

**ESTUDIO DE SUSTANCIAS GELIFICANTES PARA PRODUCCIÓN DE  
HIDROGELES AMIGABLES CON EL AMBIENTE**

**DIANA GONZÁLEZ GONZÁLEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS  
ESCUELA DE QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2014**

**ESTUDIO DE SUSTANCIAS GELIFICANTES PARA PRODUCCIÓN DE  
HIDROGELES AMIGABLES CON EL AMBIENTE**

**DIANA GONZÁLEZ GONZÁLEZ**

**TRABAJO DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE QUÍMICO**

**DIRECTOR DE PROYECTO  
JOSÉ CARLOS GUTIÉRREZ GALLEGO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS  
ESCUELA DE QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2014**

*Al Ángel de mi vida.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos a la profesora Luz Amparo Quintero, Universidad Industrial de Santander, directora del laboratorio de materiales, por la inducción en el manejo e información del equipo para ensayos mecánicos.

Y, un agradecimiento especial al Ingeniero Juan Pablo Consuegra del Laboratorio de Caracterización de Materiales, Universidad Santo Tomás de Bucaramanga, por su servicio en la determinación de propiedades mecánicas y la fundamentación de las mismas para los ensayos de las diversas muestras.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	18
1. MARCO TEÓRICO .....	19
1.1 ANTECEDENTES.....	19
1.2 LOS HIDROGELES .....	22
1.2.1 Sustancias de origen Natural.....	25
1.2.2 Sustancias semi-sintéticas.....	35
1.2.3 Sustancias sintéticas .....	37
1.3 ENSAYO MECÁNICO POR COMPRESIÓN.....	39
2. DISEÑO METODOLÓGICO.....	42
2.1 MATERIAL.....	42
2.2 REACTIVOS .....	43
2.3 PROCEDIMIENTO.....	44
2.3.1 Pruebas cualitativas de sustancias gelificantes .....	44
2.3.2 Análisis de agentes entrecruzantes. ....	45
2.3.3 Estudio de sustancias gelificantes y agentes entrecruzantes. ....	45
2.3.4 Preparación de hidrogeles seleccionados.....	46
2.3.5 Determinación de propiedades fisicomecánicas. ....	46
3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	49
3.1 PRUEBAS CUALITATIVAS DE SUSTANCIAS GELIFICANTES.....	49
3.1.1 Ensayo de ignición .....	49
3.1.2 Prueba de Biuret.....	50
3.1.3 Test de Molish.....	51
3.1.4 Determinación de espectro infrarrojo.....	53
3.2 ANÁLISIS DE AGENTES ENTRECruzANTES.....	59

3.4 ESTUDIO DE SUSTANCIAS GELIFICANTES Y AGENTES ENTRECRUZANTES.....	64
3.5 PREPARACIÓN DE HIDROGELES SELECCIONADOS.....	74
3.5 DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS.....	78
3.5.1. Densidad.....	78
3.5.2. Propiedades mecánicas.....	80
4. CONCLUSIONES .....	88
5. REFERENCIAS .....	90
BIBLIOGRAFÍA.....	99
ANEXOS.....	106

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Siglas de los reactivos empleados.....	43
Tabla 2. Formulación de los hidrogeles a estudiar. ....	46
Tabla 3. Componentes de la programación del método en TRAPEZIUM y las características seleccionadas. ....	47
Tabla 4. Características de los resultados obtenidos en el ensayo de ignición. ..	49
Tabla 5. Señales características del espectro IR de AY, (ver Anexo A). ....	53
Tabla 6. Señales características del espectro IR de PCR, (ver Anexo B). ....	53
Tabla 7. Señales características del espectro IR de AA, (ver Anexo C). ....	54
Tabla 8. Señales características del espectro IR de GX, (ver Anexo D).....	54
Tabla 9. Señales características del espectro IR de GG, (ver Anexo E). ....	54
Tabla 10. Señales características del espectro IR de GC, (ver Anexo F).....	55
Tabla 11. Señales características del espectro IR de CP, (ver Anexo G).....	56
Tabla 12. Señales características del espectro IR de CM, (ver Anexo H). ....	57
Tabla 13. Señales características del espectro IR de A25, (ver Anexo I). ....	57
Tabla 14. Señales características del espectro IR de la CMC, (ver Anexo J).....	57
Tabla 15. Señales características del espectro IR de CARB, (ver Anexo K). ....	59
Tabla 16. Señales características del espectro IR de PVA, (ver Anexo L). ....	59
Tabla 17. Señales IR experimentales y el reportadas por la literatura, de la GL, (ver Anexos M y N). ....	60
Tabla 18. Señales IR experimentales y el reportadas por la literatura, del EG, (ver Anexos O y P).....	61
Tabla 19. Señales IR experimentales y el reportadas por la literatura, del HG, (ver Anexos Q y R).....	62
Tabla 20. Señales IR experimentales y el reportadas por la literatura, del PG, (ver Anexos S y T). ....	63
Tabla 21. Señales características del espectro IR de GC/GL/H <sub>2</sub> O, (ver Anexo U). ....	74

Tabla 22. Señales características del espectro IR de GC/EG/H <sub>2</sub> O, (ver Anexo V).	75
Tabla 23. Señales características del espectro IR de GC/PG/H <sub>2</sub> O, (ver Anexo W).	75
Tabla 24. Señales características del espectro IR de CP/GL/H <sub>2</sub> O, (ver Anexo X).	76
Tabla 25. Señales características del espectro IR de CP/EG/H <sub>2</sub> O, (ver Anexo Y).	76
Tabla 26. Señales características del espectro IR de CP/PG/H <sub>2</sub> O, (ver Anexo Z).	76
Tabla 27. Medida de la masa de los cilindros de gel.	78
Tabla 28. Medida del volumen por el procedimiento de diferencia de volúmenes.	79
Tabla 29. Calculo de la densidad, por medio de la masa y el volumen.	80
Tabla 30. Medidas del diámetro y longitud de los cilindros de gel.	81
Tabla 31. Datos calculados del esfuerzo y porcentaje de deformación.	83

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Gel de cabello (izq.), gelatina (der.).....	22
Figura 2. (Izq.) Gel Físico, unión: puentes de hidrogeno. (Der.) Gel Químico, unión: enlace covalente .....	24
Figura 3. Estructura lineal de amilosa, enlaces glucosídicos $\alpha$ -D-(1,4).....	26
Figura 4. Estructura ramificada de amilopectina, enlaces glucosídicos $\alpha$ -D-(1,6). Estructura lineal de amilosa, enlaces glucosídicos $\alpha$ -D-(1,4).....	27
Figura 5. Descripción grafica de la estructura helicoidal de la amilosa.....	27
Figura 6. Pectina de alto metoxilo.....	28
Figura 7. Pectina de bajo metoxilo.....	29
Figura 8. Mecanismo de gelificación de la pectina de alto metoxilo.....	30
Figura 9. Mecanismo de gelificación de la pectina de bajo metoxilo.....	30
Figura 10. Estructura del goma-xantana.....	32
Figura 11. Estructura de goma guar. ....	33
Figura 12. Estructura de la celulosa.....	36
Figura 13. Obtención de metilcelulosa, a partir de celulosa.....	36
Figura 14. Estructura del carbopol. ....	37
Figura 15. Estructura del alcohol de polivinilo.....	38
Figura 16. Ejemplo gráfico de los ensayos mecánicos para materiales.....	39
Figura 17. Imagen de una barra sometida a carga de compresión.....	40
Figura 18. Descripción grafica de las posibles fuerzas de compresión.....	41
Figura 19. (a) Espectrofotómetro BRUKER (b) porta muestras del equipo.....	42
Figura 20. Equipo AUTOGRAPH AG-1 250 kN, máquina universal de ensayos mecánicos.....	43
Figura 21. Pantallazo de los componenetes de la programaacion del método, en TRAPEZIUM. ....	48
Figura 23. Resultado de la prueba de Biuret para la GC y CP. ....	50
Figura 24. Representación del complejo de coordinación. ....	51

Figura 25. Test de Molish. Izquierda, solución al adicionar el reactivo de Molish. Derecha, al agregar el ácido sulfúrico.....	52
Figura 26. Mecanismo de reacción del test de Molish. ....	52
Figura 27. Estructura de la glicerina. ....	60
Figura 28. Estructura del etilenglicol. ....	61
Figura 29. Estructura de hexilenglicol. ....	62
Figura 30. Estructura del propilenglicol. ....	63
Figura 31. Geles de AY, con los diferentes agentes entrecruzantes, en el orden GL/EG/HG/PG. ....	64
Figura 32. Geles de PCR, con los diferentes agentes entrecruzantes, en el orden GL/EG/HG/PG. ....	66
Figura 33. Geles de AA, con los diferentes agentes entrecruzantes, en el orden GL/EG/HG/PG. ....	67
Figura 34. Geles de GX, con los diferentes agentes entrecruzantes, en el orden GL/EG/HG/PG. ....	68
Figura 35. Geles de GG, con los diferentes agentes entrecruzantes, en el orden GL/EG/HG/PG. ....	69
Figura 36. Geles de GC, con los diferentes agentes entrecruzantes, en el orden GL/EG/HG/PG. ....	70
Figura 37. Geles de CP, con los diferentes agentes entrecruzantes, en el orden GL/EG/HG/PG. ....	70
Figura 38. Geles de CM, con los diferentes agentes entrecruzantes, en el orden GL/EG/HG/PG. ....	71
Figura 39. Geles de A25, con los diferentes agentes entrecruzantes, en el orden GL/EG/HG/PG. ....	72
Figura 40. Geles de CMC, con los diferentes agentes entrecruzantes, en el orden GL/EG/HG/PG. ....	72
Figura 41. Geles de CARB, con los diferentes agentes entrecruzantes, en el orden GL/EG/HG/PG. ....	73

Figura 42. Geles de PVA, con los diferentes agentes entrecruzantes, en el orden GL/EG/HG/PG. ....	74
Figura 22. Fotografía del ensayo de compresión en el hidrogel. Izq. Muestra inicial; Der. Muestra al aplicar la carga de compresión. ....	81
Figura 43. Grafica de esfuerzo vs. Deformación, para el gel GC/GL/H <sub>2</sub> O. ....	84
Figura 44. Grafica de esfuerzo vs. Deformación, para el gel GC/EG/H <sub>2</sub> O. ....	85
Figura 45. Grafica de esfuerzo vs. Deformación, para el gel CP/GL/H <sub>2</sub> O. ....	86
Figura 46. Grafica de esfuerzo vs. Deformación, para el gel CP/EG/H <sub>2</sub> O. ....	87

## LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Espectro infrarrojo experimental del almidón de yuca. ....	106
Anexo 2. Espectro infrarrojo experimental de la pectina cítrica rápida. ....	107
Anexo 3. .Espectro infrarrojo experimental de agar-agar.....	108
Anexo 4. Espectro infrarrojo experimental de la goma xantana.....	109
Anexo 5. Espectro infrarrojo experimental de la goma guar .....	110
Anexo 6. Espectro infrarrojo experimental de la gelatina tipo C. ....	111
Anexo 7. Espectro infrarrojo experimental de la colapiscis.....	112
Anexo 8. Espectro infrarrojo experimental de la celulosa microcristalina. ....	113
Anexo 9. Espectro infrarrojo experimental de la metilcelulosa A25. ....	114
Anexo 10. Espectro infrarrojo experimental de la carboximetilcelulosa .....	115
Anexo 11. Espectro infrarrojo experimental del carbopol.....	116
Anexo 12. Espectro infrarrojo experimental del alcohol de polivinilo .....	117
Anexo 13. Espectro infrarrojo experimental de la glicerina .....	118
Anexo 14. Espectro infrarrojo reportado por la literatura de la glicerina. ....	119
Anexo 15. Espectro infrarrojo experimental del etilenglicol.....	120
Anexo 16. Espectro infrarrojo reportado por la literatura del etilenglicol. ....	121
Anexo 17. Espectro infrarrojo experimental del hexilenglicol.....	122
Anexo 18. Espectro infrarrojo reportado por la literatura del hexilenglicol. ....	123
Anexo 19. Espectro infrarrojo experimental del propilenglicol. ....	124
Anexo 20. Espectro infrarrojo reportado por la literatura del propilenglicol.....	125
Anexo 21. Espectro infrarrojo de la mezcla GC/GL/H2O. ....	126
Anexo 22. Espectro infrarrojo de la mezcla GC/EG/H2O.....	127
Anexo 23. Espectro infrarrojo de la mezcla GC/PG/H2O.....	128
Anexo 24. Espectro infrarrojo de la mezcla CP/GL/H2O. ....	129
Anexo 25. Espectro infrarrojo de la mezcla CP/EG/H2O .....	130
Anexo 26. Espectro infrarrojo de la mezcla CP/PG/H2O.....	131
Anexo 27. Ensayo Mecánico GC/GL. ....	132

Anexo 28. Ensayo mecánico GC/EG.....	133
Anexo 29. Ensayo mecánico CP/GL.....	134
Anexo 30. Ensayo mecánico CP/EG. ....	135

## RESUMEN

**TITULO:**

ESTUDIO DE SUSTANCIAS GELIFICANTES PARA PRODUCCIÓN DE HIDROGELES AMIGABLES CON EL AMBIENTE\*

**AUTOR:**

DIANA GONZÁLEZ GONZÁLEZ\*\*

**PALABRAS CLAVES:**

Hidrogeles, hidrocoloides de alimentos, plástico biodegradable, gelificantes, polímeros naturales, ensayo de compresión.

En este trabajo, se realizó el estudio de sustancias que en medio acuoso tienen la propiedad de gelificar, para obtención de hidrogeles amigables con el ambiente; para ello, se empleó un método general con temperatura constante de 70°C y una relación de masa equitativa entre gelificante, agua y agente entrecruzante; donde se trabajó con glicerina, etilenglicol, propilenglicol y hexilenglicol. Las sustancias gelificantes estudiadas fueron: almidón, pectina, goma xantana, goma guar, agar, gelatina, colapiscis, celulosa microcristalina, carboximetilcelulosa, metilcelulosa, alcohol de polivinilo y carbopol.

Inicialmente se realizaron ensayos preliminares cualitativos sobre los gelificantes de origen natural y semisintético, para corroborar su origen, tipo polisacárido o proteico, y se determinaron espectros infrarrojos de estos, los agentes entrecruzantes, y los gelificantes sintéticos; para corroborar las sustancias de trabajo y realizar el estudio estructural. Posteriormente, se procedió al estudio de los gelificantes, donde finalizado el procedimiento, se seleccionaron los hidrogeles que presentaban consistencia homogénea y apariencia translúcida, para prepararlos a mayor escala y realizar el estudio de propiedades físico mecánicas.

Finalmente, se obtuvieron hidrogeles elásticos, con resistencia a ser deformados, termorreversibles, con una red polimérica formada por uniones físicas, del tipo puentes de hidrogeno y sin presentar impacto ecológico. Pudiendo ser empleados, en diseño de piezas anatómicas para geles balísticos, estudios en medicina o enfermería, entre otros.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de ciencias. Escuela de química. Director: José Carlos Gutiérrez Gallego.

## ABSTRAC

**TITLE:** STUDY FOR PRODUCTION OF SUBSTANCES GELLING HYDROGELS FRIENDLY ENVIRONMENT\*

**AUTHOR:** DIANA GONZÁLEZ GONZÁLEZ\*\*

**KEY WORDS:** Hydrogels, food hydrocolloids, biodegradable plastic, gel substances, natural polymers, compression test.

In this work, the study of substances which in an aqueous medium have the property of gelling, for obtaining environmentally friendly hydrogels was performed; for this, a general method was used with a constant temperature of 70 ° C and equal mass ratio between gelling, water and crosslinking agent; where he worked with glycerin, ethylene glycol, propylene glycol and hexylene glycol. The gelling substances studied were: starch, pectin, xanthan gum, guar gum, agar, gelatin, colapiscis, microcrystalline cellulose, carboxymethylcellulose, methylcellulose, polyvinyl alcohol and carbopol.

Preliminary qualitative tests initially gelling natural and semisynthetic origin is performed, to verify its origin, polysaccharide, or protein type, and infrared spectra of these, the cross-linking agents, and synthetic gelling agents are determined; to corroborate the working substances and make the structural study. Subsequently, we proceeded to study the gelling where the procedure is completed, the hydrogels exhibited homogeneous consistency and translucent appearance, to prepare a larger scale and the study of physical and mechanical properties were selected.

Finally, elastic hydrogels were obtained, with resistance to being deformed, thermoreversible, with a polymer network formed by physical bonds, the hydrogen bonds present type without environmental impact. Can be used in designing parts for ballistic gels anatomical studies in medicine or nursing, among others.

---

\* Degree Work

\*\* Industrial University of Santander. Science Faculty. Chemistry School. Director: José Carlos Gutiérrez Gallego

## INTRODUCCIÓN

Desde el descubrimiento de los primeros polímeros, estos se han introducido a la sociedad cada vez con mayor fuerza, aplicándose para el diseño de variados elementos, como los son artículos de hogar, oficina, industrias de alimentos, farmacéuticas, tecnológicas, entre otra gran variedad.<sup>1,2</sup>

Estos materiales han tenido gran acogida debido a sus variadas aplicaciones y a su durabilidad, ya que presentan resistencia a las agresiones del medio, como lo son la corrosión, variaciones de la temperatura, agentes químicos, entre otros. Esta misma característica de durabilidad, ha con llevado a que se genere gran cantidad de desechos, los cuales, cada día se acumulan en los diferentes servicios de relleno sanitario. A su vez, el reciclaje de este material resulta de alto costo, la incineración libera residuos tóxicos a la atmosfera y gran cantidad de países no cuentan con centros de reciclaje apropiados.<sup>3,4</sup>

Es por ello, que en este documento se realiza un estudio de diversas sustancias que se emplean como gelificantes en el diario vivir, como lo es la gelatina, la colapiscis, entre otros; para determinar, con cual es posible obtener un polímero hidrogel, homogéneo, termorreversible y con una densidad similar a la carne humana. De esta forma, se podría preparar un material polimérico de bajo costo de producción que no generaría impacto ecológico, pudiéndose emplear en el diseño de piezas anatómicas para estudios en el campo de la balística, enfermería, entre otros.

# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1 ANTECEDENTES

En la antigüedad <sup>5</sup>, los hombres empleaban los polímeros naturales para diseñar diversos objetos de uso diario, a partir de la madera, fibras vegetales, piel y huesos de animales, entre otros.

Materiales como el ámbar, el asta y la goma laca; que son sustancias de origen vegetal, se consideran los precursores de los actuales polímeros. Se data que en el año 2000 a.C., los egipcios empleaban el ámbar para embalsamar y el asta para diseñar figuras; en la era medieval, los europeos utilizaban el asta para peines y cucharas; y, en la India, la goma laca se empleaba como recubrimiento de superficies.<sup>1</sup>

Las características que presentaban los materiales de origen natural, no satisfacían las necesidades que la actual humanidad necesitaba, por ello, desde el siglo XIX, se empezaron a realizar modificaciones a dichos materiales, para generar productos termoplásticos y elastómeros. Para 1839 <sup>6</sup>, Charles Goodyear descubre el proceso de la vulcanización, con el cual, era posible convertir la goma en un material seco, resistente y muy elástico. En 1870, John Wesley Hyatt, genera el celuloide, un plástico hecho de celulosa modificada.

En 1909, Leo Baekeland reporta el primer plástico completamente sintético, la bakelita, obtenida de la resina de fenolformaldehído; en su investigación, encontró que si la reacción se detenía antes de finalizar, era posible obtener un material fluido y fácil de moldear. La bakelita, fue usada para el diseño de carcasas de teléfonos, radios y elementos de escritorio.

Hasta el año de 1920, la mayor producción de materiales poliméricos era de origen natural y la información teórica acerca de las propiedades que presentaban estos materiales, era muy escasa. Para este año, Hermann Staudinger presenta su investigación, proponiendo que los polímeros eran largas cadenas de unidades más pequeñas que se repetían; posteriormente, Kurt Meyer y Herman Mark estudian la estructura de la celulosa y otros polisacáridos, determinando que estas eran multiunitarias. Finalmente, Paul Flory, presenta su estudio, donde describe cómo es posible formar materiales elásticos generando redes entrecruzadas de polímeros.

Teniéndose los conocimientos teóricos de lo que ocurría estructuralmente en la formación de materiales poliméricos, surgen nuevas investigaciones y se diseñan nuevas técnicas, generándose progresos en la elaboración de polímeros. Pero, para los años '30, las inversiones en el estudio de recursos renovables, se vieron muy disminuidas, debido al auge de los derivados fósiles. Este auge, generó un sin fin de productos químicos con fácil disponibilidad debido a los bajos costos de producción de macromoléculas, sin contar sus propiedades fisicomecánicas mejoradas, tales como, ligereza, rigidez, resistencia y flexibilidad; surgiendo así, la era del plástico.<sup>7</sup>

El material sintético abarcó la industria de la tecnología, medicina, objetos de uso cotidiano, entre otros; para los años '70 las empresas productoras de plástico fomentaron el estudio de nuevas mezclas y mejora de las propiedades de los polímeros existentes; se perfeccionó la maquinaria, se descubrieron nuevos tipos de aditivos, mejorando las propiedades, como resistencia a mayores temperaturas, al daño de uso, a agentes químicos y corrosión. Esta misma mejoría, conllevó a una gran creciente en el desecho de residuos sólidos; por otro lado, en el campo de la biotecnología, los órganos de origen sintético diseñados para trasplantes, eran rechazados por quienes los poseían, generando múltiples enfermedades.

Posteriormente, la subida en el precio del petróleo y el hecho de que gradualmente este recurso se ha ido agotando, ha surgido gran importancia en crear nuevos materiales para remplazar los existentes evitando las contraindicaciones, regresando de nuevo el interés por los materiales poliméricos que brinda la naturaleza.

De esta manera, Ortiz Eliza, Cruz Rocío, Cruz Javier, Mendoza Ana y Morales Ana; describen la síntesis de un hidrogel en el cual combinan la acrilamida, material sintético, con la metilcelulosa, la cual es de origen natural, obteniendo películas homogéneas, transparentes y de gran flexibilidad.<sup>2</sup>

Ruiz Gladys diseña un polímero biodegradable a partir de almidón de yuca, glicina y agua, realizando variaciones en temperatura y agitación; obteniendo películas, las cuales, pueden ser aplicadas en el diseño de empaques de alimentos. De esta forma describe un plástico biodegradable de bajo costo y facilidad de obtención de materia prima.<sup>3</sup>

Meneses Juliana, Corrales Catalina y Valencia Marco (2007)<sup>4</sup>; a partir del material obtenido por Ruiz, estudian la adición de diversas sustancias tales como espesantes, lubricantes, plastificantes, extensores y humectantes; de esta forma obtienen un material de mayor aplicabilidad en la generación de empaques y recubrimientos.

En 2009, Echeverri Claudia, Vallejo Catalina y Londoño Marta<sup>8</sup>; diseñan un hidrogel a partir de un polímero sintético, el alcohol de polivinilo, el cual, es un material no tóxico y presenta biocompatibilidad. El material obtenido tiene la característica de absorción y liberación de líquidos, lo que le permite ser empleado en el campo de la medicina.

Gandini, Alessandro y Naceur, Mohamed <sup>7</sup>; describen como en los últimos años los productos de recursos renovables son perfectamente aptos para generar gran variedad de monómeros y polímeros. Explican cómo, con la celulosa, se generan diversos productos con propiedades específicas al realizar modificaciones químicas, como se emplea el almidón en adhesivos, producción de papel y diseño de material plastificado; y, como las sustancias de origen proteico han sido de gran interés debido a su estructura altamente polar y reactiva.

En general, en la literatura se describen varias aplicaciones de los hidrogeles, que van desde el campo de la medicina en estudio de fármacos e implantes de tejidos; en la industria de alimentos, para empaques; en criminalística se emplea como gel balístico, diseño de piezas anatómicas, etc. <sup>9, 10</sup>

## 1.2 LOS HIDROGELES

Son sustancias coloidales <sup>11</sup>, donde su fase dispersa es líquida (agua) y la fase dispersante es sólida. La fase dispersa <sup>12</sup> consiste en macromoléculas interconectadas o entrecruzadas que forman una red tridimensional, en la cual se retiene el agua por medio de puentes de hidrogeno. Como ejemplo se tiene el gel de cabello y la gelatina (ver figura 1).

Figura 1. Gel de cabello (izq.), gelatina (der.).



Los hidrogeles <sup>9, 13</sup> se caracterizan principalmente, por:

- Carácter hidrófilo, debido a la presencia de grupos funcionales hidrofílicos en su estructura, tales como: alcoholes (-OH), ácidos carboxílicos (-COOH), amidas (-CONR), entre otros.
- Son insolubles en agua, debido a que su estructura polimérica conforma un red tridimensional. Pero, en medio acuoso, presenta hinchamiento, aumentando su volumen hasta alcanzar un equilibrio físico-químico. Esto como resultado de un balance entre la fuerza osmótica generada por el agua y la fuerza cohesiva generada por la red.
- Suaves al tacto y flexibles, debido al monómero hidrófilo y la baja densidad de entrecruzamiento.

La elasticidad y rigidez del hidrogel, depende del tipo de polímero y su concentración, la presencia de sales, el pH y la temperatura del medio.

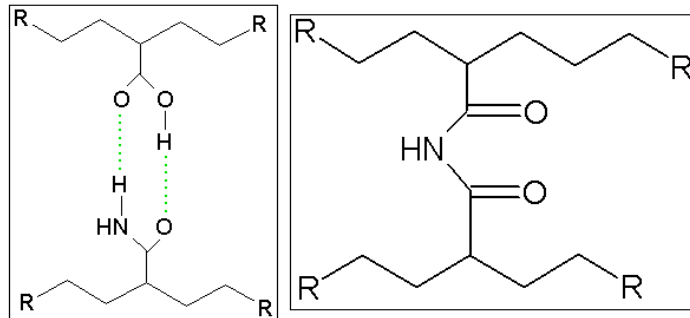
De acuerdo a la naturaleza de las uniones de la red polimérica, se tienen dos tipos de hidrogeles:

Geles físicos: donde la red tridimensional está formada por uniones del tipo van der Waals y puentes de hidrógeno, las cuales, son poco estables a cambios físicos, tales como, pH, temperatura, entre otros. En la figura 2 (izq.), se esquematiza este tipo de interacción. Dan origen a mallas no entrecruzadas, donde las cadenas se enredan unas con otras, por lo cual pueden albergar y retener moléculas de líquidos. A medida que aumenta la proporción del líquido la malla se desenreda, por lo cual el gel pasa de un aspecto sólido elástico a un fluido viscoso.

Geles químicos: la red está formada por enlaces covalentes, los cuales, son muy fuertes y su ruptura genera la degradación del gel. Por ello, estos geles no son reversibles con la temperatura. En la figura 2 (der.), se representa este tipo de

enlace. Dan lugar a mallas entrecruzadas. Esta estructura puede absorber líquidos sin cambiar su aspecto de sólido elástico.

Figura 2. (Izq.) Gel Físico, unión: puentes de hidrogeno. (Der.) Gel Químico, unión: enlace covalente



En la síntesis de un hidrogel, se emplea un polímero que presente monómeros con sustituyentes no ionizables, grupos funcionales ionizables o sales internas; se necesita una sistema iniciador, que permita el crecimiento de las cadenas macromoleculares, pudiendo ser, temperatura, radicales libres, radiación, entre otros; un agente entrecruzante, el cual, es fundamental para optimizar las propiedades del gel, y debe poseer varios grupos funcionales reactivos en su estructura; y, se emplea el medio acuoso, para disolver y generar el hinchamiento del hidrogel.

En general <sup>14</sup>, antes de que se inicie el proceso de gelificación, ocurre un cambio en la conformación estructural del polímero empleado, pudiendo ser alguno de los siguientes:

- Transición Intra/Inter: los grupos funcionales del polímero se encuentran escondidos, pero en el momento en que se aplica el sistema iniciador, dichos grupos se activan, formando el gel por enlaces intermoleculares.

- Transición Bovina/Hélice o Bovina/Glóbulo: inicialmente el polímero tiene una conformación de bovina, al aplicarse el sistema iniciador, ocurre la apertura de dichas bovinas, para posteriormente formar hélices o glóbulos que se agregan formando el gel.
- Dos estados de transición: la unidad monomérica a lo largo de la cadena, al aplicar el sistema iniciador, puede presentar dos estados, uno activo y otro inactivo. Los monómeros activos se entrecruzan por múltiples asociaciones formando el gel.

Las sustancias gelificantes que se emplean en la preparación de un hidrogel, pueden ser de origen natural, semisintético o sintético. Las sustancias de origen natural, consisten en biopolímeros de proteínas o polisacáridos; las sustancias semisintéticas, son generadas por síntesis de biomonomeros, tales como derivados de celulosa; y como sustancias sintéticas, se tiene el alcohol de polivinilo o carbopol. Algunas sustancias se describen a continuación:

**1.2.1 Sustancias de origen Natural. Polisacáridos.**<sup>15</sup> Son polímeros, donde su unidad básica se conoce como monosacáridos, los cuales, son derivados de aldehídos o cetonas de cadena lineal; como ejemplo se tiene el monosacárido de glucosa, lactosa, entre otros.

Pueden ser sustancias conformadas por un único monosacárido, homopolisacáridos, tales como el almidón; o por varios monosacáridos, heteropolisacáridos, como la pectina y el agar - agar.

Como prueba cualitativa de polisacáridos<sup>16</sup>, se tiene el test de Molish, en el cual, el ácido sulfúrico deshidrata los glúcidos obteniéndose como producto final un furfural o hidroximetil furfural, los cuales al reaccionar con el naftol forman un anillo

color violeta. También es común emplear un ensayo de ignición, ya que los glúcidos liberan un olor característico.

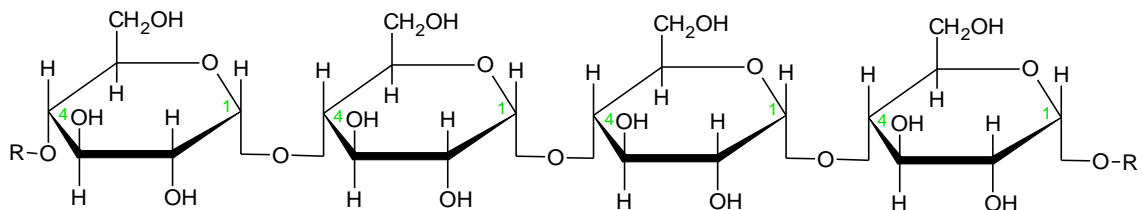
Los polisacáridos presentan diversas sustancias gelificantes con múltiples aplicaciones, algunos ejemplos son:

- **El almidón.**<sup>17</sup> Es un polisacárido de reserva vegetal, el cual, se obtiene de las semillas de cereales, el maíz, trigo, arroz, tubérculos, etc.

