



S.E.P.

S.E.S.

Tec.N.M.

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA

“EFECTO MICROBICIDA DE UNA ZEOLITA ACONDICIONADA CON PLATA EN UN SISTEMA EN COLUMNA SOBRE UN CONSORCIO DE MICROORGANISMOS INCLUYENDO LA RECUPERACIÓN Y REUSO DE LA PLATA RESIDUAL”

TÉSIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES

PRESENTA:

VÍCTOR ENRIQUE GONZAGA GALEANA

No. DE CONTROL: 0128D1170

DIRECTOR DE TESIS:

DR. ISAÍAS DE LA ROSA GÓMEZ

CO-DIRECTORA DE TESIS:

DRA. MARIA TERESA OLGUÍN GUTIÉRREZ



Instituto Tecnológico de Toluca

Metepec, Méx., 26/noviembre/2018

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN

DEPI-395-1244/2018

DR. JOSÉ LUIS GARCÍA RIVAS
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
PRESENTE.

Por este medio comunicamos a usted que la Comisión Revisora designada para analizar la tesis denominada "Efecto microbicida de una zeolita acondicionada con plata en un sistema en columna sobre un consorcio de microorganismos incluyendo la recuperación de la plata residual", que como parte de los requisitos para obtener el grado académico de Doctor en Ciencias Ambientales presenta el C. VÍCTOR ENRIQUE GONZAGA GALEANA, con número de control 0128D1170 para sustentar el acto de Recepción Profesional, ha dictaminado que dicho trabajo reúne las características de contenido y calidad necesario para proceder a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE

DR. ISAÍAS DE LA ROSA GÓMEZ
DIRECTOR DE TESIS

DRA. MARÍA TERESA OLGÚN GUTIÉRREZ
CO DIRECTORA DE TESIS

DRA. MARÍA DEL CARMEN CARREÑO DE LEÓN
REVISORA

DRA. CLAUDIA ROSARIO MURO URISTA
REVISORA

DRA. CRISTINA BURROLA AGUILAR
REVISORA

DRA. MARÍA DEL CONSUELO HERNÁNDEZ BERRIEL
REVISORA



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL
DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN

JLGR/magj

Av. Tecnológico S/N, Col. Agrícola Bellavista, C.P. 52149,
Metepec, Estado de México. Tels. Dirección (01722) 208 7205. Subd. Académica 208 7207,
Subd. de Planeación 208 7206, Subd. Administrativa 208 7208, Conmut. 208 72 00
e-mail: info@toluca.tecnm.mx, www.toluca.tecnm.mx



Metepec, Edo. de México, **27/noviembre/2018**

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN

DEPI-395-1256/2018.

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS

**C. VÍCTOR ENRIQUE GONZAGA GALEANA
CANDIDATO AL GRADO DE DOCTOR
EN CIENCIAS AMBIENTALES
P R E S E N T E.**

De acuerdo con el Reglamento de Titulación del Sistema Nacional de Educación Superior Tecnológica de la Subsecretaría de Educación Superior de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora realizó con respecto a su Trabajo de Tesis titulado **"EFECTO MICROBICIDA DE UNA ZEOLITA ACONDICIONADA CON PLATA EN UN SISTEMA EN COLUMNA SOBRE UN CONSORCIO DE MICROORGANISMOS INCLUYENDO LA RECUPERACIÓN DE LA PLATA RESIDUAL"**, la División de Estudios de Posgrado e Investigación concede autorización para que proceda a la impresión del mismo.

Sin más por el momento, quedo de usted.

ATENTAMENTE

Educación. Integridad y Fiebre



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN

JLGR/magj



Av. Tecnológico s/n, Col. Agrícola Bellavista, C.P. 52149, Metepec, Estado de México.
Tels. Dirección (01722) 208 7205, Subd. Académica 208 7207,
Subd. de Planeación 208 7206, Subd. Administrativa 208 7208, Conmutador: 208 72 00
e-mail: info@toluca.tecnm.mx, www.toluca.tecnm.mx



AGRADECIMIENTOS

Al **Instituto Tecnológico de Toluca** por las instalaciones brindadas para la realización de esta investigación.

Al **Laboratorio de Investigación en Ingeniería Ambiental** y al personal que labora en el por el apoyo recibido para llevar a cabo la presente investigación.

Al **Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares** por las instalaciones brindadas para el desarrollo de esta investigación.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por la beca otorgada para la realización de los estudios de posgrado.

Al **proyecto número 254665 del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por los fondos destinados para la investigación.

Al **Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECyT)** por los apoyos económicos para asistir al congreso y la impresión de tesis.

Al **Dr. Isaías de la Rosa Gómez** por todas sus aportaciones científicas para el desarrollo de esta investigación, así como sus sugerencias y observaciones, siempre inteligentes y oportunas, deseo reconocer todos los conocimientos y valores que ha logrado transmitirme en las innumerables horas que hemos pasado juntos trabajando en los últimos cuatro años, siempre le estaré agradecido y en deuda con él.

A la **Dra. María Teresa Olgún Gutiérrez** por su constante y paciente seguimiento compartiendo su tiempo de manera generosa, por sus apreciados y relevantes enseñanzas, aportes, críticas, comentarios y sugerencias durante el desarrollo del presente trabajo.

A la **Dra. María del Carmen Carreño De León**, la **Dra. Claudia Rosario Muro Urista** y la **Dra. Cristina Burrola Aguilar** por el aporte de sus conocimientos y experiencia que sirvieron de guía para llevar a cabo la presente investigación.

A la **Q.F.B. Ma. De Jesús González Hernández**, a la **I.Q. Martha Manjarrez Olvera** y la **Q.F.B. Maribel Verónica Albiter López** por el apoyo profesional y humano brindado a esta investigación.

A mis compañeros de laboratorio, compañeros de servicio social y residencia por la solidaridad que me mostraron durante el posgrado y especialmente al Dr. Luis Gerardo

Rossainz Castro por brindarme su desinteresado apoyo, colaboración y sobre todo por su amistad.

*“Cuando te encuentres a ti mismo al lado de la mayoría,
es tiempo de parar y reflexionar”*

Mark Twain

RESUMEN

Los microorganismos patógenos que se encuentra en el agua son causa de varias enfermedades en el ser humano y es esencial encontrar alternativas para la desinfección del agua, especialmente en regiones que no cuentan con sistemas de distribución de agua purificada. Las zeolitas naturales modificadas con metales han sido investigadas para este propósito. Sin embargo, pocos trabajos han considerados un consorcio de microorganismos y sistemas de columnas empaquetadas. Por lo tanto, el efecto microbicida de la zeolita rica en clinoptilolite-heulandita modificada con plata (ZGAg) sobre un microorganismo específico o consorcio de microorganismos por *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* y *Candida albicans* en un sistema continuo se investigaron considerando las características de cada microorganismo, la complejidad de los sistemas de microorganismos (especies individuales o consorcio) y la altura del lecho de zeolita natural (masa del agente microbicida). La liberación de plata de la ZGAg después de los procesos de desinfección en el sistema continuo también se consideró tanto en su recuperación como en su reuso para este trabajo. La zeolita natural del tamaño de partícula de malla 30 de Guerrero (México) se modificó con plata usando una solución de AgNO_3 . Las zeolitas naturales no modificadas y modificadas con plata se caracterizaron por microscopía electrónica de barrido, espectroscopia de dispersión de energía de rayos X y difracción de rayos X. Se adquirieron cultivos microbianos de la American Type Culture Collection para los experimentos de desinfección. Se analizaron curvas de ruptura de desinfección obtenidas para obtener diferentes parámetros (entre ellos, punto de quiebre, volumen de agua desinfectada y cinética del proceso de desinfección). Se encontró que el volumen de agua desinfectada era más alto para *E. coli* que para *S. aureus* y *C. albicans* para 300 y 400 mg de ZGAg y el volumen variaba dependiendo de la masa del material zeolítico microbicida. La resistencia del microorganismo al material zeolítico microbicida cambió cuando los microorganismos están en un consorcio. Los datos experimentales de desinfección se adaptaron bien a un modelo logístico no lineal y la masa de ZGAg y el tipo de microorganismo afectan los parámetros t_{50} y k .

