fiber chemical treatment and properties of recycled pp / bamboo fiber composites To cite this version : HAL Id : hal-02625690 Relationship between fiber chemical treatment and properties of recycled pp / bamboo fiber composites*.
- Nukala, S. G., Kong, I., Kakarla, A. B., Kong, W., & Kong, W. (2022). Development of Wood Polymer Composites from Recycled Wood and Plastic Waste: Thermal and Mechanical

- Properties. *Journal of Composites Science*, 6(7). <https://doi.org/10.3390/jcs6070194>
- OCDE. (2020, April 28). *Colombia - Organisation for Economic Co-operation and Development*. <https://www.oecd.org/latin-america/paises/colombia/>
- Onoja, D. A., & Ahemen, I. (2019). Synthesis and Characterization of Cellulose Based Nanofibres from Rice Husk. *IOSR Journal of Applied Physics (IOSR-JAP)*, 11(2), 80–87. <https://doi.org/10.9790/4861-1102038087>
- Orji, B. O., & McDonald, A. G. (2020). Evaluation of the mechanical, thermal and rheological properties of recycled polyolefins rice-hull composites. *Materials*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/ma13030667>
- Panthapulakkal, S., Law, S., & Sain, M. (2005). Enhancement of processability of rice husk filled high-density polyethylene composite profiles. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 18(5), 445–458. <https://doi.org/10.1177/0892705705054398>
- Pasangulapati, V., Ramachandriya, K. D., Kumar, A., Wilkins, M. R., Jones, C. L., & Huhnke, R. L. (2012). Effects of cellulose, hemicellulose and lignin on thermochemical conversion characteristics of the selected biomass. *Bioresource Technology*, 114, 663–669. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.036>
- Passaglia, E., Coiai, S., & Augier, S. (2009). Control of macromolecular architecture during the reactive functionalization in the melt of olefin polymers. *Progress in Polymer Science (Oxford)*, 34(9), 911–947. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2009.04.008>
- Patti, A., Acierno, D., Lecocq, H., Serghei, A., & Cassagnau, P. (2021). Viscoelastic behaviour of highly filled polypropylene with solid and liquid Tin microparticles: influence of the stearic acid additive. *Rheologica Acta*, 60(11), 661–673. <https://doi.org/10.1007/s00397-021-01297-x>
- Pérez, C. (2004). Técnicas de análisis multivariante de datos. In *Pearson Prentice Hall*.

<http://bit.ly/1JzSD8y>

- Pinzón, D. D., de Camargo, R. V., dos Santos Luiz, D., Branco, L. T. P., Grillo, C. C., & Saron, C. (2020). Composites of Recycled Polypropylene from Cotton Swab Waste with Pyrolyzed Rice Husk. *Journal of Polymers and the Environment*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01883-9>
- Qiu, W., Endo, T., & Hirotsu, T. (2004). Interfacial interactions of a novel mechanochemical composite of cellulose with maleated polypropylene. *Journal of Applied Polymer Science*, 94(3), 1326–1335. <https://doi.org/10.1002/app.21123>
- Qiu, W., Zhang, F., Endo, T., & Hirotsu, T. (2003). Preparation and characteristics of composites of high-crystalline cellulose with polypropylene: Effects of maleated polypropylene and cellulose content. *Journal of Applied Polymer Science*, 87(2), 337–345. <https://doi.org/10.1002/app.11446>
- Qiu, W., Zhang, F., Endo, T., & Hirotsu, T. (2005). Effect of maleated polypropylene on the performance of polypropylene/ cellulose composite. *Polymer Composites*, 26(4), 448–453. <https://doi.org/10.1002/pc.20119>
- Quispe, C. D. L. (2016). Diccionario de metodologia de la investigacion cientifica. In *publicia* (Vol. 1, Issue 1).
- Radzi, A. M., Sapuan, S. M., Jawaid, M., & Mansor, M. R. (2019). Water absorption, thickness swelling and thermal properties of roselle/sugar palm fibre reinforced thermoplastic polyurethane hybrid composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(5), 3988–3994. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.07.007>
- Raghu, N., Kale, A., Chauhan, S., & Aggarwal, P. K. (2018). Rice husk reinforced polypropylene composites: mechanical, morphological and thermal properties. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 15(1), 96–104. <https://doi.org/10.1007/s13196-018-0212-7>

