



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

**MASTER OFICIAL EN
INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Caracterización funcional de los mecanismos de
acción internos del Garbanzo (*Cicer Arietinum L*)
para procesos de coagulación-floculación en el
tratamiento del agua.**

Autor:

Jaramillo Peralta, Jhoan Sebastián

Tutoras Académicas:

Bolado Rodríguez, Silvia¹

Palacio Martínez, Laura²

¹Departamento: Ingeniería química y
tecnología del medio ambiente.

²Departamento: Física Aplicada.
Grupo de superficies y materiales
porosos (SMAP).

Valladolid, 6 de Septiembre, 2017.

INDICE

1. Introducción	4
2. Objetivos	7
3. Materiales y métodos	7
4. Resultados y discusión	13
5. Conclusiones.....	38
6. Agradecimientos	39
7. Bibliografía	40

Resumen

Debido a la falta de agua en las comunidades marginales de Colombia. Este estudio buscó una alternativa para optimizar el uso del agua existente. El objetivo central de este trabajo es conocer los mecanismos de acción internos del *Cicer Arietinum L* que le permiten el funcionamiento como coagulante natural, mediante la caracterización y evaluación de su eficiencia para la eliminación de turbidez y color en aguas. Mediante el cumplimiento de los objetivos se pudo demostrar la capacidad de coagulación que presenta el *Cicer Arietinum L* y su mecanismo de acción a la hora de interactuar en el medio con los diferentes contaminantes, demostrando tener un desempeño similar en remoción al coagulante químico universal sulfato de aluminio; cumpliendo así con los parámetros estipulados (Resolución No. 2115 de 2007, calidad del agua potable) en la legislación colombiana como la turbidez, el color del pH y la conductividad. En primer lugar se trabajó con aguas sintéticas preparadas en el laboratorio del grupo de investigación SMAP de la Universidad de Valladolid que representaban 3 épocas de precipitación siendo éstas: baja 200 NTU, media 400 NTU y alta 600 NTU. Se comprobó además el funcionamiento del coagulante con agua de un entorno real, la cual oscilaba en 492 NTU de turbidez que fue extraída del río Pisuerga de la ciudad de Valladolid (España). La metodología utilizada es de naturaleza cuantitativa empleando el método experimental y comparativo, ya que se utilizó el sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$ como referente y se midieron parámetros como turbidez, color, pH, conductividad, potencial Z y contenido de aminoácidos. Los resultados obtenidos permitieron concluir que el *Cicer Arietinum L* posee un punto isoeléctrico de 3,7 comportándose así como un coagulante de origen aniónico. Se logró identificar por cromatografía el perfil de los aminoácidos presentando un contenido elevado en aminoácidos polares como el ácido aspártico, ácido glutámico, arginina, histidina y lisina. Se utilizó la prueba Jar test para determinar el pH de la dosis óptima de los coagulantes, las cuales fueron 100, 110 y 120 mg/L a pH 7 y 110mg/L para el agua del río Pisuerga pH 7 para el coagulante natural, logrando una eficiencia en remoción para el agua sintética en las 3 épocas y agua de entorno real por encima del 98% para eliminación de turbidez y del 94% para la eliminación de color. Para el coagulante químico, las dosis óptimas fueron 90 para época de precipitación baja y media 90 y 100 mg/L para la época alta a pH 7 para el agua sintética y de 100 mg/L para el agua del río Pisuerga a pH óptimo de 7 con una remoción de turbidez en las 3 épocas de más del 98% y para remoción de color en un valor por encima del 94 %.

Palabras clave: Aminoácidos, coagulante natural, color, turbidez, potencial Z.

1. Introducción

Dada la importancia del agua potable para la salud pública, ésta debe ser accesible para poder utilizarla en muchos ámbitos: para beber, para uso doméstico, para la producción de alimentos y en algunos casos para fines recreativos. La mejora del abastecimiento de agua, el saneamiento y la gestión de los recursos hídricos pueden impulsar el crecimiento económico de los países y contribuir en gran medida a la reducción de la pobreza [1].

La calidad del agua potable es una preocupación creciente en los países en desarrollo, porque las fuentes están bajo amenaza creciente de contaminación; con consecuencias de gran alcance para la salud de los habitantes y para el desarrollo económico y social de comunidades y naciones [2].

La contaminación del agua debe ser considerada como de alto riesgo para la salud. Según la Unicef, más del 80% de las enfermedades que padece la población de países en vía de desarrollo en Latinoamérica son transmitidas por el agua que se consume, lo cual da una magnitud del grave problema que aqueja a Latinoamérica y el impacto en el PIB de cada país, en los bajos indicadores de calidad de vida y la brecha denigrante entre el subdesarrollo y el desarrollo [3].

En los países subdesarrollados las enfermedades causadas por la falta de agua o su mala calidad ocasionan la muerte anual de aproximadamente 5 millones de personas, de las cuales cerca de 1,8 millones mueren por enfermedades diarreicas. El 90% de estas personas son niños menores de cinco años, lo que equivale a la muerte de 4.500 niños/día (OMS) [4].

Una de las principales causas de enfermedades en las poblaciones marginales se encuentra relacionada con las fuentes de agua cercanas (pozos, lagos, manantiales, agua de lluvia, etc.) debido a que éstas tienen altas concentraciones de microorganismos que transmiten enfermedades debilitantes y mortales [5], generando una carga económica para su tratamiento y manejo debido a la ausencia de políticas públicas que garanticen la cobertura y la calidad del agua potable para todas las personas sin excepción alguna [6].

En Colombia, se han invertido significativos recursos en la construcción de infraestructura para el tratamiento del agua en zonas rurales, pero es evidente el pronto abandono al que se someten estos avances porque no es factible su sostenibilidad económica o por el desconocimiento de la tecnología implementada que no permite su apropiación por parte de los beneficiados. Este problema es recurrente y consecuencia de la negligencia estatal y regional de América Latina y el Caribe, que a la postre trae como consecuencia abandonar el propósito de suministrar agua potable a estas poblaciones [7].

La importancia del agua y del ambiente sano y su incidencia sobre la salud y el desarrollo de la población están plenamente reconocidos en la Constitución Política de Colombia, así como en los instrumentos internacionales ratificados por el país [5].

En Colombia, la potabilización requiere de la combinación de procesos físicos y químicos de acuerdo a parámetros regulatorios (Resolución 2115 de 2007, calidad del agua potable) para aguas destinadas al consumo humano. Estos procesos requieren del uso de sustancias químicas (como el sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$ y el cloruro férrico $FeCl_3$, entre otras) que actúan como coadyuvantes en la limpieza del agua, representando altos costos de adquisición, infraestructura y mantenimiento, con el riesgo químico de manipulación que supone. Sin embargo, aunque estas sustancias cumplen eficientemente con su función pueden ser nocivas [8]. Se ha sugerido que la exposición al aluminio es un factor de riesgo para el desarrollo de la enfermedad de Alzheimer en los seres humanos [1] [9].

La normatividad colombiana (Resolución 2115 de 2007) estableció las condiciones mínimas de calidad para el agua destinada al consumo humano. Aunque en términos generales, el agua potable de la mayoría de ciudades colombianas cumple con la norma, sin embargo, hay muchas regiones deprimidas y áreas rurales del país en las cuales no es así. Es en éstas donde se centrarán los esfuerzos de aplicación de los resultados de la investigación, para las cuales el agua potable es un bien muy escaso. En estos casos las comunidades deben acudir al uso de fuentes hídricas con aguas de baja calidad no aptas directamente para consumo. La generación de nuevo conocimiento, que permita seleccionar los mejores materiales vegetales, de bajo coste y sostenibles con el medioambiente para el tratamiento de agua de consumo, se convertirá en una alternativa viable a esta situación precaria para las poblaciones vulnerables [10].

En las últimas décadas, se ha visto incrementado el uso de recursos naturales. Los coagulantes naturales son de gran interés para muchos investigadores hoy en día, basándose en estudios sobre su procedencia, uso, actividad, pureza y calidad de los mismos, ya que estos coagulantes son biodegradables, de bajo costo, multifuncional, abundante en la fuente y respetuoso del medio ambiente [11].

El interés por conocer los agentes naturales (composición, estructura, funcionalidad), para su uso se ha propagado en todo el mundo. El desarrollo tecnológico ha dado paso a nuevas metodologías y procedimientos que han modificado sustancialmente el estudio de las plantas. Su origen natural, garantiza la inocuidad para el ser humano, y la biodegradabilidad de los lodos producidos permite además su utilización en la agricultura.

Los coagulantes naturales de las fuentes minerales y vegetales fueron utilizados por el agua y la industria de tratamiento de aguas mucho antes del advenimiento de productos químicos sintéticos como las sales de hierro y aluminio [12].

Debido a sus diferentes características y rendimiento; se han identificado varios coagulantes efectivos de origen vegetal: *Nirmali*, *Okra*, frijol rojo, azúcar y maíz rojo [13], *Moringa oleifera* [14], *Cactus latifera* y polvo de semillas de *Prosopis juliflora* [15]. Los coagulantes naturales tienen un futuro brillante y se están empezando a usar por muchos investigadores debido a su abundante fuente, bajo precio, no generan contaminantes que afecten al medio ambiente, multifunción y naturaleza biodegradable en la purificación del agua.

El garbanzo (*Cicer Arientinum L.*) pertenece a la familia Leguminosae. Es una planta anual, tiene raíces profundas, pelos y tallos ramificados, alcanzando una altura de hasta 0,60 m. El tipo de garbanzo kabuli es característico para formar vainas largas. Sus semillas son grandes, menos arrugadas, blancas o cremosas [16].



Figura 1. *Cicer Arientinum L*

Tabla 1. Información nutricional del *Cicer arietinum L.*

Información nutricional 100 g	
Humedad	13,00 g
Proteínas	19,60 g
Lípidos	5,50 g
Carbohidratos totales	59,10
Calcio	150 mg
Fosforo	300 mg
Hierro	6,40 mg
Potasio	756, 20 mg
Sodio	30,20 mg

En la tabla 1 podemos observar el contenido nutricional del *Cicer arietinum L.*, que tiene un alto contenido proteico, además de tener una contribución significativa en calcio, fósforo, potasio y sodio que pueden interactuar y permitir un mejor proceso de coagulación.

2. Objetivos

El objetivo central de esta investigación fue conocer el funcionamiento del *Cicer Arietinum L* como coagulante para el tratamiento del agua. Para alcanzar el objetivo central, la investigación contemplo los siguientes objetivos específicos:

- Validar la eficiencia en el laboratorio del *Cicer Arietinum L* como coagulante, para diferentes niveles de turbidez en aguas sintéticas.
- Evaluar la eficacia del *Cicer Arietinum L* en agua de un entorno real.
- Comparar el comportamiento del *Cicer Arietinum L* con el coagulante comercial Sulfato de aluminio.
- Determinar el contenido de aminoácidos presentes en el *Cicer Arietinum L*, y cuáles de ellos intervienen en el proceso de coagulación.
- Evaluar el potencial Z del *Cicer Arietinum L* y las muestras de agua utilizadas.
- Comprender el funcionamiento y mecanismo interno del *Cicer Arietinum L* en los procesos de coagulación.