ABSTRACT

The pathogenic microorganisms found in water are the cause of several diseases in humans and it is essential to find alternatives for water disinfection, especially in regions that do not have purified water distribution systems. The natural zeolites modified with metals have been investigated for this purpose. However, few works have been a consortium of microorganisms and packed column systems. Therefore, the microbicidal effect of silver-modified clinoptilolite-heulandite-rich zeolite (ZGAg) on a specific microorganism and consortium of microorganisms by *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* and *Candida albicans* in an uninvestigated system. The complexity of the microorganism systems and the height of the natural zeolite bed (mass of the microbicidal agent). The release of the silver from the ZGAg. After the disinfection processes in the continuous system. The natural zeolite of the size of the 30 mesh particle from Guerrero (Mexico) was modified with silver using an AgNO_3 solution. Natural unmodified and modified silver zeolites are characterized by scanning electron microscopy, X-ray energy scattering spectroscopy and X-ray diffraction. Microbials were purchased from the American Type Culture Collection for disinfection experiments. The rupture curves of the disinfection will be analyzed to obtain different parameters (among them, breaking point, volume of disinfected water and kinetics of the disinfection process). It was found that the volume of disinfected water was higher for *E. coli* than for *S. aureus* and *C. albicans* for 300 and 400 mg of ZGA and the volume varied in the mass of the microbicidal zeolitic material. The resistance of the microorganism to the microbicidal zeolitic material when the microorganisms are in a consortium. The experimental disinfection data are well adapted to a non-linear logistic model and the mass of ZGAg and the type of microorganism in parameters t_{50} and k .

CONTENIDO

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
INTRODUCCIÓN	xixi
1 FUNDAMENTOS	1
1.1 El agua	1
1.1.1 Contaminación del agua	3
1.1.2 Contaminación biológica del agua	5
1.1.2.1 Microorganismos	5
1.1.2.2 Escherichia coli	6
1.1.2.3 Staphylococcus aureus	7
1.1.2.4 Candida albicans	8
1.1.2.5 Consorcio microbiano	10
1.1.3 Tratamiento del agua residual municipal	11
1.2 Metodologías de desinfección de agua	13
1.3 Zeolitas	15
1.3.1 Propiedades de las zeolitas	16
1.3.2 Clinoptilolita	17
1.3.3 Intercambio iónico y selectividad de las zeolitas	18
1.4 Zeolita acondicionada con plata	19
1.4.1 Efecto microbicida de la plata	20
1.4.2 Propiedades de la plata	21
1.4.3 Niveles ambientales	22
1.5 Desinfección con zeolita acondicionada con plata	23

1.6 Modelado de curvas de ruptura usando ecuaciones no lineales	25
2 METODOLOGÍA	27
2.1 Molienda y tamizado de la zeolita natural	29
2.2 Acondicionamiento de la zeolita natural	29
2.2.1 Con sodio	29
2.2.2 Con plata	30
2.3 Caracterización de la zeolita natural	30
2.3.1 Difracción de rayos-X	30
2.3.2. Microscopía electrónica de barrido	31
2.4 Preparación de la suspensión de microorganismos	31
2.5 Evaluación del efecto microbicida	32
2.5.1 Sobre <i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i> y <i>C. albicans</i> en suspensión acuosa	32
2.5.2 Sobre un consorcio microbiano en suspensión acuosa	32
2.6 Cuantificación de microorganismos y de plata	33
2.7 Recuperación de la plata residual	33
2.8 Determinación de la plata recuperada por la ZGNa	34
2.9 Evaluación del efecto microbicida de la zeolita acondicionada con la plata recuperada sobre células de <i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i> y <i>C. albicans</i> en suspensión acuosa	34
2.10 Modelado de curvas de ruptura usando ecuaciones no lineales	34
3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	355

3.1 Caracterización de la zeolita	35
3.1.1 Difracción de rayos-X	35
3.1.2 Microscopía electrónica de barrido	38
3.2 Evaluación del efecto microbicida de la zeolita acondicionada con Na y Ag sobre un consorcio de <i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i> y <i>C. albicans</i> en suspensión acuosa	42
3.2.1 Para la ZGNa	42
3.2.2 Para el sistema: 300 mg de ZGAg y 10 mL/min	43
3.2.3 Sistema: 400 mg de ZGAg y 10 mL/min	50
3.2.4 Sistema: 300 mg de ZGAg y 15 mL/min	59
3.3 Recuperación de la plata residual utilizando zeolita Guerrero acondicionada con sodio	64
3.3.1 Recuperación de muestra preparada: 300 y 400 mg de ZGNa a un flujo de 2 mL/min	65
3.3.2 Recuperación de muestra preparada: 300 y 400 mg de ZGNa a un flujo de 10 mL/min	69
3.3.3 Recuperación de muestra preparada: 400 mg de ZGNa a un flujo de 5 mL/min	72
3.3.4 Recuperación de la Ag de efluente: 600 mg de ZGNa a un flujo de 5 mL/min	73
3.3.5 Recuperación de la Ag de un efluente con 0.43 mg/L	744
3.3.6 Recuperación de la Ag de una efluente con 0.61 mg/L	75
3.3.7 Recuperación de la Ag de una efluente con 0.87 mg/L	76
3.4 Evaluación del efecto microbicida de la zeolita acondicionada con la plata recuperada sobre células de <i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i> y <i>C. albicans</i> en suspensión acuosa	78
3.5 Modelado de curvas de ruptura usando ecuaciones no lineales	82
4CONCLUSIONES	84

5 REFERENCIAS	86
PRODUCCIÓN CIENTÍFICA	99
ANEXOS	101

RELACIÓN DE TABLAS

Tabla 3.1	Análisis elemental de la roca zeolítica del Estado de Guerrero	41
Tabla 3.2	Efecto microbicida de la ZGNa empleando a <i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i> y <i>C. albicans</i> como microorganismo de prueba	42
Tabla 3.3	Efecto microbicida de la ZGAg empleando a <i>E. coli</i> (masa: 300mg y Φ : 10 mL/min)	44
Tabla 3.4	Efecto microbicida de la ZGAg empleando a <i>S. aureus</i> (masa: 300mg y Φ : 10 mL/min)	45
Tabla 3.5	Efecto microbicida de la ZGAg empleando a <i>C. albicans</i> (masa: 300mg y Φ : 10 mL/min)	47
Tabla 3.6	Efecto microbicida de la ZGAg empleando un consorcio microbiano como células de prueba (masa: 300mg y Φ : 10 mL/min)	49
Tabla 3.7	Efecto microbicida de la ZGAg empleando a <i>E. coli</i> (masa: 400mg y Φ : 10 mL/min)	51
Tabla 3.8	Efecto microbicida de la ZGAg empleando a <i>S. aureus</i> (masa: 400mg y Φ : 10 mL/min)	52
Tabla 3.9	Efecto microbicida de la ZGAg empleando <i>C. albicans</i> (masa: 400mg y Φ : 10 mL/min)	54
Tabla 3.10	Efecto microbicida de la ZGAg empleando un consorcio microbiano como células de prueba (masa: 400mg y Φ : 10 mL/min)	55
Tabla 3.11	Efecto microbicida de la ZGAg empleando a <i>E. coli</i>	

