



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO



FACULTAD DE CIENCIA E INGENIERÍA EN ALIMENTOS Y BIOTECNOLOGÍA

CARRERA DE BIOTECNOLOGÍA

Tema: Desarrollo de láminas flexibles sostenibles a partir de residuos sólidos de una curtiembre en Tungurahua

Informe Final del Trabajo de Titulación, Opción Proyecto de Investigación, previo la obtención del Título de Ingeniero Biotecnólogo, otorgado por la Universidad Técnica de Ambato, a través de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología.

Este estudio forma parte del Proyecto de Investigación/vinculación “Composites poliméricos sostenibles a partir de residuos agroindustriales y de cuero Wet-blue para aplicaciones ecológicas”, aprobado mediante Resolución Nro. UTA-CONIN-2025-0064-R de la Universidad Técnica de Ambato.

Autor: Christian Manuel Cadena Garcés

Tutor: Dra. Nelly Esther Flores Tapia

Ambato – Ecuador

Julio - 2025

APROBACIÓN DEL TUTOR

Dra. Nelly Esther Flores Tapia

CERTIFICA:

Que el presente Informe Final del Trabajo de Titulación ha sido prolijamente revisado. Por lo tanto, autorizo la presentación de este Informe Final del Trabajo de Titulación, Opción Proyecto de Investigación, el mismo que responde a las normas establecidas en el Reglamento de Títulos y Grados de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología.

Ambato, 23 de Junio de 2025.

Dra. Nelly Esther Flores Tapia

1716253305

TUTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Christian Manuel Cadena Garcés, manifiesto que los resultados obtenidos en el presente Informe Final del Trabajo de Titulación, Opción Proyecto de Investigación, previo a la obtención del título de Ingeniero Biotecnólogo son absolutamente originales, auténticos y personales; a excepción de las citas bibliográficas.



Christian Manuel Cadena Garcés

1850638568

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Informe Final del Trabajo de Titulación o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi Informe Final del Trabajo de Titulación, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

A handwritten signature in blue ink, reading "Christian Cadena", is positioned above a horizontal line.

Christian Manuel Cadena Garcés

1850638568

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los suscritos Profesores Calificadores, aprueban el presente Informe Final del Trabajo de Titulación, Opción Proyecto de Investigación, el mismo que ha sido elaborado de conformidad con las disposiciones emitidas por la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología de la Universidad Técnica de Ambato.

Para constancia firman:

Presidente del Tribunal

Mg. Alex Fabián Valencia Silva

1803121084

Mg. Juan de Dios Espinoza Moya

1803201431

Ambato, 07 de Julio de 2025

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, Manuel Cadena y Rocío Garcés, que han sido pilares fundamentales en mi vida, gracias a su amor, guía y apoyo incondicional he logrado llegar a conseguir todo lo que me he propuesto. Gracias a ellos estoy en lo más alto todo lo que soy y todo lo que seré es gracias a ellos.

A mis hermanas, Gabriela y Vanessa, que siempre estuvieron dispuestas a ayudarme en los momentos más difíciles dándome sus consejos, compartiéndome sus experiencias de vida para poder mejorar, ellas son también un ejemplo a seguir.

A mi abuela Rosa Freire y mi tía Alba Cadena, mis dos ángeles que estuvieron conmigo en una parte de este viaje ellas ayudaron a forjar la persona que soy ahora ellas me enseñaron a demostrar que nuestra familia sabe cómo luchar y salir adelante por más difícil que se ponga la situación, aunque ahora no pueda disfrutar con ellas este logro sé que desde arriba estarán orgullosas de mí.

A Samantha Caicedo, mi compañera desde el inicio de la carrera que me ha dado la fuerza para levantarme después de cada fracaso, para ayudarme a no rendirme, estar conmigo en cada desvelada, en cada exposición, en cada trabajo. Eres mi inspiración, eres la razón de levantarme día a día para ser una mejor persona, ahora espero que seas mi compañera de vida.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres Manuel y Rocío, que nunca han dejado de creer en mí su apoyo en este camino ha sido fundamental para llegar al final de esta travesía.

A mis hermanas Gabriela y Vanessa, por su apoyo por sus ánimos por todos sus consejos, su ayuda de último momento, por cada palabra de aliento.

A mi tía Alba que me ha ayudado durante toda mi vida como un hijo más y aún desde el cielo me sigue dando todo su amor y sé que me sigue ayudando de alguna forma.

A mis amigos Luis, Ángel, Patricio, Fernando y David que me han brindado su amistad y en muchos momentos brindarme una mano amiga para ayudarme en los momentos que más lo he necesitado.

A mi novia Samantha por su amor incondicional durante todos estos años, por estar a mi lado en todo momento así hayan sido buenos o malos y sé que estarás junto a mí muchos más.

A la Dra. Nelly Flores agradezco su confianza para llevar a cabo este proyecto y haberme guiado durante este final del camino.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL TUTOR	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	iii
DERECHOS DE AUTOR	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO.....	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
RESUMEN EJECUTIVO	xv
CAPÍTULO I.- MARCO TEÓRICO	17
1.1 Antecedentes Investigativos.....	17
1.1.1. Justificación.....	17
1.1.2. Industria del curtido.....	17
1.1.3. Industria del curtido en Ecuador	18
1.1.4. Proceso de curtido	18
1.1.5. Residuos de curtiembre.....	20
1.1.6. <i>Wet blue</i>	21
1.1.7. Eliminación de <i>Wet blue</i>	22
1.1.8. Estrategias de reciclaje del <i>Wet blue</i>	24
1.1.9. Composites poliméricos.....	24
1.1.10. Composites poliméricos a base de <i>wet blue</i>	25
1.2 Objetivos.....	26
1.2.1. Objetivo General	26
1.2.2. Objetivos específicos	26

CAPÍTULO II.- METODOLOGÍA	27
2.1 Materiales	27
2.1.1. Reactivos	27
2.1.2. Equipos.....	28
2.2 Métodos	28
2.2.1. Preparación de materiales	28
2.2.2. Tratamiento previo del <i>wet blue</i>	28
2.2.3. Preparación de mezcla	28
2.2.4. Moldeo y secado.....	29
2.2.5. Caracterización fisicoquímica	29
CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
3.1. Análisis y discusión de los resultados	33
3.1.1. Obtención de láminas	33
3.1.2. Caracterización fisicoquímica	35
3.1.3. Prueba mecánica de tracción	38
3.1.4. Análisis FT-IR.....	40
CAPITULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	42
4.1 Conclusiones	42
Referencias Bibliográficas	43
ANEXOS	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Material fungible en el proyecto de investigación	27
Tabla 2 Reactivos empleados en el proyecto de titulación	27
Tabla 3 Equipos utilizados en el proyecto de titulación.....	28
Tabla 4 Láminas de <i>wet blue</i>	33
Tabla 5 Parámetros fisicoquímicos de cada lámina	35
Tabla 6 Resultados ensayos de resistencia a la tracción de cada lámina	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Esquema de proceso de curtido del cuero.	19
Figura 2 <i>Wet blue</i> obtenido de curtiduría	21
Figura 3 Espectros FT-IR de <i>wet blue</i> , PVA, glicerol y mezclas.....	40

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXOS	50
Anexo 1. <i>Tabla de resultados de pH obtenidos por diseño simplex lattice en mezclas de Wet blue, PVA y Glicerol</i>	50
Anexo 2. <i>Gráficas de diagnóstico de residuos para el modelo de regresión cuadrática del pH en mezclas</i>	51
Anexo 3. <i>Gráficas de superficie y contorno de respuesta para el pH en mezclas obtenidas mediante diseño simplex lattice</i>	51
Anexo 4. <i>Tabla de resultados de densidad obtenidos por diseño simplex lattice en mezclas de Wet blue, PVA y Glicerol</i>	52
Anexo 5. <i>Gráficas de diagnóstico de residuos para el modelo de regresión cuadrática de densidad en mezclas</i>	53
Anexo 6. <i>Gráficas de superficie y contorno de respuesta para la densidad en mezclas obtenidas mediante diseño simplex lattice</i>	53
Anexo 7. <i>Tabla de resultados de humedad obtenidos por diseño simplex lattice en mezclas de Wet blue, PVA y Glicerol</i>	54
Anexo 8. <i>Gráficas de diagnóstico de residuos para el modelo de regresión cuadrática de humedad en mezclas</i>	55
Anexo 9. <i>Gráficas de superficie y contorno de respuesta para la humedad en mezclas obtenidas mediante diseño simplex lattice</i>	55
Anexo 10. <i>Tabla de resultados de absorción de agua obtenidos por diseño simplex lattice en mezclas de Wet blue, PVA y Glicerol</i>	56
Anexo 11. <i>Gráficas de diagnóstico de residuos para el modelo de regresión cuadrática del absorción de agua en mezclas</i>	57
Anexo 12. <i>Gráficas de superficie y contorno de respuesta para la absorción de agua en mezclas obtenidas mediante diseño simplex lattice</i>	57

Anexo 13. <i>Tabla de resultados de cenizas obtenidos por diseño simplex lattice en mezclas de Wet blue, PVA y Glicerol.....</i>	<i>58</i>
Anexo 14. <i>Gráficas de diagnóstico de residuos para el modelo de regresión cuadrática del cenizas en mezclas</i>	<i>59</i>
Anexo 15. <i>Gráficas de superficie y contorno de respuesta para cenizas en mezclas obtenidas mediante diseño simplex lattice</i>	<i>59</i>
Anexo 16. <i>Tabla de resultados de resistencia a la tracción obtenidos por tracción simplex lattice en mezclas de Wet blue, PVA y Glicerol.....</i>	<i>60</i>
Anexo 17. <i>Gráficas de diagnóstico de residuos para el modelo de regresión cuadrática de resistencia a la tracción en mezclas</i>	<i>61</i>
Anexo 18. <i>Gráficas de superficie y contorno de respuesta para la resistencia a la tracción en mezclas obtenidas mediante diseño simplex lattice</i>	<i>61</i>
Anexo 19. <i>Tabla de resultados de deformación obtenidos por diseño simplex lattice en mezclas de Wet blue, PVA y Glicerol</i>	<i>62</i>
Anexo 20. <i>Gráficas de diagnóstico de residuos para el modelo de regresión cuadrática de deformación en mezclas</i>	<i>63</i>
Anexo 21. <i>Gráficas de superficie y contorno de respuesta para la deformación en mezclas obtenidas mediante diseño simplex lattice</i>	<i>63</i>
Anexo 22. <i>Ensayo de resistencia a la tracción de WB30PVA63G7</i>	<i>64</i>
Anexo 23. <i>Ensayo de resistencia a la tracción de WB30PVA70G0</i>	<i>64</i>
Anexo 24. <i>Ensayo de resistencia a la tracción de WB33PVA57G10</i>	<i>65</i>
Anexo 25. <i>Ensayo de resistencia a la tracción de WB33PVA57G10</i>	<i>65</i>
Anexo 26. <i>Ensayo de resistencia a la tracción de WB33PVA63G4</i>	<i>66</i>
Anexo 27. <i>Ensayo de resistencia a la tracción de WB37PVA57G6</i>	<i>66</i>
Anexo 28. <i>Ensayo de resistencia a la tracción de WB37PVA63G0</i>	<i>67</i>
Anexo 29. <i>Ensayo de resistencia a la tracción de WB40PVA50G10</i>	<i>67</i>

Anexo 30. <i>Ensayo de resistencia a la tracción de WB40PVA57G3</i>	68
Anexo 31. <i>Ensayo de resistencia a la tracción de WB43PVA50G7</i>	68
Anexo 32. <i>Ensayo de resistencia a la tracción de WB43PVA57G0</i>	69
Anexo 33. <i>Ensayo de resistencia a la tracción de WB47PVA43G10</i>	69
Anexo 34. <i>Ensayo de resistencia a la tracción de WB47PVA50G3</i>	70
Anexo 35. <i>Ensayo de resistencia a la tracción de WB50PVA43G7</i>	70
Anexo 36. <i>Ensayo de resistencia a la tracción de WB50PVA50G0</i>	71

RESUMEN EJECUTIVO

La industria del curtido de cuero genera grandes cantidades de residuos sólidos como el *wet blue*, un subproducto con alto contenido de cromo que representa un riesgo ambiental significativo, especialmente en regiones como Tungurahua, Ecuador. Este trabajo resalta la importancia de buscar alternativas sostenibles que permitan valorizar estos residuos y reducir su impacto ambiental, promoviendo así la economía circular y el desarrollo de materiales innovadores a partir de fuentes secundarias. Para lograr este objetivo, se elaboraron láminas flexibles combinando residuos de cuero *wet blue*, alcohol polivinílico (PVA) y glicerol en diferentes proporciones, siguiendo un proceso experimental que incluyó lavado, secado, hidrolizado y triturado del *wet blue*, mezcla con los otros componentes, moldeo, secado y caracterización fisicoquímica y mecánica bajo normas ASTM e ISO, además de análisis FTIR para verificar la integridad estructural del colágeno y la presencia de los grupos funcionales de cada componente. Los resultados demostraron que es posible fabricar láminas flexibles sostenibles a partir de residuos industriales, siendo el PVA responsable de la mayor resistencia mecánica y homogeneidad, el glicerol otorga la flexibilidad y el *wet blue* la absorción de agua y el contenido de cenizas, aunque la elevada absorción hídrica limita su uso en ambientes húmedos y la presencia de cromo requiere consideraciones adicionales para su aplicación. En conclusión, este estudio evidencia la viabilidad de valorizar residuos de curtiembre para obtener materiales funcionales y sostenibles, aportando soluciones para la gestión ambiental responsable y abriendo el camino a futuras aplicaciones industriales.

Palabras clave: *Wet blue*, Composites poliméricos, Residuos de curtiembre, Economía circular, Alcohol polivinílico.

ABSTRACT

The leather tanning industry generates large amounts of solid waste such as *wet blue*, a byproduct with high chromium content that represents a significant environmental risk, especially in regions such as Tungurahua, Ecuador. This work highlights the importance of seeking sustainable alternatives that allow the valorization of this waste and reduce its environmental impact, thus promoting the circular economy and the development of innovative materials from secondary sources. To achieve this objective, flexible sheets were created by combining *wet blue* leather waste, polyvinyl alcohol (PVA), and glycerol in different proportions. Following an experimental process that included washing, drying, hydrolyzing and grinding of the *wet blue*, mixing with the other components, molding, drying, and physicochemical and mechanical characterization under ASTM and ISO standards, in addition to FTIR analysis to verify the structural integrity of the collagen and the presence of the functional groups of each component. The results demonstrated that it is possible to manufacture sustainable flexible sheets from industrial waste. PVA is responsible for the greatest mechanical strength and homogeneity, glycerol provides flexibility, and *wet blue* is responsible for water absorption and ash content. However, high water absorption limits its use in humid environments, and the presence of chromium requires additional considerations for its application. In conclusion, this study demonstrates the feasibility of recovering tannery waste to obtain functional and sustainable materials, providing solutions for responsible environmental management and paving the way for future industrial applications.

Keywords: *Wet blue*, Polymeric composites, Tannery waste, Circular economy, Polyvinyl alcohol.

CAPÍTULO I.- MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes Investigativos

1.1.1. Justificación

La industria del curtido es un sector económico esencial que genera miles de millones de dólares a nivel mundial. En Ecuador, alcanzó un valor de USD 502,38 millones en 2020, consolidándose como una actividad industrial clave **(CFN, 2021)**. Sin embargo, es una de las actividades industriales más perjudiciales para el medio ambiente. El proceso de curtido, que transforma pieles crudas en cuero, requiere una gran cantidad de recursos y genera elevados volúmenes de aguas residuales, contaminación del aire y residuos sólidos, los cuales pueden llegar a 8,5 millones de toneladas anuales a nivel mundial **(Jaffari et al., 2024)**.

Dentro de los residuos sólidos generados, una preocupación importante es la presencia de cromo, ya que en el proceso de curtido se utilizan sales de cromo para estabilizar el cuero. Como resultado, los residuos derivados del cuero contienen un cierto porcentaje de este metal, lo que representa un riesgo ambiental y para la salud humana **(Famielec, 2020)**. Se estima que alrededor del 30 % de los residuos sólidos del proceso de curtido corresponde a *wet blue*, un subproducto con altos niveles de cromo. Tradicionalmente, este residuo ha sido desechado en vertederos, lo que genera un impacto ambiental significativo, ya que su degradación puede provocar la oxidación del cromo trivalente a cromo hexavalente, una forma altamente tóxica para los seres vivos y el ecosistema **(Nanni et al., 2021)**.

En este contexto, surge la necesidad de buscar alternativas sostenibles para la gestión de estos residuos. Un enfoque innovador es la valorización del *wet-blue* en la fabricación de composites poliméricos, integrándolo con materiales como alcohol polivinílico y glicerol para desarrollar láminas flexibles con propiedades mecánicas y morfológicas adecuadas. La estructura del cuero lo convierte en un material viable como componente de refuerzo en diversos compuestos, lo que permite obtener alternativas ecológicas frente a materiales sintéticos convencionales **(Debnath et al., 2023)**.

Por ello, el presente estudio propone el aprovechamiento del *wet blue* en el desarrollo de composites poliméricos sostenibles, con el objetivo de mitigar el impacto ambiental de los residuos de la industria del cuero y fomentar el uso de materiales ecológicos con propiedades funcionales adecuadas.

1.1.2. Industria del curtido

La curtiduría es un antiguo oficio que se ha practicado desde los inicios de la civilización y, con el paso del tiempo, ha experimentado un notable crecimiento en varios países, desempeñando un papel crucial en la economía de los países productores, puesto que el cuero es una importante fuente de divisas gracias a su aplicación en la elaboración de diversos productos muy útiles, como calzado, bolsos y prendas de

vestir. El proceso de curtido es donde la piel y los cueros de animales se procesan hasta obtener un cuero duradero. Este proceso utiliza diversos productos químicos, como sulfuro de sodio, cal, sulfato de amonio, taninos vegetales, cloruro de sodio, sales de cromo y bactericidas, además de que consume un alto volumen de agua. Por estas razones, la industria del curtido está afectando negativamente al medio ambiente debido a la gran cantidad de contaminantes químicos y orgánicos que genera como desechos, los cuales son principalmente desechados en cuerpos de agua y vertederos (Patel et al., 2021).

1.1.3. Industria del curtido en Ecuador

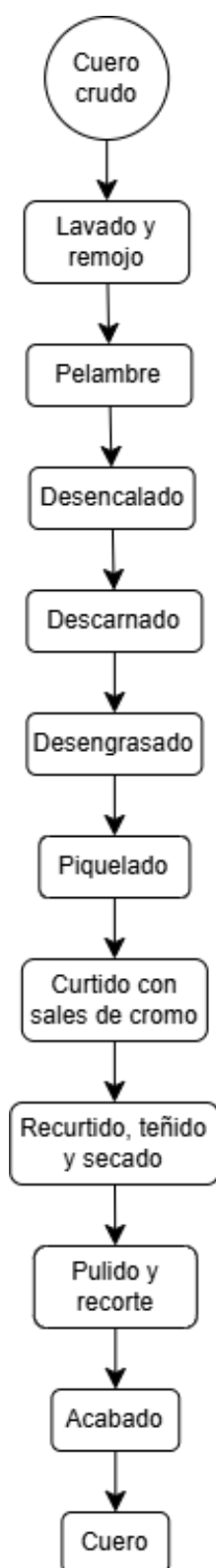
En Ecuador, el proceso de curtido consiste en retirar el pelo de la piel y tratarla con agentes de curtido, generalmente químicos, para dotar al material de características físicas como textura, color y suavidad, optimizando su aspecto y tacto según el uso previsto. La provincia de Tungurahua es la principal productora de cuero en el país. A nivel nacional, existen aproximadamente 80 curtiembres, que incluyen grandes, medianas y pequeñas empresas artesanales, además de unas 60 empresas y personal dedicados a la venta de productos para el tratamiento del cuero. Esto convierte a la industria del cuero en una importante fuente de producción y empleo en el país, generando puestos de trabajo en diversas etapas del proceso (Silva et al., 2022).

1.1.4. Proceso de curtido

La fabricación de cuero es un proceso complejo que consta de varias etapas. En primer lugar, la sangre y la suciedad de las pieles crudas se eliminan mediante un lavado. Luego, se ablandan y desalinizan mediante remojo en agua; los ácidos grasos se eliminan mediante el descarnado. Posteriormente, se realiza el encalado, que es un proceso por el cual se hincha la piel para que los agentes curtientes mejoren su penetración en la piel. Se utiliza un medio alcalino de sulfuro y cal para la disolución química del pelo y la epidermis, para facilitar el proceso de depilado se añade sulfuro de sodio, para eliminar los restos de pelo y degradar las proteínas las pieles se neutralizan con sales de amonio y enzimas. Después de este primer proceso de preparación de la piel, se lleva a cabo el proceso de curtido. Primero se añaden ácidos, como ácido sulfúrico para ajustar el pH de las pieles, además en este proceso para evitar que las pieles se hinchen se añaden sales. En el proceso de curtido las fibras de colágeno presentes en las pieles reaccionan con cromo, taninos u otro agente químico, dependiendo de que agente curtiente que se utilice. El proceso de curtido se divide en curtido al cromo y curtido vegetal, en este se utilizan sustancias orgánicas naturales derivadas de las plantas, pero el 90% del cuero producido se utiliza sales de cromo, una vez finalizado el curtido, el cuero se apila, se escurre y se clasifica según su grosor y la calidad requeridos, posteriormente se realiza un proceso de retención, engrasado y teñido, finalmente se realiza un proceso de secado y acabado (Patel et al., 2021).

Figura 1

Esquema de proceso de curtido del cuero.



Nota. Obtenido de **Bhardwaj et al., (2023)**.

1.1.5. Residuos de curtiembre

La transformación de pieles crudas en cuero implica una compleja serie de pasos químicos y mecánicos por lo cual enfrenta críticas por su impacto ambiental puesto que el proceso genera gran cantidad de desechos sólidos. Se estima que se necesita alrededor de 7 kg de piel para crear 1 m² de cuero terminado que pesa 1,5 kg lo que significa que el 75% de la materia prima se convierte en residuos, lo que significa que cada año se generan alrededor del 4 millones de toneladas de residuos sólidos. Además, en cada etapa del proceso se utiliza agua; se pueden utilizar hasta 370 L de agua por cada m² de cuero terminado. El agua residual resultado del proceso posee altos niveles de contaminantes que representan un riesgo ambiental si no son tratados adecuadamente antes de su vertido final, los químicos utilizados son los causantes de este riesgo ambiental puesto que estudios revelan que por cada 1000 kg de pieles curdas se añaden 452 kg de productos químicos de los cuales solo 72 kg permanecen en el cuero terminado, el resto solo el 30% se convierte en residuos sólidos lo demás se convierte en lodos **(Thomasset & Benayoun, 2024)**.

