

Análisis de interacciones de los ácidos húmicos con colorante azul brillante en solución acuosa

Analysis of interactions of humic acids with brilliant blue dye in aqueous solution

R.V. Jiménez-Ruiz ^a, E. Contreras-López  ^a, L.G. González-Olivares  ^a, A. Castañeda-Ovando  ^a,
S. Nieto-Velázquez  ^{a*}

^aÁrea Académica de Química, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.

Resumen

Los ácidos húmicos (AHs) analizados (AHCH, AHLe, AHMa, AHCe, AHTr y HAAv), son macromoléculas humificadas que se encuentran condensadas y además presentan tamaños y proporciones diferentes; éstas pueden estar compuestas con diferentes grupos funcionales tales como los ácidos carboxílicos, quinonas e hidroxilos fenólicos. El análisis de interacciones no covalentes de los AHs con cada uno de los metales (Me) como agentes coagulantes: AH-Me, y con el colorante (CR) azul brillante: AH-CR a pH 5 y 7 en soluciones acuosas, utilizando dos procesos: microfiltración y reposo-decantación. La eliminación de la MO total (AH-CR) se favoreció con sales de Al³⁺ a pH de 5 y con el proceso de microfiltración, obteniendo porcentajes de eliminación mayores al 80% y con respecto al proceso de reposo-decantación los porcentajes de eliminación disminuyeron al 50%. No obstante, los AHs se pueden utilizar como polielectrolitos, formando agregados-aglomerados, aumentando su densidad y precipitando para la descontaminación de agua por medio de procesos rápidos, económicos y eficientes.

Palabras Clave: Ácido húmico, Colorante, Azul brillante, Metales, Interacciones.

Abstract

Humic acids (HAs) analized (HACH, HALE, HAMa, HACe, HATr y HAAv) are considered humified macromolecules and that are found condensed and presented in different sizes and proportions, those can be composed of functional groups as carboxylic acids, quinones and phenolic hydroxyls. Analysis of non-covalent interactions of HAs with each of the metals (Me) as coagulating agents: HA-Me and with the dye (CR) bright blue: HA-CR at pH 5 and 7, in aqueous solutions, will be carried out using two processes: microfiltration and settling-decantation. The elimination of total OM (AH-CR) was favored with Al³⁺ salts (at pH 5) following a microfiltration process, obtaining higher elimination percentages of 80% and with respect to the elimination percentages (50%) in the resting-decantation processes. Furthermore, the HAs can be used as polyelectrolytes, forming heavy aggregates-agglomerates, which increase their density and precipitate allowing water decontamination through a rapid, economical and efficient process.

Keywords: Humic acid, Dye, Bright blue, Metals, Interactions.

1. Introducción

El suelo está constituido por materia inorgánica (minerales, arcillas, compuestos arenosos, silicatos, entre otros), materia orgánica (carbohidratos, proteínas, polisacáridos, sustancias húmicas, entre otros) y residuos orgánicos inalterados (biomasa vegetal y biomasa animal). No obstante, la materia orgánica que se encuentra en el suelo es responsable de los procesos y cambios físicos, químicos y biológicos, dando la

composición, estructura y propiedades como la capacidad de intercambio catiónico (C.I.C) (Aguilera, 2000).

La materia orgánica (MO) está constituida por compuestos que provienen de organismos que se encuentran en constante degradación y descomposición, existen dos tipos de materia orgánica: la materia orgánica del suelo (MOS) y la materia orgánica natural (MON) (David *et al.*, 2002), está última se encuentra presente en el agua superficial y subterránea de un suelo o en los vertederos de agua, la cual puede causar

*Autor para la correspondencia: nieto@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: nieto@uaeh.edu.mx (Silvia Nieto-Velázquez), ji352110@uaeh.edu.mx (Rocio Valeria Jiménez-Ruiz), elizac@uaeh.edu.mx (Elizabeth Contreras-López), lgonzales@uaeh.edu.mx (Luis Guillermo González-Olivares), ovandoa@uaeh.edu.mx (Araceli Castañeda-Ovando).

Historial del manuscrito: recibido el 30/09/2025, última versión-revisada recibida el 07/11/2025, aceptado el 09/11/2025, publicado el 12/12/2025. **DOI:** <https://doi.org/10.29057/icbi.v13iEspecial4.15792>



problemas microbiológicos en el tratamiento de la misma, al igual que ciertas reacciones químicas (atrapamiento, movilización, etc.) con los contaminantes (colorantes, metales, no metales, agroquímicos, entre otros) formando polianiones orgánicos (Watson *et al.*, 2016).

La materia orgánica del suelo (MOS), se divide en dos grupos muy importantes: la MOS biótica y la MOS abiótica. La MOS biótica está constituida por los organismos vivos, dando como resultado las reacciones que ocurren para tener la biodisponibilidad de algunos nutrientes presentes en el suelo, es decir, es la encargada de la bioactividad, mientras que la MOS abiótica está constituida por una parte polimérica compleja y estable, la cual se divide en sustancias no húmicas y sustancias húmicas (SHs) (Aguilera, 2000).

Las sustancias no húmicas son aquellos compuestos orgánicos que presentan una estructura definida, tal como proteínas, polisacáridos, carbohidratos, aminoácidos entre otros, mientras que las sustancias húmicas (SHs) son aquellas que no tienen una estructura definida, debido a que se describen como un conjunto de moléculas con grupos funcionales característicos como los grupos carboxílicos, fenólicos, quinonas y enólicos, estos grupos se unen mediante interacciones hidrofóbicas y enlaces por puentes de hidrógeno, por lo que son consideradas como un ensamblaje supramolecular de pequeñas moléculas a moléculas grandes (supramolécula), además están caracterizadas por presentar una complejidad y estabilidad (Trujillo, 2010). Estas sustancias presentan la capacidad de afectar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, como modificar el potencial de hidrógeno (pH) presentando un amortiguamiento, así como la biodisponibilidad, el transporte y la degradación de ciertos compuestos (Almendros, 2008).