(masa: 300mg y Φ : 15 mL/min)	59
Tabla 3.12 Efecto microbicida de la ZGAg empleando a <i>S. aureus</i> (masa: 300mg y Φ : 15 mL/min)	60
Tabla 3.13 Efecto microbicida de la ZGAg empleando a <i>C. albicans</i> (masa: 300mg y Φ : 15 mL/min)	62
Tabla 3.14 Efecto microbicida de la ZGAg empleando un consorcio microbiano como celulas de prueba (masa: 300mg y Φ : 15 mL/min)	63
Tabla 3.15 Primer proceso de recuperación de plata de una solución estándar	66
Tabla 3.16 Segundo proceso de recuperación de plata de una solución estandar	68
Tabla 3.17 Primer proceso de recuperación de plata de una solución estandar de 1 y 0.5 mg/L	69
Tabla 3.18 Segundo proceso de recuperación de plata de una solución estándar de 1 y 0.5 mg/L	71
Tabla 3.19 Primer y segundo proceso de recuperación de plata de una solución estándar empleando 400 mg de ZGNa y un flujo de 5 mL/min	72
Tabla 3.20 Primer y segundo proceso de recuperación de plata de una muestra de efluente proveniente del proceso de desinfección	74
Tabla 3.21 Proceso de recuperación de plata de una mezcla de efluentes con una concentración de 0.43 mg/L	75
Tabla 3.22 Proceso de recuperación de plata de una mezcla de efluentes con una concentración de 0.61 mg/L	76
Tabla 3.23 Proceso de recuperación de plata de una mezcla de efluentes con una concentración de 0.87 mg/L	77
Tabla 3.24 Efecto microbicida de la ZGAgR empleando a <i>E. coli</i> (masa: 400mg y Φ : 10 mL/min)	78
Tabla 3.25. Efecto microbicida de la ZGAgR empleando a <i>S. aureus</i> (masa: 400mg y Φ : 10 mL/min)	79
Tabla 3.26. Efecto microbicida de la ZGAgR empleando a <i>C. albicans</i> (masa: 400mg y Φ : 10 mL/min)	81

Tabla 3.27. Parámetros del modelo logístico que describe la eliminación de microorganismo (masa: 300 y 400 mg y Φ : 10 mL/min)	82
Tabla 3.28. Parámetros del modelo logístico que describe la eliminación de microorganismos en consorcio (masa: 300 y 400 mg y Φ : 10 mL/min)	83

RELACIÓN DE FIGURAS

Figura 2.1 Etapas de la investigación	27
Figura 3.1 Comparación de los patrones de difracción de rayos-X de ZG, ZGNa y ZGAg	35
Figura 3.2 Patrones de difracción de rayos-X de las ZG	36
Figura 3.3 Patrones de difracción de rayos-X de las ZGNa	37
Figura 3.4 Patrones de difracción de rayos-X de las ZGAg	37
Figura 3.5 Imagen MEB de la ZG	38
Figura 3.6 Análisis elemental (EDS) de la ZG	39
Figura 3.7 Imagen MEB de la ZGNa	39
Figura 3.8 Análisis elemental (EDS) de la ZGNa	40
Figura 3.9 Imagen MEB de la ZGAg	40
Figura 3.10 Análisis elemental (EDS) de la ZGAg	41
Figura 3.11 Efecto microbicida de la ZGNa sobre <i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i> y <i>C. albicans</i> en un sistema en continuo	43
Figura 3.12 Efecto microbicida de la ZGAg sobre <i>E. coli</i> (masa: 300mg y Φ : 10 mL/min)	44
Figura 3.13 Efecto microbicida de la ZGAg sobre <i>S. aureus</i> (masa: 300mg y Φ : 10 mL/min)	45
Figura 3.14 Efecto microbicida de la ZGAg sobre <i>C. albicans</i> (masa: 300mg y Φ : 10 mL/min)	48
Figura 3.15 Efecto microbicida de la ZGAg sobre un consorcio microbiano	

(masa: 300mg y Φ : 10 mL/min)	49
Figura 3.16 Efecto microbicida de la ZGAg sobre <i>E. coli</i> (masa: 400mg y Φ : 10 mL/min)	51
Figura 3.17 Efecto microbicida de la ZGAg sobre <i>S. aureus</i> (masa: 400mg y Φ : 10 mL/min)	53
Figura 3.18 Efecto microbicida de la ZGAg sobre <i>C. albicans</i> (masa: 400mg y Φ : 10 mL/min)	55
Figura 3.19 Efecto microbicida de la ZGAg sobre un consorcio microbiano (masa: 400mg y Φ : 10 mL/min)	57
Figura 3.20 Efecto microbicida de la ZGAg sobre <i>E. coli</i> (masa: 300mg y Φ : 15 mL/min)	60
Figura 3.21 Efecto microbicida de la ZGAg sobre <i>S. aureus</i> (masa: 300mg y Φ : 15 mL/min)	61
Figura 3.22 Efecto microbicida de la ZGAg sobre <i>C. albicans</i> (masa: 300mg y Φ : 15 mL/min)	62
Figura 3.23 Efecto microbicida de la ZGAg sobre un consorcio microbiano (masa: 300mg y Φ : 15 mL/min)	64
Figura 3.24 Plata residual proveniente de los procesos de desinfección en sistemas en columna	65
Figura 3.25 Primer proceso de recuperación de plata utilizando masa: 300 y 400 mg de ZGNa y Φ : 2 mL/min	67
Figura 3.26 Segundo proceso de recuperación de plata utilizando masa: 300 y 400 mg de ZGNa y Φ : 2 mL/min	68
Figura 3.27 Primer proceso de recuperación de plata utilizando masa: 300 y 400 mg de ZGNa y Φ : 10 mL/min	70
Figura 3.28 Segundo proceso de recuperación de plata utilizando masa: 300 y 400 mg de ZGNa y Φ : 10 mL/min	71
Figura 3.29 Primer y segundo proceso de recuperación de plata utilizando masa: 300 y 400 mg de ZGNa y Φ : 5 mL/min	73

Figura 3.30	Proceso de recuperación de la plata de efluentes con diferente concentración de plata residual	77
Figura 3.31	Efecto microbicida de la ZGAgR empleando a <i>E. coli</i> en un sistema en columna (masa: 400mg y Φ : 10 mL/min)	79
Figura 3.32	Efecto microbicida de la ZGAgR empleando a <i>S. aureus</i> en un sistema en columna (masa: 400mg y Φ : 10 mL/min)	80
Figura 3.33	Efecto microbicida de la ZGAgR empleando a <i>S. aureus</i> en un sistema en columna (masa: 400mg y Φ : 10 mL/min)	81
Figura 3.34	Identificación de biofilm en la estructura de la ZGAg. Hisopado (a), siembra en TSA (b), incubación (c) y tinción de Gram (d).	101

INTRODUCCIÓN

Debido a la incuestionable importancia de requerir agua potable, se tiene la necesidad de contar con compuestos microbicidas que tengan alta resistencia al calor, radiación y a la acción mecánica. Siendo la plata (Ag^+) un componente atractivo, debido a su fuerte acción microbicida y su alta estabilidad, así como las zeolitas naturales eficientes intercambiadores de iones, es que ha despertado el interés de la comunidad científica, el desarrollar desinfectantes a base de zeolitas y iones metálicos incorporados en la red cristalina de éstas.

Con este trabajo, se da una propuesta para el tratamiento de aguas residuales con materiales zeolíticos modificados con plata así como su reutilización, ya que actualmente los métodos comunes de desinfección, presentan deficiencias como la formación de subproductos dañinos a la salud y su elevado costo. En la presente investigación, se evaluó la desinfección del agua en un sistema en columna, empleando dos masas de zeolita del estado de Guerrero acondicionada con plata, sobre un consorcio microbiano, a dos diferentes flujos. Se consideró además, la recuperación de la plata residual y el reuso de ésta como agente microbicida. Planteando el hecho de que la masa de la zeolita Guerrero acondicionada con plata, influye sobre el volumen de agua desinfectada, partiendo de un consorcio de microorganismos Gram (+) y Gram (-) como indicadores de contaminación. Así como, la reutilización de la plata que se recupera con una zeolita natural del Estado de Guerrero previamente acondicionada con sodio, ofrece el mismo efecto microbicida frente a los microorganismos patógenos en el medio acuoso.

Este proyecto es una oportunidad para establecer capacidades y desarrollar propuestas, que permitirán resolver problemas de contaminación microbiológica del agua, a partir de la utilización de un recurso natural disponible en el país, como lo son las zeolitas.