1.1.5.1. Residuos líquidos

La producción de cuero requiere grandes cantidades de agentes químicos y agua, lo que suele estar asociado con la generación de gases de efecto invernadero, grandes volúmenes de residuos sólidos y una elevada carga orgánica en las aguas residuales. Se estima que, de cada tonelada métrica de cuero crudo que se somete al proceso de curtido, solo el 20% se convierte en cuero utilizable **(Hansen et al., 2021)**.

Las aguas residuales del curtido siempre presentan concentraciones de contaminantes superiores a los límites impuestos por las legislaciones de cada país para su vertido en aguas superficiales o subterráneas, los principales contaminantes que se encuentran son el cromo, sulfuros, cloruros y sólidos en suspensión, es por ello que estas aguas tienen una alta contaminación de demanda química de oxígeno (DQO) y demanda biológica de oxígeno (DBO5), estos contaminantes son atribuidos principalmente en el proceso de precurtido y residuos de las pieles donde se utilizan grandes cantidades de los químicos antes mencionados **(Chiampo et al., 2023)**.

1.1.5.2. Residuos sólidos

Para crear cuero a partir de pieles crudas se utilizan diversos procedimientos físicos, químicos y mecánicos, en cada etapa del procesamiento se crea una cantidad significativa de residuos sólidos, se estima que en el procesamiento de 1000 kg de pieles puede generar entre 750 y 850 kg de residuos **(Verma & Sharma, 2023)**. Los residuos sólidos se pueden clasificar en tres grupos principales, residuos de acabado donde comprenden materiales como polvo pulido y recortes del proceso de teñido, residuos sólidos curtidos en el cual se encuentran virutas de cromo, recortes curtidos y serrajes *wet blue* inutilizables provenientes del proceso de curtido y recurtido con cromo, finalmente los residuos sólidos

sin curtir consisten en recortes y descarnados en bruto estos surgen de los procesos de remojo, encalado, depilado y precurtido. La proporción de residuos sólidos generados en la operación de fabricación de cuero puede variar significativamente la carne descarnada representa el 50-60%, mientras que las virutas de cromo y el polvo pulido representan el 40 % finalmente los recortes y el acabado representa el 7% y 3% respectivamente (Jaffari et al., 2024).

1.1.5.3. Emisiones atmosféricas

El proceso de curtido es responsable de emisiones hacia la atmosfera de contaminantes principalmente compuesto por disolventes orgánicos mismos que son utilizados en el acabado del cuero específicamente en el recubrimiento, además durante el proceso de encalado y desencalado se generan emisiones de sulfuro de hidrogeno y amoniaco ,los compuestos que son emitidos son tóxicos y altamente nocivos que deben de ser eliminados por la salud de los trabajadores, el tratamiento más común suele ser la adsorción con carbón activado, pero solo una parte de las emisiones son eliminados eficazmente, sin embargo en general la industria de la curtiduría estas emisiones atmosférica no es un problema tan grave en comparación con los impactos en el agua o suelo (Chiampo et al., 2023).

1.1.6. Wet blue

Figura 2

Wet blue obtenido de curtiduría



Nota. Residuos de cuero utilizados en el proyecto. Elaboración propia.

El *wet blue* (WB) es un subproducto generado en la industria de cuero. Este se genera después del proceso de tratamiento con sales de cromo, este material se obtiene en una fase intermedia del curtido, este proceso se lo realiza con la finalidad de estabilizar el material lo cual le otorga una alta resistencia mecánica y estabilidad química lo que lo convierte en un material valioso como base para la producción

de una amplia gama de productos de cuero como calzado, marroquinería, tapicería, ropa, accesorios, etc., la relevancia de este proceso radica en que la calidad del producto terminado depende del *wet blue* (Shammy et al., 2022).

El problema ambiental asociado al *wet blue* radica en que una gran parte de los residuos generados en la industria del cuero contiene cromo (III), al ser el principal elemento con el cual se realiza el curtido se estima que, de las más de 480.000 toneladas de curtido en cromo, los restos de óxido de cromo asciende a más de 125.000 toneladas (Ahmed & Maraz, 2021). Durante varios años, el método de eliminación más utilizado es el vertido en vertederos públicos. La acumulación de estos desechos puede representar un riesgo para el medio ambiente y la salud humana, debido a la posible liberación de cromo hexavalente, una forma tóxica del metal que se filtra en el suelo y aguas subterráneas debido a la oxidación catalizada por varios factores como la humedad y temperatura (Nanni et al., 2021).

1.1.7. Eliminación de *Wet blue*

1.1.7.1. Proceso de conversión termoquímicas

La transformación termoquímica comprende la descomposición de sustancias orgánicas para generar energía, combustible y gases, estos métodos son la incineración, la gasificación y la pirólisis que resultan muy eficiente para materiales con alta cantidad de componentes orgánicos como lo son los residuos sólidos de curtiduría, existen numerosas investigaciones que indican la posibilidad de eliminar estos residuos de manera segura (Awasthi et al., 2023).

1.1.7.1.1. Pirólisis

La pirólisis es un proceso de descomposición térmica de compuestos orgánicos que ocurre cuando un material se calienta a altas temperaturas en ausencia de oxígeno o con una cantidad mínima de aire que impide la combustión, este tratamiento permite la recuperación de compuestos de cromo (Cr) y la generación de energía a partir de las virutas curtidas de cromo es decir los residuos de *Wet blue* en la literatura mencionan que esta clase de residuos puede ser utilizado para la revalorización termoquímica ya que se puede producir una composición significativa de productos líquidos (bio-oil), sólidos (biochar) y gaseoso (syngas) (Chagtni et al., 2023). Sin embargo, esta técnica posee algunas limitaciones, puesto que aún existen lagunas de investigación que no se han resuelto como la posibilidad de que el cromo (III) presente en las virutas cambie a cromo (VI) una forma tóxica de este metal, además que la temperatura es muy variable en ciertos procesos de pirólisis por lo cual se tiene diferentes temperaturas de operación lo cual dificulta su escalado a nivel industrial (Copik et al., 2023).

1.1.7.1.2. Incineración

La incineración es un proceso ampliamente utilizado para la eliminación de residuos sólidos de

curtiduría, en este proceso los desechos se queman a altas temperaturas por lo cual el residuo se convierte en gases, cenizas y energía térmica, actualmente esta tecnología es la más utilizada ya que permite eliminar los desechos sólidos que contienen cromo (III), debido a la reducción de volumen además de que es posible la recuperación de energía, sin embargo, se ha demostrado que realizar este proceso provoca también la oxidación de cromo (III) a cromo (VI) esto se da por la presencia de oxígeno y la temperatura, la formación de esta forma de cromo es principalmente preocupante puesto que esta es la forma más tóxica del cromo siendo esta una alta amenaza que pone en riesgo a la sostenibilidad de este proceso (Gao et al., 2023).

1.1.7.1.3. Gasificación

La gasificación es un proceso termoquímico el cuál convierte materiales carbonosos en una mezcla de gases combustibles denominado gas de síntesis, esta es una conversión que se realiza a una alta temperatura que suele ser mayor a 700 °C en un entorno con oxígeno (Mishra & Upadhyay, 2021), es decir que este proceso permite la revalorización de residuos sólidos de curtiembre en biocombustibles, además de ello estudios sugieren que aplicar esta técnica permite la extracción de ferrocromo, el cual es usado en la industria metalúrgica (Jaffari et al., 2024), además esta técnica permite obtener otros productos con valor añadido además del gas de síntesis como lo son cenizas y alquitrán mismos que tienen un alto potencial para la valorización energética (Di Lauro et al., 2022), sin embargo existe una falta de investigación exhaustiva sobre la sostenibilidad y estudios cinéticos detallados para la optimización de procesos, es por ello que es complicado llevar a cabo este proceso en la práctica también por esto es que se dificulta el escalamiento a nivel industrial.

1.1.7.2. Tratamiento biológico

Actualmente, existe la posibilidad de tratar los residuos sólidos de curtiembre mediante la conversión bioquímica, donde se utilizan diferentes tipos de microorganismos. Sin embargo, este proceso requiere una mayor inversión y es menos efectiva que otros procesos debido a la alta concentración de metales pesados, un obstáculo difícil de comprender para llevar a cabo las principales técnicas biológicas las cuales son digestión anaeróbica y compostaje (Jaffari et al., 2024).

1.1.7.2.1. Compostaje

El compostaje es un proceso aeróbico que transforma residuos sólidos de curtiembre en biofertilizantes, este tratamiento ha sido ampliamente estudiado, muchos estudios han marcado la preocupación que se tiene por la movilización de cromo (III) en el suelo y agua subterránea al momento de llevar a cabo el compostaje (Guo et al., 2022), esto desencadena un grave riesgo de contaminación en la cadena alimentaria es por ello que podría no considerarse viable la opción de gestión de estos residuos sólidos

con el compostaje, indicando resultados desfavorables debido a la concentración de metales pesados (**Abouelela et al., 2022**), sin embargo el compostaje permite tener a consideración una nueva valorización energética de los residuos sólidos de curtiembre pero considerando el alto contenido de metales pesados como el cromo se debe tener precauciones al momento de aplicar esta técnica (**Jaffari et al., 2024**).

1.1.7.2. Digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica es un tratamiento biológico utilizando microorganismos anaeróbicos que transforman los desechos sólidos de curtiembre en biogás, esta tecnología está siendo últimamente estudiada y es reconocida por su doble capacidad de abordar dos problemáticas que son gestionar eficazmente los residuos sólidos de curtiembre y al mismo tiempo, ayudar en la producción de energía más sostenible. Este proceso permite generar biogás compuesto principalmente por CO₂ y CH₄ este biogás constituye una alternativa energética limpia que disminuye la dependencia del uso de combustibles fósiles además esto permite mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero, las investigaciones demuestran que la presencia de los metales pesados influye significativamente en la eficacia de la producción de biogás, si bien las recientes investigaciones arrojan resultados prometedores aún existe una falta de estudios que permitan aclarar el proceso de producción de biogás (**Jaffari et al., 2024**).

1.1.8. Estrategias de reciclaje del *Wet blue*

Hoy en día la gran parte del total de residuos de cuero se envía a vertederos lo que impide la recuperación de materiales y energía, además de generar graves daños ambientales, por ello existe una creciente preocupación de cómo reducir los efectos indeseables de esta industria, basado en la perspectiva de la economía circular se busca crear un crecimiento económico aprovechando al máximo los recursos y mantener el valor de los productos, componentes y recursos por el mayor tiempo posible (**Vidaurre-Arbizu et al., 2021**).

Existen diversas estrategias para la valorización de este subproducto, los cuales son según **Verma & Sharma (2023)** la adsorción permite la remoción de cromo que puede llegar a ser de un 50%, se puede desarrollar un biogás empleando los lodos sólidos de curtido eliminando así contaminantes como el cromo y contaminantes orgánicos, otras formas de aprovechar los desperdicios son la extracción o recuperación de componentes como elastina, colágeno, cromo y biomasa, otros procesos estudiados son la obtención de enzimas y microorganismos descomponedores de compuestos complejos.

1.1.9. Composites poliméricos

Un composite polimérico es una mezcla de más de dos polímeros con diferentes propiedades, que

mezclados en ciertas cantidades les otorgan nuevas características como propiedades fisicoquímicas y térmicas al material resultante, en esta mezcla los componentes individuales en los composites permanecen juntos por interacciones físicas o químicas que retienen sus identidades físicas o químicas y exhiben una superioridad de estas sobre su estado individual (**Duraikkannu et al., 2021**).

Los compuestos de la matriz polimérica pueden ser diferentes tipos de fibras ya sean naturales y sintéticas, que son reforzados en las mezclas que pueden moldearse en diferentes formas y tamaños lo cual permite fabricar diferentes tipos de materiales, los compuestos poliméricos adquieren características como una buena resistencia mecánica y rigidez, a la vez pueden tener características como ser livianos tener una estabilidad dimensional alta lo cual evita una expansión térmica y tener una alta resistencia a la fatiga y fractura, estas tienen un bajo costo de fabricación debido a sus principios de fabricación simples y que se adaptan a varios diseños (**Hsissou et al., 2021**).

1.1.10. Composites poliméricos a base de *wet blue*

Los nuevos procesos industriales buscan reducir el impacto ambiental promoviendo la fabricación de productos más sostenibles incorporando residuos como una forma de mitigar el impacto ambiental negativo al reutilizar residuos, la adición de materiales poliméricos a los residuos promueve la producción de nuevos materiales con excelentes propiedades, el uso de estos residuos poliméricos para la fabricación de materiales tiene un amplio alcance como envases multicapa con PET, PE y aluminio, como relleno de refuerzo en la preparación de compuestos con matriz de polietileno de alta densidad. Ante la consecuencia de la eliminación inadecuada de residuos peligrosos y la disminución de la vida útil de los vertederos industriales la alternativa de incorporar un residuo peligroso en una matriz polimérica puede resolver un problema ambiental al convertirlo en un subproducto que ofrece excelentes ventajas, además de ello el desarrollo de esta clase de material contribuye a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (**Rizzato et al., 2020**).

Los desechos de cuero *wet blue* se pueden combinar para obtener una matriz polimérica de esta manera se reduce significativamente la peligrosidad de estos residuos, la proteína colágena de las pieles y cueros presentes crea una estructura de reticulación al cromo como refuerzo en la matriz de reciclaje además esta otorga una resistencia fisicoquímica y térmica de las mezclas (**Sharma et al., 2023**). Uno de los enfoques estudiados para la creación de un biocomposite empleando *wet blue*, es el uso con alcohol polivinílico, en el cual la matriz polimérica muestra propiedades mecánicas para potenciales diversas aplicaciones en varios ámbitos, este proceso contribuye en la economía circular al reducir la generación de residuos y se promueve el uso de materiales reciclados, dando soluciones innovadoras frente a la problemática ambiental asociada a la industria del cuero (**Debnath et al., 2023**).

1.2 Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Desarrollar de láminas flexibles sostenibles a partir de residuos sólidos de una curtiembre en Tungurahua.

1.2.2. Objetivos específicos

- ❖ Elaborar láminas flexibles con diferentes proporciones de cuero wet-blue, alcohol polivinílico (PVA) y glicerol.
- ❖ Caracterizar las láminas flexibles elaboradas con residuos de cuero wet-blue, alcohol polivinílico (PVA) y glicerol, mediante el análisis de sus propiedades fisicoquímicas.
- ❖ Evaluar el desempeño mecánico de las formulaciones obtenidas a través de ensayos de tracción, con el propósito de determinar su viabilidad como materiales sostenibles.

CAPÍTULO II.- METODOLOGÍA

2.1 Materiales

El presente trabajo de titulación fue de tipo experimental y se llevó a cabo en los laboratorios de investigación UODIDE de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología de la Universidad Técnica de Ambato. En la **Tabla 1**, se enlistan los reactivos, material fungible y equipos que se utilizaron durante la investigación.

Tabla 1

Material fungible en el proyecto de investigación

Materiales Fungibles	Cantidad
Vasos de precipitación 1000 ml	4
Vasos de precipitación de 250 ml	2
Papel aluminio	1
Crisoles 30 mL	4
Espátula	1
Piceta	1
Termómetro	1
Probeta de plástico 50 mL	1
Probeta de plástico 100 mL	1
Vaso de precipitación 100mL	1

2.1.1. Reactivos

Tabla 2

Reactivos empleados en el proyecto de titulación

Reactivos	Cantidad
Alcohol Polivinílico (PVA)	2000 g
Glicerina	500 mg
Oxido de magnesio	100 g
Hidróxido de sodio	25 g

2.1.2. Equipos

Tabla 3

Equipos utilizados en el proyecto de titulación

Equipos	Cantidad
pH/mV/Conductivity AB200 3215258/N14M1U	1
Balanza analítica 4413162	1
Espectrofotómetro FTIR	1
Horno Binder 8752603 (V02E9U)	1
Máquina universal de ensayos	1
Mufla	1
Estufa	1
Agitador vertical	1

2.2 Métodos

2.2.1. Preparación de materiales

El *wet blue* se lavó y se dejó secar a 60 °C por 24 horas y se trituro hasta obtener un tamaño de partícula menor a 2 mm, el PVA se pesó a diferentes cantidades de acuerdo a la cantidad requerida en la mezcla, además, el glicerol de igual manera se preparó en diferentes concentraciones para usarlo como plastificante (Fu et al., 2023) .

2.2.2. Tratamiento previo del *wet blue*

El residuo de cuero *wet blue* se hidrolizó mediante un tratamiento alcalino utilizando óxido de magnesio (MgO). Se preparó una mezcla con relación 1:4 de *wet-blue* y agua, a la cual se añadió óxido de magnesio al 5% para iniciar la hidrólisis. La mezcla se mantuvo a 60 °C durante 2 horas y media bajo agitación constante, favoreciendo la ruptura parcial de enlaces peptídicos y la dispersión de componentes proteicos del colágeno (Debnath et al., 2023). Finalizado el proceso, la mezcla se dejó reposar.

2.2.3. Preparación de mezcla

Las mezclas siguen el procedimiento mencionado por Raksaksri et al., (2023), donde la cantidad de concentraciones de *wet blue* fueron de 30%, 33%, 37%, 40%, 43%, 47% y 50%, las concentraciones de PVA fueron de 43%, 50%, 57%, 63% y 70% y las concentraciones de glicerol fueron de 0%, 3%, 4%, 6%, 7% y 10%. Las proporciones definidas de *wet blue*, PVA y glicerol se mezclaron inmediatamente después del término de la hidrólisis de *wet blue*, se agitó la mezcla a 60 °C durante 40 minutos.

2.2.4. Moldeo y secado

Las mezclas inicialmente se sometieron a un proceso de secado en una estufa a 60 °C durante 6 horas para eliminar el exceso de agua posteriormente, fueron vertidas en moldes planos de acero inoxidable engrasados con aceite de vaselina y sometidas a moldeo por compresión en una prensa manual a 60 °C y 5 MPa durante 6 horas. Posteriormente, se dejó enfriar gradualmente hasta alcanzar temperatura ambiente. Finalmente, se desmoldaron cuidadosamente y acondicionaron en ambiente controlado durante 48 horas antes de su caracterización (Hanumantharaju et al., 2023).

2.2.5. Caracterización fisicoquímica

2.2.5.1. pH

Siguiendo la norma **ASTM D1293**, se preparó una solución 1:10 donde se utilizó una muestra de lámina de 2x2 cm con un peso aproximado de 2 gramos en 20 gramos de agua destilada, se agitó esta solución durante 30 minutos, posteriormente se filtró la solución y se midió el pH con un potenciómetro.

2.2.5.2. Densidad

Siguiendo la norma **ASTM D792**, se cortó una muestra en un tamaño de 2 cm de largo por 2 cm de ancho el espesor se determinó utilizando un micrómetro y el peso se determinó usando una balanza analítica, posteriormente se determinó la densidad aplicando la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{\text{Masa (g)}}{\text{Volumen (cm}^3\text{)}} \quad (\text{Ec. 1})$$

2.2.5.3. Contenido de humedad

Siguiendo la normativa **ASTM D6980**, se tomaron muestras de 2 cm x 2 cm, las cuales se pesaron en una balanza analítica, posteriormente se pesaron crisoles secos, luego se agregó la muestra a cada crisol y se colocó en la estufa a 105 °C durante 6 horas, finalmente los crisoles se dejaron enfriar en un desecador y se pesó en una balanza analítica, el porcentaje de humedad se determinó utilizando la siguiente fórmula:

$$\% \text{Humedad} = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\% \quad (\text{Ec. 2})$$

Dónde:

m₀= es el peso inicial de los crisoles con la muestra

m₁= es el peso final de los crisoles con la muestra

2.2.5.4. Absorción de agua

De acuerdo a la normativa **ASTM D570**, se tomó una muestra de 76 mm de largo por 25 mm de ancho. Esta se pesó en una balanza analítica, la muestra se sumergió en un recipiente con agua destilada a 23 °C durante 24 horas, posteriormente se secó la muestra con papel absorbente, se pesó nuevamente la muestra, después se realizó un reacondicionamiento donde se secó la muestra a la temperatura de secado original de la lámina y se pesó nuevamente, finalmente se calculó la absorción de agua empleando la siguiente fórmula:

$$\%aumento\ de\ peso = \frac{m1 - m0}{m0} \times 100\% \quad (Ec. 3)$$

$$\%materia\ soluble\ pérdida = \frac{m0 - m2}{m0} \times 100\% \quad (Ec. 4)$$

$$\%Absorción\ de\ agua = \%aumento\ de\ peso + \%materia\ soluble\ pérdida \quad (Ec. 5)$$

Dónde:

m1= Peso húmedo

m0= Peso seco

m2= Peso reacondicionado

2.2.5.5. Cenizas totales.

Basado en la normativa **ASTM D5630**, se obtuvo una muestra de 2 cm x 2 cm de 1 gramo de peso, la cual que se colocó en crisoles que previamente se han pesado. En el crisol se colocó la muestra y se llevó a la mufla a 600 °C durante 4 horas, posteriormente se dejó enfriar en un desecador, y se pesó nuevamente, se calculó el contenido de cenizas empleando la siguiente fórmula:

$$\%cenizas = \frac{W3 - W1}{W2 - W1} \times 100\% \quad (Ec. 6)$$

Dónde:

W1= masa del crisol

W2= masa del crisol con la muestra

W3= masa del crisol con las cenizas de la muestra

2.2.5.6. Pruebas mecánicas de tracción

De acuerdo con la metodología **ISO 3376:2020** los ensayos de tracción de las láminas se llevaron a cabo en una máquina universal de ensayos INSTRON 3365, se obtuvieron probetas en forma “hueso de perro” con dimensiones de 110 mm de largo con 20 mm de ancho, el espesor se midió en base a la **ISO 2589:2016**. Se realizó el ensayo a una velocidad de 100 mm/min. Para determinar la resistencia a la tracción (Tn) utilizando la siguiente fórmula:

$$T_n = \frac{F_{max}}{w \times t} \quad (Ec. 7)$$

Dónde:

T_n= Resistencia a la tracción

F_{max}= Fuerza más alta registrada en newtons

w= Ancho medio de la pieza de prueba en milímetros

t= Espesor medio de la pieza de ensayo en milímetros

2.2.5.7. Prueba FT-IR

Se utilizó el espectrofotómetro FT-IR, el cual se calibró con una muestra de KBr puro, posteriormente se utilizó una muestra con la cual cada espectro se obtuvo realizando 20 barridos con una resolución de 4 cm⁻¹ en las bandas de frecuencia de 4000 a 600 cm⁻¹. Se analizó las bandas de absorción correspondientes a los enlaces peptídicos del colágeno en el *wet blue* (amide I, amide II y amide III), así como las señales características del PVA (O-H, C-H y C-O) y del glicerol (O-H y C-O) (Debnath et al., 2023).

2.2.5.8. Diseño experimental y análisis de datos

Se utilizó un diseño experimental simplex lattice para mezclas ternarias, para evaluar de forma individual y combinada los factores principales: *wet blue* (WB), alcohol polivinílico (PVA) y glicerol (G), en diferentes proporciones sobre las variables de respuesta fisicoquímicas y mecánicas. Los datos obtenidos se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) para evaluar la significancia estadística de cada coeficiente del modelo polinomial de mezcla. Adicionalmente, se generaron gráficas de superficie y de contorno para visualizar las regiones óptimas dentro del espacio de mezclas y facilitar la interpretación de los efectos de cada componente, con el fin de identificar las proporciones óptimas de los componentes y qué componente maximiza o minimiza las variables (Li et al., 2021).