Las SHs se forman mediante un proceso llamado humificación que ocurre con la transformación y descomposición de vegetales y microorganismos presentes en el suelo, se conforman por átomos de C, H, N, O y S con un porcentaje de 45-55%, 3-6%, 1-5%, 30-45% y 0-1% respectivamente (Orsetti, 2010). Debido a su composición química, las SHs pueden tener interacciones no covalentes con diferentes contaminantes (metales, colorantes, agroquímicos, etc.), que se encuentran en el suelo o en el agua, logrando estos contaminantes establecer una competencia por los sitios activos de enlace con las SHs cuando los protones de los grupos funcionales (-OH y -COOH) se disocian, formando complejos solubles e insolubles y contribuyendo a la integración de nuevos compuestos que pueden encargarse de la solubilización y movilización de dichos contaminantes e incluso de algunos nutrientes.

Las SHs se dividen en tres tipos de compuestos: huminas, ácidos fúlvicos y ácidos húmicos (Figura 1). Presentando un rol importante en el medio ambiente, debido a que afectan directamente la estructura del suelo y su disponibilidad de iones metálicos.

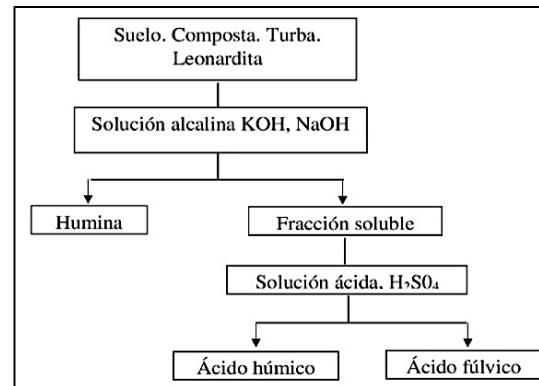


Figura 1. Clasificación de las sustancias húmicas (Rodríguez, 2015).

Las huminas (Hs) son compuestos químicos insolubles en medio acuosos en todo el intervalo de pH (0-14), y se pueden asegurar largas cadenas de ácidos, hidrocarburos, ésteres y estructuras polares, presentando un proceso de mineralización muy lento, debido a que son muy estables (Trujillo, 2010). Los ácidos fúlvicos (AFs) son solubles en todo el intervalo del pH, tienen pesos moleculares pequeños y una mayor cantidad de grupos funcionales como los ácidos carboxílicos, formando complejos metálicos más solubles, por lo que es posible que transporten iones metálicos en solución (Kloster, *et al.*, 2013). Estos presentan una coloración amarilla clara, debido a la buena solubilidad de ácidos minerales, alcoholes, entre otros (Trujillo, 2010).

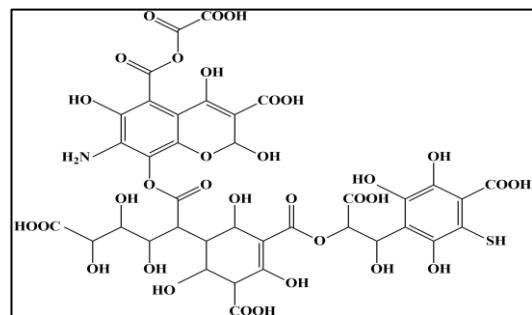


Figura 2. Estructura molecular hipotética de ácido fúlvico (Trujillo, 2010).

Los ácidos húmicos (AHs) son polímeros unidos de manera aleatoria, proporciona diferentes tamaños y pesos moleculares (50000 a 100000 Da), se encuentran presentes en aguas, suelos y sedimentos, estos ácidos pueden ser solubles e insolubles en un intervalo de pH (Canales, 2021). Se encuentran conformados por agregados de moléculas pequeñas unidas por fuerzas hidrofóbicas y puentes de hidrógeno (Orsetti, 2010).

La agregación de un AH es el resultado de las interacciones moleculares que existen entre los grupos funcionales que conforman su estructura y dependen directamente de factores ambientales, tales como el pH, la fuerza iónica, los compuestos orgánicos, partículas sólidas, por lo que son más propensos a inmovilizar y acumular los iones metálicos en la fase sólida. La agregación en ausencia de cationes está favorecida al disminuir el valor del pH, porque la protonación de los grupos funcionales característicos (-OH y -COOH) hace que la repulsión electrostática disminuya y promueva la formación de enlaces de hidrógeno intramoleculares mediante los puentes de hidrógeno (Orsetti, 2010).

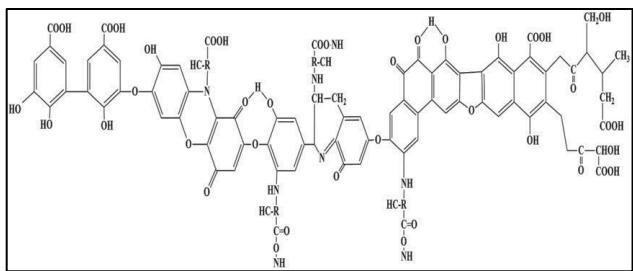


Figura 3. Estructura molecular hipotética de ácido húmico (Melo *et al.*, 2016).

Por lo tanto, los AHs pueden hacer reacciones de formación de complejos e intercambios iónicos (cationicos y aniónicos), ayudando a reducir la concentración de sales y la disminución de toxinas provenientes de los agroquímicos (Cooper y Ghanem, 2017).

Existen procesos que funcionan para la remoción de los AHs obteniendo un buen rendimiento, estos procesos son llamados procesos de coagulación y floculación en el cual se utilizan sales de aluminio y de hierro que permiten un proceso de sedimentación, uno de los principales factores que afectan el proceso de coagulación es el pH, debido a que afecta el equilibrio de las reacciones entre los grupos funcionales orgánicos y las especies hidrolizadas como metales, por lo tanto, debido a que los AHs se ven afectados por el valor de pH por medio de una desprotonación o protonación de los grupos funcionales principales, da como resultado diferentes características que afectan directamente a la reactividad y los enlaces formados entre los coagulantes metálicos (Yu, 2017).