1 FUNDAMENTOS

En México, el agua ha sido reconocida como un asunto estratégico y de seguridad nacional, y se ha convertido en elemento central de las actuales políticas ambientales y económicas, así como un factor clave del desarrollo social. Lograr que todos los cuerpos de agua superficiales y subterráneos del país recuperen su calidad, aporten caudales para satisfacer las necesidades de la población y contribuyan al crecimiento económico y bienestar de la población; requiere que se mantengan limpios, sin descargas de aguas residuales urbanas, industriales y agrícolas que los contaminen y afecten más allá de su capacidad natural de asimilación y dilución (De la Peña *et al.*, 2013).

1.1 El agua

El agua es uno de los recursos más importantes para la vida en el planeta. El ser humano depende de su disponibilidad no sólo para el consumo doméstico, sino también para el funcionamiento y la continuidad de las actividades agrícolas e industriales. Las reservas de agua en el mundo consideran el volumen disponible total acumulado de agua subterránea y superficial; dichos volúmenes se distribuyen en América del sur siendo la región con los mayores recursos hídricos renovables del planeta (cerca del 31.8% del total), seguida por Asia (28.9%) y Europa (13.9%); en contraste, la región de Centroamérica posee tan solo el 1.5% de la reserva total mundial. En México, la precipitación normal para el periodo 1981-2010 fue de 935.7 milímetros, volumen que se considera abundante (CONAGUA, 2015).

En las últimas décadas, con la finalidad de producir más alimentos y energía, así como de dotar del servicio de agua potable a una población cada vez más numerosa, la demanda por el líquido ha crecido significativamente. Otro problema importante relacionado con la posibilidad de utilizar el agua es su grado de contaminación, ya que,

si no tiene la calidad adecuada puede agravar el problema de la escasez. Las aguas de los cuerpos superficiales y subterráneos se contaminan por las descargas sin tratamiento previo, de aguas residuales municipales e industriales, así como por los arrastres que provienen de las zonas que practican actividades agrícolas y pecuarias.

Aun cuando el tema del agua se ha centrado principalmente en las necesidades humanas, es indispensable destacar su importancia como elemento clave para el funcionamiento y mantenimiento de los ecosistemas naturales y su biodiversidad. Sin el agua que garantice su función y mantenimiento, los ecosistemas naturales se degradan, pierden su biodiversidad y con ello dejan de proveer o reducen la calidad de los bienes y servicios ambientales que sostienen a las sociedades (SEMARNAT, 2012).

En la búsqueda de soluciones hay muchas iniciativas de distintos sectores de la sociedad, entre los cuales las organizaciones de la sociedad civil, las organizaciones de base, los académicos y especialistas no son la excepción en esta tarea. Discuten, proponen y actúan en distintos temas relacionados con el agua, muchas veces con distintas ópticas, pero con un mismo fin: lograr la conservación de los recursos hídricos y su adecuada gestión integral, respetando al máximo los derechos humanos, la equidad de género, la gestión democrática, los derechos de las etnias y de la propia naturaleza (Flores & Montesillo Cedillo, 2006).

El agua es utilizada no solo para el consumo, sino también en procesos industriales, así como en las actividades cotidianas de las personas, lo que la convierte en el medio de transporte de los residuos generados, produciendo agua contaminada (Romero, 2011).

1.1.1 Contaminación del agua

La mayor parte de la contaminación se origina por los usos urbano, industrial y agrícola. Existen dos tipos de contaminación: la puntual y la difusa o dispersa. La primera puede ser controlada mediante acciones específicas; la segunda se produce en general, a lo largo de extensas superficies hacia los acuíferos o por los márgenes de los ríos y laderas de los embalses. Al no haber un punto de concentración, es muy difícil su identificación y control (Flores & Montesillo Cedillo, 2006).

En México, se considera que el 26% de los ríos, lagos y embalses son de buena calidad, de acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CNA); mientras el 74% restante, presenta algún grado de contaminación, siendo los principales contaminantes la materia orgánica, nutrientes (nitrógeno y fosforo) y microorganismos (coliformes totales y coliformes fecales), así como metales en áreas con actividad industrial (Pérez, 2007).

Las principales fuentes de contaminación del agua en México son:

- a) Prácticas agrícolas. Los principales contaminantes son los plaguicidas, llevados hasta los ríos por la lluvia y la erosión del suelo, cuyo polvo es transportado hacia los ríos y el mar contaminándolos.
- b) Urbanización. Descargas de residuos de origen doméstico y público que constituyen las aguas residuales municipales. Está relacionada con la cobertura de los servicios de agua potable y alcantarillado, se incrementa en los grandes asentamientos urbanos.
- c) Descargas industriales. Descargas generadas por las actividades de extracción y transformación de recursos naturales usados como bienes de consumo y satisfactores para la población. Las descargas industriales contienen metales pesados y otras sustancias químicas tóxicas, que no se degradan fácilmente en condiciones naturales.

- d) Sector pecuario. Constituido por los efluentes de las instalaciones dedicadas a la crianza y engorda de ganado.
- e) Uso turístico y de navegación. Hay más de 850 sitios asociados a cuerpos de agua que podrían destinarse al establecimiento de lugares recreativos. Algunos ríos y estuarios son aprovechados, también, por embarcaciones de pequeño calado para el transporte de productos comerciales y para el turismo (Flores & Montesillo Cedillo, 2006).

El ciclo natural del agua tiene gran capacidad de purificación. Pero esta facilidad de regeneración del agua y su aparente abundancia hace que sea el vertedero habitual en el que se arrojan los residuos producidos por la actividad humana (Echarri, 1998). Se considera que el agua está contaminada, cuando ésta ya no reúne las condiciones requeridas para los usos que se hubiera destinado en su estado natural (Pérez, 2007).

Las aguas utilizadas en los procesos productivos retornan contaminadas a los cauces de agua y en la mayoría de los casos se deteriora su calidad para usos posteriores. Dependiendo del grado de contaminación, el agua residual puede ser nociva para la vida, puede producirse también una liberación de compuestos volátiles que provocan mal olor, sabor acentuado y podrían traer problemas en una nueva operación de purificación y tratamiento del agua (Guimarães & Nour, 2001).

Las aguas residuales se encuentran contaminadas principalmente con nutrientes (nitrógeno y fosforo), microorganismos patógenos (bacterias) y, virus, materia orgánica, detergentes, metales pesados, sustancias químicas orgánicas sintéticas, hormonas y productos farmacéuticos (Silk & Ciruna, 2004). En el caso de los residuos de origen doméstico, la carga contaminante está representada por altos porcentajes de materia orgánica y microorganismos de origen fecal. El control de la calidad microbiológica del agua de consumo y de desecho, requiere de análisis dirigidos a determinar la presencia de microorganismos patógenos; los agentes involucrados en la transmisión hídrica son las bacterias, virus y protozoos, que pueden causar

enfermedades con diferentes niveles de gravedad, desde gastroenteritis simple, hasta casos fatales de diarrea, disentería, hepatitis o fiebre tifoidea (Arcos *et al.*, 2005).

1.1.2 Contaminación biológica del agua

Los contaminantes biológicos son seres vivos, que al ingresar en el ser humano, ocasionan enfermedades de tipo infeccioso o parasitario. Son los microorganismos y endoparásitos humanos susceptibles de originar cualquier tipo de infección, alergia o toxicidad. Un problema para la salud pública se encuentra en la propagación de los microorganismos patógenos, a través de los suministros de agua. Este problema se presenta en todos los países del mundo y las fallas en los sistemas de tratamiento de aguas residuales y de consumo humano, han originado un gran número de víctimas en todo el mundo (Spiro & Stigliani, 2004).