Es un polímero de glucosa conformado por dos tipos de moléculas, la amilosa con enlaces glucosídicos  $\alpha$ -D-(1,4) y la amilopectina, con enlaces glucosídicos  $\alpha$ -D-(1,6), (ver figuras 3 y 4); la primer molécula es lineal y se encuentra enrollada en forma de hélice (ver figura 5), y la segunda molécula es ramificada.

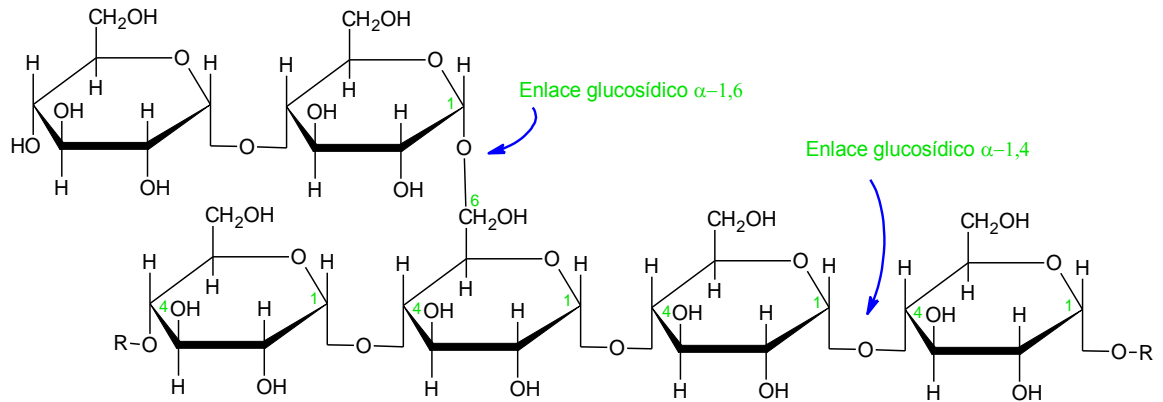
En solución acuosa, la amilosa alcanza un mayor volumen de hinchamiento debido a que la amilopectina es insoluble, pero, al aumentar la temperatura del sistema, la amilopectina empieza a absorber más agua que la amilosa.

Figura 3. Estructura lineal de amilosa, enlaces glucosídicos  $\alpha$ -D-(1,4).



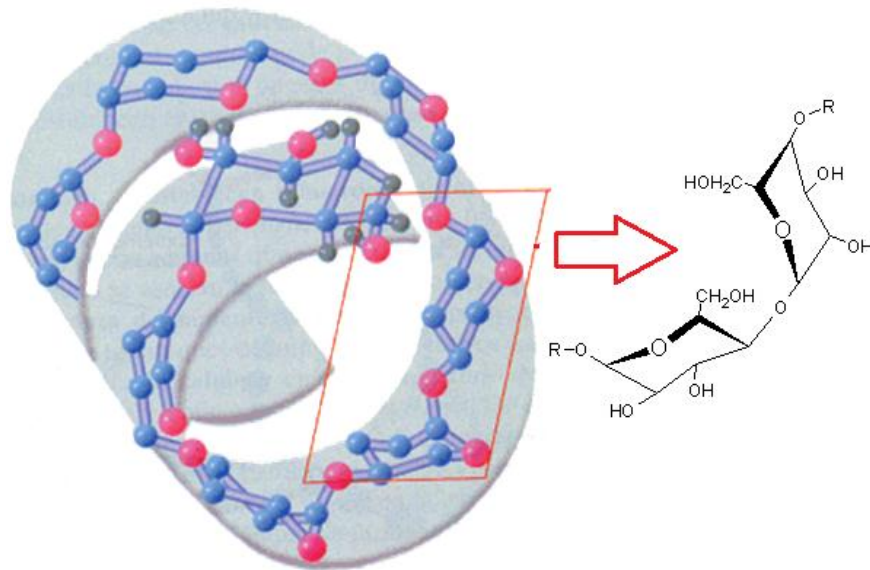
Fuente 1. Síntesis y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca<sup>4</sup>. Modificado por el autor.

Figura 4. Estructura ramificada de amilopectina, enlaces glucosídicos  $\alpha$ -D-(1,6). Estructura lineal de amilosa, enlaces glucosídicos  $\alpha$ -D-(1,4).



Fuente 2. Síntesis y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca <sup>4</sup>. Modificado por el autor.

Figura 5. Descripción grafica de la estructura helicoidal de la amilosa.



Fuente 3. Polisacáridos <sup>17</sup>. Modificado por el autor.

En general, el proceso de gelificación del almidón <sup>12</sup>, ocurre en las siguientes etapas: inicialmente, en agua fría ocurre una absorción de aproximadamente el 25% del agua; al iniciar el calentamiento, y alcanzar una temperatura

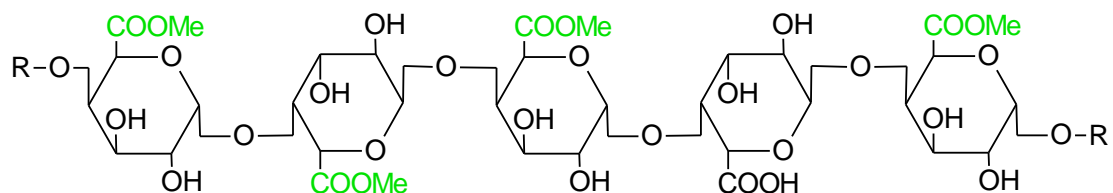
aproximada a los 65 ° C, ocurre un rápido hinchamiento de los gránulos, debido a gran absorción de agua; y, finalmente, hay un mayor hinchamiento, pudiendo haber desgarré del gránulo. Al enfriar, aumenta la viscosidad y se forma el gel.

En la industria de alimentos el almidón se emplea como estabilizante, adhesivo, espesante, gelificante, entre otros <sup>18</sup>; también se emplea en la producción del papel, y, en la actualidad <sup>4</sup>, diversas investigaciones han encontrado en la gelificación del almidón, propiedades adecuadas para preparar películas poliméricas, las cuales pueden ser empleadas en el diseño de bolsas o empaques biodegradables. También <sup>19</sup>, se han realizado investigaciones en el campo de la medicina, para diseño de biomateriales.

- **La pectina.** <sup>12, 20</sup> Son polisacáridos de tejido vegetal, el cual influye en la textura de algunas frutas y hortalizas. Se obtiene por un proceso de hidrolisis ácida en cáscaras de manzana y cítricos.

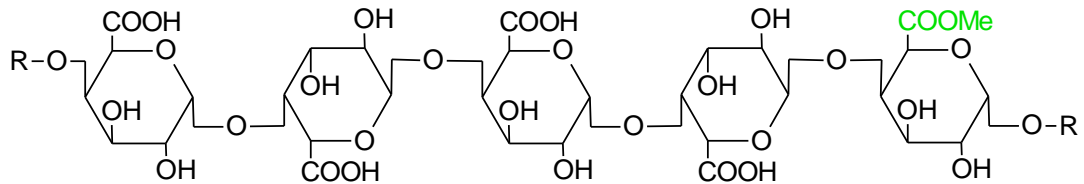
Presenta una estructura lineal de ácido galacturónico, algunas cadenas presentas radicales carboxilo libres y otros esterificados con metanol. De acuerdo a la cantidad de grupos esterificados, las pectinas se clasifican en: pectina de alto metoxilo, (ver figura 6), cuando más del 50% de los grupos carboxilo esta esterificado; y pectina de bajo metoxilo, (ver figura 7), cuando es inferior al 50%.

Figura 6. Pectina de alto metoxilo.



Fuente 4. Pectinas <sup>21</sup>. Modificado por el autor.

Figura 7. Pectina de bajo metoxilo.



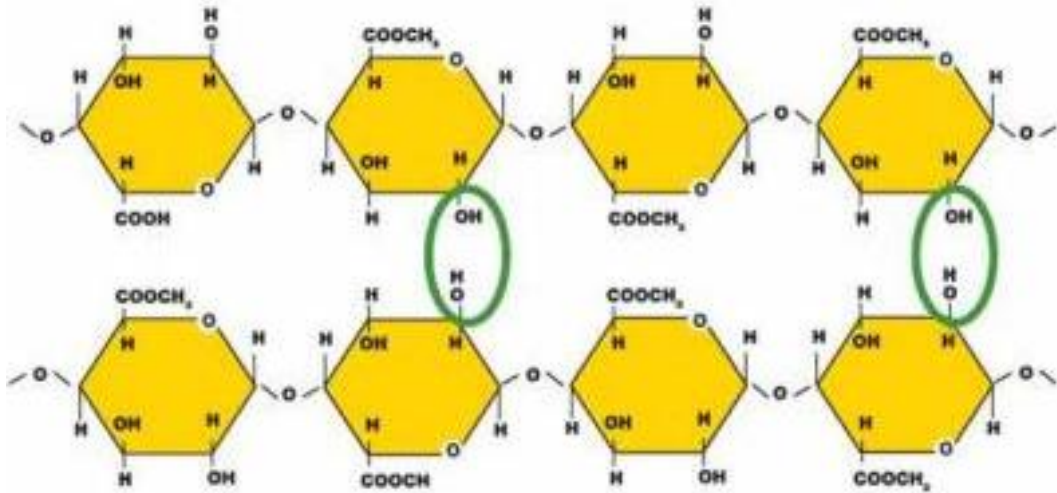
Fuente 5. Pectinas <sup>21</sup>. Modificado por el autor.

El proceso de gelificación de la pectina, depende del grado de esterificación, tiempo y temperatura. Por ello, se tiene que:

Gelificación para pectina de alto metoxilo: en medio acuoso, los grupos ácidos se ionizan, generando que las moléculas de pectina se disocien por repulsión de cargas; para evitar esto, es necesario adicionar ácido para neutralizar la acción de los grupos carboxílicos y azúcar para deshidratar, favoreciéndose así, las uniones entre las moléculas de pectina. Este procedimiento se realiza en calentamiento y el ácido debe adicionarse al final, para evitar pre-gelificación. Al enfriar, se forma el gel de pectina, el cual, es reversible en caliente.

Las interacciones de la pectina de alto metoxilo se describen en la siguiente figura:

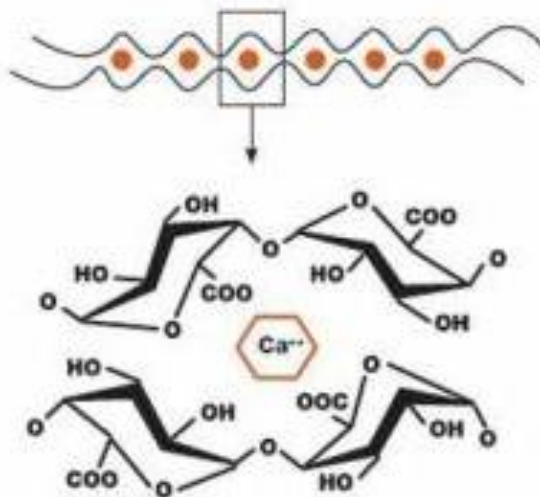
Figura 8. Mecanismo de gelificación de la pectina de alto metoxilo.



Fuente 6. Mecanismos de gelificación de las pectinas.<sup>22</sup> Modificado por el autor.

Gelificación para pectina de bajo metoxilo: En este caso se emplea un ión divalente, como el  $\text{Ca}^{+2}$ , para que se formen enlaces con los grupos ácidos libres, generándose la red tridimensional. En la siguiente figura se esquematiza este tipo de interacción:

Figura 9. Mecanismo de gelificación de la pectina de bajo metoxilo.



Fuente 7. Mecanismos de gelificación de las pectinas. <sup>22</sup> Modificado por el autor.

En general, a mayor grado de esterificación mayor es la temperatura de gelificación y mayor será la rapidez con que gelifique. Por ello, las pectinas con alto grado de metoxilación, se conocen como pectinas rápidas. Para cada tipo de pectina con cierto grado de metoxilación, existen unos parámetros óptimos de concentración de azúcar y pH, o cantidad de iones divalentes a emplear.

La pectina se emplea en la industria de alimentos para formación de geles en mermeladas, conservas, postres frutales, entre otros; también, se emplea como espesante. En los últimos años <sup>23</sup>, se han realizado investigaciones en el campo de la farmacéutica, ya que los geles de pectina son biocompatibles, por lo cual, se pueden generar aplicaciones en encapsulamiento con liberación controlada de fármacos, por otro lado, diversas investigaciones han determinado que al realizar modificaciones químicas al hidrogel de pectina, es posible obtener un material biomédico, con el cual, se liberen moléculas activas o células.

- **Agar – Agar.** <sup>24</sup> Esta sustancia se encuentra en la pared celular de las algas agorofitas, es un heteropolisacárido compuesto por agarosa, un polímero neutro y agarpectina, un polímero cargado con sulfatos. La agarosa, consiste en cadenas repetidas de unidades alternadas de  $\beta$ -1,3-D-galactosa y  $\alpha$ -1,4-3,6-anhidro-L-galactosa. La agarpectina, es un polisacárido sulfatado compuesto de agarosa y cierto porcentaje de éster de sulfato, ácido-D-glicurónico y una pequeña cantidad de ácido pirúvico. La composición porcentual de estos dos polímeros depende del tipo de agarosa.

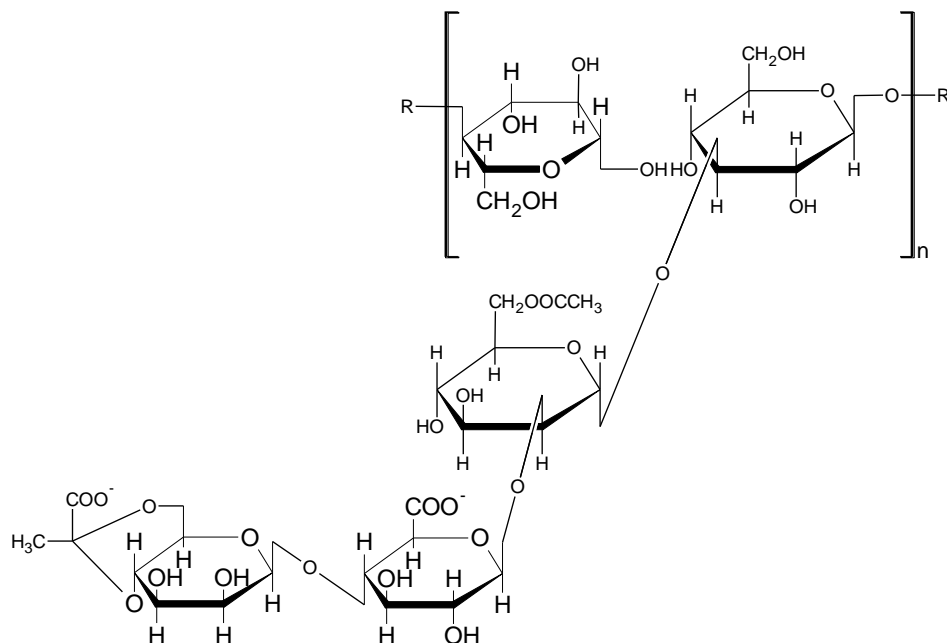
Esta sustancia se caracteriza por ser insoluble en agua fría, pero al calentar, el sistema presenta la capacidad de absorber gran cantidad del agua, formando un gel. El gel generado por el agar -agar, es rígido, posee forma definida, y punto de fusión y gelificación definidos. Las características del gel, dependen de la concentración, tiempo, pH y contenido de azúcar en el medio. El agar - agar posee

carga levemente negativa, por lo cual su estabilidad depende de la hidratación y la carga eléctrica, para ello debe evitarse altas temperaturas y pH inferiores a 6.

Los hidrogeles de agar se emplean en la industria de alimentos como gelificantes, también, son usados para generar cultivos de tejido celular, ya que no hay enzimas que lo degraden y en geles para electroforesis de ADN.

- **Goma Xantana.** <sup>25, 26</sup> Es un polisacárido generado de manera industrial, por fermentación de cultivos de microorganismos del *Xantomonas campestris*. Su estructura está constituida por  $\beta$ -1,4-glucosa, cada segunda unidad de esta, está conectada a una manosa, ácido glucorónico y manosa. La manosa más cercana a la cadena principal tiene un éster de ácido acético en el carbono seis, y la manosa final tiene un enlace entre los carbonos seis y cuatro al segundo carbono del ácido pirúvico (Ver figura 10).

Figura 10. Estructura del goma-xantana.



Fuente 8. Carbohidrato o glúcidos- estructura química. <sup>27</sup> Modificado por el autor.

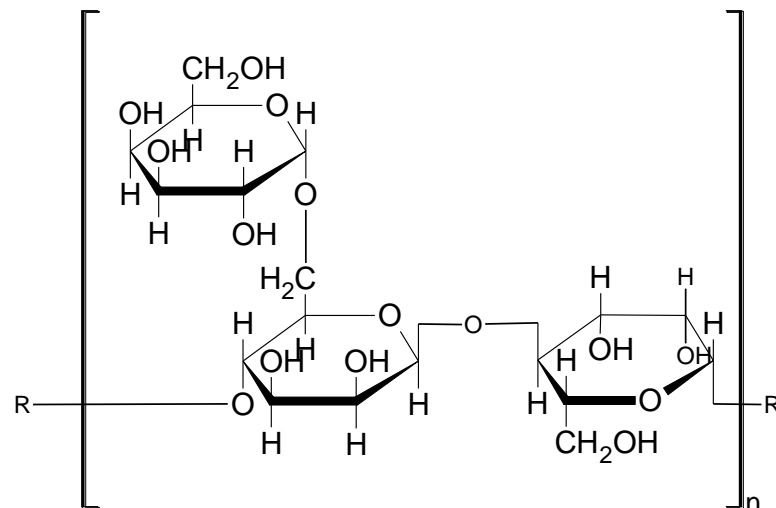
La goma xantana es estable al calor y a soluciones fuertemente ácidas o básicas, presenta una viscosidad estable en un amplio intervalo de temperatura, es soluble en agua fría y caliente, y en solventes orgánicos a temperaturas mayores a 65 °C, en solución es neutro.

En la industria de alimentos, se emplea como espesante y estabilizante. También se emplea para suspender y estabilizar agua.

- **Goma Guar.** <sup>28, 29</sup> Esta sustancia se obtiene de las semillas de legumbre *Cyamopsis tetragonolobus*, se emplea como agente espesante, estabilizante o agente gelificante, en la industria de alimentos, farmacéutica, biomédica, química y productos cosméticos.

Estructuralmente, es un polisacárido compuesto de cadenas lineales de (1,4)- $\beta$ -D-manosa unidas a galactosa, a través de enlaces (1,6). Sus cadenas son largas y semiflexibles, ya que la cadena lineal de manosa presenta una conformación de hélice.

Figura 11. Estructura de goma guar.



Fuente 9. Carbohidrato o glúcidos- estructura química <sup>16</sup>. Modificado por el autor.

En solución acuosa, la goma guar se hidrata rápidamente incrementando la viscosidad a concentraciones muy bajas de la misma (inferior a 1%), presentando una viscosidad estable en un amplio intervalo de pH (1 - 10.5). En general, la viscosidad de la solución de goma guar, depende de la temperatura, tiempo, concentración, fuerza iónica y agitación.

**Proteínas.** <sup>30, 31</sup> Son biopolímeros de aminoácidos presentes en múltiples procesos de los seres vivos. Las sustancias de origen proteico, tales como colapiscis y gelatina, presentan la propiedad de gelificar en medio acuoso a medida que se calienta el sistema.

En el proceso de gelificación, las proteínas se someten a calentamiento, donde ocurre la desnaturalización y por ende ocurre una agregación ordenada de las moléculas, generando una red continua. El gel que se forma, presenta interacciones no covalentes, como los puentes de hidrogeno, los cuales aportan estabilidad y fortalecimiento a la estructura; y, interacciones covalentes, como los puentes disulfuro, que contribuyen a la formación inicial y la organización.

El agua que está presente en el gel se encuentra retenida de manera física, por lo cual es posible eliminarla. La retención de agua se incrementa, cuando se ionizan los grupos funcionales presentes en la proteína.

En la formación de redes proteicas, los factores que contribuyen son: interacciones entre proteínas, interacción con el disolvente, fuerza de atracción y repulsión entre cadenas polipeptídicas, las etapas de calentamiento y enfriamiento.

Para determinar de manera cualitativa si una muestra es una proteína <sup>32</sup>, se puede implementar la prueba de Biuret. El reactivo de Biuret, consiste en una solución acuosa alcalina de hidróxido de sodio o potasio, y sulfato de cobre. Al adicionar la

muestra proteica, se genera un complejo de coordinación de color violeta, el cual permite identificar si la muestra es o no una proteína; la intensidad de dicho color indica la cantidad de enlaces peptídicos.

Un ejemplo de sustancia gelificante de origen proteico, es:

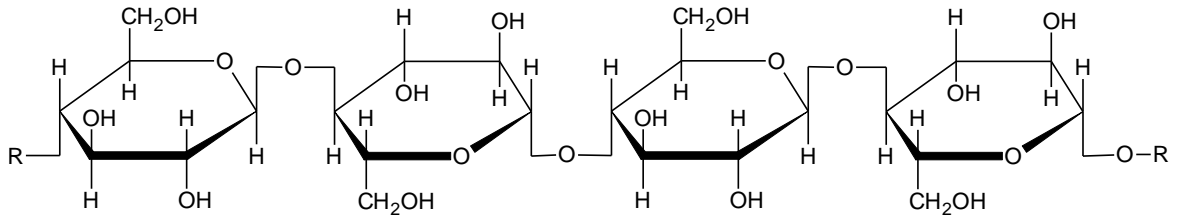
- **La Gelatina.**<sup>33</sup> Es una sustancia de origen animal compuesta por polímeros de proteínas; se obtiene por tratamiento térmico del colágeno de las pieles, huesos y algunos tejidos animales; principalmente bovinos, porcinos y peces. En la industria de alimentos, se emplea como emulsionante y estabilizante; en la industria farmacéutica y cosmética se emplea como excipiente de algunos medicamentos. También es empleado en ortopedia, dermatología, urología, oftalmología, entre otros.

Al disolver la gelatina en agua, esta absorbe el líquido y se hincha, formando un coloide fluido, a medida que el sistema se enfría, aumenta la viscosidad y se solidifica, formándose un gel, el cual, es reversible al aumentar la temperatura.

### 1.2.2 Sustancias semi-sintéticas

**Derivados de Celulosa.**<sup>18, 34</sup> La celulosa es un polisacárido de origen vegetal que conforma la pared celular de diferentes plantas. Estructuralmente, es una cadena lineal formada por  $\beta$ -glucosa y enlaces glucosídicos  $\beta$ -(1,4). Presenta una estructura lineal o fibrosa, en la cual, se dan múltiples interacciones de puentes de hidrógeno entre los hidroxilos de las diferentes cadenas, por lo cual son resistentes e insolubles al agua. Presenta grupos  $-\text{CH}_2\text{OH}$  alternados por arriba y por debajo del plano de la molécula.

Figura 12. Estructura de la celulosa.

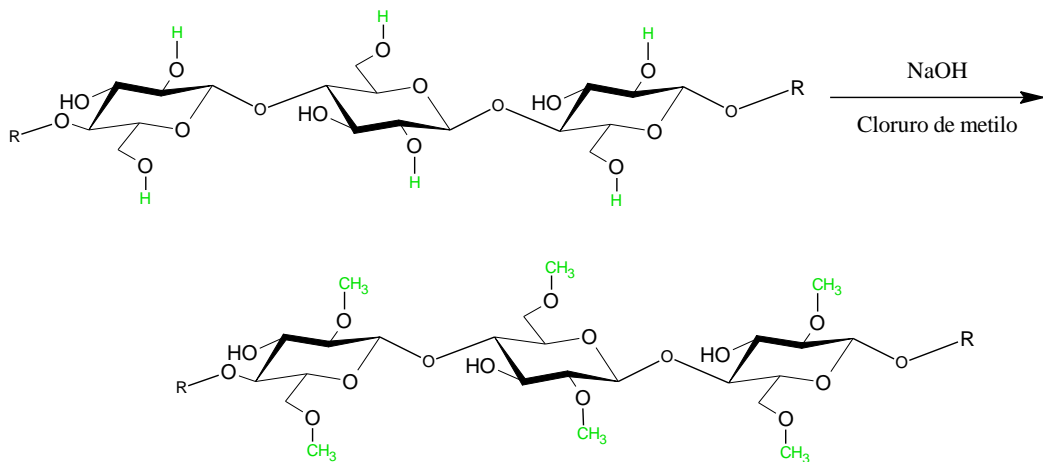


Fuente 10. Carbohidrato o glúcidos- estructura química <sup>18</sup>. Modificado por el autor.

La celulosa puede ser modificada químicamente, para generar sustancias con diversas propiedades, entre algunos ejemplos se tiene:

- **Celulosa microcristalizada.** Se obtiene por hidrólisis parcial de la celulosa, con ácido clorhídrico, liberándose partículas cristalinas. En medio acuoso este derivado gelifica, por lo cual, en la industria de alimentos se emplea como estabilizante, como modificador de textura y para controlar la formación de cristales en postres congelados.
- **Metilcelulosa.** Se obtiene por sustitución química de los grupos hidroxilo de las moléculas de glucosa presentes en la estructura de la celulosa, por grupos metilo (Ver figura 12).

Figura 13. Obtención de metilcelulosa, a partir de celulosa.



Fuente 11. Éteres de celulosa. <sup>35</sup> Modificado por el autor.

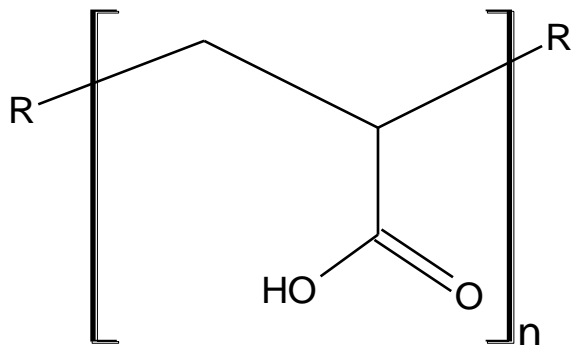
Esta sustancia actúa como gelificante en medio acuoso caliente, aproximadamente en el intervalo de 50 - 70 °C de temperatura, es estable en un amplio intervalo de pH, que va desde 3 a 11; se emplea como estabilizante y para realización de películas impermeables.

- **Carboximetilcelulosa.** Se obtiene por sustitución química de los grupos hidroxilo de las moléculas de glucosa presentes en la estructura de la celulosa, por grupos carboximetilos.

El grupo sustituyente es hidrófilo, por lo cual, se incrementa la solubilidad en agua, es estable en un gran rango de pH; se emplea para incrementar la viscosidad de la fase acuosa, para mejorar la textura, evitar la formación de cristales en postres fríos, como espesante, emulsionante y estabilizante de disoluciones de proteínas.

**1.2.3 Sustancias sintéticas. Carbopol.** <sup>36</sup> Es un polímero sintético de ácido acrílico, que en medio acuoso o algunos solventes orgánicos forma dispersiones. Se emplea como suspensor y gelificante, para cremas y pomadas que se aplican de forma oftálmica, rectal y tópica. Como emulsionante, para elaboración de emulsiones de uso tópico.

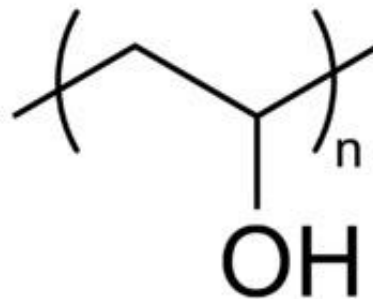
Figura 14. Estructura del carbopol.



El carbopol se hincha en presencia de agua y otros solventes polares, formando una dispersión, la cual, debe ser neutralizada con hidróxido de sodio, para formar geles neutros. Estos geles son ampliamente usados en la industria farmacéutica y cosmética, como protector cutáneo frente a grasas y disolventes orgánicos, como emulsionante para aumentar la viscosidad de los shampoos, como hidratante para productos oftalmológicos, y como gel conductor de ultrasonido o ecografías.

- **Alcohol de polivinilo (PVA).** <sup>8</sup> Es un polímero sintético no tóxico y biocompatible, cuya estructura se representa en la siguiente figura:

Figura 15. Estructura del alcohol de polivinilo.



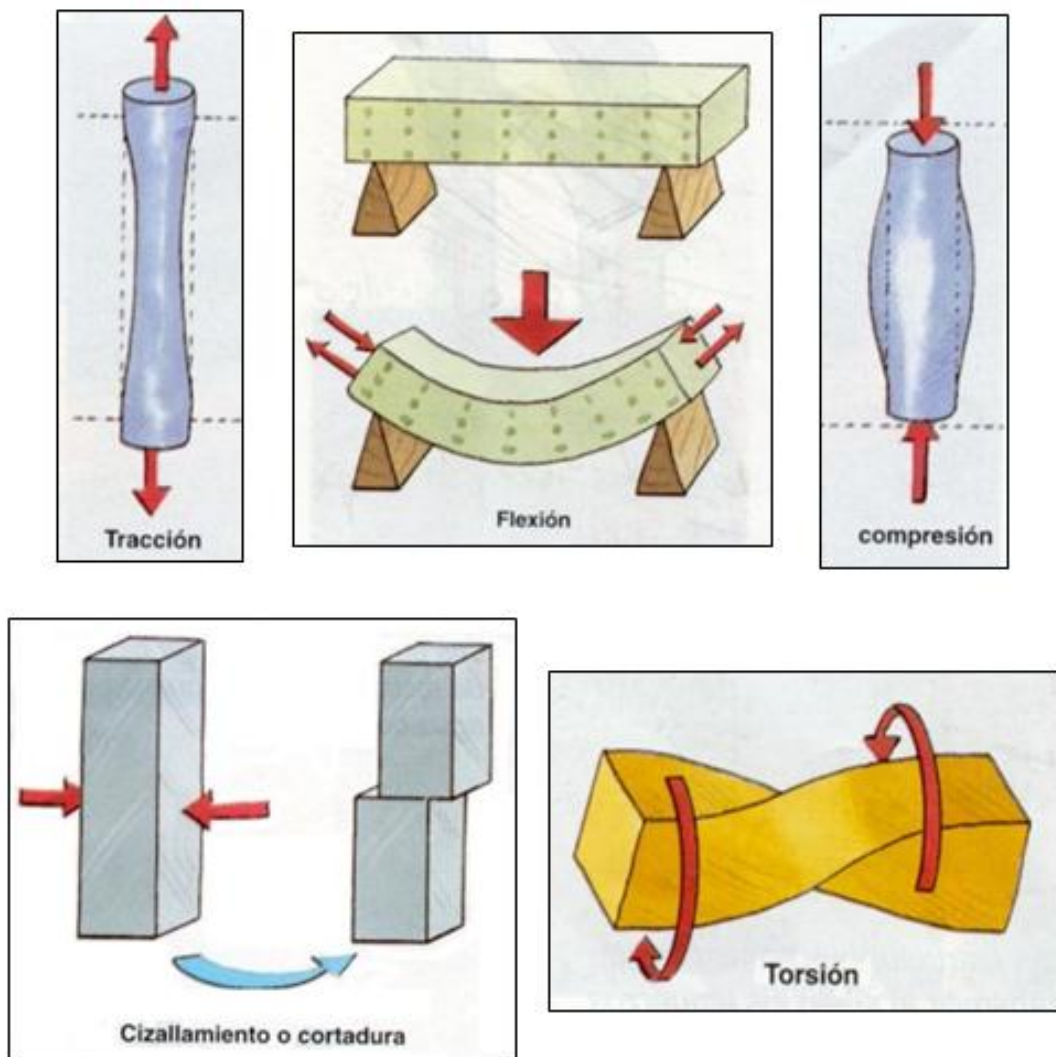
En agua caliente, el PVA forma un colide reversible, pudiéndose obtener hidrogeles físicos o químicos, donde las propiedades el mismo dependen de la concentración y la temperatura.