Las interacciones entre un AH con cierto tipo de metal pueden ser del tipo electrostáticas y enlaces covalentes coordinados, que involucran la formación de complejos o grupos quelantes, es decir, interacciones no covalentes ocasionadas por la gran cantidad de grupos funcionales hidroxilo y carboxilo, que forman parte de los anillos aromáticos y cadenas alifáticas en la macromolécula del húmico (Christl y Kretzschmar, 2001; Masoodi *et al.*, 2013; Xue, 2024). En relación con lo mencionado anteriormente, se analizaron las interacciones no covalentes de los AHs con el colorante azul brillante en presencia de metales di y trivalentes como agentes coagulantes (Watson *et al.*, 2016).

El colorante azul brillante contiene en su estructura grupos funcionales característicos, como anillos aromáticos, dobles enlaces y sulfonatos. Se presenta su molécula en la siguiente figura:

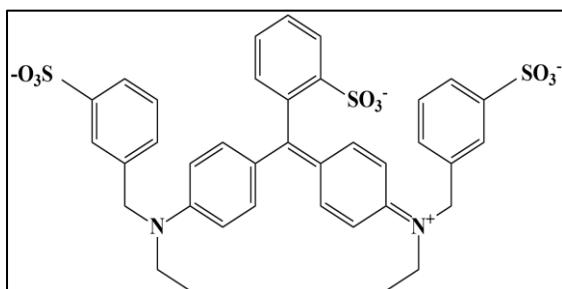


Figura 4. Estructura química del colorante azul brillante (Galindo y Venegas, 2018).

El colorante azul brillante es un colorante clasificado como de triarilmelano, su nombre por la IUPAC: a-(4-(N-etil-3-sulfonatobencilamino)-fenil)-a-(4-Netil-3-sulfonatobencilamino)-ciclohexa-(2,5-dienilideno) tolueno-sulfonato-disódico. Es un polvo soluble en agua, presenta absorción en la región visible a una longitud de onda de $\lambda = 630$ nm. Debido a su estructura éste posee características químicas como la conjugación de enlaces: $\pi - \pi^*$ mediante los anillos aromáticos, heteroátomos y cargas iónicas. El colorante puede ser afectado por factores como el pH, en el cuál se pueden presentar modificaciones estructurales y llevar a cabo interacciones con los metales y con los grupos carboxilos e hidroxilos de los ácidos húmicos (Galindo y Venegas, 2018).

El colorante azul brillante no presenta riesgos de genotoxicidad y carcinogenicidad de acuerdo con la norma, sin embargo, se encontró que a partir de estudios de toxicidad crónica presenta algunos efectos, tal como la pérdida de peso y disminución de la supervivencia en dosis altas, daño linfáticos y en los riñones. La Norma Oficial Mexicana NOM-218-SSA1-2011 hace mención que el límite máximo en el producto para consumo humano es de 100 mg/L (König, 2015). El colorante es muy utilizado productos alimenticios, tales como bebidas, congelados, polvos, jarabes y concentrados (Koval *et al.*, 2023).

No obstante, en el presente trabajo de investigación se describe una metodología para evaluar la interacción de los AHs como un posible floculante (polielectrolito) con el colorante (CR) azul brillante y en presencia de sales de metales (Me) di y trivalentes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} y Al^{3+}) como agentes coagulantes (Kloster *et al.*, 2013; Watson *et al.*, 2016; Carpio, 2017). El análisis se lleva a cabo bajo distintas condiciones experimentales, incluyendo variaciones en la concentración, el pH (5 y 7) y el tiempo de reacción (Shunan *et al.*, 2021), mediante el método espectroscópico en la región ultravioleta-visible (UV-VIS).

2. Desarrollo experimental

2.1. Obtención de los AHs.

Se analizaron seis AHs (extraídos y caracterizados en otros trabajos de investigación) para evaluar las interacciones no covalentes que presentan con el colorante (CR) azul brillante y en presencia de agentes coagulantes. Los AHs se etiquetaron de acuerdo a la muestra de suelo obtenida: AHMa (suelo de cultivo de maíz), AHTr (suelo de cultivo de Trigo), AHCe (suelo de cultivo de cebada) y AHAv (suelo de cultivo de avena), estos cuatro AHs fueron extraídos en el laboratorio mediante el método de Kononova (1982) (Licona, 2007; Sociedad Internacional de Sustancias Húmicas, 2025).

No obstante, es importante señalar que se utilizaron dos AHs comerciales de leonardita (AHLe) y CHEMAPEX (AHCH) (Schnitzer, 1991; Schulten and Hempfling, 1992).

2.2. Análisis fisicoquímico de interacción de los AHs por espectroscopía UV-VIS.

El análisis de las interacciones químicas no covalentes de los AHs formadas con el CR azul brillante en presencia de agentes coagulantes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} y Al^{3+}) a un pH de 5 y 7 se realizó utilizando un espectrofotómetro UV-VIS Perkin Elmer modelo Lambda 40, lo que permitió el análisis de los procesos fisicoquímicos que involucran la agregación, aglomeración y coagulación de la materia orgánica (MO).

La metodología inició con la obtención de la concentración adecuada y establecida del CR azul brillante para el respectivo análisis cualitativo y cuantitativo, utilizando la espectroscopía en la región visible. Para la obtención de la concentración adecuada, se llevó a cabo una curva de calibrado con estándares del CR azul brillante utilizando concentraciones de 5, 10, 15, 20 y 25 mg/L, a partir de estos estándares se realizó un barridopectral en un intervalo de longitud de onda (λ) de 200 a 700 nm. La absorbancia más representativa a utilizar, es decir, donde se presenta el pico de absorción máxima, se registra a una λ de 630 nm.

Para el análisis de los AHs y sus interacciones químicas con el colorante azul brillante (AH-CR), con metales (AH-Me) y con ambas sustancias (AH-CR-Me). Se prosiguió a la preparación de las disoluciones en las que se utilizaron 50 mg/L de AH a partir de una solución patrón de 1000 mg/L (Pacheco, 2002), posteriormente, se añadió cierto volumen con una concentración de 15 mg/L del CR azul brillante de una solución patrón de 500 mg/L y finalmente, una concentración de 3mM del agente coagulante de la sal del metal, a partir de una solución patrón de 10 mM. Las sales metálicas utilizadas corresponden a CaCl_2 , MgSO_4 , $\text{Fe}(\text{ClO}_4)_3$ y $\text{Al}(\text{ClO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (98% de pureza, marca: SIGMA-ALDRICH). A todas las disoluciones se les ajustó el pH a 5 y posteriormente a 7, dependiendo de las condiciones establecidas anteriormente.