1.1.2.1 Microorganismos

Whittaker (1969), propuso un esquema que considera la clasificación de los seres vivos en cinco reinos y que sigue vigente hasta la fecha. Consideró dos reinos de microorganismos con base en su organización celular: Reino Monera, formado por organismos procariontes en el que están incluidas las bacterias (células sin núcleo celular diferenciado, es decir, su ADN no está confinado en el interior de un núcleo, sino que se distribuye libremente en el citoplasma); y Reino Protista formado por organismos eucariontes (células con núcleo diferenciado), que incluye a protozoarios y algas unicelulares. El resto de los organismos son eucariontes y casi todos multicelulares. Se clasificaron con base en su organización celular, complejidad estructural y modo de nutrición, en los reinos: Animalia, Fungi y Plantae.

Para la realización de este trabajo se fundamentó principalmente en dos reinos Monera y Fungi. El Reino Monera identifica a los organismos procariontes unicelulares que obtienen nutrimentos por absorción o fotosíntesis; pueden ser móviles, con pared celular y generalmente con reproducción asexual. El Reino Fungi refiere a organismos eucariontes, casi siempre multicelulares los cuales absorben sus alimentos y generalmente son inmóviles, cuentan con una pared celular formada de quitina y su reproducción es tanto asexual como sexual.

1.1.2.2 Escherichia coli

La *E. coli* es una bacteria Gram negativa con forma de bastón, por lo general de 1.1 a 1.5 μm de largo y 0.5 μm de diámetro. Conforme a la definición general de la familia Enterobacteriaceae a la que pertenece, es una bacteria quimioheterótrofa facultativa con metabolismo fermentativo y respiratorio, no forma esporas, está desprovista de oxidasa, produce catalasa y β -galactosidasa, puede ser móvil por flagelos periticos o inmóviles y normalmente reduce nitrato a nitrito. Su envoltura celular se caracteriza por una estructura multilaminar. La membrana interna (o citoplasmática) consiste en una doble capa de fosfolípidos que regula el paso de nutrientes, metabolitos y macromoléculas. La capa externa, consiste en un peptidoglucano delgado, que contiene una elevada concentración de proteínas. La membrana externa compleja consiste en otra doble capa de fosfolípidos que incluyen lipopolisacáridos (LPS), lipoproteínas, proteínas porinas multiméricas (que facilitan el paso de diversas sustancias, incluidos los antibióticos betalactámicos) y otras proteínas de la membrana externa (Puerta & Mateos, 2010).

E. coli es una de las especies bacterianas más minuciosamente estudiadas y no solamente por sus capacidades patogénicas, sino también como sustrato y modelo de investigaciones metabólicas, genéticas, poblacionales y de diversa índole. La *E. coli* está presente en grandes concentraciones en la microflora intestinal normal de las

personas y los animales donde, por lo general, es inocua. Sin embargo, en otras partes del cuerpo, *E. coli* puede causar enfermedades graves, como infecciones de las vías urinarias, bacteriemia y meningitis. Un número reducido de cepas enteropatógenas, pueden causar diarrea aguda. La infección se asocia con la transmisión de persona a persona, el contacto con animales, los alimentos y el consumo de agua contaminada. La transmisión de persona a persona es particularmente frecuente en comunidades donde hay personas en proximidad estrecha, como en residencias y guarderías (OMS, 2006).

Se ha precisado que seis grupos patógenos o patotipos de *E. coli* ocasionan diarrea en sujetos sanos: *E. coli* enterotoxigénica (ETEC), enteroinvasiva (EIEC), enterohemorrágica (EHEC), enteroagregativa (EAEC), adherente difusa (DAEC) y enteropatógena (EPEC). La *E. coli* enteropatógena (EPEC, por sus siglas en inglés) fue la primera en describirse y es tal vez, uno de los microorganismos más estudiados. La infección con EPEC es una de las causas más comunes de diarrea infantil en países en vías de desarrollo, como México (Vidal *et al.*, 2007).

1.1.2.3 Staphylococcus aureus

S. aureus forma parte de la familia *Micrococcaceae*, género *Staphylococcus*, el cual contiene más de 30 especies diferentes y muchas de éstas son habitantes naturales de la piel y las membranas mucosas del hombre. Es un coco Gram positivo, su tamaño oscila entre 0.8 a 1.5 μm de diámetro, no móvil, no forma esporas, puede encontrarse solo, en pares, en cadenas cortas o en racimos. Es un anaerobio facultativo, pero crece mejor en condiciones aerobias. El microorganismo produce catalasa, coagulasa y crece rápidamente en agar sangre. Sus colonias miden de 1 a 3 mm (Velázquez, 2005; Kanafani, & Fowler, 2006). El género *Staphylococcus* contiene al menos quince especies. Además de *S. aureus*, las especies *S. epidermidis* y *S. saprophyticus*, también se asocian con enfermedades humanas (OMS, 2006). El *S. aureus* es

probablemente el más versátil de los microorganismos patógenos. Puede producir enfermedad por toxinas o superantígenos, invadir cualquier órgano o tejido y originar supuración, necrosis tisular, trombosis vascular y bacteriemia (Mensa *et al.*, 2013). La proliferación en los tejidos puede producir manifestaciones como inflamación de la piel causada por la infección de un folículo piloso, infecciones cutáneas, infecciones postoperatorias de heridas, infecciones intestinales, septicemia, endocarditis, osteomielitis y neumonía.

S. aureus es un microorganismo relativamente extendido en el ambiente, pero se encuentra principalmente en la piel y las mucosas de los animales. Los estafilococos se detectan ocasionalmente en el aparato digestivo y pueden detectarse en aguas residuales. *S. aureus* puede ser liberado por contacto humano en medios acuáticos como piscinas, balnearios y otras aguas recreativas. También se ha detectado en aguas de consumo (OMS, 2006).

1.1.2.4 Candida albicans

C. albicans es una levadura, es decir, un hongo que se presenta predominantemente en forma unicelular. Las células están compuestas por paredes delgadas, que se producen por gemación y suele presentarse como una célula oval de 2 a 4 micras. Las levaduras son microorganismos eucarióticos, las cuales se reproducen asexualmente por un proceso específico de división celular, conocido como gemación. Se presenta bajo condiciones de cultivo facultativo y está formado por células que se mantienen unidas entre sí como una cadena y blastoconidias o blastosporas, que están agrupadas en montones a lo largo del pseudomicelio, en los sitios en que los extremos finales de las células pseudomiceliales se empalman con otras (Pardi & Cardozo, 2002).

Existen varios métodos disponibles para el examen de *C. albicans* en fresco, dependiendo del origen de la muestra. Entre ellos en hidróxido potásico, la tinción de Gram, la tinción de Wright-Giemsa, metamina argéntica, ácido periódico de Schiff, azul de metileno, blanco calcoflour y tinción de Papanicolau (Olea, 1995).

La composición química de *C. albicans* está representada por 20-40% de proteínas y 30-50% de polisacáridos, mientras que la proporción de lípidos es variable. La fracción lipídica va a depender de la cepa, edad del cultivo, condiciones ambientales y del origen de la fuente de carbono. La pared celular de *C. albicans* está compuesta principalmente por los polisacáridos: manano, glucano y quitina. Aunque la síntesis de los componentes de la pared celular está dinámicamente influenciada por las condiciones de crecimiento y por los estadios metabólicos.

Las especies de *Candida* crecen bien en medios de cultivo con agar, peptona, dextrosa, maltosa o sacarosa. Las colonias muy pequeñas aparecen en un lapso de 24 a 36 horas en Agar Sabouraud. Las colonias son típicamente blancas por completo, pero adquieren un color crema o requemado al continuar envejeciendo (Pardi & Cardozo, 2002).

C. albicans está asociada ecológicamente a seres vivos de sangre caliente. Su temperatura óptima de crecimiento es 37 °C. Los tractos digestivo y respiratorio, junto con la mucosa genital (vagina), son los reservorios más importantes en los seres humanos y origen de candidiasis endógenas. En estas localizaciones se comporta como un saprobio y su aislamiento no implica, por sí solo, la presencia de infección. *C. albicans* no sobrevive durante mucho tiempo en superficies secas, pero su supervivencia es mayor cuando hay humedad y se ha aislado de los cepillos dentales, cremas de manos, cosméticos y ropa (Pontón *et al.*, 2002).