Wet blue: 30% a 50%

PVA: 30% a 70%

Glicerol: 0% a 10%

Mezcla	<i>Wet blue</i> (%)	PVA (%)	Glicerol (%)
WB30PVA63G7	30	63	7
WB30PVA70G0	30	70	0
WB33PVA57G10	33	57	10
WB33PVA63G4	33	63	4

WB37PVA570G6	37	57	6
WB37PVA63G0	37	63	0
WB40PVA50G10	40	50	10
WB40PVA57G3	40	57	3
WB43PVA50G7	43	50	7
WB43PVA57G0	43	57	0
WB47PVA43G10	47	43	10
WB47PVA50G3	47	50	3
WB50PVA43G7	50	43	7
WB50PVA50G0	50	50	0

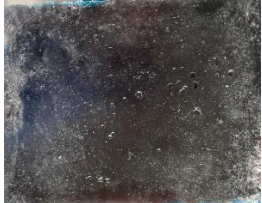
CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis y discusión de los resultados

3.1.1. Obtención de láminas

Tabla 4

Láminas de wet blue

Código	Imagen	Cantidad de <i>wet blue</i> (g)	Cantidad de PVA (g)	Cantidad de glicerol (g)
WB30PVA63G7		90	189	21
WB30PVA70G0		90	210	0
WB33PVA57G10		99	171	30
WB33PVA63G4		99	189	12
WB37PVA570G6		111	171	18

WB37PVA63G0		111	189	0
WB40PVA50G10		120	150	30
WB40PVA57G3		120	171	9
WB43PVA50G7		129	150	21
WB43PVA57G0		129	171	0
WB47PVA43G10		141	129	30
WB47PVA50G3		141	150	9

WB50PVA43G7		150	129	21
WB50PVA50G0		150	150	0

Las láminas flexibles obtenidas se muestran en la **Tabla 4**, donde se evidencian diferencias en sus características macroscópicas. La coloración se observa con una tonalidad más clara cuanto mayor es la presencia de PVA y una coloración más oscura a mayor concentración de *wet blue*. Además las láminas presentaron varias grietas y poros, atribuibles a la presencia de agua que, durante el proceso de moldeo y secado, se liberó dejando las grietas, según **Fu et al. (2023)**, formulaciones con PVA y glicerol mezcladas con agua da lugar a moléculas de agua libres que son responsables de producir huecos en las láminas, mismos que son defectos importantes a considerar en las pruebas mecánicas, estos defectos se minimizaron al implementar un proceso de secado previo al moldeo y prensado. Por otro lado, aunque todas las láminas fueron flexibles, aquellas láminas que poseen glicerol tenían una mayor flexibilidad, puesto que el glicerol posee características que le permiten interactuar con las moléculas de los componentes proteicos o polímeros polares, lo cual disminuye la intensidad del entrelazamiento aumentando la elasticidad de las mezclas, las concentraciones de glicerol aumentan significativamente la elongación a la rotura (**Ben et al., 2022**).

3.1.2. Caracterización fisicoquímica

Tabla 5

Parámetros fisicoquímicos de cada lámina

Código	pH	Densidad (g/cm ³)	Humedad (%)	Absorción de agua (%)	Cenizas totales (%)
WB30PVA63G7	7,58 ±0,01	1,28 ±0,09	0,54 ±0,01	197,75 ±24,66	3,37 ±0,1
WB30PVA70G0	7,41 ±0,01	0,81 ±0,04	0,41 ±0,03	135,51 ± 31,06	3,30 ±0,06
WB33PVA57G10	7,54 ±0,01	1,17 ±0,09	2,4 ±0,25	225,23 ±35,13	3,29 ±0,05
WB33PVA63G4	7,23 ±0,01	1,19 ±0,09	1,62 ±0,46	301,84 ±39,21	3,90 ±0,03
WB37PVA57G6	7,55 ±0,01	1 ±0,05	0,43 ±0,01	375,52 ±114,8	4,25 ±0,08
WB37PVA63G0	7,57 ±0,02	0,96 ±0,03	1,09 ±0,07	308,23 ±85,74	3,20 ±0,12

WB40PVA50G10	7,77 $\pm$ 0,01	1,33 $\pm$ 0,1	1,41 $\pm$ 0,09	255,78 $\pm$ 23,34	4,00 $\pm$ 0,18
WB40PVA57G3	7,68 $\pm$ 0,01	0,96 $\pm$ 0,04	1,02 $\pm$ 0,03	505,55 $\pm$ 49,46	4,46 $\pm$ 0,17
WB43PVA50G7	7,78 $\pm$ 0,01	1,19 $\pm$ 0,01	1,75 $\pm$ 0,35	262,89 $\pm$ 15,63	4,57 $\pm$ 0,1
WB43PVA57G0	7,83 $\pm$ 0,02	0,71 $\pm$ 0,1	1,34 $\pm$ 0,11	399,70 $\pm$ 46,35	4,23 $\pm$ 0,12
WB47PVA43G10	7,68 $\pm$ 0,02	1,26 $\pm$ 0,5	0,53 $\pm$ 0,05	156,82 $\pm$ 8,77	5,19 $\pm$ 0,2
WB447VA50G3	7,82 $\pm$ 0,03	0,99 $\pm$ 0,05	1,23 $\pm$ 0,25	243,36 $\pm$ 18,21	4,13 $\pm$ 0,26
WB50PVA43G7	7,74 $\pm$ 0,01	0,97 $\pm$ 0,02	0,12 $\pm$ 0,07	347,07 $\pm$ 56,43	5,46 $\pm$ 0,27
WB50PVA50G0	7,66 $\pm$ 0,02	0,98 $\pm$ 0,02	0,23 $\pm$ 0,12	416,07 $\pm$ 15,65	6,14 $\pm$ 0,09

Las características fisicoquímicas de las láminas obtenidas se detallan en la **Tabla 5**, donde se observa el pH de cada lámina el cual es cercano a la neutralidad, lo cual se atribuye a la presencia mayoritaria de PVA en las mezclas, que por sus características químicas posee un pH cercano a 7 lo cual mantiene el entorno de la mezcla en un pH cercano a la neutralidad (**Oun et al., 2022**), esta característica es relevante ya que según lo mencionan **Yang et al. (2022)** el efecto del valor de pH en las mezclas afecta seriamente al comportamiento de los materiales. Mantener un valor de pH adecuado cercano a la neutralidad evita posibles alteraciones en la estructura del material.

El análisis estadístico descrito en el **Anexo 1** realizado permitió identificar que el pH de las láminas está significativamente influenciado por los tres componentes que conforman las mezclas, con una mayor significancia la interacción entre *wet blue* y PVA, es decir, que estos dos componentes generan un efecto directo al nivel de pH. En el **Anexo 3** se observan las regiones óptimas para mantener el nivel de pH en 7, lo cual es consistente con los resultados obtenidos. Por ello, el control del pH en las láminas puede optimizarse ajustando el efecto conjunto de *wet blue* y PVA.

En cuanto a la humedad, los valores obtenidos son bajos, en la mayoría de los casos inferiores al 1%, en contraparte con las láminas reportadas por **Debnath et al. (2023)** quienes presentan mezclas con concentraciones similares a las planteadas en este trabajo con cantidades de humedad del 15% al 17% mientras que en las mezclas obtenidas en este trabajo se obtuvo una humedad de 0,12% a 2,4%, esta diferencia se debe al proceso de secado de las mezclas previo al moldeo y la temperatura usada en el proceso de prensado, como se mencionó anteriormente, de esta manera se evitó la formación de grietas y desperfectos en las láminas.

En el análisis estadístico especificado en el **Anexo 7**, revela que el principal componente determinante del porcentaje de humedad es el glicerol como factor individual también la interacción entre *wet blue* y PVA es estadísticamente significativa lo que indica que ambos en altas proporciones generan un incremento en el porcentaje de humedad, las gráficas de superficie y de contorno en el **Anexo 9**, corroboran los datos obtenidos, mostrando los valores máximos de humedad se concentran en la región

con mayor contenido de glicerol.

El porcentaje de absorción de agua es un parámetro especialmente relevante, ya que todas las láminas poseen valores de porcentaje de absorción mayor al 100% demostrando una característica hidrófila. La alta absorción de agua puede deberse a la concentración de PVA, que por sus grupos hidroxilo tiene poca resistencia a ambientes húmedos permitiendo así que las moléculas de agua puedan penetrar fácilmente las estructuras formadas por PVA y otros compuestos por lo cual se da lugar al hinchamiento que al mismo tiempo destruye las propiedades mecánicas de los composites que conforman (**Handoko & Yusuf, 2021**). El porcentaje de absorción de agua indica que el material no puede ser utilizado en un ambiente húmedo que requiera una estabilidad en ambientes húmedos; por lo cual, este podría ser utilizado como un criterio de exclusión hacia un posible uso del material.

En el análisis estadístico que se observa en el **Anexo 10**, se demostró que tanto el PVA como *wet blue* si aumentan, la absorción de agua aumenta, lo cual es consistente con los datos obtenidos, sin embargo en el **Anexo 12**, se observa en las gráficas de superficie y de contorno que mientras se acerca a las regiones de *wet blue*, PVA y glicerol se disminuye la absorción de agua pero esto se debe a la R-cuadrado, que debido a la cantidad de datos este no puede utilizarse para predecir resultados fuera de los resultados experimentales obtenidos en el presente trabajo.

Los resultados obtenidos en el análisis de cenizas totales, muestran que este parámetro aumenta en el porcentaje de cenizas al mismo tiempo que se incrementa la concentración de *wet blue* en las mezclas, esto se debe a la presencia de compuestos inorgánicos, como las sales de cromo propias del *wet blue*, según el estudio de **Shaibur (2023)** sobre la recuperación de cromo de residuos de viruta de cuero, reporta que el *wet blue* puede contener entre un 4% a 6% de sales de cromo, por lo cual es esperable la presencia en la cantidad reportada.

Estos datos se comprueban con el análisis estadístico presentados en el **Anexo 13**, donde se demostró que el *wet blue* es el principal factor que incrementa el porcentaje de cenizas en las láminas, las gráficas de superficie y contorno en el **Anexo 15**, corroboran esto evidenciando que formulaciones que se acerquen a la región de *wet blue* se obtendrán mayores porcentajes de cenizas, lo cual comprueba los valores obtenidos en la **Tabla 5**.

Por último, aunque la presencia de cromo da lugar a pensar una posible toxicidad del material por liberación de cromo, en el trabajo de **Gendaszewska et al. (2024)**, se demuestra mediante una prueba de toxicidad probada en plantas, que la toxicidad del cromo en las plantas no resultó ser significativa con efectos imperceptibles. Sin embargo, se sugiere seguir realizando más estudios para minimizar cualquier riesgo al momento de manipular el material o ser utilizado con otros materiales.

3.1.3. Prueba mecánica de tracción

Tabla 6

Resultados ensayos de resistencia a la tracción de cada lámina

Código	Resistencia a la tracción máxima (MPa)	Máxima deformación (%)
WB30PVA63G7	6,01 ± 0,1	111,55 ± 13,98
WB30PVA70G0	6,24 ± 0,37	66,58 ± 12,76
WB33PVA57G10	3,29 ± 0,31	84,76 ± 2,25
WB33PVA63G4	5,67 ± 0,64	52,18 ± 23,61
WB37PVA57G6	5,06 ± 0,55	97,50 ± 20,68
WB37PVA63G0	3,78 ± 0,41	83,38 ± 7,87
WB40PVA50G10	6,19 ± 1,1	82,77 ± 21,76
WB40PVA57G3	4,18 ± 0,33	94,99 ± 4,05
WB43PVA50G7	4,38 ± 0,33	67,09 ± 2,24
WB43PVA57G0	5,05 ± 0,37	79,82 ± 3,51
WB47PVA43G10	4,34 ± 0,46	76,85 ± 2,78
WB47VA50G3	3,50 ± 0,27	34,20 ± 5,81
WB50PVA43G7	3,74 ± 0,43	52,35 ± 8,42
WB50PVA50G0	4,86 ± 0,44	21,32 ± 6,02

En la **Tabla 6**, se presentan los resultados promedio de los ensayos de resistencia a la tracción de todas las mezclas siendo las variables evaluadas la resistencia a la tracción (T_n) y la deformación (σ). Se destacan las mezclas WB30PVA70G0 con T_n de 6,2383 MPa y σ de 66,5764%, WB37PVA63G0 con T_n de 3,777 MPa y σ de 87,3825%, WB43PVA57G0 con T_n de 5,048 MPa y σ de 78,8202% y WB50PVA50G0 con T_n de 4,8554 MPa y σ de 21,3208%, las cuales indican una resistencia a la tracción alta pero con poca deformación, en contraste con las mezclas WB30PVA63G7 con T_n de 6,0058 MPa y σ de 111,5477%, WB37PVA57G6 con T_n de 5,0614 MPa y σ de 105,296%, WB43PVA50G7 con T_n 4,3754 MPa y σ de 67,0909 % y WB50PVA43G7 con T_n de 3,7367 MPa y σ de 52,3548% estas mezclas poseen una concentración de componentes similar en cuanto a *wet blue* y PVA, pero con un contenido de glicerol de 6% a 7%. Esto sugiere que la presencia de glicerol está relacionada con la elasticidad del material, pero también con la debilidad del mismo, en el trabajo de **Fu et al. (2023)** destacan que el glicerol favorece la elasticidad de materiales mezclados con PVA, pero que sacrifica la resistencia a la tracción.

Esto también se comprueba con el análisis estadístico detallado en el **Anexo 19**, donde se destaca que el glicerol afectan significativamente positiva la deformación del material, también se comprueba que el PVA afecta significativamente negativa la deformación del material es decir que mientras aumenta el PVA se reduce la deformación esto observa también en las gráficas de superficie y contorno en el **Anexo 21**, mostrando en las zonas cercanas a la zona de glicerol un alto nivel de deformación, sin embargo debido al R-cuadrado ajustado el modelo presenta una variabilidad experimental no considerada fuera de los datos experimentales obtenidos que se deben de considerar.

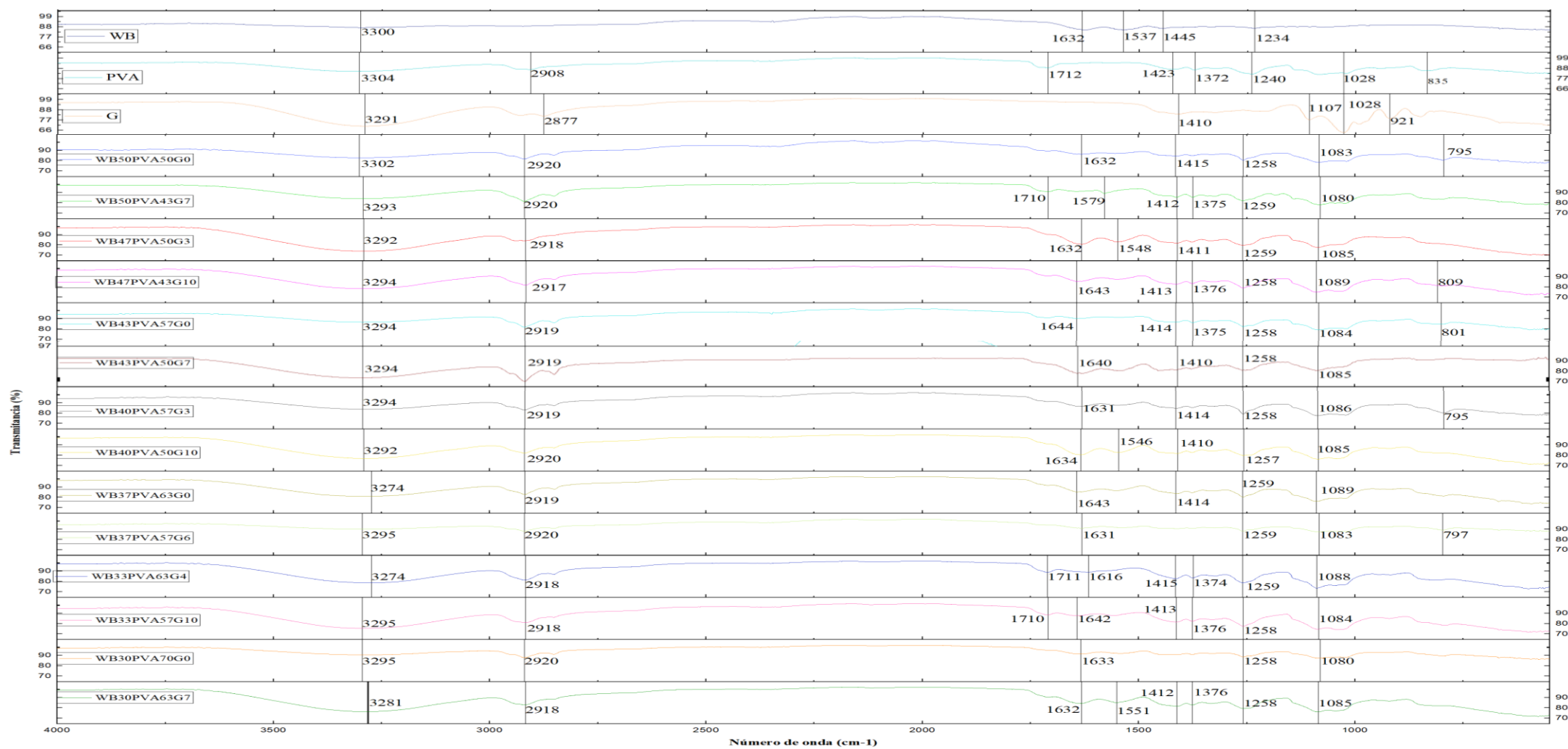
En la **Tabla 6** además se observa que las mezclas con una alta concentración de glicerol de 10%, como WB33PVA57G10 con Tn de 3,2884 MPa y σ de 84,7588%, WB40PVA50G10 con 6,1863 MPa y σ 82,7659% y WB47PVA43G10 con 4,3371 MPa y σ 76,8534%, muestran una resistencia a la tracción relativamente baja comparada a todas las mezclas pero con una alta deformación esto también lo reporta **Tarique et al. (2021)** en su trabajo explican que el plastificante disminuye la interacción entre los grupos funcionales de la mezcla que son las de PVA y *wet blue* al formar la matriz polimérica estos dos componentes aumentan la resistencia a la tracción por ende se intuye que aumentar sustancialmente la concentración de glicerol es contraproducente en mantener la estabilidad de las láminas esto se comprueba con las mezclas que no poseen glicerol como WB30PVA70G0 con Tn de 6,2383 MPa y WB43PVA57G0 con Tn de 5,05 MPa, mientras que las mezclas con glicerol como WB33PVA57G10 con Tn de 3,29 MPa y WB47PVA50G3 con Tn de 3,50 MPa.

Además, se observó que mientras menor es la presencia de PVA, la resistencia a la tracción disminuye considerablemente, esto se evidencia en la mezcla WB30PVA70G0 que posee la más alta concentración de PVA de todas las mezclas y a su vez tiene la mayor Tn con 6,24 MPa en contraste con la mezcla WB50PVA43G7 que posee la menor concentración de PVA con un Tn de 3,47 MPa lo cual es consistente con el trabajo de **Debnath et al. (2023)**, quienes atribuyen este fenómeno a que mientras menor es la presencia de PVA y aumenta la concentración de *wet blue* la unión de la matriz polimérica con el colágeno presente en el *wet blue* es más débil, lo cual da lugar a huecos dentro de la mezcla que empeora las propiedades mecánicas de la mezcla. Mediante el análisis estadístico detallado en el **Anexo 16**, se demostró esto mostrando una incidencia significativa negativa del *wet blue* en la resistencia a la tracción, lo que indica que el aumento de *wet blue* disminuye también la resistencia a la tracción. Por otro lado, se obtiene una incidencia significativa positiva del PVA, es decir que este aumenta la resistencia a la tracción, en el **Anexo 18** con las gráficas de superficie y de contorno se observa esta incidencia, pero de estos gráficos se debe descartar la interacción mostrada del glicerol, ya que este modelo en particular tiene un R-cuadrado ajustado bajo por lo cual la capacidad predictiva del modelo es deficiente fuera de los resultados experimentales.

3.1.4. Análisis FT-IR

Figura 3

Espectros FT-IR de wet blue, PVA, glicerol y mezclas



Nota. Elaboración propia realizado en Origin

En la **Figura 3**, se observan los espectros FT-IR de las mezclas elaboradas en el presente trabajo, en cada mezcla se observa la presencia de la banda Amida A alrededor de 3290 cm^{-1} , característica del colágeno presente en el *wet blue*, esta banda corresponde al estiramiento de NH y a los enlaces de hidrogeno intermoleculares que mantienen la estabilidad de la estructura del colágeno (**Tujjohra et al., 2025**). Además, se observan los picos de las bandas amida I ($1700 - 1600\text{ cm}^{-1}$), a la altura entre 1632 a 1643 cm^{-1} en las mezclas este pico es atribuido a la vibración de estiramiento C=O, amida II ($1600 - 1500\text{ cm}^{-1}$) atribuida a la flexión de NH acoplada al estiramiento de NH en las mezclas se observa estos picos a la altura de 1548 cm^{-1} y amida III ($1300 - 1200\text{ cm}^{-1}$) asociada con el estiramiento de CN y la flexión de NH en las mezclas se observan los picos a la altura de 1258 cm^{-1} , estas características espectrales confirman la integridad estructural del colágeno en cada mezcla (**He et al., 2023**).

Por otro lado, también se visualiza las bandas correspondientes a los grupos funcionales de PVA en cada una de las mezclas, con picos característicos alrededor de 3304 cm^{-1} correspondiente al estiramiento de grupos hidroxilo (OH) ($3200 - 3600\text{ cm}^{-1}$), también se observaron picos alrededor de 1089 cm^{-1} , correspondientes al estiramiento de C – O ($1000 - 1200\text{ cm}^{-1}$) y picos alrededor de 2918 cm^{-1} , correspondientes a grupo C – H ($2900 - 2950\text{ cm}^{-1}$) (**Ng et al., 2023**). Además, se destaca la presencia de los grupos funcionales característicos del glicerol, que son similares a los grupos de PVA, pero con un pico más pronunciado alrededor de 3290 cm^{-1} , característico de los grupos hidroxilo, de igual manera que los grupos C – O, en picos alrededor de 1089 cm^{-1} y C – H, alrededor de 2918 cm^{-1} (**Hanry et al., 2022**).

En la **Figura 3**, en cada mezcla se muestra una superposición y desplazamiento de las bandas correspondientes a los grupos funcionales mencionados de cada componente, lo cual indica una interacción fisicoquímica entre los componentes, pero también mantiene a los mismos como la preservación estructural del colágeno (**He et al., 2023**).