Esta sustancia se emplea como emulsionante y posee propiedades adhesivas, tiene resistencia a diferentes aromas, a productos grasos y varios disolventes. También, es empleado como material espesante en pinturas y shampoos, barrera de dióxido de carbono, masilla de juegos para niños, productos de higiene femenina, como refuerzo en la fibra de hormigón, realización de pegamento, gotas para ojos, etc.

### 1.3 ENSAYO MECÁNICO POR COMPRESIÓN

Al igual que las características de composición, estructura, comportamiento físico o químico; las propiedades mecánicas permiten diferenciar materiales, por medio de pruebas de tracción, flexión, compresión, cortadura o torsión; (ver figura 16).<sup>37</sup>

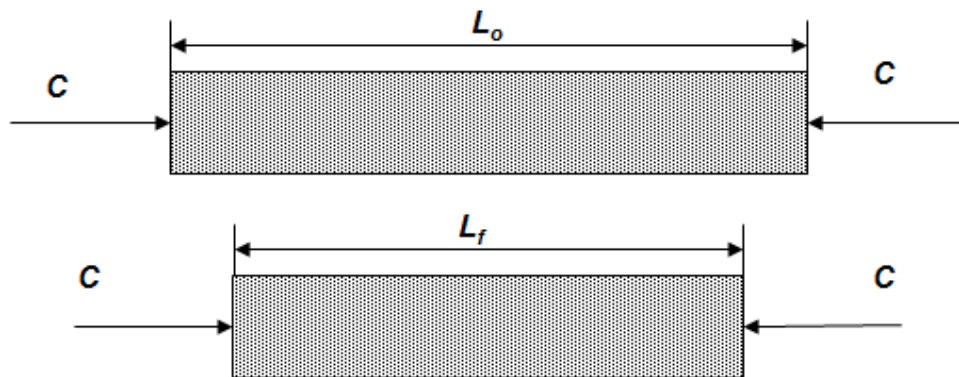
Figura 16. Ejemplo gráfico de los ensayos mecánicos para materiales.



Fuente 12. Propiedades mecánicas de los materiales.<sup>37</sup>

Todo material presenta una resistencia mecánica, que es la capacidad de resistir fuerzas aplicadas externamente; en el ensayo por compresión, se tiende a aplastar el material, donde las fuerzas que actúan, tienen la misma magnitud y sentidos opuestos hacia el mismo, tal como se describe en la siguiente figura:

Figura 17. Imagen de una barra sometida a carga de compresión.

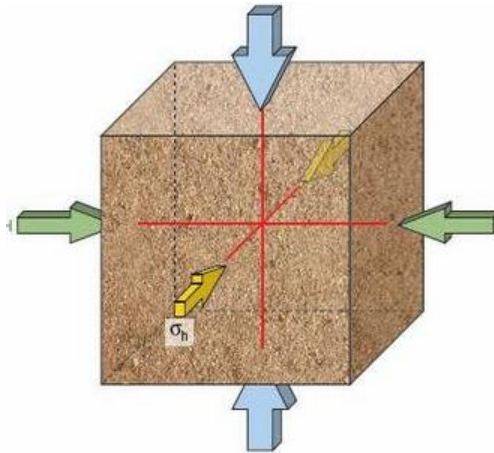


Fuente 13. Propiedades mecánicas de los materiales.<sup>37</sup>

Donde  $C$  es la fuerza aplicada para la compresión, y  $L$ , es la longitud. En esta imagen, se aplica la fuerza de compresión en el material en caras opuestas del mismo, y al aplicar la carga, el material pasa por un proceso de acortamiento.

De esta prueba se determina el esfuerzo a compresión, el cual, es el resultado de las presiones que existen dentro de un sólido deformable, caracterizándose por qué ocurre una reducción del volumen o un acortamiento en cierta dirección, ya que las fuerzas invertidas ocasionan que el material quede comprimido, también se considera, como el esfuerzo que resiste el acortamiento.

Figura 18.Descripción grafica de las posibles fuerzas de compresión.



Fuente 14. Propiedades mecánicas de los materiales. <sup>37</sup>

Determinando el esfuerzo de una material, es posible estudiar su comportamiento al aplicar fuerzas externas. En el caso del material plástico, el comportamiento mecánico, depende del tipo de monómero, el tipo de uniones, la estructura molecular que forman, el tamaño y la estructura química de las macromoléculas. En general, el material tipo plástico presenta baja rigidez, y se caracteriza por su gran elasticidad.

## 2. DISEÑO METODOLÓGICO

### 2.1 MATERIAL

Espectrofotómetro infrarrojo BRUKER (figura 19), baño de parafina, balanza, material de vidrio (tubos de ensayo, probeta, pipetas), y, una máquina universal de ensayos mecánicos tipo AUTOGRAPH AG-1 250 kN, marca Shimadzu (figura 20).

Figura 19. (a) Espectrofotómetro BRUKER (b) porta muestras del equipo.



Figura 20. Equipo AUTOGRAPH AG-1 250 kN, máquina universal de ensayos mecánicos.



## 2.2 REACTIVOS

En la siguiente tabla se describen las siglas de las sustancias gelificantes y los agentes entrecruzantes que se estudiaron:

Tabla 1. Siglas de los reactivos empleados.

Sustancia	Sigla	Característica
Almidón de yuca	AY	Gelificante de origen natural, polisacáridos
Pectina cítrica rápida	PCR	
Agar - agar	AA	
Goma xantana	GX	
Goma guar	GG	
Gelatina tipo C	GC	Gelificante de origen natural, proteínas
Colapiscis	CP	
Celulosa microcristalina	CM	Gelificante semisintético
Metilcelulosa A25	A25	
Carboximetilcelulosa	CMC	
Carbopol	CARB	Gelificante sintético
Alcohol de polivinilo	PVA	
Glicerina	GL	Agentes entrecruzantes
Etilenglicol	EG	
Hexilenglicol	HG	
Propilenglicol	PG	
Agua	H <sub>2</sub> O	Solvente

Entre otros reactivos empleados, se tiene: la solución de Molish, ácido sulfúrico concentrado, el reactivo de Biuret, hidróxido de sodio y acetato de plomo.

## 2.3 PROCEDIMIENTO

Inicialmente se realizó un estudio de las sustancias gelificantes, donde se corroboró si eran de origen proteico o un polisacárido; posteriormente, se determinaron espectros infrarrojos de los agentes entrecruzantes, para determinar su pureza. Se procedió al estudio de los gelificantes y agentes entrecruzantes, y, finalmente la determinación de propiedades mecánicas de los geles escogidos.

### 2.3.1 Pruebas cualitativas de sustancias gelificantes.

- **Ensayo de ignición**<sup>38</sup>: Se adicionó una pequeña cantidad de la sustancia gelificante en un crisol y se expuso a la llama de un mechero; se determinó el olor desprendido. Un olor acaramelado es característico de polisacáridos, para derivados de celulosa se identifica un olor a papel quemado y para proteínas se libera un olor putrefacto.
- **Prueba de Biuret**<sup>39</sup>: En un tubo de ensayo se adicionaron unos mililitros del reactivo de Biuret y una pequeña cantidad de la proteína, se mezcló y se calentó durante diez minutos. Se dejó enfriar y se observó el color formado. Un color violeta es indicio de prueba positiva.
- **Prueba de azufre reducido**<sup>39</sup>: En un tubo de ensayo se adicionó un poco de la proteína y unos mililitros de hidróxido de sodio 6M, se expuso a la llama de un mechero por unos segundos y se adicionó acetato de plomo. La formación de un color café es indicio de que la muestra presenta alto contenido de azufre.
- **Test de Molish**<sup>16</sup>: En un tubo de ensayo se adicionó un poco del polisacárido y un mililitro de la solución de Molish, se agitó y se adicionó por la pared del

tubo unas gotas de ácido sulfúrico concentrado. La formación de un anillo intermedio color morado es indicio de prueba positiva.

- **Determinación de espectro infrarrojo:** Para determinar las características de las sustancias gelificantes (AY, PCR, AA, GX, GG, GC, CP, CM, A25, CMC, CARB, PVA) se determinaron los espectros infrarrojos de cada una, y se analizaron los picos característicos, empleando la base de datos Spectroscopic Tools.<sup>40</sup>

**2.3.2 Análisis de agentes entrecruzantes.** Para analizar los agentes entrecruzantes (GL, EG, HG, PG), se determinó el espectro infrarrojo de cada uno y se compararon los picos característicos obtenidos con los descritos por la literatura, empleando la base de datos SBDS<sup>41</sup>; y se realiza el análisis de los grupos funcionales, empleando el Spectroscopic Tools.<sup>40</sup>

**2.3.3 Estudio de sustancias gelificantes y agentes entrecruzantes.** Se estudian un total de doce sustancias gelificantes no tóxicas: AY, PCR, AA, GX, GG, GC, CP, CM, A25, CMC, CARB, PVA. Cada una de ellas se diluyó en cuatro soluciones diferentes de glicol, GL, EG, HG, PG. Para ello, se preparan soluciones 1:1:1 en masa de gelificante /ag. entrecruzante /agua. En total se realizan 48 opciones de hidrogeles, representadas en la tabla 2.

Las mezclas se dejaron en calentamiento continuo a 70 °C por un intervalo de tiempo de 12 a 48 horas, se agitaron con regularidad y de ser necesario, se adicionó lentamente más cantidad de la solución ag. entrecruzante /agua correspondiente hasta obtener el hidrogel.

Finalizado el calentamiento, se dejaron reposar las soluciones, se seleccionaron las sustancias que presentaron la formación de un gel homogéneo y flexible; y se

prepararon en mayor cantidad para posterior estudio de propiedades físico mecánicas.

Tabla 2. Formulación de los hidrogeles a estudiar.

Tipo hidrogel	Sigla	Tipo hidrogel	Sigla	Tipo hidrogel	Sigla
AY	AY / GL / H <sub>2</sub> O	GG	GG / GL / H <sub>2</sub> O	A25	A25 / GL / H <sub>2</sub> O
	AY / EG / H <sub>2</sub> O		GG / EG / H <sub>2</sub> O		A25 / EG / H <sub>2</sub> O
	AY / HG / H <sub>2</sub> O		GG / HG / H <sub>2</sub> O		A25 / HG / H <sub>2</sub> O
	AY / PG / H <sub>2</sub> O		GG / PG / H <sub>2</sub> O		A25 / PG / H <sub>2</sub> O
PCR	PCR / GL / H <sub>2</sub> O	GC	GC / GL / H <sub>2</sub> O	CMC	CMC / GL / H <sub>2</sub> O
	PCR / EG / H <sub>2</sub> O		GC / EG / H <sub>2</sub> O		CMC / EG / H <sub>2</sub> O
	PCR / HG / H <sub>2</sub> O		GC / HG / H <sub>2</sub> O		CMC / HG / H <sub>2</sub> O
	PCR / PG / H <sub>2</sub> O		GC / PG / H <sub>2</sub> O		CMC / PG / H <sub>2</sub> O
AA	AA / GL / H <sub>2</sub> O	CP	CP / GL / H <sub>2</sub> O	CARB	CARB/GL/H <sub>2</sub> O
	AA / EG / H <sub>2</sub> O		CP / EG / H <sub>2</sub> O		CARB/EG/H <sub>2</sub> O
	AA / HG / H <sub>2</sub> O		CP / HG / H <sub>2</sub> O		CARB/HG/H <sub>2</sub> O
	AA / PG / H <sub>2</sub> O		CP / PG / H <sub>2</sub> O		CARB/PG/H <sub>2</sub> O
GX	GX / GL / H <sub>2</sub> O	CM	CM / GL / H <sub>2</sub> O	PVA	PVA / GL / H <sub>2</sub> O
	GX / EG / H <sub>2</sub> O		CM / EG / H <sub>2</sub> O		PVA / EG / H <sub>2</sub> O
	GX / HG / H <sub>2</sub> O		CM / HG / H <sub>2</sub> O		PVA / HG / H <sub>2</sub> O
	GX / PG / H <sub>2</sub> O		CM / PG / H <sub>2</sub> O		PVA / PG / H <sub>2</sub> O

**2.3.4 Preparación de hidrogeles seleccionados.** Finalizado el estudio de las sustancias gelificantes y los agentes entrecruzantes, se escogieron los geles que presentaron una consistencia homogénea y un color traslucido. En total se obtuvieron seis geles, los cuales, se prepararon a mayor escala conservando la relación 1:1:1 gelificante / ag. entrecruzante / agua. La temperatura del baño de parafina se conservó a 70 °C y se realizó constante agitación; los geles que finalizado el proceso de preparación presentaron demasiada firmeza, se les adicionó mayor cantidad de la solución gelificante / agua correspondiente. A dichos geles, se les realizó el análisis del espectro infrarrojo para determinar características estructurales y tipos de interacciones presentes en la red de los geles.

**2.3.5 Determinación de propiedades fisicomecánicas.** En esta etapa del procedimiento se estudiaron los geles seleccionados, los cuales, se calentaron

para traspasar a unos moldes con forma de cilindro, se dejaron enfriar y se extrajeron los tubos de gel.

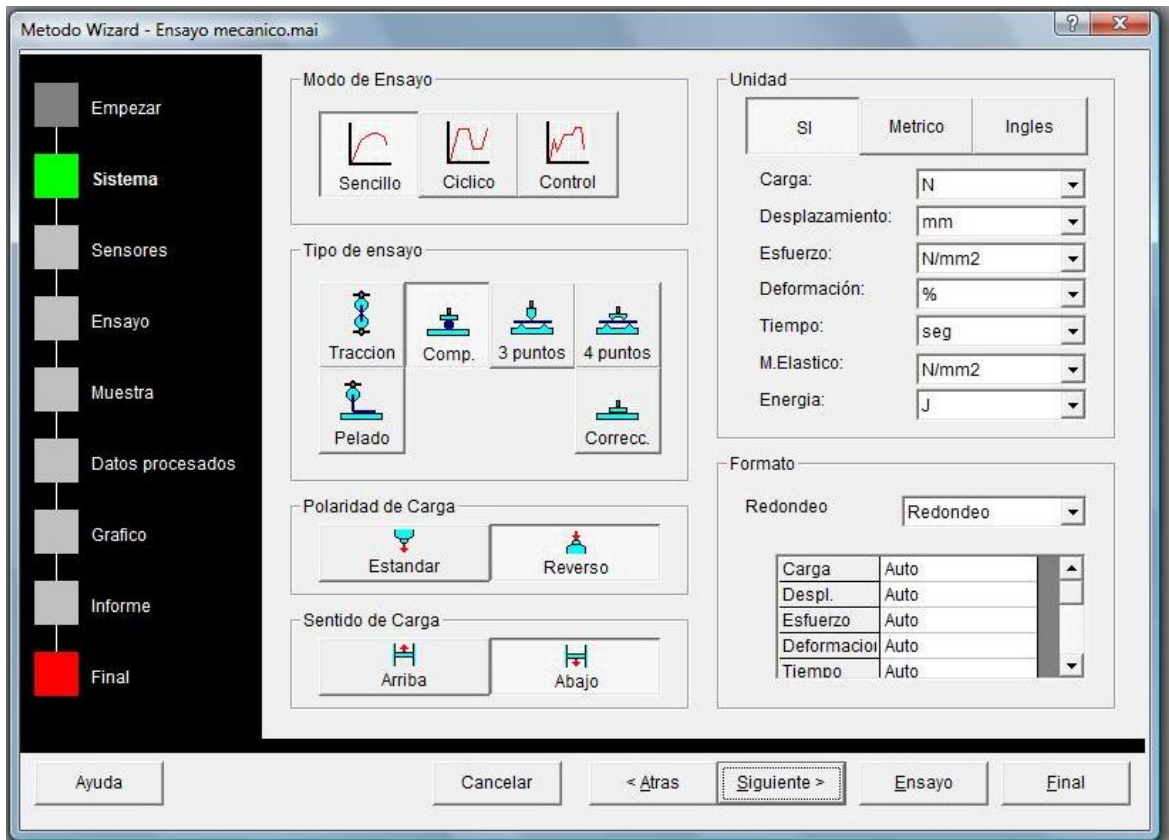
- **Densidad.** A los tubos de gel se les determinó la densidad, donde la masa se midió por medio de una balanza, y el volumen, se determinó por medio de una probeta con aceite, donde el menisco del aceite se encuentra a cierto valor; al adicionar el hidrogel, se determinó el desplazamiento final, y por diferencia de volúmenes, se calculó el volumen del hidrogel.
- **Propiedades mecánicas.** Se determinaron propiedades mecánicas por compresión empleando la maquina universal para ensayos mecánicos, AUTOGRAPH AG-1 250 kN, (ver figura 20); con la cual, se midió el esfuerzo y la deformación del material, al aplicar cierta fuerza sobre él.

El programa que se manejó en el equipo de ensayos mecánicos, se denomina TRAPEZIUM, en él, se realizó la programación del método, en la figura 21, es posible observar el pantallazo de los componentes de dicha programación, en la siguiente tabla se describe los datos ingresados:

Tabla 3. Componentes de la programación del método en TRAPEZIUM y las características seleccionadas.

Componente	Características
<b>Sistema</b>	Modo de ensayo: sencillo Tipo de ensayo: compresión
<b>Sensores</b>	Por defecto del programa
<b>Ensayo</b>	Velocidad: 5mm/min
<b>Muestra</b>	Forma: cilíndrica Material: Plástico Datos de longitud y diámetro de la muestra.
<b>Datos Procesados</b>	Por defecto del programa
<b>Grafico</b>	Por defecto del programa

Figura 21. Pantallazo de los componentes de la programación del método, en TRAPEZIUM.



### 3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 3.1 PRUEBAS CUALITATIVAS DE SUSTANCIAS GELIFICANTES

Por medio de estos ensayos fue posible corroborar el origen de cada una de las sustancias gelificantes, realizando ensayos cualitativos respecto a las moléculas e información reportada en la literatura para cada sustancia. Los resultados obtenidos y el análisis de los mismos se describen a continuación:

**3.1.1 Ensayo de ignición** Finalizado el proceso de ignición, los olores y características observadas se describen en la siguiente tabla:

Tabla 4. Características de los resultados obtenidos en el ensayo de ignición.

Sustancia	Características
AY PCR AA GX GG	Al exponer estas sustancias a la llama, inicialmente se hinchan tomando un color café, la llama se torna color anaranjado, se libera humo con un olor ligeramente acaramelado. Finalizado el proceso queda un residuo color negro.
CM A25 CMC	Al exponer estas sustancias a la llama, inicialmente se hinchan tomando un color café y liberan humo con olor a papel quemado. La llama se torna color anaranjado. Finalizado el proceso queda un residuo color negro.
GC CP	Al exponer estas sustancias a la llama, empiezan a salpicar sin perder su estado sólido, posteriormente toman un color café y liberan humo con olor putrefacto. Finalizado el proceso queda un residuo.

Las sustancias <sup>38</sup> que al incinerarse liberaron gran cantidad de humo y produjeron cambio en el color de la llama del mechero, de azul a anaranjado, es debido a presencia de gran cantidad de carbonos en la molécula. El hecho de que inicialmente la muestra se tornará color café y se hinchara, y que al finalizar el proceso quedara un residuo, es indicio de que las muestras son polisacáridos. Este es el caso del: PCR, AY, GX, AA, GG, A25, CMC, CM. Por medio de esta

prueba también fue posible corroborar que las sustancias A25, CMC y CM; son derivados de la celulosa, ya que liberaron un olor a papel quemado.

Con respecto a las sustancias GC y CP; la liberación de un olor putrefacto es debido a que las muestras son proteínas, por ende, al incinerarse, el olor es generado por el desprendimiento de amoníaco, debido a los grupos aminos presentes en los monómeros de dichas proteínas.

**3.1.2 Prueba de Biuret.** Esta prueba se realizó para las sustancias gelificantes de origen proteico, la GC y la CP, las soluciones de dichas sustancias son incoloras, al adicionar el reactivo de Biuret se tornó azul y transcurridos unos segundos se tornó color violeta (ver figura 23). Por ello, el resultado de esta prueba fue positivo para ambas sustancias.

Este cambio de color es generado <sup>32, 39</sup>, ya que, el reactivo de Biuret es una mezcla de hidróxido de sodio y sulfato de cobre, el medio alcalino destruye los grupos carbamida de los enlaces peptídicos y se genera un complejo de coordinación entre los iones cobre y los pares de electrones libres del nitrógeno que hace parte del enlace peptídico destruido (ver figura 24), dicho complejo es color violeta.

Figura 22. Resultado de la prueba de Biuret para la GC y CP.

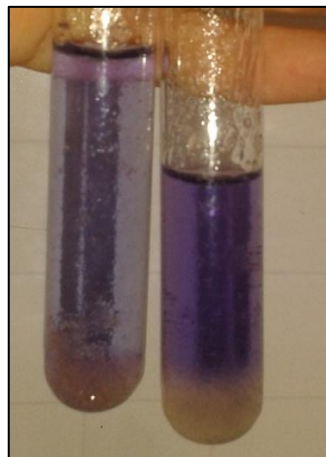
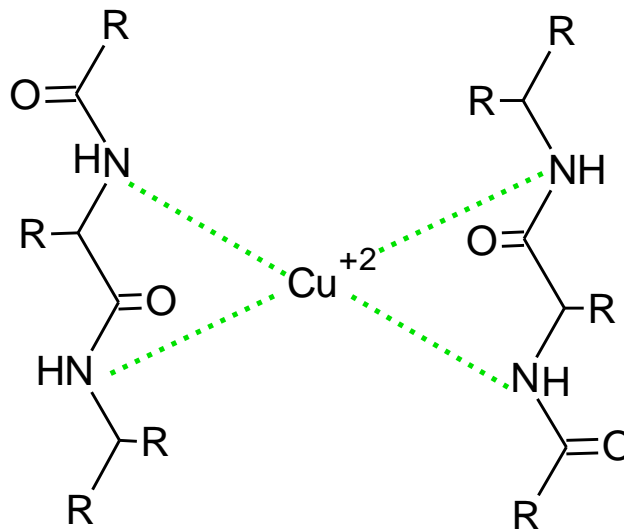


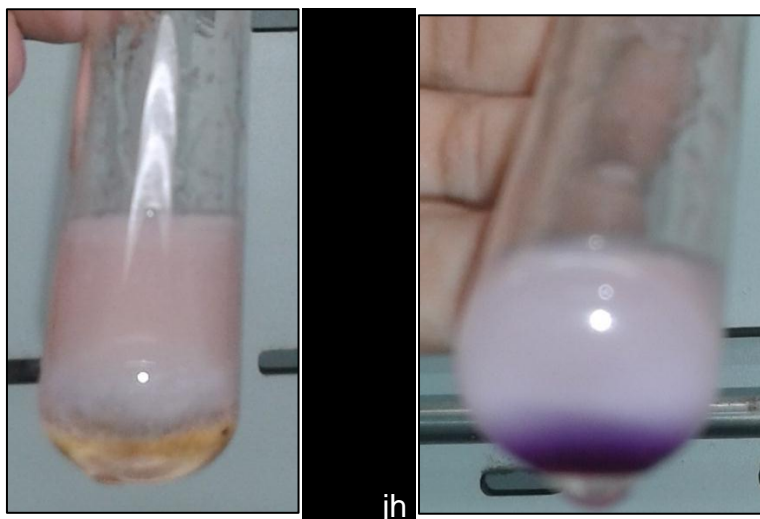
Figura 23. Representación del complejo de coordinación.



**3.1.3 Prueba de azufre reducido.** Esta prueba se aplicó en la sustancias gelificantes de origen proteico, la GC y la CP. En este caso, al diluir las sustancias en el hidróxido de sodio la solución era incolora, al calentar y posteriormente adicionar el acetato de plomo se observó de manera momentánea la formación de una solución lechosa que posteriormente se tornó incolora nuevamente; por ende esta prueba se considera negativa para ambas sustancias, esto puede ser debido a que la GC y la CP, presentan una concentración baja de azufre en su estructura.

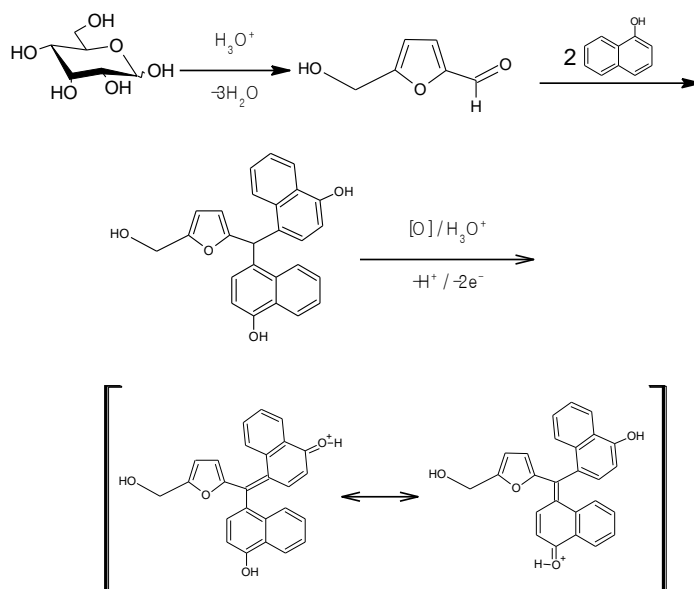
**3.1.4 Test de Molish.** Esta prueba se realizó a las sustancias gelificantes del tipo polisacárido: AY, PCR, AA, GX, GG, A25 y CMC; en todos los casos, la solución inicial es incolora, al adicionar el reactivo de Molish se tornó color vino tinto, y al agregar las gotas del ácido sulfúrico se observó la formación del anillo color violeta; por ende esta prueba es positiva.

Figura 24. Test de Molish. Izquierda, solución al adicionar el reactivo de Molish. Derecha, al agregar el ácido sulfúrico.



Esta reacción <sup>16</sup> es debido a que los polisacáridos en medio ácido se deshidratan, formando furfural o hidroxifurfural, los cuales, al reaccionar con el naftol forman una molécula de color violeta. A continuación se describe de manera abreviada el mecanismo de reacción:

Figura 25. Mecanismo de reacción del test de Molish.



Con respecto a la CM, el resultado fue negativo, pudiendo ser debido a que esta sustancia se obtiene por despolimerización de la celulosa, por ende no presenta largas cadenas de polisacáridos

**3.1.5 Determinación de espectro infrarrojo.** Debido a que los sólidos gelificantes no reportan espectro IR, se realizó un análisis de las señales características, empleando el *Spectroscopic Tools*<sup>40</sup>; y relacionando con la estructura molecular reportada por la literatura.

- **Polisacáridos: AY, PCR, AA, GX y GG.** Las principales señales de cada una de las sustancias y la intensidad de las mismas, se describen a continuación:

Tabla 5. Señales características del espectro IR de AY, (ver Anexo A).

IR experimental		
Señal	Longitud de onda [cm <sup>-1</sup> ]	[ ] Intensidad (%)
1	998	60-65
2	3299	80-85
3	1078	80-85
4	1150	85-90
5	1338	90-95
6	929	90-95
7	860	95-100
8	764	95-100

Tabla 6. Señales características del espectro IR de PCR, (ver Anexo B).

IR experimental		
Señal	Longitud de onda [cm <sup>-1</sup> ]	[ ] Intensidad (%)
1	1049	75-80
2	990	85-90
3	911	85-90
4	3326	85-90
5	1105	85-90
6	867	85-90
7	1235	90-95
8	1345	90-95
9	1434	90-95

Tabla 7. Señales características del espectro IR de AA, (ver Anexo C).

IR experimental		
Señal	Longitud de onda [cm <sup>-1</sup> ]	[ ] Intensidad (%)
1	1046	75-80
2	3399	85-90
3	927	85-90
4	1224	90-95
5	843	90-95
6	773	90-95
7	1426	95-100

Tabla 8. Señales características del espectro IR de GX, (ver Anexo D).

IR experimental		
Señal	Longitud de onda [cm <sup>-1</sup> ]	[ ] Intensidad (%)
1	1021	55-60
2	3301	75-80
3	1603	80-85
4	1405	85-90
5	791	95-100

Tabla 9. Señales características del espectro IR de GG, (ver Anexo E).

IR experimental		
Señal	Longitud de onda [cm <sup>-1</sup> ]	[ ] Intensidad (%)
1	1016	75-80
2	3314	85-90
3	809	90-95
4	870	90-95
5	1376	90-95

Al analizar los espectros de cada uno de los polisacáridos y por medio del *Spectroscopy tools*, se determinó que las principales señales de cada sustancia son características de los carbohidratos, donde de acuerdo al intervalo de absorción, las señales se deben a:

En el intervalo de 1200 a 1460, se debe a la vibración de la deformación de los enlaces C-H y O-H; como lo son los picos 7,8 y 9 del PCR; y, los picos 4 y 7 del AA.

En el intervalo de 1000 a 1160, se debe al estiramiento del enlace C-O; como lo son los picos 3 y 4 del AY, los picos 1 y 5 del PCR, el pico 1 del AA, la GX y la GG. Esta señal es bastante pronunciada en los carbohidratos, lo cual, corroboró el origen de las sustancias analizadas, ya que sus señales de mayor intensidad correspondieron a dicho intervalo.

En el intervalo de 730-960, se debe a la deformación del enlace C-H; como lo son los picos 6,7 y 8 del AY, los picos 3 y 6 del PCR, los picos 3, 5 y 6 del AA, el pico 5 de la GX y los picos 3 y 4 de la GG.

Con respecto a la banda ancha observada por encima de los  $3250\text{ cm}^{-1}$ , tal como la señal 2 del AY, AA, GX y GG; y la señal 4 del PCR; se debe a los puentes de hidrogeno intermoleculares de los grupos -OH.

- **Proteínas: GC y CP.** Las principales señales de cada una de las sustancias y la intensidad de las mismas, se describen a continuación:

Tabla 10. Señales características del espectro IR de GC, (ver Anexo F).