1.1.2.5 Consorcio microbiano

Recientemente ha surgido interés en las múltiples poblaciones microbianas que interactúan, ya que los consorcios pueden realizar funciones complejas que las poblaciones individuales no pueden y porque los consorcios pueden ser más resistentes a las fluctuaciones ambientales. Estos rasgos atractivos se basan en dos características de organización. Primero, los miembros del consorcio se comunican con uno y con otro, ya sea comercializando metabolitos o intercambiando señales moleculares. En cada población, el individuo detecta y responde a la presencia de otros en el consorcio. Esta comunicación habilita el segundo rasgo importante, que es la división del trabajo; la producción global del consorcio se basa en una combinación de las tareas realizadas por los individuos constituyentes de sub-poblaciones (Keller & Surette, 2006).

Frecuente las enfermedades de origen hídrico, están relacionadas con la presencia de microorganismos emergentes y reemergentes. Existe una gran dificultad para determinar la presencia de todos los microorganismos patógenos involucrados en los procesos de contaminación ambiental. Dicha determinación implica costos elevados, tiempo y laboratorios especializados. Frente a estas dificultades y a la necesidad de hacer una evaluación rápida y fiable de la presencia de patógenos en el agua, se ha planteado la necesidad de trabajar con determinados grupos indicadores. Los microorganismos indicadores son aquellos que tienen un comportamiento similar a los patógenos, concentración y reacción frente a factores ambientales, pero son más fáciles, rápidos y económicos de identificar (Arcos *et al.*, 2005).

En microbiología ambiental, se suele hacer referencia a consorcio, para referirse a comunidades microbianas que en conjunto son capaces de colonizar determinados ecosistemas, dándose asociaciones entre los miembros de la población, pueden ser neutrales, beneficiosas o perjudiciales para al menos uno de los organismos involucrados. Generalmente, los microorganismos interaccionan de manera positiva o

negativa. Las asociaciones positivas se clasifican como mutualismo o comensalismo; en tanto que las negativas incluyen la depredación, el parasitismo y la competencia por el propio nicho. La neutralidad es poco frecuente y quizá solo un fenómeno teórico. Dentro de una misma población, los microorganismos cooperan cuando las densidades celulares son bajas, pero compiten cuando son altas (Cavallini, 2005).

1.1.3 Tratamiento del agua residual municipal

El saneamiento de las aguas residuales adquiere más importancia para asegurar su recolección, conducción, tratamiento y adecuada disposición en los cuerpos receptores, en condiciones que no perjudiquen al medio ambiente y la salud de la población (De la Peña *et al.*, 2013).

En general, las aguas residuales consisten en dos componentes, un efluente líquido y un constituyente sólido, conocido como lodo. Típicamente existen dos formas generales de tratar las aguas residuales. Una de ellas consiste en dejar que las aguas residuales se asienten en el fondo de los estanques, permitiendo que el material sólido se deposite en el fondo. Después se trata la corriente superior de residuos con sustancias químicas para reducir el número de contaminantes dañinos presentes. El segundo método más común consiste en utilizar la población bacteriana para degradar la materia orgánica. Este método, conocido como tratamiento de lodos activados, requiere el abastecimiento de oxígeno a los microbios de las aguas residuales para realizar su metabolismo. Los pasos básicos para el tratamiento de aguas residuales incluyen (Reynolds, 2002):

- a. Pretratamiento: remoción física de objetos grandes.
- b. Deposición primaria: sedimentación por gravedad de las partículas sólidas y contaminantes adheridos.

- c. Tratamiento secundario: digestión biológica usando lodos activados o filtros de goteo que fomentan el crecimiento de microorganismos.
- d. Tratamiento terciario: tratamiento químico (por ejemplo, precipitación, desinfección). También puede utilizarse para realzar los pasos del tratamiento primario.

Durante el año 2014, las 2,337 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en operación a lo largo del país trataron 111.3 m³/s, es decir el 52.8 % de los 211.0 m³/s recolectados a través de los sistemas de alcantarillado; las plantas de tratamiento de agua residual industrial trataron 65.6 m³/s, en 2,639 plantas en operación a nivel nacional. Conagua estima que al 2014 se reusaban directamente (antes de su descarga) 21.8 m³/s de aguas residuales tratadas. En tanto que se reusaban indirectamente (después de su descarga) 69.4 m³/s de aguas residuales tratadas. El intercambio de aguas residuales tratadas, en el que substituyen agua de primer uso, se estima en 8.9 m³/s (CONAGUA, 2015).

Como promedio, solamente 10% de las aguas de alcantarillado recolectadas en Latinoamérica, son sujetas a cualquier tipo de tratamiento. Una evaluación de las plantas de tratamiento de aguas de alcantarillado en México calcula que 5% de las plantas existentes, están siendo operadas de manera satisfactoria. El tratamiento de aguas residuales es necesario para la prevención de la contaminación ambiental y del agua, al igual que para la protección de la salud pública. Cada región tiene sus propias necesidades correspondientes a métodos de tratamiento particulares.

El manejo efectivo de aguas residuales debe dar como resultado un efluente ya sea reciclado o reusable, o uno que pueda ser descargado de manera segura al ambiente (agua y suelo). La meta del tratamiento de aguas residuales nunca ha sido producir un producto estéril, sin especies microbianas, sino reducir el nivel de microorganismos dañinos a niveles más seguros de exposición, donde el agua es comúnmente reciclada para el riego o usos industriales. Al escoger la tecnología apropiada de tratamiento,

deben considerarse cierto número de factores, incluyendo la cantidad y composición de la corriente de residuos, los estándares del efluente, opciones indicadas de uso y desecho, opciones de pretratamiento; y factibilidad de funcionamiento (Reynolds, 2002).

1.2 Metodologías de desinfección de agua

La desinfección se define como proceso mediante el cual se eliminan los microorganismos patógenos en el agua. Este proceso no solo debe inactivar a los microorganismos presentes en el agua, sino que también debe tener un efecto residual, lo que significa que debe mantener agentes activos en el agua tras la desinfección.

Entre los agentes químicos de desinfección más utilizados, se destacan el cloro elemental gaseoso (Cl_2), el hipoclorito (ClO^-), la mezcla de cloro con amoníaco (Cl_2/NH_3) que forman cloramina, el dióxido de cloro (ClO_2), el ozono (O_3), el permanganato de potasio (KMnO_4) y la luz ultravioleta (UV). Se han desarrollado también métodos modernos que se basan en la irradiación con rayos γ y la fotocatalisis heterogénea UV/ TiO_2 .

El cloro posee un poder de desinfección mayor en medio ácido. Su uso está muy extendido, porque tiene varios aspectos atractivos: logra la inactivación efectiva de una gran gama de patógenos comúnmente encontrados en las aguas, su costo es bajo, y tiene un efecto residual fácilmente controlado y monitorizado que protege al agua de una reinfección (CYTED, 2001).

El agua sometida al proceso de desinfección puede contener precursores orgánicos fundamentalmente ácidos húmicos y fúlvicos, que proceden de la degradación microbiana y química de carbohidratos y proteínas. Estos precursores reaccionan con

el desinfectante, dando lugar a la aparición de sustancias indeseables. En el caso de la desinfección por cloro, se trata de compuestos orgánicos clorados, muchos de los cuales tienen comprobada su capacidad tóxica y/o mutagénica para el hombre. De igual forma, la cloración de aguas con elevado contenido proteico, procedente de proliferaciones de algas (eutrofización), contribuyen a la formación de estos subproductos. Estos compuestos no deseados, se forman si los precursores orgánicos y el cloro residual libre (CRL), están presentes conjuntamente durante el tiempo suficiente. Una vez formados, es difícil eliminarlos del agua y es por ello de suma importancia, prevenir su formación. Los subproductos mayoritarios de la cloración son los trihalometanos y ácidos acéticos halogenados (Teresa & Sánchez, 2008).