En el trabajo de **Debnath et al. (2023)**, destacan la interacción entre colágeno y PVA da como resultado una deshidratación entre los grupos hidroxilo de estos componentes lo que da lugar a la formación de enlaces éter que se evidencian en picos alrededor de 1080 cm^{-1} , también se da lugar a la formación de enlaces éster por reacciones de esterificación entre los grupos – OH del PVA y el –COOH del *wet blue* con pico alrededor de 1376 cm^{-1} lo cual se aprecia en mezclas como WB30PVA63G7, WB33PVA57G10 y WB33PVA63G4 la formación de esto sugiere una interacción estructural más fuerte destacando la compatibilidad química entre los componentes sin la desnaturalización de los mismos (**Riaz et al., 2018**).

CAPITULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Se elaboraron láminas flexibles utilizando diferentes proporciones de residuos de cuero *wet blue*, alcohol polivinílico (PVA) y glicerol, se observó que las mezclas con mayores concentración de PVA resultaron ser más homogéneas en cuanto a la textura y coloración, además debido al proceso de secado se obtuvieron láminas con menos poros y defectos como grietas que afectan los resultados de la realización de análisis mecánicos.
- Se caracterizaron las láminas obtenidas donde se demostró que la concentración *wet blue*, PVA y glicerol afectan a las características fisicoquímicas de las láminas, los valores de pH son adecuados para una interacción con otros materiales al ser cercanos a la neutralidad, también se demostró que el agua afecta negativamente al material debido a su alta capacidad de absorción lo cual lo descarta para ser usado en ambientes con alto contenido de agua, además se demostró la presencia de cromo en el material que si bien no es significativa es un aspecto a considerar en futuras aplicaciones del material.
- Se evaluó el desempeño de las láminas mediante el ensayo de resistencia a la tracción la cual mostro que las formulaciones con alto contenido de PVA muestran una mayor resistencia a la tracción, pero con baja deformación como fue el caso de la mezcla WB30PVA70G0 con un Tn de 6,24 MPa y se observó que mientras las formulaciones con glicerol tienen una alta deformación WB37PVA57G6 con un Tn de 5,06 MP, de esa forma el plastificante afecta a la resistencia a la tracción además de que si se tiene una alta concentración de glicerol se puede llegar a afectar la estabilidad estructural de las láminas.
- Se desarrolló láminas flexibles utilizando residuos sólidos de cuero *wet blue* con alcohol polivinílico (PVA) y glicerol, las láminas obtenidas demuestran la viabilidad de aprovechar estos residuos industriales contribuyendo así a la sostenibilidad ambiental favoreciendo la economía circular, este trabajo es un paso previo a una posterior investigación que permita establecer la utilidad específica donde puede ser aplicado el material.

Referencias Bibliográficas

- Aboulela, A. R., Mussa, A. A., Talhami, M., Das, P., & Hawari, A. H. (2022). Industrial sludge valorization and decontamination via lipid extraction and heavy metals removal using low-cost protic ionic liquid. *Science of The Total Environment*, 835, 155451. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.155451>
- Ahmed, M. D., & Maraz, K. M. (2021). Benefits and problems of chrome tanning in leather processing: Approach a greener technology in leather industry. *Materials Engineering Research*, 3(1), 156–164. <https://doi.org/10.25082/mer.2021.01.004>
- American Society for Testing and Materials. (2018). *Standard Test Methods for pH of Water*. (ASTM D1293-18). ASTM international. <https://store.astm.org/d1293-18.html>
- American Society for Testing and Materials. (2020). *Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement*. (ASTM D792-20). ASTM international. <https://store.astm.org/d0792-20.html>
- American Society for Testing and Materials. (2017). *Standard Test Methods for Determination of Moisture in Plastics by Loss in Weight*. (ASTM D6980-17). ASTM international. <https://store.astm.org/d6980-17.html>
- American Society for Testing and Materials. (2022). *Standard Test Methods for Ash Content in Plastics*. (ASTM D5630-22). ASTM international. <https://store.astm.org/d5630-22.html>
- American Society for Testing and Materials. (2022). *Standard Test Methods for Water Absorption of Plastics*. (ASTM D570-22). ASTM international. <https://store.astm.org/standards/d570>
- American Society for Testing and Materials. (2021). *Standard Test Methods for Determining Aerobic Biodegradation of Plastic Materials Under Controlled Composting Conditions, Incorporating Thermophilic Temperatures* (ASTM D5338-15). <https://store.astm.org/d5338-15r21.html>
- Aboulela, A. R., Mussa, A. A., Talhami, M., Das, P., & Hawari, A. H. (2022). Industrial sludge valorization and decontamination via lipid extraction and heavy metals removal using low-cost protic ionic liquid. *Science of The Total Environment*, 835, 155451. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.155451>
- Ahmed, M. D., & Maraz, K. M. (2021). Benefits and problems of chrome tanning in leather processing: Approach a greener technology in leather industry. *Materials Engineering Research*, 3(1), 156–164. <https://doi.org/10.25082/mer.2021.01.004>

- Awasthi, M. K., Sar, T., Gowd, S. C., Rajendran, K., Kumar, V., Sarsaiya, S., Li, Y., Sindhu, R., Binod, P., Zhang, Z., Pandey, A., & Taherzadeh, M. J. (2023). A comprehensive review on thermochemical, and biochemical conversion methods of lignocellulosic biomass into valuable end product. *Fuel*, 342, 127790. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2023.127790>
- Ben, Z. Y., Samsudin, H., & Yhaya, M. F. (2022). Glycerol: Its properties, polymer synthesis, and applications in starch based films. *European Polymer Journal*, 175, 111377. <https://doi.org/10.1016/J.EURPOLYMJ.2022.111377>
- Bhardwaj, A., Kumar, S., & Singh, D. (2023). Tannery effluent treatment and its environmental impact: a review of current practices and emerging technologies. *Water Quality Research Journal*, 58(2), 128–152. <https://doi.org/10.2166/WQRJ.2023.002>
- Chaghtmi, R., Ben Hassen Trabelsi, A., Ben Abdallah, A., Maaoui, A., Lopez, G., Cortazar, M., Khedira, H., Chaden, C., & Olazar, M. (2023). Valorization potential of dried tannery fleshing wastes (TFW) through pyrolysis in the leather industry: Kinetic and thermodynamic investigations. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 33, 101130. <https://doi.org/10.1016/J.SCP.2023.101130>
- Chiampo, F., Shanthakumar, S., Ricky, R., & Pattukandan Ganapathy, G. (2023). Tannery: Environmental impacts and sustainable technologies. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2023.02.025>
- CFN. (2021). Ficha sectorial cuero subgerencia de análisis de productos y servicios. 1–15. <https://www.cfn.fin.ec/wp-content/uploads/downloads/biblioteca/2021/fichas-sectoriales-2-trimestre/Ficha-Sectorial-Cuero.pdf>
- Copik, P., Korus, A., Szlęk, A., & Ditaranto, M. (2023). A comparative study on thermochemical decomposition of lignocellulosic materials for energy recovery from waste: Monitoring of evolved gases, thermogravimetric, kinetic and surface analyses of produced chars. *Energy*, 285, 129328. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2023.129328>
- Debnath, A., Alam, M. A., Mondal, A. K., Uddin, M. T., Shaikh, M. A. A., & Sujan, S. M. A. (2023). Development of Flexible Composite Sheet with Chrome Shavings Using Polyvinyl Alcohol as a Cross-Linker. *International Journal of Polymer Science*, 2023(1), 6694850. <https://doi.org/10.1155/2023/6694850>
- Di Lauro, F., Migliaccio, R., Ruoppolo, G., Balsamo, M., Montagnaro, F., Imperiale, E., Caracciolo, D., & Urciuolo, M. (2022). Tannery Sludge Gasification in a Fluidized Bed for Its Energetic Valorization. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 61(46), 16972–16979.

https://doi.org/10.1021/ACS.IECR.2C03214/ASSET/IMAGES/LARGE/IE2C03214_0005.JPEG

- Duraikkannu, S. L., Castro-Muñoz, R., & Figoli, A. (2021). A review on phase-inversion technique-based polymer microsphere fabrication. *Colloid and Interface Science Communications*, 40, 100329. <https://doi.org/10.1016/J.COLCOM.2020.100329>
- Famielec, S. (2020). Chromium Concentrate Recovery from Solid Tannery Waste in a Thermal Process. *Materials* 2020, Vol. 13, Page 1533, 13(7), 1533. <https://doi.org/10.3390/MA13071533>
- Fu, Z. zhen, Yao, Y. hang, Guo, S. jie, Wang, K., Zhang, Q., & Fu, Q. (2023). Effect of Plasticization on Stretching Stability of Poly(Vinyl Alcohol) Films: A Case Study Using Glycerol and Water. *Macromolecular Rapid Communications*, 44(1), 2200296. <https://doi.org/10.1002/MARC.202200296>
- Gao, B., Jiang, H., Chen, H., Peng, M., Zhang, W., Hu, L., & Mao, L. (2023). The introduction of sulfates to suppress Cr(III) oxidation during incineration of tannery sludge and reduce leachability toxicity of incineration residue. *Journal of Cleaner Production*, 382, 135272. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.135272>
- Gendaszewska, D., Pipiak, P., Wiecek, D., & Sieczyńska, K. (2024). Experimental Study on Chrome Tanned Leather Shavings Modification—Properties and Prospective for Future Application. *Processes* 2024, Vol. 12, Page 228, 12(1), 228. <https://doi.org/10.3390/PR12010228>
- Guo, S. shan, Yu, C. yang, Zhao, X. yue, chen, Y. zhou, Wang, J. yi, Su, M., Yang, X. yu, & Yang, J. yan. (2022). The chromium migration risk from tannery sludge into shallow soil and groundwater: Influence factors, modeling, and microbial response. *Journal of Cleaner Production*, 374, 133776. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.133776>
- Handoko, F., & Yusuf, Y. (2021). Synthesis and Physicochemical Properties of Poly(vinyl) Alcohol Nanocomposites Reinforced with Nanocrystalline Cellulose from Tea (*Camellia sinensis*) Waste. *Materials* 2021, Vol. 14, Page 7154, 14(23), 7154. <https://doi.org/10.3390/MA14237154>
- Hanry, E. L., Redzwan, N. F. M., Badeges, N. F. A. K., & Surugau, N. (2022). Characterization of biofilms developed from alginate extracted from *Padina* sp. incorporated with calcium chloride (CaCl₂). *Journal of Physics: Conference Series*, 2314(1), 012022. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2314/1/012022>
- Hansen, É., Monteiro de Aquim, P., & Gutterres, M. (2021). Current technologies for post-tanning wastewater treatment: A review. *Journal of Environmental Management*, 294, 113003.

<https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.113003>

- Hanumantharaju, H. G., Prashanth, K. P., Ramu, B., Venkatesh, N., & Chethan, G. R. (2023). 3D Printing of Biopolymer Composites Investigation on Effect of Egg Shell Particles on Polylactic Acid Matrix. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 13(3). <https://doi.org/10.33263/BRIAC133.251>
- He, Z., Shen, J., Zhang, J., Lin, W., & Gu, H. (2023). Cleaner, High-Efficiency, and High-Value Conversion of Chrome-Containing Leather Solid Waste into Carbon Quantum Dots as Renewable Bimetallic Ions Detection Sensors. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 11(35), 13126–13141. https://doi.org/10.1021/ACSSUSCHEMENG.3C03382/ASSET/IMAGES/LARGE/SC3C03382_0009.JPEG
- Hsissou, R., Seghiri, R., Benzekri, Z., Hilali, M., Rafik, M., & Elharfi, A. (2021). Polymer composite materials: A comprehensive review. *Composite Structures*, 262, 113640. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2021.113640>
- International Organization for Standardization (2020). *Leather — Physical and mechanical tests — Determination of tensile strength and percentage elongation* (ISO 3376:2020/IULTCS/IUP6). <https://www.iso.org/standard/75173.html>
- International Organization for Standardization (2020). *Leather — Physical and mechanical tests — Determination of thickness* (ISO 2589:2016/IULTCS/IUP4). <https://www.iso.org/standard/68859.html>
- Jaffari, Z. H., Hong, J., & Park, K. Y. (2024). A systematic review of innovations in tannery solid waste treatment: A viable solution for the circular economy. In *Science of the Total Environment* (Vol. 948). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174848>
- Kawahara, S., Nishioka, H., Yamano, M., & Yamamoto, Y. (2022). Synthetic Rubber with the Tensile Strength of Natural Rubber. *ACS Applied Polymer Materials*, 4(4), 2323–2328. https://doi.org/10.1021/ACSAPM.1C01508/ASSET/IMAGES/LARGE/AP1C01508_0005.JPE
- Li, Z., Lu, D., & Gao, X. (2021). Optimization of mixture proportions by statistical experimental design using response surface method - A review. *Journal of Building Engineering*, 36, 102101. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2020.102101>
- Mishra, S., & Upadhyay, R. K. (2021). Review on biomass gasification: Gasifiers, gasifying mediums,

- and operational parameters. *Materials Science for Energy Technologies*, 4, 329–340. <https://doi.org/10.1016/J.MSET.2021.08.009>
- Nanni, A., Parisi, M., Colonna, M., & Messori, M. (2021). Thermo-Mechanical and Morphological Properties of Polymer Composites Reinforced by Natural Fibers Derived from *Wet blue* Leather Wastes: A Comparative Study. *Polymers* 2021, Vol. 13, Page 1837, 13(11), 1837. <https://doi.org/10.3390/POLYM13111837>
- Ng, W. W., Thiam, H. S., Pang, Y. L., Lim, Y. S., Wong, J., & Saw, L. H. (2023). Self-sustainable, self-healable sulfonated graphene oxide incorporated nafion/poly(vinyl alcohol) proton exchange membrane for direct methanol fuel cell applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(6), 111151. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2023.111151>
- Oun, A. A., Shin, G. H., Rhim, J. W., & Kim, J. T. (2022). Recent advances in polyvinyl alcohol-based composite films and their applications in food packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 34, 100991. <https://doi.org/10.1016/J.FPSL.2022.100991>
- Patel, N., Shahane, S., Chauhan, D., Rai, D., Khan, Md. Z. A., Bhunia, B., & Chaudhary, V. K. (2021). Environmental Impact and Treatment of Tannery Waste. In *Water Pollution and Remediation: Organic Pollutants* (Vol. 54, pp. 577–595). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-52395-4_16
- Pham, N. T. H. (2021). Characterization of Low-Density Polyethylene and LDPE-Based/Ethylene-Vinyl Acetate with Medium Content of Vinyl Acetate. *Polymers* 2021, Vol. 13, Page 2352, 13(14), 2352. <https://doi.org/10.3390/POLYM13142352>
- Raksaksri, L., Ruksakulpiwat, Y., & Udomkitpanya, T. (2023). The Properties of Tannery Waste Addition as a Filler Based on Two Types of Polymer Matrices: Poly(Butylene Adipate-Co-Terephthalate) (PBAT) and Poly(Butylene Succinate) (PBS). *Advances in Polymer Technology*, 2023(1), 8301108. <https://doi.org/10.1155/2023/8301108>
- Riaz, T., Zeeshan, R., Zarif, F., Ilyas, K., Muhammad, N., Safi, S. Z., Rahim, A., Rizvi, S. A. A., & Rehman, I. U. (2018). FTIR analysis of natural and synthetic collagen. *Applied Spectroscopy Reviews*, 53(9), 703–746. <https://doi.org/10.1080/05704928.2018.1426595;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER>
- Rizzato, M. P., Berto, L. K., Corso, M., Albuquerque, A. C. D. de, Azenha, T. D., & Rezende, L. C. S. H. (2020). Composições formadas por polipropileno reciclado e resíduos de couro wet-blue: uma prática sustentável. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)*, 55(2), 256–267.

<https://doi.org/10.5327/z2176-947820200654>

- Senthil, R., Kavukcu, S. B., Çakır, S., Türkmen, H., Başaran, B., & Alagumuthu, T. (2022). Utilization of various solid leather wastes for the production of blended bricks. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 24(6), 1889–1901. <https://doi.org/10.1007/S10098-022-02295-0/METRICS>
- Shaibur, M. R. (2023). Heavy metals in chrome-tanned shaving of the tannery industry are a potential hazard to the environment of Bangladesh. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 7, 100281. <https://doi.org/10.1016/J.CSCEE.2022.100281>
- Shammy, U., Abedin, M., & Rahman, M. (2022). Usage of wet blue shaving in sand-cement blocks: An approach towards solid waste management in tannery. *Journal of Agriculture, Food and Environment*, 03(03), 26–31. <https://doi.org/10.47440/JAFE.2022.3306>
- Sharma, S., Sudhakara, P., Singh, J., Sanjay, M. R., & Siengchin, S. (2023). Fabrication of Novel Polymer Composites from Leather Waste Fibers and Recycled Poly(Ethylene-Vinyl-Acetate) for Value-Added Products. *Sustainability (Switzerland)*, 15(5), 4333. <https://doi.org/10.3390/SU15054333/S1>
- Silva, M. J., Salinas Morales, D., Silva, M. J., & Salinas Morales, D. (2022). La contaminación proveniente de la industria curtiembre, una aproximación a la realidad ecuatoriana. *Revista Científica UISRAEL*, 9(1), 69–80. <https://doi.org/10.35290/RCUI.V9N1.2022.427>
- Tarique, J., Sapuan, S. M., & Khalina, A. (2021). Effect of glycerol plasticizer loading on the physical, mechanical, thermal, and barrier properties of arrowroot (*Maranta arundinacea*) starch biopolymers. *Scientific Reports 2021 11:1*, 11(1), 1–17. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93094-y>
- Thomasset, A., & Benayoun, S. (2024). Review: Leather sustainability, an industrial ecology in process. *Journal of Industrial Ecology*, 28(6), 1842–1856. <https://doi.org/10.1111/JIEC.13547>
- Tujjohra, F., Islam, M. M., Rashid, T. U., & Rahman, M. M. (2025). Valorization of hazardous leather shaving dust for the fabrication of electrospun collagen/PVA/chitosan nanomats in wound care. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 10, 100748. <https://doi.org/10.1016/J.CARPTA.2025.100748>
- Verma, S. K., & Sharma, P. C. (2023). Current trends in solid tannery waste management. *Critical Reviews in Biotechnology*, 43(5), 805–822. <https://doi.org/10.1080/07388551.2022.2068996>

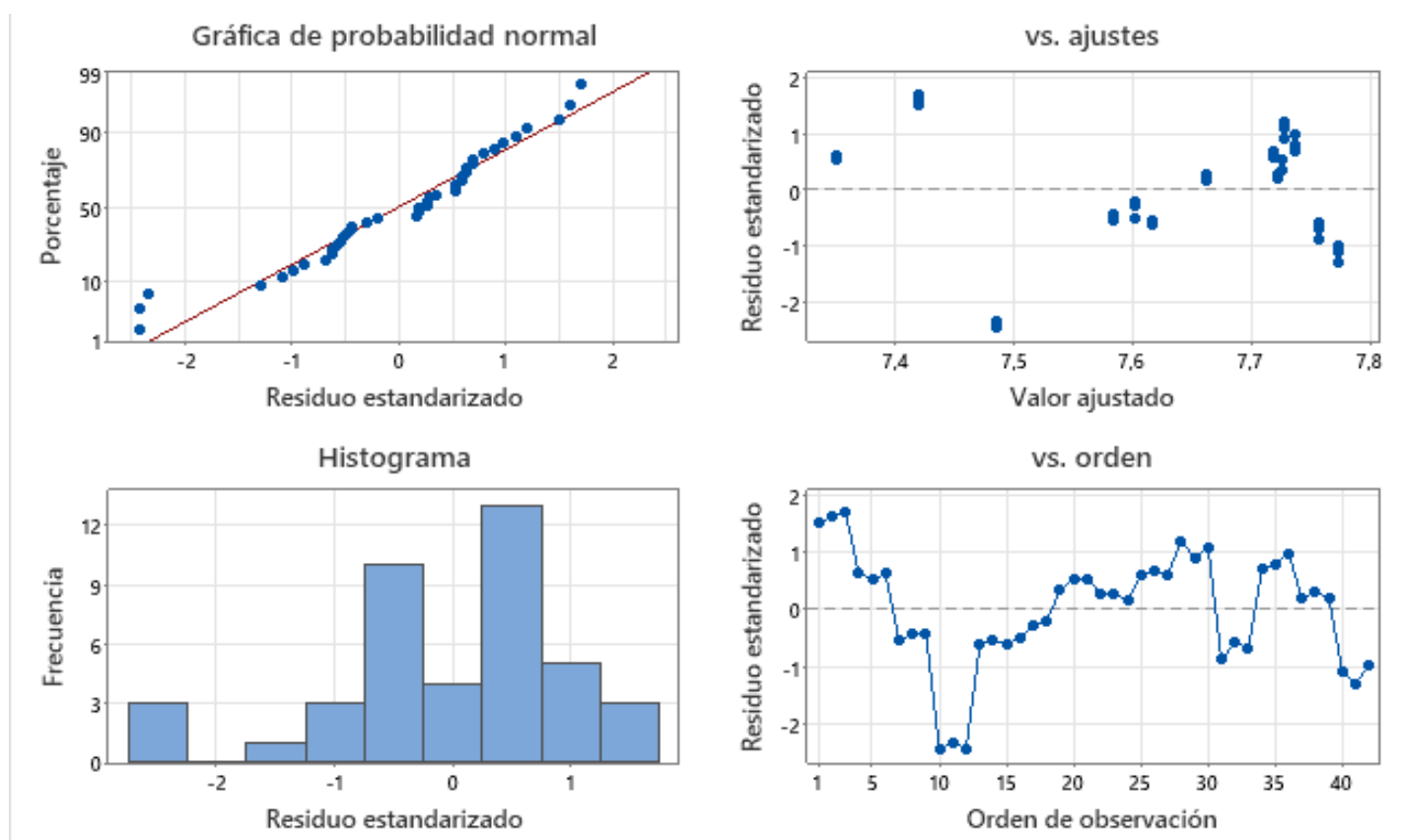
- Vidaurre-Arbizu, M., Pérez-Bou, S., Zuazua-Ros, A., & Martín-Gómez, C. (2021). From the leather industry to building sector: Exploration of potential applications of discarded solid wastes. *Journal of Cleaner Production*, 291, 125960. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.125960>
- Yang, L., Shi, X., Tian, X., Xue, Y., Wang, J., & Qi, L. (2022). Influence of pH value on the microstructure and corrosion behavior of carbon fiber reinforced magnesium matrix composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 17, 412–424. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2022.01.031>

ANEXOS

Anexo 1. Tabla de resultados de pH obtenidos por diseño simplex lattice en mezclas de Wet blue, PVA y Glicerol

