

**PROPIEDADES ANTIMICROBIANAS DEL COBRE EN  
PLACAS Y TUBERIAS PARA AGUA POTABLE**

**INFORME FINAL**

**Dra. María Teresa Fuentes Romero, Ced. Prof. 7173701**

**Dr. Celestino Odín Rodríguez Nava, Ced. Prof. 10979607**

**Dr. Fabián Mendoza Hernández, Ced. Prof. 09160040**

**| NACOBRE |**

**OCTUBRE/2018**

# Contenido

RESUMEN.....	3
OBJETIVO GENERAL.....	4
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
INTRODUCCIÓN.....	5
ANTECEDENTES DEL COBRE.....	6
ANTECEDENTES DEL CLORURO DE POLIVINILO (PVC).....	8
POLÍMEROS.....	8
CLORURO DE POLIVINILO.....	8
PVC RÍGIDO.....	11
PVC PLASTIFICADO (SEMIRIGIDO Y FLEXIBLE).....	13
POLICLORURO DE VINILO CLORADO (CPVC).....	15
POLIPROPILENO RANDOM (PPR).....	17
METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	18
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	19
COBRE.....	19
COMPOSICIÓN QUÍMICA.....	20
ENSAYOS DE COMPRESIÓN.....	22
MICROBIOLÓGICOS.....	22
METODOLOGÍA PARA PRUEBAS ESTÁTICAS.....	22
RESULTADOS PRELIMINARES DE LAS PRUEBAS MICROBIOLÓGICAS.....	23
POLICLORUROS DE VINILO.....	30
ESPECTROSCOPIA DE INFRARROJO.....	30
ESPECTROSCOPIA RAMAN.....	34
ESPECTRO RAMAN DEL PVC.....	35

<b>ESPECTRO RAMAN DEL CPVC .....</b>	<b>36</b>
<b>ESPECTRO RAMAN DEL PPR.....</b>	<b>38</b>
<b>PRUEBAS DINÁMICAS ANTIMICROBIANAS .....</b>	<b>39</b>
<b>RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DINAMICAS ANTIMICROBLIALES .....</b>	<b>41</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>45</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>49</b>

## RESUMEN

En el presente estudio se analizaron cuatro diferentes materiales los cuales son una de cobre de la marca NACOBRE y tres muestras comerciales de; Cloruro de polivinilo (PVC), Policloruro de vinilo clorado (CPVC) y Polipropileno Random (PPR) para poder determinar las propiedades antimicrobianas y diferencias estructurales entre cada una de las muestras de estudio.

Para analizar el cobre se realizaron tres técnicas de caracterización las cuales fueron: microscopía óptica (MO), composición química por chispa y difracción de rayos X (DRX) así mismo las muestras fueron sometidas a pruebas mecánicas tales como: resistencia a la tensión y compresión

Para los análisis de la superficie de las muestras de PVC se realizaron empleando una técnica espectroscópica de caracterización de materiales muy utilizada: espectroscopia de infrarrojo con ATR. La técnica de análisis empleada es habitualmente usada en la caracterización de la superficie de diversos materiales, así como para poder determinar su composición.

Algunas propiedades atribuidas al PVC, como las antimicrobianas, presumiblemente están relacionadas a la composición de la superficie interna de los tubos de PVC, que en algunos casos pueden variar de un tipo de tubo a otro.

Los resultados del presente estudio muestran que la composición química del cobre presenta el 99.97% de pureza con una estructura cristalina cubica centrada en las caras y un parámetro de red de 0.7240 nm.

Para el análisis de la superficie interna de las muestras de PVC es distinto entre sí, siendo semejantes al tubo blanco (PVC) y amarillo (CPVC) y a su vez distintos del tubo verde (PPR), de acuerdo con los desplazamientos observados en las frecuencias de vibración en los espectros de infrarrojo (IR).

La prueba estática de exposición de los materiales en medios microbianos, permitió evaluar posibles actividades microbianas con respecto a E. Coli y Salmonella enterica, ver las dificultades de la evaluación de los cupones (materiales seccionados de 2.5 cm de cada material estudiado) debido a que no son planos y en algunos casos pocos

flexibles, bacteria evaluada y así obtener resultados cualitativos estadísticamente representativos.

## **OBJETIVO GENERAL**

Realizar pruebas físicas, químicas y microbiológicas estáticas y dinámicas con las bacterias *E. Coli*, *Salmonella sp* y *Legionella sp* para tubería y placa de Cobre (Cu) de la aleación UNS C12200 de acuerdo con las normas ASTM B88 y NMX-W-018-SCFI empresa **Nacobre** y demostrar el efecto antimicrobiano del mismo con respecto a las tuberías de PVC, CPVC y PPR.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Caracterización de los materiales de cobre, PVC, CPVC y PPR.
2. Realizar cultivos para la bacteria *E. Coli*, *Salmonella sp* y *Legionella sp*
3. Realizar pruebas microbiológicas estáticas para los grupos bacterianos anteriormente citados, según la norma NMX-W163-SCFI-2013 para la tubería y placa de cobre de los diferentes materiales plásticos.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las tuberías residenciales más usadas son de cobre y las de PVC, CPVC y PPR. Por lo general, las tuberías de cobre son un para el abastecimiento agua, mientras que las tuberías fabricadas de polímeros son empleadas por presentarse con un bajo precio.

La gran ventaja de utilizar cobre para el transporte de agua es que es seguro e higiénico para el consumo humano; por lo que el empleo del mismo se sugirió para la fabricación utensilios domésticos desde la antigüedad.

Las civilizaciones como los griegos, romanos, egipcios, aztecas y mayas, utilizaban el cobre en la fabricación de vasijas para preservar agua y alimentos, como también en la fabricación de instrumentos quirúrgicos y en la curación de heridas. En el siglo XVII se descubrió la capacidad del cobre para combatir plagas en la agricultura, específicamente para controlar infecciones por hongos en plantaciones de trigo. Hoy en día están disponibles en el mercado diferentes pesticidas que contienen cobre en diversas formulaciones químicas, los cuales se utilizan en agricultura. También existen pinturas con cobre usadas en embarcaciones para evitar adherencia de microorganismos y, secundariamente, crustáceos (Prado V., 2012).

Es muy mencionado que estudios recientes indican que bacterias, incluyendo algunas cepas nocivas de *Escherichia coli* y *Staphylococcus aureus* meticilin-resistente, mueren en pocas horas cuando se colocan sobre superficies de aleaciones de cobre a temperatura ambiente. Esta habilidad natural para reducir la carga biológica de los microorganismos del medio ambiente se explota en la purificación del agua, pintura, material de construcción y la industria textil. Los compuestos de cobre, como sulfato de cobre e hidróxido de cobre, son materiales inorgánicos tradicionales que tienen un amplio uso como antibacterianos (Sandoval P., 2014)

Con el respaldo de la evidencia científica acumulada, el 25 de marzo de 2008, la EPA registró al cobre como el primer y único metal con propiedades antibacterianas, autorizando la difusión de conceptos importantes, entre ellos que "las superficies de cobre eliminan 99,9% de los patógenos bacterianos después de 2 h de exposición" y certificando que superficies de cobre metálico y sus aleaciones son antimicrobianos naturales, poseen eficacia antimicrobiana de larga duración, tienen un efecto autodesinfectante y son superiores a otros revestimientos disponibles en el mercado.

Este registro autoriza el uso de superficies de cobre en ambientes hospitalarios (Sandoval, P. et. al; 2014).

## **ANTECEDENTES DEL COBRE**

El cobre es un metal que se encuentra ampliamente distribuido en la naturaleza, cuyo descubrimiento data de alrededor de 5.000 años AC y que ha sido utilizado en diferentes funciones que incluye desde la construcción de utensilios de uso doméstico hasta su uso como conductor eléctrico ( Cooper Development Association. , s.f.). Sin embargo, son muchos más los roles que cumple este metal en la vida todos los seres vivos, entre los cuales destaca su función como un microelemento o nutriente esencial para realizar funciones básicas de su metabolismo celular.

En el caso de los humanos se puede precisar que el cobre es un elemento requerido en bajas concentraciones que forma parte de varios sistemas enzimáticos, que intervienen en el desarrollo fetal, en el tejido cardíaco, el proceso de osificación del esqueleto, la maduración del sistema nervioso y también en el sistema inmune de todos los seres superiores.

Además, es un componente clave en las proteínas que participan en los procesos de respiración celular y rol antioxidante esencial ayudando a neutralizar los radicales libres que producen daños celulares graves (posee un gran potencial para oxidar algunos grupos químicos de proteínas y/o lípidos celulares).

La investigación científica hoy disponible ha permitido conocer y en muchos casos dilucidar los mecanismos que explican las múltiples propiedades antimicrobianas del cobre. Es así que disponemos de investigación básica y aplicada sobre su rol antimicrobiano frente a numerosos patógenos, para el hombre y los animales, entre ellos, *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes*, *Salmonella Enterica*, *Campylobacter jejuni*, *Staphylococcus aureus* MRSA, *Legionella pneumophila*, *Clostridium difficile*, *Pseudomonas aeruginosa* y otros.

La actividad antiviral del cobre ha sido demostrada asimismo frente al virus HIV-1, el virus de la Influenza aviar y varios otros virus con y sin envoltura. A lo anterior se suma la potente actividad que tiene el cobre sobre muchas especies de hongos, algas y levaduras. Paradójicamente, en la industria actual se usan productos con importantes concentraciones de cobre sin que el ciudadano informado aprecie el rol de la adición de

este elemento en varios productos de uso frecuente. Hay dos ejemplos que son interesantes de abordar a manera de ejemplo. Este es el caso de los pesticidas en base a cobre ( Copper Sources and Management Strategies Clearinghouse., s.f.).

La razón es que al adicionar cobre ellos amplían el rango de letalidad para muchas especies de hongos, en particular algunos hongos filamentosos que causan grandes pérdidas económicas a los productores de frutas y granos. El segundo caso es el uso de cobre en pinturas (E., 1995). Hoy se encuentran en uso las pinturas denominadas “anti-fouling”, las que se utilizan para pintar barcos. El biofouling es un proceso que comienza con la adherencia de una capa de microorganismos en la superficie del barco en contacto con el agua de mar.

Tales poblaciones bacterianas se multiplican generando biopelículas (biofilms) de forma tal que se hacen resistentes a los factores deletéreos, tales como las corrientes marinas, el frío u otros sistemas generadores de estrés. Las biopelículas formadas por microorganismos y algunos de sus productos celulares (polisacáridos) sirven luego de base para que se produzca la incrustación de organismos multicelulares (eucarióticos), tales como crustáceos y otros mariscos de cubierta calcárea.

Todo este fenómeno conduce a que la tara (peso) del barco aumente significativamente y en forma proporcional disminuya la eficiencia del desplazamiento del mismo, con el consecuente impacto en el mayor costo del transporte.

Estas dos aplicaciones del cobre como agente capaz de inhibir diferentes poblaciones microbianas se encuentran desde muchos años disponibles y son comercializadas sin que muy poca gente haya reparado el rol esencial que el cobre jugaba en ellas. Tal rol es el de actuar como un eficiente antimicrobiano de amplio espectro, es decir inactiva microorganismos tales como las bacterias, virus y hongos (Figueroa).

Los antecedentes mencionados y la eficacia de la actividad antimicrobiana de productos en base a cobre, ha motivado en este último tiempo el desarrollo de varios estudios tendientes a conocer los probables mecanismos envueltos en esta actividad antagónica, así como evaluar posibles aplicaciones de este metal.

# **ANTECEDENTES DEL CLORURO DE POLIVINILO (PVC)**

## **POLÍMEROS**

Un tipo de materiales muy empleados en diversas áreas en la vida cotidiana son los polímeros. Los polímeros tienen un gran peso molecular y se componen de un mayor número de unidades repetitivas. La síntesis de polímeros tiene lugar a una escala muy amplia y los polímeros tienen una amplia gama de propiedades para usar en diferentes aplicaciones (Lu X, 2011) y (Springer-Verlag, 1999)

Los polímeros tienen diversas aplicaciones, por ejemplo, en el área de empaquetamiento (bolsas de alimento, botellas, bolsas para basura, etc.), médica (catéteres y tubos para asistir sangre a órganos, prótesis, lentes, cepillos de dientes, etc.), recreación (botes, balones, calzado atlético, bicicletas, etc.), textil (ropa, fibra textil), transportes (teléfonos, computadoras, pinturas, recubrimientos) e industrial (tubos, válvulas, engranes, cables aislantes y conectores) (Young, 2011.).

Los polímeros son materiales altamente utilizados en todos los contextos existentes. Por ello, estas macromoléculas tienen mucho interés científicamente, debido a sus valiosas propiedades y por eso en las últimas décadas se ha centrado el interés en el estudio de las peculiares estructuras químicas de estos materiales. Tal es el caso del policloruro de vinilo (PVC).

## **CLORURO DE POLIVINILO**

Dentro de los polímeros, el policloruro de vinilo o PVC [del inglés poly(vinyl chloride)] es uno de los termoplásticos más versátiles y uno de los polímeros comerciales más utilizados en la actualidad. La gran variedad de propiedades que presenta se debe a la alta rigidez y la relativa tenacidad resultantes de la estructura de su cadena, así como a la posibilidad de reducir la interacción entre cadenas mediante el empleo de plastificantes.

El PVC se presenta como un material blanco que comienza a reblandecer alrededor de los 80 °C y se descompone sobre 140 °C. Es un polímero que se obtiene por polimerización por adición y además una resina que resulta de la polimerización del cloruro de vinilo o cloroetano. Tiene una muy buena resistencia eléctrica y a la llama. La

Figura 1 muestra la estructura del monómero de cloruro de vinilo, así como su polímero (Tonelli, 2001.).

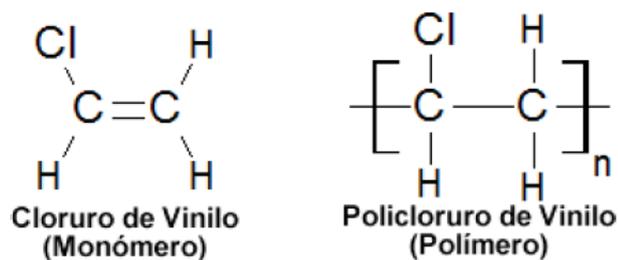


Figura 1. Estructura del monómero y el polímero del PVC.