IR experimental		
Señal	Longitud de onda [ $\text{cm}^{-1}$ ]	[ ] Intensidad (%)
1	1630	82-84
2	1530	84-86
3	3275	88-90
4	1446	90-92
5	1332	92-94
6	2109	96-98

Tabla 11. Señales características del espectro IR de CP, (ver Anexo G).

IR experimental		
Señal	Longitud de onda [cm <sup>-1</sup> ]	[ ] Intensidad (%)
1	1630	84-86
2	1527	86-88
3	3294	90-92
4	1445	90-92
5	1332	92-94
6	557	94-96
7	2110	96-98

Al analizar los espectros de cada uno de las sustancias y por medio del *Spectroscopy tools*, se determinó que las principales señales son características de los polipéptidos, donde de acuerdo al intervalo de absorción, las señales se deben a:

En el intervalo de 3280 a 3330, se debe a los puentes de hidrogeno intermoleculares de los -N-H; como lo es el pico 3 en ambas sustancias.

La señal 1630 es debida al estiramiento del doble enlace -CO, en cada una de la sustancias es el pico número 1, esta señal es la más intensa en polipéptidos, lo que corroboró que las sustancias son de origen proteico.

En el intervalo de 1520 a 1525, se debe a la deformación del enlace -N-H, como lo es el pico 2 en ambas sustancias. Esta señal también es de gran intensidad para polipéptidos.

Con respecto a la señal 4 en cada una de las sustancias, esta pudo ser debida a los fragmentos amida N-CH<sub>3</sub>, generados por la deformación del enlace C-H.

Las señales 5 y 6 de la GC, y las señales 5, 6 y 7 de la CP; pueden ser debidas a presencia de aminoácidos libres.

- **Derivados de celulosa: CM, A25 y CMC.** Las principales señales de cada una de las sustancias y la intensidad de las mismas, se describen a continuación:

Tabla 12. Señales características del espectro IR de CM, (ver Anexo H).

IR experimental		
Señal	Longitud de onda [cm <sup>-1</sup> ]	[ ] Intensidad (%)
1	682	75-80
2	1224	75-80
3	1435	80-85
4	1504	80-85
5	1609	85-90
6	1369	85-90
7	602	85-90
8	1326	85-90
9	3158	90-95

Tabla 13. Señales características del espectro IR de A25, (ver Anexo I).

IR experimental		
Señal	Longitud de onda [cm <sup>-1</sup> ]	[ ] Intensidad (%)
1	1054	55-60
2	3381	80-85
3	1638	85-90
4	946	85-90
5	565	85-90
6	2926	85-90
7	1449	90-95

Tabla 14. Señales características del espectro IR de la CMC, (ver Anexo J).

IR experimental		
Señal	Longitud de onda [cm <sup>-1</sup> ]	[ ] Intensidad (%)
1	1022	75-80
2	1589	80-85
3	1413	90-95
4	3279	90-95
5	1323	90-95
6	2898	90-95

Al analizar los espectros de cada uno de las sustancias y por medio del *Spectroscopy tools*, se determinó que las principales señales son características de la celulosa, donde de acuerdo al intervalo de absorción, las señales se deben a:

En el intervalo de 3125 a 3575, se genera una banda ancha debido al estiramiento de los grupos -O-H; como lo es la señal 9 de la CM, la señal 2 del A25 y la señal 4 de la CMC.

El intervalo de 1600 a 1635, se debe a la deformación de los grupos -O-H; tal como el pico 5 en la CM, el pico 3 en el A25 y el pico 2 de la CMC.

La señal en el intervalo de 1435 a 1480, se debe a deformación de los fragmentos -CH<sub>2</sub>; tal como la señal 3 en la CM y la señal 7 en el A25.

Se tiene un pico en 1375, debido a la deformación del fragmento -CH-; como lo es la señal 6 de la CM.

En el intervalo de 1030 a 1320, se pueden observar varias señales, como lo son los picos 2 y 8 en la CM, el pico 1 en el A25 y, el pico 1 y 5 de la CMC.

Con respecto a la señal 1 y 7 en la CM, es una banda ancha característica del grupo funcional alcohol, generada por la deformación fuera del plano; y, las señales 4 y 6 de la A25, y las señales 3 y 6 de la CMC; son características de carbohidratos.

- **Carbopol:** es un polímero sintético de ácido acrílico, por ello sus señales pueden ser debidas a: las señales 1, 2 y 4 son características del grupo funcional ácido carboxílico, la primera generada por el estiramiento C=O, la

segunda por el fragmento -C-O- y la última es una banda ancha generada por el estiramiento del -O-H. La señal 5, se debe al fragmento -CH<sub>2</sub>-.

Tabla 15. Señales características del espectro IR de CARB, (ver Anexo K).

Señal	IR experimental	
	Longitud de onda [cm <sup>-1</sup> ]	[ ] Intensidad (%)
1	1701	55-60
2	1168	75-80
3	800	80-85
4	2940	85-90
5	1451	90-95

- **Alcohol de polivinilo:** es un polímero sintético, donde sus señales pueden ser debidas a: la señal 2 es generada por -CH<sub>2</sub>-, la señal 3 y 4, son generadas por puentes de hidrogeno intermoleculares de los grupos alcohol.

Tabla 16. Señales características del espectro IR de PVA, (ver Anexo L).

Señal	IR experimental	
	Longitud de onda [cm <sup>-1</sup> ]	[ ] Intensidad (%)
1	1591	40-45
2	1460	40-45
3	3230	55-60
4	3332	60-65

### 3.2 ANÁLISIS DE AGENTES ENTRECruzANTES

- **Glicerina:** Las principales señales del espectro IR experimental y su relación con el reportado por la literatura <sup>41</sup>, se describen en la siguiente tabla;

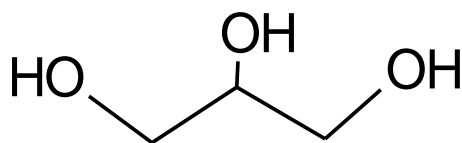
Tabla 17. Señales IR experimentales y el reportadas por la literatura, de la GL, (ver Anexos M y N).

Señal	IR experimental		IR literatura	
	Longitud de onda [cm <sup>-1</sup> ]	[ ] Intensidad (%)	Longitud de onda [cm <sup>-1</sup> ]	Intensidad (%)
1	1031	25-30	1043	4
2	3285	50-55		
3	1108	65-70	1110	7
4	1415	75-80	1416	17
5	483	75-80		
6	922	75-80	924	29
7	853	75-80	855	36

De acuerdo a la estructura (ver figura 27), las señales características del espectro de la glicerina, pueden ser debidas a:

La señal 1, 3 y 4 es características del grupo funcional alcohol, la primera se debe a la presencia de alcohol primario y las otras dos señales a la presencia de alcohol secundario. La señal 2 es generada por puentes de hidrogeno intermoleculares de los –OH. La señal 5 es característica de alcanos lineales.

Figura 26. Estructura de la glicerina.



- **Etilenglicol:** Las principales señales del espectro IR experimental y su relación con el reportado por la literatura<sup>41</sup>, se describen en la siguiente tabla;

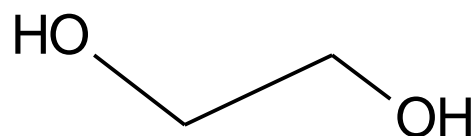
Tabla 18. Señales IR experimentales y el reportadas por la literatura, del EG, (ver Anexos O y P).

Señal	IR experimental		IR literatura	
	Longitud de onda [cm <sup>-1</sup> ]	[ ] Intensidad (%)	Longitud de onda [cm <sup>-1</sup> ]	Intensidad (%)
1	1034	30-35	1042	4
2	1083	50-55	1087	4
3	3296	60-65		
4	882	70-75	883	16
5	515	70-75	522	43
6	611	80-85		

De acuerdo a la estructura del etilenglicol (ver figura 28), las señales características de su espectro pueden ser debidas a:

Las señales 1, 2 y 6; son características de los alcoholes, siendo las señal 1 y 2, para alcoholes primarios. La señal 3 es generada por puentes de hidrogeno intermoleculares, debidos a los grupos -OH. La señal 5 indica que la sustancia es un alcano lineal.

Figura 27. Estructura del etilenglicol.



- **Hexilenglicol:** Las principales señales del espectro IR experimental y su relación con el reportado por la literatura<sup>41</sup>, se describen en la siguiente tabla;

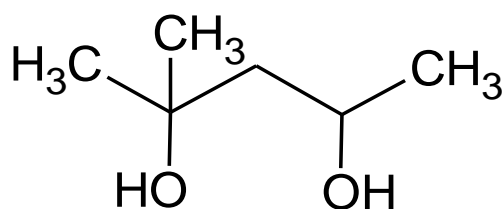
Tabla 19. Señales IR experimentales y el reportadas por la literatura, del HG, (ver Anexos Q y R).

Señal	IR experimental		IR literatura	
	Longitud de onda [cm <sup>-1</sup> ]	[ ] Intensidad (%)	Longitud de onda [cm <sup>-1</sup> ]	Intensidad (%)
1	1155	55-60	1158	11
2	2971	70-75	2971	4
3	1374	70-75	1376	21
4	3333	75-80	3347	8
5	1419	75-80	1420	35
6	2932	80-85	2933	20
7	836	80-85	837	46

Las señales características del hexilenglicol, de acuerdo a su estructura (ver figura 29) y el IR reportado por la literatura pueden ser debidas a:

La señal 1, 3, 5 y 7; son características del grupo funcional alcohol, la señal 1 y 7 es debida al alcohol terciario y las otras dos señales se deben a la presencia de alcohol secundario. La señal 2 es generada por los fragmentos R-CH<sub>3</sub>, la señal 4 es característica de puentes de hidrogeno intermoleculares de los grupos -OH, y la señal 6 es generada por el fragmento -CH<sub>2</sub>-.

Figura 28. Estructura de hexilenglicol.



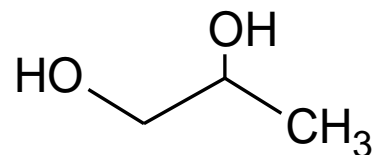
- **Propilenglicol:** Las principales señales del espectro IR experimental y su relación con el reportado por la literatura<sup>41</sup>, se describen en la siguiente tabla;

Tabla 20. Señales IR experimentales y el reportadas por la literatura, del PG, (ver Anexos S y T).

Señal	IR experimental		IR literatura	
	Longitud de onda [cm <sup>-1</sup> ]	[ ] Intensidad (%)	Longitud de onda [cm <sup>-1</sup> ]	Intensidad (%)
1	1040	35-40	1045	4
2	3319	60-65		
3	923	70-75	924	28
4	1137	70-75	1138	14
5	837	70-75	839	26
6	521	75-80	525	44
7	991	75-80	991	30
8	655	75-80	669	42
9	2972	75-80	2971	10
10	1377	80-85	1377	25

A partir de la estructura del propilenglicol, las señales características de su espectro, pueden ser debidas a:

Figura 29. Estructura del propilenglicol.



La señal 1, 8 y 10; son generadas por el grupo funcional alcohol, la 1 es debida al alcohol primario y la señal 8 al alcohol secundario. La señal 2 es generada por puentes de hidrogeno intermoleculares de los grupos –OH. La señal 4 y 9 es debida al fragmento R-CH<sub>3</sub>. La señal 6 indica que la sustancia es un alcano lineal.

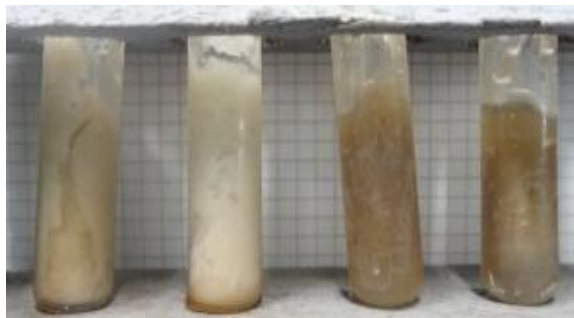
### 3.4 ESTUDIO DE SUSTANCIAS GELIFICANTES Y AGENTES ENTRECruzANTES

Finalizado el proceso de calentamiento y agitación manual, los resultados obtenidos se describen a continuación:

- **Almidón de yuca:** De acuerdo a la solución de ag. gelificante, se tiene que: en GL, EG y HG, se formaron geles color beige que al tacto se granulan; y, en PG, se formó un gel con similitud a una masa pegajosa. El hecho de que ninguna de las mezclas fuera prueba positiva en la formación de un gel consistente, pudo ser debido a que hubo exceso de agua, ya que, se manejó una concentración del 33,33%, en relación con los datos reportados por la literatura <sup>3</sup> donde se describe un máximo del 20%; este exceso de solvente pudo con llevar a que el gel se hidratara en gran cantidad, y a su vez, pudo haber formado enlaces por puentes de hidrogeno con la molécula de almidón, disminuyendo las interacciones entre las mismas o con el agente gelificante. Por ende, el resultado obtenido fueron soluciones pastosas.

En la siguiente fotografía se puede observar el resultado:

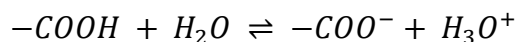
Figura 30. Geles de AY, con los diferentes agentes entrecruzantes, en el orden GL/EG/HG/PG.



En general <sup>12</sup>, el proceso que ocurre en la gelificación del almidón, se debe que al aplicar energía térmica, el agua puede atravesar la malla de la superficie del granulo, al continuar el calentamiento hay suficiente energía para que se rompan los enlaces hidrógenos de la estructura cristalina, ablandándola, por lo cual, el agua ingresa con mayor rapidez. La apertura de la superficie del granulo, con lleva a que se liberen cadenas de amilosa y estas pasan a formar parte de la dispersión.

Al enfriar, los gránulos que no se han roto se aglutinan por puentes de hidrogeno, ayudados por la amilosa libre, la cual, forma puentes de hidrógeno entre ellas y las ramificaciones de amilopectina. Formándose la red tridimensional de gránulos hinchados.

- **Pectina cítrica rápida:** De acuerdo a la solución de ag. gelificante, se tiene que: en GL se formó una masa pegajosa; en EG y HG, se formó un gel color ámbar que al tacto se asemeja a la cera de una vela y se granula; y, en PG, se observó la formación de una zona muy blanda y pegajosa, y en otra zona se obtuvo un gel muy endurecido que al tacto se granula, con similitud a la cera de una vela. La falta de formación de un gel consistente, pudo ser debido, a que la PCR es un tipo de pectina de alto metoxilo, por lo cual es necesario la presencia de azúcar y un manejo de pH ácido <sup>21, 22</sup>. Esto se explica, ya que, los grupos carboxílicos, son ácidos débiles que en solución acuosa presentan un equilibrio entre su forma ionizada y la no ionizada, tal como se muestra en la siguiente reacción:



Esta ionización, genera cargas negativas en las moléculas de la pectina, por lo cual, las moléculas se separan por repulsión de cargas.

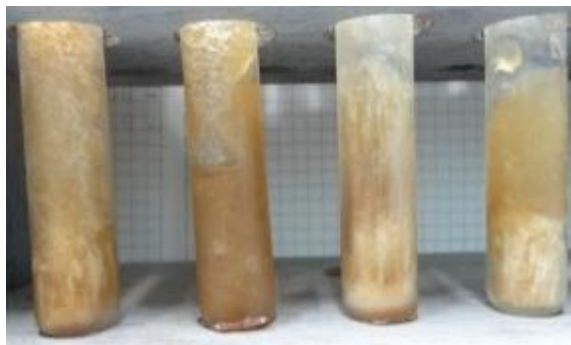
Al adicionar el ácido, el equilibrio se desplaza hacia la izquierda, ya que los protones ( $H^+$ ) reaccionan con algunos de los ácidos ionizados, reduciéndose la carga de las moléculas y por ende, ya no se repelen entre sí.

Por otro lado, es necesario adicionar cierta cantidad de azúcar al sistema, para que compita por el agua presente en el medio, desplazando a un más hacia la izquierda la anterior reacción, y de esta manera, se pueden formar puentes de hidrogeno con los ácidos no ionizados, generándose así la red tridimensional.

Debido a que no se aplicaron las condiciones ideales, es posible que las uniones físicas de las moléculas no se hayan favorecido, disminuyéndose la densidad de entrecruzamiento, por la repulsión de cargas y por ende, se generaron los sólidos de baja viscosidad.

Los resultados de los geles obtenidos con pectina se observan en la siguiente figura:

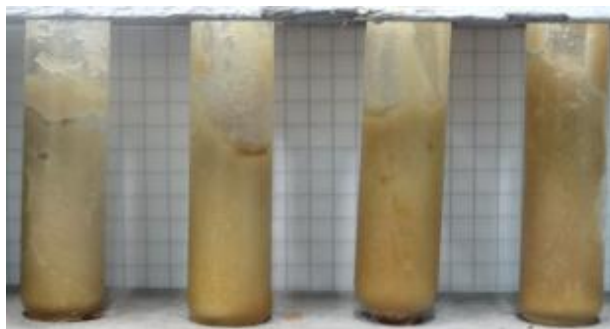
Figura 31. Geles de PCR, con los diferentes agentes entrecruzantes, en el orden GL/EG/HG/PG.



- **Agar-agar:** De acuerdo a la solución de ag. gelificante, se tiene que: con los cuatro glicoles, hubo formación de un fluido polvoriento y pastoso, color ámbar claro. Este resultado demostró ser negativo para la formación de un gel,

pudiendo ser debido, que para la síntesis de un hidrogel de AA <sup>24</sup>, es necesario emplear concentraciones muy bajas de esta sustancia (1%), manejar una temperatura muy inferior a los 85 °C y pH superior a 6. En cuanto a la temperatura, se manejó los 70 °C, por lo cual, puede considerarse que este factor no influyó; el pH fue neutro, alrededor de 7, pudiendo ser posible que el AA presentará ionización, ya que su molécula presenta carga levemente negativa, generando repulsión de cargas entre moléculas. Por otro lado, se manejó una concentración muy alta del soluto, siendo la relación de AA/ ag. gelificante / agua, de 1/1/1; este exceso de gelificante, con llevó a que el disolvente fuera muy escaso para incorporarse en las unidades de agarosa, fracción gelificante, y por ende, las interacciones entre las moléculas y con el agente entrecruzante fueran mínimas, por lo cual, posiblemente no se formó la estructura de doble hélice, que se genera por interacción de los átomos de hidrogeno ecuatoriales de la  $\alpha$ -1,4-3,6-anhidro-L-galactosa; los cuales, son los que forman la red polimérica para obtener un gel adecuado.

Figura 32. Geles de AA, con los diferentes agentes entrecruzantes, en el orden GL/EG/HG/PG.



- **Goma xantana:** De acuerdo a la solución de ag. gelificante, se tiene que: en GL se formó una masa muy blanda y pegajosa; en EG, se formó un gel color ocre que al tacto se granula y no es pegajoso; en HG, se formó una masa color ocre no pegajosa; y, en PG, se obtuvo un gel color ámbar que al tacto se granula y no es pegajoso. El resultado negativo en la obtención de un gel

consistente, pudo ser debido, que para generar hidrogeles de goma xantana, es necesario diluirla con anterioridad en agua fría con el fin de evitar aglomeraciones y posteriormente adicionar el disolvente, por otro lado, debe considerarse que esta sustancia se emplea como espesante y no como gelificante, y para que ocurra la formación de un gel, según el reporte en la literatura <sup>25</sup>, puede realizarse empleando pH superior a 10 y en presencia de iones calcio, o, pH 4 y presencia de iones aluminio; de esta manera se formaría un complejo con los iones, aumentando la densidad de entrecruzamiento y por ende la viscosidad.

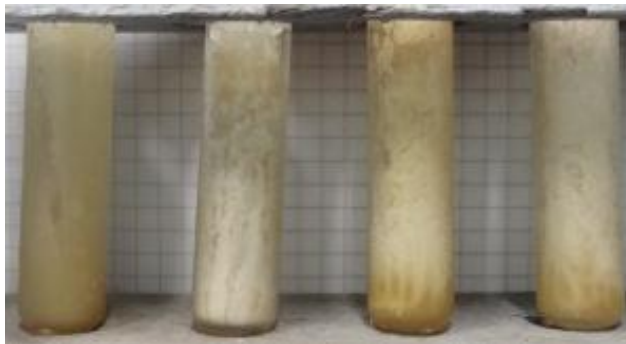
Figura 33. Geles de GX, con los diferentes agentes entrecruzantes, en el orden GL/EG/HG/PG.



**Goma guar:** De acuerdo a la solución de ag. gelificante, se tiene que: en GL, se formó un gel blando color ocre claro; en EG y PG, se formaron geles color ocre que se granulan con facilidad; y en HG, se formó una masa color ocre. (Ver figura 35). El resultado negativo en la obtención de geles consistentes, pudo ser debido, a que se manejó una concentración muy alta de la GG, 33.33%, en relación por lo reportado en la literatura <sup>28</sup> de alrededor del 3%, lo que generó una sobresaturación, con llevando a que el solvente no fuera el suficiente para incorporarse en la estructura de las cadenas poliméricas y permitir una mayor interacción entre las mismas y con el agente entrecruzante. Por otro lado, para formar un gel de GG es necesario emplear el ión borato y que el pH de la solución

sea inferior a 7, de esta manera se forma un compuesto de transición, por interacción entre el ión con los grupos hidroxilos que se encuentran en posición cis en la molécula de GG, aumentándose la densidad de entrecruzamiento y por ende la viscosidad.

Figura 34. Geles de GG, con los diferentes agentes entrecruzantes, en el orden GL/EG/HG/PG.



- **Proteínas, GC y CP:** Para ambos gelificantes, el resultado obtenido en la dilución con GL, EG y PG; fue la formación de geles consistentes, y con el HG, se formó un gel blando y opaco. (Ver figuras 36 y 37). En este caso, se obtuvieron de manera positiva hidrogeles con consistencia homogénea, por lo cual, se seleccionaron para ser preparados a mayor escala y realizar el estudio mecánico. Con respecto al gel de HG, fue rechazado, ya que su consistencia es muy blanda, esto pudo ser debido, a que en relación con las otras moléculas de los glicoles (ver figuras 27, 28 y 30), en el hexilenglicol (figura 29), los grupos hidroxilo presentan impedimento estérico, por ende, se ven disminuidas las interacciones, generando geles con baja viscosidad.

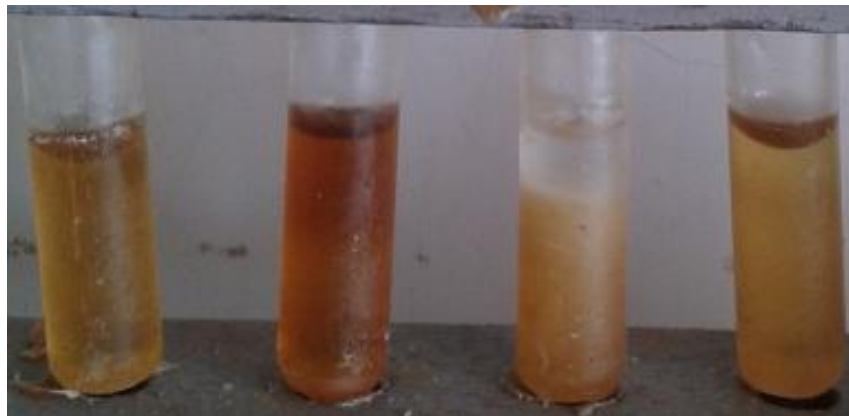
En general <sup>42</sup>, en el mecanismo de gelificación de las proteínas, al aplicar calor, la energía térmica genera la desnaturalización, por lo cual, el agua puede incorporarse entre las cadenas poliméricas, haciendo que se genere el hinchamiento, y permitiendo una mayor interacción entre las moléculas de la

proteína con el agente entrecruzante o entre ellas mismas, formándose así, la red tridimensional, y, al enfriar el sistema, se observó la formación del gel.

Figura 35. Geles de GC, con los diferentes agentes entrecruzantes, en el orden GL/EG/HG/PG.



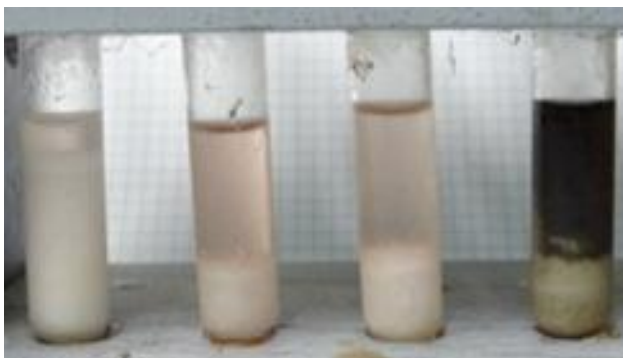
Figura 36. Geles de CP, con los diferentes agentes entrecruzantes, en el orden GL/EG/HG/PG.



- **Celulosa microcristalina:** De acuerdo a la solución de agente gelificante, se tiene que: en todos los glicoles se obtuvo un sobrenadante, para la GL y PG, de color rosa pálido, para el EG, color ámbar y para el HG, color blanco; y, también se observó un sólido, debido a que la CM se diluyó parcialmente (figura 38). En este caso, no ocurrió la formación de geles<sup>43</sup>, debido a que la CM, se obtiene de la despolimerización de la celulosa, lo que implica que no

presenta largas cadenas poliméricas que se puedan interconectar entre sí para generar la red tridimensional. Por otro lado, esta sustancia, solo se solubiliza de manera parcial en soluciones alcalinas, y el disolvente empleado en la práctica, de agua / glicol, presenta un pH alrededor de 7, esto explica el sólido no disuelto en los ensayos.

Figura 37. Geles de CM, con los diferentes agentes entrecruzantes, en el orden GL/EG/HG/PG.



- **Metilcelulosa A25:** De acuerdo a la solución de ag. gelificante, se tiene que: en GL se formó una masa color blanco que al tacto se granula; en EG se obtuvo una masa color beige, pegajosa; en HG, se formó un gel pegajoso color beige; y, en PG, se observó una masa pegajosa color beige. (Ver figura 39). La obtención de resultado negativo para la formación de geles, se debe, a que según el reporte en la literatura<sup>18</sup>, esta sustancia al calentar forma un gel, pero al enfriar retoma la viscosidad original. Esto puede ser debido, a que las moléculas de metilcelulosa presenta pocos grupos funcionales, ya que en su estructura (Ver figura 13), los grupos hidroxilos del monómero de glucosa han sido sustituidos por grupos metilo, los cuales, no son reactivos y no es posible generar entrecruzamiento, ocasionando que la viscosidad sea baja y por ende no se forme el gel.

Figura 38. Geles de A25, con los diferentes agentes entrecruzantes, en el orden GL/EG/HG/PG.



- **Carboximetilcelulosa:** De acuerdo a la solución de ag. gelificante, se tiene que: en GL, EG y PG, se formaron geles que al tacto se granulan; y en HG, se formó un sólido similar a la cera de una vela que se granula con facilidad. (Ver figura 40). La negativa en la obtención de geles consistentes, puede ser debido, a que según el reporte en la ficha técnica de este material <sup>44</sup>, debe emplearse una concentración máxima del 10%; en la práctica, se empleó una concentración del 33.33%. Este exceso de soluto, con llevo a que el disolvente no fuera el suficiente para incorporarse en las cadenas poliméricas, y por ende, se disminuyeron las interacciones entre las mismas y con el agente entrecruzante.

Figura 39. Geles de CMC, con los diferentes agentes entrecruzantes, en el orden GL/EG/HG/PG.



- **Carbopol:** De acuerdo a la solución de ag. gelificante, se tiene que: en GL, se formó un gel color ámbar claro que al tacto se granula; en EG, se formó un gel color beige pegajoso; y en HG y PG, se formaron geles muy blandos. (Ver figura 41). La negativa en la obtención de geles consistentes, puede ser debido, a que según el reporte en la ficha técnica de este material<sup>36</sup>, después de dispersar el CARB en agua, es necesario neutralizar la solución para formar un gel. Esto se debe a que en solución acuosa, los grupos ácidos del CARB se ionizan, generando que las cadenas poliméricas se distancien por repulsión de cargas; para evitar este efecto, se emplea la trietanolamina o hidróxido de sodio al 10%, hasta llevar la solución a pH superior de 6.

Figura 40. Geles de CARB, con los diferentes agentes entrecruzantes, en el orden GL/EG/HG/PG.



- **Alcohol de polivinilo:** En los cuatro glicoles, el PVA se diluyó en el disolvente. Esto pudo ser debido<sup>8</sup>, que para la formación de geles de PVA debe emplearse concentraciones del mismo entre 38 y 75%, para generar las suficientes interacciones; en este caso, se empleó un 33%, lo cual está por debajo del rango reportado por la literatura.

El resultado obtenido se observa en la siguiente figura:

Figura 41. Geles de PVA, con los diferentes agentes entrecruzantes, en el orden GL/EG/HG/PG.



### 3.5 PREPARACIÓN DE HIDROGELES SELECCIONADOS

Los geles seleccionados fueron los de gelatina tipo C y los de colapiscis, diluidos en glicerina, etilenglicol y propilenglicol. Las señales características de los espectros infrarrojos se describen a continuación:

Tabla 21. Señales características del espectro IR de GC/GL/H<sub>2</sub>O, (ver Anexo U).

Señal	IR experimental	
	Longitud de onda [cm <sup>-1</sup> ]	[ ] Intensidad (%)
1	3302	70-75
2	1638	75-80
3	1040	75-80
4	2924	75-80
5	1556	80-85
6	1457	85-90
7	1110	85-90
8	672	90-95
9	924	90-95
10	856	90-95

Tabla 22. Señales características del espectro IR de GC/EG/H<sub>2</sub>O, (ver Anexo V).

IR experimental		
Señal	Longitud de onda [cm <sup>-1</sup> ]	[ ] Intensidad (%)
1	1639	60-65
2	3294	60-65
3	1040	60-65
4	1082	70-75
5	1551	75-80
6	1452	80-85
7	2943	80-85
8	1246	85-90
9	667	85-90
10	882	90-95

Tabla 23. Señales características del espectro IR de GC/PG/H<sub>2</sub>O, (ver Anexo W).

IR experimental		
Señal	Longitud de onda [cm <sup>-1</sup> ]	[ ] Intensidad (%)
1	1639	65-70
2	3301	65-70
3	1042	65-70
4	1548	75-80
5	1452	80-85
6	1137	80-85
7	2923	80-85
8	1333	85-90
9	660	90-95
10	991	90-95
11	825	90-95
12	838	90-95

Tabla 24. Señales características del espectro IR de CP/GL/H2O, (ver Anexo X).

IR experimental		
Señal	Longitud de onda [cm <sup>-1</sup> ]	[ ] Intensidad (%)
1	1637	55-60
2	3300	60-65
3	1549	65-70
4	1040	70-75
5	1453	75-80
6	1243	80-85
7	1336	80-85
8	2943	80-85
9	669	80-85
10	924	90-95
11	858	90-95

Tabla 25. Señales características del espectro IR de CP/EG/H2O, (ver Anexo Y).