- Rasheed, M., Jawaid, M., Parveez, B., Zuriyati, A., & Khan, A. (2020). Morphological, chemical and thermal analysis of cellulose nanocrystals extracted from bamboo fibre. In *International Journal of Biological Macromolecules* (Vol. 160). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.05.170>
- Ravindran, L., Sreekala, M. S., & Thomas, S. (2019). Novel processing parameters for the extraction of cellulose nanofibres (CNF) from environmentally benign pineapple leaf fibres (PALF): Structure-property relationships. *International Journal of Biological Macromolecules*, 131, 858–870. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.03.134>
- Reale Batista, M. D., Drzal, L. T., Kiziltas, A., & Mielewski, D. (2020). Hybrid cellulose-inorganic reinforcement polypropylene composites: Lightweight materials for automotive applications. *Polymer Composites*, 41(3), 1074–1089. <https://doi.org/10.1002/pc.25439>
- Resconi, L., Jones, R. L., Rheingold, A. L., & Yap, G. P. A. (1996). High-molecular-weight atactic polypropylene from metallocene catalysts. 1. $\text{Me}_2\text{Si}(\text{9-Flu})_2\text{ZrX}_2$ (X = Cl, Me). *Organometallics*, 15(3), 998–1005. <https://doi.org/10.1021/om950197h>
- Rinawa, K., Maiti, S. N., Sonnier, R., Rinawa, K., Maiti, S. N., Sonnier, R., & Dynamic, J. L. (2022). *Dynamic rheological studies and applicability of time-temperature superposition principle for PA12 / SEBS-g-MA blends To cite this version : HAL Id : hal-02914222.*
- Rishina, L., Kissin, Y. V., Lalayan, S. S., & Krashennnikov, V. G. (2019). Synthesis of atactic polypropylene: Propylene polymerization reactions with $\text{TiCl}_4 - \text{Al}(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{Cl} / \text{Mg}(\text{C}_4\text{H}_9)_2$ catalyst. *Journal of Applied Polymer Science*, 136(25), 1–8. <https://doi.org/10.1002/app.47692>
- Rodríguez, E., Arqués, J. L., Rodríguez, R., Nuñez, M., Medina, M., Talarico, T. L., Casas, I. A., Chung, T. C., Dobrogosz, W. J., Axelsson, L., Lindgren, S. E., Dobrogosz, W. J., Kerkeni, L., Ruano, P., Delgado, L. L., Picco, S., Villegas, L., Tonelli, F., Merlo, M., ... Masuelli, M.

- (1989). Natural Fibers: Applications. *Intech*, 32(tourism), 137–144.
<https://www.intechopen.com/books/advanced-biometric-technologies/liveness-detection-in-biometrics>
- Rosa, S. M. L., Nachtigall, S. M. B., & Ferreira, C. A. (2009). Thermal and dynamic-mechanical characterization of rice-husk filled polypropylene composites. *Macromolecular Research*, 17(1), 8–13. <https://doi.org/10.1007/BF03218594>
- Rosa, S. M. L., Rehman, N., De Miranda, M. I. G., Nachtigall, S. M. B., & Bica, C. I. D. (2012). Chlorine-free extraction of cellulose from rice husk and whisker isolation. *Carbohydrate Polymers*, 87(2), 1131–1138. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.08.084>
- Rozman, H. D., Lai, C. Y., Ismail, H., & Mohd Ishak, Z. A. (2000). Effect of coupling agents on the mechanical and physical properties of oil palm empty fruit bunch-polypropylene composites. *Polymer International*, 49(11), 1273–1278. [https://doi.org/10.1002/1097-0126\(200011\)49:11<1273::AID-PI469>3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/1097-0126(200011)49:11<1273::AID-PI469>3.0.CO;2-U)
- Ryu, Y. S., Lee, J. H., & Kim, S. H. (2020). Efficacy of alkyl ketene dimer modified microcrystalline cellulose in polypropylene matrix. *Polymer*, 196(March), 122463. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2020.122463>
- Safdari, F., Carreau, P. J., Heuzey, M. C., Kamal, M. R., & Sain, M. M. (2017). Enhanced properties of poly(ethylene oxide)/cellulose nanofiber biocomposites. *Cellulose*, 24(2), 755–767. <https://doi.org/10.1007/s10570-016-1137-1>
- Sancho, J. J. (2012). *analisis multivariante*. <http://www.acmcb.es/files/425-3501-DOCUMENT/Sancho-9-14Maig12.pdf>
- Santiago, R., Ismail, H., & Suharty, N. (2018). Comparison of Processing and Mechanical Properties of Polypropylene/Recycled Acrylonitrile Butadiene Rubber/Rice Husk Powder Composites Modified With Silane and Acetic Anhydride Compound. In *Natural Fibre*

Reinforced Vinyl Ester and Vinyl Polymer Composites (pp. 333–347). Elsevier Ltd.