Para los AHs de AHCH y AHMa se les realizó un proceso de microfiltración, utilizando membranas Omnipore PTFE de 0.45 μm de tamaño de poro, mientras que para los demás AHs (AHLe, AHCe, AHTr y AHAv) se llevó a cabo un proceso de reposo aproximadamente de 20 h y posteriormente se realizó una decantación. Con ambos procesos se logró la eliminación de las partículas sólidas formadas en las disoluciones, y mediante su análisis por espectroscopía UV-VIS (barridopectral de $\lambda = 200$ a 700 nm), se lograron obtener propiedades espectroscópicas tales como absorbancia (A), coeficiente de absorbividad molar (ϵ_{280}), porcentaje de aromaticidad (%A) y el peso molecular promedio (P.M.promedio).

Utilizando la ecuación de Lambert-Beer, es posible determinar el coeficiente de absorbividad molar (ϵ_{280}) con la absorbancia a $\lambda = 280$ nm y con la ecuación siguiente:

$$\text{Absorbancia} = \epsilon \cdot c \cdot I \quad (\text{ec. 1})$$

Por otra parte, las ecuaciones que están correlacionadas con la absorbividad molar, se puede obtener el porcentaje de aromaticidad y el peso molecular promedio (Chin *et al.*, 1994).

$$\text{Aromaticidad} = 0.05 \epsilon_{(280)} + 6.74 \quad (\text{ec.2})$$

$$\text{P.M.} = 3.99 \epsilon_{(280)} + 490 \quad (\text{ec.3})$$

A partir del análisis de las interacciones de la MO total: AH-CR y la determinación cualitativa y cuantitativa a una $\lambda = 630$ nm (máxima absorción del colorante), se puede obtener el porcentaje de remoción del CR, así como la concentración que quedó en disolución, además se observó el efecto del agente coagulante añadido por la agregación de las partículas por la influencia del pH de trabajo en cada análisis.

Como se mencionó anteriormente, la longitud de onda que se utilizó para el análisis de las interacciones no covalentes de los AHs fue en un intervalo de 200 a 700 nm; debido a que el CR azul brillante y los AHs utilizados presentan un punto máximo de absorción en 630 y 280 nm respectivamente, por lo que se estableció un intervalo en el que se contemplaran ambas señales de absorción.

3. Resultados y Discusión

3.1. Obtención de los AHs

Los AHs que nos proporcionaron para llevar acabo dicha investigación (AHCH, AHLe, AHMa, AHTr, AHCe y AHAv), fueron estudiados y analizados en trabajos de investigación previos (Nieto, 2017; Nieto 2019). No obstante, los AHs presentaron ser compuestos aromáticos en su estructura y con grupos funcionales como ácidos carboxílicos e hidroxilos fenólicos, además se establece que son poliácidos.

3.2. Evaluación de los AHs, AH-Me, AH-CR y AH-CR-Me por espectroscopía UV-VIS.

La evaluación del efecto de agregación-aglomeración, coagulación, precipitación y la cuantificación de la MO total (AH-CR) en solución acuosa mediante la presencia de los metales como agentes coagulantes, así como conocer la concentración del CR en la disolución, concentración y porcentaje de eliminación, posterior al añadir la sal del metal.

Se inició por obtener los espectros de los estándares del CR con las concentraciones de 5, 10, 15, 20 y 25 mg/L, realizando barridos de 200 a 700 nm de longitud de onda por espectroscopía UV-VIS como se presentan en la siguiente figura:

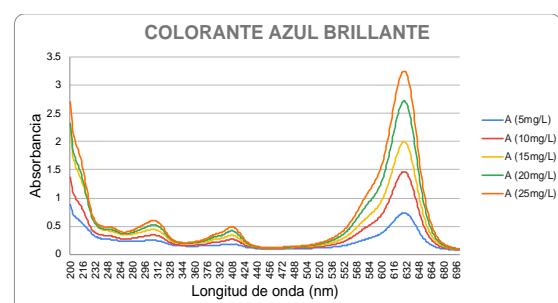


Figura 5. Espectros del colorante azul brillante por espectroscopía UV-VIS.

Los espectros del CR revelan la concentración adecuada a utilizar y en los subsecuentes experimentos se les agregó una concentración de 15 mg/L, presentando una señal de absorción máxima a $\lambda = 630$ nm. Para la cuantificación del CR en solución acuosa se obtiene una línea de calibrado. Respecto a la información proporcionada en la calibración del colorante a partir de los estándares se presentan los datos en la siguiente tabla con una correlación y regresión lineal aceptable.

Tabla 1. Parámetros de regresión de la línea de calibrado.

Parámetros Estadísticos	Línea de calibrado, CR
Número de estándares, n	5
Regresión lineal, R^2	0.9979
Coeficiente de correlación, r	0.9989
Ordenada en el origen, b	0.1257
Pendiente, m	0.1252

Mediante las concentraciones adecuadas: para el CR de 15mg/L, AH de 50 mg/L y del Me de 3 mM, se prepararon 4 tipos de disoluciones para el análisis. A la primera solución se le agregaron solo los 250 μ L de AH, en la segunda solución se le agregaron los 250 μ L de AH y 150 μ L de CR azul brillante (AH-CR), en la tercera solución se le agregó 250 μ L de AH y 1500 μ L del agente coagulante (AH-Me) y en la cuarta solución los 250 μ L de AH, 150 μ L de CR azul brillante y 1500 μ L del agente coagulante (AH-CR-Me).

Cada disolución acuosa se ajustó a un pH de 5 o 7 según corresponda, y se procedió a obtener los espectros de los AHs (AH, AH-Me, AH-CR y AH-CR-Me) (Figuras: 6 y 7). Se realizaron barridos de $\lambda = 200$ a 700 nm, analizando la absorción máxima específica a longitudes de onda de $\lambda = 280$ y 630 nm para la macromolécula del húmico y el colorante azul brillante.