El átomo de cloro enlazado a cada átomo de carbono le confiere características amorfas principalmente e impiden su cristalización, la alta cohesión entre moléculas y cadenas poliméricas del PVC se deben principalmente a los momentos dipolares fuertes originados por los átomos de cloro, los cuales a su vez dan cierto impedimento estérico, es decir, que repelen moléculas con igual carga, creando repulsiones electrostáticas que reducen la flexibilidad de las cadenas poliméricas, esta dificultad en la conformación estructural hace necesario la incorporación de aditivos para ser obtenido un producto final deseado.

El cloruro de vinilo (monómero) fue descubierto por Regnault en 1835, al tratar el 1,2-dicloroetano con una solución alcohólica de potasa cáustica. De forma casual, también descubrió el polímero al haber expuesto a la luz un tubo de ensayo conteniendo el monómero. En 1872, Bauman pudo polimerizar el monómero y consiguió establecer algunas propiedades del termoplástico (Asua, 2008.).

Ostromislensky, en 1912, trabajando en la síntesis del caucho, estableció las condiciones de polimerización del cloruro de vinilo que sirvieron de base a las técnicas empleadas en Alemania en 1930. Solamente quedaba una pequeña laguna. El polímero obtenido era excesivamente rígido y no apto para los usos industriales, más si se tiene en cuenta que se perseguía, durante años, el conseguir un nuevo producto similar al caucho. Este inconveniente pudo ser superado merced al descubrimiento de Senón, en 1932, de la plastificación del policloruro de vinilo. Las excelentes propiedades de estos materiales, desde el punto de vista de su utilización práctica, han impulsado de manera sorprendente definitiva la producción mundial del PVC y las técnicas de su polimerización.

A pesar de los progresos alcanzados en cuanto se refiere a métodos de obtención, propiedades, posibilidades de plastificación, etc., su máxima expansión no se alcanza hasta que la industria auxiliar productora de máquinas y elementos de transformación pone al día sus programas y ofrece al industrial el utillaje adecuado para control y transformación del PVC. Es un hecho bien conocido el enorme incremento del consumo de este polímero en todo el mundo, al aparecer extrusoras capaces de conseguir perfiles de grandes dimensiones (conductos de más de 1 m. de diámetro) y máquinas de inyección con capacidad para piezas de más de 12 kg de peso.

Además de las excelentes propiedades del polímero, ha contribuido enormemente a su expansión el que las primeras materias de que se obtiene son de gran abundancia y módico precio. Fundamentalmente se parte del acetileno y etileno, como productos orgánicos y del cloro, procedente del cloruro de hidrógeno y del cloruro de sodio, como material inorgánico. La molécula de PVC contiene un 43 % de su peso en etileno y el 57 % en cloro.

- El PVC se presenta en su forma original como un polvo blanco, amorfo y opaco.
- Es inodoro, insípido e inodoro, además de ser resistente a la mayoría de los agentes químicos.
- Es ligero y no inflamable por lo que es clasificado como material no propagador de la llama.
- No se degrada, ni se disuelve en agua y además es totalmente reciclable.

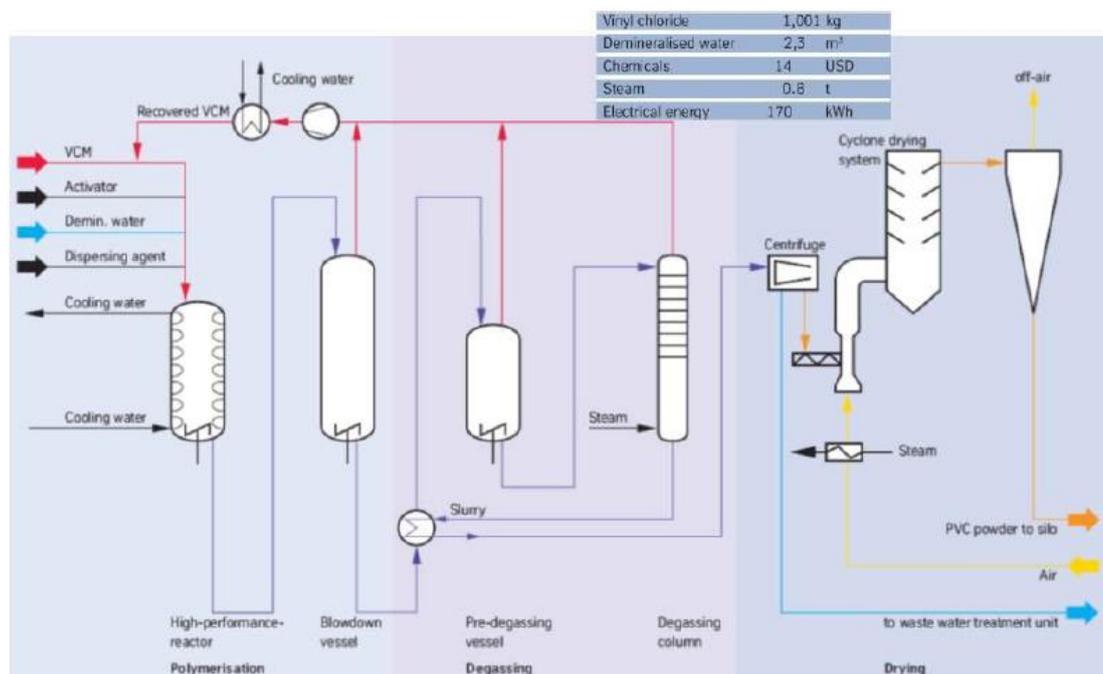
Es uno de los polímeros más estudiados y utilizados por el hombre para su desarrollo y confort, dado que por su amplia versatilidad es utilizado en áreas tan diversas como la construcción, energía, salud, preservación de alimentos y artículos de uso diario, entre otros.

El desarrollo en tecnología y aplicaciones no ha tenido pausa llegándose en nuestros días a una producción de 25 millones de toneladas.

Técnicamente se distinguen dos tipos de PVC claramente diferentes: el rígido y el flexible o plastificado. El primero es el que se produce directamente en la polimerización, partiendo del monómero puro. El segundo se obtiene mediante la adición de plastificantes. Cada uno se fabrica con una gran variedad de subtipos,

destinados a diferentes aplicaciones finales, pudiéndose conseguir desde una rigidez similar a la de la madera hasta la flexibilidad de un caucho.

El siguiente esquema de la Figura 2 presenta el esquema de fabricación del PVC (Biesenberger, 1983).



**Figura 2.** Proceso de fabricación del PVC.

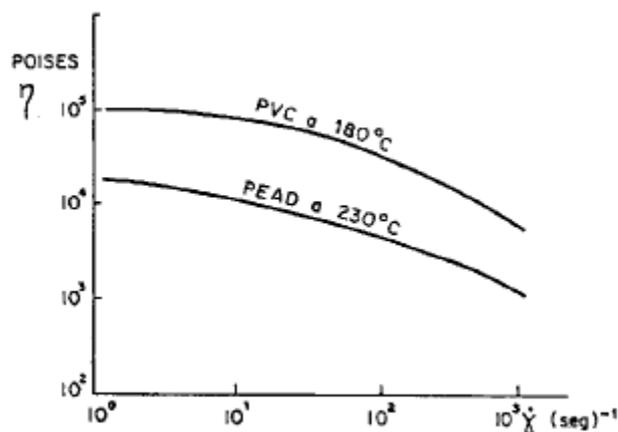
### PVC RÍGIDO

La densidad del PVC rígido es de 1.4 g/cm<sup>3</sup>, su temperatura máxima de utilización es de 65°C y ofrece una alta resistencia a la llama, debido a que contiene un 56 % en peso de cloro, lo que le permitió, ya hace muchos años, desplazar en numerosas aplicaciones al celuloide (nitrato de celulosa).

El PVC en estado fundido es mucho más viscoso que las poliolefinas, por ello, aunque puede procesarse por todas las técnicas de transformación de los termoplásticos, es muy difícil fabricar artículos de pequeño espesor a partir del polímero fundido por inyección o extrusión, pues para evitar la degradación no debe superarse la temperatura de 180-185 °C. En la Figura 3, que nos da la viscosidad en función de la velocidad de deformación por corte, se pone de manifiesto la mayor viscosidad del PVC a la temperatura de 180°C, con respecto al PEAD a 230°C. Por estas razones la productividad

de las máquinas de inyección y extrusión resulta mucho menor en el caso del PVC que para los polietilenos.

Evidentemente la fluidez del PVC fundido depende del peso molecular de la resina utilizada, que puede variar entre 50000 y 120000 y éste se especifica, normalmente, de forma indirecta a través del “valor K” o del índice de viscosidad ISO, obtenidos a partir de una medida de la viscosidad relativa en ciclohexanona.



**Figura 3.** Viscosidad del PVC a esta temperatura, con respecto al PEAD a 230°C.

Para facilitar la fusión y homogeneización del material, así como el flujo del fundido en contacto con los metales, usualmente se adicionan pequeñas cantidades de ceras parafínicas y sales metálicas de ácidos de 14 a 18 átomos de carbono que actúan como lubricantes internos y externos (Braun, 2013.).

Para disminuir la descomposición del material a alta temperatura se añaden estabilizadores que absorben y neutralizan el HCl producido, evitando así el efecto autocatalítico que ocasiona este compuesto y la corrosión en las partes metálicas. Los más usados son las sales básicas de plomo (carbonatos, sulfatos, fosfitos), pero tienen el inconveniente de ser tóxicos y, por tanto, no pueden ser empleados en formulaciones destinadas a la fabricación de envases para alimentos (botellas de agua mineral, recipientes para margarina, etc.). Para estos fines se usan compuestos organometálicos de estaño y, cuando se requiere una alta transparencia (como es el caso de las botellas de agua mineral o de aceite), se emplean mercaptidas de estaño del tipo:

$(C_4H_9)_2Sn(SC_{12}H_{25})_2$ . Los aceites vegetales epoxidados (por ejemplo, el de soja) actúan como estabilizadores con un efecto simultáneo plastificante.

En conjunto las características del PVC sin modificar no son excesivamente buenas: es muy frágil y con el tiempo envejece, perdiendo resistencia y haciéndose cada vez más frágil. Sin embargo, se pueden mejorar todas sus propiedades mediante aditivos específicos. Además de los ya citados estabilizantes, que inhiben la propagación de las reacciones en cadena de descomposición, suele mejorarse su resistencia al impacto mediante mezcla con terpolímeros de metacrilato-butadieno-estireno (MBS), que mejoran y facilitan también las operaciones de transformación. Admiten altos porcentajes de cargas (carbonato y silicatos de calcio, bentonitas, etc.) (Lokensgard, 2008.).

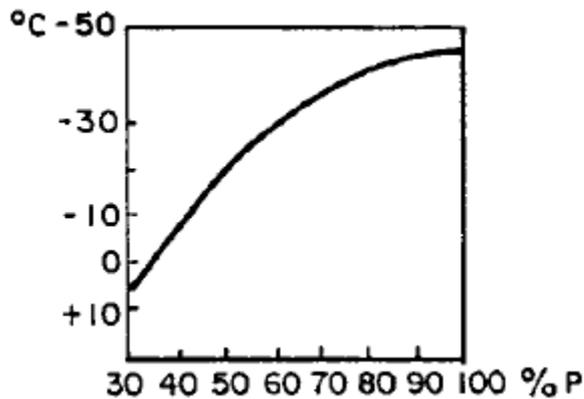
La buena resistencia del PVC a los agentes químicos y la facilidad con que se suelda y conforma le hacen un material especialmente apto para ser utilizado en la construcción de equipos, tuberías, válvulas y accesorios para la industria química, envases alimenticios, instalaciones de saneamiento y de decoración, por lo que su consumo se encuentra muy extendido. Es uno de los materiales plásticos más utilizados en la construcción de edificios.

#### **PVC PLASTIFICADO (SEMIRIGIDO Y FLEXIBLE)**

El efecto de los plastificantes es debido a que sus moléculas se introducen entre las cadenas macromoleculares del polímero facilitando su movimiento relativo respecto a las contiguas. Los plastificantes más utilizados son el ftalato de dioctilo (DOP), el ftalato de dibutilo (DBP), el tricresilfosfato (TCP), el dioctilsebacato (DOS), etc. La proporción del plastificante suele variar desde el 10 al 60 % en peso, según el grado de flexibilidad/rigidez deseado (Chanda, 2013.).

Las resinas utilizadas deben tener una alta porosidad para facilitar la absorción del plastificante. Esto se consigue controlando adecuadamente las condiciones de la polimerización que se lleva a cabo en suspensión.

En la Figura 4 se indica aproximadamente la relación en peso de (plastificante/resina) que debe tener un material para mantener su flexibilidad a una determinada temperatura.



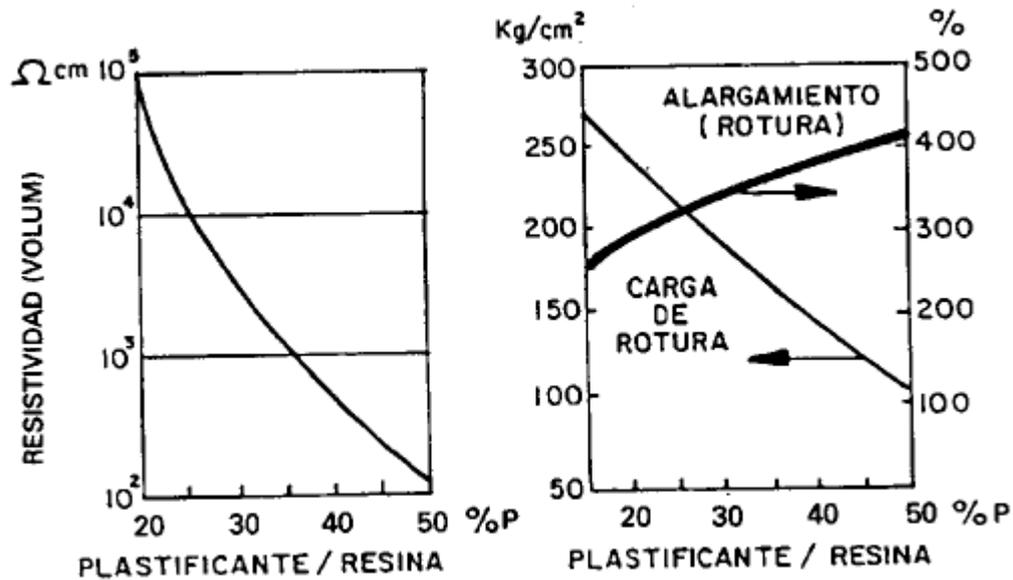
**Figura 4.** Relación en peso de (plastificante/resina) que debe tener un material para mantener su flexibilidad a una determinada temperatura.