3. Materiales y métodos

Este trabajo se basó en un estudio de naturaleza **cuantitativa**. Utilizando la recolección y análisis de datos para la validación al posible uso del *Cicer Arietinum L* como coagulante. Empleando un método de tipo **experimental**. Mediante pruebas de ensayo y error, caracterizando el objeto a estudiar por su mecanismo de acción, señalando sus propiedades como agente natural. De tipo **comparativo**; ya que se estableció más de un análisis y se compararon los resultados con el coagulante químico sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$ para la remoción de sólidos en suspensión y coloidales.

Para su desarrollo se obtuvieron las semillas del coagulante *Cicer arietinum L*; en la empresa Mercacentro de la ciudad de Ibagué, Colombia. Las pruebas se realizaron en los laboratorios del grupo de investigación SMAP perteneciente a la Facultad de Ciencias de la Universidad de Valladolid, España, utilizando agua sintética para simular 3 tipos de turbidez que fueron comparables con la época de precipitación baja (200 NTU), precipitación media (400NTU) y precipitación alta (600 NTU). Para dar una validez en un entorno real del funcionamiento del coagulante se utilizó después, agua del río Pisuerga ubicado en la ciudad de Valladolid, España en época de precipitación alta.

3.1. Extracción del coagulante

Las semillas del coagulante *Cicer Arietinum L*, se lavaron con abundante cantidad de agua para eliminar las impurezas, luego se secaron durante dos días al sol. El material se trituró utilizando un mezclador (Oster), el polvo resultante se tamizó con un tamiz No. 200 para obtener un polvo muy fino para almacenamiento en recipientes de plástico para evitar la hidratación y posterior uso en la preparación de las soluciones del coagulante; en la figura 2 se puede ver el proceso realizado.

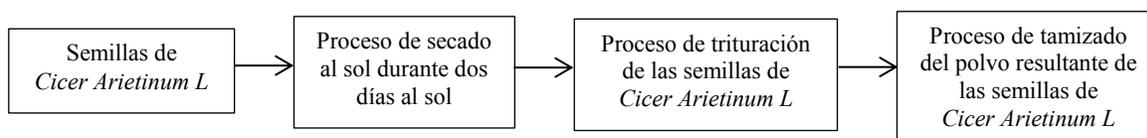


Figura 2. Proceso de extracción del coagulante de las semillas del *Cicer Arietinum L*

3.2. Preparación del coagulante

Se prepararon soluciones con una concentración al 1% añadiendo 10 g del coagulante *Cicer Arietinum L* en 1000 mL con agua Milli-Q®, obteniéndose una solución de 10.000 mg / L, después se realizó una agitación durante una hora para homogeneizar la mezcla, a partir de esta solución se llevaron a cabo las pruebas para conocer las dosis adecuadas para tratar el agua sintética preparada en el laboratorio y el agua del entorno real del río Pisuerga.

3.3. Determinación de los aminoácidos

La determinación de los aminoácidos que contiene el coagulante *Cicer Arietinum L*, fue realizado en el laboratorio del grupo SMAP en el I+D de la Universidad de Valladolid, mediante hidrólisis acida siguiendo el procedimiento indicado a continuación:

- Se pesaron 30 mg de cada muestra y se realizó una hidrólisis ácida con microondas en medio HCl 6N y atmósfera inerte.
- Una vez hidrolizada la muestra se llevó a sequedad con corriente de nitrógeno y se disolvió en 1 mL HCl 0,1N.
- Se filtró la muestra con filtro de nylon 0,22µm y se analizaron en el HPLC 1200 analítico

Tabla 2. Cantidad de muestra pesada y volumen final al que se llevó.

Fotoquímico	Cantidad de muestra (g)	Volumen final (mL)
Cicer Arietinum	0.0302	1.0039

Tabla 3. Parámetros cromatográficos.

Eluyente	A: 40mMol NaH ₂ PO ₄ pH 7.8 B: ACN: MeOH: agua: (45:45:10 v/v/v) Flujo: 2ml/min
Inyector	Programado para realizar la derivatización con OPA y FMOC.
Columna	ZORBAX Eclipse AAA 4.6mm x 150mm x 3.5µm
Detector	UV/visible $\lambda = 338$ nm

Se aplicó el método de estándar externo, mediante comparación de los tiempos de retención y de las áreas de los picos entre la muestra y la solución estándar de aminoácidos.

3.4. Preparación de agua sintética

Se utilizó arcilla grado laboratorio para la preparación de muestras de agua sintética para todos los experimentos los cuales simulaban las épocas precipitación baja (200 NTU), precipitación media (400NTU) y precipitación alta (600 NTU).

Para la preparación de la turbidez del agua sintética se procedió a utilizar 0,22 g para obtener 200 NTU; 0,42 g para 400 NTU y 0,62 g para 600 NTU de arcilla cada una en un litro de agua del grifo. Las suspensiones se agitaron suavemente durante 15 minutos en un agitador magnético con el fin de conseguir una dispersión uniforme de las partículas de arcilla. Este proceso se repitieron para los 4 recipientes que conformaban el equipo Jar test compuesto por agitador multi-velocidad de cuatro paletas (Velp Scientifica, modelo FC45). Para obtener los pesos en los cuales se conseguía alcanzar los niveles de turbidez esperados, se realizaron ensayos previos y correcciones, las cuales permitieron obtener la cantidad adecuada de arcilla para generar el agua sintética deseada.

3.5. Recolección y preparación de agua entorno real.

Para dar una validez en un entorno real del funcionamiento del coagulante se utilizó agua del río Pisuerga ubicado en la ciudad de Valladolid, España; la cual fue extraída en

contracorriente y almacenada en una nevera para su posterior traslado a los laboratorios del grupo de investigación SMAP de la Universidad de Valladolid. Este proceso se adelantó en época de precipitación media. El agua obtenida fue distribuida en los 4 recipientes de conformaban el equipo Jar test.

3.6. *Medición del potencial Z del agua sintética y agua entorno real.*



Figura 3. Equipo ZETAMASTER Malvern

El potencial Z se midió mediante el equipo ZETAMASTER Malvern. Este equipo permite la evaluación y medición del potencial zeta (ζ) de agua con presencia de materiales coloidales, por electroforesis, para tamaños de partícula entre 5 y 5000 nm.

Se utilizó 500 mL de agua sintética con el nivel de turbidez más bajo el cual correspondía a 200 NTU, siendo agitado durante 15 minutos y dejándose reposar durante 1 hora con el fin de que las partículas de mayor tamaño precipitasen facilitando así el proceso de filtración mediante una membrana Whatman de 1 micrómetro para eliminar las impurezas que podían afectar la medición.

Para el agua del entorno real se procedió a una agitación rápida por 15 minutos dejándose reposar durante 2 horas ya que contenía muchas más partículas por su alto nivel de turbidez. Posteriormente fue filtrada mediante papel de filtro y por último mediante una membrana Whatman de 1 micrómetro, para eliminar las impurezas que podían afectar la medición.

Se midió el potencial Z de muestras a diferentes pH (desde 3 a 10). Para su variación se colocó la muestra en un agitador magnético partiendo de un pH de 3, obtenido mediante la utilización de ácido clorhídrico 2M. Con el fin de mantener los cloruros constantes, para

aumentar el pH en escala de 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10, se utilizó hidróxido de sodio 2M. Además se midió la conductividad.

3.7. Medición del potencial Z del coagulante *Cicer Arietinum L*

Se utilizó también el equipo ZETAMASTER Malvern. En este caso se preparó una solución al 1%, con 5 g de *Cicer Arietinum L* en 500 mL de agua Milli-Q, que se agitó durante 15 minutos para ser posteriormente filtrada a través de una membrana Whatman de 1 micrómetro para eliminar las impurezas que podían afectar la medición. Igual que en el apartado anterior, se realizaron medidas en disoluciones con pH variando de 3 a 10.

3.8. Otros

Con el fin de medir la eficiencia del coagulante y caracterizar las soluciones iniciales del agua sintética y real, se evaluaron parámetros fisicoquímicos tales como la turbidez (SM 2130B), color aparente (SM 2120B), pH (Métodos Estándar 4500B) y la conductividad (Métodos Estándar 2510), se siguieron las metodologías estandarizadas para el análisis de agua de APHA-AWWA-WEF [17].

Para la medición de estos parámetros se utilizó un turbidímetro HACH 2100Q, se midió el color mediante un espectrofotómetro HACH a 475 nm, se determinó el pH mediante el medidor de pH básico 20 Crison y se midió la conductividad por medio de un conductímetro GLP 32 Crison. Los parámetros medidos se compararon con los establecidos en la legislación colombiana [18] [10]. En la Tabla 4 se muestran los valores límites para la calidad del agua potable.

Tabla 4. Parámetros límites para el agua potable (Resolución 2115 de 2007, calidad del agua potable).

Parámetros	Unidad	Limite
pH		6,5 – 9
Color	Pt-Co	15
Turbidez	NTU	2
Conductividad	$\mu\text{S/cm}$	50 – 1000

Fuente: [10].

3.9. Prueba de coagulación y funcionamiento.

Para determinar la eficiencia del coagulante *Cicer arietinum L*, se procedió a trabajar con dosis en escala progresiva del coagulante obtenido de la solución madre de 10.000 mg / L, a un pH de 6 y en un litro de agua sintética, con el fin de determinar la dosis mínima donde se comenzaba a formar floc y por ende, partir desde esta dosis para los ensayos posteriores.

De esta forma, se determinó que la formación del floc con el coagulante *Cicer Arietinum L* tenía lugar en dosis cercanas a los 80 mg / L.

La eficacia del coagulante *Cicer Arietinum L*, fue comparada con el coagulante comercial sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$, determinando cuál poseía mayor capacidad de eliminación de contaminantes del agua. Para el coagulante químico sulfato de aluminio se encontró que la formación del floc se presentó a partir de una dosis inicial de 70 mg / L.

Una vez obtenidas las dosis mínimas de los coagulantes se procedió a evaluar el pH óptimo de funcionamiento y las dosificaciones respectivas para los niveles de turbidez estipulados. Las pruebas fueron realizadas en el equipo Jar test. Para iniciar la prueba, se añadieron los 1000 mL de agua sintética; los cuatro recipientes fueron colocados en el equipo, asignando a cada uno con un respectivo número. A continuación, se realizó el proceso de coagulación / floculación y sedimentación, comenzando con una mezcla rápida a una velocidad de 150 rpm durante 2 min. Después se llevó a cabo una mezcla lenta, reduciendo la velocidad a 45 rpm durante 25 min. Finalmente, las paletas se retiraron de las muestras contenidas en los recipientes y se dejaron sedimentar durante 30 min.

Al final del período de sedimentación, se retiró la muestra sobrenadante de cada recipiente. Posteriormente, se determinaron los parámetros fisicoquímicos: turbidez, color, pH y conductividad utilizando las metodologías estandarizadas de APHA-AWWA-WEF [17].