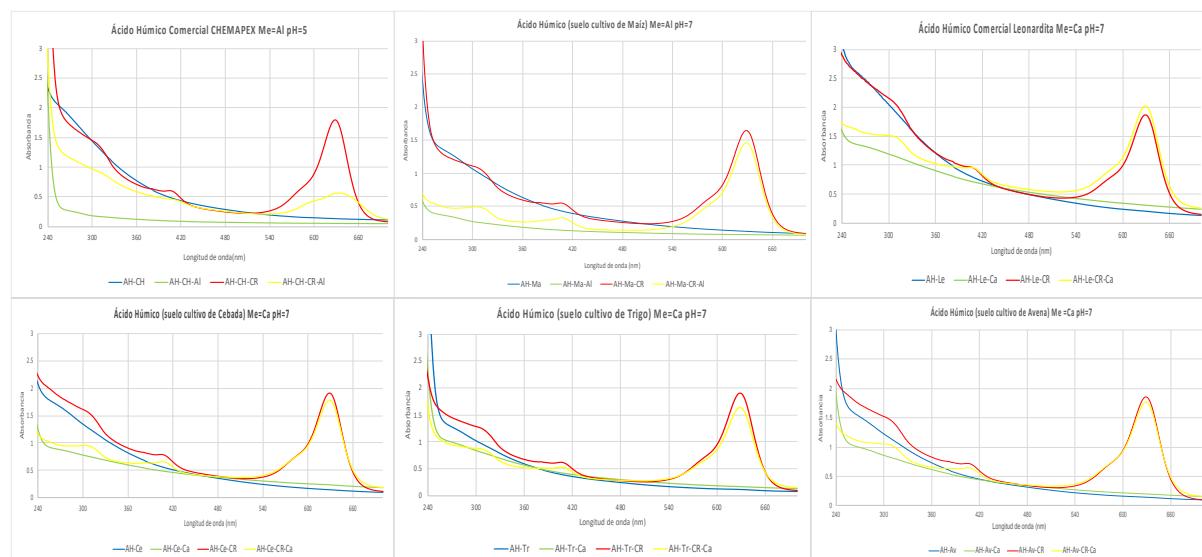


Figura 6: Espectros de máxima absorción ($\lambda = 280$ nm) de los AHs y AH-Me por espectroscopia UV-VIS (Elaboración propia).

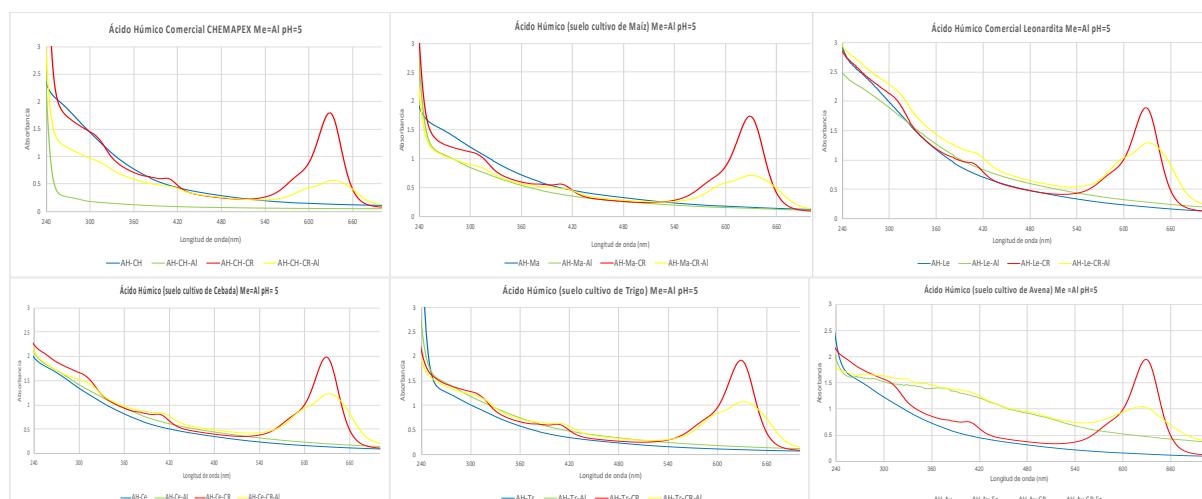


Figura 7. Espectros de máxima absorción ($\lambda = 630$ nm) de los AH-CR y AH-CR-Me por espectroscopia UV-VIS (Elaboración propia).

Con los correspondientes espectros de absorción como se presentan en las figuras anteriores (Figuras: 6 y 7), se observa una misma tendencia o comportamiento, sin embargo, al obtener los parámetros espectroscópicos mediante la absorbancia y aplicando las ecuaciones: 1, 2 y 3, se analiza cada dato y se presentan los AHs con el CR de mayor interacción con el agente coagulante (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} y Al^{3+}) correspondiente a cada pH de 5 o 7 (Tabla 2 y Tabla 3).

Se obtuvieron los parámetros espectroscópicos de los AHs antes y después de agregar el agente coagulante (AH y AH-Me) donde se logró obtener datos de absorbividad molar, porcentaje de aromaticidad y P.M. promedio. Dichos datos indican una disminución en el peso molecular en presencia del agente coagulante en comparación cuando solo se tiene al AH sin la presencia del metal. En el caso del AHCH y AHCH-Al a pH 5 se obtuvieron valores de P.M. promedio de 5499.98 y 1406.70, lo que indica que al agregar la sal metálica de aluminio se forman los aglomerados que precipitan al aumentar la densidad. A partir de los datos obtenidos se observa que al añadir al AH el agente coagulante (Me), en este caso el Al^{3+} a pH de 5 y 7, para los AHs de AHCH y AHMa, en los cuales se realizó el proceso de microfiltración se obtuvo un porcentaje de remoción del 74 %. Mientras que en el proceso de los demás AHs (AHTr, AHAv, AHCe y AHLe) por reposo durante 20 h y decantación se logró un porcentaje de remoción de un 30 %. Todos se pudieron eliminar con el agente coagulante de Ca^{2+} a un pH de 7, donde se observó una gran estabilidad del precipitado: AH-Ca. En este mismo proceso de reposo-decantación con la sal de Al^{3+} en el tiempo de reposo se observó un aumento del pH a 7 sufriendo el precipitado un fenómeno de peptización.