<https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102160-6.00017-2>

Schuyler, Q. A., Wilcox, C., Townsend, K. A., Wedemeyer-Strombel, K. R., Balazs, G., van Sebille, E., & Hardesty, B. D. (2016). Risk analysis reveals global hotspots for marine debris ingestion by sea turtles. *Global Change Biology*, 22(2), 567–576. <https://doi.org/10.1111/gcb.13078>

Shamsollahi, Z., & Partovinia, A. (2019). Recent advances on pollutants removal by rice husk as a bio-based adsorbent: A critical review. *Journal of Environmental Management*, 246(May), 314–323. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.145>

Shukla, S. K., & Bharadvaja, A. (2015). *Extraction of Cellulose Micro Sheets from Rice Husk: A Scalable Chemical Approach Preparation and application of Bio electrode View project. December 2016.* <https://www.researchgate.net/publication/311876106>

Sojoudiasli, H., Heuzey, M. C., & Carreau, P. J. (2014). Rheological, morphological and mechanical properties of flax fiber polypropylene composites: Influence of compatibilizers. *Cellulose*, 21(5), 3797–3812. <https://doi.org/10.1007/s10570-014-0375-3>

Soltani, N., Bahrami, A., Pech-Canul, M. I., & González, L. A. (2015). Review on the physicochemical treatments of rice husk for production of advanced materials. *Chemical Engineering Journal*, 264, 899–935. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.11.056>

Song, J. (2015). thermoplastics and thermoplastic composites. *Inequality in the Workplace*, 896. <https://doi.org/10.7591/j.ctt5hh0qp.3>

Soury, E., Behraves, A. H., Rizvi, G. M., & Jam, N. J. (2012). Rheological Investigation of Wood-Polypropylene Composites in Rotational Plate Rheometer. *Journal of Polymers and the Environment*, 20(4), 998–1006. <https://doi.org/10.1007/s10924-012-0502-x>

Spicker, C., Rudolph, N., Kühnert, I., & Aumnate, C. (2019). The use of rheological behavior to

- monitor the processing and service life properties of recycled polypropylene. *Food Packaging and Shelf Life*, 19(June 2018), 174–183. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.01.002>
- Spoljaric, S., Genovese, A., & Shanks, R. A. (2009). Polypropylene-microcrystalline cellulose composites with enhanced compatibility and properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40(6–7), 791–799. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.03.011>
- Stein, V., & Schemmel, T. (2020). Sustainable Rice Husk Ash-Based High-Temperature Insulating Materials. *InterCeram: International Ceramic Review*, 69(4–5), 30–37. <https://doi.org/10.1007/s42411-020-0119-3>
- Stephen Morton, David Pencheon, and N. S., & Sustainability. (2017). Sustainable Development Goals (SDGs), and their implementation A national global framework for health, development and equity needs a systems approach at every level Stephen. *British Medical Bulletin*, 124(October), 81–90. <https://doi.org/10.1093/bmb/ldx031>
- Suzuki, K., Homma, Y., Igarashi, Y., Okumura, H., & Yano, H. (2017). Effect of preparation process of microfibrillated cellulose-reinforced polypropylene upon dispersion and mechanical properties. *Cellulose*, 24(9), 3789–3801. <https://doi.org/10.1007/s10570-017-1355-1>
- Syduzzaman, M., Faruque, M. A. Al, Bilisik, K., & Naebe, M. (2020). Plant-based natural fibre reinforced composites: A review on fabrication, properties and applications. *Coatings*, 10(10), 1–34. <https://doi.org/10.3390/coatings10100973>
- T.C. Mike Chung. (2001). Functionalization of Polyolefins. In *academic press* (Vol. 53, Issue 9). <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/245180/245180.pdf%0Ahttps://hdl.handle.net/20.500.12380/245180%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2011.03.003%0Ahttps://doi.org/10.1016/j.gr.2017.08.001%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2014.12>
- Tabak, C., Keskin, S., Akbasak, T., & Ozkoc, G. (2020). Polypropylene/Spray Dried and Silane-