Existe una gama completa de plastificantes que, formulados convenientemente con otros aditivos y distintas cargas, permiten satisfacer muy diferentes requisitos exigidos en los productos finales. Estas formulaciones son muchas veces secretas y objeto de una continua investigación y mejora. Algunos proporcionan flexibilidad al PVC a bajas temperaturas y no emigran por difusión a temperaturas relativamente altas. Para los envases alimentarios se exigen plastificantes inocuos para la salud y que no produzcan olor. En otros casos deben resistir la extracción que producen ciertos componentes usados en los adhesivos con los que se pegan las piezas de PVC.

Las técnicas de transformación aplicables son las de moldeo por inyección, extrusión y calandrado partiendo de mezclas previamente homogeneizadas en mezcladoras adecuadas. El calandrado está especialmente indicado para la fabricación de láminas y pieles de pequeño espesor, que después pueden soldarse unas a otras mediante laminado en caliente.

La presencia de plastificante reduce la resistencia mecánica y la resistividad eléctrica del PVC como se pone de manifiesto en la Figura 5.

Sin embargo, el PVC es ampliamente utilizado en el recubrimiento de cables eléctricos de baja tensión, empleándose para tales aplicaciones compuestos especiales que soportan en continuo temperaturas del orden de 100 °C, e incluso superiores (caso de cortocircuito) pero de poca duración.



**Figura 5.** Resistencia mecánica y resistividad eléctrica del PVC en función de la relación en peso (plastificante/resina).

El film transparente de PVC resulta especialmente adecuado para la utilización en agricultura para invernaderos, con la ventaja sobre el PEBD de una mayor transparencia para las radiaciones luminosas e inferior para las infrarrojas, manteniendo el calor durante la noche. Su menor resistencia a la fluencia (al ser un material muy poco cristalino) obliga a reforzarlo mediante un sustrato reticulado de material más resistente (poliéster o poliamida).

Siempre que la cantidad de plastificante sea relativamente pequeña, el PVC plastificado arde lentamente y tiende a autoextinguirse. La resistencia al fuego puede mejorarse considerablemente usando plastificantes fosfatados o mediante adición de óxido de antimonio, a menudo con (“extenders”) del tipo de las parafinas cloradas.

### **POLICLORURO DE VINILO CLORADO (CPVC)**

El Policloruro de vinilo clorado (CPVC) es un termoplástico producido por cloración de la resina de policloruro de vinilo (PVC). Los usos incluyen tuberías de agua fría y caliente, y el manejo de líquidos industriales.

CPVC es el PVC que ha sido clorado a través de una reacción de cloración de radicales libres. Esta reacción suele ser iniciada por la aplicación de energía térmica o UV utilizando diferentes enfoques. En el proceso, el gas cloro se descompone en cloro

de radicales libres que se hace reaccionar con PVC en un paso posterior a la producción, esencialmente, reemplazando una parte del hidrógeno en el PVC con el cloro.

Dependiendo del método, una cantidad variable de cloro se introduce en el polímero permitiendo una forma de medida para ajustar las propiedades finales. El contenido de cloro puede variar de un fabricante a otro, la base puede ser tan baja como 56.7% en PVC hasta un máximo de 74% en masa, aunque la mayoría de las resinas comerciales tienen un contenido de cloro de 63% a 69%. A medida que el contenido de cloro en CPVC es mayor, su temperatura de transición vítrea (Tg) se incrementa significativamente. Bajo condiciones normales de funcionamiento, el CPVC se vuelve inestable en un 70% de la masa de cloro.

Varios aditivos se introducen en la resina con el fin de hacer al material procesable. Estos aditivos pueden consistir de estabilizadores, modificadores de impacto, pigmentos y lubricantes.

El CPVC comparte la mayoría de las características y propiedades del PVC. También es fácilmente trabajable, incluyendo el mecanizado, soldadura, y la formación. Debido a su excelente resistencia a temperaturas elevadas, el CPVC es ideal para construcciones de auto-apoyo, donde las temperaturas de hasta 90°C (194°F) están presentes. La capacidad de doblar, la forma y soldadura del CPVC permite su uso en una amplia variedad de procesos y aplicaciones. Presenta propiedades ignífugas.

CPVC puede soportar el agua corrosiva a temperaturas mayores que las de PVC, por lo general de 40°C a 50°C o superior, lo que contribuye a su popularidad como material para los sistemas de tuberías de agua en viviendas, así como la construcción comercial.

La principal diferencia mecánica entre el CPVC y PVC, es que el CPVC es mucho más dúctil, permitiendo una mayor flexión y resistencia a la compresión. Además, la resistencia mecánica del CPVC lo convierte en un candidato viable para reemplazar a muchos tipos de tuberías metálicas en las condiciones en que la susceptibilidad del metal a la corrosión limita su uso.

El CPVC es similar al PVC en resistencia al fuego. Suele ser muy difícil de encender y tiende a autoextinguirse, cuando no se aplica una llama de forma directa

Debido a su contenido de cloro, la incineración del CPVC, ya sea un incendio o en un proceso de eliminación industrial, puede dar lugar a la creación de las dioxinas.

### **POLIPROPILENO RANDOM (PPR)**

Es un polímero termoplástico de propileno de alta tecnología del cual se fabrican tuberías y conexiones. Entre sus propiedades mecánicas se destacan sus valores de rigidez, dureza y resistencia.

Este tipo de material es usado comúnmente para agua potable y caliente sistemas de calefacción del suelo y de radiadores, igual que en cualquier sistema de distribución de agua y aire comprimido, diferentes químicos.

EL PPR es un polímero fisiológicamente inocuo, idóneo para muchos usos del sector alimenticio y farmacéutico. Una de las principales ventajas del sistema PPR es su fácil y rápida instalación.

# METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

A continuación, se describe un diagrama experimental de las actividades desarrolladas en el presente estudio.

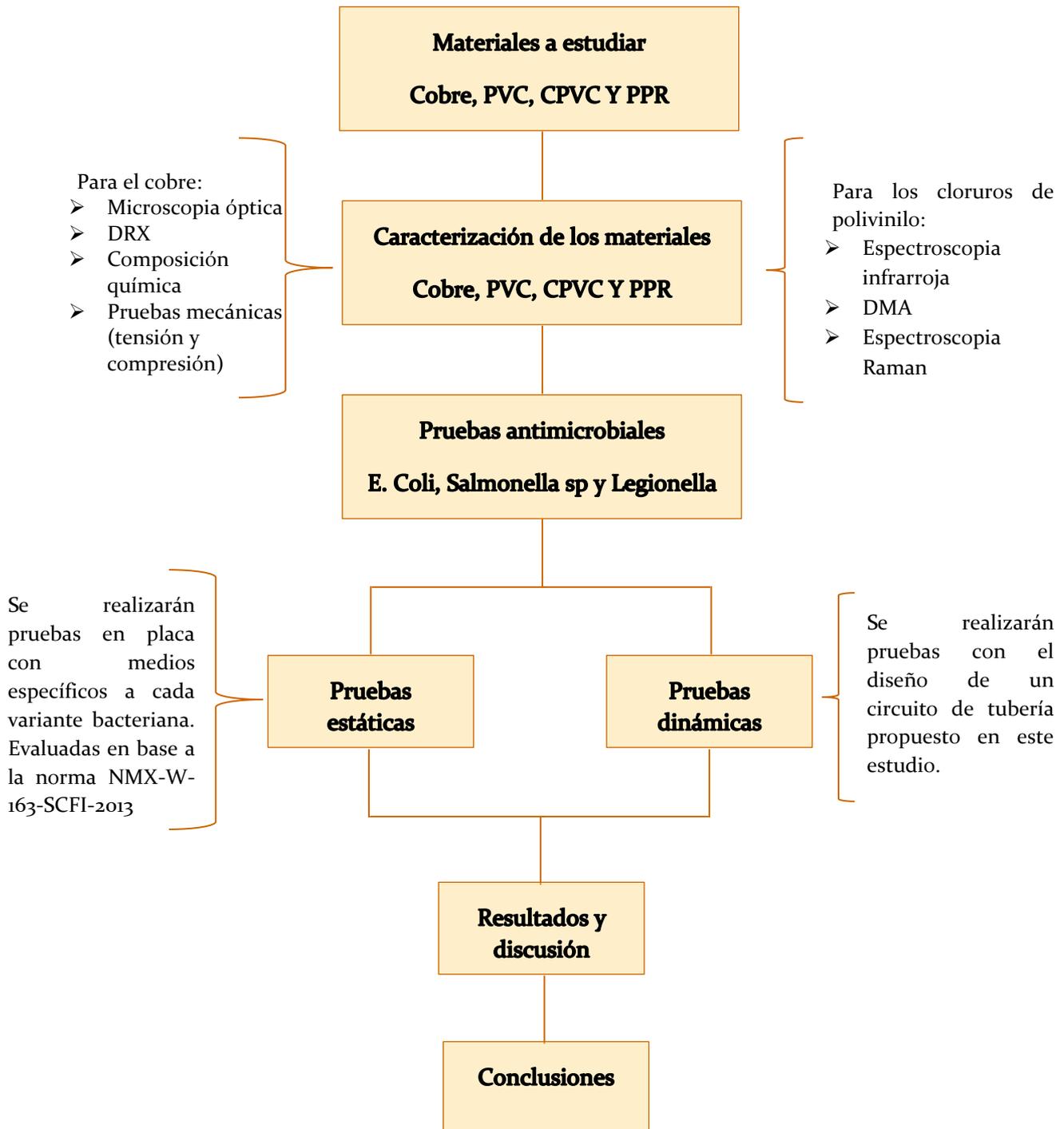
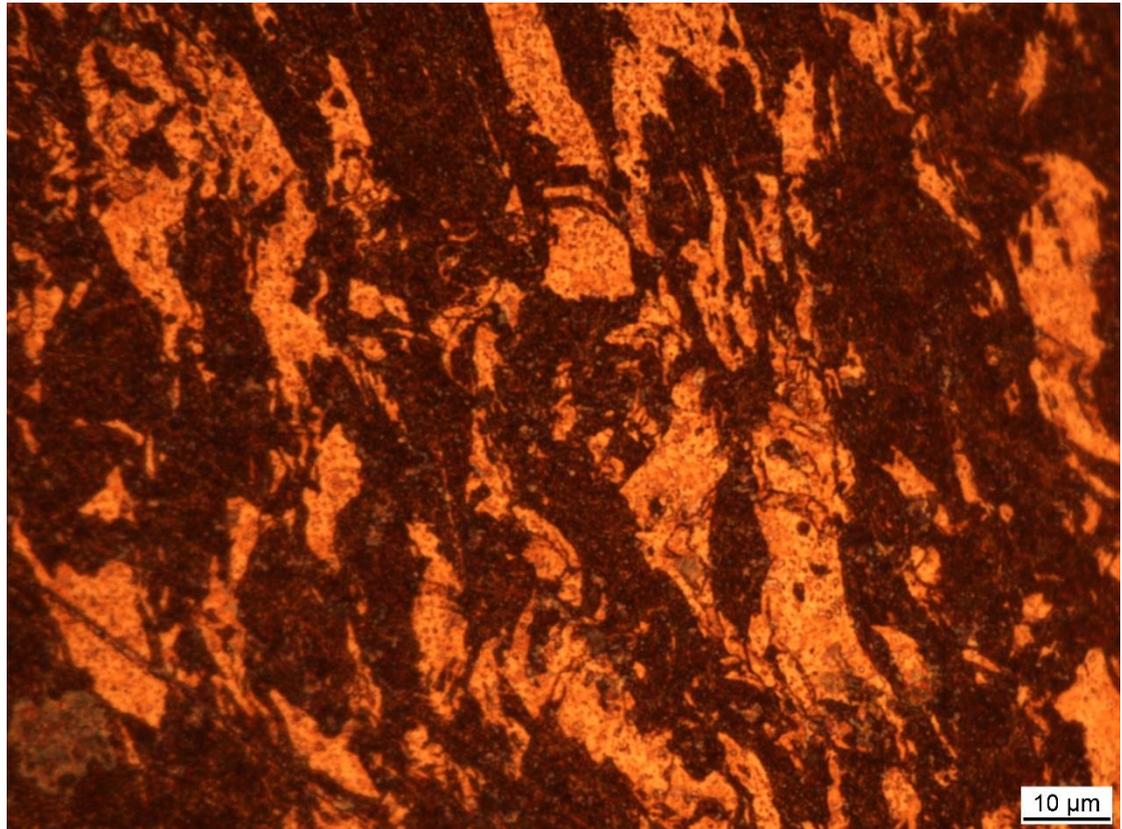


Figura 6. Diagrama experimental de esta investigación

# RESULTADOS Y DISCUSIÓN

## COBRE

Se realizó un corte en la sección transversal del tubo obteniendo la siguiente micrografía. Mostrado en la figura 7.



**Figura 7.** Micrografía del tubo de cobre tipo M de una aleación UNS C12200 de acuerdo con el estándar ASTM B88 y norma NMX-W-018-SCFI-2006 a 100X.

Obteniendo un número de grano de 93 granos/pul<sup>2</sup> y un tamaño promedio de 7.6 μm.

Partiendo que las tuberías sin costura se fabrican a partir de una pieza maciza cilíndrica la cual es calentada en un horno, previo a su extrusión. Luego se deforma con rodillos y posteriormente se realiza un agujero mediante un penetrador; este tipo de tubería es la mejor para contener la presión debido a su homogeneidad en todas sus direcciones, sin embargo existen variaciones en el proceso según su fabricante se toma en consideración la realización de un análisis comparativo de para poder determinar características mecánicas del material se realizaron ensayos de tensión,

compresión y microdureza la tubería de cobre, los resultados se describen a continuación.

Micro dureza Vickers: presentando un promedio de 9 lecturas en cada tubo y obteniendo un promedio el cual se presenta a continuación en la Tabla 1. La resistencia superficial que presenta un material a la deformación plástica pudo observarse mediante el ensayo de microdureza, permitiéndonos observar que estos tubos en general presentan mayor a los extremos que en el centro.

Tabla 1. Promedio de las durezas Vickers de un tubo de cobre tipo M

	T1	T2
Microdureza Vickers (HV 0.1)	148.46	149.16

## COMPOSICIÓN QUÍMICA

Se realizó la composición química por elemento con dos técnicas de caracterización; 1) por chispa y 2) difracción de rayos X (DRX).