Tabla 2. Parámetros espectroscópicos de los AH-CR y AH-CR-Me en presencia del agente coagulante.

AHs pH 5 y 7	Absorvidad molar (ε)		% Aromaticidad	P.M. promedio
AHCH-CR	1131.72 (1.70)	63.33 (1.52)	5005.55 (1.53)	
AHCH-CR-Al (pH 5)	708.20 (13)	42.15 (11)	3315.72 (11)	
AHMa-CR	692.58 (0.33)	41.37 (0.28)	3253.40 (0.28)	
AHMa-CR-Al (pH 5)	427.81 (50)	28.13 (38)	2196.97 (39)	
AHLe-CR	1483.92 (0.41)	80.94 (0.38)	6410.83 (0.38)	
AHLe-CR-Al (pH 5)	1398.49 (0.59)	76.66 (0.54)	6069.99 (0.54)	
AHCe-CR	1066.18 (2.15)	60.05 (1.91)	4744.05 (1.93)	
AHCe-CR-Al (pH 5)	906.91 (10)	52.09 (9.46)	4108.58 (9.57)	
AHTr-CR	802.73 (0.68)	46.88 (0.58)	3692.89 (0.59)	
AHTr-CR-Al (pH 5)	773.62 (0.45)	45.42 (0.38)	3576.75 (0.38)	
AHAv-CR	1273.27 (9.41)	70.40 (8.51)	5570.37 (8.58)	
AHAv-CR-Fe (pH 5)	1197.56 (1.94)	66.62 (1.74)	5268.26 (1.76)	

(* % DER entre paréntesis para un total de dos análisis)

En la tabla 2 se tienen los datos de cada AH con el CR (AH-CR) y con la presencia del agente coagulante (AH-CR-Me), en donde el AHCH-CR presenta un 34% de eliminación y el AHMa-CR un 32% de eliminación, ambos AHs con Al^{3+} a pH de 5 y llevando a cabo el proceso de microfiltración. No obstante, para los demás AHs (AHLeCR, AHCe-CR, AHTr-CR y AHAv-CR) los porcentajes presentan un promedio muy bajo de eliminación de MO total (AH-CR), aproximadamente el 13% con el proceso de reposo y decantación en presencia de

Al^{3+} y Fe^{3+} a pH de 5. Es importante considerar que los parámetros espectroscópicos de ambas tablas 2 y 3 se obtienen a una $\lambda = 280$ nm en donde se presenta la absorción máxima para los AHs y no del colorante.

Respecto a los valores obtenidos de la tabla siguiente, en donde se presentan los AHs con el metal (agente coagulante) y el pH adecuado para la eliminación del CR, mostrando valores muy cercanos entre ellos.

Tabla 3. Concentraciones (mg/L) y porcentaje de eliminación del Colorante Azul Brillante.

AH-CR-Metal	mg/L de CR Solución	mg/L de CR Precipitado	% CR Eliminado
AHCH-CR-Al (pH 5)	3.01	11.99	79.95
AHMa-CR-Al (pH 5)	4.17	10.83	72.23
AHLe-CR-Al (pH 5)	7.02	7.98	53.21
AHCe-CR-Al (pH 5)	7.08	7.92	52.82
AHTr-CR-Al (pH 5)	6.39	8.61	57.40
AHAv-CR-Fe (pH 5)	3.42	11.58	77.22

Los AHs con la sal de Al^{3+} o Fe^{3+} a pH de 5 para la eliminación del CR, mostrando las cantidades en porcentaje muy parecidos entre ellos (Tabla 3), sin embargo, el AHCH comercial y el AHAv extraído en el laboratorio presentan una mayor interacción química no covalente con las sales de Al^{3+} al mismo pH, siguiendo el orden con respecto al AH: AHMa-CR-Al > AHTr-CR-Al > AHLe-CR-Al > AHCe-CR-Al, debido a la disminución de los valores espectroscópicos sobre todo en el P.M. promedio y a una $\lambda = 630$ nm, lo cual indica la agregación-aglomeración, coagulación, precipitación y eliminación de la MO total (AH-CR).

4. Conclusiones

Los AHs son macromoléculas humificadas y condensadas en diferente proporción, que depende en gran medida de la fuente de obtención y del método de extracción, no obstante, los coloides formados de los AHs comportándose como micelas mixtas en solución acuosa, llevan a cabo diferentes interacciones no covalentes con el colorante azul brillante, que se inactiva totalmente al entrar en contacto con la macromolécula.

El comportamiento de los AHs al interaccionar con cada uno de los metales como agentes coagulantes: AH-Me, revela la posible movilidad o disponibilidad de los cationes tanto en el suelo o en agua, cumpliendo una función con una mayor interacción y eliminación con sales de Al^{3+} a pH de 5 en el proceso de microfiltración pero al cambiar el proceso con reposo y decantación se ve favorecido con sales de Ca^{2+} a pH de 7. Con la presencia del CR en soluciones acuosas con ambos procesos se favoreció con sales de Al^{3+} a pH de 5, sin embargo, hay que resaltar que con el proceso de microfiltración se obtienen porcentajes elevados de eliminación de MO y con el

procesos de reposo y decantación se obtienen adecuados porcentajes de eliminación (AH-CR). Es importante mencionar y resaltar a los AHs como polielectrolitos, siendo una perspectiva por la gran ventaja que presentan en comparación con la poliacrilamida. El AH forma agregados o aglomerados aumentando su densidad y precipitando, llevando consigo muchos características y parámetros fisicoquímicos muy relevantes que ayudan a la descontaminación de agua por medio de procesos rápidos, económicos y eficientes.

Agradecimientos

Silvia Nieto Velázquez agradece el financiamiento PRODEP, convenio no. 511-6/18-8644.