El ozono, forma alotrópica del oxígeno, es un oxidante muy enérgico, es utilizado como tal en la desinfección del agua, está comprobada su eficacia en oxidación de materias orgánicas e inorgánicas. Su poder oxidante y desinfectante, mayor que el cloro, le hace más eficaz que éste en la eliminación del olor, sabor y color del agua, así como en la eliminación de bacterias, virus y otros microorganismos.

Se utiliza en el tratamiento del agua y su empleo en este campo no está más extendido debido a su mayor costo con respecto a otros desinfectantes generalmente empleados, además puede formar otros subproductos perjudiciales entre los que destacan los bromatos y aldehídos. El ozono no mantiene una concentración residual persistente y puede formar óxido nítrico o ácido nítrico que causaran corrosiones en los equipos. Al ser el ozono un oxidante fuerte, puede producir trastornos en los tejidos humanos y particularmente en los ojos y pulmones (Gordillo, 2012).

El permanganato potásico se obtiene a partir del dióxido de manganeso (MnO_2). Se trata de un compuesto bastante oxidante, que en las ETAP es utilizado principalmente en el control de olor y sabor, y control de crecimiento de microorganismos. También elimina hierro y manganeso, y puede ser útil en el control de precursores de THM y otros subproductos antes de la aplicación de otros desinfectantes. El permanganato

potásico inhibe el crecimiento de bacterias (coliformes, *Vibrio cholerae*, *Salmonella typhi* y bacteria *Flexner*) y virus (polivirus, bacteriófagos) pero no es efectivo con todos los microorganismos, por lo que es necesario aplicar este producto junto con otro tipo de desinfección. Reacciona de manera explosiva con muchas sustancias, en humanos produce irritación y quemaduras por inhalación, contacto o ingestión. Puede provocar daños en el aparato reproductivo y efectos mutagénicos (Álvarez Guisasola, 2009).

La radiación ultravioleta (UV) es una alternativa de creciente aplicación en la desinfección de aguas de abastecimiento y residuales. Se ha comprobado que la radiación UV es eficiente en la inactivación de bacterias, virus (colifago, virus de la hepatitis A, polivirus y rotavirus) y protozoarios (por ejemplo, cistos de *Giardia lamblia* y *Giardia muris*, *Acanthamoeba rhysodes* y *Cryptosporidium*) (CYTED, 2001).

No se forman subproductos durante la desinfección, y para mantener un efecto residual es habitualmente necesaria la adición de otros agentes químicos, la materia orgánica disuelta en el agua y la profundidad impiden la acción germicida de la radiación; las interacciones de reacciones conducen a la inactivación incluye reacciones bioquímicas que pueden ser afectadas por la temperatura durante el período de irradiación, pero es sobre todo durante el tiempo de post-irradiación que se producen procesos de reactivación si existen condiciones adecuadas (Salcedo *et al.*, 2007).

1.3 Zeolitas

Una zeolita es un mineral cristalino con estructura caracterizada por una red de tetraedros entrelazados, cada uno compuesto por cuatro átomos de oxígeno alrededor de un catión. Esta red contiene cavidades abiertas en forma de canales y cajas. Estas suelen ser ocupadas por moléculas de H₂O y cationes intercambiables. Los canales son lo suficientemente grandes como para permitir el paso de distintas especies. En la

fase hidratada de este mineral la deshidratación ocurre a temperaturas por debajo de los 400 °C y su rehidratación es reversible, definida así por la International Mineralogical Association (Baerlocher *et al.*, 2007).

Las zeolitas tienen importantes aplicaciones industriales como desecantes o deshidratantes por su gran afinidad con el agua, como tamices moleculares porque sus canales y cavidades solo permiten el paso de moléculas de un determinado tamaño y como intercambiadores iónicos por sus sitios catiónicos (Leyva, 2004).

1.3.1 Propiedades de las zeolitas

La microporosidad de las zeolitas es abierta y la estructura permite la transferencia de materia entre el espacio intracristalino y el medio que lo rodea. Esta transferencia está limitada por el diámetro de los poros de la zeolita, ya que sólo podrán ingresar o salir, aquellas moléculas cuyas dimensiones sean inferiores a un cierto valor, el cual varía de una zeolita a otra (Olguín, 2004). Las propiedades principales de las zeolitas son (Romero, 2011):

- a) Propiedades mecánicas: son resistentes a la pulverización, tiene baja resistencia al desgaste por fricción (abrasión) y no se convierten en terrones. Tienen un bajo peso volumétrico (menor de 1.7 – 1.8 g/cm³).
- b) Deshidratación e hidratación: la deshidratación y la hidratación de estos minerales no producen cambios en su estructura, por lo que pueden llenarse de líquidos o gases en ciclo repetidos.
- c) Estabilidad térmica: la estabilidad térmica de las zeolitas varía, la temperatura de descomposición de zeolitas con contenidos bajos en silicio es alrededor de 700 °C, mientras que zeolitas completamente silíceas, son estables hasta 1300 °C.

- d) Porosidad: las zeolitas son formadas por canales y cavidades regulares y uniformes de dimensiones moleculares (entre 3 a 13 nm) que son medidas similares a los diámetros cinéticos de una gran cantidad de moléculas.
- e) Adsorción: la superficie de los sólidos es una región singular, que es responsable o al menos condiciona muchas de sus propiedades. Los átomos que se encuentran en ello no tienen las fuerzas de cohesión compensadas, como ocurre en los átomos situados en el seno del sólido que es, en definitiva, responsable de las propiedades de adsorción de los sólidos.
- f) Propiedades de intercambio catiónico: debido a su rígida estructura tridimensional, las zeolitas no sufren ningún cambio dimensional apreciable durante el intercambio iónico.

1.3.2 Clinoptilolita

La zeolita natural comúnmente utilizada en procesos de intercambio iónico se conoce como clinoptilolita cuyo nombre fue propuesto por Schaller (1932), la presencia estructural adicional de silicio en la clinoptilolita, comparada con la heulandita, aparenta ser la responsable del incremento en la estabilidad (Mumpton, 1960). La relación de silicio/aluminio que posee esta zeolita es baja, lo que significa que este mineral tiene una mayor cantidad de sitios de intercambio iónico (Pavón *et al.*, 2000); este tipo de zeolita es característica del estado de Guerrero.

La clinoptilolita es un aluminosilicato de sodio, potasio y calcio hidratado, que tiene la fórmula molecular $(\text{Na}, \text{K}, \text{Ca}_{0.5}, \text{Sr}_{0.5}, \text{Ba}_{0.5}, \text{Mg}_{0.5})_6 [\text{Al}_6\text{Si}_{30}\text{O}_{72}] \cdot 20\text{H}_2\text{O}$. Es una zeolita perteneciente a la familia de la heulandita, junto con la laumontita y la modernita, entre otras. La composición química de las series heulandita-clinoptilolita se caracterizan por cambios en la composición de cationes intercambiables. Los miembros de estas series se distinguen de acuerdo a su contenido de sílica (alta sílica y baja sílica). Las zeolitas

de baja sílica son ricas en K^+ , Na^+ y Mg^+ , el potasio es el más común en la clinoptilolita, aunque algunas existen en la naturaleza con alto contenido de Na.

La clinoptilolita-heulandita mexicana modificada con plata puede eliminar microorganismos patógenos como la *Escherichia coli* y *Staphylococcus feacalis* del agua. Sin embargo, es bien sabido que las variaciones en la pureza y composición, y la existencia de algunas impurezas dentro de estos materiales son directamente reflejadas en su capacidad de intercambio iónico (Rivera *et al.*, 2000).

1.3.3 Intercambio iónico y selectividad de las zeolitas

La capacidad de intercambio iónico de una zeolita es una magnitud que mide la cantidad de equivalentes de un catión que es capaz de retener por intercambio iónico una masa de zeolita. Esta capacidad está directamente relacionada con la cantidad de Al presente en la red zeolítica y depende de su composición química. Una alta capacidad de intercambio iónico corresponde a zeolitas con baja relación SiO_2/Al_2O_3 (Rodríguez & Rodríguez, 2004).