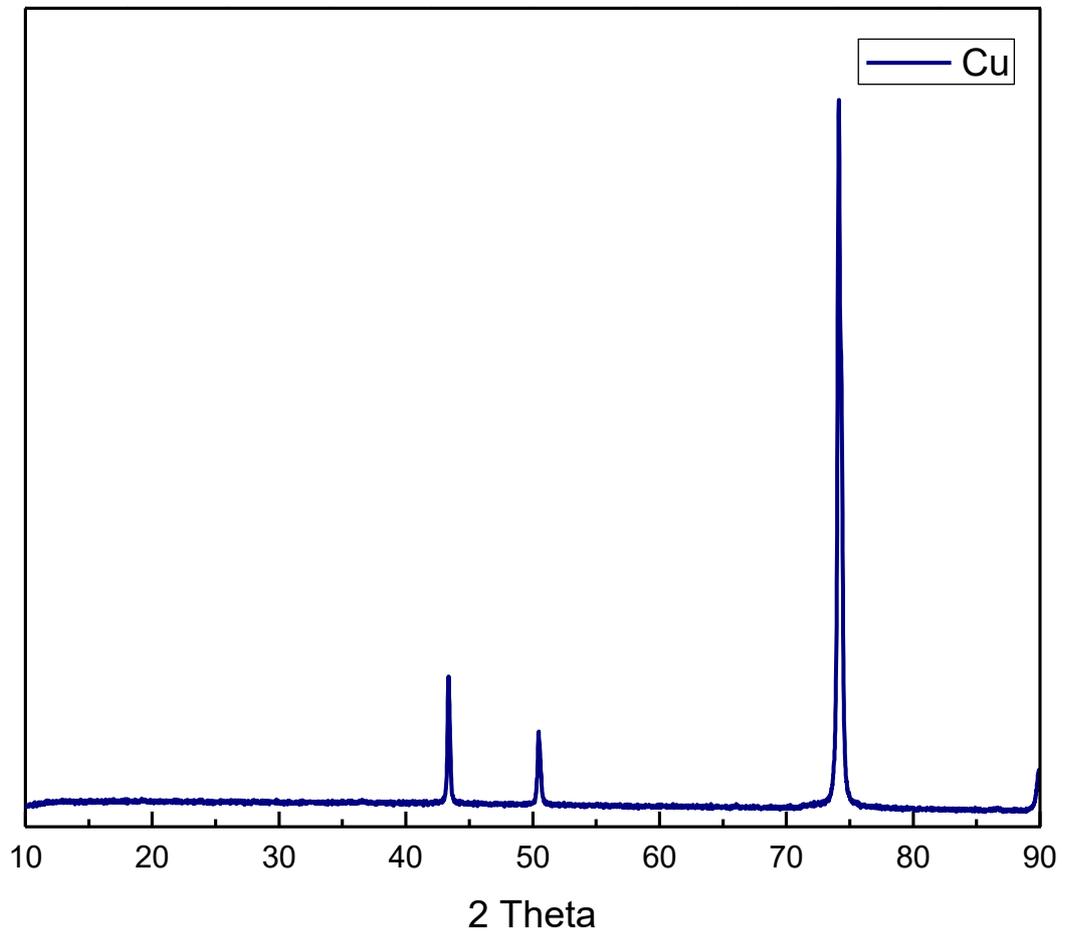
La tabla 2 muestra los resultados de la técnica por chispa, de acuerdo con la norma NMX K 150 donde muestra la cantidad de elementos permitidos en el cobre.

Tabla 2. Análisis químico por chispa

Elemento Químico		
	T-1	T-2
<b>Cu</b>	99.980	99.950
<b>Ag</b>	0.0005	0.0011
<b>P</b>	0.029	0.026

También se determinó la composición química por el método Rietvel, es una técnica de refinamiento que tiene la capacidad de determinar con mayor precisión parámetros estructurales de la muestra, a partir de la construcción de un modelo teórico que se ajusta al patrón de difracción experimental, mediante

el método de mínimos cuadrados. Herramienta aportada directamente con el software X Powder.



**Figura 8.** Difractograma del tubo de cobre tipo M de una aleación UNS C12200 de acuerdo con el estándar ASTM B88 y la norma NMX-W-018-SCFI-2006

De acuerdo con la carta cristalográfica: 9013014 se obtiene la siguiente información: radio atómico: 0.128 nm, estructura cristalina: FCC y con el método Riedvel la composición química: 99.97%.

## ENSAYOS DE COMPRESIÓN

La Tabla 3, muestra los ensayos de esfuerzos de compresión en donde primero se deforman elásticamente y posteriormente plásticamente, mostrando el comportamiento del material bajo deformaciones permanentes grandes, así como si este presenta un comportamiento frágil a tracción, pudiendo observar que el cobre continuo con sus propiedades dúctiles.

Tabla 3. Ensayos de compresión

	Punto de cedencia (kgf)	Carga máxima (kgf)	Altura inicial	Altura final
T1	2320	2613.33	22.5	6.09
T2	5640	5843.13	21.5	5.15

La tabla 4, muestra los resultados del punto de cedencia, carga máxima, alturas, así como el % de reducción en la longitud.

Tabla 4. Ensayos de compresión incluyendo los puntos de cedencia.

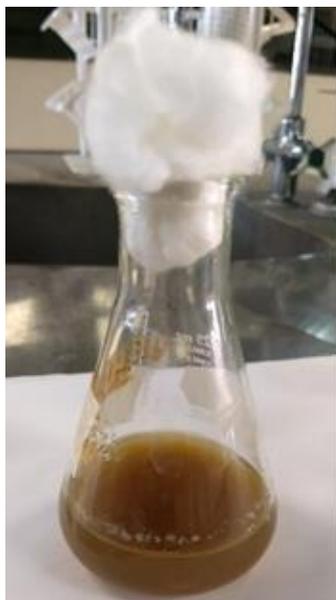
	Punto de cedencia (kgf)	Carga máxima (kgf)	Altura inicial	Altura final	% reducción de longitud
T1	1554.55	1796.58	22	5.27	77%
T2	5625	5880.68	22	5.64	75%

## MICROBIOLÓGICOS

### METODOLOGÍA PARA PRUEBAS ESTÁTICAS

Para evaluar la inhibición microbiana por los materiales PVC, CPVC, PPR y cobre, se llevó a cabo dos metodologías utilizando la bacteria *E. Coli*. La primera metodología consistió en poner en contacto directo a los cupones de los diferentes

materiales de aproximadamente 1 cm<sup>2</sup> de área con *E. Coli*, estas crecieron en agar de bilis y rojo de violeta, se inoculó 100 µL de una solución de *E. Coli* previamente obtenida y se dejó crecer las bacterias por un periodo de dos días en incubadora a 24°C en ausencia de luz. La segunda metodología se evaluó la inhibición de crecimiento microbiano en medio de cultivo líquido, el cual tenía la siguiente composición: 10 g/l de glucosa, 2 g/l de peptona de caseína, 20 mg/L de Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> y se ajustó con NaOH 1M a pH de 7. En matraces de 250 mL se agregó 100 mL de medio de cultivo previamente mencionado (Figura 9); para evaluar el efecto de los materiales PVC, CPVC, PPR y cobre se agregó un cupón de 1 cm<sup>2</sup> de área aproximadamente en cada matraz por separado, adicionalmente se consideró un matraz con medio y sin cupón como control. Tanto en agar como en medio de cultivo líquido, los experimentos se realizaron por triplicado.



**Figura 9.** Matraz con 100mL de cultivo nutritivo inoculado con *E. Coli* para evaluar la capacidad antimicrobiana de los materiales PVC, VPVC, PPR y cobre

## **RESULTADOS PRELIMINARES DE LAS PRUEBAS MICROBIOLÓGICAS**

En la evaluación de la inhibición del crecimiento microbiano de *E. Coli* se realizó por dos estrategias, la primera fue en medio sólido y la segunda en medio

líquido. En lo que respecta a la evaluación de medio sólido se realizó en agar bilis y rojo de violeta, el cual es un medio específico para el crecimiento de la bacteria *E.Coli*. En esta experimentación en medio sólido se llevaron a cabo dos formas de colocar los cupones, la primera fue sobreponer los cupones en el agar previa inoculación de la bacteria *E.Coli*. (Figura , Figura 112, Figura 14 y Figura 116A). La segunda fue sumergir completamente los cupones en el agar (Figura 13, Figura 1, y Figura 1 A).

En la Figura 112 se muestra el crecimiento de *E.Coli* con el cupón de PVC, el cual fue colocado sobre la superficie, en la Figura A se muestra la vista superior en la Figura B la imagen inferior, en esta última figura se resalta mediante un círculo rojo el área expuesta al cupón, en el cual no se presenta crecimiento microbiano debajo de él. Este mismo comportamiento se presentó con CPVC (Figura 12B), con PPR (Figura B) y con cobre (Figura 1A). Esto se debe a que no hay oxígeno y no pueden crecer fácilmente las bacterias *E.Coli*.

En la Figura A, se muestra la vista superior de la placa expuesta a PVC, en donde se puede apreciar que el crecimiento microbiano está alrededor del cupón, obteniendo como conclusión que no hay inhibición microbiana por parte del PVC. Estos mismos comportamientos fueron obtenidos para CPVC (Figura 1A) y PPR (Figura A).

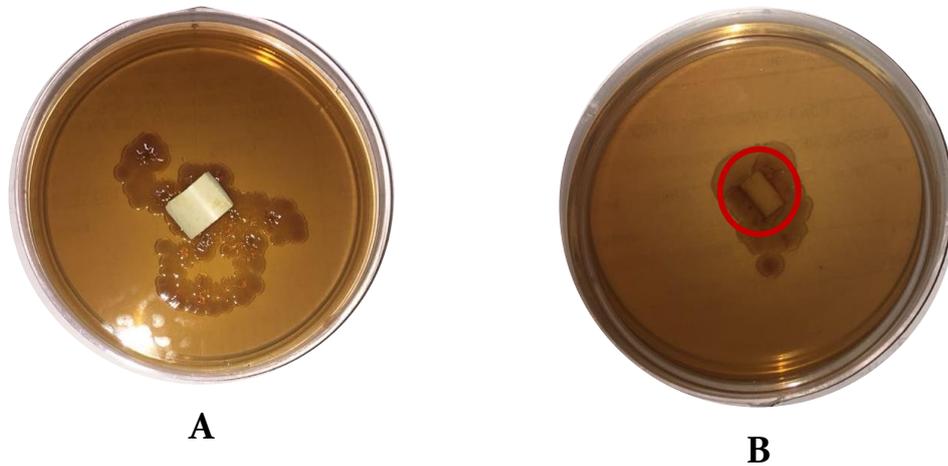


**Figura 10.** Crecimiento de *E.Coli* en agar bilis y rojo de violeta utilizando un cupón de PVC colocado en la superficie. A) vista superior y B) vista inferior

Cuando el experimento se lleva a cabo con los cupones completamente sumergidos en el agar de bilis y rojo violeta, el resultado para los materiales de PVC, VPVC y PPR fueron iguales, no hubo inhibición microbiana como se muestran en la Figura 11, Figura 12 y Figura 13, en estas imágenes se aprecia que por encima de los cupones hay crecimiento de *E. Coli*.



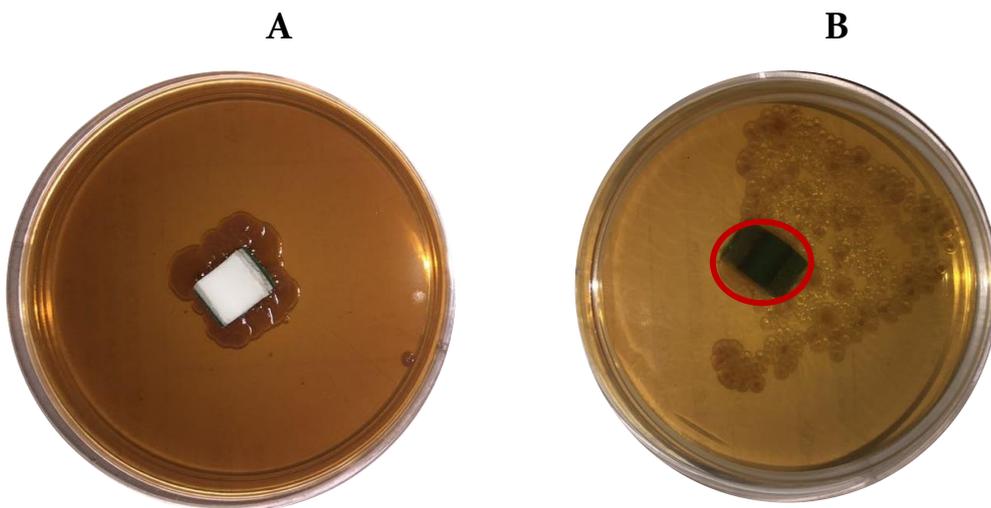
**Figura 11.** Crecimiento de *E. Coli* en agar bilis y rojo de violeta utilizando un cupón de PVC inundado completamente.