Para obtener los resultados de eficiencia para la remoción de turbidez y color en porcentaje se aplicaron las siguientes expresiones:

$$\% \text{ Remocion de turbidez (NTU)} = \frac{\text{Turbidez inicial} - \text{Turbidez final}}{\text{Turbidez Inicial}} * 100$$

$$\% \text{ Remocion de color (Pt - Co)} = \frac{\text{Color inicial} - \text{color final}}{\text{color Inicial}} * 100$$

4. Resultados y discusión

4.1. Caracterización de los aminoácidos del *Cicer Arietinum L*

El perfil de aminoácidos de las semillas de *Cicer Arietinum L*; Figura 4, permitió identificar 17 aminoácidos: ácido aspártico (Asp), ácido glutámico (Glu), serina (Ser), glutamina (Gln), histidina (His), glicina (Gly), treonina (Tre), arginina (Arg), alanina (Ala), tirosina (Tyr), cisteína (Cys), valina (Val), metionina (Met), isoleucina (Ile), leucina (Leu), lisina (Lys), prolina (Pro). Campos et al. [19], reportaron la presencia de estos aminoácidos en la fracción activa de la *Moringa Oleifera*, a excepción de la lisina. Este último aminoácido podría participar en la desestabilización de las partículas coloidales, responsables de la turbidez del agua y de su subsiguiente coagulación [19].

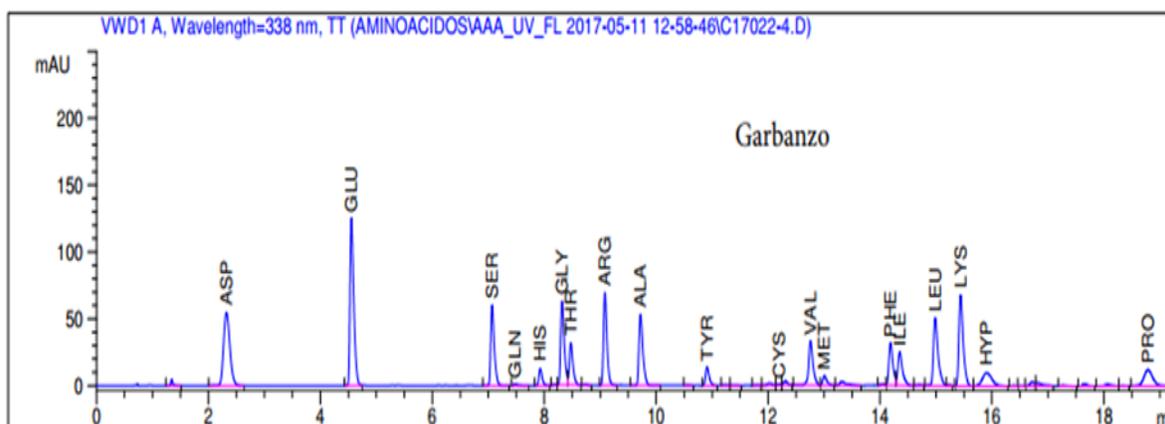


Figura 4. Perfil de los aminoácidos que predominan en 100 g de *Cicer Arietinum L*

Los resultados obtenidos indican que el mayor contenido de aminoácidos en el *Cicer Arietinum L* corresponde al ácido glutámico con 3,2%, seguido del ácido aspártico con 2,2%, arginina con 1,9%, lisina con 1,2%, leucina con 1,4%, serina 1,0% siendo el menor contenido el de la cisteína 0,01% (Tabla 5).

Estos resultados permiten comprobar que siete de los 17 aminoácidos caracterizados en el agente activo del *Cicer Arietinum L* son no polares: glicina, alanina, prolina, valina, metionina, isoleucina, leucina. (Tabla 5). Estos aminoácidos son hidrófobos, es decir, que no tienden a asociarse con el agua.

Los diez aminoácidos restantes incluyen grupos radicales polares: serina, glutamina, treonina, tirosina, cisteína, histidina, arginina, lisina, ácido aspártico y ácido glutámico; estos aminoácidos son hidrófilos, es decir, tienen tendencia a asociarse con el agua, en menor o mayor grado, dependiendo de la carga del grupo radical de cada aminoácido.

Dentro de este grupo, los aminoácidos polares sin carga, serina, glutamina, treonina, tirosina y cisteína son débilmente polares. Los aminoácidos polares con carga neta positiva; histidina, arginina y lisina (Tabla 5), son fuertemente polares por lo que normalmente suelen hallarse en las superficies exteriores de las proteínas donde pueden hidratarse por el entorno acuoso que les rodea y por último, los aminoácidos polares con carga neta negativa donde se agrupan el ácido aspártico y ácido glutámico. Al igual que los aminoácidos con carga positiva, éstos también son claramente hidrófilos, por lo tanto, tienden a encontrarse en la superficie de las moléculas de proteínas, en contacto con el agua que las rodea.

La presencia de los aminoácidos aniónicos, ácido glutámico y ácido aspártico y de los aminoácidos catiónicos; histidina, arginina y lisina, nos permite inferir que la proteína activa del *Cicer Arietinum L* es un polielectrolito que podría tener en su superficie aminoácidos polares con carga positiva y negativa, los cuales estarían disponibles para interactuar con las partículas coloidales responsables de la turbiedad en el agua, y de esta forma contribuir al proceso de coagulación-floculación de las mismas. Los grupos radicales del ácido aspártico, ácido glutámico, histidina, arginina y lisina probablemente reaccionan químicamente con las partículas coloidales responsables de la turbiedad y el color, formando así un puente químico entre las partículas que permite el incremento del tamaño de éstas y promueve su eventual precipitación. Los sitios de la proteína activa del *Cicer Arietinum L* cargados positivamente se plegarán o serán adsorbidos a un número determinado de partículas coloidales en uno o más sitios de las mismas; este plegamiento será producto de las fuerzas coulombinas de atracción debido a que las cargas de las moléculas involucradas son opuestas. De la misma forma aquellos sitios de la proteína activa cargados negativamente también se plegarán a las partículas coloidales debido a un intercambio iónico, a la formación de puentes de hidrógeno o a las fuerzas de Van der Waals.

Tabla 5. Caracterización de los aminoácidos obtenidos del *Cicer Arietinum L* basados en área pico y peso de materia.

Tipo	Fitoquímico			<i>Cicer</i>
	AAA	Aminoácidos	PM(g/mol)	<i>Arietinum L</i>
Polares con carga negativa	ASP	Ácido aspártico	133,11	2,2
	GLU	Ácido glutámico	147,13	3,2
Polares con carga positiva	HIS	Histidina	151,9	0,4
	ARG	Arginina	174,2	1,8
	LYS	Lisina	146,65	1,2
No polares	GLY	Glicina	75,07	0,7
	ALA	Alanina	89,1	0,8
	PRO	Prolina	115,13	0,6
	VAL	Valina	117,15	0,7
	MET	Metionina	149,21	0,1
	ILE	Isoleucina	131,18	0,6
	LEU	Leucina	131,18	1,4
Polares sin Carga	SER	Serina	105,09	1,0
	GLN	Glutamina	146,15	0,02
	TRE	Treonina	119,12	0,6
	TYR	Tirosina	181,19	0,4
	CYS	Cisteína	240	0,01

4.2. Caracterización del Potencial Z

Los resultados del potencial Z para las muestras de agua analizadas en este estudio permiten comprobar que la carga que poseía el agua sintética con base en arcilla, era similar a la de los coloides presentes en aguas naturales, la cual suele ser negativa.

Las arcillas se comportan como hidrófobas y se hallan rodeadas de una delgada capa de agua. Existen una serie de coloides que son realmente anfóteros y cambian de signo según que el pH este por encima o por debajo de su punto isoeléctrico, así la caolinita que sería un coloide electronegativo, se hace electropositivo cuando el pH está por debajo de 4; en estos puntos son más susceptibles a flocular [20].

Para valores más ácidos la arcilla se comporta como intercambiadora de aniones y para valores más básicos lo hace de cationes, razón por la cual a estas cargas se las conoce como cargas variables.

No obstante hay que tener en cuenta que el punto isoeléctrico de estos coloides es muy bajo (pH 3-4 para el humus y menor de 3 para las arcillas) como se puede apreciar en la figura 4 y Tabla 6, donde el punto isoeléctrico de la arcilla estará por debajo de 3. Esto quiere decir que a pH 7, como fue utilizada en los ensayos, tendrá un potencial Z de -21,4 mV.

4.2.1. Caracterización del potencial Z del agua sintética con arcilla

Tabla 6. Potencial Z agua sintética

pH	conductividad (μS)	Potencial Z (mv)
3	1077	-8,9
4	618	-16,7
5	572	-19,8
6	616	-21,3
7	648	-21,4
8	657	-21,2
9	670	-20,2
10	687	-18,6

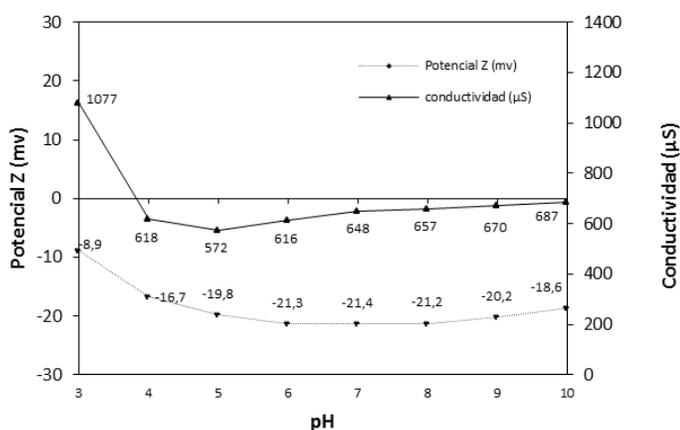


Figura 5. Potencial Z del agua sintética con arcilla

El punto isoeléctrico para el agua del entorno real (río Pisuerga) suele estar por debajo de pH 3 como se puede observar en la figura 5 y (Tabla 6), donde en el intervalo de pH de 3 a 10 es siempre negativo. Este comportamiento se observa tanto para el agua sintética como para el agua del río, y son similares con otros estudios donde se describe que el potencial Z para coloides en fuentes de agua natural, con un pH entre 5 y 8, oscila entre -15 y -30 mV [21]. Cuanto mayor es el potencial Z en valor absoluto, mayor es la carga de la partícula. A medida que disminuye el potencial Z las partículas pueden aproximarse aumentando la posibilidad de una colisión.