IR experimental		
Señal	Longitud de onda [cm <sup>-1</sup> ]	[ ] Intensidad (%)
1	1638	60-65
2	3300	60-65
3	1550	75-80
4	1454	80-85
5	1042	80-85
6	1082	80-85
7	1336	85-90
8	1246	85-90
9	665	90-95
10	882	90-95

Tabla 26. Señales características del espectro IR de CP/PG/H2O, (ver Anexo Z).

IR experimental		
Señal	Longitud de onda [cm <sup>-1</sup> ]	[ ] Intensidad (%)
1	3357	70-75
2	1637	70-75

3	1553	85-90
4	1041	90-95
5	1457	90-95
6	671	90-95
7	991	90-95
8	925	90-95
9	838	90-95

A partir de los datos del espectro de gelatina (GC) y colapiscis (CP), ver tabla 10 y 11, se observó que, en cada uno de los espectros de los hidrogeles, se tienen las tres principales señales de las sustancias de origen proteico, subrayadas con color verde. Estas señales son características de los péptidos, donde la señal alrededor de los 1630 es debida al estiramiento del doble enlace  $-CO$ , en el intervalo de 1520 a 1525, se debe a la deformación del enlace  $-N-H$ . Y, la señal de alrededor de los 1445, es debida a los fragmentos amida  $N-CH_3$ , generados por la deformación del enlace  $C-H$ .

Las señales subrayadas con color azul, son las que coinciden con el respectivo glicol en que fue diluido el hidrogel, para GL ver tabla 17, para EG ver tabla 18 y para PG ver tabla 20. Donde la señal entre los 1030 y 1085, es característica del grupo alcohol primario y la señal alrededor de 1110 se debe a alcohol secundario.

La señal del intervalo 3280 a 3330, subrayada en color gris, se debe a los puentes de hidrogeno intermoleculares de los  $-N-H$  y los  $-O-H$ .

En general, en el análisis de los espectros de los diversos hidrogeles, se observó que todos son muy similares entre sí, debido a que ambos provienen de gelificantes proteicos y se diluyen en glicoles. Para diferenciarlos, es posible mediante un grupo de señales específicas, generadas por los glicoles, estas señales son: para la GL, 922 y 853; para el EG, 882; y, para el PG, 803, 838 y

991. A partir de las señales mencionadas, es posible diferenciar los hidrogeles de un mismo tipo de gelificante, entre los glicoles diluidos.

Por medio del espectro IR, también fue posible corroborar que los geles obtenidos son del tipo físico, lo que permite que sean termorreversibles; esto indica que las interacciones entre las moléculas de gelificante y con el agente entrecruzante, son por medio de puentes de hidrogeno generados por grupos –OH y –NH.

### 3.5 DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS

**3.5.1. Densidad.** Para calcular la densidad de los geles, inicialmente se determinó la masa y posteriormente el volumen.

La masa de los cilindros de gel, se describe en la siguiente tabla, sin cifras significativas, debido a que la sensibilidad de la balanza es de un gramo:

Tabla 27. Medida de la masa de los cilindros de gel.

Tipo de Gel	Masa [g]
GC / GL/ H <sub>2</sub> O	46
GC / EG/ H <sub>2</sub> O	44
GC / PG/ H <sub>2</sub> O	9
CP / GL/ H <sub>2</sub> O	40
CP / EG/ H <sub>2</sub> O	43
CP / PG/ H <sub>2</sub> O	45

El volumen se determinó empleando una probeta con aceite, en la cual, se tiene en cuenta que el menisco inicial del aceite se encuentra en cierto valor, al adicionar el cilindro de gel, el volumen del aceite se desplaza, por ende la fórmula para calcular el volumen del gel, es:

$$V = V_f - V_o [mL]$$

Donde  $V_o$  es el volumen inicial del aceite y  $V_f$  es el volumen después de adicionar el gel. Reemplazando con los datos del gel GC/GL/H<sub>2</sub>O, (ver tabla 28), se tiene:

$$V = 128\text{mL} - 90\text{mL} = 38[\text{mL}]$$

En el cálculo de este dato no se emplearon cifras significativas, ya que la sensibilidad de la probeta es de 2mL.

En la siguiente tabla, se describen los volúmenes inicial, final y el del gel.

Tabla 28. Medida del volumen por el procedimiento de diferencia de volúmenes.

Tipo de Gel	$V_o$ [mL]	$V_f$ [mL]	V [mL]
GC / GL/ H <sub>2</sub> O	90	128	38
GC / EG/ H <sub>2</sub> O	90	128	38
GC / PG/ H <sub>2</sub> O	74	82	8
CP / GL/ H <sub>2</sub> O	90	122	32
CP / EG/ H <sub>2</sub> O	90	126	36
CP / PG/ H <sub>2</sub> O	90	130	40

Teniéndose los datos de masa y volumen, se determinó la densidad de los materiales empleando los datos de las tablas 27 y 28, los resultados se describen en la tabla 29.

Para el ejemplo del cálculo de la densidad, se parte de la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{m}{V} \left[ \frac{g}{\text{cm}^3} \right]$$

Donde  $\rho$  es la densidad,  $m$  la masa y  $V$  el volumen; reemplazando con los datos del gel GC/GL/H<sub>2</sub>O, ver tabla 29, y, considerando que un mL es equivalente a un cm<sup>3</sup>, se tiene:

$$\rho = \frac{45g}{36\text{cm}^3} = 1,25 \left[ \frac{g}{\text{cm}^3} \right]$$

En La siguiente tabla, se describen el valor de la masa, volumen y densidad de cada hidrogel; se emplearon tres cifras significativas, para poder observar las diferencias.

Tabla 29. Calculo de la densidad, por medio de la masa y el volumen.

Tipo de Gel	m [g]	V[cm <sup>3</sup> ]	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]
GC / GL/ H <sub>2</sub> O	46	38	1,211
GC / EG/ H <sub>2</sub> O	44	38	1,158
GC / PG/ H <sub>2</sub> O	9	8	1,125
CP / GL/ H <sub>2</sub> O	40	32	1,250
CP / EG/ H <sub>2</sub> O	43	36	1,194
CP / PG/ H <sub>2</sub> O	45	40	1,125

La densidad de los glicoles es: GL <sup>45</sup> 1,264 g/cm<sup>3</sup>, EG <sup>46</sup> 1,116 g/cm<sup>3</sup> y PG <sup>47</sup> 1,038 g/cm<sup>3</sup>; comparando con los resultados obtenidos para la densidad de los hidrogeles, se observó que los geles de una misma sustancia gelificante, presenta una relación directa entre la densidad del mismo y el glicol en el que se encuentra disuelto; en este orden, se tiene que los geles de mayor densidad son los diluidos en GL, seguidos por los de EG y finalmente los de PG. Este factor puede deberse a la cantidad de grupos hidroxilo presentes en los glicoles, donde la GL presenta 3 grupos; y, a pesar de que el EG y PG, presentan la misma cantidad de grupos hidroxilo, dos, el PG presenta mayor impedimento estérico. Por otro lado, se observó que los geles de CP, presentan mayor densidad en relación con los de GC, diluidos en el mismo tipo de glicol; esto puede ser debido a diferencias en la cantidad de aminoácidos que presenta cada gelificante, donde posiblemente el CP, posee mayor cantidad de grupos reactivos, que pudieran generar mayor cantidad de interacciones.

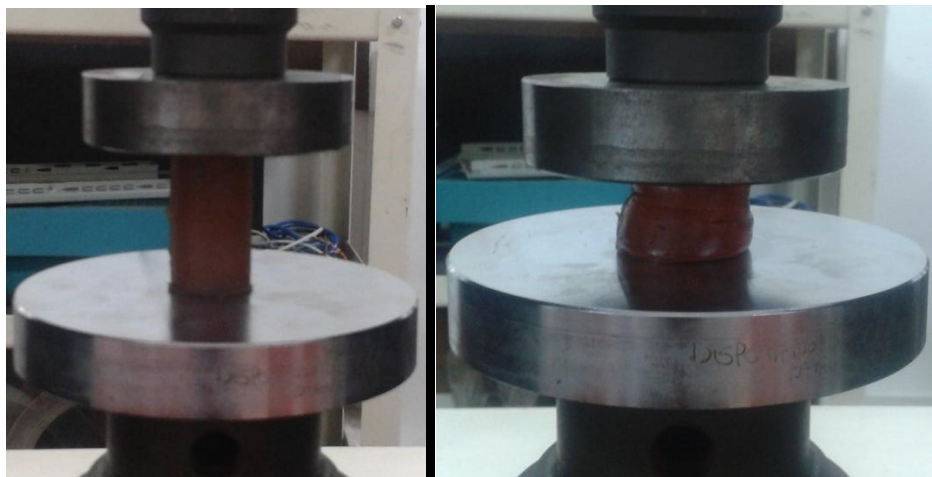
**3.5.2. Propiedades mecánicas.** En la determinación de ensayos mecánicos, los datos de longitud y diámetro se determinaron por medio de un calibrador, en la siguiente tabla se describen los valores determinados:

Tabla 30. Medidas del diámetro y longitud de los cilindros de gel.

Tipo de Gel	d [mm]	l [mm]
GC / GL/ H <sub>2</sub> O	28,5	53,5
GC / EG/ H <sub>2</sub> O	29,4	49,7
CP / GL/ H <sub>2</sub> O	29,8	41,2
CP / EG/ H <sub>2</sub> O	28,4	51,7

Realizado el proceso de programación, el equipo inicia la compresión del material, detectando el esfuerzo que realizó el hidrogel sobre la carga aplicada, y el cambio en la longitud del mismo. En la siguiente imagen se observa el proceso de compresión del equipo:

Figura 42. Fotografía del ensayo de compresión en el hidrogel. Izq. Muestra inicial; Der. Muestra al aplicar la carga de compresión.



Finalizado el proceso de compresión, el programa realiza los cálculos de esfuerzo y porcentaje de deformación, por medio de la carga y el cambio en la longitud del material; generando la gráfica entre estas dos variables.

Para el ejemplo de los cálculos, se parte de la ecuación del esfuerzo<sup>37</sup>:

$$E = \frac{F_{aplicada}}{A} \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$$

Donde  $F_{aplicada}$ , es el valor de la fuerza o carga aplicada, y A, es el área sobre la cual se aplica dicha carga. La fuerza aplicada, es un dato reportado por el equipo y el área, se calculó por medio del diámetro de los cilindros de gel empleando la siguiente ecuación:

$$A = \pi \left( \frac{d}{2} \right)^2 [mm^2]$$

Donde d representa el diámetro, remplazando con los datos de GC/GL/H<sub>2</sub>O, (tabla 30), se tiene:

$$A = \pi \left( \frac{28,5mm}{2} \right)^2 = 637,940 [mm^2]$$

En el punto máximo de la gráfica, la carga tiene un valor de 543,75 N (ver Anexo AA), remplazando en la ecuación del esfuerzo, se tiene:

$$E = \frac{543,750N}{637,940mm} = 0,85235 \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$$

Para determinar el porcentaje de deformación, se parte de la siguiente ecuación:

$$\%D = \frac{l_D}{l} \times 100\%$$

Donde l es la longitud (ver tabla 30), y  $l_D$ , es la longitud de deformación, dato reportado por el equipo; tomando el valor del punto máximo, 35,804 mm; y remplazando, se tiene:

$$\%D = \frac{35,804mm}{53,5mm} \times 100\% = 66,923\%$$

En la siguiente tabla, se reportan los valores calculados de esfuerzo y porcentaje de deformación, para el punto máximo de cada hidrogel:

Tabla 31. Datos calculados del esfuerzo y porcentaje de deformación.

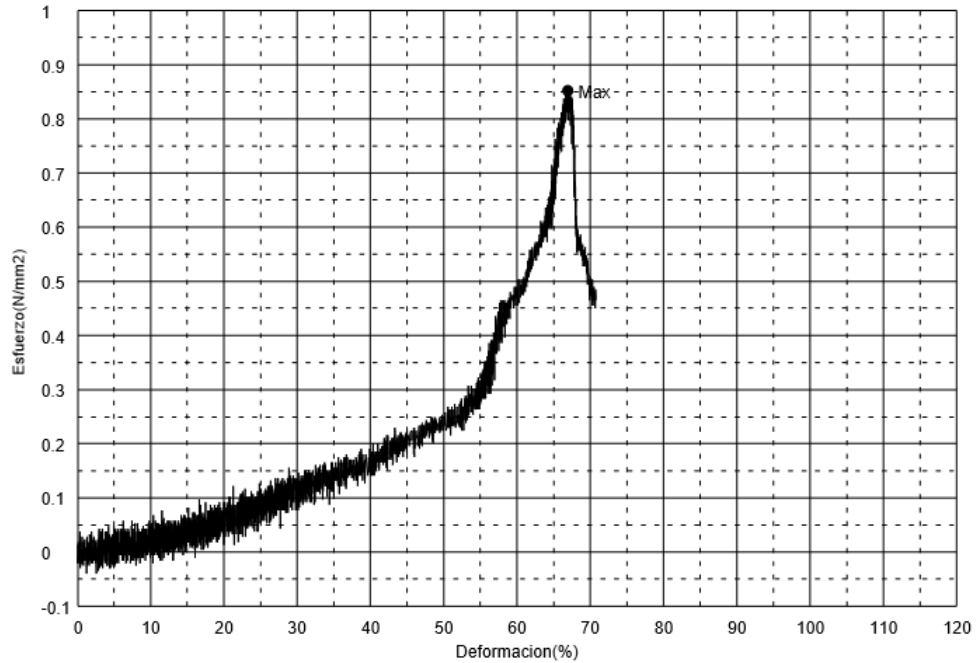
Tipo de Gel	A [mm <sup>2</sup> ]	F <sub>aplicada</sub> [N]	l <sub>D</sub> [mm]	E [N/mm <sup>2</sup> ]	%D
GC / GL	637,940	543,750	35,804	0,852	66,923
GC / EG	678,867	1318,750	41,774	1,943	84,052
CP / GL	697,465	18715,630	38,950	26,834	94,539
CP / EG	633,471	446,875	41,278	0,705	79,841

Para dichos cálculos, se emplearon los datos de la tabla 30, y los valores reportados por el equipo, anexos AA, BB, CC y DD:

El equipo está programado para realizar los cálculos de esfuerzo y porcentaje de deformación del material, para generar la gráfica de estas dos variables, para los geles el resultado obtenido es:

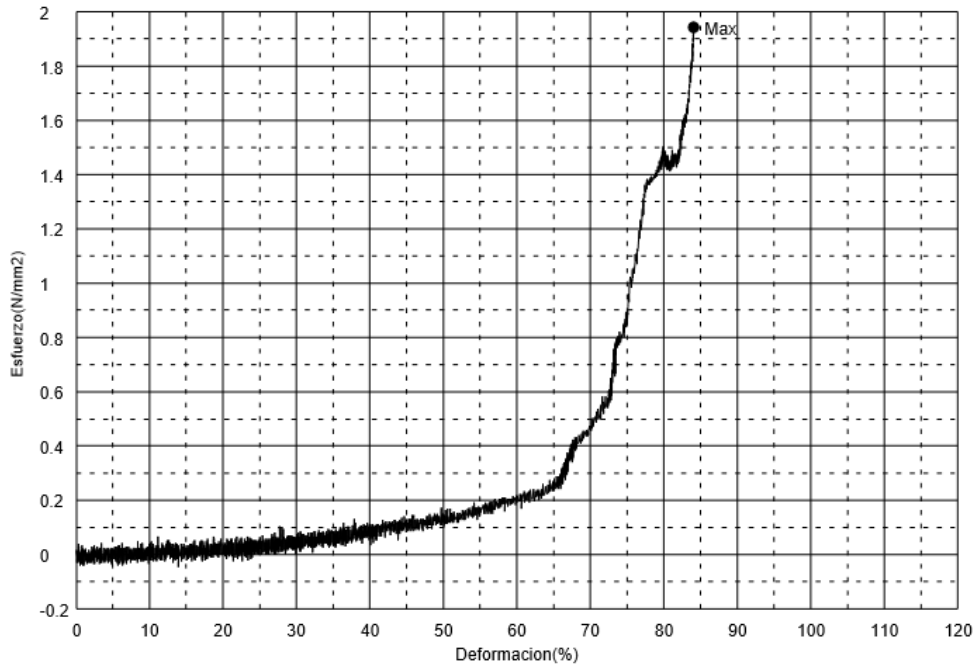
- Hidrogeles de gelatina (GC).

Figura 43. Grafica de esfuerzo vs. Deformación, para el gel GC/GL/H<sub>2</sub>O.



En la figura 43, se observó que, a medida que al material se le aplicaba la carga de compresión, el gel realizaba un esfuerzo o resistencia a la deformación, soportando hasta un esfuerzo máximo de 0,85235 N/mm<sup>2</sup> (Ver anexo AA: Ensayo mecánico GC/GL) y una máxima deformación de aprox. el 67% de la longitud inicial; en este punto, la gráfica desciende a gran velocidad, debido a que el material presentó ruptura.

Figura 44. Grafica de esfuerzo vs. Deformación, para el gel GC/EG/H2O.

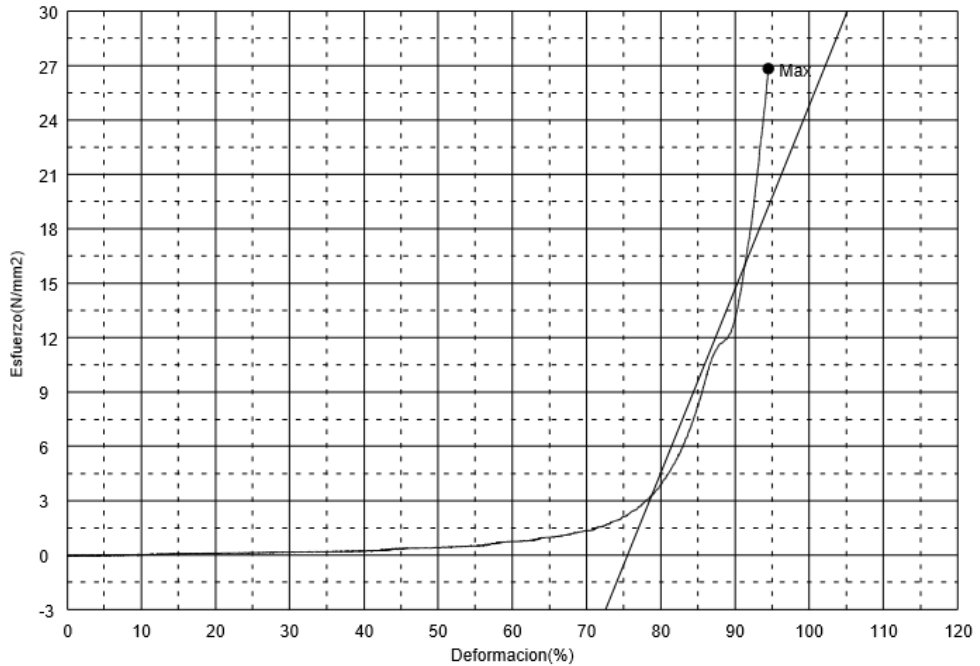


Para la gráfica del gel diluido en EG, se observó que el material realizó un menor esfuerzo al ser deformado, en relación con el gel de GL, pero alcanzó un mayor valor en el punto máximo de esfuerzo, siendo este de  $1,94258 \text{ N/mm}^2$  (Ver anexo BB: Ensayo mecánico GC/EG) y un mayor porcentaje de deformación, aprox. 84%; en ese momento, el gel presentó ruptura, pero demostró tener mayor resistencia a cargas externas en relación con el gel diluido en GL.

Para el gel diluido en PG, no fue posible realizar el ensayo mecánico, debido a que presentaba una consistencia poco viscosa y por ende no ejercía ninguna resistencia a las cargas, lo que con llevo a que el equipo no detectara ni esfuerzo, ni deformación.

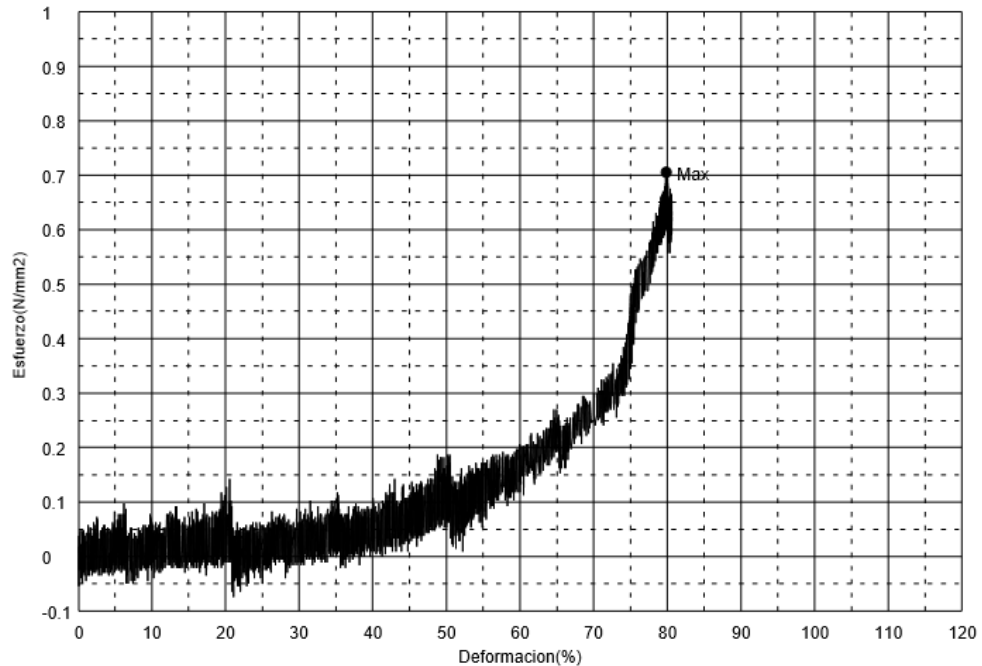
- Hidrogeles de colapiscis (CP).

Figura 45. Grafica de esfuerzo vs. Deformación, para el gel CP/GL/H<sub>2</sub>O.



En la figura 45, se observó que el gel diluido en GL, inicialmente no realizó mucho esfuerzo, pero después del 50% de deformación se observó un rápido incremento en el esfuerzo realizado por el material, soportando un punto máximo de 26,8338N/mm<sup>2</sup> (Ver anexo CC: Ensayo mecánico CP/GL) y un máximo porcentaje de deformación de 94% aprox.

Figura 46. Grafica de esfuerzo vs. Deformación, para el gel CP/EG/H<sub>2</sub>O.



Para el gel diluido en EG, se observó un incremento en el esfuerzo desde un porcentaje de deformación más rápido que el diluido en GL, y a su vez, presentó menor resistencia a la carga, con un esfuerzo máximo de  $0,70544\text{N/mm}^2$  (Ver anexo DD: Ensayo mecánico CP/EG) y una máxima deformación de aprox. 80%.

Para el gel diluido en PG, no fue posible realizar el ensayo mecánico, debido a que presentaba una consistencia poco viscosa y por ende no ejercía ninguna resistencia a las cargas, lo que con llevo a que el equipo no detectara ni esfuerzo, ni deformación.

En general, los hidrogeles de CP, presentaron mayor resistencia a la carga y a su vez, no tuvieron ruptura, sino que se aplastaron, hasta quedar planos; los geles de GC, presentaron ruptura y quedaron deformes. Esto puede ser debido, a que posiblemente, los geles de CP presenten mayor número de interacciones.

#### 4. CONCLUSIONES

Con el método realizado, en el cual se empleó una temperatura constante de 70°C y una relación de masa equitativa entre el gelificante, agente entrecruzante y agua; fue posible estudiar diversas sustancias gelificantes de origen natural, semi-sintético y sintético; y, agentes entrecruzantes del tipo glicol. A su vez, se obtuvieron hidrogeles de gelatina y colapiscis homogéneos y con características adecuadas para diseño de piezas anatómicas.

En esta investigación, las sustancias estudiadas, no todas presentaron un proceso de gelificación adecuado, ya que se obtuvieron solidos quebradizos y sustancias pastosas, como lo fue, AY, PEC, AA, GX, GG, A25, CMC y CARB; debido a que es necesario realizar ajustes a ciertas propiedades, como lo es el pH, concentración de reactivos y adición de componentes externos. Otros de los gelificantes, como el PVA solo se diluyó en el disolvente, debido a que se empleó una concentración muy baja de la misma; y la CM, no formó ninguna sustancia debido a que no posee estructuras poliméricas de gran tamaño que puedan generar una red tridimensional.

Con respecto a la GC y la CP, se obtuvieron hidrogeles en los agentes entrecruzantes, glicerina y etilenglicol. Estos geles, presentaron buenas características mecánicas, teniéndose que el hidrogel con mayor resistencia a la carga y mayor porcentaje de deformación, fue el CP/GL/H<sub>2</sub>O, por otro lado, los geles de CP no presentaron ruptura, indicando su gran elasticidad.

Los geles de GC y CP, diluidos en PG, no presentaron la viscosidad adecuada para realizar ensayos mecánicos, y los diluidos en HG, no formaron un gel consistente; la baja viscosidad de estos materiales, se debe a que estas sustancias a pesar de presentar la misma cantidad de grupos alcohol que el EG,

presentan impedimento estérico, generando menor cantidad de interacciones entre moléculas.

En general, los geles obtenidos, son del tipo físico, lo que se corroboró por medio del espectro IR, donde las interacciones se deben a puentes de hidrogeno, y por ende poseen la propiedad de ser termorreversible y amigables con el ambiente. Por otro lado, los gelificantes que generaron hidrogeles, la GC y la CP, ambas son sustancias de origen proteico, que poseen gran cantidad de grupos funcionales en su estructura, lo que con llevo a que se facilitara la formación de la red tridimensional. Con respecto al gelificante CP, parece poseer mayor cantidad de grupos polares en relación con la GC, originando geles con mayor densidad y resistencia a cargas externas.

## 5. REFERENCIAS

1. GARCÍA, Sergio. Referencias históricas y evolución de los plásticos. En: Revista Iberoamericana de Polímeros. Enero, 2009, vol. 10, no. 1; p. 71-80.
2. ORTIZ L., Elisa; CRUZ, Rocío A.; CRUZ G., Javier; MENDOZA, Ana M. y MORALES C., Ana B. Síntesis y caracterización de hidrogeles obtenidos a partir de acrilamida y metilcelulosa. En: Revista Iberoamericana de Polímeros. Diciembre, 2006, vol. 7, no. 4; p. 247-253.
3. RUÍZ, Gladys. Obtención y caracterización de un polímero biodegradable a partir de almidón de yuca. En: Ingeniería y ciencia. Septiembre, 2006, vol. 2, no. 4; p. 5-28.
4. MENESES, Juliana; CORRALES, Catalina M. y VALENCIA, Marco. Síntesis y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca. En: Revista Escuela de Ingeniería de Antioquia. Diciembre, 2007, no. 8; p. 57-67.
5. JIANG, Lojng y ZHANG, Jinwen. Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics. Capítulo 6: Biodegradable polymers and polymer Blends, 6.2 Naturally occurring biodegradable polymers. 1ed. United States: ELSEVIER, 2012, 109-113 p. ISBN 978-1-4557-2834-3.
6. CEBRIÁN H., Alfonso; INFANTE B., Rebeca y VARA V., Agustín. Química y Tecnología de las Macromoléculas, Polímeros en medicina. Universidad de Valladolid, Química y Tecnología de Macromoléculas. [Online]. España, 2005. <<http://www.eis.uva.es/~macromol/curso03-04/medicina/index.html>> [Consultado: 3 de Septiembre de 2014].

7. GANDINI, Alessandro y NACEUR B., Mohamed. Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics. Capítulo 4: The state of the art of polymers from renewable resources. 1ed. United States: ELSEVIER, 2012, 71-85 p. ISBN 978-1-4557-2834-3.
8. ECHEVERRI, Claudia E; VALLEJO, Catalina y LONDOÑO, Marta E. Síntesis y caracterización de hidrogeles de alcohol polivinílico por la técnica de congelamiento/descongelamiento para aplicaciones médicas. En: Revista Escuela de Ingeniería de Antioquia, diciembre, 2009, no. 12; p. 59-66.
9. CEBRIÁN H., Alfonso; INFANTE B., Rebeca y VARA V., Agustín. Química y Tecnología de las Macromoléculas, Los polímero en medicina, Hidrogeles. Universidad de Valladolid, Química y Tecnología de Macromoléculas. [Online]. España, 2005. <<http://www.eis.uva.es/~macromol/curso05-06/medicina/hidrogeles.htm>> [Consultado: 15 de Enero de 2014].
10. MOTA, CHINCOYA, MARTÍNEZ, MAYORGA y GALINDO. Como hacer gel balístico. Criminalística. [Online]. México. <<http://www.criminalistica.com.mx/areas-forenses/balistica/737-como-hacer-gel-balico>>. [Consultado: 20 de Febrero de 2014].
11. RAMÍREZ A., Ruth Isabel y TORRES V., Golda Meyer. Propiedades funcionales de los componentes de los alimentos, capítulo 4: el estado coloidal de los alimento, Lección 16: Generalidades de los Coloides. Universidad Nacional a Distancia, Química y Análisis de los Alimentos. [Online]. Duitama, Colombia, 2011. <[http://datateca.unad.edu.co/contenidos/202015/202015/leccin\\_16\\_generalidad\\_es\\_de\\_los\\_coloides.html](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/202015/202015/leccin_16_generalidad_es_de_los_coloides.html)> [Consultado: 10 de Mayo de 2014].