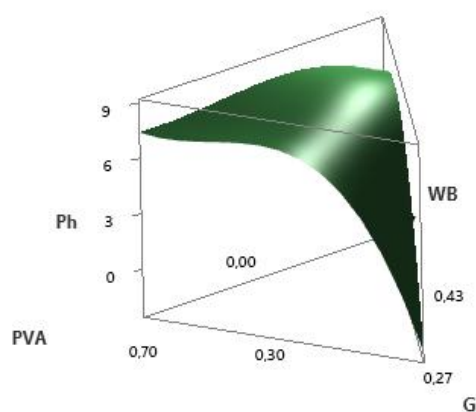
Coeficientes de regresión estimados para pH (pseudocomponentes)						
Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV	
WB	7,71	0,127	*	*	11,18	
PVA	7,3508	0,0551	*	*	3,04	
G	8,319	0,769	*	*	105,07	
WB*PVA	0,817	0,316	2,58	0,014	6,33	
WB*G	-0,76	1,28	-0,6	0,554	56,24	
PVA*G	-0,95	1,13	-0,84	0,409	37,56	
Resumen del modelo						
S (pred)	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	PRESS	R-cuadrado		
0,10947	61,54%	56,20%	0,572485	48,97%		
Ecuación de regresión cuadrática						
pH=0.04909(WB)+0.050357(PVA)+0.20711(G)+0.001121(WB×PVA)−0.001047(WB×G)−0.001299(PVA×G)						
Análisis de varianza para pH (pseudocomponentes)						
Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	5	0,6904	0,690399	0,13808	11,52	0
Lineal	2	0,58333	0,095597	0,047799	3,99	0,027
Cuadrático	3	0,10707	0,107073	0,035691	2,98	0,044
WB*PVA	1	0,09745	0,079938	0,079938	6,67	0,014
WB*G	1	0,00125	0,004278	0,004278	0,36	0,554
PVA*G	1	0,00838	0,008377	0,008377	0,7	0,409
Error residual	36	0,43141	0,431413	0,011984		
Falta de ajuste	8	0,42815	0,428146	0,053518	458,73	0
Error puro	28	0,00327	0,003267	0,000117		
Total	41	1,12181				
Coeficientes de regresión estimados para pH (cantidades del componente)						
Término	Coef					
WB	0,04909					
PVA	0,050					
G	0,207					
WB*PVA	0,001					
WB*G	-0,001					
PVA*G	-0,001299					

Anexo 2. Gráficas de diagnóstico de residuos para el modelo de regresión cuadrática del pH en mezclas

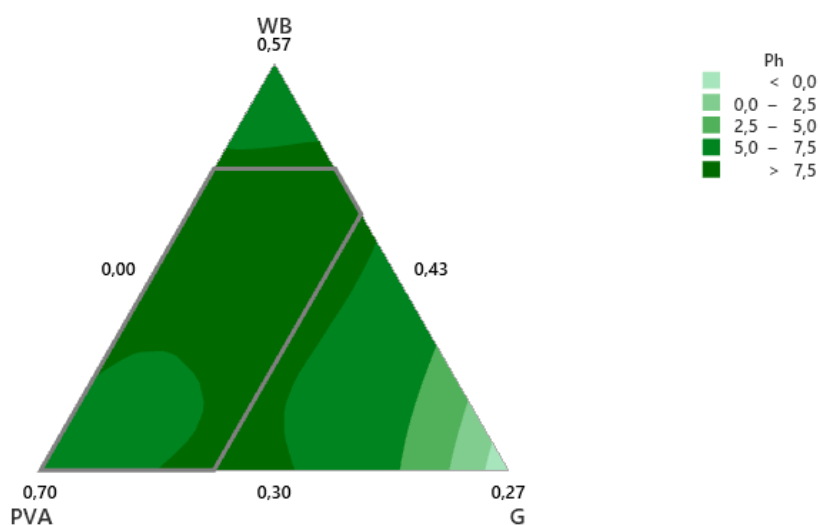


Anexo 3. Gráficas de superficie y contorno de respuesta para el pH en mezclas obtenidas mediante diseño simplex lattice

Gráfica de superficie de mezcla de Ph
(proporciones de los componentes)



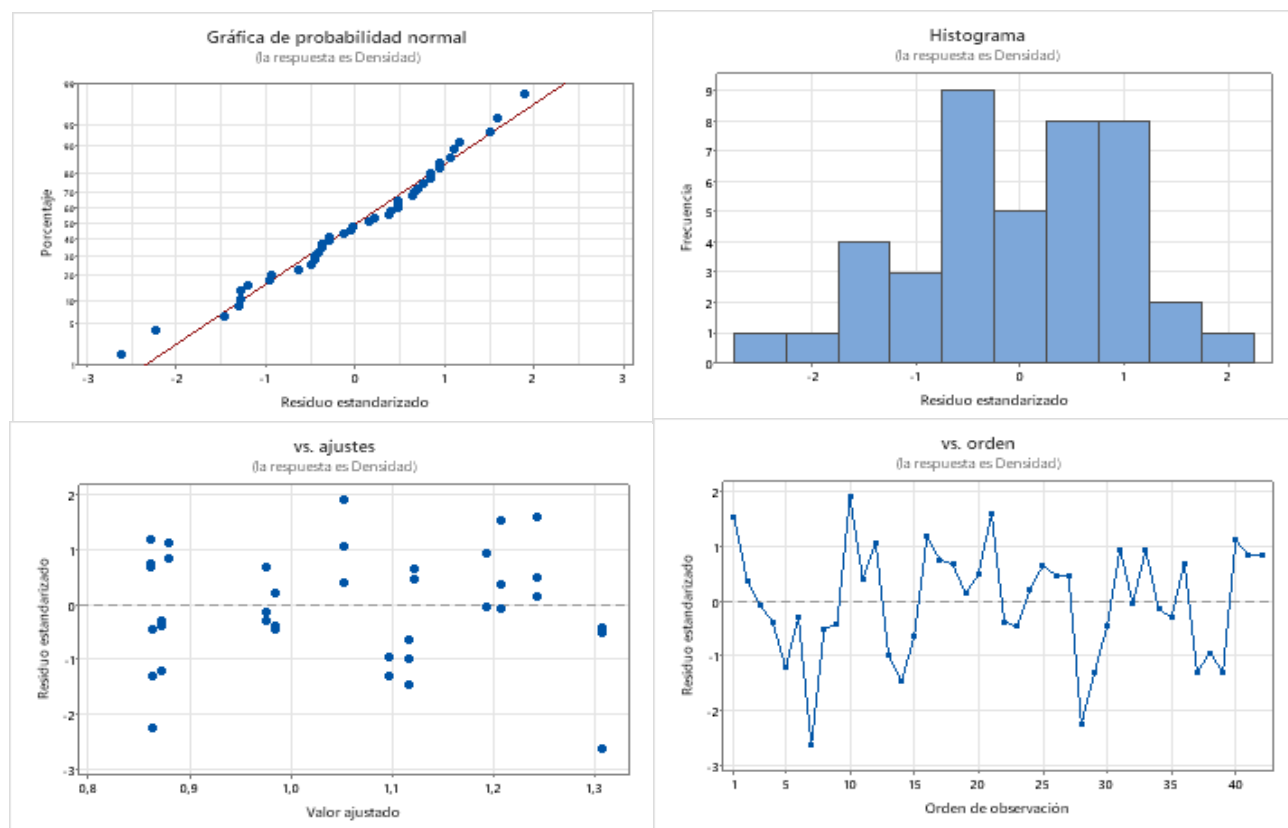
Gráfica de contorno de mezcla para Ph
(proporciones de los componentes)



Anexo 4. Tabla de resultados de densidad obtenidos por diseño simplex lattice en mezclas de Wet blue, PVA y Glicerol

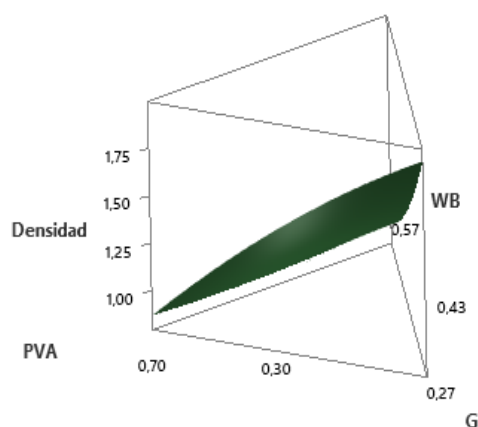
Coeficientes de regresión estimados para Densidad (pseudocomponentes)						
Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV	
WB	0,907	0,145	*	*	11,18	
PVA	0,8714	0,0633	*	*	3,04	
G	1,932	0,883	*	*	105,07	
WB*PVA	-0,1	0,363	-0,28	0,784	6,33	
WB*G	-0,4	1,47	-0,27	0,787	56,24	
PVA*G	0,31	1,3	0,24	0,811	37,56	
Resumen del modelo						
S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	PRESS	R-cuadrado		
0,125654	61,36%	55,99%	0,78573	46,59%		
Ecuación de regresión cuadrática						
Densidad=0,0137776·WB+0,0106685·PVA+0,0437408·G–0,0001375·(WB×PVA)–0,0005476·(WB×G)+0,0004307·(PVA×G)						
Análisis de varianza para Densidad (pseudocomponentes)						
Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	5	0,90265	0,902646	0,180529	11,43	0
Lineal	2	0,88162	0,023133	0,011567	0,73	0,488
Cuadrático	3	0,02102	0,021025	0,007008	0,44	0,723
WB*PVA	1	0,002	0,001203	0,001203	0,08	0,784
WB*G	1	0,0181	0,001169	0,001169	0,07	0,787
PVA*G	1	0,00092	0,000921	0,000921	0,06	
Error residual	36	0,5684	0,568402	0,015789		
Falta de ajuste	8	0,42167	0,421669	0,052709	10,06	0
Error puro	28	0,14673	0,146733	0,00524		
Total	41	1,47105				
Coeficientes de regresión estimados para Densidad (cantidades del componente)						
Término	Coef					
WB	0,014					
PVA	0,0106685					
G	0,0437408					
WB*PVA	-0,0001375					
WB*G	-0,0005476					
PVA*G	0.0004307					

Anexo 5. Gráficas de diagnóstico de residuos para el modelo de regresión cuadrática de densidad en mezclas

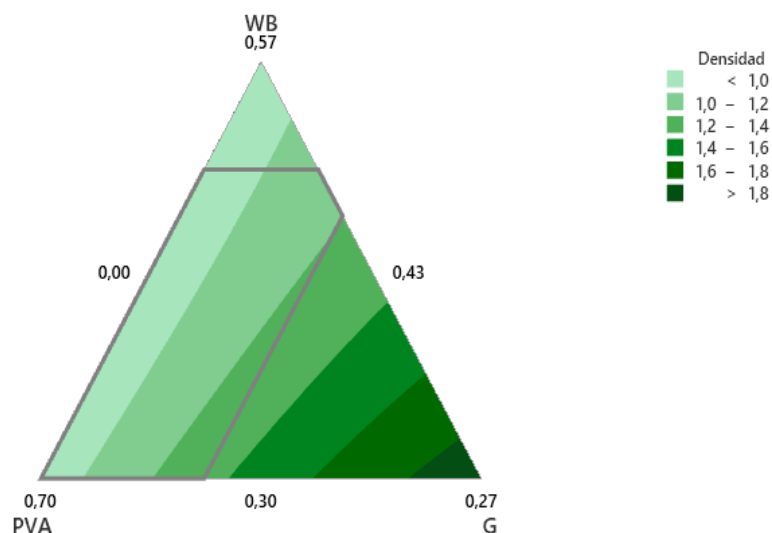


Anexo 6. Gráficas de superficie y contorno de respuesta para la densidad en mezclas obtenidas mediante diseño simplex lattice

Gráfica de superficie de mezcla de Densidad
(proporciones de los componentes)



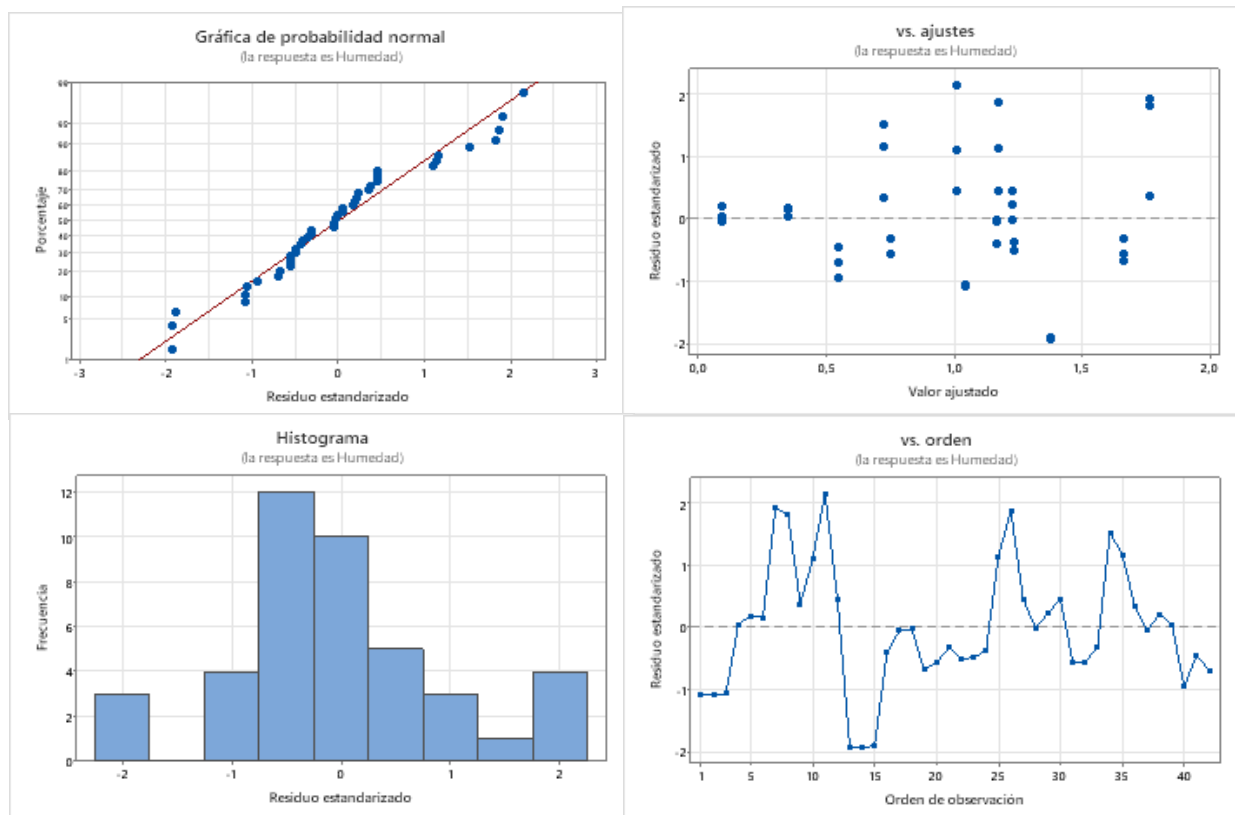
Gráfica de contorno de mezcla para Densidad
(proporciones de los componentes)



Anexo 7. Tabla de resultados de humedad obtenidos por diseño simplex lattice en mezclas de Wet blue, PVA y Glicerol

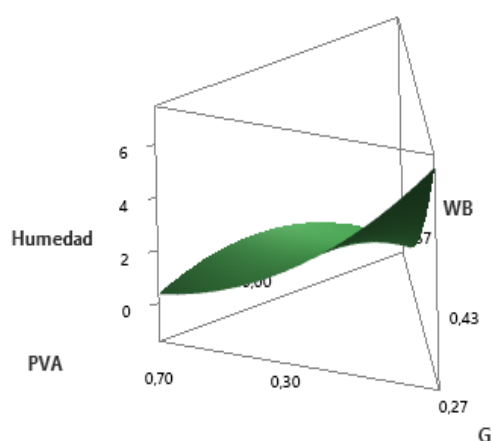
Coeficientes de regresión estimados para Humedad (pseudocomponentes)						
Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV	
WB	-0,945	0,597	*	*	11,18	
PVA	0,353	0,26	*	*	3,04	
G	6,97	3,63	*	*	105,07	
WB*PVA	6	1,49	4,02	0	6,33	
WB*G	-5,3	6,03	-0,88	0,386	56,24	
PVA*G	-5,33	5,35	-1	0,325	37,56	
Resumen del modelo						
S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	PRESS	R-cuadrado		
0,516699	47,64%	40,37%	12,4085	32,41%		
Ecuación de regresión cuadrática						
$\text{Humedad} = -0.278 \cdot \text{WB} - 0.123 \cdot \text{PVA} + 0.902 \cdot \text{G} + 0.00824 \cdot (\text{WB} \times \text{PVA}) - 0.00726 \cdot (\text{WB} \times \text{G}) - 0.00732 \cdot (\text{PVA} \times \text{G})$						
Análisis de varianza para Humedad (pseudocomponentes)						
Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	5	8,7464	8,7464	1,74928	6,55	0
Lineal	2	2,4627	2,3745	1,18727	4,45	0,019
Cuadrático	3	6,2837	6,2837	2,09456	7,85	0
WB*PVA	1	6,0178	4,3183	4,3183	16,17	0
WB*G	1	0,0001	0,2057	0,20573	0,77	0,386
PVA*G	1	0,2657	0,2657	0,26572	1	0,325
Error residual	36	9,6112	9,6112	0,26698		
Falta de ajuste	8	8,3944	8,3944	1,04931	24,15	0
Error puro	28	1,2168	1,2168	0,04346		
Total	41	18,3576				
Coeficientes de regresión estimados para Humedad (cantidades del componente)						
Término	Coef					
WB	-0,27802					
PVA	-0,123					
G	0,902					
WB*PVA	0,008					
WB*G	-0,007					
PVA*G	-0,007316					

Anexo 8. Gráficas de diagnóstico de residuos para el modelo de regresión cuadrática de humedad en mezclas

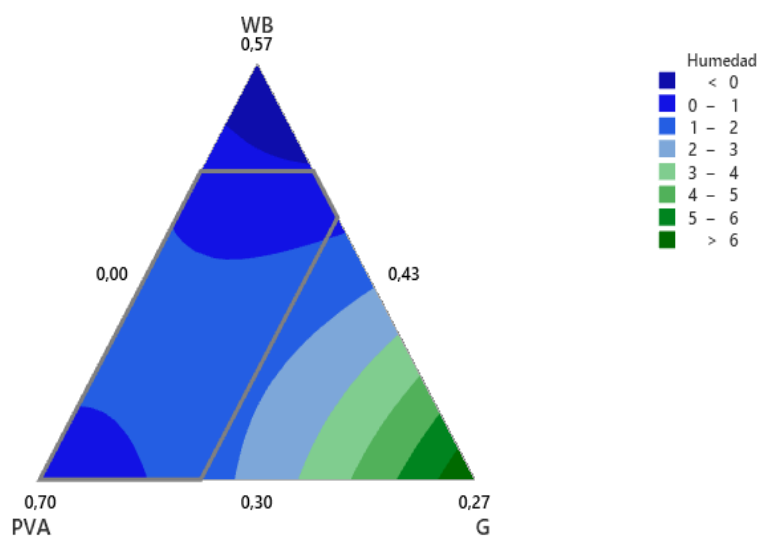


Anexo 9. Gráficas de superficie y contorno de respuesta para la humedad en mezclas obtenidas mediante diseño simplex lattice

Gráfica de superficie de mezcla de Humedad
(proporciones de los componentes)



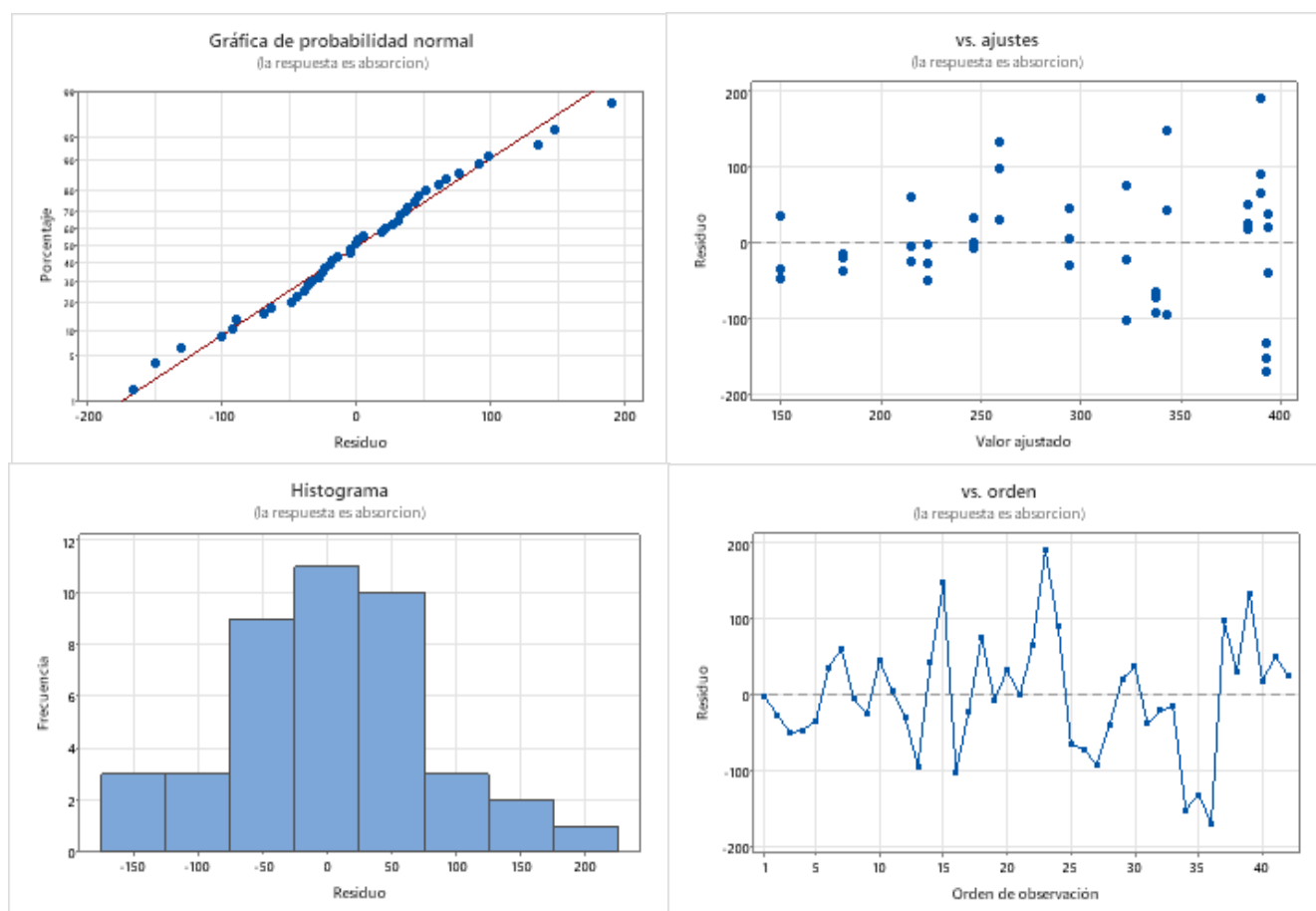
Gráfica de contorno de mezcla para Humedad
(proporciones de los componentes)