**Figura 12.** Crecimiento de *E. Coli* en agar bilis y rojo de violeta utilizando un cupón de CPVC colocado en la superficie. A) vista superior y B) vista inferior



**Figura 13.** Crecimiento de E.Coli en agar bilis y rojo de violeta utilizando un cupón de CPVC inundado completamente.

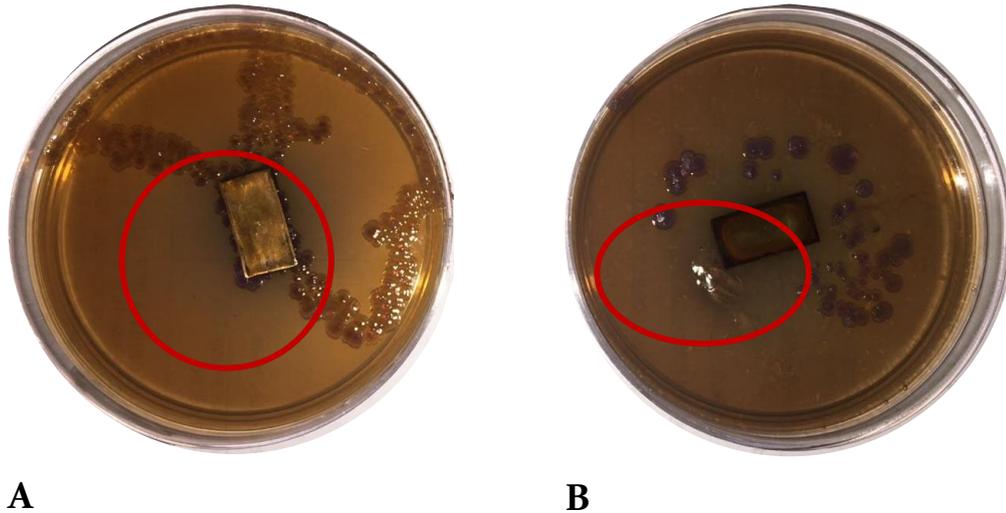


**Figura 14.** Crecimiento de E.Coli en agar bilis y rojo de violeta utilizando un cupón de PPR colocado en la superficie. A) vista superior y B) vista inferior



**Figura 15.** Crecimiento de E.Coli en agar bilis y rojo de violeta utilizando un cupón de PPR inundado completamente.

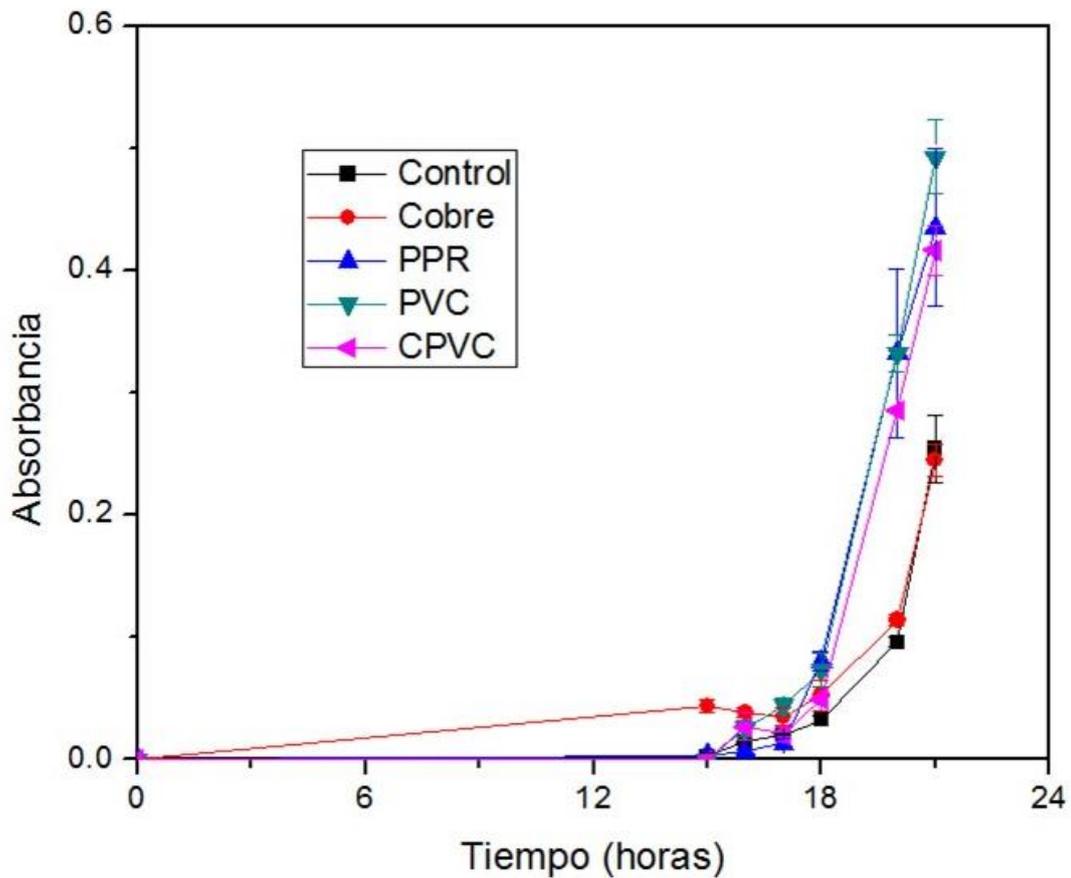
La evaluación utilizando cobre completamente sumergido fue diferente, en la Figura 16B se muestra el cupón de cobre, por encima de él no hay crecimiento microbiano (se resalta figura con círculo rojo), por el contrario cuando se coloca el cobre sobre la superficie en agar (Figura 1A) alrededor del cupón hay crecimiento microbiano (de igual manera zona resaltada con círculo rojo). Este comportamiento sugiere que el cobre sumergido se oxida a Cu(II) el cual puede generar peróxido de hidrógeno al interior de la célula (Hoshino , Kimura, Hayakawa, Yamaji, & Ando, 2000) (Milenkovic, Hrenovic, Matijasevic, Miomir, & Rajic, 2017), el cobre (II) difunde a través del agar y genera un halo de inhibición, este comportamiento en donde se genera un halo de inhibición se ha obtenido previamente con semiconductores, los cuales generan sustancias reactivas de oxígeno en presencia de luz (González-Penguely, Morales-Ramírez, Rodríguez-Rosales, Rodríguez-Nava, & Carrera-Jota, 2017) . Este experimento demuestra que el Cu elemental no tiene efecto sobre el crecimiento microbiano (Figura 1A) en condiciones de oscuridad.



**Figura 16.** Crecimiento de la bacteria *E.Coli* en agar bilis y rojo de violeta utilizando un cupón de cobre. A) Cupón sobre la superficie y B) cupón inundado

La segunda metodología llevada a cabo para evaluar el efecto de los materiales PVC, CPVC, PPR y cobre sobre el crecimiento de *E.Coli*, se realizó en 100 mL de medio líquido con medio nutritivo en matraces Erlenmeyer en donde se colocó los cupones de los diferentes materiales utilizados por separado con el propósito de evaluar la cinética de crecimiento microbiana. El medio de cultivo se inoculó con una pequeña cantidad de *E.Coli* y se midió con espectrofotómetro la turbidez generada por el crecimiento microbiano a 600 nm. En la Figura 1 se muestra las cinéticas de crecimiento de los diferentes materiales probados, en todos los materiales la fase lag (etapa de adaptación al medio nutritivo por parte de los microorganismos) duró 16 horas, después de este periodo comenzó la fase de crecimiento exponencial, siendo los tratamientos control y cobre los que tardaron más tiempo en crecer (curvas de color negro y rojo), mientras que para los tratamientos con cupones de PPR, PVC y CPVC el crecimiento fue mayor (curvas de color azul, verde esmeralda y rosa respectivamente). No obstante, durante el periodo de 15 a 17 horas, se muestra una disminución en la absorbancia del tratamiento de cobre, esto sugiere una actividad antibacteriana del cobre, después de este periodo estas bacterias crecen a la misma velocidad que el tratamiento control, esta disminución del crecimiento también es debido a la presencia  $Cu(II)$  oxidado por el medio de cultivo por el color café oscuro obtenido en el medio de cultivo. Con respecto a los materiales plásticos no se encontró actividad antimicrobiana, sino al contrario, favorecen el crecimiento. Este resultado sugiere que cuando los tubos plásticos están en contacto

con agua potable que fue contaminada con materia orgánica pueden representar un riesgo pues lejos de matar a los microorganismos favorecen su crecimiento. Considerando este resultado, es muy importante conocer la calidad del agua que se suministrará, pues podrían provocar la proliferación de bacterias poniendo en riesgo a las personas.



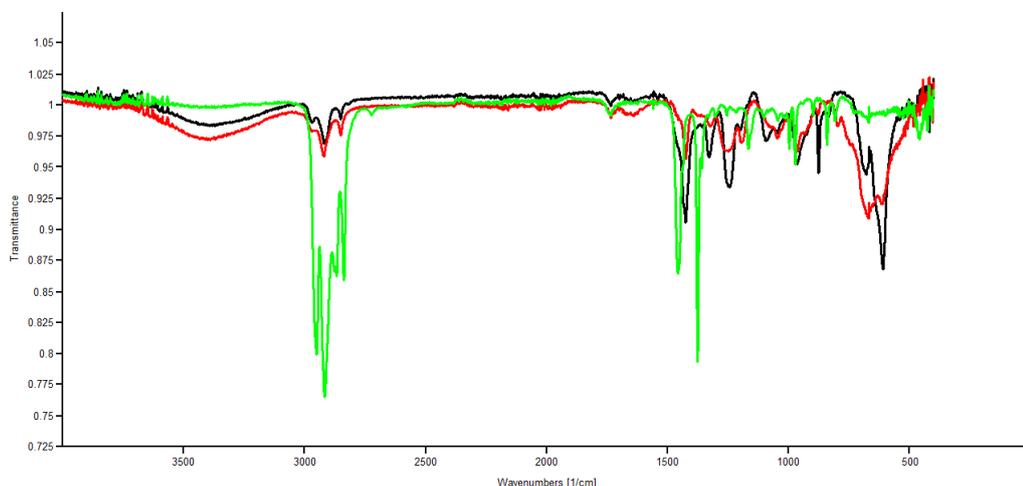
**Figura 17.** Curvas de crecimiento de la bacteria E.Coli en medio de cultivo nutritivo líquido en contacto con cupones de 1 cm<sup>2</sup>. Curva negra-control, curva roja- cupón de cobre, curva rosa- cupón de CPVC, curva verde esmeralda- cupón de PVC y curva azul-cupón de PPR.

## POLICLORUROS DE VINILO

A continuación, se muestran los resultados de los análisis por espectroscopia de infrarrojo realizados a las tres muestras de tubos bajo estudio.

### ESPECTROSCOPIA DE INFRARROJO

En la Figura 18 se muestran los espectros de IR realizados a las muestras de tubos. En color negro se muestra el espectro correspondiente al tubo de PVC; el espectro de color rojo corresponde al tubo de CPVC y, finalmente, el espectro en color verde corresponde al tubo de PPR.



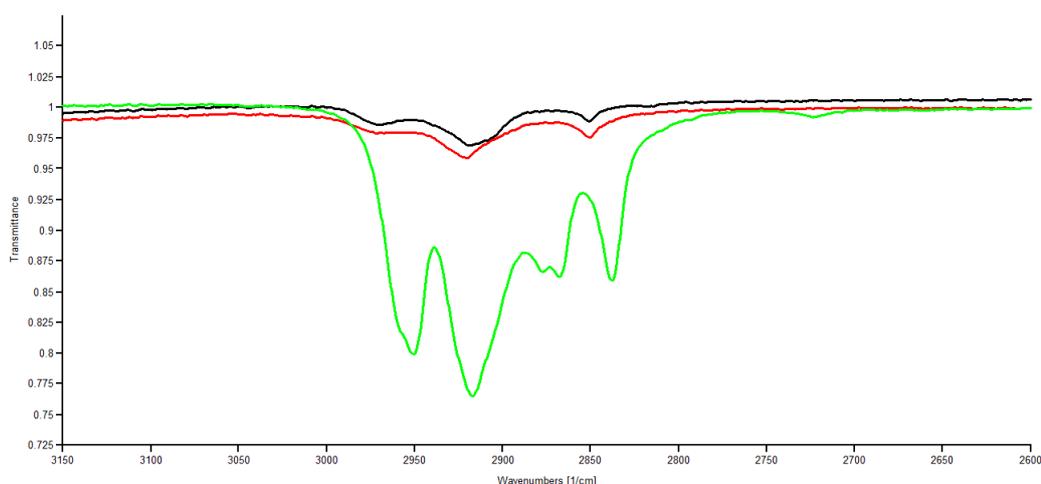
**Figura 18.** Espectros de infrarrojo para los tubos de polímeros bajo estudio: PVC (espectro en color negro); CPVC (espectro en color rojo) y PPR (espectro en color verde).

De manera general, los espectros presentan los rasgos distintivos característicos de las unidades monómericas conjugadas del PVC: las bandas entre  $2977$  y  $2838\text{ cm}^{-1}$  correspondientes a los diferentes modos de estiramientos de los enlaces C-H, de los grupos Cl-C-H, y  $\text{CH}_2$ . La región comprendida entre  $3000$  y  $2800\text{ cm}^{-1}$  es la zona de aparición esperada (teórica) de las vibraciones de estiramiento para los enlaces C-H<sup>4</sup>.

El PVC tiene en su estructura una cadena repetitiva de átomos de carbono, a estos átomos de C se unen átomos de hidrógeno y cloro a lo largo de toda su estructura en un arreglo periódico. Estos enlaces entre C-H y C-Cl son enlaces sencillos, es decir, involucran carbonos con hibridación  $\text{sp}^3$ . Las vibraciones de tensión del enlace C-H se

sitúan por debajo de los  $3000\text{ cm}^{-1}$  debido a la cantidad de carácter s en el orbital del carbono empleado para formar el enlace. El orbital s está más cerca del núcleo que los orbitales p y resultan enlaces más resistentes y más rígidos a partir de los orbitales con más carácter s. Los enlaces que involucran enlaces con hibridación  $sp^2$  (dobles enlaces) absorben a frecuencias justo arriba (a la izquierda) de  $3000\text{ cm}^{-1}$ . Esto se explica de la siguiente manera: un orbital  $sp^3$  tiene un cuarto de carácter s, y un orbital  $sp^2$  tiene un tercio de carácter s. Se espera que el enlace del orbital  $sp^2$  sea ligeramente más fuerte, con una frecuencia de vibración más alta.

La variación en la posición de las distintas bandas entre un compuesto y el valor teórico puede deberse a factores como la presencia de dobles enlaces en la estructura del compuesto bajo estudio, la cercanía de grupos dadores o sustractores de electrones, la formación de puentes de hidrógeno, entre otros. Existen ligeros desplazamientos de las bandas mencionadas entre el tubo de PVC y los tubos de CPVC y el de PPR, más adelante se tratará de explicar esta diferencia en la posición de las bandas entre los materiales bajo estudio con base en la posición de las demás bandas en los espectros de IR. Además, la banda a  $2871\text{ cm}^{-1}$  que aparece en el PPR no se encuentra presente en los tubos de PVC ni CPVC, esto sugiere diferencias estructurales en la composición de la superficie interna del PPR respecto a los tubos de PVC y CPVC. La Figura 19 presenta un acercamiento a la zona de vibración de los enlaces C-H (estiramiento) cercana a  $3000\text{ cm}^{-1}$ , se aprecian las diferencias mencionadas entre los tubos de PPR y el PVC y CPVC.