4.2.2. Caracterización del potencial Z del agua del río Pisuerga Valladolid.

Tabla 7. Potencial Z del agua del río Pisuerga Valladolid

pH	conductividad (μS)	Potencial Z (mV)
3	1049	-16,5
4	596	-19,7
5	557	-20,8
6	568	-21,0
7	611	-20,8
8	668	-21,4
9	699	-21,8
10	739	-21,9

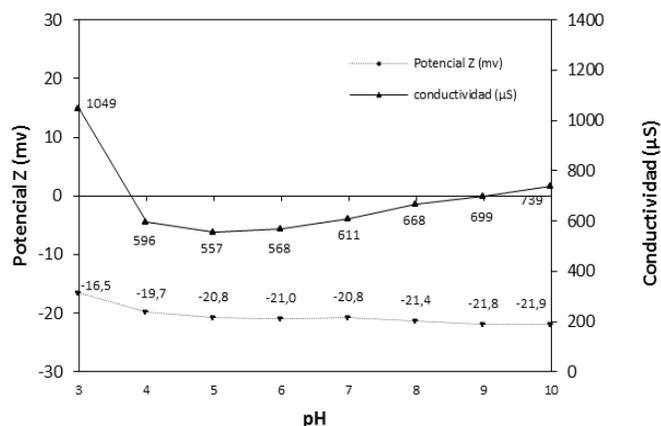


Figura 6. Potencial Z del agua del río Pisuerga Valladolid

Estos resultados además son comparables por los obtenidos por Nabigengesere y Narasiah [22] donde obtuvieron que para agua sintética con caolín el punto isoeléctrico estuvo en torno a 2,8.

4.2.3. Caracterización del Punto isoeléctrico *Cicer Arietinum L*

Tabla 8. Punto isoeléctrico *Cicer Arietinum L*

pH	conductividad (μS)	Potencial Z (mV)
3	1174	15,1
4	827	-2,5
5	851	-11,8
6	891	-19,8
7	919	-21,9
8	949	-21,9
9	970	-24,5
10	1022	-27,1

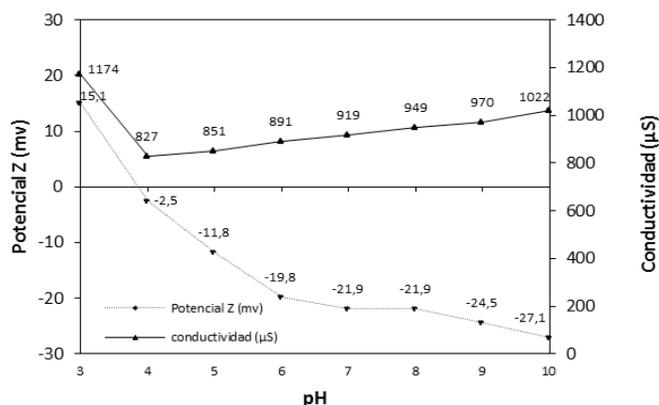


Figura 7. Punto isoeléctrico *Cicer Arietinum L*

El estudio del potencial zeta revela que el punto isoeléctrico del *Cicer arietinum L* estaría alrededor de pH 3,7; como se puede ver en la anterior figura 7 y (Tabla 8). Por debajo de este pH, la superficie del adsorbente está cargada positivamente y por encima de la superficie es negativa. El rango donde la carga se mantiene constante está a pH entre 6 y 8.

Este resultado nos permite conocer que el *Cicer Arietinum L* se comporta como un coagulante de carácter anionico debido a que su carga a pH de 7 el cual fue utilizado en los ensayos presento un potencial de -21,9 mV; siendo comparados estos resultados con los presentados en el estudio de Lakshmipathiraj et al [23] donde el potencial zeta del polvo de la semilla *Nirmali* estaría alrededor del pH 1,3 o 1,4. Considerando este autor que la superficie característica del adsorbente presenta una propiedad similar a la de un polielectrolito anionico. [23].

4.3. Mecanismo de acción del coagulante *Cicer Arietinum L*.

Según los resultados obtenidos en la caracterización por cromatografía de los aminoácidos y el potencial Z mostrado por el coagulante *Cicer Arietinum L* es importante considerar que en disociación acuosa, los aminoácidos muestran un comportamiento anfótero. Dependiendo del pH pueden ionizarse, como acido carboxílico, liberando protones y quedando el radical (-COO-), o como base por los grupos -NH₂ que captan protones, quedando como (-NH₃⁺), o comportarse como ácido y base a la vez.

En la figura 8, podemos apreciar la estructura de los aminoácidos y sus respectivos pK además de su punto isoeléctrico, siendo estos los de mayor presencia en el *Cicer Arietinum L* y los cuales debido a su carácter polar pueden interactuar con los contaminantes según el pH del medio.

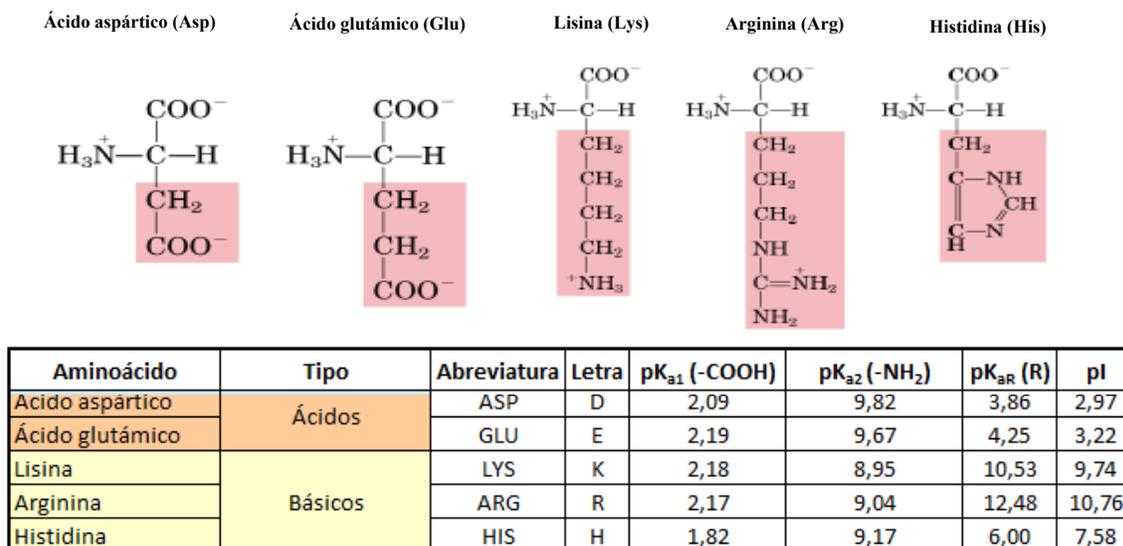


Figura 8. Caracterización estructural y pK de los aminoácidos más representativos del *Cicer Arietinum L*.

Fuente. [24].

Esta clasificación se ha realizado en base al grupo -R, pero es importante indicar que a pH neutro, el grupo α -amino se encuentra cargado positivamente y el grupo α -carboxilo lo está negativamente, por esta razón en la Figura 2 estos grupos aparecen siempre cargados [24].

A un pH ácido, los aminoácidos tendrán carga neta positiva, pues los H^+ del medio son captados por el grupo carboxilo ionizado, neutralizando éste y quedando únicamente la carga del grupo amino. Por el contrario, en un pH más básico, el grupo amino cederá un H^+ al medio y el aminoácido quedará con carga negativa.

Debido a esto se analizó el comportamiento de los aminoácidos mediante su pK y el pH del medio fue neutro para todos los ensayos que se efectuaron para conocer la carga eléctrica que poseían en ese intervalo de pH.

En general se asumen las siguientes consideraciones, para determinar el porcentaje de protonación de un grupo ionizable en un aminoácido:

- Si el $pH < pK-1$ el grupo está al 100 % protonado
- Si el $pH > pK+1$ el grupo está al 100 % desprotonado
- Si el $pH = pK$ el grupo está al 50 % protonado

El valor de pK_1 corresponde con el pK del grupo α -carboxilo; el pK_2 al otro grupo carboxilo presente en la cadena R: β -carboxilo en el caso del ácido aspártico y γ -carboxilo en el del ácido glutámico) y por último el pK_3 será el valor del pK del grupo α -amino [24].

4.3.1. *Aminoácidos polares con carga negativa.* Existen dos α -aminoácidos cuyo resto polar posee carga negativa a pH fisiológico, debida a la presencia de un grupo carboxilo (-COOH), el ácido glutámico y el ácido aspártico.

- El ácido aspártico con un $pK_R = 3,86$ y un $pK_2 = 9,82$ y un pH intermedio entre estos dos pK neutro tendrá una carga de -1 ya que predominaran los grupos carboxilo $-COO^-$.
- El ácido glutámico con un $pK_R=4,25$ y un $pk_2 = 9,67$ y un pH intermedio entre estos dos pK neutro tendrá una carga de -1 ya que predominaran los grupos carboxilo $-COO^-$.

4.3.2. *Aminoácidos polares con carga positiva.* Tres son los α -aminoácidos que poseen restos -R cargados positivamente a pH fisiológico. La lisina posee una cadena lateral de butilamonio, la arginina presenta un grupo -R de guanidina y la histidina es portadora de un grupo -R de imidazolio.

- La lisina con un $pK_1= 2,18$ y un $pK_2= 8,95$ y un pH intermedio entre estos dos pK neutro tendrá una carga positiva neta ya que el carboxilo estará disociado ($-\text{COO}^-$) y los dos aminos protonados ($-\text{NH}_3^+$).
- La arginina con un $pK_1= 2,17$ y un $pK_2= 9,04$ y un pH intermedio entre estos dos pK neutro tendrá una carga positiva neta ya que el carboxilo estará disociado ($-\text{COO}^-$) y el amino de la cadena lateral sigue protonado ($-\text{NH}_3^+$) y el alfa-amino aparece como ($-\text{NH}_2^+$).
- La histidina con un $pK_R=6$ y un $pK_2 = 9,17$ y un pH intermedio entre estos dos pK neutro tendrá una carga de 0, el carboxilo estará disociado ($-\text{COO}^-$) y el amino sigue protonado ($-\text{NH}_3^+$); el alfa-amino aparece como ($-\text{NH}_2$). El aminoácido estará próximo a su punto isoeléctrico.

Esto nos permitió inferir que a ese intervalo de pH; las proteínas del coagulante y la superficie de los coloides y de la arcilla fueron dominadas por cargas positivas y negativas siendo las cargas positivas aportadas por los aminoácidos polares lisina y arginina y las negativas por los ácidos aspártico y glutámico las cuales pueden intervenir con los coloides en el proceso de coagulación mediante adsorción; ya que el coagulante al interactuar con las partículas y después de medido su carga eléctrica parece ser que actúa como un coagulante aniónico.

Estos resultados nos da una idea de que el *Cicer Arietinum L* puede ser comparado con el extracto de las semillas *Nirmali* funcionando estos como un polielectrolito aniónico que desestabilizan las partículas en el agua a través de puentes químicos. Los estudios han establecido que el extracto de *Nirmali* contiene lípidos, carbohidratos y alcaloides que presentan grupos carboxilo e hidroxilo, que aumentan la capacidad de coagulación. Se cree que la presencia de grupos hidroxilo a lo largo de la cadena polimérica proporciona abundantes sitios de adsorción que conducen a la formación de puentes químicos [25].

Es así entonces como podemos predecir mediante los análisis que el mecanismo de acción de *Cicer arietinum L*, puede atribuirse a la formación de enlaces por puentes de hidrógeno o por medio de la formación de puentes con el calcio ya que tiene grupos carboxilo. Ya que se descartan los 3 mecanismos de funcionamiento los cuales son compresión a doble capa, absorción y neutralización de cargas y atrapamiento de partículas dentro de un precipitado.