Anexo 10. Tabla de resultados de absorción de agua obtenidos por diseño simplex lattice en mezclas de Wet blue, PVA y Glicerol

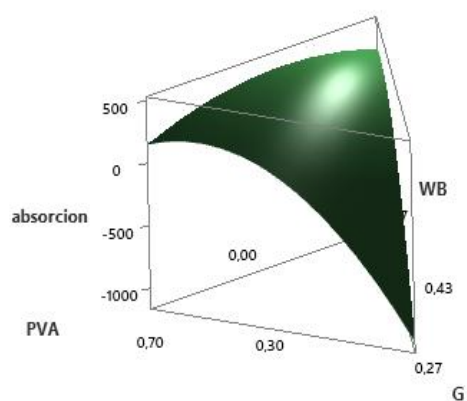
Coeficientes de regresión estimados para absorción (pseudocomponentes)						
Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV	
WB	276,2	93,6	*	*	11,18	
PVA	149,9	40,8	*	*	3,04	
G	-1074	569	*	*	105,07	
WB*PVA	731	234	3,13	0,004	6,33	
WB*G	1735	945	1,84	0,075	56,24	
PVA*G	2033	838	2,43	0,02	37,56	
Resumen del modelo						
S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	PRESS	R-cuadrado		
80,9457	53,48%	47,02%	298877	41,05%		
Ecuación de regresión cuadrática						
Absorción de agua=276.2·WB+149.9·PVA+(-1074)·G+731·(WB×PVA)+1735·(WB×G)+2033·(PVA×G)						
Análisis de varianza para absorción (pseudocomponentes)						
Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	5	271135	271135	54227	8,28	0
Lineal	2	114952	47825	23912	3,65	0,036
Cuadrático	3	156183	156183	52061	7,95	0
WB*PVA	1	114196	63991	63991	9,77	0,004
WB*G	1	3369	22079	22079	3,37	0,075
PVA*G	1	38619	38619	38619	5,89	0,02
Error residual	36	235879	235879	6552		
Falta de ajuste	8	159238	159238	19905	7,27	0
Error puro	28	76642	76642	2737		
Total	41	507014				
Coeficientes de regresión estimados para absorción (cantidades del componente)						
Término	Coef					
WB	-25,402					
PVA	-17,048					
G	-223,637					
WB*PVA	1,003					
WB*G	2,38					
PVA*G	2,789					

Anexo 11. Gráficas de diagnóstico de residuos para el modelo de regresión cuadrática del absorción de agua en mezclas

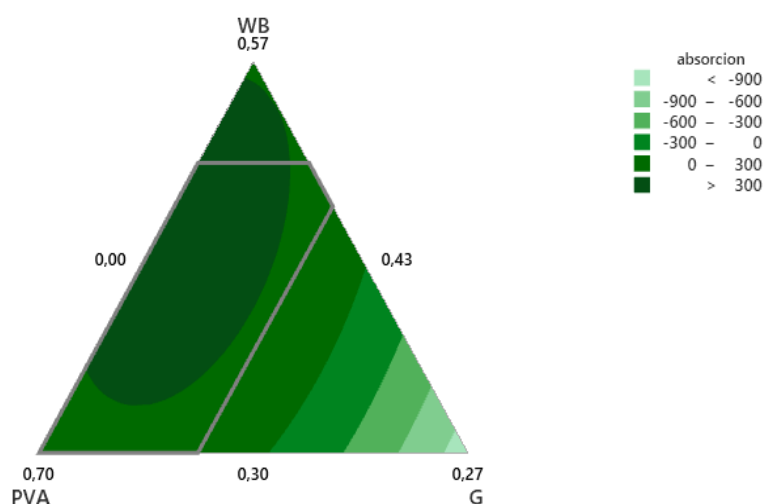


Anexo 12. Gráficas de superficie y contorno de respuesta para la absorción de agua en mezclas obtenidas mediante diseño simplex lattice

Gráfica de superficie de mezcla de absorcion
(proporciones de los componentes)



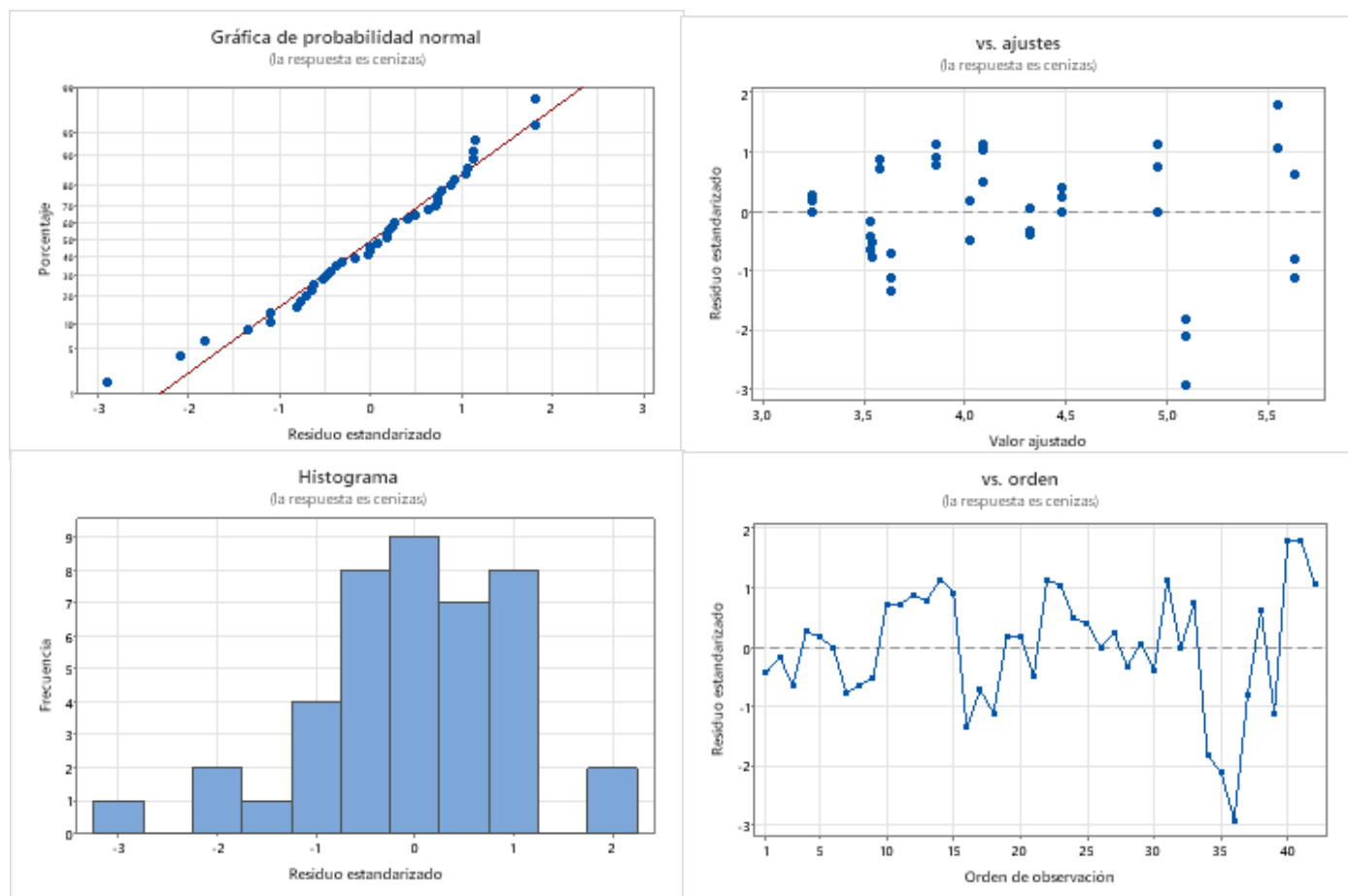
Gráfica de contorno de mezcla para absorcion
(proporciones de los componentes)



Anexo 13. Tabla de resultados de cenizas obtenidos por diseño simplex lattice en mezclas de Wet blue, PVA y Glicerol

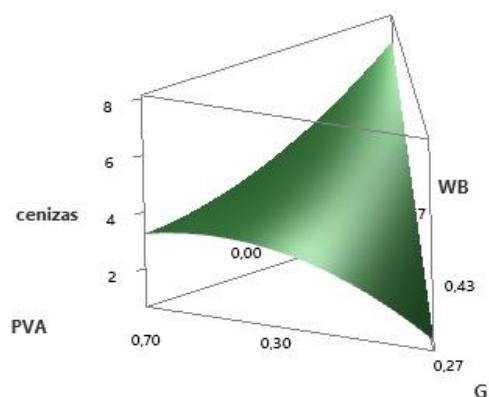
Coeficientes de regresión estimados para cenizas (pseudocomponentes)						
Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV	
WB	7,212	0,507	*	*	11,18	
PVA	3,246	0,221	*	*	3,04	
G	1,05	3,08	*	*	105,07	
WB*PVA	-3,34	1,27	-2,64	0,012	6,33	
WB*G	0,09	5,12	0,02	0,987	56,24	
PVA*G	4,48	4,54	0,99	0,33	37,56	
Resumen del modelo						
S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	PRESS	R-cuadrado		
0,438452	77,41%	74,27%	9,21917	69,91%		
Ecuación de regresión cuadrática						
Cenizas=0,273·WB+0,067·PVA−0,420·G−0,00459·(WB×PVA)+0,000117·(WB×G)+0,00614·(PVA×G)						
Análisis de varianza para cenizas (pseudocomponentes)						
Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	5	23,7135	23,7135	4,7427	24,67	0
Lineal	2	22,1293	11,171	5,5855	29,05	0
Cuadrático	3	1,5842	1,5842	0,52806	2,75	0,057
WB*PVA	1	0,7074	1,3398	1,33981	6,97	0,012
WB*G	1	0,6897	0,0001	0,00005	0	0,987
PVA*G	1	0,1871	0,1871	0,18707	0,97	0,33
Error residual	36	6,9206	6,9206	0,19224		
Falta de ajuste	8	6,167	6,167	0,77088	28,64	0
Error puro	28	0,7536	0,7536	0,02691		
Total	41	30,6341				
Coeficientes de regresión estimados para cenizas (cantidades del componente)						
Término	Coef					
WB	0,273					
PVA	0,066838					
G	-0,419759					
WB*PVA	-0,004587					
WB*G	0,000117					
PVA*G	0,006139					

Anexo 14. Gráficas de diagnóstico de residuos para el modelo de regresión cuadrática del cenizas en mezclas

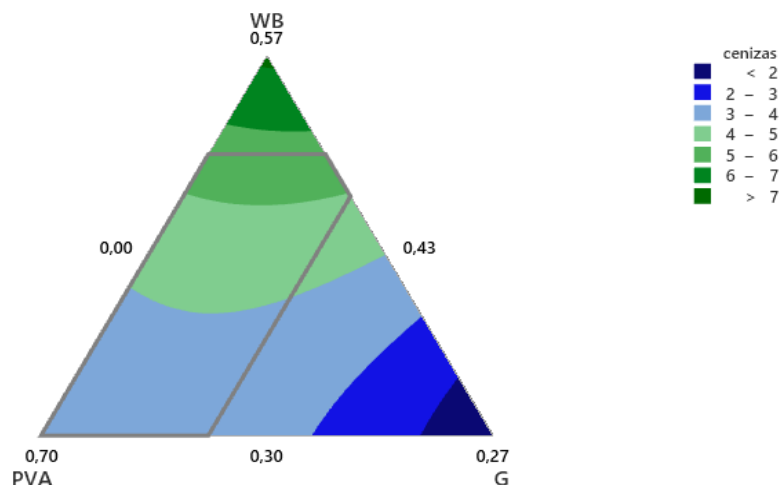


Anexo 15. Gráficas de superficie y contorno de respuesta para cenizas en mezclas obtenidas mediante diseño simplex lattice

Gráfica de superficie de mezcla de cenizas
(proporciones de los componentes)



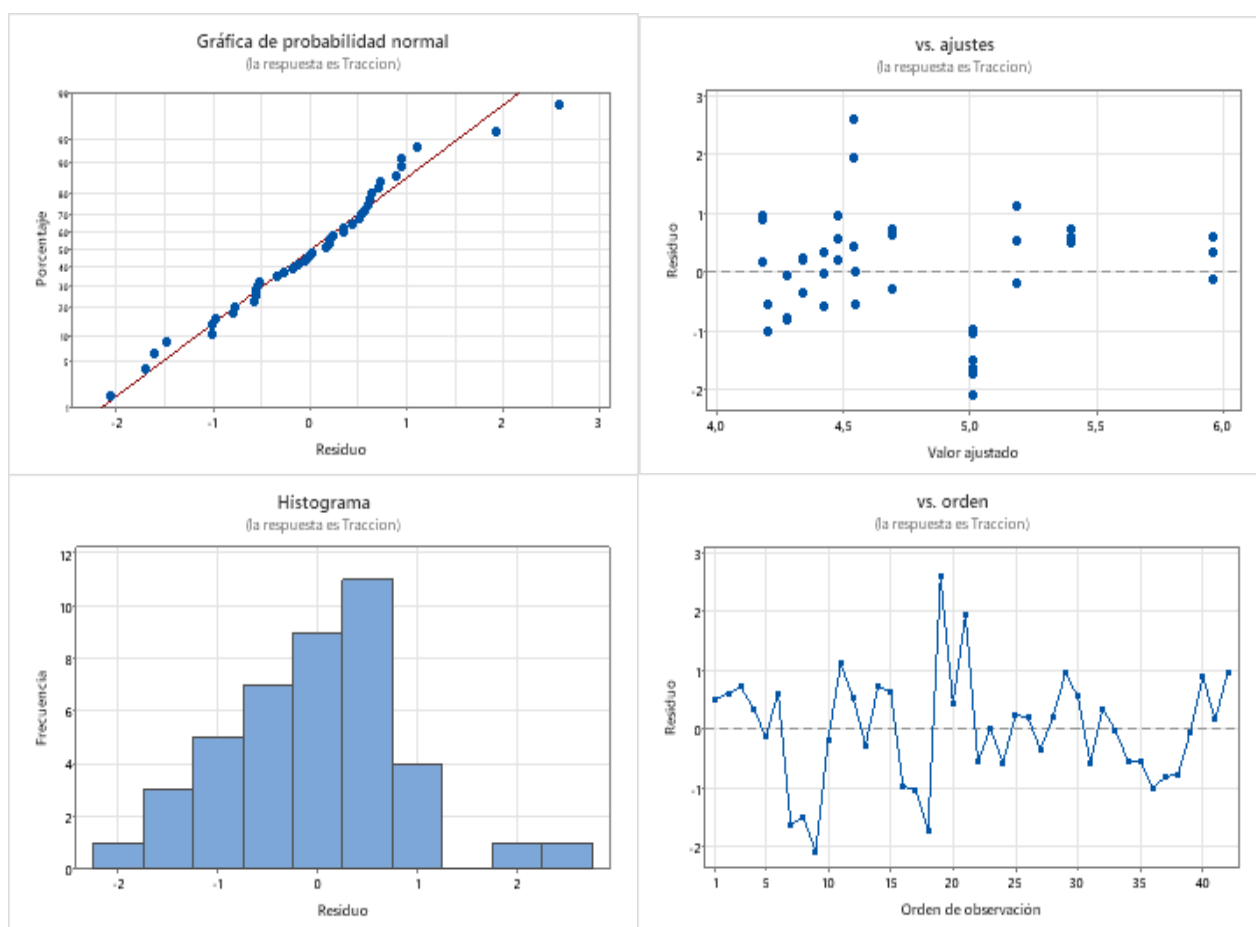
Gráfica de contorno de mezcla para cenizas
(proporciones de los componentes)



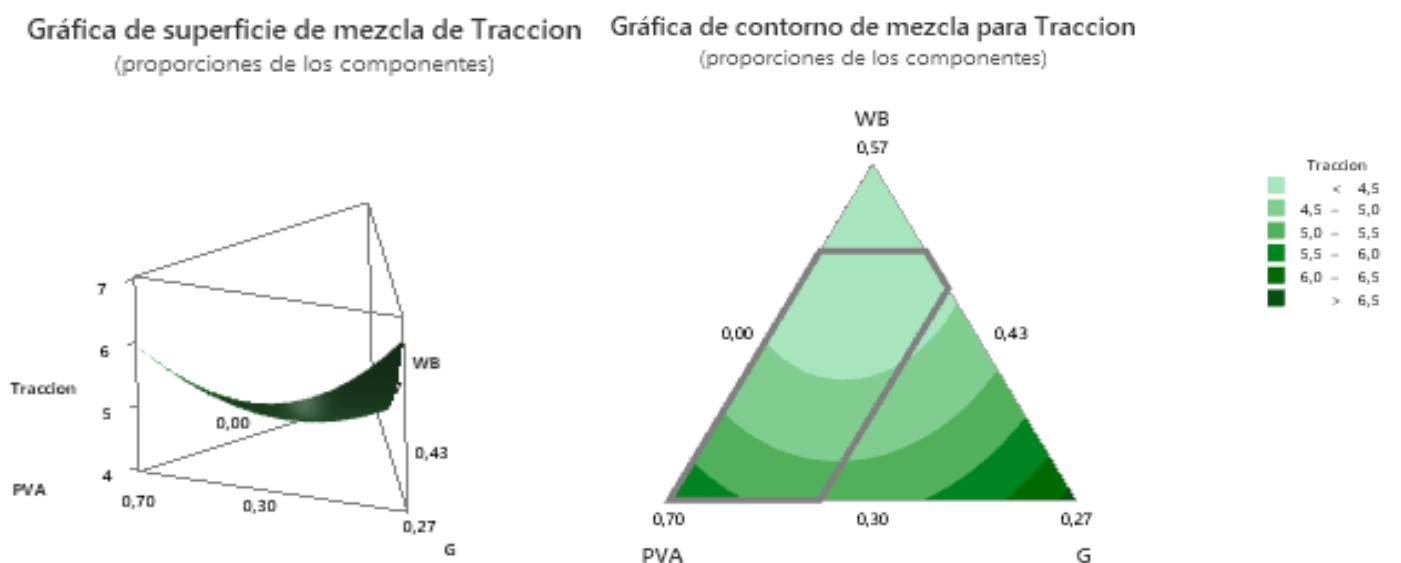
Anexo 16. Tabla de resultados de resistencia a la tracción obtenidos por tracción simplex lattice en mezclas de Wet blue, PVA y Glicerol

Coeficientes de regresión estimados para Tracción (pseudocomponentes)						
Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV	
WB	4,24	1,15	*	*	11,18	
PVA	5,959	0,503	*	*	3,04	
G	6,69	7,01	*	*	105,07	
WB*PVA	-2,61	2,88	-0,91	0,371	6,33	
WB*G	-3,1	11,7	-0,27	0,791	56,24	
PVA*G	-3,9	10,3	-0,38	0,708	37,56	
Resumen del modelo						
S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	PRESS	R-cuadrado		
0,998027	22,53%	11,77%	49,7411	0,00%		
Ecuación de regresión cuadrática						
Tracción=0.123·WB+0.140·PVA+0.418·G-0.00358·(WB×PVA)-0.00427·(WB×G)-0.00536·(PVA×G)						
Análisis de varianza para Tracción (pseudocomponentes)						
Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	5	10,4275	10,4275	2,0855	2,09	0,089
Lineal	2,000	8,8903	2,074	1,03701	1,04	0,363
Cuadrático	3	1,5372	1,5372	0,5124	0,51	0,675
WB*PVA	1	1,3715	0,8177	0,81769	0,82	0,371
WB*G	1	0,0232	0,0712	0,07118	0,07	0,791
PVA*G	1	0,1425	0,1425	0,14247	0,14	0,708
Error residual	36	35,8581	35,8581	0,99606		
Falta de ajuste	8	29,139	29,139	3,64238	15,18	0
Error puro	28	6,7191	6,7191	0,23997		
Total	41	46,2856				
Coeficientes de regresión estimados para Tracción (cantidades del componente)						
Término	Coef					
WB	0,123					
PVA	0,140					
G	0,418028					
WB*PVA	-0,003584					
WB*G	-0,004273					
PVA*G	-0,005357					

Anexo 17. Gráficas de diagnóstico de residuos para el modelo de regresión cuadrática de resistencia a la tracción en mezclas



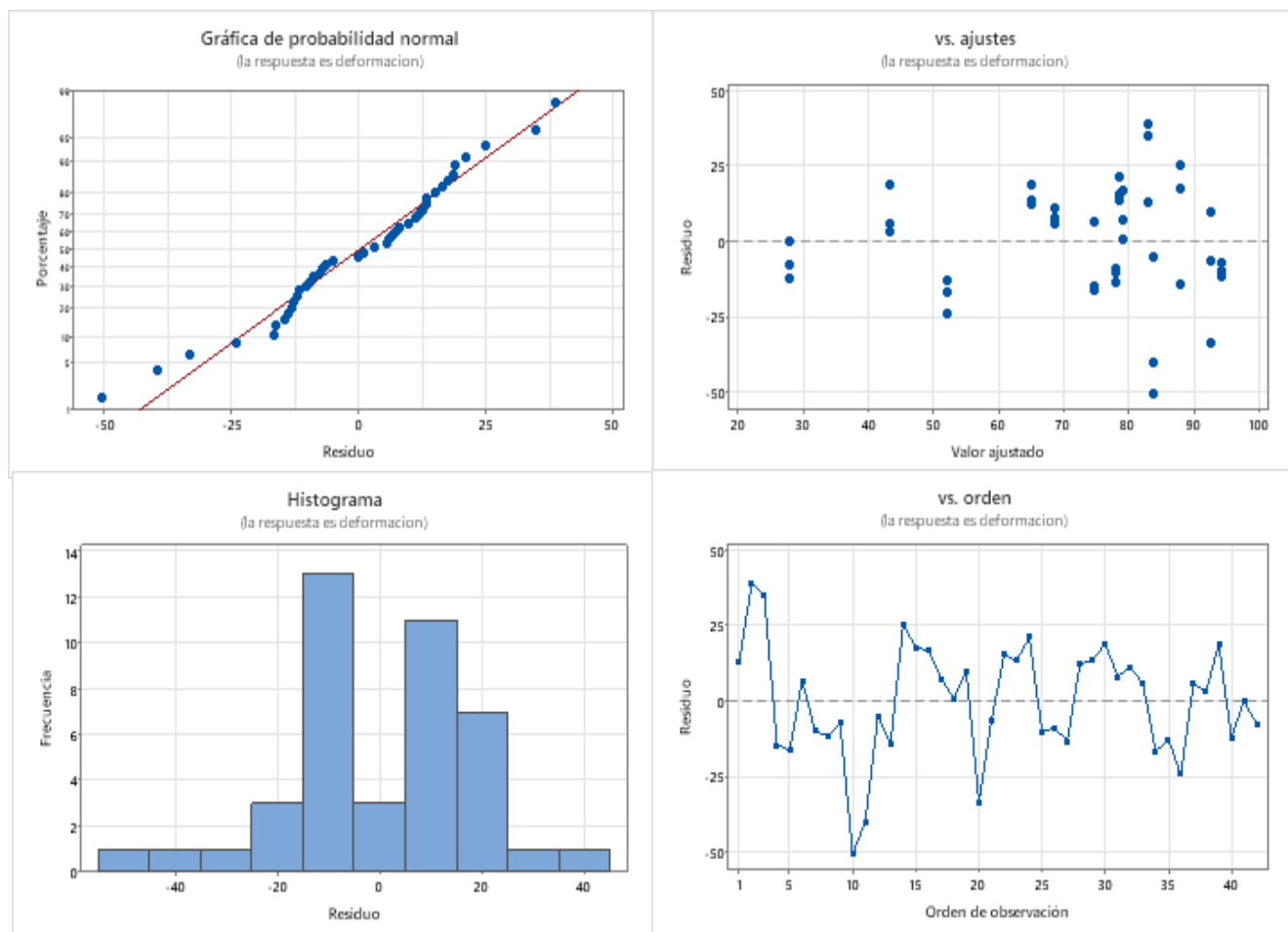
Anexo 18. Gráficas de superficie y contorno de respuesta para la resistencia a la tracción en mezclas obtenidas mediante diseño simplex lattice