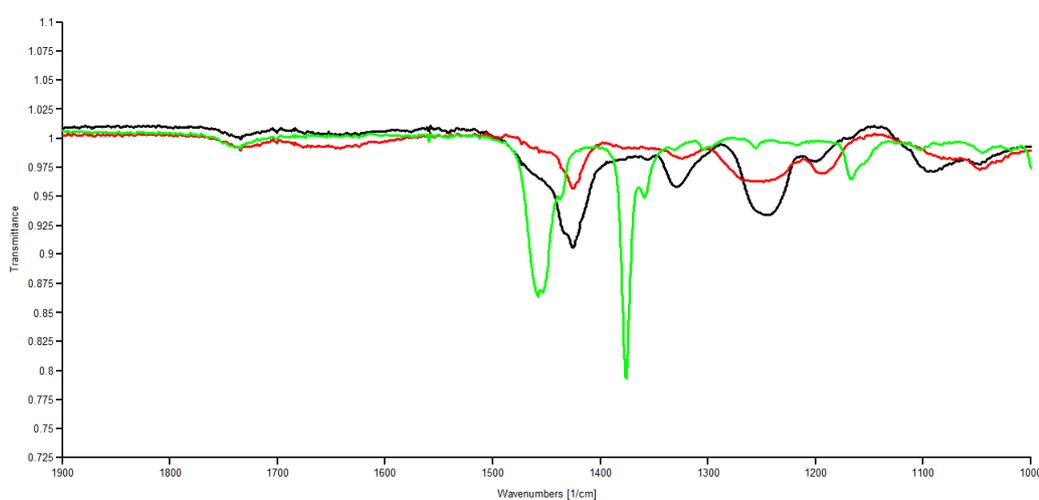


**Figura 19.** Acercamiento a la zona de vibración cercana a  $3000\text{ cm}^{-1}$  para los espectros de IR de los tubos de PVC (espectro negro), CPVC (espectro rojo) y PPR (espectro en color verde).

Se mencionó anteriormente que las moléculas presentan *modos normales de vibración*. En dependencia de los modos de vibración es posible corroborar la presencia de un tipo de enlace en la molécula, esto debido a que un enlace en una molécula puede presentar más de un modo de vibración (estiramiento, de tijera, estiramiento fuera del plano), así, cada modo de vibración para cada enlace se presenta a distintas frecuencias. Para el PPR, a una longitud de onda de  $1460\text{ cm}^{-1}$  se observa una señal correspondiente a la flexión fuera del plano que confirma los estiramientos vibracionales C-H de los  $\text{CH}_2$  alifático de las señales en la zona cercana a  $3000\text{ cm}^{-1}$ . Para los tubos de PVC y CPVC esta vibración se presenta a una frecuencia de  $1427\text{ cm}^{-1}$ , lo que confirma que existen desplazamientos en las vibraciones de estiramiento de los enlaces C-H.

Ahora bien, la señal del tubo de PPR que se presenta en  $1378\text{ cm}^{-1}$  se atribuye a los modos de deformación de aleteo del enlace C-H, intensificada por la proximidad del átomo de cloro unido al mismo carbono (Cl-C-H). Para los tubos blanco y amarillo, la señal se presenta a  $1328$  y  $1325\text{ cm}^{-1}$ , a diferencia que estas bandas son menos intensas (por la proximidad del átomo de cloro) y están desplazadas a frecuencias más bajas respecto al tubo de PPR, posiblemente a la presencia de un tercer enlace que esté provocando que el enlace entre Cl-C-H se haga más pesado y por lo tanto la vibración se desplaza a longitudes de onda más bajas. En la Figura 20 se presenta un acercamiento a la zona de  $1500$  y  $1330\text{ cm}^{-1}$  donde es posible apreciar las diferencias dadas entre los tres

tubos estudiados. Así mismo, se observa señales entre a  $1049$  y  $1042\text{ cm}^{-1}$  correspondientes a vibraciones C-C de la cadena del polímero. Habitualmente no es posible identificar las vibraciones del enlace C-C cuando tienen enlazados átomos de H a ellos, esto se presenta en los alcanos. Para el caso de los tubos de es posible percibir el enlace C-C gracias a que en su estructura se encuentran unidos átomos de Cl que son capaces de polarizar el enlace C-C y de esta manera presentar una absorción en la longitud de onda mencionada.



**Figura 20.** Acercamiento a la zona de vibración comprendida entre  $1500$  y  $1330\text{ cm}^{-1}$  para los tubos de PVC (espectro en color negro), CPVC (espectro en color rojo) y PPR (espectro en color verde).

De igual manera, el espectro de IR del PPR exhibe dos bandas a  $998$  y  $974\text{ cm}^{-1}$ , respectivamente. Estas bandas de absorción corresponden a las tensiones  $\gamma$  C-H fuera del plano de las unidades olefínicas trans y vinil, mientras que una señal débil cercana a  $720\text{ cm}^{-1}$  pertenecientes al isómero cis, fue de difícil detección respecto a las intensidades de los otros isómeros. Para los espectros de los tubos de PVC y CPVC únicamente se presenta la banda para la unidad olefínica trans de los dos tubos desplazada 10 unidades a frecuencias más bajas (a  $964\text{ cm}^{-1}$ ) respecto del PPR.

Por último, las vibraciones de deformación del enlace C-Cl se observan alrededor de  $670\text{ cm}^{-1}$  para los tres tubos. Estas bandas dependen de la estructura conformacional del polímero y de la disposición espacial de los átomos que rodean estos enlaces.

Ha sido reportada una señal alrededor de  $1700\text{ cm}^{-1}$ , asignada a enlaces de tensión de grupos carbonilos (C=O). Esta señal es muy característica para este grupo ya que es muy intensa en esta región. Este grupo funcional probablemente proviene de agentes tipo cetonas, aldehídos o ácidos introducidos en la cadena del polímero durante el proceso de polimerización o durante la remoción del residuo del monómero o del iniciador. Sin embargo, no fue posible detectarla en ninguno de los espectros de los tubos de analizados, por lo que más estudios tendrían que realizarse para poder determinar las diferencias que se presentan entre cada uno de los espectros de los tubos analizados.

En la Tabla 5 se presenta un resumen de las asignaciones de las bandas de los espectros de infrarrojo para las muestras de tubos estudiadas.

**Tabla 5.** Resumen de las vibraciones presentes en los tubos estudiados.

<b>Longitud de onda (<math>\text{cm}^{-1}</math>)</b>	<b>Atribución</b>
2977 a 2838	Tensión de estiramiento del enlace C-H de los $\text{CH}_2$ y C-H-Cl
1460, 1427	Flexión fuera del plano del enlace C-H de los $\text{CH}_2$
1378, 1328 y 1325	Deformación de aleteo del enlace C-H de los Cl-C-H y C- $\text{H}_2$
1049 a 1042	Tensión C-C
998 – 964	Tensiones y C-H fuera del plano de las unidades olefinicas trans y vinil
670	Deformación del enlace C-Cl

## ESPECTROSCOPIA RAMAN

La Espectroscopia Raman es una técnica que se realiza directamente sobre el material a analizar, y que tiene las ventajas frente a otras técnicas de caracterización de

compuestos que no requiere ningún tipo de preparación y que no conlleva ninguna alteración de la superficie sobre la que se realiza el análisis.

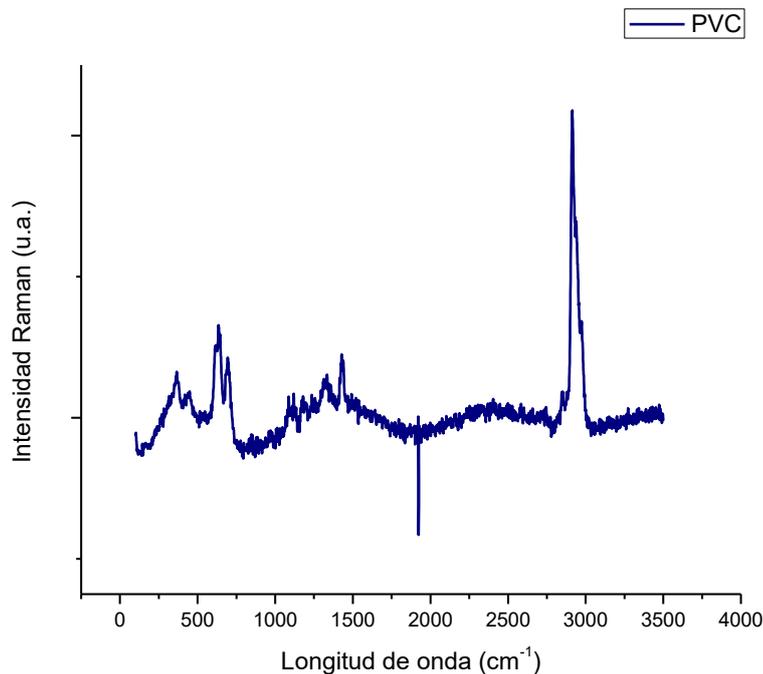
A continuación, se presentan los espectros de Raman de cada uno de los tubos de PVC bajo estudio. El área espectral que contiene la mayoría de los picos se encuentran en la zona de 0 a  $3300\text{ cm}^{-1}$ . Si bien los espectros son relativamente sencillos, las bandas espectrales que presentan dan información relevante acerca de la composición de cada uno de los tubos analizados.

### **ESPECTRO RAMAN DEL PVC**

En la Figura 21 se muestra el espectro de Raman del tubo de PVC. Se puede observar en el espectro que se presentan bandas definidas que permiten la identificación de los grupos funcionales presentes en la estructura del tubo. En primera instancia, se aprecia una banda débil situada a  $371\text{ cm}^{-1}$  que ha sido asignada a modos de vibración angular del enlace Cl-C. La presencia de este enlace Cl-C dentro de la estructura analizada se corrobora por la aparición de una segunda banda, más intensa que la primera, situada alrededor de  $638\text{ cm}^{-1}$ , reportada para las vibraciones de deformación del enlace mencionado<sup>5</sup>.

Por su parte, la banda espectral que es posible de apreciar en  $1425\text{ cm}^{-1}$  se asocia a vibraciones angulares del enlace C-H (H-C-H) y que se extiende en el plano (H) de los grupos alquilo ( $\text{CH}_2$ ) presentes en el material analizado.

Además, el espectro presenta las bandas distintivas características de las unidades monoméricas conjugadas del PVC: la banda intensa situada por debajo de los  $3000\text{ cm}^{-1}$  ( $2924.5\text{ cm}^{-1}$ ) es debida a la vibración angular de los enlaces C-H, de los enlaces C-H unidos al cloro (Cl-C-H), así como a los grupos  $\text{CH}_2$  de la estructura polimérica, reportada en diversos trabajos<sup>6</sup>.



**Figura 21.** Espectro de Raman del tubo de PVC.

### ESPECTRO RAMAN DEL CPVC

Continuando con el análisis de las muestras, en la Figura 22 se muestra el espectro de Raman del tubo de CPVC. Pese a que el espectro muestra una significativa cantidad de ruido, es posible hacer la asignación de las bandas encontradas a los grupos funcionales encontrados en la muestra analizada.

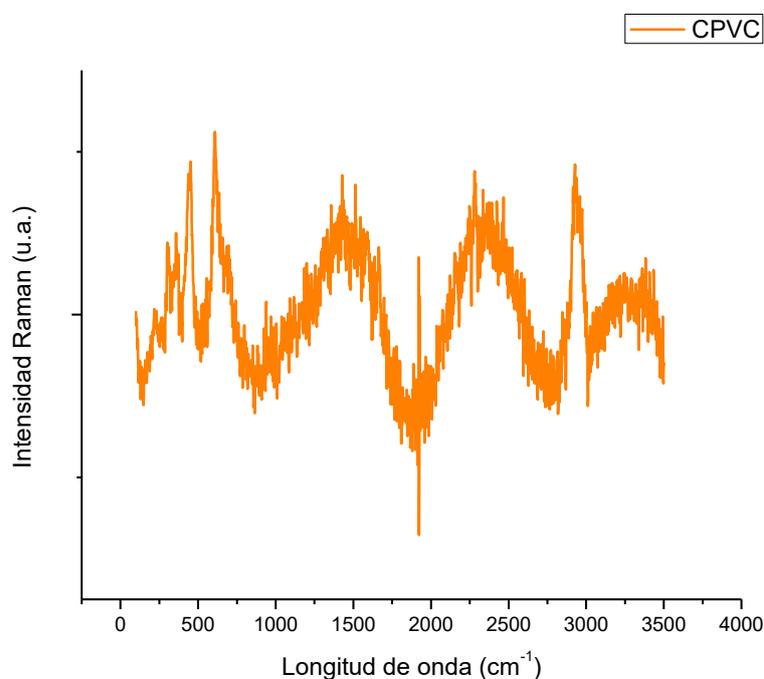
La banda centrada en  $447\text{ cm}^{-1}$  se relaciona a modos de vibración angular del enlace Cl-C. El enlace Cl-C dentro de la estructura analizada se corrobora por la aparición de una segunda banda, ligeramente más intensa que la primera, situada en  $602\text{ cm}^{-1}$ , reportada para las vibraciones de deformación del enlace mencionado<sup>5</sup>.

Las diferencias en la posición de las bandas asociadas al enlace Cl-C entre el tubo de PVC y el tubo de CPVC se deben a la conjugación del átomo de cloro en las estructuras de ambos tubos, además de la cercanía entre los átomos de Cl, es decir, en el CPVC los átomos de cloro se encuentran más cercanos entre sí y tienen posiciones en forma de “zig-zag” dentro de la estructura carbonada del polímero, a diferencia del tubo de PVC

donde los átomos de Cl están más alejados y se presentan sobre el mismo eje, lo que hace que las señales estén separadas más unidades respecto al tubo de CPVC.

Otro rasgo distintivo de la estructura del tubo de CPVC es que su espectro de Raman muestra una banda a  $1427\text{ cm}^{-1}$ , que está relacionada a vibraciones angulares del enlace C-H (H-C-H) y que se extiende en el plano (H) de los grupos alquilo ( $\text{CH}_2$ ) presentes en el material analizado y que también se encuentran conjugados en la estructura al igual que los átomos de Cl.

Finalmente, la banda presente a  $2914\text{ cm}^{-1}$  corresponde a las vibraciones angulares de los enlaces C-H, de los enlaces C-H unidos al cloro (Cl-C-H), así como a los grupos  $\text{CH}_2$  de la estructura polimérica. La banda presenta un corrimiento ligero (10 unidades) respecto a la banda presente en el PVC por la conjugación mencionada anteriormente, es decir, al estar más cercanos los átomos de Cl entre sí en la estructura del CPVC, la energía de vibración del enlace H-C-H es menor por la presencia adyacente de átomos más pesados (Cl), lo que se ve reflejado en una disminución de la vibración de este enlace en el CPVC.