A continuación se detalla el mecanismo de acción:

4.3.3. Adsorción y formación Puente

La formación de puentes se presenta cuando un agente forma hilos o fibras que absorben a más de una partícula, capturándolas y ligándolas a ellos; como se puede observar en la

figura 9.

Este fenómeno es explicado por la teoría del “puente”. En la molécula polimérica cuando entra en contacto con las partículas coloidales, los grupos reactivos del polímero se unen a la superficie de la partícula y el resto de la estructura de la molécula queda libre y se extiende sobre la solución para adsorber otras partículas [26].

Se ha demostrado que el mucílago del cactus *Opuntia ficus indica* que es un polisacárido aniónico, resultando ser efectivo en la eliminación de partículas a través de este mecanismo [27].

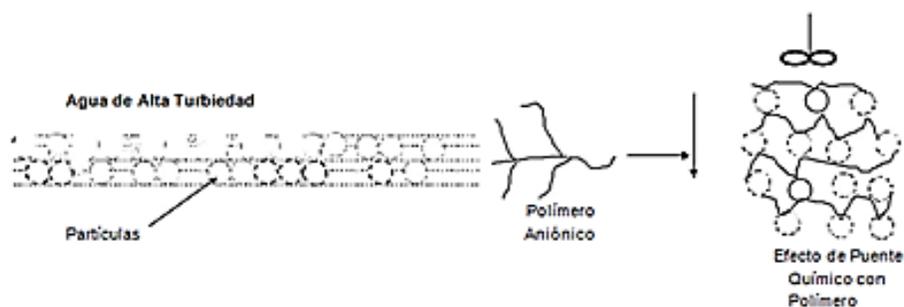


Figura 9. Efecto de Puente de las Partículas en Suspensión.

4.4. Parámetros iniciales y eficiencia de los coagulantes.

Tabla 9. Parámetros iniciales agua sintética para conocer pH óptimo del *Cicer arietinum L.*

Beaker	Muestra inicial			
	Turbidez (NTU)	Color (Pt-Co)	pH	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
1	200	235	3	342
2	200	230	5	345
3	200	229	7	352
4	200	226	9	362

En la Tabla 9; se muestran los parámetros y características iniciales del agua sintética que fue utilizada para conocer el pH óptimo del coagulante *Cicer Arietinum L.* El agua poseía una turbidez general de 200 NTU en los 4 recipientes, un color que variaba ligeramente de 226 a 235Pt-Co para valores de pH ajustados a 3, 5, 7 y 9 mediante ácido clorhídrico 2M e hidróxido de sodio 2M. La conductividad osciló en condiciones ácidas en torno 650 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y en condiciones básicas 362 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La dosis inicial empleada se obtuvo como se describe

en el apartado 3.9. Prueba de coagulación y funcionamiento, donde se trabajó con dosis progresivas iniciando en 20 mg/L y llegando a 80 mg/L, a una concentración del 1 %, y pH de 6 y en un litro de agua sintética, evaluando así a partir de cual dosis se comenzaba a formar floc y por ende, partir desde esta dosis para los ensayos posteriores.

De esta forma, se determinó que la formación del floc con el coagulante *Cicer Arietinum L* tenía lugar en dosis cercanas a 80 mg / L.

Para el coagulante comercial sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$, se evaluó a partir de una dosis inicial de 70 mg / L ya que a partir de esta dosis se apreciaba la formación del floc.

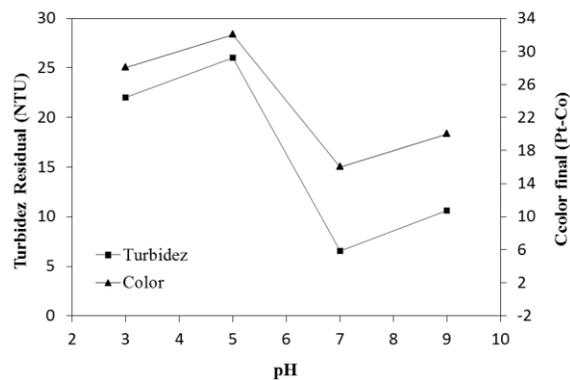


Figura 10. Variación de la Turbidez residual y color final con respecto al pH.

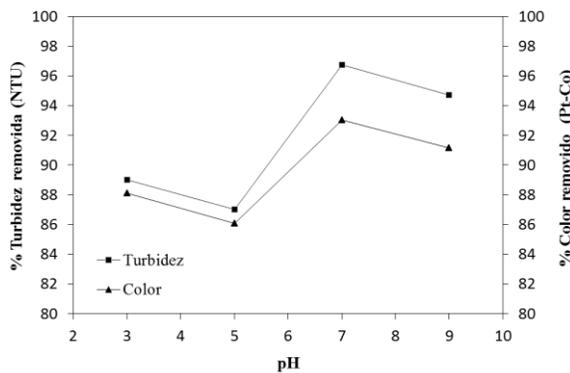


Figura 11. Porcentajes de remoción de turbidez y color con respecto al pH.

Los resultados del pH óptimo y dosis mínimas a utilizar en los ensayos posteriores con *Cicer Arietinum L* para la eliminación de turbidez y color. Se presentan en las (figuras 10 y 11), donde se expresó las diferentes variaciones del pH con respecto a la turbidez residual, color final y los porcentajes de remoción, siendo la dosis mínima 80 mg/L ya que a partir de esta se comienza a ver la formación del floc siendo este un criterio importante para

iniciar el proceso. Debido que con esta se apreciaba claramente la formación del floc y el pH óptimo fue de 7. Obteniendo los valores más bajos en turbidez residual de 6,53 NTU y color final de 16 Pt-Co. Siendo el valor inicial de la turbidez 200 NTU logrando un 96,74 % de efectividad y un color inicial de 229 Pt-Co evidenciándose un 93,01 % en la eliminación del color.

Las variaciones del pH antes y después del proceso de coagulación-floculación, únicamente fueron de 0,2 unidades de pH. Para la conductividad el valor final vario en un intervalo de de 4 a 12 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en los recipientes. Percibiéndose que la conductividad no se ve alterada por el coagulante natural.

Los ensayos propuestos se basaron en reflejar las características similares del agua contaminada en época de precipitación baja (200 NTU), precipitación media (400NTU) y precipitación alta (600 NTU).

Tabla 10. Parámetros iniciales agua sintética (200 NTU) tratada con *Cicer arietinum L.*

Muestra inicial				
Beaker	Turbidez (NTU)	Color (Pt-Co)	pH	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
1	200	244	7	368
2	200	238	7	375
3	200	243	7	379
4	200	239	7	384

Tabla 11. Parámetros iniciales agua sintética (200 NTU) tratada con Sulfato de aluminio.

Muestra inicial				
Beaker	Turbidez (NTU)	Color (Pt-Co)	pH	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
1	200	237	7	312
2	200	234	7	307
3	200	231	7	309
4	200	235	7	305

Una vez conocida la dosis mínima para la formación del floc y el pH óptimo del *Cicer Arietinum L* 80 mg/L. Se procedió a efectuar los ensayos con los niveles de turbidez estipulados para hallar la dosificación óptima para cada uno. En el caso del sulfato de aluminio se trabajó a pH de 7 y con una dosis mínima inicial de 70 mg/L.

En las (Tablas 10 y 11), se muestra el resumen de los parámetros y características iniciales del agua sintética utilizada, para medir la eficiencia del coagulante aniónico y del sulfato de aluminio como un producto químico comparativo la turbidez para los ensayos presento un error de ± 5 NTU.

4.4.1. Ensayo utilizando *Cicer Arietinum L* como coagulante natural (200NTU).

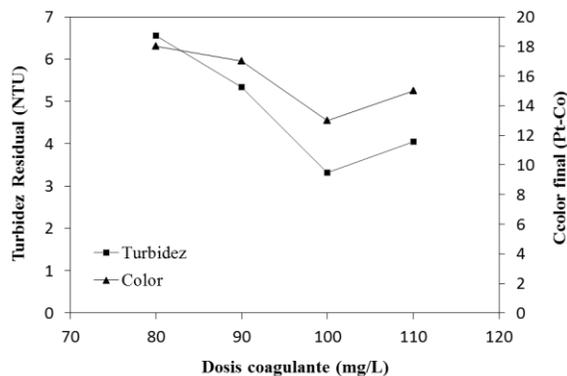


Figura 12. Turbidez residual y color final respecto a la dosis de coagulante

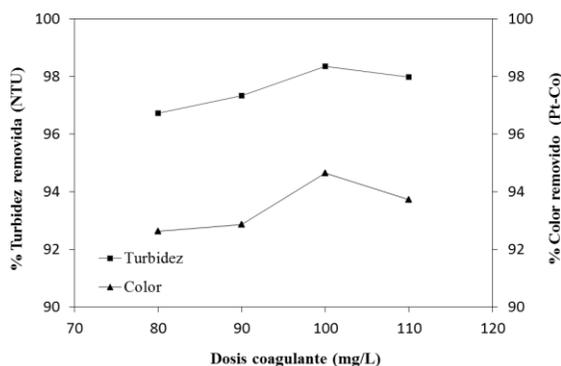


Figura 13. Porcentaje de remoción de turbidez y color respecto a la dosis de coagulante

Los resultados para conocer la dosis óptima y efectividad del *Cicer Arietinum L*, para una turbidez inicial de 200 NTU y color comprendido de 238 Pt-Co a 244 Pt-Co, se observan en las (figuras 12 y 13). Siendo la turbidez residual más baja de 3,31 NTU y un color final de 113 Pt-Co; correspondiente a 100 mg/L con un porcentaje en remoción de turbidez de 98,35 % y un porcentaje de remoción de color 94,65 % para la dosis optima de 100 mg/L (figuras 12 y 13). Se cumple así con los estándares estipulados en la legislación

colombiana. Estos resultados son comparados por los obtenidos por Asrafuzzaman [11], el cual obtuvo con dosis de 100 mg/L y una turbidez de 200 NTU porcentajes en remoción de 94,1 % para la *Moringa Oleifera*, 95,89 % y 88,9 % para *Dolichos Lablad*.

Se observó que el pH del medio no se ve afectado por el coagulante natural, después del ensayo ya que no consume alcalinidad y su variación es muy pequeña siendo el pH inicial 7 en los 4 recipientes y el final comprendido entre 7,1 y 7,2. La conductividad inicial en el ensayo estuvo no presente gran variabilidad con respecto al inicio presentando estos valores finales con un incremento de 7 a 24 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

4.4.2. Ensayo utilizando Sulfato de Aluminio como coagulante (200 NTU).

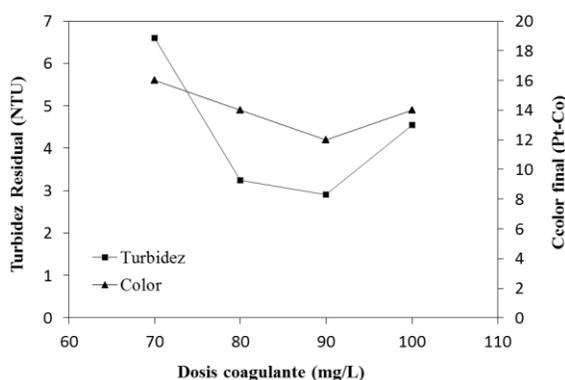


Figura 14. Turbidez residual y color final respecto a la dosis de coagulante químico

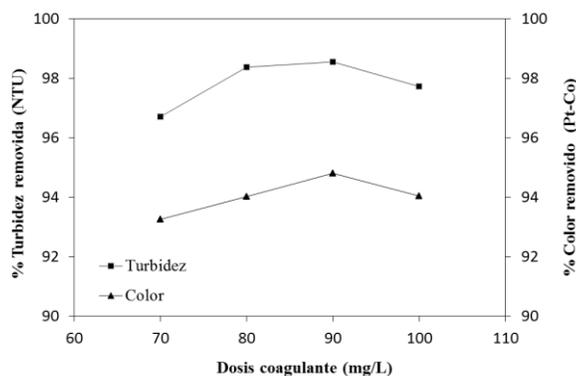


Figura 15. Porcentaje de remoción de turbidez y color respecto a la dosis de coagulante químico.