- Treated Nanofibrillated Cellulose Composites. *Polymer Engineering and Science*, 60(2), 352–361. <https://doi.org/10.1002/pen.25290>
- Tajvidi, M., & Takemura, A. (2010). Thermal degradation of natural fiber-reinforced polypropylene composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 23(3), 281–298. <https://doi.org/10.1177/0892705709347063>
- TamásBárány;József Karger-Kocsis (1950–2018). (2019). Polypropylene handbook: Morphology, Blends and Composites. In *Choice Reviews Online* (Vol. 43, Issue 05). <https://doi.org/10.5860/choice.43-2825>
- Thakur, V. K., Vennerberg, D., & Kessler, M. R. (2014). Green aqueous surface modification of polypropylene for novel polymer nanocomposites. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 6(12), 9349–9356. <https://doi.org/10.1021/am501726d>
- Tzounis, P. N., Argyropoulou, D. V., Anogiannakis, S. D., & Theodorou, D. N. (2018). Tacticity Effect on the Conformational Properties of Polypropylene and Poly(ethylene-propylene) Copolymers. *Macromolecules*, 51(17), 6878–6891. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.8b01099>
- Ummartyotin, S., & Pechyen, C. (2016). Microcrystalline-cellulose and polypropylene based composite: A simple, selective and effective material for microwavable packaging. *Carbohydrate Polymers*, 142, 133–140. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.01.020>
- Universidad de los Andes, & Greenpeace Colombia. (2019). *Situación actual de Colombia y su impacto en el medio ambiente*. 14.
- Uribe, F. G. O. U. (2003). Diccionario de Metodología de La Investigacion Cientifica. In *Libro8 Editorial* *Limusa* (Vol. 1). https://drive.google.com/file/d/1PxTICezCcbZ5vj519FrRXfmZ1HRNpWF_/view?fbclid=IwAR1NpUV20GPct8wf9nn70LkLcW-z2C83JDuIUgqBTgZtql7RZg0o5V8XyNA

- V. Mazzanti, F. Mollica, N. E. K. (2015). Rheological and Mechanical Characterization of Polypropylene-Based Wood Plastic Composites. *Polymer Composites*, 37(12), 3460–3473. <https://doi.org/10.1002/pc>
- Vallejo Zamudio, L. E. (2019). El plan nacional de desarrollo 2018-2022: “Pacto por Colombia, pacto por la equidad.” *Apuntes Del Cenes*. <https://doi.org/10.19053/01203053.v38.n68.2019.9924>
- Vesel, A., & Mozetic, M. (2010). *ON THE FUNCTIONALIZATION OF POLYPROPYLENE WITH CF 4 PLASMA CREATED IN CAPACITIVELY COUPLED RF DISCHARGE* (Vol. 1).
- Vineta Srebrenkoska, Gordana Bogoeva Gaceva, Maurizio Avella, M. E. E., & Gentile, and G. (2008). Recycling of polypropylene-based eco-composites. *Polym Int*, 55, 6. <https://doi.org/10.1002/pi.2470>
- Wang, D., Yang, B., Chen, Q. T., Chen, J., Su, L. F., Chen, P., Zheng, Z. Z., Miao, J. Bin, Qian, J. S., Xia, R., & Shi, Y. (2019). A facile evaluation on melt crystallization kinetics and thermal properties of low-density polyethylene (LDPE)/Recycled polyethylene terephthalate (RPET) blends. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 2(3), 126–135. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2019.05.002>
- Wang, K., Li, T., Xie, S., Wu, X., Huang, W., Tian, Q., Tu, C., & Yan, W. (2019). Influence of organo-sepiolite on the morphological, mechanical, and rheological properties of PP/ABS blends. *Polymers*, 11(9), 1–11. <https://doi.org/10.3390/polym11091493>
- Wang, S., Li, H., Zou, S., & Zhang, G. (2020). Experimental research on a feasible rice husk/geopolymer foam building insulation material. *Energy and Buildings*, 226, 110358. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110358>
- Waste, E. U., Directive, F., & Birli, A. (2015). 3R CONCEPT-REDUCE-REUSE- RECYCLE Waste. In *Energy Efficient Solutions For Built Environments*.