**Figura 22.** Espectro de Raman del tubo de CPVC.

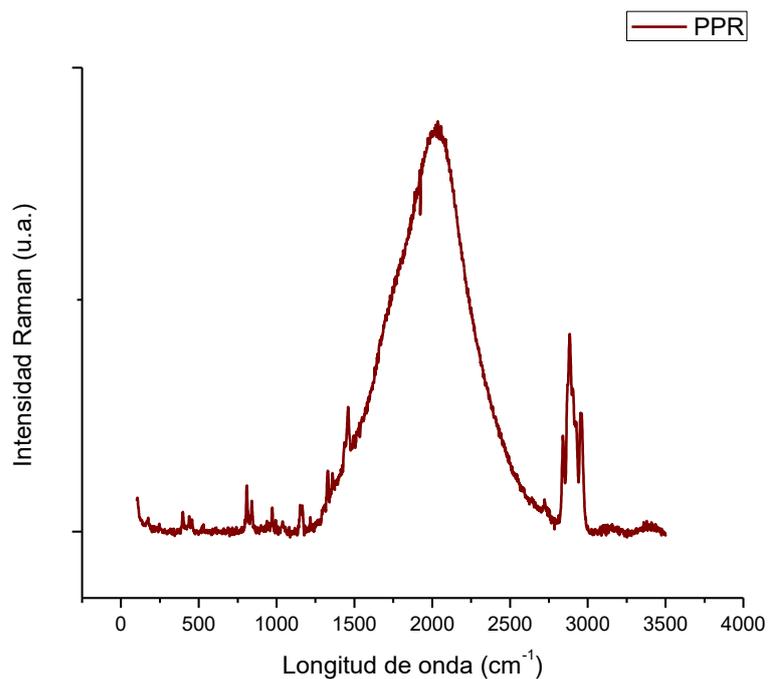
## ESPECTRO RAMAN DEL PPR

En la Figura 23 se presenta el espectro de Raman del tubo de PPR. Es importante resaltar que el tubo de PPR analizado presenta una considerable fluorescencia o ruido (propia de la lámpara con la que se hizo incidir el láser sobre la muestra, banda centrada a  $2000\text{ cm}^{-1}$ ). Sin embargo, pese a los inconvenientes en la medición, es posible obtener información muy valiosa con las bandas espectrales que es posible identificar.

El aspecto más útil del espectro es que se hace difícil la identificación de un enlace Cl-C en la región comprendida entre los  $350$  y  $650\text{ cm}^{-1}$ , como se presenta para los tubos de PVC y CPVC. El hecho puede ser provocado por la aparición de un átomo, por ejemplo de O, enlazado a la cadena de átomos de carbono, situación que se puede interpretar como cierta debido a la señal presente en  $812\text{ cm}^{-1}$  y que en algunos casos ha sido asociada a vibraciones de deformación fuera del plano para el enlace C-O. El hecho resulta curioso ya que se presenta una nueva banda a  $1151\text{ cm}^{-1}$  y que no está asociada a algún tipo de vibración del enlace C-O. La aparición de una banda alrededor de  $1730\text{ cm}^{-1}$  sería de gran ayuda para determinar la presencia de un grupo carbonilo (C=O), sin embargo, dicha banda no es posible detectarla, en parte por la fluorescencia que presenta el material analizado.

Por su parte, la banda a  $1453\text{ cm}^{-1}$ , es asociada a vibraciones angulares del enlace C-H (H-C-H) y que se extiende en el plano (H) de los grupos alquilo ( $\text{CH}_2$ ) presentes en el material.

Por último las señales presentes por debajo de los  $3000\text{ cm}^{-1}$  ( $2838$ ,  $2878$  y  $2953\text{ cm}^{-1}$ ) se asignan a las vibraciones angulares de los enlaces C-H, de los grupos  $\text{CH}_2$  de la estructura polimérica. La presencia de 3 bandas en la región sugiere la presencia de un átomo de hidrógeno enlazado de manera distinta a como lo está en los tubos de PVC y CPVC para los grupos Cl-C-H y  $\text{CH}_2$ , es decir, existe la posibilidad de un tercer átomo de hidrógeno enlazado de manera distinta o bien, a un átomo diferente al C y Cl.



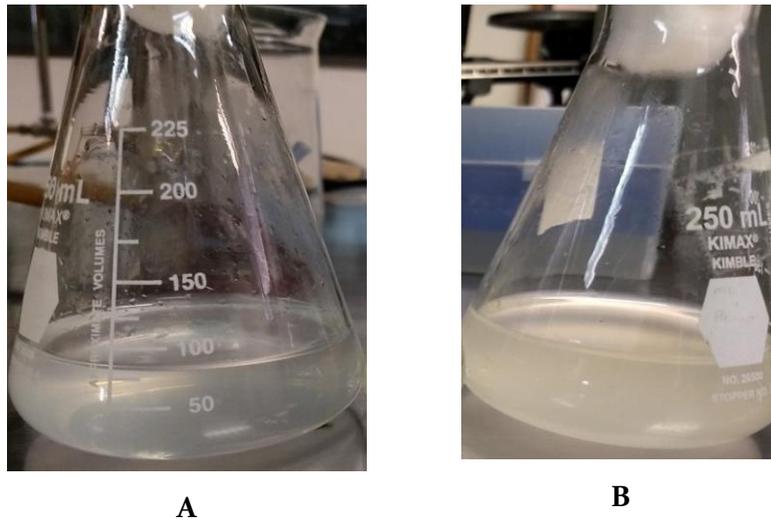
**Figura 23.** Espectro de Raman del tubo de PPR.

## PRUEBAS DINÁMICAS ANTIMICROBIANAS

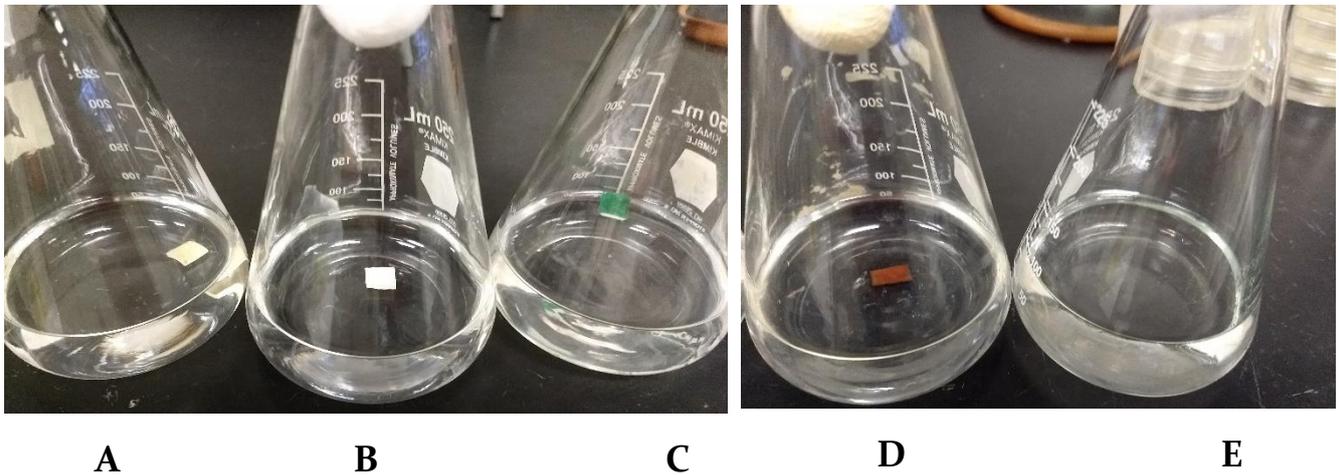
Para evaluar la inhibición microbiana por los materiales PVC, CPVC, PPR y cobre, se inocularon las bacterias *Pseudomona Aeruginosa* y *Salmonella enterica* en medio líquido nutritivo con la siguiente composición: 10 g/L de glucosa, 2 g/L de peptona de caseína, 20 mg/L de  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  y se ajustó el pH=7 con NaOH, se dejó crecer las bacterias por un periodo de 24 horas en ausencia de luz (Figura 24). Una vez que la población se encontraba en su fase exponencial de crecimiento se tomaron 24 mL de inóculo que se centrifugó para recuperar las células y se enjuagó dos veces con solución salina de 0.75 g de NaCl de concentración.

Después las células de ambas cepas enjuagadas se mezclaron en un cóctel bacteriano. En matraces de 250 mL se agregó 100 mL de agua salina, a la concentración ya mencionada, y se agregó un cupón de 1 cm<sup>2</sup> de área aproximadamente en cada matraz por separado; adicionalmente se consideró un matraz con solución y sin cupón como control (Figura 25), este procedimiento se realizó por triplicado para cada material de estudio. Para evaluar el efecto de los materiales PVC, CPVC, PPR y cobre se adicionó 1 mL del cóctel bacteriano en cada matraz y se dejó en reposo por un periodo de 48 horas en oscuridad. Posteriormente se tomaron 200 µL de la solución salina con las bacterias

y se sembró en medio sólido de agar bacteriológico previamente esterilizado y enriquecido con los nutrientes en las mismas concentraciones que el medio líquido: 10 g/L de glucosa, 2 g/L de peptona de caseína, 20 mg/L de  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ . Se observó el crecimiento de las cepas en el medio sólido.



**Figura 24.** Medio líquido enriquecido en el que se inocularon *Pseudomona Aeruginosa* y *Salmonella enterica* luego de 24 horas de incubación en ausencia de luz.



**Figura 15.** Matracas con solución salina 0.75 g NaCl esterilizados y con cupón de 1 centímetro cuadrado de cada material, inoculados con 1 mL de la mezcla de las dos cepas *Pseudomona Aeruginosa* y *Salmonella entérica*. A) CPVC, B) PVC, C) PPR, D) Cobre, E) Control.

## RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DINAMICAS ANTIMICROBIALES

En la evaluación de la inhibición del crecimiento microbiano de *Pseudomona Aeruginosa* y *Salmonella entérica* se realizó una siembra de ambas bacterias en medio nutritivo, como se presenta en la Figura 1, luego se extrajeron las células y se enjuagaron con solución salina (0.75 g NaCl) . Después se inocularon en solución salina previamente esterilizada y con un cupón de 1 cm<sup>2</sup> del material de estudio. Posteriormente se dejó reposar por 24 horas en oscuridad (Figura 2) y se tomaron 200 µL de esta solución con bacterias que habían estado en contacto con el material por 24 horas y se sembró directamente en el medio sólido enriquecido. Se dejó en oscuridad por 48 horas y se observó el crecimiento bacteriano sobre las placas. A continuación, se presentan las imágenes del crecimiento microbiano en la placa de cada material y la vista al microscopio con un objetivo de 4x. (Figura 26, Figura 27, Figura 28, Figura 29 y Figura 30)



**Figura 26.** A) Cultivo de *Pseudomona Aeruginosa* y *Salmonella entérica* que no estuvieron en contacto con ningún material (Control, en medio solido enriquecido)  
B) Vista al microscopio de la población bacteriana

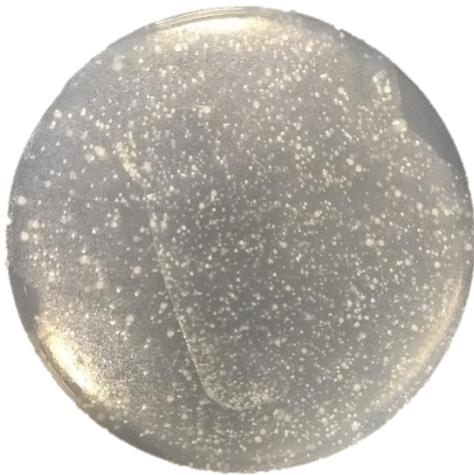


**A**

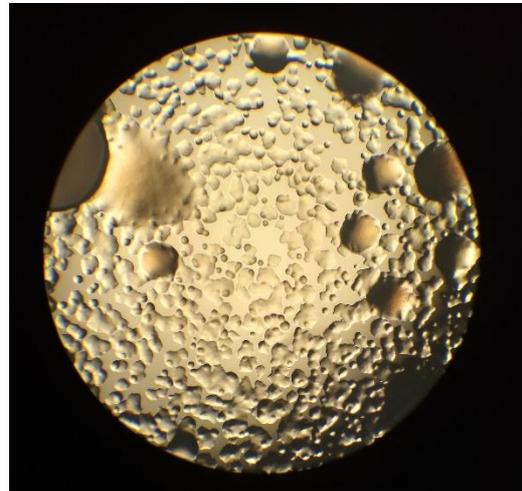


**B**

**Figura 27.** A) Cultivo de *Pseudomona Aeruginosa* y *Salmonella* entérica que estuvieron en contacto con CPVC por 24 horas, en medio solido enriquecido B) Vista al microscopio de la población bacteriana

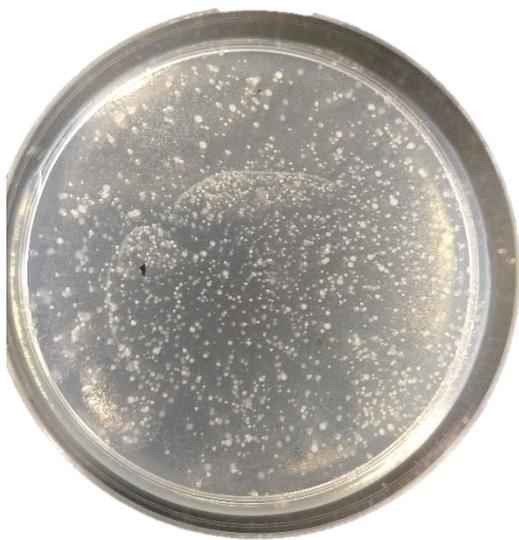


**A**



**B**

**Figura 28.** A) Cultivo de *Pseudomona Aeruginosa* y *Salmonella* entérica que estuvieron en contacto con PPR por 24 horas, en medio solido enriquecido B) Vista al microscopio de la población bacteriana



**A**



**B**

**Figura 29.** A) Cultivo de *Pseudomona Aeruginosa* y *Salmonella* entérica que estuvieron en contacto con PVC por 24 horas, en medio solido enriquecido B) Vista al microscopio de la población bacteriana



**A**



**B**

**Figura 30.** A) Cultivo de *Pseudomona Aeruginosa* y *Salmonella* enterica que estuvieron en contacto con Cobre por 24 horas, en medio solido enriquecido B) Vista al microscopio de la población bacteriana

El género *Salmonella* y *Pseudomona* son conocidos por su capacidad para sobrevivir al calor, ciertos ácidos y el peróxido de hidrógeno y su habilidad para sobrevivir en las superficies, pueden vivir más de 10 semanas en alimentos y superficies

a temperatura entre 13 °C a 23 °C (Comité científico de seguridad agroalimentaria de la CAE, 2008).