Debido a su gran uso a nivel mundial en el tratamiento del agua, se escogió como coagulante comparativo para los ensayos respectivos el sulfato de aluminio partiendo de una dosis mínima de 70 mg/L, para una turbidez inicial de 200 NTU y un color comprendido de 231 Pt-Co a 237 Pt-Co. La turbidez residual más baja fue 2,9 NTU y color de 12 Pt-Co, como un porcentaje en remoción de turbidez de 98,55 % y en remoción de color de 94,81 % para una dosis óptima de 90 mg/L (figura 14 y 15). En ambos casos, se está dentro de los estándares exigidos por la legislación colombiana.

El pH inicial fue de 7 en los 4 recipientes y el final estuvo comprendido entre 6,8 y 6,9 disminuyendo mínimamente debido a que el sulfato tiende a bajar el pH por sus características. La conductividad inicial en el ensayo presento una variabilidad que estuvo entre 16 y 20 $\mu\text{S/cm}$. Esto se debe a la presencia de sales y compuestos que al reaccionar generan un aumento en la conductividad.

En las (Tablas 12 y 13) se detallan los parámetros y características iniciales del agua sintética con una turbidez generada de 400 NTU época de precipitación media con una turbidez con un error de ± 5 NTU.

Tabla 12. Parámetros iniciales agua sintética (400 NTU) tratada con *Cicer arietinum L.*

Muestra inicial				
Beaker	Turbidez (NTU)	Color (Pt-Co)	pH	Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)
1	400	464	7	376
2	400	475	7	379
3	400	468	7	374
4	400	472	7	372

Tabla 13. Parámetros iniciales agua sintética (400 NTU) tratada con Sulfato de aluminio.

Muestra inicial				
Beaker	Turbidez (NTU)	Color (Pt-Co)	pH	Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)
1	400	437	7	324
2	400	445	7	317
3	400	448	7	328

4.4.3. Ensayo utilizando *Cicer Arietinum L* como coagulante natural (400NTU).

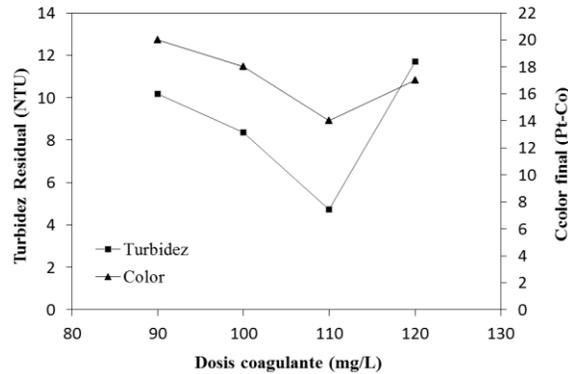


Figura 16. Turbidez residual y color final respecto a la dosis de coagulante.

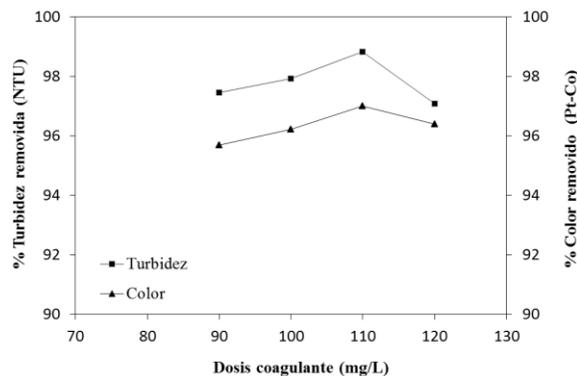


Figura 17. Porcentaje de remoción de turbidez y color respecto a la dosis de coagulante.

La efectividad del coagulante *Cicer Arietinum L* para una turbidez inicial de 400 NTU época de precipitación media y color comprendido de 464 Pt-Co a 475 Pt-Co. El valor mínimo de turbidez residual fue de 4,72 NTU y un color final 14 Pt-Co. Un porcentaje en remoción de turbidez de 98,82 % y un porcentaje de remoción de color de 97,01 % para una dosis optima de 110 mg/L como se aprecia en las Figuras (16 y 17). Valores que cumplen con la legislación colombiana.

El pH del medio no se ve afectado por el coagulante natural, después del ensayo ya que no consume alcalinidad del medio y su variación es muy pequeña siendo el pH inicial 7 en los 4 recipientes y el final comprendido entre 7,1 y 7,3. La conductividad inicial en el ensayo

no presento una modificación amplia estando comprendida la variación entre 3 y 14 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

4.4.4. Ensayo utilizando Sulfato de Aluminio como coagulante (400 NTU).

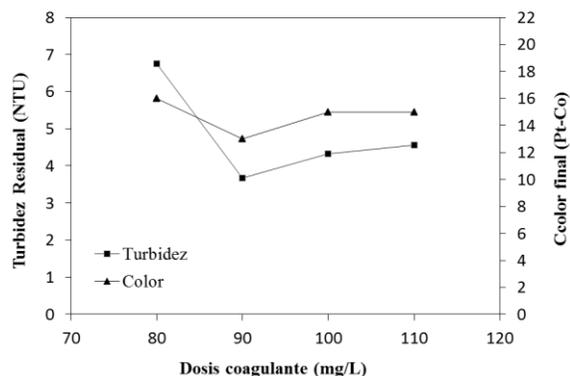


Figura 18. Turbidez residual y color final respecto a la dosis de coagulante químico

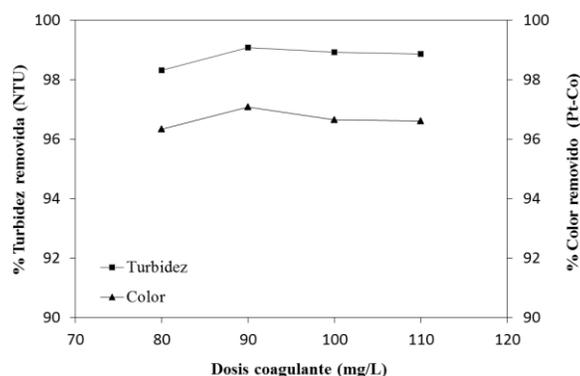


Figura 19. Porcentaje de remoción de turbidez y color respecto a la dosis de coagulante químico.

Después de efectuados los ensayos con el sulfato de aluminio, con una turbidez inicial de 400 NTU época de precipitación media y un color comprendido de 437 Pt-Co a 448 Pt-Co en el agua sintética. Se obtuvo como resultado mínimo de una turbidez residual 3,67 NTU y un color final de 13 Pt-Co. Porcentaje en remoción de turbidez de 99,08 % y un porcentaje de remoción de color 97,08 % para la dosis óptima de 90 mg/L apreciable en las (figuras 18 y 19). Estos resultados cumplen con la normativa colombiana la cual estipula que la

turbidez después del proceso de coagulación-floculación y antes de la filtración debe estar por debajo de 10 NTU y con un color máximo de 15 Pt-Co.

Se observó que el pH del medio disminuye no siendo alterado en gran magnitud por el coagulante químico después del ensayo, siendo el pH inicial 7 en los 4 recipientes y el final comprendido entre 6,7 y 6,8. La conductividad inicial en el ensayo presentó una variabilidad en la conductividad final del orden de 28 a 34 $\mu\text{S}/\text{cm}$, siendo esto debido a la interacción del medio con los componentes que posee el coagulante de origen químico.

Tabla 14. Parámetros iniciales agua sintética (600 NTU) tratada con *Cicer Arietinum L.*

Muestra inicial				
Beaker	Turbidez (NTU)	Color (Pt-Co)	pH	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
1	600	655	7	318
2	600	657	7	321
3	600	647	7	313
4	600	649	7	317

Tabla 15. Parámetros iniciales agua sintética (600 NTU) tratada con Sulfato de aluminio.

Muestra inicial				
Beaker	Turbidez (NTU)	Color (Pt-Co)	pH	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
1	600	654	7	330
2	600	660	7	338
3	600	652	7	345
4	600	659	7	328

Los parámetros y características iniciales del agua sintética se exponen en las (Tablas 14 y 15) con una turbidez generada de 600 NTU época de precipitación alta. Con una turbidez con un error de ± 5 NTU.

4.4.5. Ensayo utilizando *Cicer Arietinum L* como coagulante natural (600NTU).

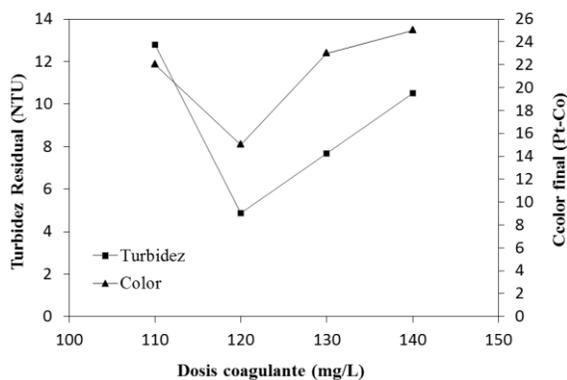


Figura 20. Turbidez residual y color final respecto a la dosis de coagulante.

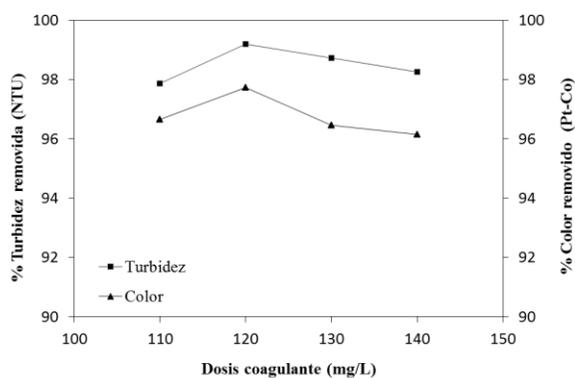


Figura 21. Porcentaje de remoción de turbidez y color respecto a la dosis de coagulante.