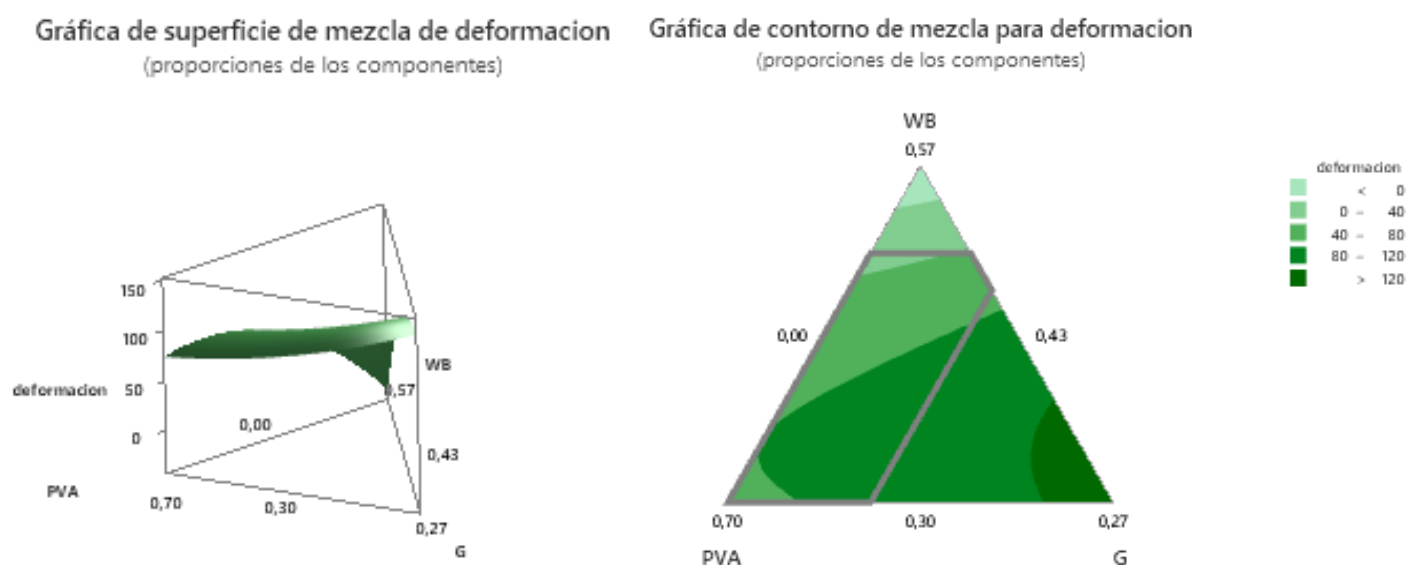
Anexo 19. Tabla de resultados de deformación obtenidos por diseño simplex lattice en mezclas de Wet blue, PVA y Glicerol

Coeficientes de regresión estimados para deformación (pseudocomponentes)						
Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV	
WB	-31,7	23	*	*	11,18	
PVA	74,6	10	*	*	3,04	
G	138	140	*	*	105,07	
WB*PVA	167,1	57,4	2,91	0,006	6,33	
WB*G	162	232	0,7	0,491	56,24	
PVA*G	-42	206	-0,2	0,84	37,56	
Resumen del modelo						
S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	PRESS	R-cuadrado		
(pred)						
19,8707	50,38%	43,49%	18682,7	34,78%		
Ecuación de regresión cuadrática						
Deformación= $-8,91 \cdot WB - 1,99 \cdot PVA + 3,03 \cdot G + 0,23 \cdot (WB \times PVA) + 0,22 \cdot (WB \times G) - 0,06 \cdot (PVA \times G)$						
Análisis de varianza para deformación (pseudocomponentes)						
Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	5	14433	14433	2886,6	7,31	0
Lineal	2	11001,5	8054,3	4027,16	10,2	0
Cuadrático	3,000	3431,600	3431,6	1143,85	2,9	0,048
WB*PVA	1,000	1948,1	3343,3	3343,35	8,47	0,006
WB*G	1	1467,2	191,4	191,43	0,48	0,491
PVA*G	1	16,3	16,3	16,27	0,04	0,84
Error residual	36	14214,4	14214,4	394,84		
Falta de ajuste	8	10082,9	10082,9	1260,36	8,54	0
Error puro	28	4131,5	4131,5	147,55		
Total	41	28647,4				
Coeficientes de regresión estimados para deformación (cantidades del componente)						
Término	Coef					
WB	-8,908					
PVA	-1,991					
G	3,028					
WB*PVA	0,229					
WB*G	0,22158					
PVA*G	-0,05726					

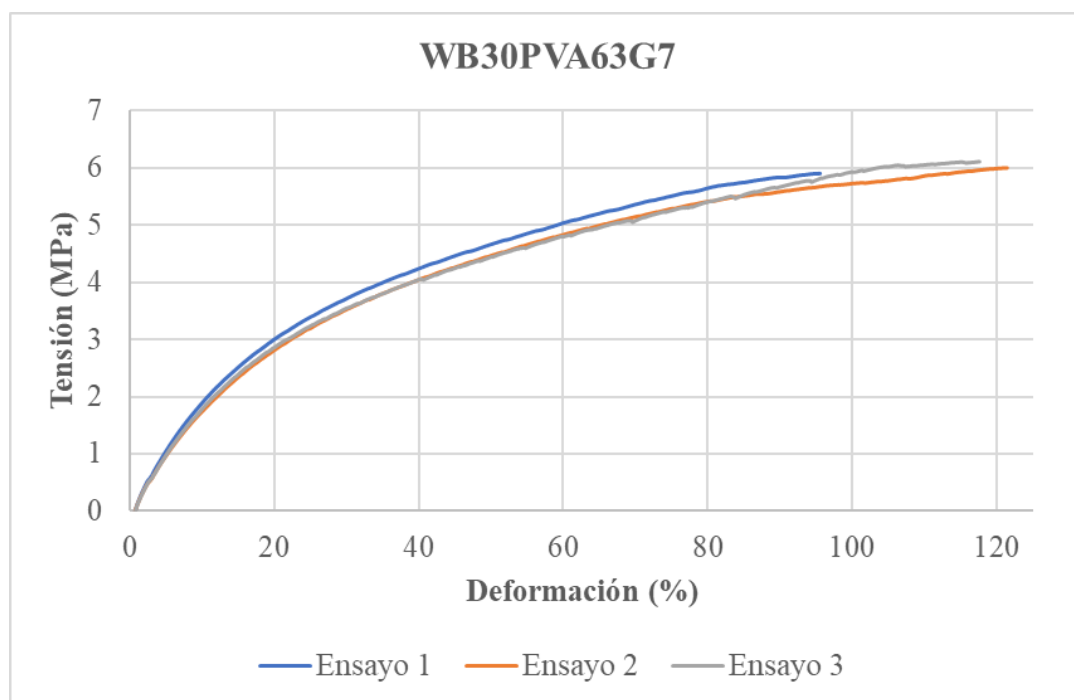
Anexo 20. Gráficas de diagnóstico de residuos para el modelo de regresión cuadrática de deformación en mezclas



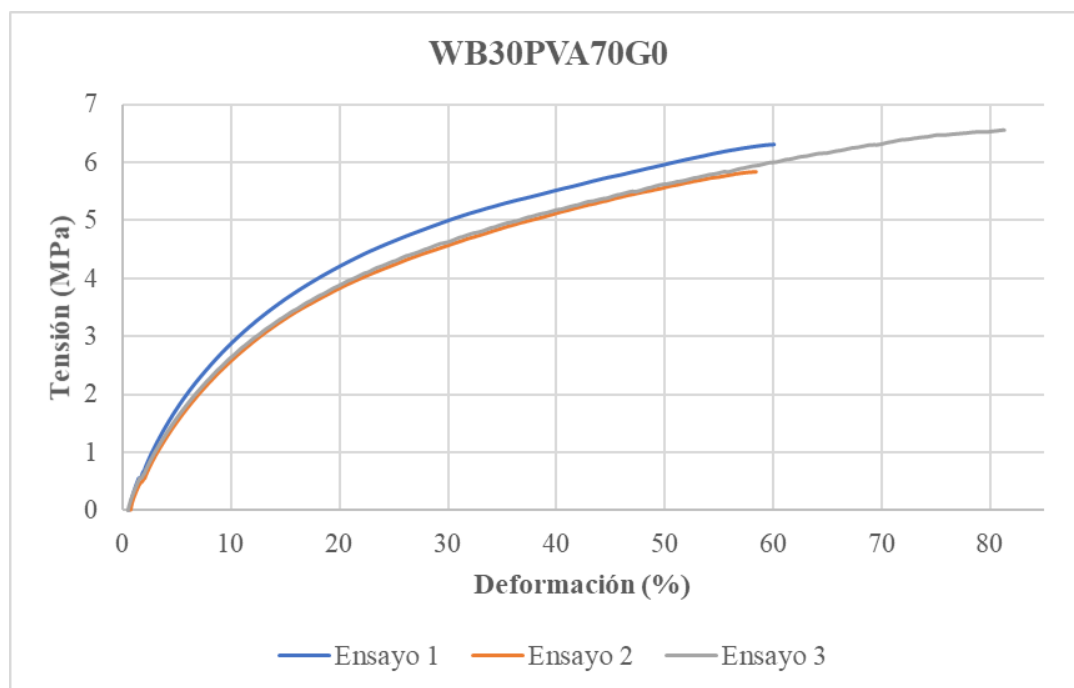
Anexo 21. Gráficas de superficie y contorno de respuesta para la deformación en mezclas obtenidas mediante diseño simplex lattice



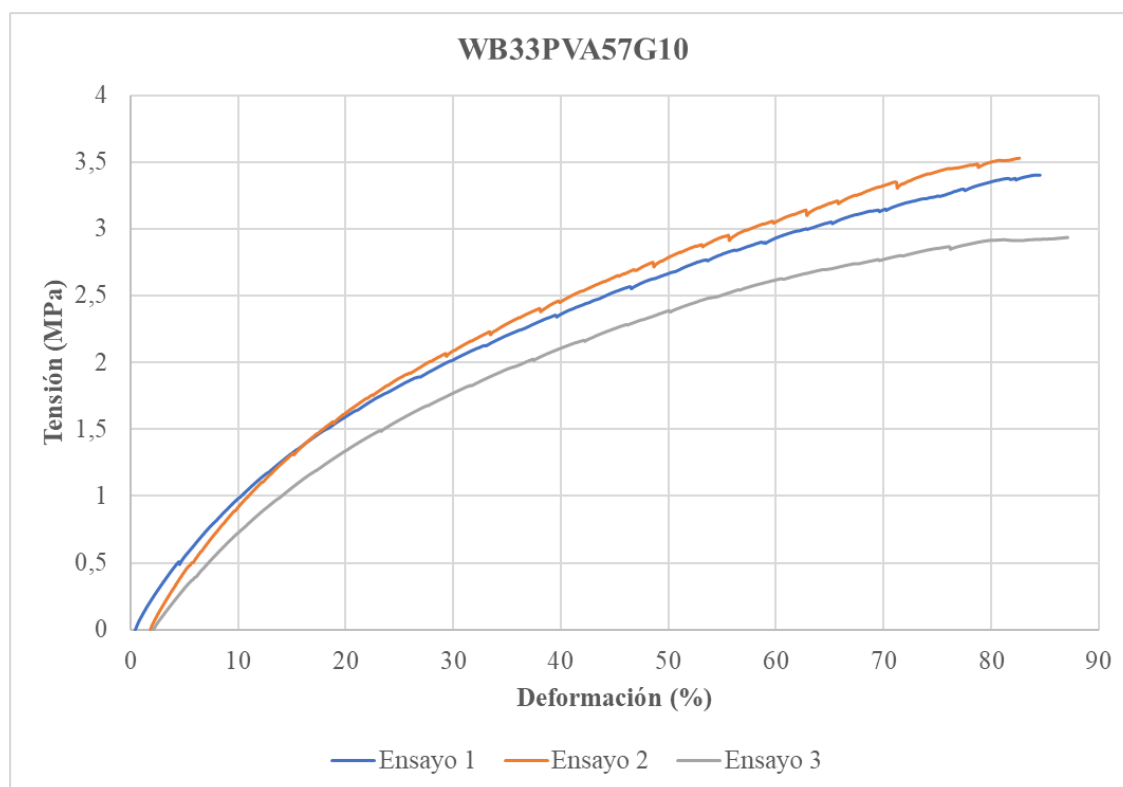
Anexo 22. Ensayo de resistencia a la tracción de WB30PVA63G7



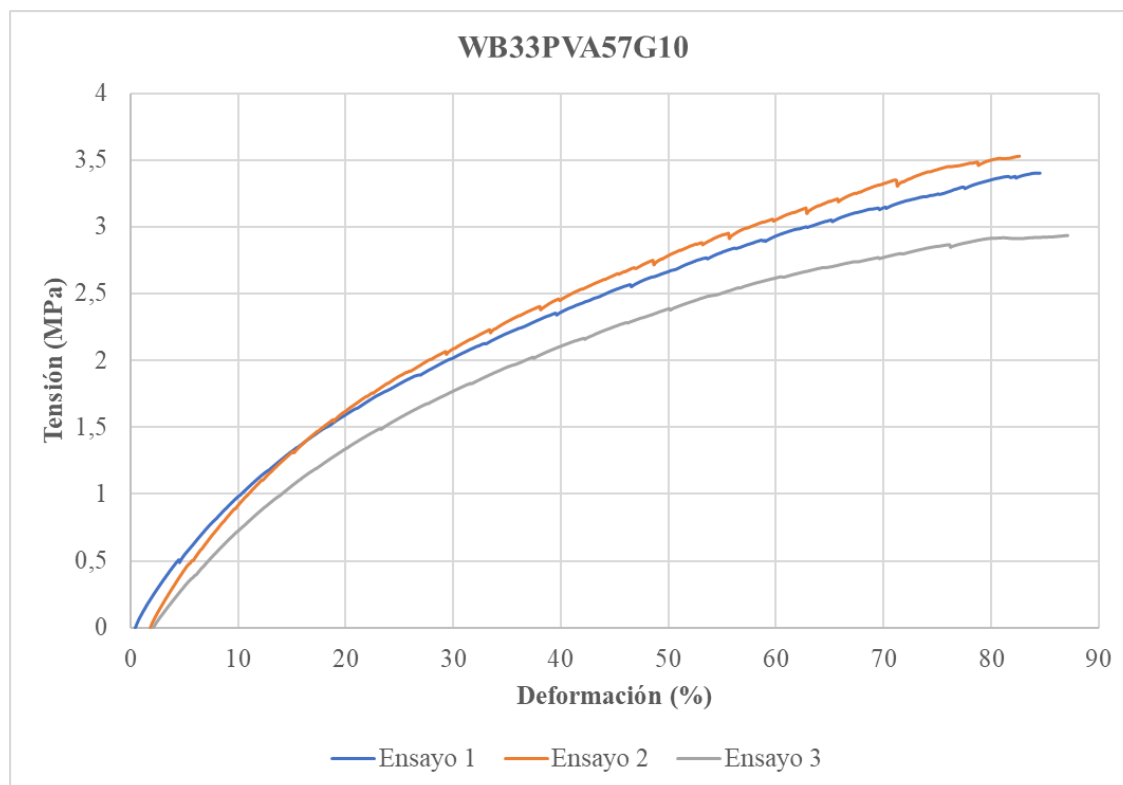
Anexo 23. Ensayo de resistencia a la tracción de WB30PVA70G0



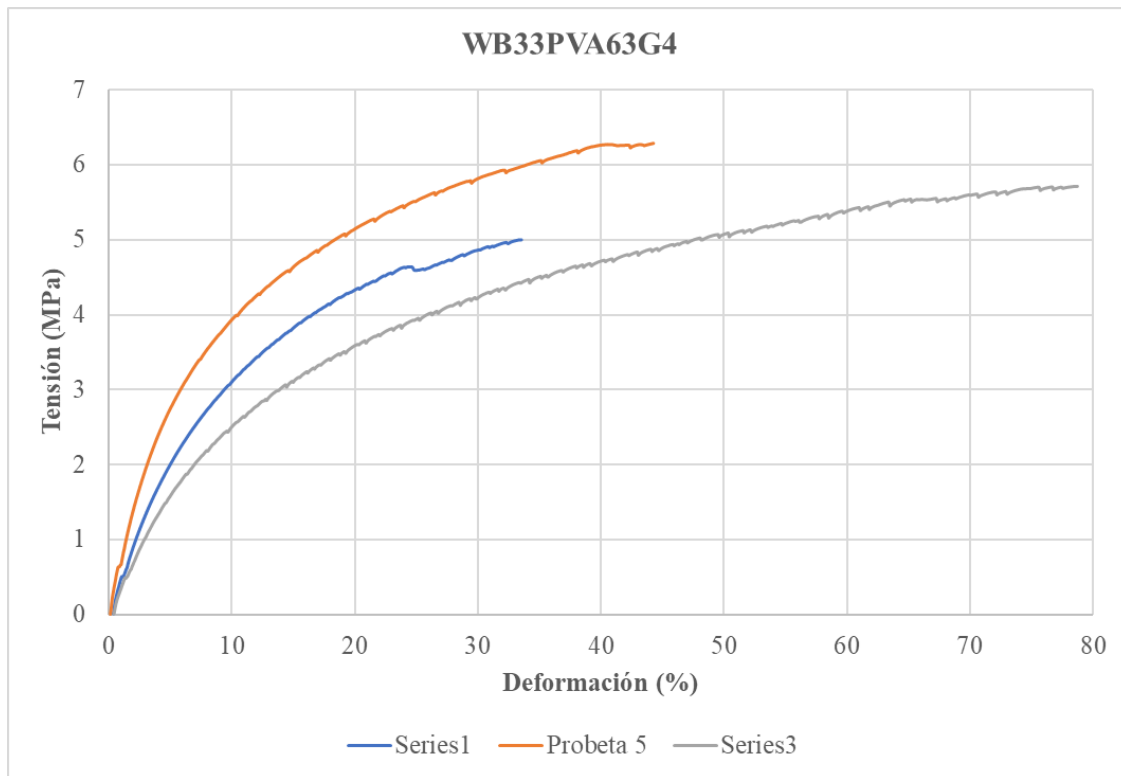
Anexo 24. Ensayo de resistencia a la tracción de WB33PVA57G10



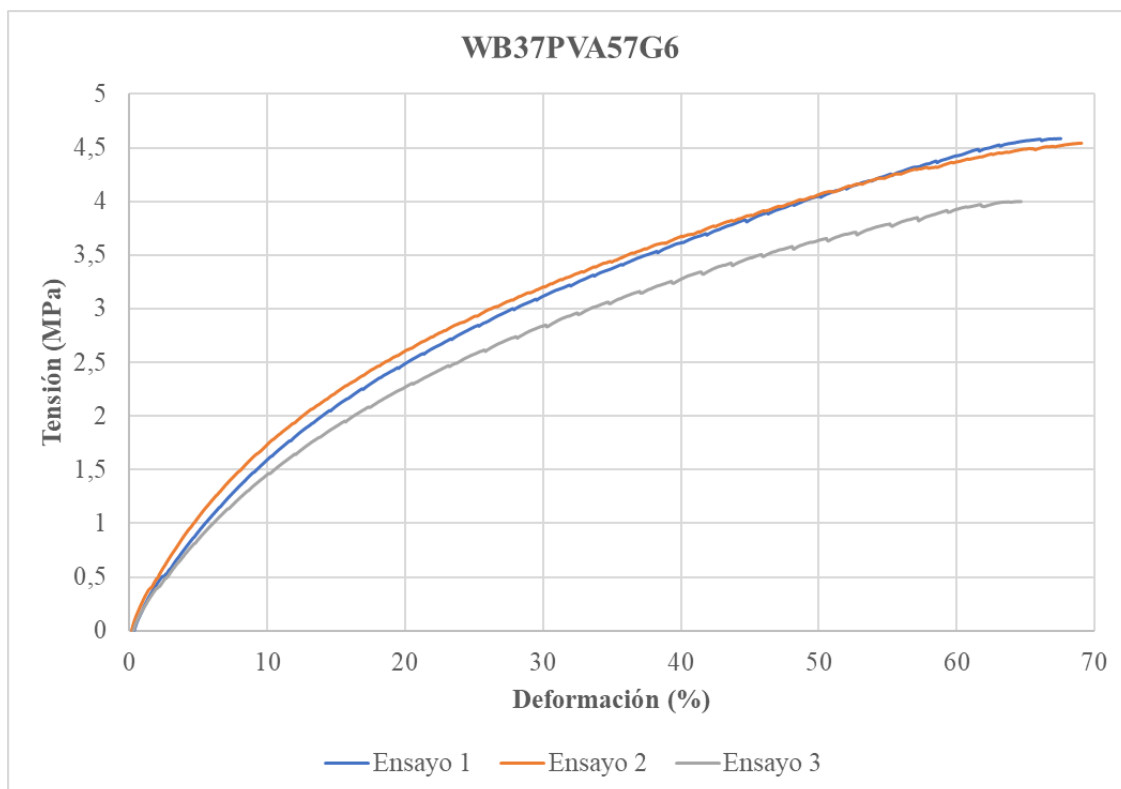
Anexo 25. Ensayo de resistencia a la tracción de WB33PVA57G10