Al colocar las bacterias en un medio salino se les deja en un ambiente sin nutrientes por lo que entran en un periodo de inactividad para preservar su material genético en espera de un medio para reproducirse (Golding, I., Paulsson, J., Zawilski, S. M., & Cox, E. C. 2005). Entonces se inoculó una mezcla de *Pseudomonas Aeruginosa* y *Salmonella entérica* en solución con 0.75 g NaCl para que entraran en este estado de inactividad metabólica y la población se mantuviera constante. Sin embargo, al ponerse en contacto con los materiales PVC, CPVC, PPR y cobre, se puede comprobar si alguno de ellos puede o no afectar a la población bacteriana presente, como es el caso del cobre, pues observando la Figura 30A podemos ver que la cantidad de unidades formadoras de colonias (UFCs) que se señalan circuladas en color rojo es menor que la cantidad observada en las Figuras 26A, 27A, 28A, y 29A en las que la proliferación de las bacterias fue demasiada y las UFCs son incuantificables. Este comportamiento se debe a que el cobre sumergido se oxida a Cu(II) el cual es tóxico y puede generar peróxido de hidrógeno al interior de la célula (Hoshino, Kimura, Hayakawa, Yamaji, & Ando, 2000). La presencia del cobre en el medio no solo produce Cu (II) que es tóxico, también produce Cu (I) en forma de Cu<sub>2</sub>O el cual tiene un efecto antibacterial (Li, B., Li, Y., Zhao, Y., & Sun, L., 2013). Sin embargo, los matraces con solución salina inoculada con las cepas y los cupones se mantuvieron en un ambiente en ausencia de luz por lo que la oxidación del cobre se retrasó y la producción de los iones ya mencionados fue mínima, de tal manera que la disminución en la población bacteriana es debido al efecto oligodinámico que presenta el cobre al igual que los metales de su mismo grupo en la tabla periódica como el oro y la plata. Este efecto es característico de los metales y fue descubierto en 1893 por Carl Wilhelm von Nägeli y los mecanismos por los cuales se destruye a las bacterias siguen siendo estudiados por diversos investigadores (Nägeli, Karl Wilhelm, 1893). Este efecto fundamentalmente consiste en la disminución de la carga bacteriana a causa de la naturaleza de los metales, se ha comprobado tanto en las superficies de los metales, como en otras superficies y fluidos entran en contacto con éstos (Shrestha, R., Joshi, D. R., Gopali, J., & Piya, S., 2009).

De acuerdo a al protocolo de salud pública del 2008 de la EPA (US Environmental Protection Agency, 2008) se recomiendan materiales de cobre en instituciones de salud pública por la eficacia demostrada en diversos estudios contra

cinco de las cepas que causan mayores afecciones en hospitales: *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* O157 : H7, Methicillin-Resistant *S. aureus* (MRSA), *Enterobacter aerogenes* y *Pseudomona aeruginosa* (Michels HT, Anderson DG, 2008) de las cuales se trabajó con una de las cepas en las presentes pruebas y se han obtenido resultados similares, comprobando que el cobre tiene actividad antimicrobiana.

Las bacterias inoculadas en los matraces con los materiales PVC, CPVC y PPR no se vieron afectadas por la presencia de los cupones en la solución, por lo que al esperar las 24 horas la población no había disminuido y al sembrarlo en el medio sólido la densidad de la población fue bastante elevada como se puede ver en las Figuras 26B, 27B, 28B y 29B. Mientras que observando la Figura 30B en la que se sembró la solución salina en la que había estado en contacto el cobre con *Pseudomona Aeruginosa* y *Salmonella enterica* se aprecia que la presencia de las bacterias es muy poca. Nuevamente se atribuye esta ausencia a la presencia del cobre en el medio.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se comprobó la pureza que presenta el cobre con difracción de rayos X y análisis químico por chispa teniendo un 99.98%.

Cabe resaltar que el presentar poca presencia de hierro en la composición química del cobre, podría contribuir al efecto inhibitor del cobre con las bacterias estudiadas. Sin embargo, en el presente estudio aún falta analizar los productos resultantes de la exposición a los medios microbiológicos.

Al aplicar la norma ASTM E 112 se obtuvo un número de grano de 93 granos/pul<sup>2</sup> y un tamaño promedio de 7.6 µm.

Con los datos obtenidos de las propiedades mecánicas, se sugiere construir una curva esfuerzo-deformación experimental.

Así mismo, se sugiere realizar estudio microbiológico con diferentes tuberías de cobre, es decir utilizando las marcas comerciales en el territorio nacional.

Derivado a que la composición química de los materiales promueve el crecimiento de algunos agentes microbiológicos.

De las pruebas microbiológicas se tiene que al llevar a cabo pruebas para evaluar la capacidad antimicrobiana de los materiales PVC, CPVC, PPR y cobre utilizando la bacteria *E.Coli* como indicador. En las pruebas realizadas en agar se encontró que los materiales PVC, CPVC y PPR no tienen actividad antimicrobiana y en pruebas en medio líquido, por el contrario, estos materiales favorecieron el crecimiento microbiano. El cobre en estado elemental no presentó inhibición microbiana en ausencia de luz, pero cuando el material se expone a un medio oxidantes (medio de cultivo o cupón sumergido), si hay inhibición microbiana por la presencia del Cu (II) el cual es conocido por su capacidad antimicrobiana.

Por lo que se sugiere evaluar el efecto de la luz sobre la capacidad antimicrobiana del cobre.

Se sugiere evaluar la formación de CuO en medios no acuosos y su efecto sobre la actividad microbiana.

Se sugiere realizar estudio de correlación entre composición del agua y efectos sobre la interfase del cobre para determinar su vulnerabilidad a la corrosión.

Con respecto a las muestras de PVC se estudiaron las propiedades estructurales de tres muestras de tubos poliméricos. Por medio de espectroscopia de infrarrojo y espectroscopía Raman donde se estudió la composición de la superficie interna de tres tubos poliméricos comerciales utilizados como tubería doméstica.

El aspecto más útil de la espectroscopia de IR es la habilidad para identificar los grupos funcionales. Sin embargo, la aplicación de una sola técnica analítica de análisis en el campo de la caracterización estructural a menudo no es muy contundente. Si bien por medio de la espectroscopia de IR se encontraron diferencias existentes entre los tubos de estudiados y se da un indicio acerca de la estructura de dichos tubos, se recomienda utilizar una segunda técnica espectroscópica como lo puede ser Resonancia Magnética Nuclear (para poder estudiar la información acerca del esqueleto de carbono o de los grupos metileno del compuesto) de protón y carbono 13 (RMN de  $^1\text{H}$  y  $^{13}\text{C}$ ) o Espectroscopia de Fotón de Rayos X (XPS) para poder determinar a ciencia cierta la composición y diferencias entre cada una de las muestras de tubos bajo estudio.

A pesar de lo anterior, la espectroscopia de IR provee la prueba contundente de que dos compuestos son iguales o distintos. Las bandas en la región de la huella digital dependen de las vibraciones complejas que involucran toda la molécula, y es muy poco probable que dos compuestos cualesquiera (a excepción de los enantiómeros) tengan de manera precisa el mismo espectro de infrarrojo.

En conclusión, el estudio de las muestras de tubos por espectroscopia de infrarrojo ha sido valioso de las siguientes maneras:

a) Se han establecido los grupos funcionales que están presentes en los tres compuestos.

b) Hay ausencia de otros grupos funcionales, los cuales darían absorciones intensas si estuviesen presentes.

c) Se han conocido las diferencias que hay en la superficie interna (estructura) de los tubos que dan indicio de la composición de los mismos.

De los tres tubos estudiados, el PPR presenta más diferencias significativas respecto a los tubos de PVC y CPVC. Sin embargo, una segunda técnica de caracterización ayudará a determinar a que son debidas esas diferencias, conociendo con exactitud qué elemento (s) en la estructura del PPR provocan esas diferencias respecto a los otros dos tubos.

La Espectroscopía Raman es una técnica de caracterización de materiales orgánicos e inorgánicos muy útil cuando se trata de realizar análisis confiables y sin destrucción de la muestra bajo estudio.

Los resultados muestran que las estructuras de los tubos de PVC y CPVC están compuestos principalmente de C, Cl e H, cambiando únicamente el modo en que están presentes los átomos de Cl a lo largo de la cadena de átomos de C en ambos tubos.

Ahora bien, el espectro del PPR sugiere que en su estructura no están presentes átomos de cloro como en los tubos de PVC y CPVC, en su lugar, existe la posibilidad de que haya un átomo diferente o que esté enlazado de manera distinta a lo largo de la cadena de átomos de carbono.

Con la Espectroscopía de Raman se puede analizar la composición química de compuestos orgánicos e inorgánicos sin destruir las muestras y sin preparación especial y además se pueden analizar materiales en cualquier estado: sólido, líquido y gaseoso. Otras técnicas de análisis son más restrictivas: la difracción de rayos X (DRX) sólo permite determinar la composición a nivel atómico de cristales y aleaciones inorgánicas muy bien ordenadas; la espectroscopía de fotoelectrones permite la identificación de compuestos sólidos superficiales y necesita ultra vacío; la espectroscopía de IR permite analizar la composición química de sólidos orgánicos e inorgánicos pero requiere de preparación de muestras muy delgadas para que sean transparentes al IR; la fluorescencia de rayos X permite sólo un análisis por elemento de sólidos, requiere de vacío y protección para el operario, etc. Además, todas las técnicas mencionadas anteriormente requieren unos equipos de análisis de valor similar o superior al necesario para llevar a cabo el análisis Raman.

Se sugiere la aplicación de una tercera técnica de análisis para corroborar la ausencia de átomos de cloro en la estructura del PPR y determinar con certeza el átomo distinto a carbono e hidrógeno presente en la estructura.

En el diseño experimental de las pruebas dinámicas se evaluó la capacidad de antibacteriana de los materiales PVC, CPVC, PPR y cobre; se colocaron en contacto con *Pseudomonas Aeruginosa* y *Salmonella* entérica en un medio salino, con concentración 0.75 g NaCl, en ausencia de nutrientes y libre de compuestos orgánicos, que podrían acidificar el medio. La población bacteriana entró en un estado de inactividad y solo se vio afectada por el contacto con el material.

El cobre demostró tener propiedades bactericidas al reducir la población bacteriana en la solución salina, al mantener un ambiente de oscuridad durante el periodo de incubación se garantiza que la oxidación del cobre fue mínima y que el efecto antibacteriana es intrínseco del material. Por lo cual, utilizar el término “cobre antimicrobiana” como fuente de referencia para abordar los temas relacionados con bacterias.

La producción de los iones Cu(I) y Cu(II) no representa ningún riesgo, con lo que nuevamente se comprueba que las recomendaciones de las instituciones de salud sobre el uso de cobre son acertadas, por su gran capacidad de mantener una baja carga de bacterias patógenas tanto en su superficie como en los fluidos que entran en contacto

con él debido al efecto oligodinámico. Esto es, el Cobre es un material metálico con capacidad antimicrobiana, es decir; reduce el crecimiento de poblaciones de bacterias matándolas con respecto a un tiempo de exposición máximo de 24 h.

Los materiales PVC, CPVC, y PPR no afectan a las poblaciones bacterianas.

## BIBLIOGRAFÍA

*Cooper Development Association*. . (s.f.). Obtenido de <http://www.copper.org/>

*Copper Sources and Management Strategies Clearinghouse*. (s.f.). Obtenido de [http://scvurppp-wzk.com/cu\\_clearinghouse\\_web/cu\\_pest.htm](http://scvurppp-wzk.com/cu_clearinghouse_web/cu_pest.htm).

Asua, J. (2008.). *Polymer Reaction Engineering*. Wiley,.

Biesenberger, J. A. (1983). *Principles of Polymerization Engineering*. . Wiley.

Braun, D. H. (2013.). *Polymer Synthesis: Theory and Practice: Fundamentals, Methods, Experiments*. . Berlin Heidelberg. : Springer.

Chanda, M. ( 2013.). *Introduction to Polymer Science and Chemistry: A Problem-Solving Approach*,. (S. Edition, Ed.) Taylor & Francis.

E., C. T. (1995). *Infect. Control Hosp. Epidemiol.* . (16), 444-450.

Figueroa, G. (s.f.). Propiedades antimicrobianas del cobre. *Cobre, Salud, Medio Ambiente y Nuevas Tecnologías*, 33-35.

González-Penguelly, B., Morales-Ramírez, Á. d., Rodríguez-Rosales, M. G., Rodríguez-Nava, C. O., & Carrera-Jota, M. L. (2017). New infrared-assisted method for sol-gel derived ZnO:Ag thin films: Structural and bacterial inhibition properties. *Materials Science and Engineering C*, 78, 833-841.

Hoshino , H., Kimura, T., Hayakawa, F., Yamaji, A., & Ando, T. (2000). Bactericidal activity of catechin-copper (II) complexes against *Staphylococcus aureus* compared with *Escherichia coli*. *Letter in Applied Microbiology*, 31, 213.-217.

- Li, B., Li, Y., Zhao, Y., & Sun, L. (2013). Shape-controlled synthesis of Cu<sub>2</sub>O nano/microcrystals and their antibacterial activity. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 74(12), 1842-1847.
- Lokensgard, E. (2008.). *Industrial Plastics: Theory and Applications*. Cengage Learning.
- Lu X, Z. W. (2011). One-dimensional conducting polymer nanocomposites: Synthesis, properties and applications. *Prog Polym Sci*(36), 671-712.
- Michels HT, Anderson DG. (2008). Antimicrobial regulatory efficacy testing of solid copper alloy surfaces in the USA. *Metal Ions in Biology and Medicine*, 10:185-190.
- Milenkovic, J., Hrenovic, J., Matijasevic, D., Miomir, N., & Rajic, N. (2017). Bactericidal activity of Cu-, Zn-, and Ag- containing zeolites toward Escherichia coli isolates. *Environ Sci Pollut Res*, 24, 20273-20281.
- Prado V., V. R. (2012). Aplicación de la capacidad bactericida del cobre en la práctica médica. *Revista Médica Chile*, 1325-1332.
- Sandoval P., G. S. (2014). Utilización de sulfato de cobre para la elaboración de un jabón líquido antiséptico. *Revista Cubana Farm.*, 542-549.
- Springer-Verlag, T. G. (1999). *Nanotechnology*. New York.
- Tonelli, A. E. (2001.). *Polymers From the Inside Out: An Introduction to Macromolecules*. Wiley.
- US Environmental Protection Agency. (2008). Obtenido de EPA registers copper-containing alloy products: <http://www.epa.gov/pesticides/factsheets/copper-alloy-products.htm>.
- Young, R. J. (2011.). *Introduction to Polymers*. (T. Edition, Ed.) Polymer Science.