Los resultados para conocer la dosis óptima y efectividad del *Cicer Arietinum L* para una turbidez inicial de 600 NTU época de precipitación alta y un color comprendido de 647 Pt-Co a 657 Pt-Co. Se obtuvo una turbidez residual mínima de 4,86 NTU y un color final de 15 Pt-Co. Porcentaje en remoción de turbidez de 99,19 % y un porcentaje de remoción de color 97,72 % para una dosis optima de 120 mg/L apreciable en las (figuras 20 y 21). Valores que cumplen con los estándares estipulados en la legislación colombiana.

El pH del medio no se ve afectado por el coagulante natural, después del ensayo ya que no consume alcalinidad del medio y su variación es muy pequeña siendo el pH inicial 7 en los

4 recipientes y el final comprendido entre 7,3 y 7,2. La conductividad inicial en el ensayo no presentó una viabilidad significativa estando estos valores en un intervalo de 5 a 7 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Este comportamiento es similar en otros coagulantes de origen natural ya que en su estructura química no poseen una cantidad elevada de sales que eleven la conductividad.

4.4.6. Ensayo utilizando Sulfato de Aluminio como coagulante (600 NTU).

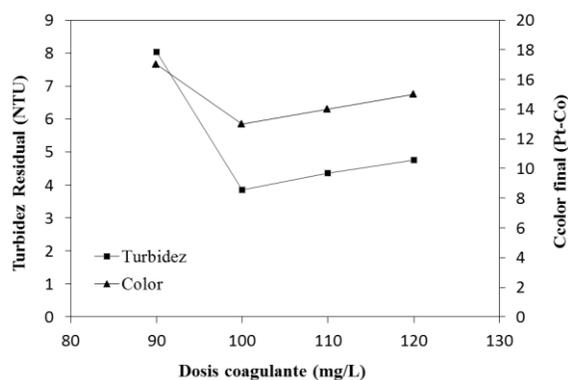


Figura 22. Porcentaje de remoción de turbidez y color respecto a la dosis de coagulante químico.

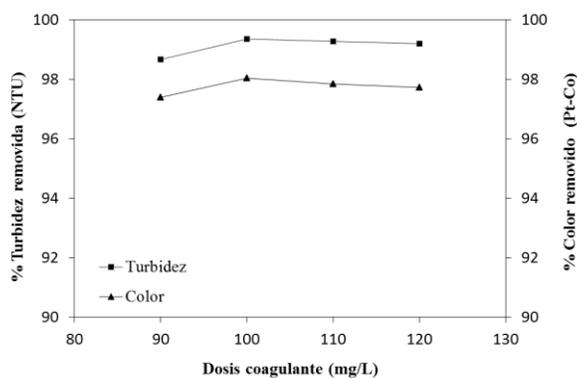


Figura 23. Porcentaje de remoción de turbidez y color respecto a la dosis de coagulante químico.

Los resultados para conocer la dosis óptima y efectividad del coagulante químico sulfato de aluminio para una turbidez inicial de 600 NTU época de precipitación alta y un color comprendido de 652 Pt-Co a 660 Pt-Co. Se obtuvo una turbidez residual mínima de 3,85 NTU y un color final de 13 Pt-Co. Porcentaje en remoción de turbidez de 99,36 % y un porcentaje de remoción de color 98,03 % para la dosis óptima de 100 mg/L apreciable en

las (figuras 22 y 23). Valores que cumplen con los estándares estipulados en la normativa Colombiana.

Se observó que el pH del medio se ve afectado por el coagulante químico sulfato de aluminio después del ensayo ya que siendo el pH inicial 7 en los 4 recipientes y el final comprendido entre 6,5 y 6,7. La conductividad inicial presento una variabilidad que estuvo comprendida entre 9 y 22 $\mu\text{S/cm}$.

4.5. Parámetros iniciales agua río Pisuegra y eficiencia de los coagulantes.

Tabla 16. Parámetros iniciales agua río Pisuegra (492 NTU) tratada con *Cicer Arietinum L.*

Muestra inicial				
Beaker	Turbidez (NTU)	Color (Pt-Co)	pH	Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)
1	492	473	7	658
2	492	475	7	660
3	492	477	7	661
4	492	472	7	659

Tabla 17. Parámetros iniciales agua río Pisuegra (490 NTU) tratada Sulfato de aluminio

Muestra inicial				
Beaker	Turbidez (NTU)	Color (Pt-Co)	pH	Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)
1	490	465	7	645
2	490	467	7	649
3	490	464	7	652
4	490	469	7	648

Los parámetros y características iniciales del agua del río Pisuegra la cual fue extraída en época de precipitación media se exponen en las (Tablas 16 y 17). Con una turbidez con un error de ± 5 NTU.

4.5.1. Ensayo utilizando *Cicer Arietinum L* como coagulante natural (492 NTU).

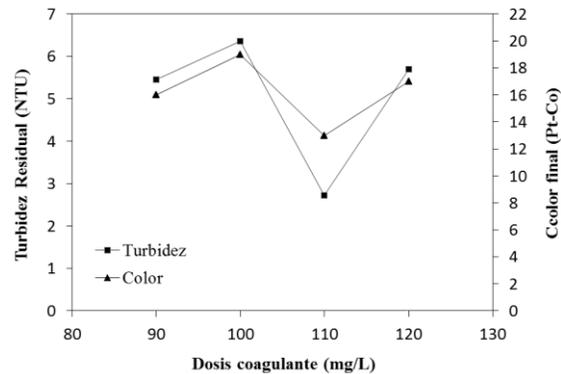


Figura 24. Turbidez residual y color final respecto a la dosis de coagulante.

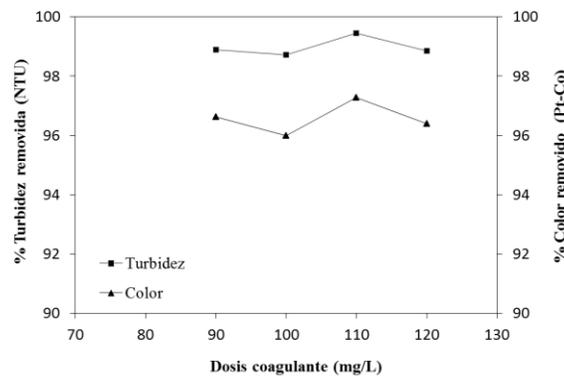


Figura 25. Porcentaje de remoción de turbidez y color respecto a la dosis de coagulante.

La efectividad del coagulante *Cicer Arietinum L* para el agua de entorno real como lo del río Pisuegra con una turbidez inicial de 492 NTU época de precipitación media y color comprendido de 472 Pt-Co a 477 Pt-Co. Se alcanzó una turbidez residual mínima de 2,72 NTU y un color final de 13 Pt-Co. Porcentaje en remoción de turbidez de 99,45 % y un porcentaje en remoción de color de 97,27 % para una dosis optima de 110 mg/L como se aprecia en las (figuras 24 y 25). Valores que cumplen con los parámetros estipulados en la legislación colombiana.

Se determinó que el pH del medio no se ve afectado por el coagulante *Cicer Arietinum L*, después del ensayo ya que no consume alcalinidad y su variación es muy pequeña siendo el pH inicial 7 en los 4 recipientes y el final comprendido entre 7,3 y 7,2. La conductividad inicial en el ensayo no presento una variabilidad notable estando comprendido para los valores finales entre 7 y 13 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respecto al valor inicial. Este comportamiento es similar en otros coagulantes de origen natural ya que en su composición no poseen gran cantidad de sales que eleven la conductividad.

4.5.2. Ensayo utilizando Sulfato de Aluminio como coagulante (492 NTU).

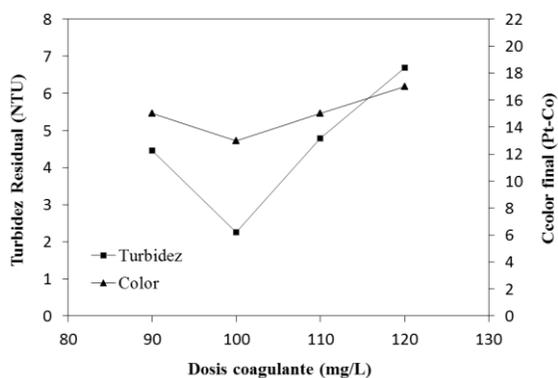


Figura 26. Turbidez residual y color final respecto a la dosis de coagulante químico.

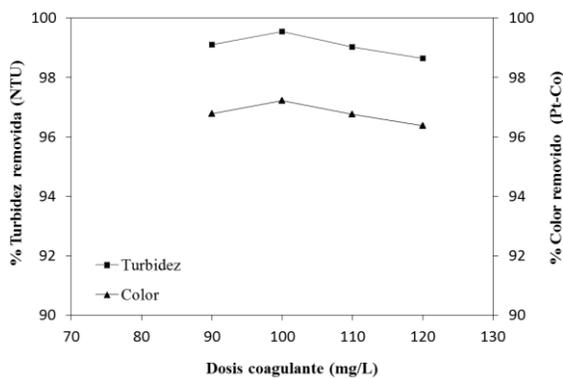


Figura 27. Porcentaje de remoción de turbidez y color respecto a la dosis de coagulante químico.

Los resultados comparativos llevados a cabo con el sulfato de aluminio con el agua del entorno real río Pisuerga con una turbidez inicial de 490 NTU época de precipitación media y un color comprendido entre 464 Pt-Co a 469 Pt-Co. Obteniéndose una turbidez residual

mínima de 2,25NTU y un color final de 15, 13,15 y 17 Pt-Co. Porcentaje en remoción de turbidez del 99,54 % y un porcentaje de remoción de color 97,22 % para la dosis optima de 100 mg/L apreciable en las (figuras 25 y 26). Valores que cumplen con los estipulados en la normativa Colombiana.

El pH del medio se ve afectado por el coagulante químico sulfato de aluminio después del ensayo, el pH inicial fue de 7 en los 4 recipientes y el final comprendido entre 6,7 y 6,8 apreciándose que debido a la composición química del coagulante este tiende a disminuir el pH del medio. La conductividad inicial presento una variabilidad entre 23 y 30 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Estos ensayos permiten percibir que el coagulante químico posee una gran efectividad en la remoción de contaminantes pero a su vez altera parámetros como el pH y la conductividad.

Tabla 17. Comparativa de resultados generales con *Cicer Arietinum L* respecto al sulfato de aluminio.

Muestra	Parámetro	<i>Cicer Arietinum L</i>			Sulfato de Aluminio		
		Dosis (mg/L)	% Remoción de turbidez	% Remoción de color	Dosis (mg/L)	% Remoción de turbidez	% Remoción de color
Agua sintética con arcilla	200 NTU	100	98,34	94,65	90	98,55	94,8
	400 NTU	110	98,82	97	90	99,08	97,07
	600 NTU	120	99,19	97,71	100	99,35	98,03
Agua del río Pisuerga	492 NTU	110	99,45	97,27	100	99,54	97,22
	Media	---	99,01	97,14	---	99,22	97,15
	Desviación	---	0,48	1,37	---	0,43	1,39

Figura 28. Muestras resultados eficiencia del coagulante *Cicer Arietinum L*.