12. RAMÍREZ A., Ruth Isabel y TORRES V., Golda Meyer. Propiedades funcionales de los componentes de los alimentos, capítulo 4: el estado coloidal de los alimento, Lección 20: Geles. Universidad Nacional a Distancia, Química y Análisis de los Alimentos. [Online]. Duitama, Colombia, 2011. <[http://datateca.unad.edu.co/contenidos/202015/202015/leccin\\_20\\_geles.html](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/202015/202015/leccin_20_geles.html)> [Consultado: 10 de Mayo de 2014].
13. KATIME, Issa A.; KATIME, Oscar y KATIME, Daniel. Materiales inteligentes: hidrogeles macromoleculares, algunas aplicaciones biomédicas. En: Anales de la Real Sociedad Española de Química, octubre, 2005, no. 4; p. 35, 36.
14. TANAKA, F. y KOGA, T. Hydrocolloids, Parte 1: Physical Chemistry and Industrial Application of Gels, Polysaccharides, and Proteins, 2: Structure of Gels and Gelation, Thermoreversible gelation strongly coupled to polymer conformational transition. 1ed. Holanda: ELSEVIER, 2000, 53, 54 p. ISBN 978-0-444-50178-3.
15. GARCÍA C., Francisco; SÁNCHEZ F., Álvaro; IBÁÑEZ M., José; LAVEDA M., Francisco; MARTÍNEZ P., Fernando y MORÁN P., Ángel. Aula Virtual de Biología, 2-Glúcidos, 5-Polisacáridos. Universidad de Murcia. [Online]. España, 1999. <<http://www.um.es/molecula/gluci05.htm>>. [Consultado: 10 de Febrero de 2014].
16. ARNÉS S., Maribel; ARIAS I., Ximena; BRAVO M., Roberto y MORENO O., Alejandra. Laboratorio de Química Orgánica. Universidad Mayor. Facultad de Ciencias Silvoagropecuarias, Escuelas de Agronomía e ingeniería Forestal. 2010. p. 24 y 25.
17. SUN, Xiuzhi Susan. Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics. Capítulo 1: Overview of plant polymers: Resources, Demands, and

- Sustainability.1ed. United States: ELSEVIER, 2012, 4,5 p. ISBN 978-1-4557-2834-3.
18. RAMIREZ A., Ruth Isabel y TORRES V., Golda Meyer. Propiedades funcionales de los componentes de los alimentos, capítulo 5: Propiedades funcionales de los carbohidratos, Lección 22: Propiedades funcionales de los polisacáridos. Universidad Nacional a Distancia, Química y Análisis de los Alimentos. [Online]. Duitama, Colombia, 2011. <[http://datateca.unad.edu.co/contenidos/202015/202015/leccin\\_22\\_propiedades\\_funcionales\\_de\\_los\\_polisacridos.html](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/202015/202015/leccin_22_propiedades_funcionales_de_los_polisacridos.html)> [Consultado: 10 de Mayo de 2014].
  19. HE, Wey y BENSON, Roberto. Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics. Capítulo 5: Polymeric Biomaterials, 5.3.3 Natural Polymers.1ed. United States: ELSEVIER, 2012, 93 p. ISBN 978-1-4557-2834-3.
  20. VACLAVIK, Vickie A. Fundamentos de la Ciencia de Alimentos. Capítulo 5: Pectinas y otros carbohidratos. 1 ed. España: ACRIBIA, 1998, 63-69 p. ISBN 84-200-0976-8.
  21. CAMACHO O., Guillermo y CORTÉS, Jaime A. Procesamiento y conservación de frutas, Tema 4: Obtención de Mermeladas, 3. Ingredientes, Pectinas. Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos. [Online]. Bogotá, Colombia, 2002. <<http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/agronomia/2006228/teoria/obmerm/p3.htm#3-3>>. [Consultado: 10 de Agosto de 2014].
  22. SILVATEAM, Food Ingredients, Pectina, Mecanismo de gelificación. [Online]. Italia, 2014. <<http://es.silvateam.com/Productos-y-Servicios/Food-Ingredients/Pectina/Mecanismo-de-gelificaci%C3%B3n>> [Consultado: 10 de Mayo de 2014].

23. MAMANI C., Pseidy L.; RUIZ C., Roberto y VEIGA, María D. Pectina: usos farmacéuticos y aplicaciones terapéuticas. En: Anales de la Real Academia Nacional de Farmacia, octubre, 2012, vol. 78, no. 1; p. 84-94.
24. PORTO, Samuel. Agar gel. Agar Brasileiro Indústria e Comércio Ltda. [Online]. Sao Paulo, Brasil, 2003. <<http://www.agargel.com.br/agar-tec-es.html>> [Consultado: 10 de Mayo de 2014].
25. BRISTHAR LABORATORIOS, Materias primas para la industria farmacéutica, alimenticia y cosmética. Goma xanthan, estabilizante para suspensiones y emulsiones. [Online]. Caracas, Venezuela, 2010. <<http://www.bristhar.com.ve/xanthan.html>> [Consultado: 10 de Febrero de 2014].
26. RODD, Andrew B.; DUNSTAN, Dave E. y BOGER, David V. Hydrocolloids, Parte 1: Physical Chemistry and Industrial Application of Gels, Polysaccharides, and Proteins, 3: Polysaccharides, Dynamic light scattering of dilute and semi-dilute Xanthan solutions and comparison with Rheological Characteristics. 1ed. Holanda: ELSEVIER, 2000, 151, 152 p. ISBN 978-0-444-50178-3.
27. ZAMORA, Antonio. Carbohidratos o glúcidos, estructura química. Scientific Psychic. [Online]. USA, 2014. <<http://www.scientificpsychic.com/fitness/carbohidratos2.html>> [Consultado: 10 de Mayo de 2014].
28. GALINDO MURILLO, Rodrigo y GRACIA MORA, Jesús. La goma guar y su uso en alimentos. Universidad nacional autónoma de México, facultad de química. [Online]. México, 2011. <[http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/GomaGuar\\_1839.pdf](http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/GomaGuar_1839.pdf)> [Consultado: 10 de Mayo de 2014].

29. TORRES, M. D.; HALLMARK, B. y WILSON, D. J. Effect of concentration on shear and extensional rheology of guar gum. En: Food Hydrocolloids. Octubre, 2014, vol. 40; p. 85-86.
30. GARCÍA C., Francisco; SÁNCHEZ F., Álvaro; IBÁÑEZ M., José; LAVEDA M., Francisco; MARTÍNEZ P., Fernando y MORÁN P., Ángel. Aula Virtual de Biología, 4- Proteínas, 7- Funciones de las proteínas. Universidad de Murcia. [Online]. España, 1999. <<http://www.um.es/molecula/prot07.htm>> [Consultado: 10 de Febrero de 2014].
31. RAMIREZ A., Ruth Isabel y TORRES V., Golda Meyer. Propiedades funcionales de los componentes de los alimentos, capítulo 6: Propiedades funcionales de las proteínas y lípidos, Lección 27: Propiedades dependientes de las interacciones proteína – proteína. Universidad Nacional a Distancia, Química y Análisis de los Alimentos. [Online]. Duitama, Colombia, 2011. <[http://datateca.unad.edu.co/contenidos/202015/202015/leccin\\_27\\_\\_propiedad\\_es\\_dependientes\\_de\\_las\\_interacciones\\_proteina\\_\\_proteina.html](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/202015/202015/leccin_27__propiedad_es_dependientes_de_las_interacciones_proteina__proteina.html)> [Consultado: 10 de Febrero de 2014].
32. CORTIZO, Susana; PERUZZO, Pablo; COUSTET, Marcos; PALACIO, Magdalena y OBERTI, Tamara. Material Didáctico Química Orgánica III, Reacción de Biuret. Universidad Nacional de la Plata, Facultad de Ciencias Exactas, Departamento de Química. [Online]. La Plata, Argentina, 2008.<<http://catedras.quimica.unlp.edu.ar/qo3/Apuntes/Biuret.pdf>> [Consultado: 10 de Mayo de 2014].
33. HAUG, I. J. y DRAGET, K. I. Handbook of Hydrocolloid. Capítulo 6: Gelatine. 2 ed. United States: ELSEVIER, 2009, 142-151 p. ISBN 978-1-4398-0820-7.

34. CEBRIÁN H., Alfonso; INFANTE B., Rebeca y VARA V., Agustín. Química y Tecnología de las Macromoléculas, Polisacáridos, Celulosa. Universidad de Valladolid, Química y Tecnología de Macromoléculas. [Online]. España, 2008. <<http://www.eis.uva.es/~macromol/curso08-09/pls/celulosa.htm>> [Consultado: 10 de Mayo 2014].
35. CHEMICAL HALTER. Éteres de celulosa. [Online]. México, 2014. <<http://www.quimicoshalter.com/eteres-de-celulosa>> [Consultado: 10 de Enero 2014].
36. ACOFARMA. Ficha de información técnica. Carbopol y gel carbómero. [Online]. España, 2014. <[http://www.acofarma.com/admin/uploads/descarga/4080-21dba52a929da8d93618ba5c8b06ea22ae9c2bab/main/files/Carbopol\\_y\\_Gel\\_carb\\_\\_mero.pdf](http://www.acofarma.com/admin/uploads/descarga/4080-21dba52a929da8d93618ba5c8b06ea22ae9c2bab/main/files/Carbopol_y_Gel_carb__mero.pdf)> [Consultado: 10 de Enero 2014].
37. PINZÓN CALDERÓN, Manuel. 2. Propiedades mecánicas de los materiales. Universidad Tecnológica de Pereira, Metalografía. [Online]. Colombia, 2012. < <http://blog.utp.edu.co/metalografia/2012/07/31/2-propiedades-mecanicas-de-los-materiales/> > [Consultado: 10 de Octubre 2014].
38. LOZANO U., Luz Amparo; ROMERO B., Arnold R. y URBINA G., Juan M. Manual prácticas de laboratorio I de química orgánica. Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ciencias, Escuela de Química. 2013. p. 6 y 7.
39. ARNÉS S., Maribel; ARIAS I., Ximena; BRAVO M., Roberto y MORENO O., Alejandra. Laboratorio de Química Orgánica. Universidad Mayor. Facultad de Ciencias Silvoagropecuarias, Escuelas de Agronomía e ingeniería Forestal. 2010. p. 28 y 32.

40. Steffen's Chemistry page. Spectroscopic Tools. [Online]. Alemania. 2013. <<http://www.science-and-fun.de/tools/>> [Consultado: 15 de febrero de 2014].
41. Royal Society of Chemistry. SDBS Spectral Database for Organic Compounds. [Online]. Japón. 1997. <[http://sdb.db.aist.go.jp/sdb/cgi-bin/cre\\_index.cgi](http://sdb.db.aist.go.jp/sdb/cgi-bin/cre_index.cgi)> [Consultado: 10 de Agosto de 2014].
42. SANTOS, Talita; SOUZA F., Men de Sá; CACERES, Carlos A.; ROSA, Morysleide; MORAIS, Joao P. y PINTO, Alaídes. Fish gelatin films as affected by cellulose whiskers and sonication. En: Food Hydrocolloids. Diciembre, 2014, vol. 41; p. 113, 114.
43. BARROS SANTOS, Carlos. Los aditivos en la alimentación de los españoles y la legislación que regula su autorización y uso. Capítulo 9: Real decreto de 19 de diciembre de 1997 del ministerio de sanidad y consumo, por el que se establecen las normas de identidad y pureza de los aditivos alimentarios distintos de los colorantes y edulcorantes utilizados en los productos alimenticios, E-460 Celulosa microcristalina. 1 ed. España: Visión Libros, 2008, 638 p. ISBN 978-84-9886-321-5.
44. ACOFARMA. Ficha de información técnica. Carboximetilcelulosa sódica. [Online]. España, 2014. <[http://www.acofarma.com/admin/uploads/descarga/4202-d2fa20f6ffb1f7c5e800e786e4720c4ce163fe5f/main/files/Carboximetilcelulosa\\_sodica.pdf](http://www.acofarma.com/admin/uploads/descarga/4202-d2fa20f6ffb1f7c5e800e786e4720c4ce163fe5f/main/files/Carboximetilcelulosa_sodica.pdf)> [Consultado: 10 de Septiembre 2014].
45. ACOFARMA. Ficha de información técnica. Glicerina. [Online]. España, 2014. <<http://www.acofarma.com/admin/uploads/descarga/4056-ad0f6747fbffc2ee07d82de08097bdd043f5e5ba/main/files/Glicerina.pdf>> [Consultado: 10 de Octubre 2014].

46. ACOFARMA. Ficha de información técnica. Etilenglicol. [Online]. España, 2014. < <http://www.acofarma.com/admin/uploads/descarga/1602-ca95985876cb95fcb09282b3ae0386dc9875024e/main/files/Etilenglicol.pdf>> [Consultado: 10 de Octubre 2014].
47. ACOFARMA. Ficha de información técnica. Propilenglicol. [Online]. España, 2014. < <http://www.acofarma.com/admin/uploads/descarga/4257-dec0525952d91caba371957d3a73cdaa33233fb3/main/files/Propilenglicol.pdf>> [Consultado: 10 de Octubre 2014].

## BIBLIOGRAFÍA

BARROS SANTOS, Carlos. Los aditivos en la alimentación de los españoles y la legislación que regula su autorización y uso. Capítulo 9: Real decreto de 19 de diciembre de 1997 del ministerio de sanidad y consumo, por el que se establecen las normas de identidad y pureza de los aditivos alimentarios distintos de los colorantes y edulcorantes utilizados en los productos alimenticios, E-460 Celulosa microcristalina. 1 ed. España: Visión Libros, 2008, 638 p. ISBN 978-84-9886-321-5.

BRISTHAR LABORATORIOS, Materias primas para la industria farmacéutica, alimenticia y cosmética. Goma xanthan, estabilizante para suspensiones y emulsiones. [Online]. Caracas, Venezuela, 2010. <<http://www.bristhar.com.ve/xanthan.html>> [Consultado: 10 de Febrero de 2014].

CAMACHO O., Guillermo y CORTÉS, Jaime A. Procesamiento y conservación de frutas, Tema 4: Obtención de Mermeladas, 3. Ingredientes, Pectinas. Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos. [Online]. Bogotá, Colombia, 2002. <<http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/agronomia/2006228/teoria/obmerm/p3.htm#3-3>>. [Consultado: 10 de Agosto de 2014].

CEBRIÁN H., Alfonso; INFANTE B., Rebeca y VARA V., Agustín. Química y Tecnología de las Macromoléculas, Polímeros en medicina. Universidad de Valladolid, Química y Tecnología de Macromoléculas. [Online]. España, 2005. <<http://www.eis.uva.es/~macromol/curso03-04/medicina/index.html>> [Consultado: 3 de Septiembre de 2014].

CEBRIÁN H., Alfonso; INFANTE B., Rebeca y VARA V., Agustín. Química y Tecnología de las Macromoléculas, Los polímero en medicina, Hidrogeles.

Universidad de Valladolid, Química y Tecnología de Macromoléculas. [Online]. España, 2005. <<http://www.eis.uva.es/~macromol/curso05-06/medicina/hidrog eles.htm>> [Consultado: 15 de Enero de 2014].

CEBRIÁN H., Alfonso; INFANTE B., Rebeca y VARA V., Agustín. Química y Tecnología de las Macromoléculas, Polisacáridos, Celulosa. Universidad de Valladolid, Química y Tecnología de Macromoléculas. [Online]. España, 2008. <<http://www.eis.uva.es/~macromol/curso08-09/pls/celulosa.htm>> [Consultado: 10 de Mayo 2014].

CUGGINO, Julio C. Síntesis De hidrogeles para su posible aplicación en liberación controlada de drogas. En: Asociación argentina de materiales. Octubre, 2008.

ECHEVERRI, Claudia E; VALLEJO, Catalina y LONDOÑO, Marta E. Síntesis y caracterización de hidrogeles de alcohol polivinílico por la técnica de congelamiento/descongelamiento para aplicaciones médicas. En: Revista Escuela de Ingeniería de Antioquia, diciembre, 2009, no. 12; p. 59-66.

GALINDO MURILLO, Rodrigo y GRACIA MORA, Jesús. La goma guar y su uso en alimentos. Universidad nacional autónoma de México, facultad de química. [Online]. México, 2011. <[http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/GomaGuar\\_1839.pdf](http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/GomaGuar_1839.pdf)> [Consultado: 10 de Mayo de 2014].

GANDINI, Alessandro y NACEUR B., Mohamed. Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics. Capítulo 4: The state of the art of polymers from renewable resources. 1ed. United States: ELSEVIER, 2012, 71-85 p. ISBN 978-1-4557-2834-3.

GARCÍA C., Francisco; SÁNCHEZ F., Álvaro; IBÁÑEZ M., José; LAVEDA M., Francisco; MARTÍNEZ P., Fernando y MORÁN P., Ángel. Aula Virtual de Biología, 2-Glúcidos, 5-Polisacáridos. Universidad de Murcia. [Online]. España, 1999. <<http://www.um.es/molecula/gluci05.htm>>. [Consultado: 10 de Febrero de 2014].

GARCÍA C., Francisco; SÁNCHEZ F., Álvaro; IBÁÑEZ M., José; LAVEDA M., Francisco; MARTÍNEZ P., Fernando y MORÁN P., Ángel. Aula Virtual de Biología, 4- Proteínas, 7- Funciones de las proteínas. Universidad de Murcia. [Online]. España, 1999. <<http://www.um.es/molecula/prot07.htm>> [Consultado: 10 de Febrero de 2014].

GARCÍA, Sergio. Referencias históricas y evolución de los plásticos. En: Revista Iberoamericana de Polímeros. Enero, 2009, vol. 10, no. 1; p. 71-80.

HAUG, I. J. y DRAGET, K. I. Handbook of Hydrocolloid. Capítulo 6: Gelatine. 2 ed. United States: ELSEVIER, 2009, 142-151 p. ISBN 978-1-4398-0820-7.

HE, Wey y BENSON, Roberto. Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics. Capítulo 5: Polymeric Biomaterials, 5.3.3 Natural Polymers. 1ed. United States: ELSEVIER, 2012, 93 p. ISBN 978-1-4557-2834-3.

JIANG, Lojng y ZHANG, Jinwen. Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics. Capítulo 6: Biodegradable polymers and polymer Blends, 6.2 Naturally occurring biodegradable polymers. 1ed. United States: ELSEVIER, 2012, 109-113 p. ISBN 978-1-4557-2834-3.

KATIME, Issa A.; KATIME, Oscar y KATIME, Daniel. Materiales inteligentes: hidrogeles macromoleculares, algunas aplicaciones biomédicas. En: Anales de la Real Sociedad Española de Química, octubre, 2005, no. 4; p. 35, 36.

MAMANI C., Pseidy L.; RUIZ C., Roberto y VEIGA, María D. Pectina: usos farmacéuticos y aplicaciones terapéuticas. En: Anales de la Real Academia Nacional de Farmacia, octubre, 2012, vol. 78, no. 1; p. 84-94.

MENESES, Juliana; CORRALES, Catalina M. y VALENCIA, Marco. Síntesis y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca. En: Revista Escuela de Ingeniería de Antioquia. Diciembre, 2007, no. 8; p. 57-67.

MOTA, CHINCOYA, MARTÍNEZ, MAYORGA y GALINDO. Como hacer gel balístico. Criminalística. [Online]. México. <<http://www.criminalistica.com.mx/areas-forenses/balistica/737-como-hacer-gel-balico>>. [Consultado: 20 de Febrero de 2014].

MUÑOZ, Gustavo A. y ZULUAGA, Fabio. Síntesis de hidrogeles a partir de acrilamida y ácido alilmalónico y su utilización en la liberación controlada de fármacos. En: Revista Academia Colombiana de Ciencias. Diciembre, 2009, vol. 33, no. 129; p. 539 - 548.

ORTIZ L., Elisa; CRUZ, Rocío A.; CRUZ G., Javier; MENDOZA, Ana M. y MORALES C., Ana B. Síntesis y caracterización de hidrogeles obtenidos a partir de acrilamida y metilcelulosa. En: Revista Iberoamericana de Polímeros. Diciembre, 2006, vol. 7, no. 4; p. 247-253.

PINZÓN CALDERÓN, Manuel. 2. Propiedades mecánicas de los materiales. Universidad Tecnológica de Pereira, Metalografía. [Online]. Colombia, 2012. <<http://blog.utp.edu.co/metalografia/2012/07/31/2-propiedades-mecanicas-de-los-materiales/>> [Consultado: 10 de Octubre 2014].

PORTO, Samuel. Agar gel. Agar Brasileiro Indústria e Comércio Ltda. [Online]. Sao Paulo, Brasil, 2003. <<http://www.agargel.com.br/agar-tec-es.html>> [Consultado: 10 de Mayo de 2014].

RAMÍREZ A., Ruth Isabel y TORRES V., Golda Meyer. Propiedades funcionales de los componentes de los alimentos, capítulo 4: el estado coloidal de los alimento, Lección 16: Generalidades de los Coloides. Universidad Nacional a Distancia, Química y Análisis de los Alimentos. [Online]. Duitama, Colombia, 2011. <[http://datateca.unad.edu.co/contenidos/202015/202015/leccin\\_16\\_generalidades\\_de\\_los\\_coloides.html](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/202015/202015/leccin_16_generalidades_de_los_coloides.html)> [Consultado: 10 de Mayo de 2014].

RAMÍREZ A., Ruth Isabel y TORRES V., Golda Meyer. Propiedades funcionales de los componentes de los alimentos, capítulo 4: el estado coloidal de los alimento, Lección 20: Geles. Universidad Nacional a Distancia, Química y Análisis de los Alimentos. [Online]. Duitama, Colombia, 2011. <[http://datateca.unad.edu.co/contenidos/202015/202015/leccin\\_20\\_geles.html](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/202015/202015/leccin_20_geles.html)> [Consultado: 10 de Mayo de 2014].

RAMIREZ A., Ruth Isabel y TORRES V., Golda Meyer. Propiedades funcionales de los componentes de los alimentos, capítulo 5: Propiedades funcionales de los carbohidratos, Lección 22: Propiedades funcionales de los polisacáridos. Universidad Nacional a Distancia, Química y Análisis de los Alimentos. [Online]. Duitama, Colombia, 2011. <[http://datateca.unad.edu.co/contenidos/202015/202015/leccin\\_22\\_propiedades\\_funcionales\\_de\\_los\\_polisacridos.html](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/202015/202015/leccin_22_propiedades_funcionales_de_los_polisacridos.html)> [Consultado: 10 de Mayo de 2014].

RAMIREZ A., Ruth Isabel y TORRES V., Golda Meyer. Propiedades funcionales de los componentes de los alimentos, capítulo 6: Propiedades funcionales de las proteínas y lípidos, Lección 27: Propiedades dependientes de las interacciones proteína – proteína. Universidad Nacional a Distancia, Química y Análisis de los

Alimentos. [Online]. Duitama, Colombia, 2011. <[http://datateca.unad.edu.co/contenidos/202015/202015/leccin\\_27\\_\\_propiedades\\_dependientes\\_de\\_las\\_interacciones\\_proteina\\_\\_proteina.html](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/202015/202015/leccin_27__propiedades_dependientes_de_las_interacciones_proteina__proteina.html)> [Consultado: 10 de Febrero de 2014].

RODD, Andrew B.; DUNSTAN, Dave E. y BOGER, David V. Hydrocolloids, Parte 1: Physical Chemistry and Industrial Application of Gels, Polysaccharides, and Proteins, 3: Polysaccharides, Dynamic light scattering of dilute and semi-dilute Xanthan solutions and comparison with Rheological Characteristics. 1ed. Holanda: ELSEVIER, 2000, 151, 152 p. ISBN 978-0-444-50178-3.

RUÍZ, Gladys. Obtención y caracterización de un polímero biodegradable a partir de almidón de yuca. En: Ingeniería y ciencia. Septiembre, 2006, vol. 2, no. 4; p. 5-28.

SANTOS, Talita; SOUZA F., Men de Sá; CACERES, Carlos A.; ROSA, Morysleide; MORAIS, Joao P. y PINTO, Alaídes. Fish gelatin films as affected by cellulose whiskers and sonication. En: Food Hydrocolloids. Diciembre, 2014, vol. 41; p. 113, 114.

SUN, Xiuzhi Susan. Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics. Capítulo 1: Overview of plant polymers: Resources, Demands, and Sustainability. 1ed. United States: ELSEVIER, 2012, 4,5 p. ISBN 978-1-4557-2834-3.

TANAKA, F. y KOGA, T. Hydrocolloids, Parte 1: Physical Chemistry and Industrial Application of Gels, Polysaccharides, and Proteins, 2: Structure of Gels and Gelation, Thermoreversible gelation strongly coupled to polymer conformational transition. 1ed. Holanda: ELSEVIER, 2000, 53, 54 p. ISBN 978-0-444-50178-3.

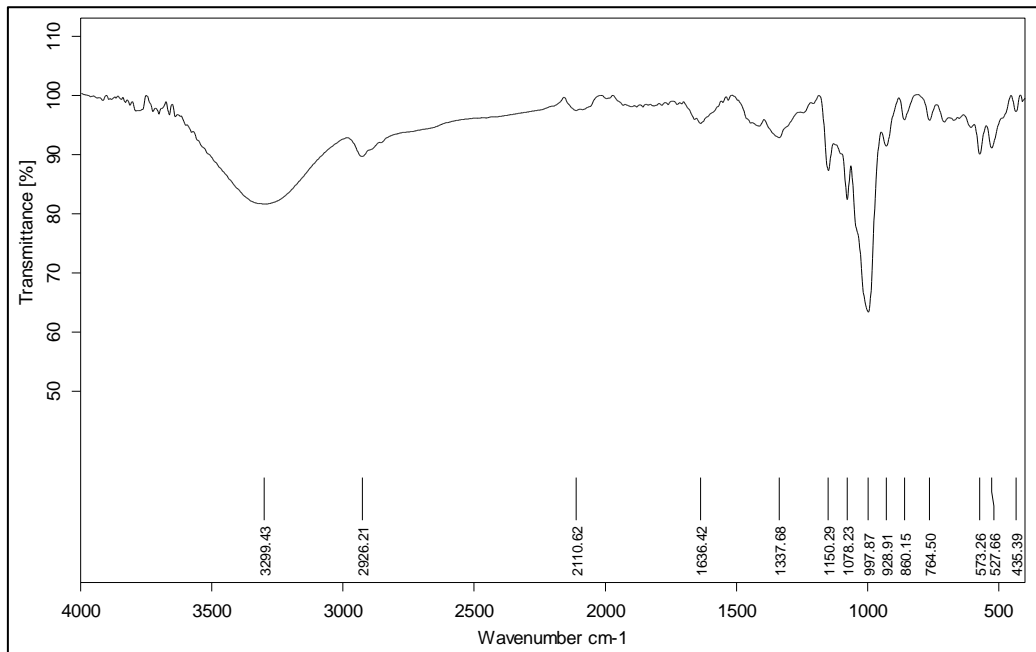
TORRES, M. D.; HALLMARK, B. y WILSON, D. J. Effect of concentration on shear and extensional rheology of guar gum. En: Food Hydrocolloids. Octubre, 2014, vol. 40; p. 85-86.

VACLAVIK, Vickie A. Fundamentos de la Ciencia de Alimentos. Capítulo 5: Pectinas y otros carbohidratos. 1 ed. España: ACRIBIA, 1998, 63-69 p. ISBN 84-200-0976-8.

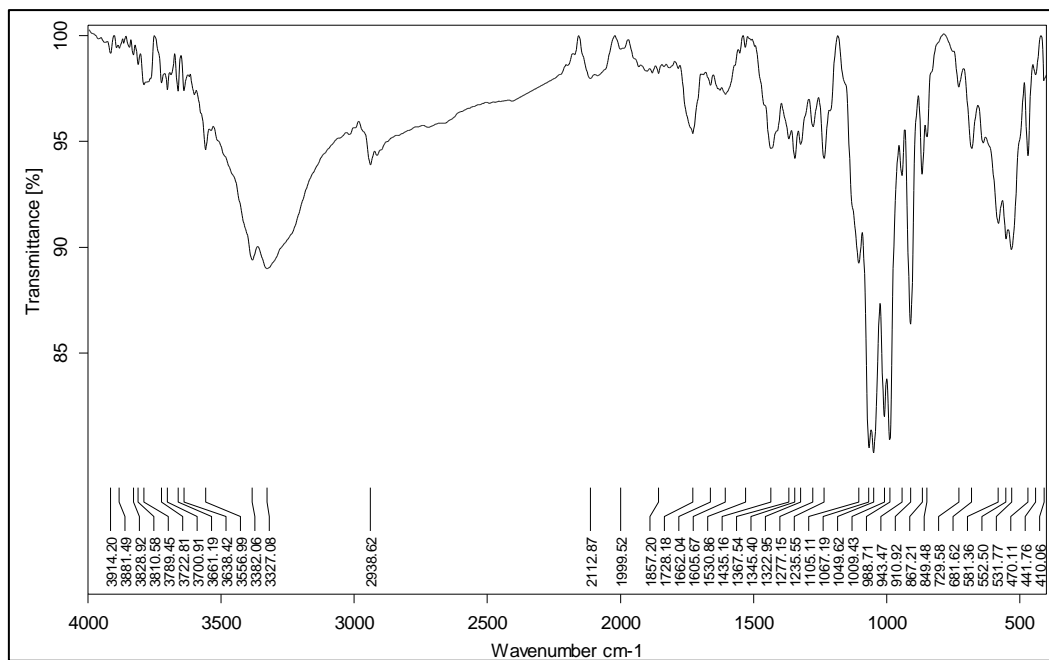
ZAMORA, Antonio. Carbohidratos o glúcidos, estructura química. Scientific Psychic. [Online]. USA, 2014. <<http://www.scientificpsychic.com/fitness/carbohidratos2.html>> [Consultado: 10 de Mayo de 2014].

## ANEXOS

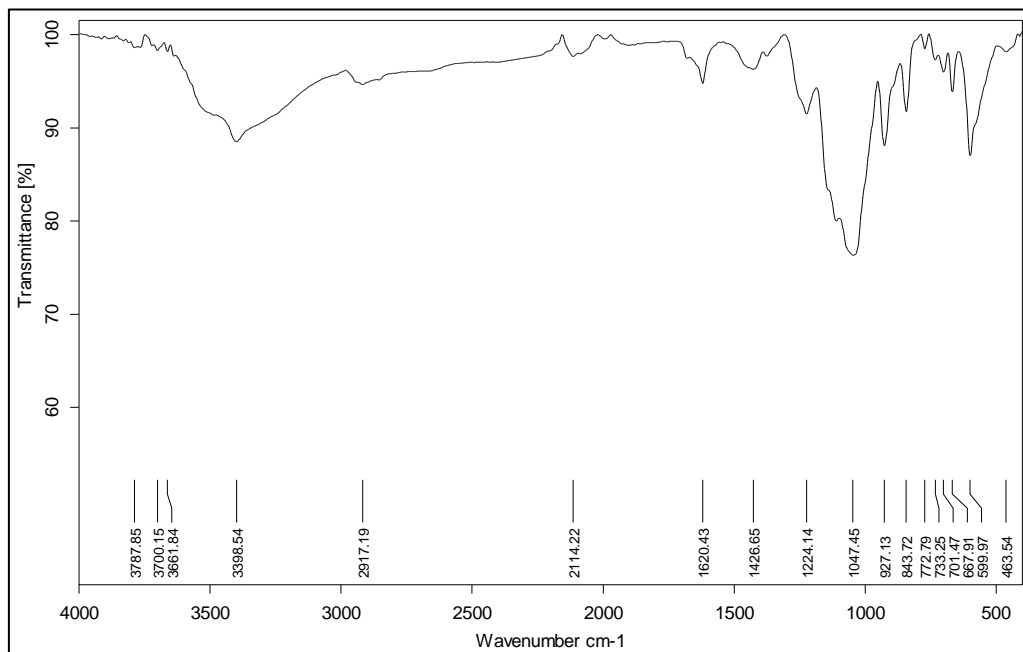
Anexo 1. Espectro infrarrojo experimental del almidón de yuca.