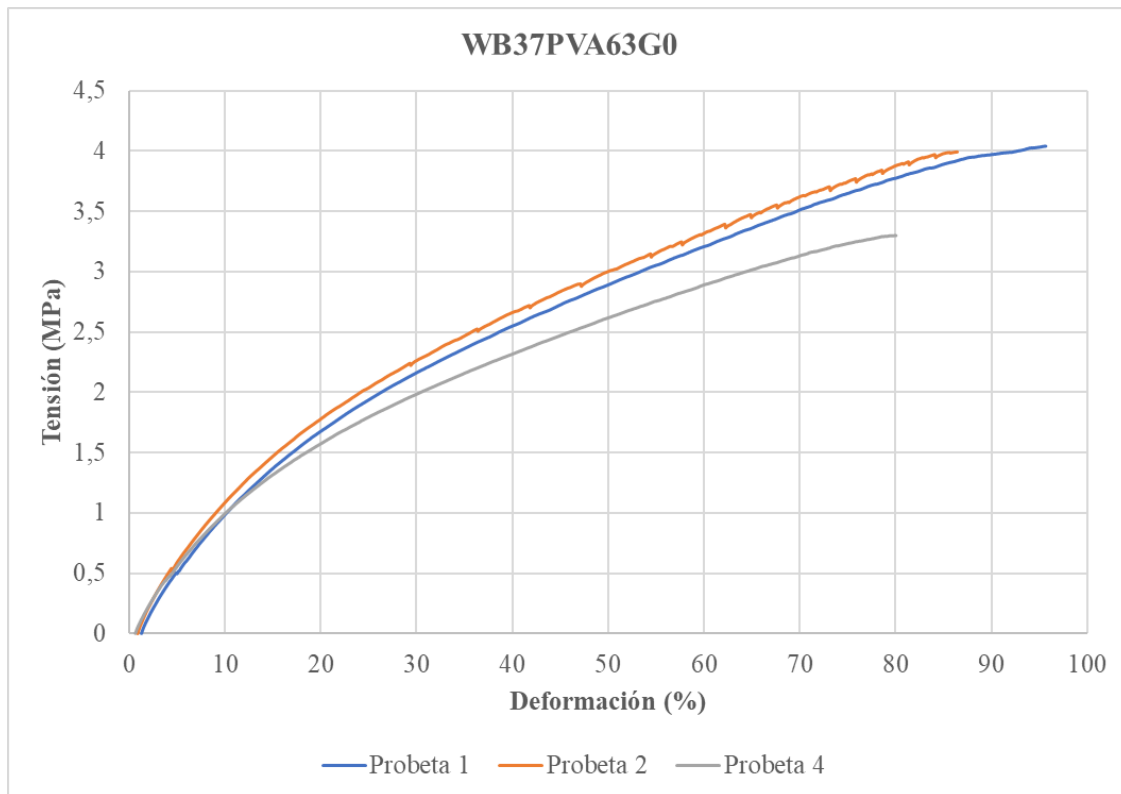
Anexo 26. Ensayo de resistencia a la tracción de WB33PVA63G4



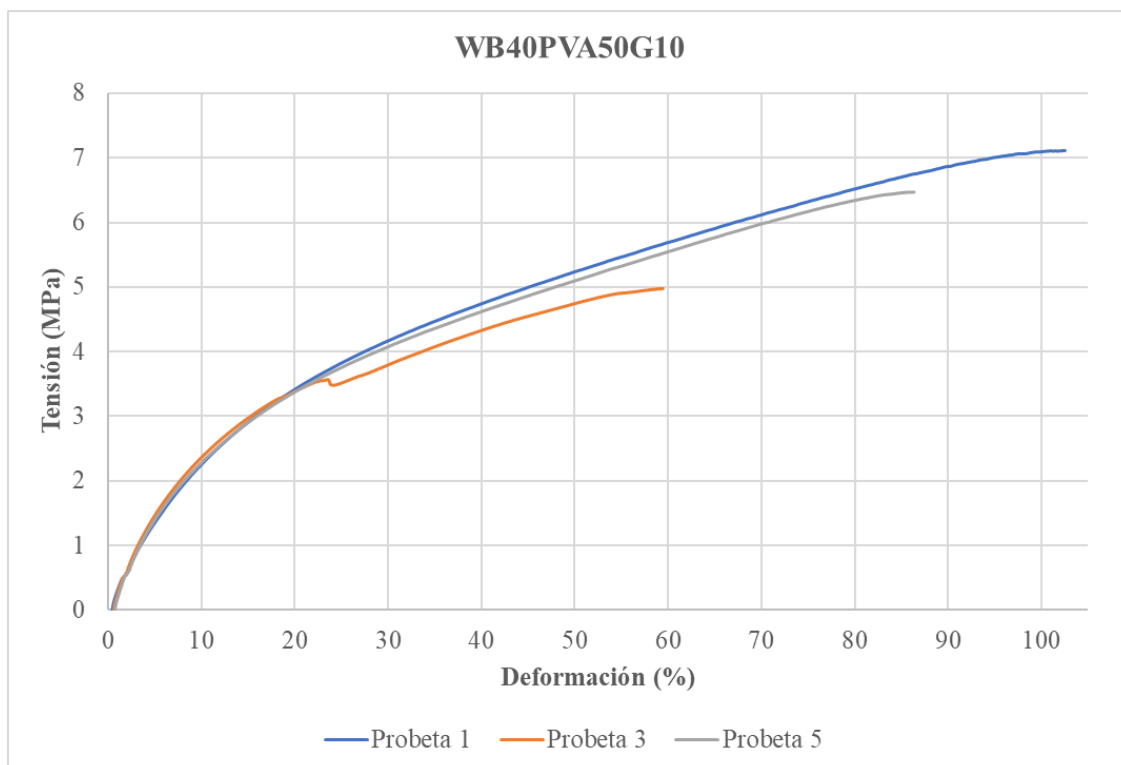
Anexo 27. Ensayo de resistencia a la tracción de WB37PVA57G6



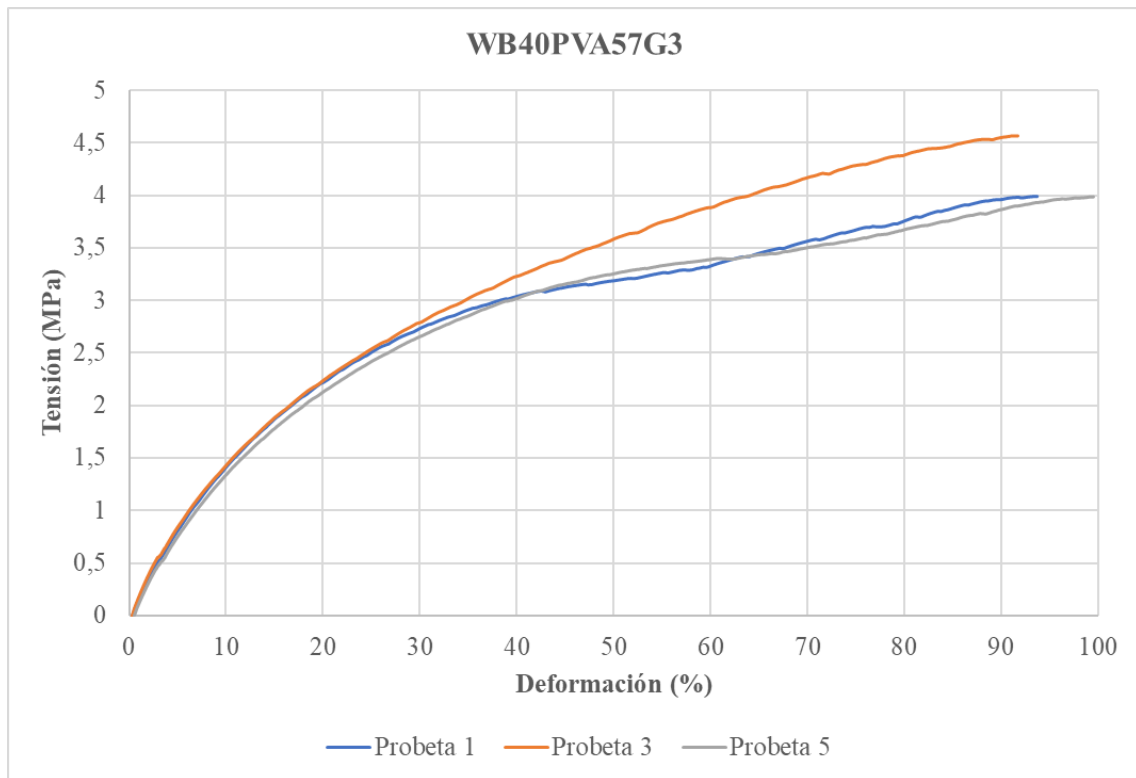
Anexo 28. Ensayo de resistencia a la tracción de WB37PVA63G0



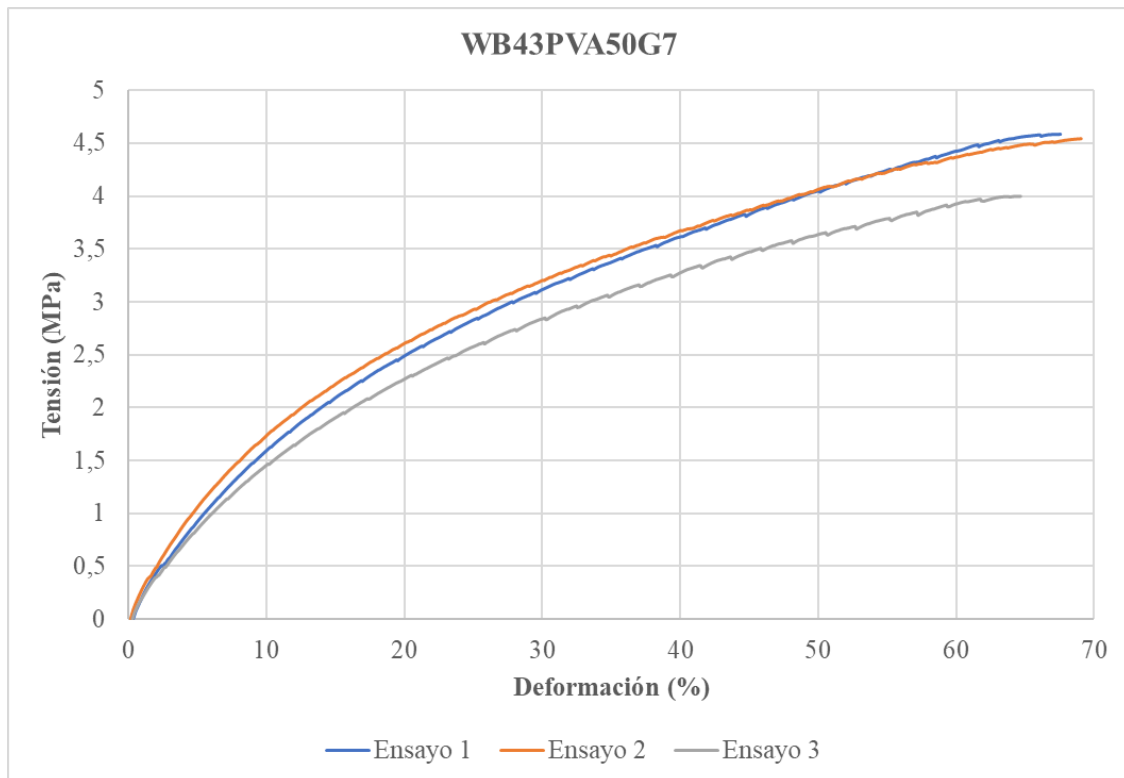
Anexo 29. Ensayo de resistencia a la tracción de WB40PVA50G10



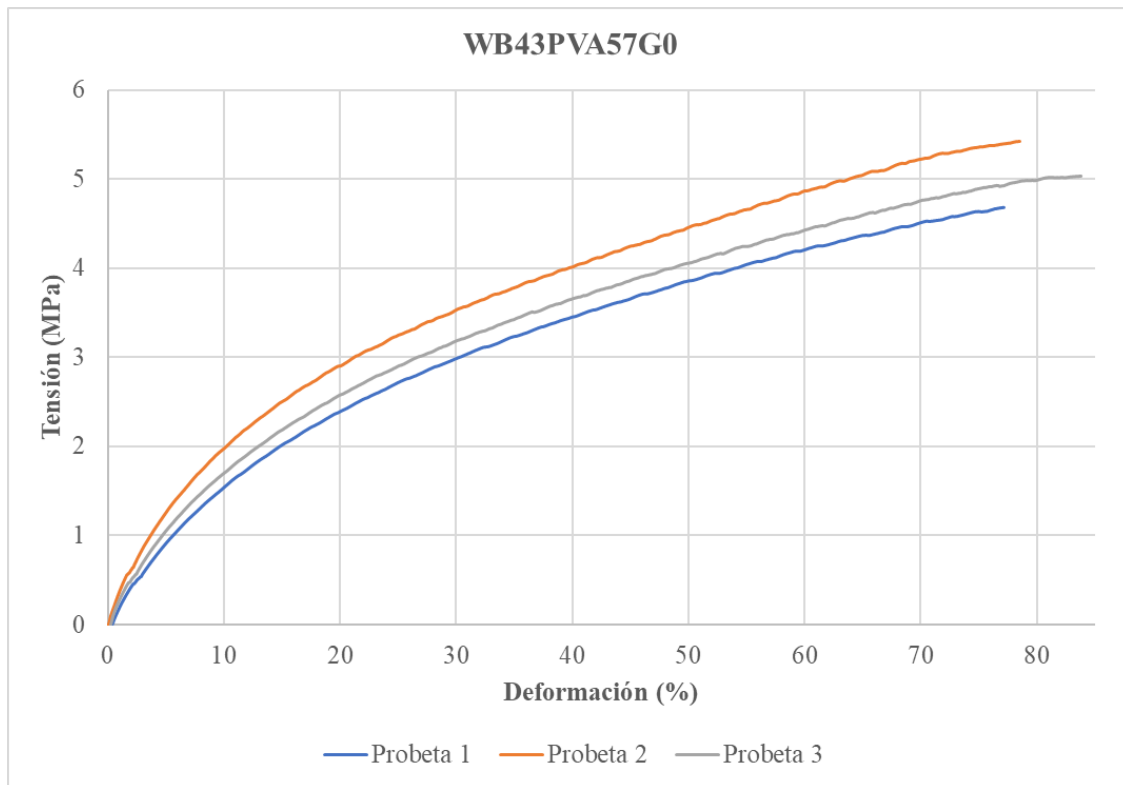
Anexo 30. Ensayo de resistencia a la tracción de WB40PVA57G3



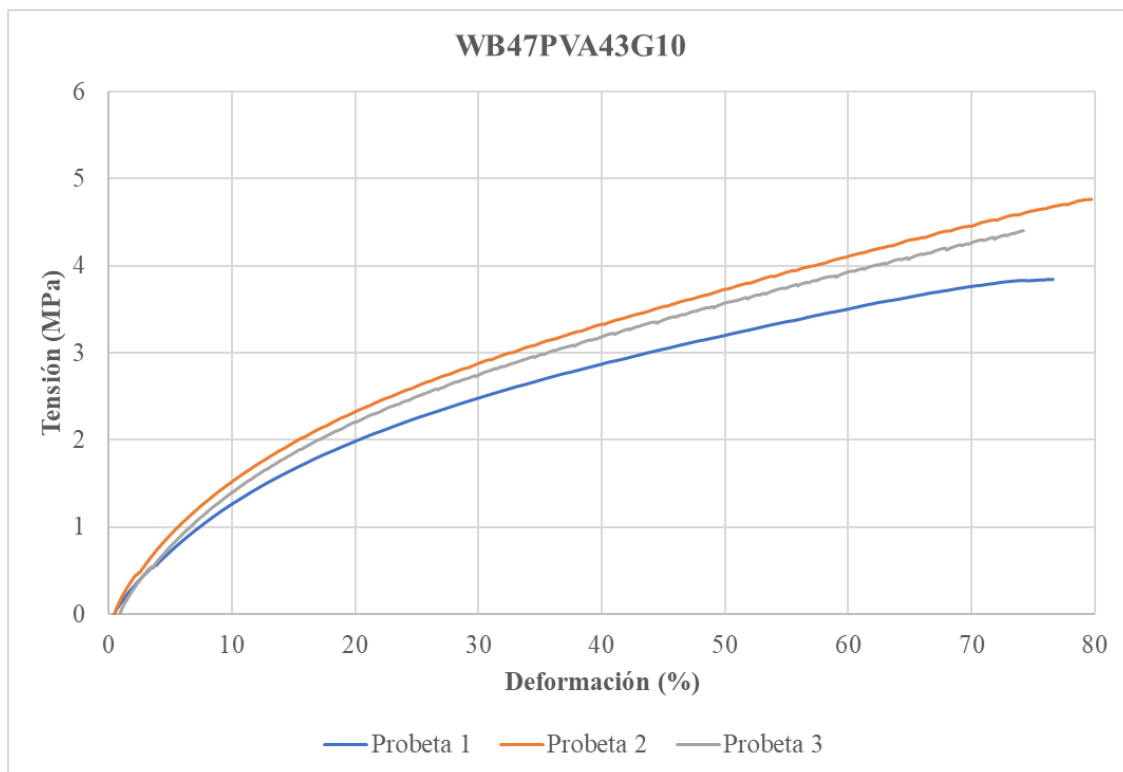
Anexo 31. Ensayo de resistencia a la tracción de WB43PVA50G7



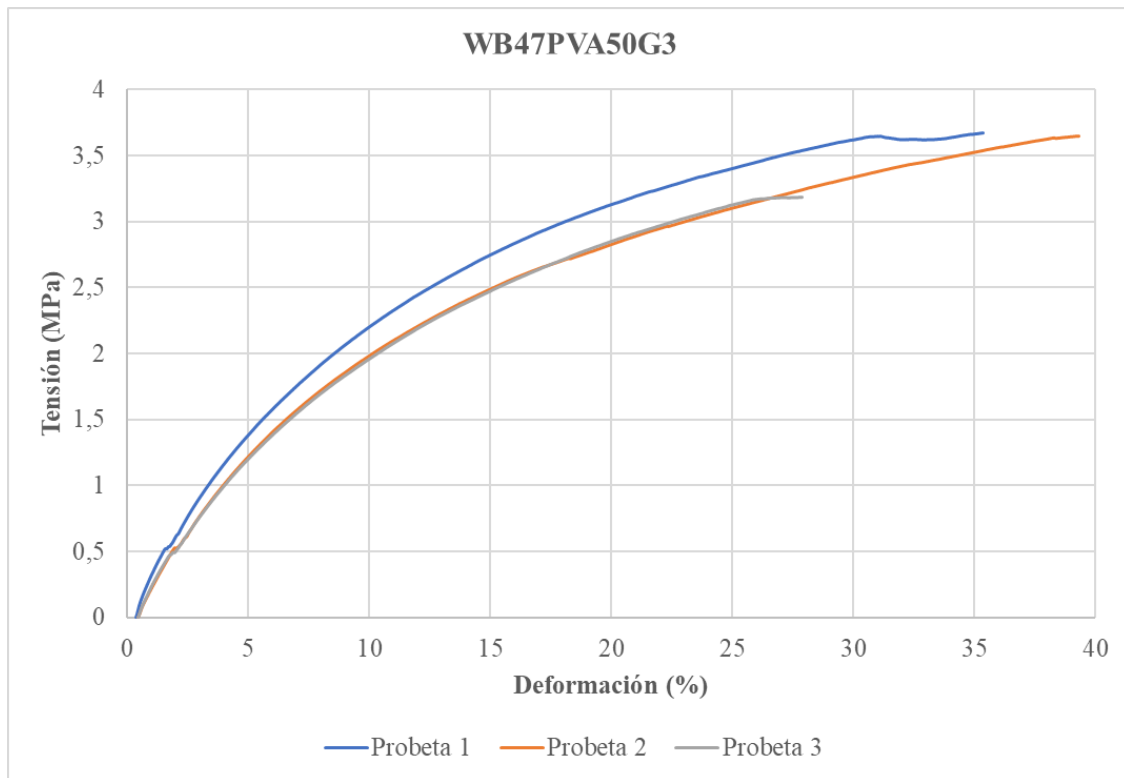
Anexo 32. Ensayo de resistencia a la tracción de WB43PVA57G0



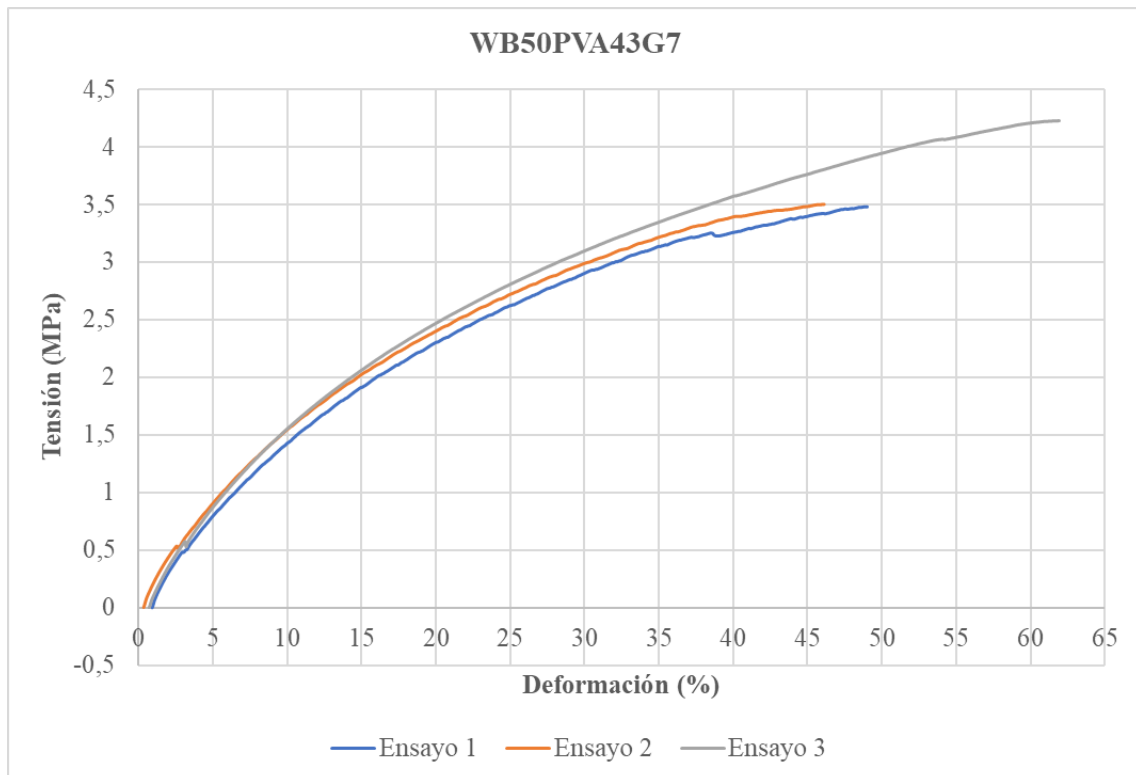
Anexo 33. Ensayo de resistencia a la tracción de WB47PVA43G10



Anexo 34.. Ensayo de resistencia a la tracción de WB47PVA50G3



Anexo 35.. Ensayo de resistencia a la tracción de WB50PVA43G7



Anexo 36. Ensayo de resistencia a la tracción de WB50PVA50G0