En la Tabla 17 y la figura 46, se resume y compara la dosificación utilizada con el coagulante natural *Cicer Arietinum L* y el coagulante químico sulfato de aluminio y los porcentajes de remoción de turbidez y color, resaltando que el coagulante natural requiere de una dosis mayor a la del sulfato de aluminio y que a medida que la turbidez aumenta la dosis también siendo este comportamiento lineal; los valores en remoción son óptimos y no están muy lejos de los obtenidos por parte del sulfato de aluminio el cual tuvo una media en remoción de turbidez del 99, 22 % y de remoción de color del 97, 15 %, el coagulante natural presento una media general del 99,01 % para remoción de turbidez y un 97,14 % para remoción de color demostrándose la capacidad del *Cicer arietinum L* como coagulante primario siendo una alternativa al tratamiento del agua en comunidades marginales siendo este coagulante fácilmente cultivable, y disponible en Colombia a 1.900 \$ pesos el kilo mientras que el sulfato de aluminio por kilo se comercializa a 4.000 \$ pesos evidenciándose que este valor del coagulante químico alcanza el doble del valor del *Cicer Arietinum L*. Estos resultados pueden ser comparados con los obtenidos con el mucilago de la Okra [28], con remoción de color y turbidez máxima de aproximadamente del 97%. Resultados similares a los obtenidos por Mazrafuzaman [11] con la *Moringa Oleifera* con un porcentaje de remoción de turbidez de 94,1 %, *Dolichos Lablad* con 88,9 %, Patale y Pandya [29] utilizaron el extracto mucilaginoso obtenido de *Coccinia indica* logrando una remoción de turbidez en agua sintética del 94% sólo en aguas con turbidez de 100 NTU

5. Conclusiones

El coagulante *Cicer arietinum L* resulto ser efectivo para los 3 tipos de turbidez (200,400, 600 NTU) del agua sintética con dosis óptimas lineales de 100, 110 y 120 mg/L, respectivamente, y con una dosis óptima de 110 mg/L para el agua de entorno real que poseía una turbidez inicial de 492 NTU. Los porcentajes de remoción de turbidez eran superiores al 98 % y de remoción de color superiores al 94 %, evidenciándose que puede ser utilizado como coagulante primario ya que obtuvo valores muy cercanos a los logrados por el sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$. Hay que resaltar que estos valores fueron obtenidos solo mediante el proceso de coagulación-floculación faltando aún dos posibles etapas posteriores como son la filtración que se encarga de eliminar el resto de partículas que puedan quedar y el proceso de desinfección que elimina patógenos.

Los parámetros de turbidez y color, después del tratamiento con el coagulante natural y químico cumplieron con los parámetros estipulados en la legislación colombiana vigente con respecto al valor máximo aceptable de 15 UPC para el color antes de filtrar; y un valor máximo de turbidez 2 NTU después del proceso de filtración.

El coagulante *Cicer arietinum L* puede utilizarse como coagulante primario respetuoso con el medio ambiente durante la purificación del agua ya que la combinación de los procesos de tratamiento que abarca coagulación, floculación, sedimentación y filtración permitió generar un efluente que alcanzó los niveles deseables de color y turbidez.

Los resultados obtenidos indican que el mayor contenido de aminoácidos en el *Cicer Arietinum L* corresponde al ácido glutámico con 3,2 %, seguido del ácido aspártico con 2,2%, arginina con 1,8% lisina con 1,2% leucina con 1,4%, serina 1,0% siendo el menor contenido por cada 100 g para la cisteína con 0,01 %.

Los aminoácidos polares como son el ácido aspártico y ácido glutámico pueden aportar según el estudio de los pK y el pH cada uno una carga negativa a pH 7 mientras que la lisina y arginina aportan cada uno una carga positiva neta. Esto permite concluir que estos aminoácidos podrían interactuar con las partículas coloidales responsables de la turbidez y el color, durante el proceso de coagulación-floculación.

Según el estudio realizado para determinar el potencial Z, el coagulante posee un punto isoeléctrico a pH 3,7 y una potencial Z de -21,9 mV a pH 7, percibiéndose así que puede trabajar como un polielectrolito aniónico debido a la presencia de grupos -COOH y -OH, interactuando con las partículas mediante el mecanismo de acción como lo es la adsorción y formación de puentes de hidrógeno o calcio.

Este coagulante es de gran importancia para las comunidades colombianas ya que no existe literatura a nivel colombiana que estipule que este producto fue utilizado para el tratamiento del agua como una solución innovadora y que permitiría proporcionar agua adecuada para dicha población.

6. Agradecimientos

Como autor de este trabajo quiero dar las gracias por el apoyo brindado durante este proceso al equipo humano perteneciente al grupo de investigación SMAP de la Universidad de Valladolid, a mi familia y a cada una de las personas que me colaboraron.

TLPECQMF

7. Bibliografía

- [1] Organización Mundial de la Salud (OMS). “Guidelines for Drinking-water quality,” four edition. Ginebra, Suiza, pp. 1-490. 2011.
- [2] Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (Unicef). Agua, saneamiento e higiene. 2012. http://www.unicef.org/spanish/wash/index_43106.html.
- [3] H. Ramírez y J. Jaramillo. 2015. Agentes naturales como alternativa para el tratamiento del agua. Revista facultad de ciencias básicas, Universidad Nueva Granada, Vol. 11, No.1, pp.114-129. 2015. DOI <http://dx.doi.org/10.18359/rfcb.1303>
- [4] V. Perez, L Torres y V Cruz. Planes de seguridad del agua. Fundamentos y perspectivas de implementación en Colombia. Revista Ingeniería e Investigación Vol. 29 No. 3. 2009.
- [5] A. Mann y C. Tam. The Association Between Drinking Water Turbidity and Gastrointestinal Illness: a systematic review, Bio Med Central Public Health, ID 101186. pp. 2-7. 2007
- [6] P. Lucas, C. Cabral y Colford J. Dissemination of Drinking Water Contamination Data to Consumers: A Systematic Review of Impact on Consumer Behaviors, PLoS One, Vol. 6 No 6. 2011
- [7] O. Ospina y H. Ramirez, “Tratamiento casero alternativo de agua para consumo humano por medio de fitoquímicos,” Escuela Colombiana de Ingeniería, vol. 84, pp. 7-17, 2011.
- [8] L. Molano. Las semillas de *Moringa Oleifera Lam*, como alternativa de coagulante natural para purificación de agua. Tesis de especialización. Universidad Industrial de Santander, facultad de ciencias, especialización en química ambiental Bucaramanga. Pp. 1-43. 2011.
- [9] L. Fuentes, I. Mendoza, A. López, M. Castro y C. Urdaneta, “Efectividad de un coagulante extraído de *Stenocereus griseus* (Haw.) Buxb. en la potabilización del agua,” Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia, vol. 34, no. 1, pp48-56, 2011.
- [10] Resolución 2115. Capítulo IV. En M. D. SOCIAL, Resolución 2115 pp, 7-12. Bogotá: Oficial República de Colombia. 2007.

- [11] M. Asrafuzzaman, A. Fakhruddin y M. Hossain, “Reduction of turbidity of water using locally available natural coagulants,” *ISRN Microbiology*, vol, 2011, pp, 1-6. 2011.
- [12] A. Ndabigengesere, K. S. Narasiah y B.G. Talbot, “Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using *Moringa oleifera*” *Water Research*, vol 29, no. 2, 703-710 1995.
- [13] K. R. Gunaratna, B. Garcia, S. Andersson, and G. Dalhammar. 2007. “Screening and evaluation of natural coagulants for water treatment,” *Water Science and Technology*, vol. 7, no. 5-6, pp. 19–25, 2007.
- [14] S. A. A. Jahn, 1988. “Using *Moringa* seeds as coagulants in developing countries,” *Journal of the American Water Works Association*, vol. 80, no. 6, pp. 43–50, 1988.
- [15] A. Diaz, N. Rincon, A. Escorihuela, N. Fernandez, E. Chacin y C. F. Forster, “A preliminary evaluation of turbidity removal by natural coagulants indigenous to Venezuela,” *Process Biochemistry*, vol. 35, no. 3-4, pp. 391–395, 1999
- [16] A. K. Jukanti, P. M. Gaur, C.L. Gowda y R. N. Chibbar, “Nutritional quality and health benefits of chickpea (*cicer arietinum* L): a review. *British journal of nutrition*, vol. 108, pp. 11-26, 2012.
- [17] American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation (APHA-AWWA-WEF). “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater”. 21st edition. American Public Health Association. Washington D.C., 714 pp. 2005.
- [18] Ministerio de Protección Social. Decreto número 1575. Bogotá: Oficial. 2007.
- [19] J. Campos, G. Colina, N. Fernandez, G. Torres, B. Sulbaran y G. Ojeda. Caracterización del agente coagulante activo de las semillas de *Moringa oleífera* mediante HPCL. Centro de investigación biológicas; Universidad del Zulia, Maracaibo Venezuela vol. 37 No. 1 pp 35-43. 2003.
- [20] Edafología. Ciencias Ambientales. Extraída el día 13 de mayo de 2017 de la web <https://www.eweb.unex.es/eweb/edafo/ECAP/ECAL5PFestructura.htm>.
- [21] Coagulación-Floculación. Extraída el día 13 de mayo de 2017 de la web http://www3.uclm.es/profesorado/giq/contenido/dis_procesos/tema5.pdf

- [22] A. Ndabigengesere y K.S. Narasiah. Quality of water treated by coagulation using *Moringa oleifera* seeds. *Water research*, 32(3), pp. 781-791. 1998.
- [23] P. Lakshmipathiraj, S. Umamaheswari, G. Bhaskar Raju, S. Prabhakar y T. Kojima. Removal of Cr(VI) from aqueous solution using Nirmali seed as biosorbent. *Journal of Ecotechnology Research*, 17[3-4], pp. 103- 106. 2014
- [24] Bioquímica. Aminoácidos y péptidos. 1-14. 2016. <https://tuylaquimica.files.wordpress.com/2012/02/aminoc3a1cidos-y-protec3adnas.pdf>
- [25] C.Y. Yin. Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. *Process Biochemistry*, vol. 45, pp. 1437-1444. 2010
- [26] J. Martinez y L. González. Evaluación del poder coagulante de la tuna (*Opuntia ficus indica*) para la remoción de turbidez y color en aguas crudas. [Tesis de pregrado]. Universidad de Cartagena; Facultad de ingeniería, Programa de ingeniería química Cartagena de Indias. 2012.
- [27] S. Miller, E. Fugate, V. Craver, J. Smith y J. Zimmerman. Toward understanding the efficacy and mechanism of *Opuntia* spp. as a natural coagulant for potential application in water treatment. *Environmental Science Technology*, vol. 42, pp. 4274-4279. 2008.
- [28] T. Freitas, V. Oliveiraa, M. de Souzaa, H. Geraldinoa, V. Almeidaa, S. Fávarob y J. Garcia. Optimization of coagulation-flocculation process for treatment of industrial textile wastewater using okra (*A. esculentus*) mucilage as natural coagulant. *Industrial Crops and Products* 76, pp. 538–544. 2015.
- [29] V. Patale y J. Pandya. Mucilage extract of *Coccinia indica* fruit as coagulant-flocculent for turbid water treatment. *Asian J Plant Sci Res* 2(4): pp. 442–445. 2012.