5. Referencias

- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), (actualizado en julio 24, 2024). Recuperado 20 de mayo de 2025:
<https://espanol.epa.gov>.
- Aguilera, S.S. (2000). Importancia de la protección de la materia orgánica en suelos. Recuperado el 26 de mayo de 2025 de:
<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/121065>.
- Almendros, G. (2008). Revisión analítica de sustancias húmicas en suelos y compost. soilACE 239-255. Recuperado el 2 de mayo de 2018 de:
https://www.soilace.com/pdf/pon2008/d26/Cas/04_GAlmendros.pdf.
- Alza-Camacho, W. R., García-Colmenares, J. M., Chaparro-Acuña, S. P. (2016). Determinación voltamétrica de paraquat y glifosato en aguas superficiales. Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 17(3), 331-345. https://doi.org/10.21930/rcta.vol17_num3_art:510.
- Artinger, R. G., Buckau, S., Geyer, P., Fritz, M., Wolf, J. I., Kim. (2000). Characterization of groundwater humic substances: influence of sedimentary organic carbon. Applied Geochemistry 15, 97-116.
- Barrenechea, M. A. (2004). Coagulación de Materia Orgánica (Capítulo 4). Lima. Recuperado el 13 de junio de 2022 de:
<http://www.ingenieroambiental.com/4014/cuatro.pdf>
- Camargo, V. M., Cruz, T. L. E. (1999). Sustancias Húmicas en Aguas Para Abastecimiento. Revista Ingeniería e Investigación 44, 63-72.
- Caracterización de sustancias húmica (Capítulo 3), 44-63. Recuperado 14/05/2021. Valores reportados en:
<http://www.ihss.gatech.edu/elements.html>.
- Carpenter, L. M., Beresford, S. A. (1986). Cancer mortality and type of water source: findings from a study in the U.K. International Journal of Epidemiology, 15, 312-320.
- Carpio, D. K. (2017). Análisis fisicoquímico de ácidos húmicos y evaluación cinética de su agregación con iones Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} . Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México.
- Cerisola, C. (2015). La Materia Orgánica Edáfica. Manejo y Conservación de Suelos. Departamento de Ambiente y Recursos Naturales. UNLP. p. 19. Recuperado el 19 de octubre de 2023 de:
<https://www.intagri.com/articulos/suelos/humus-huminas-acidos-humicos-y-acidos-fulvicos>.
- Chin, Y. P., Alken, G., Loughlin, E. O. (1994). Molecular weight, polydispersity, and spectroscopic properties of aquatic humic substances. Environ. Sci. Technol 28, 1853 – 1858.
- Christl, I., y Kretzschmar, R. (2001). Relación de la unión iónica de los ácidos fulvicos y húmicos con la composición química y el tamaño molecular. 1. Unión de protones. Environmental science & technology, 35 (12), 2505-2511.
- Cooper, L., Abi-Ghanem, R. (2017). El valor de las sustancias húmicas en el ciclo de vida del carbón de los cultivos: Ácidos húmicos, ácidos fulvicos, y más. Huma Agro, 1-8.
- Davies, G., Ghabbour, E.A. & Steelink, C. (2001). Humic acids: Marvelous products of soil chemistry. Chem Educ. 78:1609-1614.
- Davis, C. J., Eschenazi, E., Papadopoulos, K. D. (2002). Combined effects of Ca^{2+} and humic acid on colloid transport through porous media. Colloid and Polymer Science, 280, 52-58.
- Díaz, N. A., Ruiz, J. A. B., Reyes, E. F., Cejudo, A. G., Novo, J. J., Peinado, J. P., Finana, I. T. (2010). Espectrofometría: Espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas. Universidad de Córdoba, 1-8.
- Edzwald, J.K. (1993). Coagulation in Drinking Water Treatment: Particles, Organics and Coagulants. Water Science Technology, 27 (11), 21-35.
- Fuyou D., Lingshun S., Zen Q., Wei T., Cheng Z., Guihua R., Jianping L. (2019). Un sensor fluorescente “on-off-on” altamente sensible y selectivo basado en puntos cuánticos de grafeno dopados con nitrógeno para la detección de Hg^{2+} y paraquat. (2019). ELSEVIER, 288, 96-103. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.02.109>.
- Gomes-de Melo, B. A., Lopes-Motta, F., Andrade-Santana, M. H. (2016). Humic acids: Structural properties and multiple functionalities for novel technological developments. ScienceDirect 62, 967-974.
- He, Z., Traina, S. J., Weavers, L. (2007). Sonolytic desorption of mercury from aluminum oxide: effects of pH, chloride and organic matter. Environ. Sci. Technol 41, 779-784.
- Humintech GmbH. (19 de abril 2023). Tratamiento de aguas residuales. <https://www.humintech.com/es/industria/aplicaciones/tratamiento-de-aguas-residuales>.
- JISA. (2016). Materia orgánica y sustancias húmicas. 26/12/2017, de JISA S.A. Sitio web: <http://www.acidoshumicos.com/blog/materia-organica-y-sustancias-humicas/>
- Kloster, N., Brigante, M., Zanini, G., Avena, M., (2013). Aggregation kinetics of humic acids in the presence of calcium ions. Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects 427, 76 - 82.
- Kononova, M. M. (1982). Materia orgánica del suelo. 1^a Ed. Oikos-tau, Barcelona, España, 63-105.
- Koval, M., Schug, W. J., Isakson, B. E. (2023). Pharmacology of pannexin channels. Current opinion in pharmacology, 69, 102359.
- Licona, S. T. J. (2007). Extracción y análisis fisicoquímico de ácidos húmicos y su interacción con $Cu^{(II)}$ y $Pb^{(II)}$. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México.
- López-Cervantes, R., Gallegos-del Tejo, A., Peña-Cervantes, E., Reyes-López, A., Castro-Franco, R., Chávez-González, J.F.J. (2006). Substancias húmicas de origen diverso en algunas propiedades físicas de un suelo franco-arcillo-limoso. Terra Latinoamericana, 24(3), 303-309. Recuperado de:
<https://www.redalyc.org/pdf/573/57311103001.pdf>
- Macias, M. E. (2013). Ultrafiltración: una técnica en la determinación de contaminantes ambientales. [Tesis para obtener el título de Ingeniero Químico, Universidad Nacional Autónoma de México]. https://www.zaragoza.unam.mx/wp-content/Portal2015/Licenciaturas/1q/tesis/tesis_macias_felipe.pdf.
- Masciandaro, G., Ceccanti, B. (1999). Assessing soil quality in different agroecosystems through biochemical and chemico-structural properties of humic substances. Soil Till. Res. 1417: 1-9.
- Masoodi, H. R., Bagheri, S., Mohammadi, M., Zakarianezhad, M., Makiabadi, B. (2013). The influence of cation-π and anion-π interactions on some NMR data of s-triazine... HF hydrogen bonding: A theoretical study. Chemical Physics Letters, 588, 31-36.
- Melo, B. A. G., Motta, F. L., Santana, M. H. A. (2016). Humic acids: Structural properties and multiple functionalities for novel technological developments. Materials Science and Engineering: C, 62, 967-974.
- Nieto-Velázquez, S., Pacheco-Hernández, L., Galán-Vidal, C. A., Páez-Hernández, M. E. (2011). Estudio de las Interacciones Ácido Húmico-Metales Pesados y Determinación de sus Constantes de Estabilidad por Electroforesis Capilar. Información Tecnológica, 22(3), 45-54. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642011000300007>.
- Nieto, V. S. (2017). Evaluación del efecto de las cinéticas de agregación de los ácidos húmicos (AHs) en presencia de Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} . Revista Tendencias en Docencia e Investigación en Química 3, 154 – 162.
- Nieto-Velázquez, S., Villagrán-Manilla, A., Ibarra-Coria, E. D. (2019). Evaluación y análisis de cinéticas de agregación de los ácidos húmicos en presencia de Al^{3+} por espectroscopí UV-VIS. Tópicos de Investigación en Ciencias de la Tierra y Materiales, 6, 72-79.
- Orsetti, S. (2010). Estudio de la heterogeneidad de ácidos húmicos en el enlace de cationes. [Tesis de doctorado, Universidad de Buenos Aires]. https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/tesis/tesis_n4726_Orsett_i.pdf.
- Pacheco, M. L. (2002). Capillary Electrophoresis and MALDI-TOF mass spectrometry of humic acids. Tesis de Doctorado, Departamento de Química Analítica, Facultad de Ciencias, Universidad de Masaryk, República Checa.
- Pengkang, J., Jina, S., Xiaochang, C. W., Xin., J. (2018). Two-dimensional correlation spectroscopic analysis on the interaction between humic acids and aluminum coagulant. Journal of Environmental Sciences, 64, 181-189.