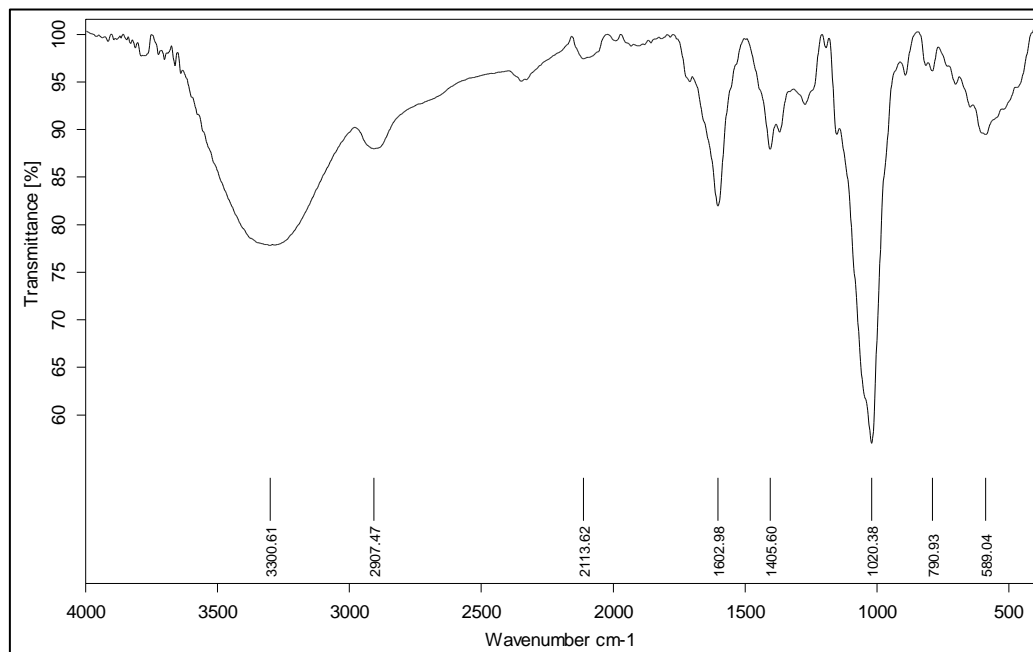
## Anexo 2. Espectro infrarrojo experimental de la pectina cítrica rápida.



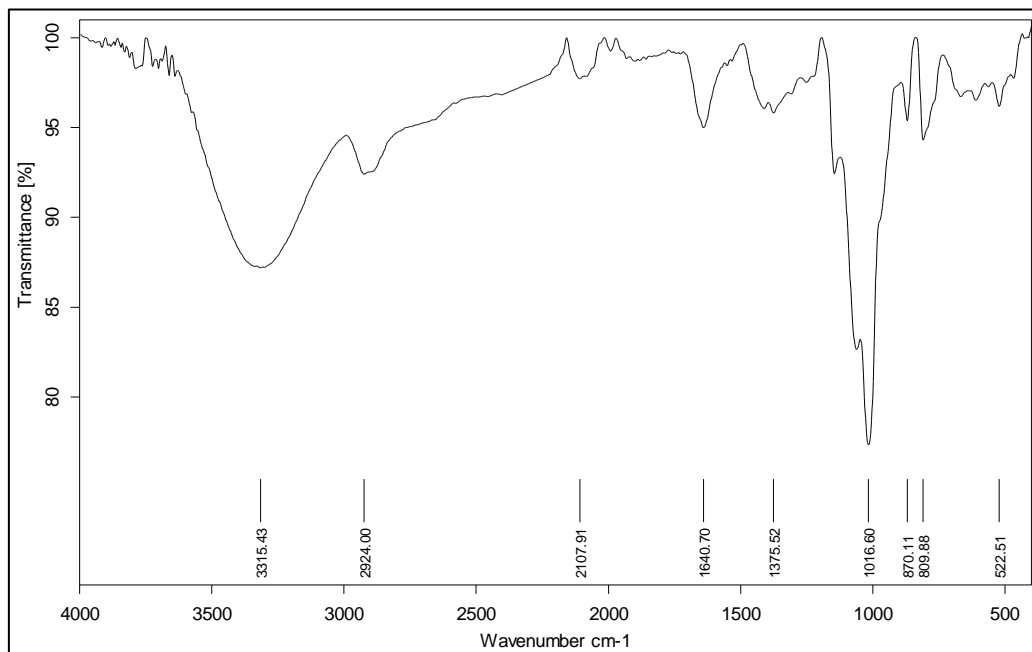
### Anexo 3. .Espectro infrarrojo experimental de agar-agar



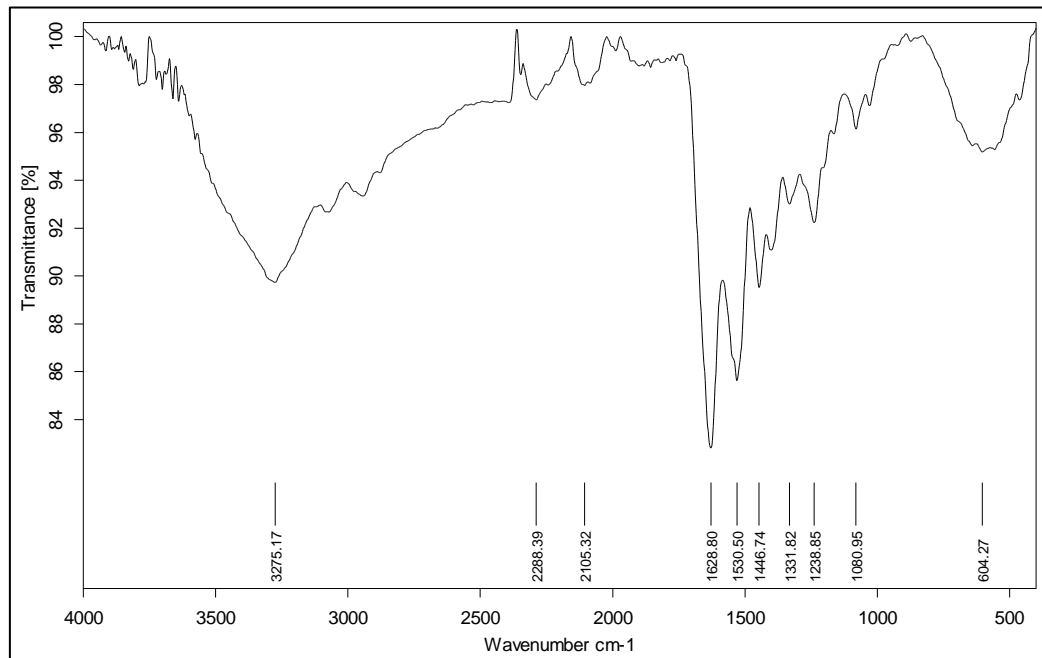
#### Anexo 4. Espectro infrarrojo experimental de la goma xantana.



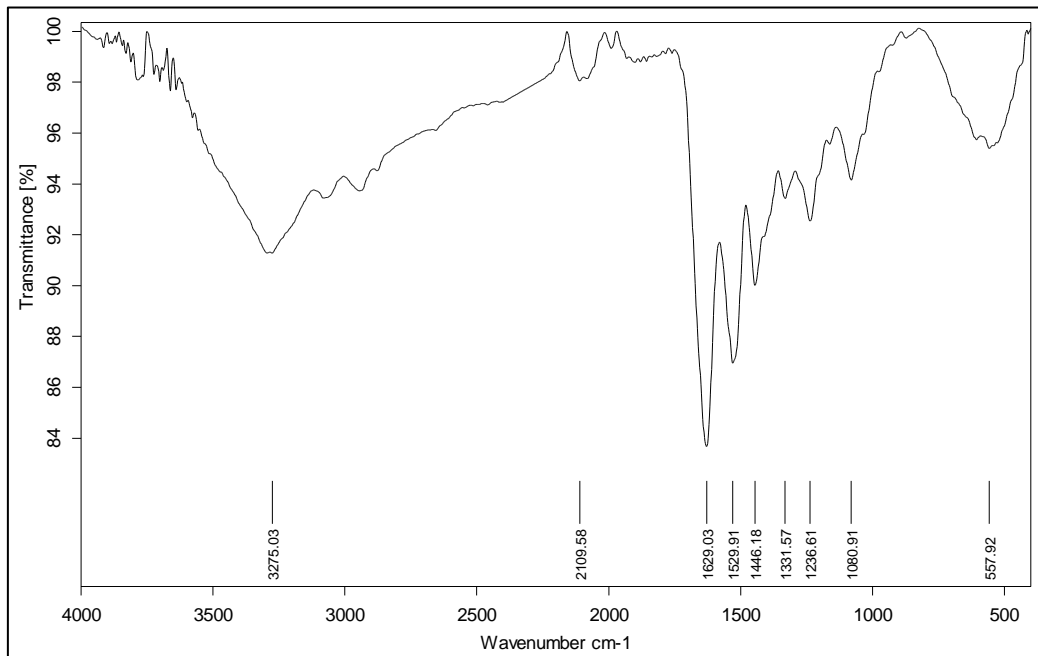
## Anexo 5. Espectro infrarrojo experimental de la goma guar



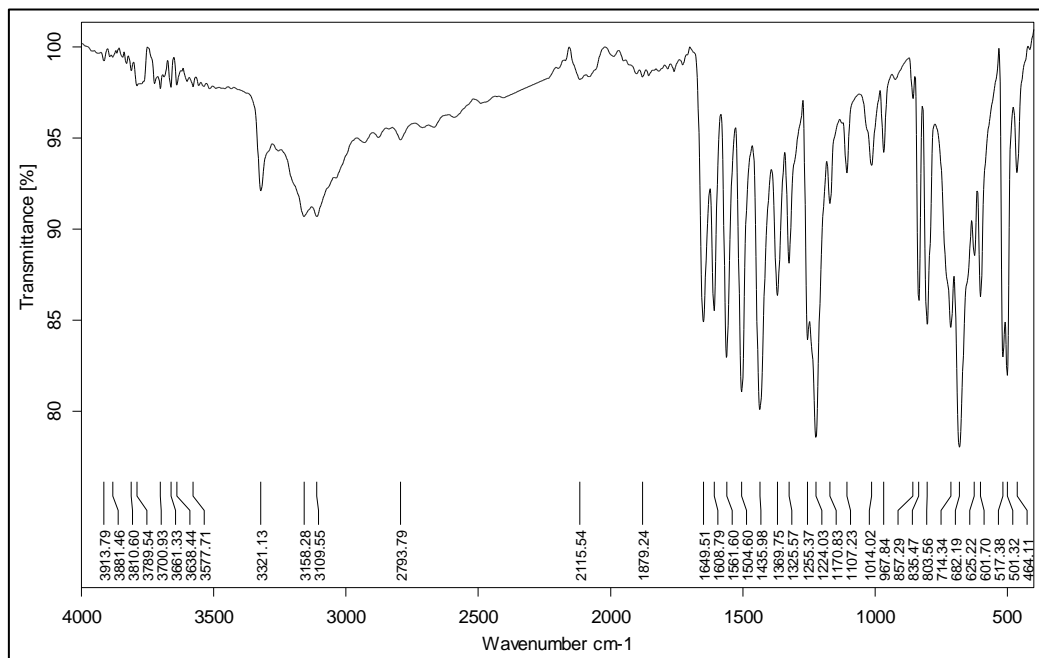
## Anexo 6. Espectro infrarrojo experimental de la gelatina tipo C.



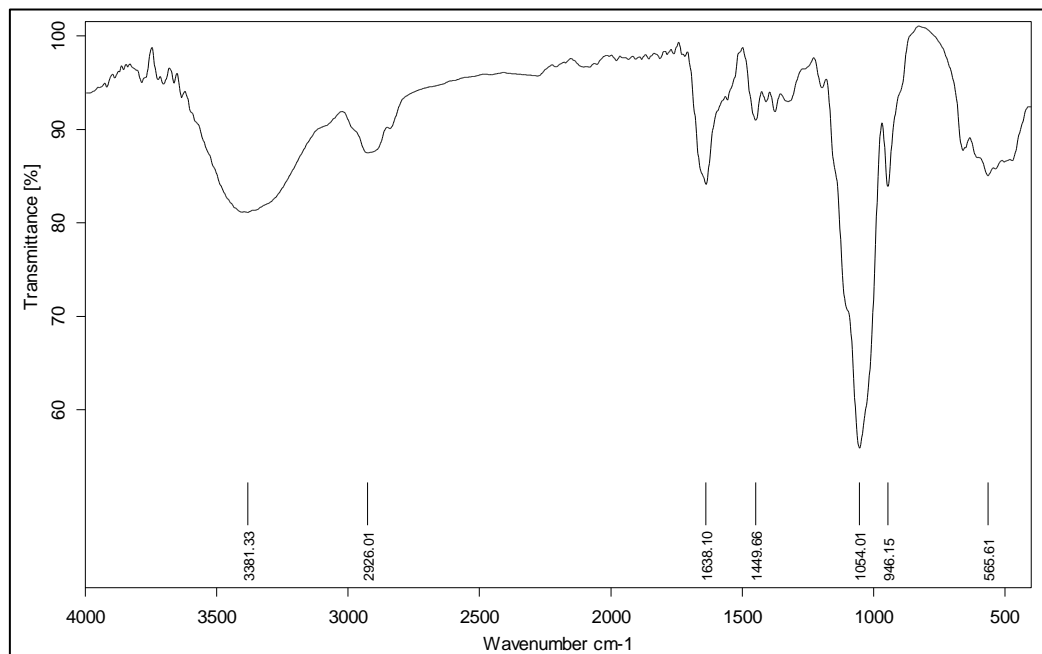
## Anexo 7. Espectro infrarrojo experimental de la colapiscis



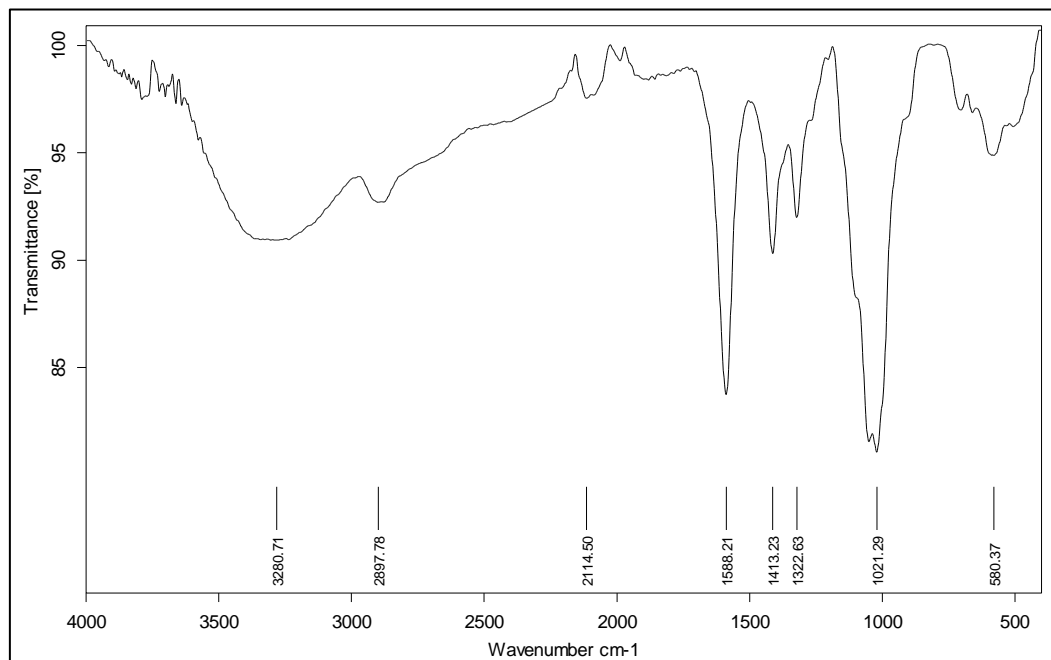
Anexo 8. Espectro infrarrojo experimental de la celulosa microcristalina.



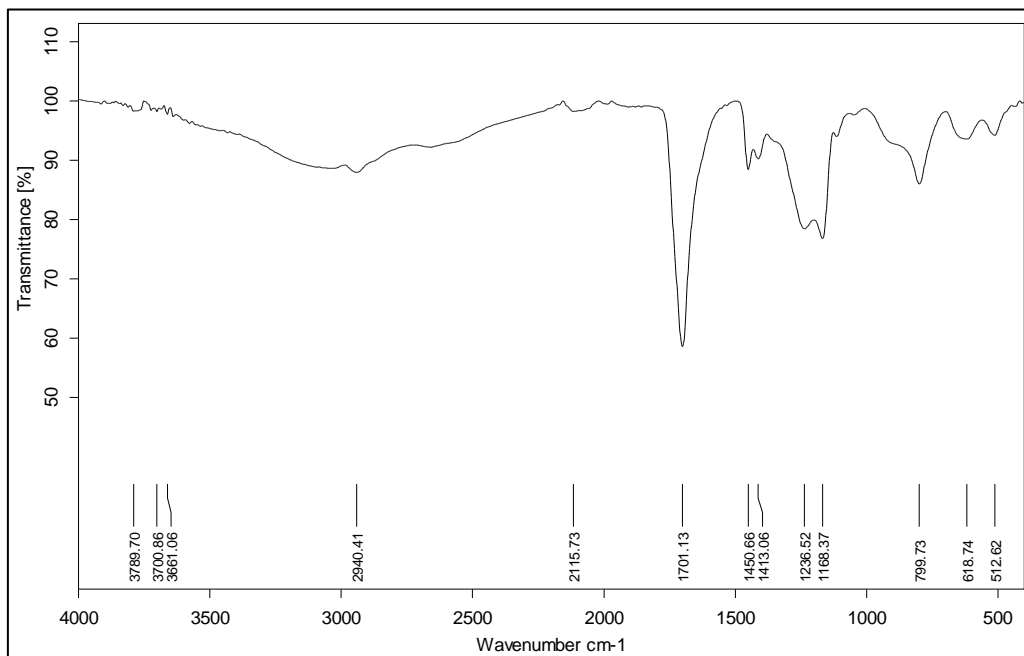
Anexo 9. Espectro infrarrojo experimental de la metilcelulosa A25.



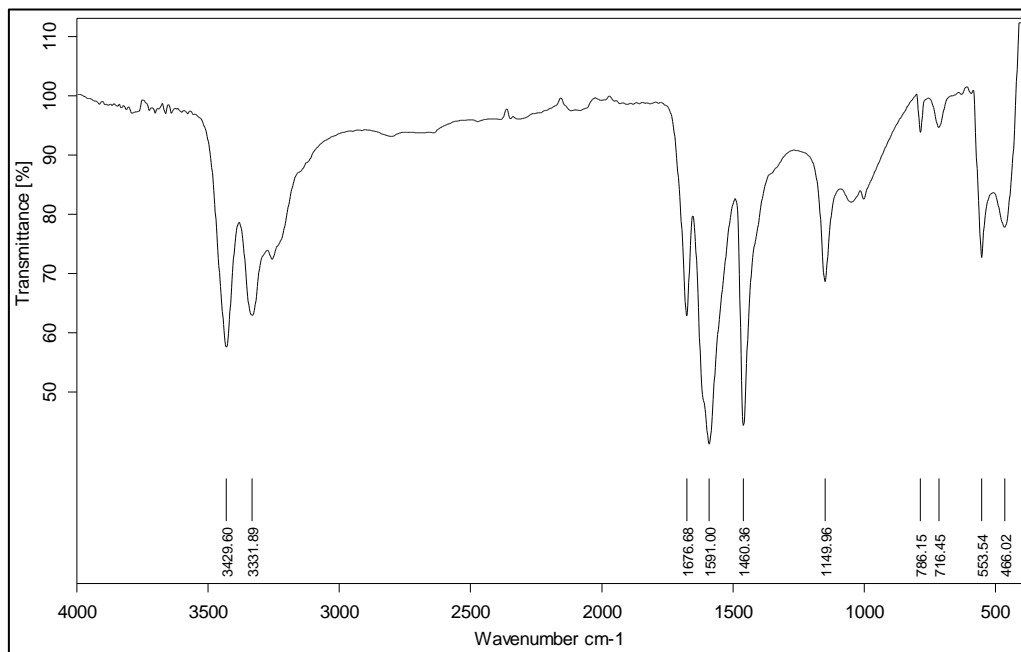
## Anexo 10. Espectro infrarrojo experimental de la carboximetilcelulosa



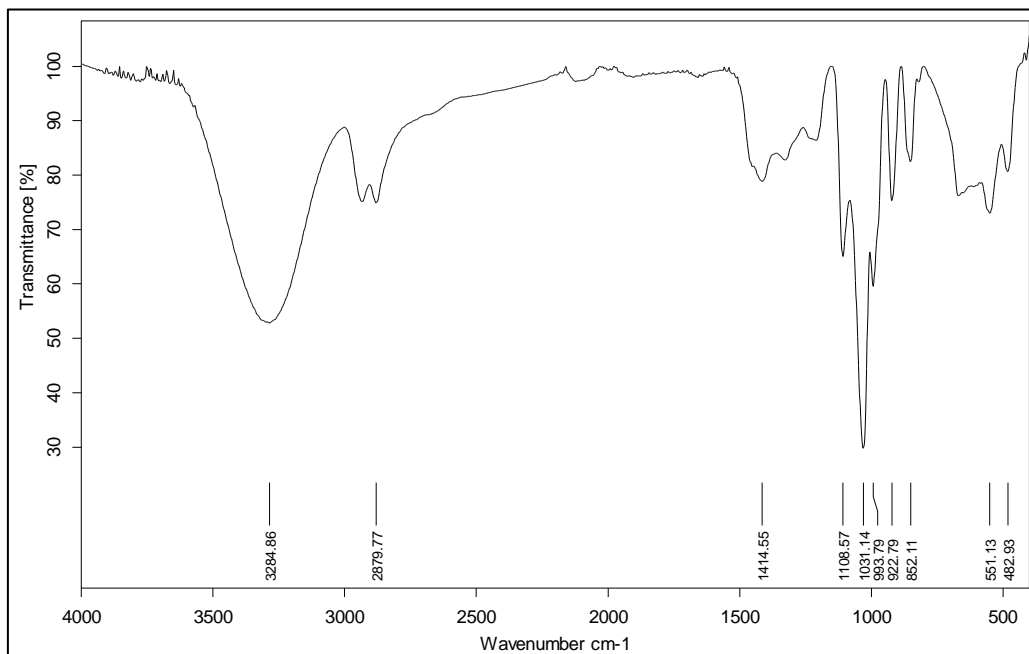
## Anexo 11. Espectro infrarrojo experimental del carbopol.



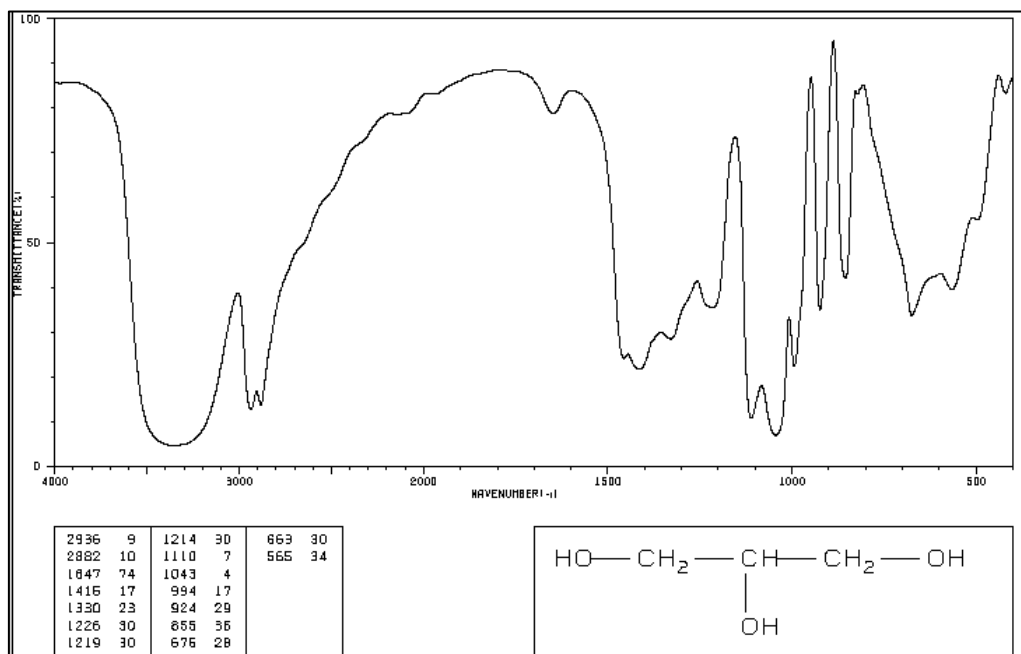
## Anexo 12. Espectro infrarrojo experimental del alcohol de polivinilo



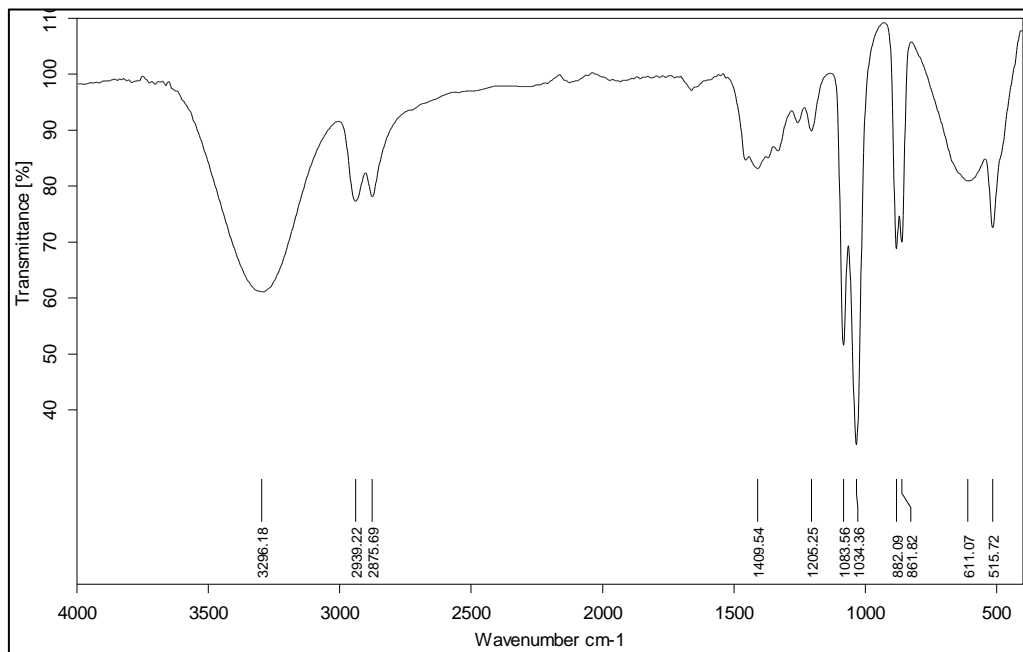
### Anexo 13. Espectro infrarrojo experimental de la glicerina



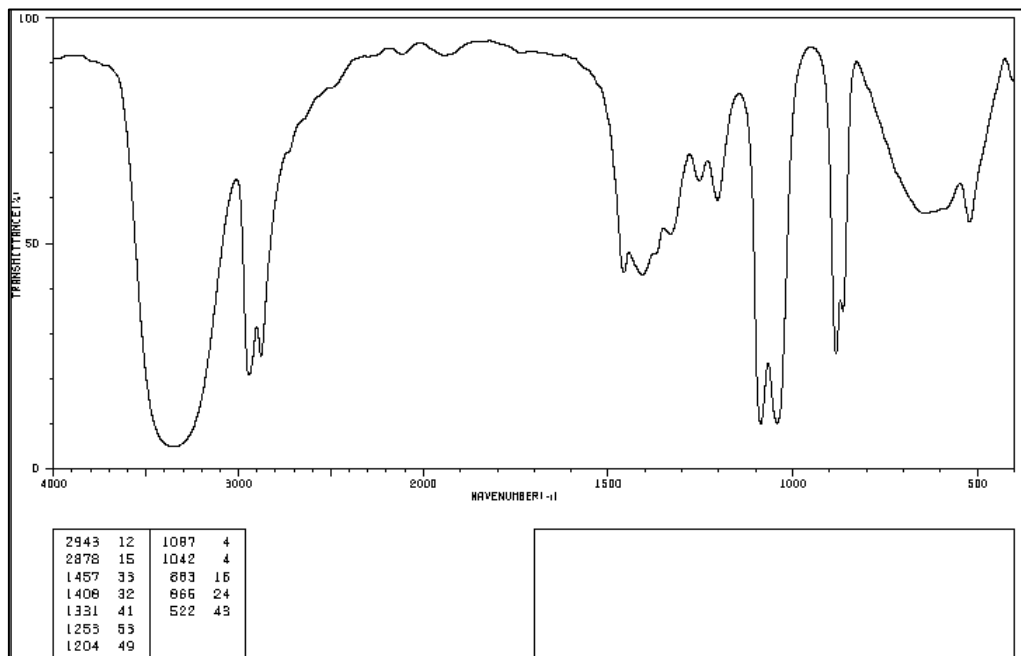
Anexo 14. Espectro infrarrojo reportado por la literatura de la glicerina.



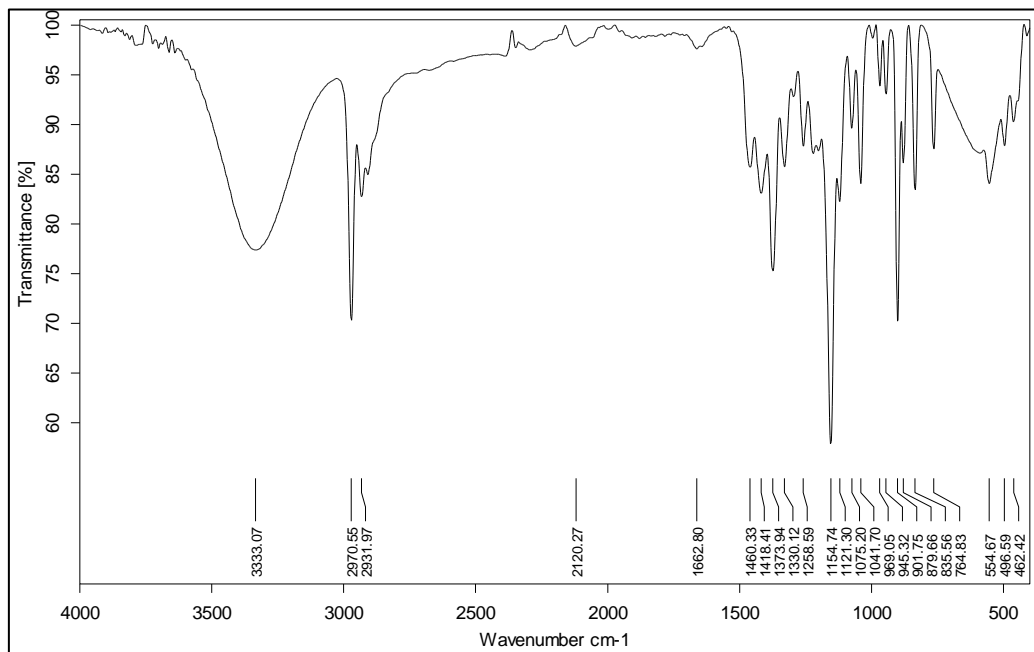
### Anexo 15. Espectro infrarrojo experimental del etilenglicol.