- Wibisono, Y., Fadila, C. R., Saiful, S., & Bilad, M. R. (2020). Facile approaches of polymeric face masks reuse and reinforcements for micro-aerosol droplets and viruses filtration: A review. *Polymers*, *12*(11), 1–18. <https://doi.org/10.3390/polym12112516>
- Wu, H., Xu, D., Zhou, Y., Gao, C., Guo, J., He, W., He, Y., & Qin, S. (2020). Tung Oil Anhydride Modified Hemp Fiber/Polypropylene Composites: The Improved Toughness, Thermal Stability and Rheological Property. *Fibers and Polymers*, *21*(9), 2084–2091. <https://doi.org/10.1007/s12221-020-1157-1>
- Wu, H., Xu, D., Zhou, Y., Guo, J., He, W., He, Y., Yi, Y., & Qin, S. (2021). The Improved Mechanical and Thermal Properties of Hemp Fibers Reinforced Polypropylene Composites with Dodecyl Bromide Modification. *Fibers and Polymers*, *22*(10), 2869–2877. <https://doi.org/10.1007/s12221-021-0127-6>
- WWF. (2020). *Transparent 2020. June*.
- Yalcin, D. (2021). Tensile Testing Concepts & Definitions. *ResearchGate*, May, 1–12.
- Yashas Gowda, T. G., Sanjay, M. R., Subrahmanya Bhat, K., Madhu, P., SenthamaraiKannan, P., Yogesha, B., & Pham, D. (2018). Polymer matrix-natural fiber composites: An overview. *Cogent Engineering*, *5*(1), 1446667. <https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1446667>
- Yazdani-Pedram Zobeiri, Mehrdad; Calderón del Río, Katia Romina; Quijada Abarca, J. (2000). *Functionalization of polypropylene in solution through grafting with monomethyl itaconate*. *45*, 269–282. <https://doi.org/0366-1644>
- Yeh, S. K., Hsieh, C. C., Chang, H. C., Yen, C. C. C., & Chang, Y. C. (2015). Synergistic effect of coupling agents and fiber treatments on mechanical properties and moisture absorption of polypropylene-rice husk composites and their foam. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *68*, 313–322. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.10.019>
- Yuanita, E., Pratama, J. N., & Chalid, M. (2017). Preparation of Micro Fibrillated Cellulose Based

- on Arenga Pinnata “Ijuk” Fibre for Nucleating Agent of Polypropylene: Characterization, Optimization and Feasibility Study. *Macromolecular Symposia*, 371(1), 61–68. <https://doi.org/10.1002/masy.201600039>
- Yunus, M. A. (2019). Extraction Cellulose From Rice Husk. *Jurnal Akta Kimia Indonesia (Indonesia Chimica Acta)*, 12(2), 79. <https://doi.org/10.20956/ica.v12i2.6559>
- Yunus, M. A., Raya, I., & Tuara, Z. I. (2019). Synthesis cellulose from rice husk. *Indonesia Chimica Acta*, 12(2), 79–83.
- Zander, N. E., Park, J. H., Boelter, Z. R., & Gillan, M. A. (2019). Recycled Cellulose Polypropylene Composite Feedstocks for Material Extrusion Additive Manufacturing. *ACS Omega*, 4(9), 13879–13888. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b01564>
- Zarges, J. C., Minkley, D., Feldmann, M., & Heim, H. P. (2017). Fracture toughness of injection molded, man-made cellulose fiber reinforced polypropylene. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 98, 147–158. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.03.022>
- Zhang, Z., Wan, D., Xing, H., Zhang, Z., Tan, H., Wang, L., Zheng, J., An, Y., & Tang, T. (2012). A new grafting monomer for synthesizing long chain branched polypropylene through melt radical reaction. *Polymer*, 53(1), 121–129. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2011.11.033>
- Zhang, Z., Zhang, R., Huang, Y., Lei, J., Chen, Y. H., Tang, J. H., & Li, Z. M. (2014). Efficient utilization of atactic polypropylene in its isotactic polypropylene blends via “structuring” processing. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 53(24), 10144–10154. <https://doi.org/10.1021/ie5012867>
- Zurina, M., Ismail, H., & Bakar, A. A. (2004). Rice Husk Powder – Filled Polystyrene / Styrene Butadiene Rubber Blends. *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 92, 3320–3332 (2004), 92(M), 3320–3332.

刘会. (n.d.). *CN109021398A - A kind of high-toughness high-strength polypropylene plastics and preparation method thereof - Google Patents.*

刘桂成杨维曦马俊杰. (n.d.). *CN107841034 Modified polypropylene composite material with KT-1 as compatibilizer.*

汪龙汪彪. (n.d.). *A kind of nano-cellulose reinforced polypropylene foamed material and preparation method thereof.*