- Ritchie J. D., Perdue E. M. (2003). Proton-binding study of standard and reference fulvic acids, humic acids, and natural organic matter. *Geochim. Cosmochim.* 67, 85-96.
- Rodríguez, F. (2015) Sustancias Húmicas: Origen, Caracterización y Uso En La Agricultura Extraído de **INTAGRI S.C.** Recuperado el 26 de mayo de 2025 de: <https://www.intagri.com>.
- Schnitzer, M. (1991). Soil organic matter. *Soil Sci.* 151, 41 – 58.
- Schulten, H. R., Hempfling, R. (1992). Influence of agricultural and management on humus composition and dynamics: Classical and modern analytical techniques. *Plant Soil* 142, 259 – 271.
- Shunan, D., Wangwei, C., Jihong, X., Liting, S., Weimu, W., Hui, L. (2021). Aggregation kinetics of fragmental PET nanoplastics in aqueous environment: complex roles of electrolytes, pH and humic acid. *Environmental Pollution* 268.
- Sociedad Internacional de Sustancias Húmicas (20 de mayo de 2025). What are Humic Substances?. <https://humic-substances.org>.
- Souza, F., Roca, S. (2018). Extraction and characterization of humic acid from coal for the application as dispersant of ceramic powders. *Journal Of Materials Research and Technology*, 7(3), 254-260. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2017.08.008>.
- Stern, B., Tarhan, M. (2023). Waste water treatment report, German technology Humic Substances Based Products, Humine Tec, recuperado el 20 de mayo de 2025 de: <https://www.humintech.com/es/industria/aplicaciones/tratamiento-de-aguas-residuales>
- Stevenson, F. J. (1992). *Humus Chemistry*. 2^a Ed. Wiley/Inter-science, New York. p. 213-217.
- Troconis, A. (2010). Tratamiento de aguas residuales. Recuperado 20/05/2025 https://www.belzona.com/es/solution_maps/wastewater/money_map.pdf
- Vallejo-Vargas, O. I., Beltrán, L., Franco, P., Montoya Navarrete, C. H., Alzate Rodríguez, E. J., Reyes, H. (2015). Determinación de trihalometanos en aguas de consumo humano por microextracción en fase sólida- cromatografía de gases en Pereira, Colombia. *Revista Colombiana de Química*, 44(1), 23–29. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v44n1.54041>
- Veobides-Amador, H., Guridi-Izquierdo, F., Vázquez-Padrón, V. (2018). Las sustancias húmicas como bioestimulantes de plantas bajo condiciones de estrés ambiental. *Cultivos Tropicales*, 39(4), 102-109. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S02585936201800400015&lng=es&tlng=es.
- Viales López, G. (2014). Intoxicación por Paraquat. *Medicina Legal de Costa Rica*, 31(2), 88-94. ISSN 2215-5287.
- Watson, M. A., Tubić, A., Agbaba, J., Nikić, J., Maletić, S., Molnar, Jazić, J., Dalmacija, B., (2016). Response surface methodology investigation into the interactions between arsenic and humic acid in water during the coagulation process. *J. Hazardous Materials* 312, 150 -158.
- Wolff, M., Ovalle, C. (2016). El Secuestro de Carbono en los Suelos Importancia de la Materia Orgánica del Suelo (MOS). INIA. Recuperado 10 de diciembre de 2024, de <https://biblioteca.inia.cl/server/api/core/bitstreams/cc10a6cd-285a-499a-b052-46b13ccbca1/content>.
- Xue, S., Hu, Y., Wan, K., & Miao, Z. (2024). Exploring Humic Acid as an Efficient and Selective Adsorbent for Lead Removal in Multi-Metal Coexistence Systems: A Review. *Separations*, 11(3), 80.
- Yu, W. Z., Gregory, J., & Campos, L. (2010). Breakage and regrowth of Al-humic flocs-effect of additional coagulant dosage. *Environmental science & technology*, 44(16), 6371-6376.