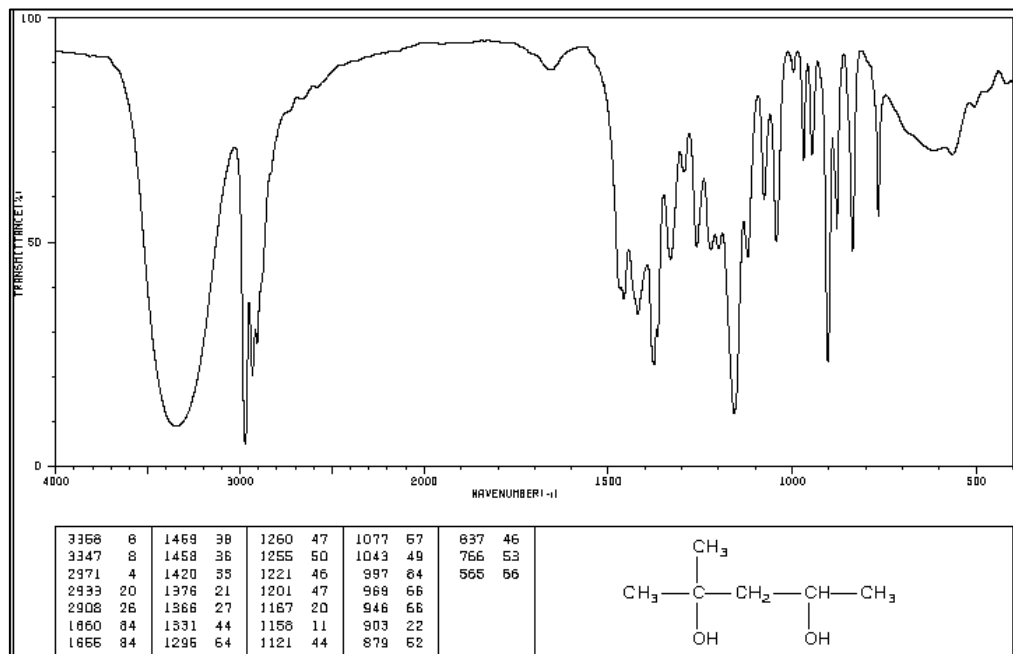
Anexo 16. Espectro infrarrojo reportado por la literatura del etilenglicol.



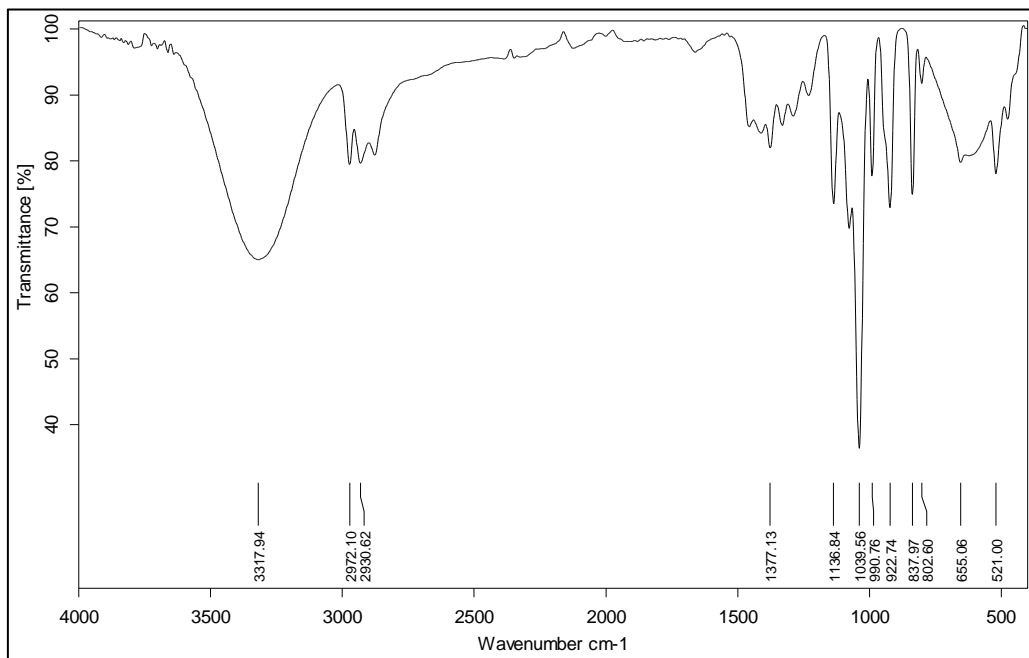
### Anexo 17. Espectro infrarrojo experimental del hexilenglicol.



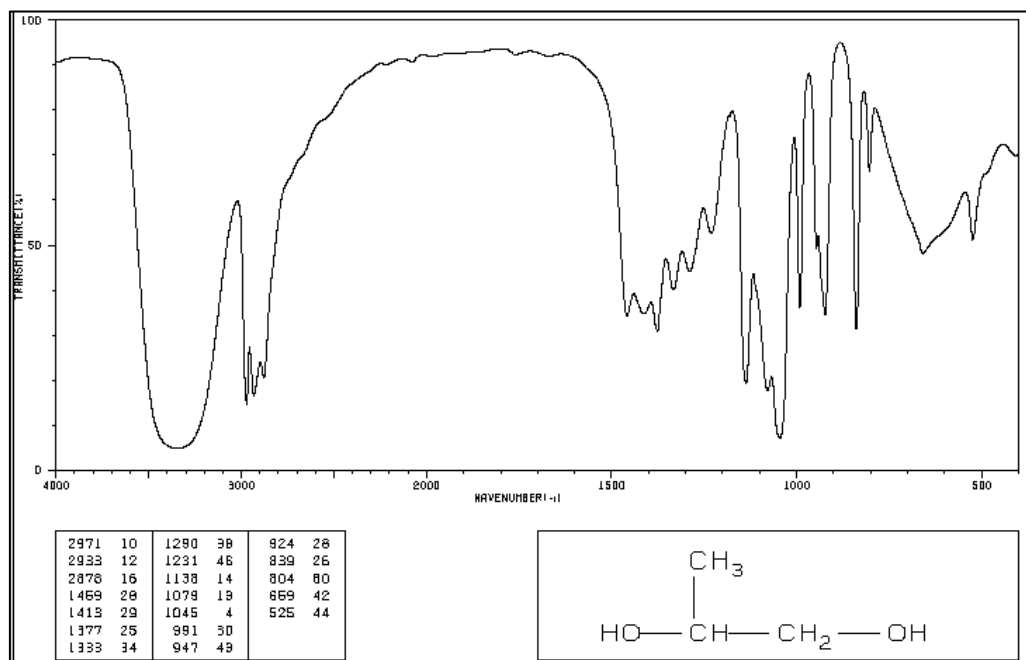
Anexo 18. Espectro infrarrojo reportado por la literatura del hexilenglicol.



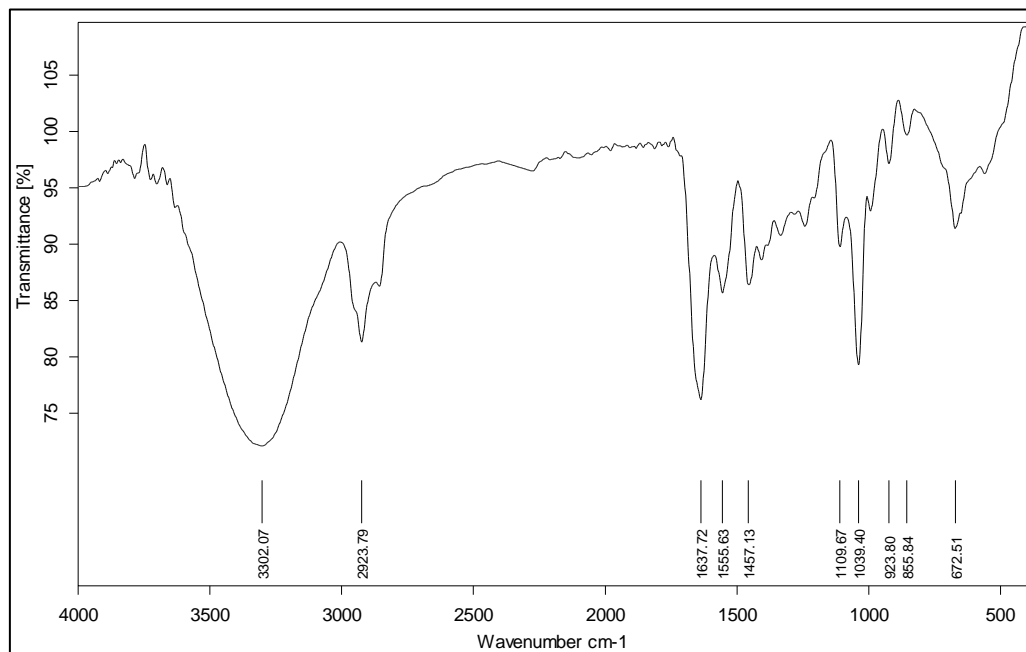
### Anexo 19. Espectro infrarrojo experimental del propilenglicol.



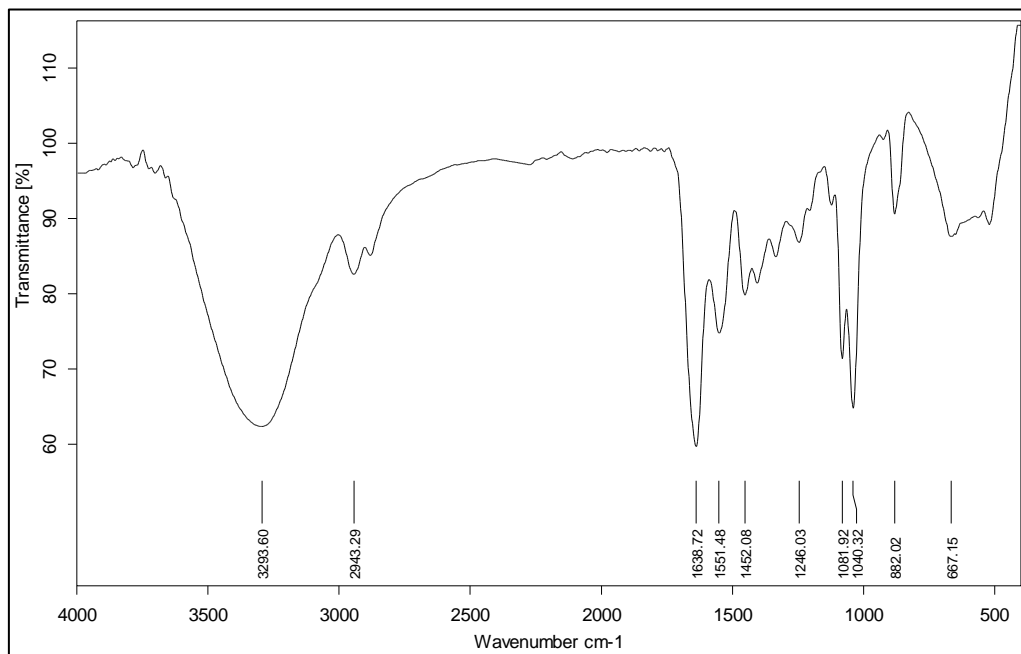
Anexo 20. Espectro infrarrojo reportado por la literatura del propilenglicol.



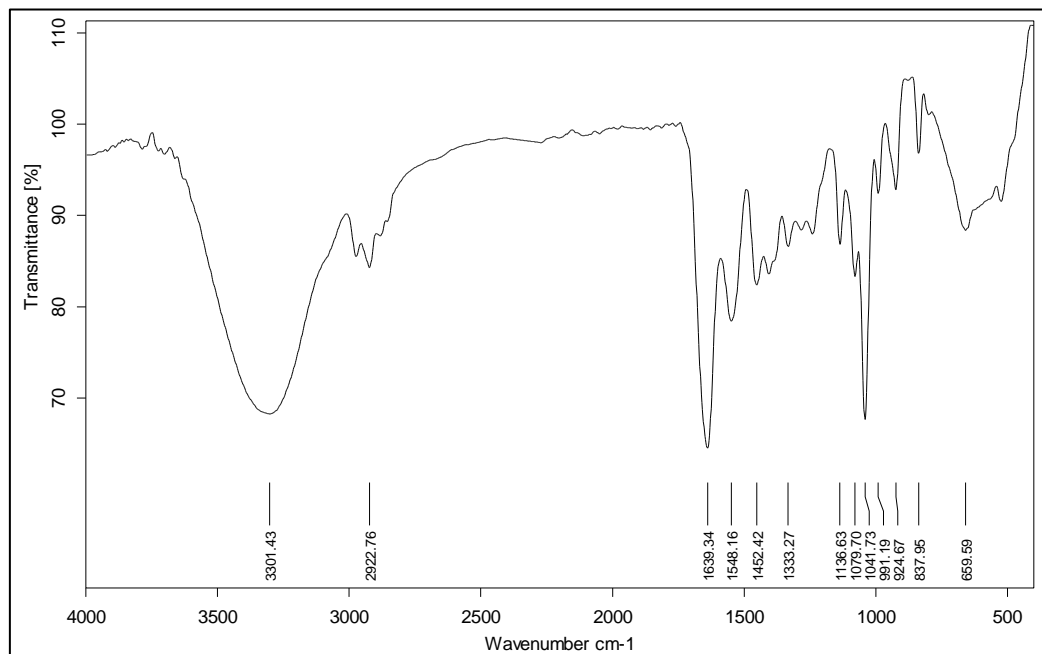
## Anexo 21. Espectro infrarrojo de la mezcla GC/GL/H2O.



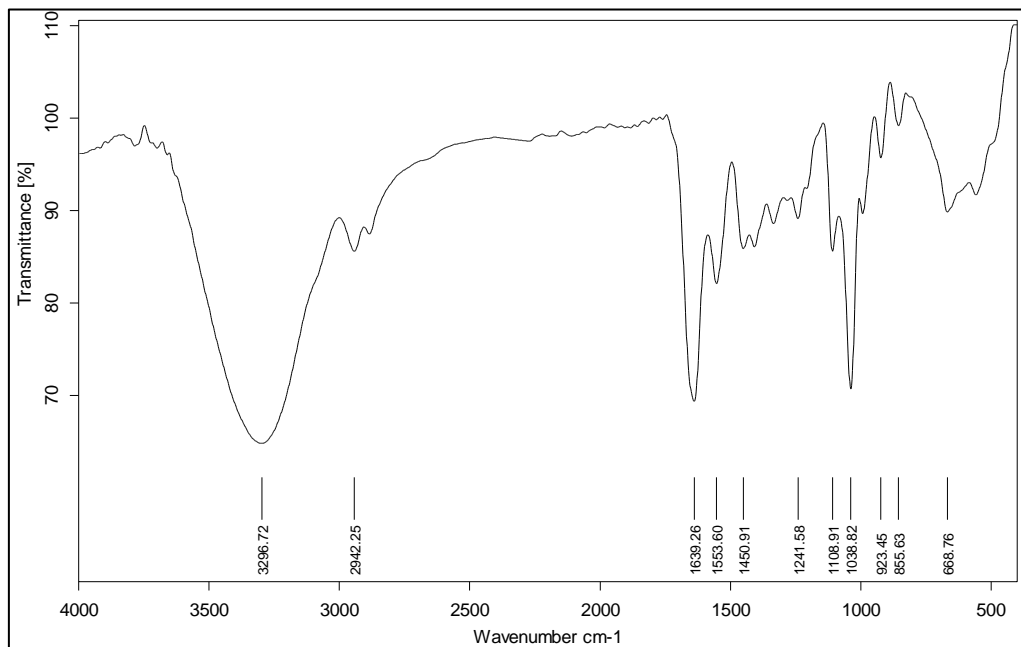
Anexo 22. Espectro infrarrojo de la mezcla GC/EG/H2O.



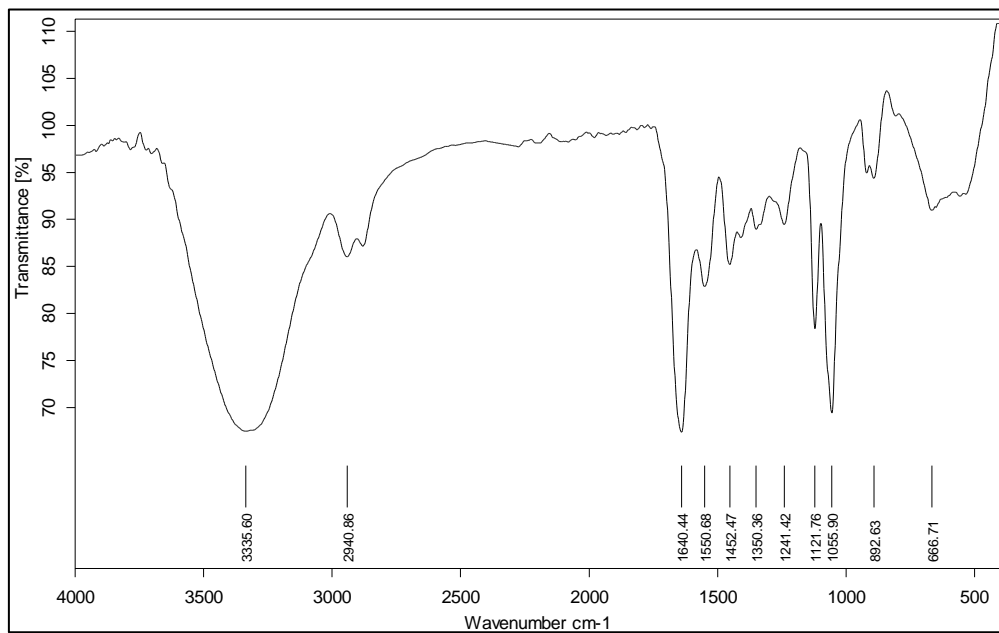
### Anexo 23. Espectro infrarrojo de la mezcla GC/PG/H2O.



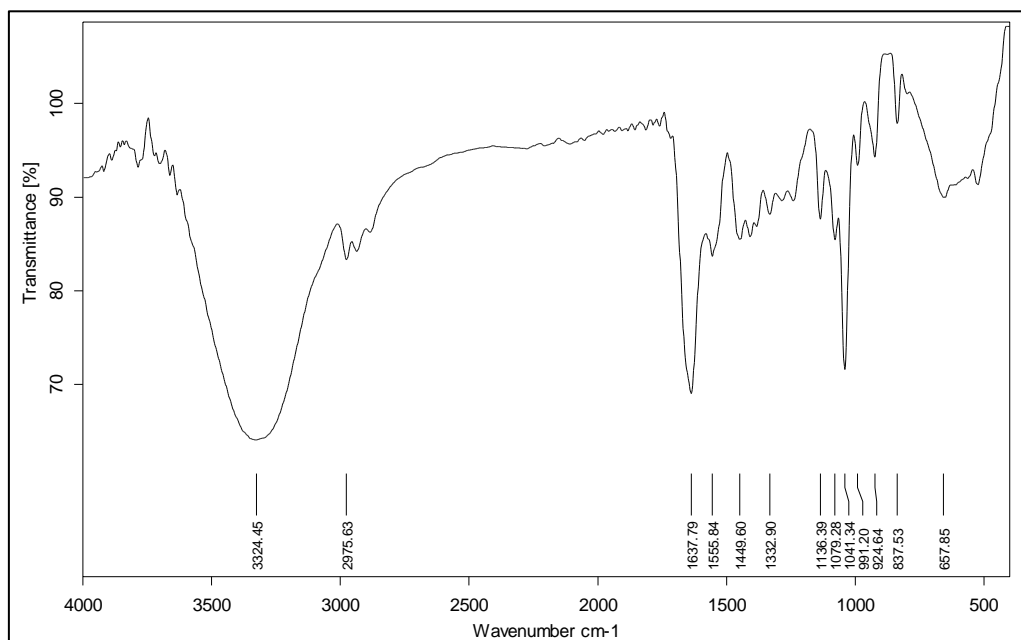
Anexo 24. Espectro infrarrojo de la mezcla CP/GL/H2O.



## Anexo 25. Espectro infrarrojo de la mezcla CP/EG/H2O



## Anexo 26. Espectro infrarrojo de la mezcla CP/PG/H2O.

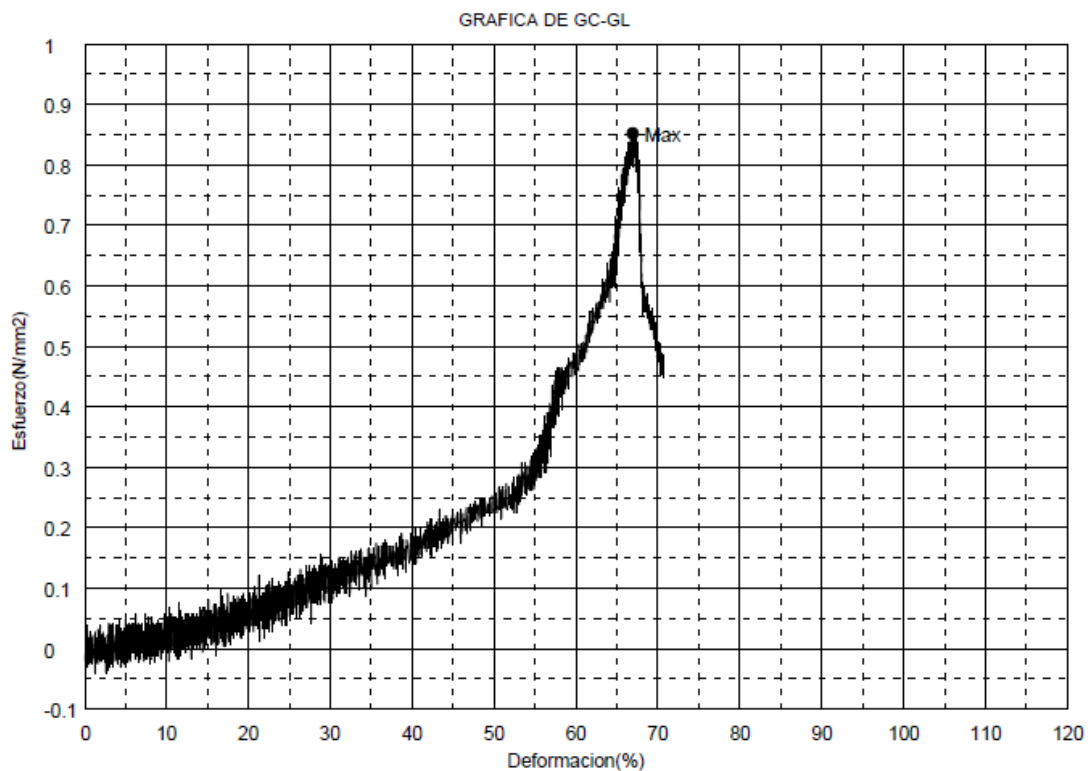


## Anexo 27. Ensayo Mecánico GC/GL.

Forma: Cilindrica

	Diametro	Altura
Unidades	mm	mm
1 - 1	28,5000	53,5000

Nombre	Max. Esfuerzo	Rotura Esfuerzo	PSF Esfuerzo	M.Elastico	LE1 Deformacion
Parametro			0.1 %/FS	2.25 N/mm2	0.2 %
Unidades	N/mm2	N/mm2	N/mm2	N/mm2	%
1 - 1	,85235	--	--	--	--

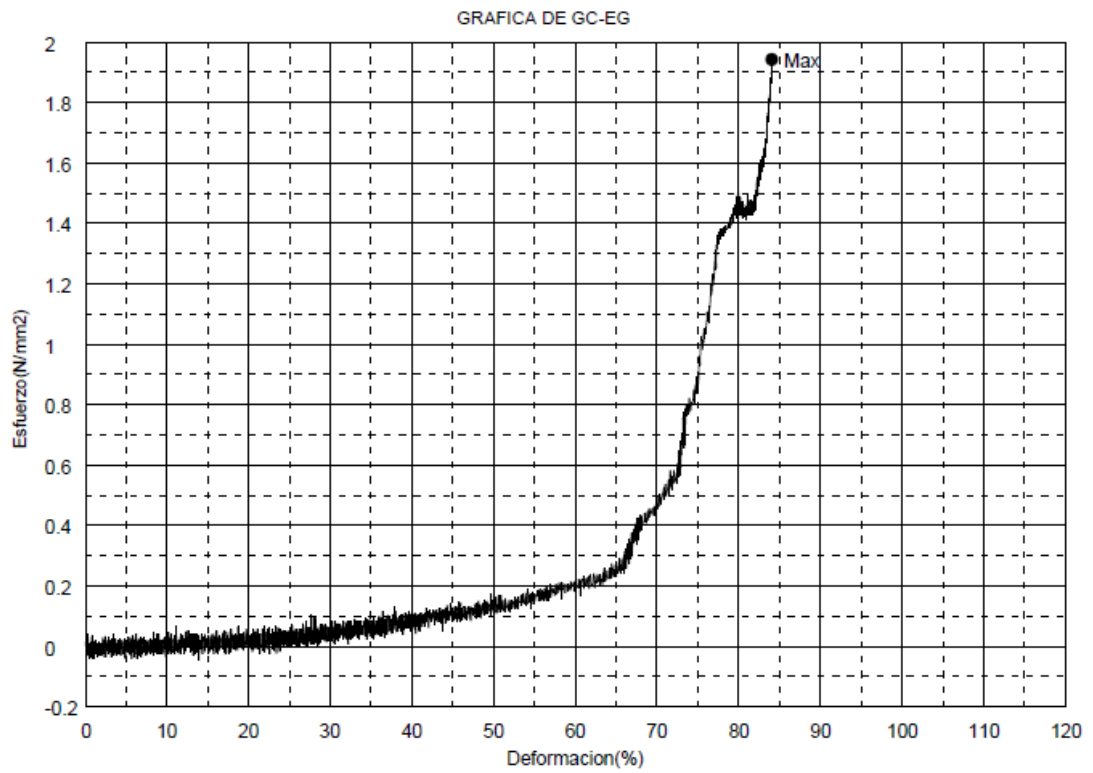


## Anexo 28. Ensayo mecánico GC/EG.

Forma: Cilindrica

	Diametro	Altura
Unidades	mm	mm
1 - 1	29,4000	49,7000

Nombre	Max. Esfuerzo	Rotura Esfuerzo	PSF Esfuerzo	M.Elastico	LE1 Deformacion
Parametro			0,1 %/FS	2, 25 N/mm2	0,2 %
Unidades	N/mm2	N/mm2	N/mm2	N/mm2	%
1 - 1	1,94258	--	--	--	--

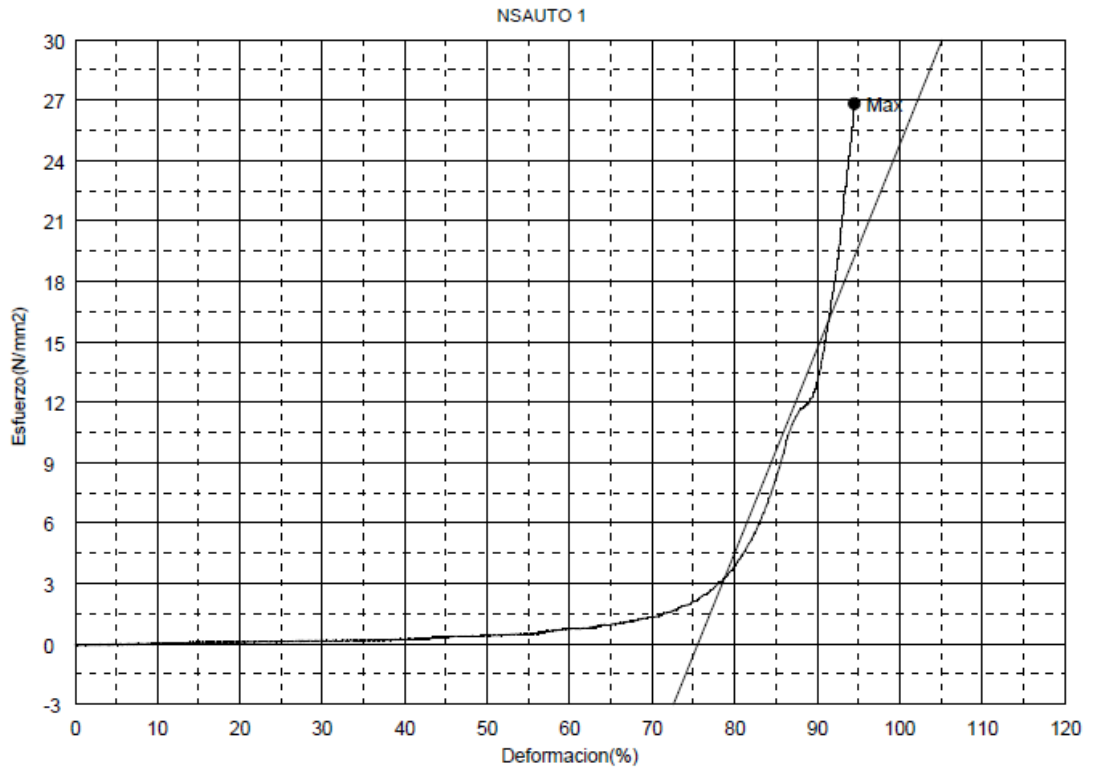


## Anexo 29. Ensayo mecánico CP/GL.

Forma: Cilindrica

	Diametro	Altura
Unidades	mm	mm
1 - 1	29,8000	41,2000

Nombre	Max. Esfuerzo	Rotura Esfuerzo	PSF Esfuerzo	M.Elastico	LE1 Deformacion
Parametro			0.1 %/FS	2.25 N/mm2	0.2 %
Unidades	N/mm2	N/mm2	N/mm2	N/mm2	%
1 - 1	26,8338	--	--	101,532	--



## Anexo 30. Ensayo mecánico CP/EG.

Forma: Cilindrica

	Diametro	Altura
Unidades	mm	mm
1 - 1	28,4000	51,7000

Nombre	Max. Esfuerzo	Rotura Esfuerzo	PSF Esfuerzo	M.Elastico	LE1 Deformacion
Parametro			0,1 %/FS	2,25 N/mm2	0,2 %
Unidades	N/mm2	N/mm2	N/mm2	N/mm2	%
1 - 1	,70544	--	--	--	--