El comportamiento que presentan las zeolitas frente al intercambio iónico, depende en particular de:

- a) La naturaleza de las especies catiónicas, la carga y el tamaño del catión (anhidro e hidratado);
- b) La temperatura;
- c) La concentración de las especies catiónicas en solución;
- d) La especie aniónica asociada al catión en solución;
- e) El solvente (la mayoría de los intercambios se realizan en medio acuoso; sin embargo, se han reportado algunos trabajos en solventes orgánicos);
- f) Las características estructurales de la zeolita.

El intercambio catiónico, en algunos casos, está acompañado de importantes modificaciones en estabilidad, capacidad de adsorción, selectividad y propiedades catalíticas (Romero, 2011).

Investigaciones realizadas por Rivera *et al.* (2000); Top A. & Ülkü S. (2004); Burrola (2004); De la Rosa G.I. (2007); De la Rosa G.I. *et al.* (2010); Hrenovic *et al.* (2012a); Hrenovic *et al.* (2012b) y Guerra *et al.* (2012) recomiendan el uso de zeolitas, tanto naturales como sintéticas para alojar iones metálicos (Ag, Cu, Zn, Hg, Sn, Pb, Bi, Cd, Cr, Ti) en la desinfección del agua.

1.4 Zeolita acondicionada con plata

Un interesante avance en la tecnología de las zeolitas ha sido el descubrimiento de varios agentes microbiológicos que tienen como base zeolitas tanto naturales como sintéticas. Uno muy importante es la plata por su alta estabilidad y su fuerte espectro como antibacterial.

Para la preparación de dichos materiales, la zeolita se usa como contenedor y lento dispersor de los iones de plata que tienen propiedades oligodinámicas (Rosabal *et al.*, 2005).

Se han realizado pretratamientos a la zeolita con una solución de NaCl obteniendo una zeolita acondicionada con sodio (ZNa) para posteriormente poner en contacto con soluciones de AgNO_3 , $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ y $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$, observando que la ZNa presenta una selectividad hacia los iones de plata (Top *et al.*, 2004).

El intercambio iónico entre plata y sodio en la zeolita ocurre de acuerdo a la ecuación 1.8 (Rivera *et al.*, 2000 y Ferreira *et al.*, 2012):



En solución de AgNO_3 , los cationes de plata pueden ser adsorbidos debido a la capacidad de intercambio iónico que tienen las zeolitas naturales, las cuales cuentan una serie de cationes intercambiables: K^+ , Na^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} (Leyva, 2004).

1.4.1 Efecto microbicida de la plata

Es conocido que algunos elementos metálicos, metales pesados como la plata, zinc, cobre, mercurio, estaño, plomo, bismuto, cadmio, cromo y talio poseen propiedades antibióticas. Preferiblemente, los iones metálicos antibióticos son de plata, cobre y zinc. Estos iones pueden utilizarse solos o en combinación. Los iones metálicos están contenidos en la zeolita en una cantidad que varía preferiblemente de 0.1 a 15% de la zeolita. En este estudio, principalmente el contenido de iones se encuentra de 0.1 a 5% para la plata; 0.1 a 8% para el cobre; y de 0.1 a 8% para el zinc, desde el punto de vista de su propiedad antibiótica eficaces para la zeolita (Niira *et al.*, 1990).

Se han llevado a cabo numerosos estudios sobre los efectos que tiene la plata como agente microbicida al eliminar una gran cantidad de organismos regularmente utilizados como indicadores de la calidad del agua y agentes patógenos para la salud humana (De la Rosa *et al.*, 2008).

Es muy poco probable que los microorganismos desarrollen algún tipo de resistencia al tratamiento. Son permanentes y no contaminantes; los iones de plata quedan atrapados en un sustrato matriz o film protector desde donde actúan. Además, su efecto es limpio e inocuo para otros seres vivos. No tienen efectos tóxicos en las células humanas (Pancorbo, 2009).

1.4.2 Propiedades de la plata

La plata es un metal precioso que se usa en joyería, platería y en la industria de alimentos; además, se aplica como antiséptico. Las aleaciones de plata se emplean como amalgamas dentales y para fabricar cojinetes y pistones de motores. Es importante puntualizar que la cantidad de residuos solubles de plata que resultan del uso como metal sólido es mínima. Los usos más comunes de las sales de plata (nitrato de plata) son en porcelana, fotografía, electroplateado y manufactura de tintas. Las dos principales fuentes de residuos solubles de plata son la fotografía y la industria de electroplateado (Leyva *et al.*, 2005).

Las concentraciones de plata están estrechamente correlacionadas con las concentraciones de silicato. La plata se emite en el medio acuático de la industria de la fotografía y de las actividades mineras y en la atmósfera por la combustión de combustibles fósiles, lo que lleva a un factor de movilización relativamente alto de 83 (James *et al.*, 2007). Un mapeo detallado de las diversas fuentes de ingesta de plata no está disponible, la plata puede ser ingerida a través del consumo de los organismos marinos que contienen concentraciones bajas y en pequeñas cantidades liberadas de los empastes dentales y los utensilios para comer. Wester (1971) encontró una ingesta diaria de los alimentos de 1-16 μg . La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA) estima que la ingesta de plata de la dieta varió desde 10 hasta 44 $\mu\text{g}/\text{día}$ (US EPA, 1980).

En el tratamiento con plata no se produce sabores, olores ni colores anormales en el agua. Tampoco hay formación de subproductos de la desinfección (Pancorbo, 2009).

1.4.3 Niveles ambientales

Las actividades bioquímicas de la plata han sido caracterizadas por las descargas a la atmósfera, agua y tierra por fuentes naturales o antropogénicas. Un conocimiento de las especies de la plata y sus respectivas biohabilidades es crucial para entender el riesgo potencial de este metal. La medición de los iones libres de plata es el único método directo que puede ser usado para medir acertadamente los efectos de este metal en los organismos (Rivera *et al.*, 2000).

En el agua de mar se han informado concentraciones de plata de 0.055 a 1.5 µg/L. Concentraciones mucho más altas (0.03 mg/L) se han reportado en los efluentes de aguas residuales que entran en las cuencas costeras del sur de California. La plata también se ha informado en concentraciones de 14-20 mg/kg en los sedimentos del fondo en estas áreas. Se ha informado que los moluscos recogidos en las zonas costeras del mar del Norte contienen concentraciones de plata de hasta 2.0 mg/kg. El agua potable no tratada con plata para fines de desinfección, por lo general contiene concentraciones extremadamente bajas de plata, se informó de una serie no detectable de 5 µg/L en aguas que han sido tratadas y están listas para su consumo. Aguas tratadas pueden contener 50 µg/L o incluso concentraciones ligeramente superiores. La US EPA ha establecido el estándar de agua potable, el nivel máximo de contaminante a 0.1 mg/L. La plata se ha medido en el aire como resultado de la actividad antropogénica: concentraciones en el aire de plata en el sur de California se han reportado en aproximadamente 2 ng/m³ (James *et al.*, 2007).

Mediciones de plata en ríos, lagos y estuarios usando técnicas limpias mostraron niveles de aproximadamente 0.01 µg/L en áreas sin contaminación y de 0.01 a 0.1 µg/L en áreas urbanas e industrializadas (WHO, 2002). En México la NOM-041-SSA1-1993 "Bienes y servicios. Agua purificada envasada. Especificaciones sanitarias", marca que la cantidad máxima contenida de plata en aguas debe ser menor a 0.05 mg/L (Rivera *et al.*, 2000).

1.5 Desinfección con zeolita acondicionada con plata

La eliminación de microorganismos patógenos del agua es uno de los aspectos más importantes de un sistema de tratamiento de agua. La desinfección del agua se puede lograr utilizando productos químicos y agentes físicos. La plata o zinc modificando zeolitas naturales se han propuesto como desinfectantes de agua. Rivera *et al.* (2000), encontró que la clinoptilolita-heulandita modificada con plata libera estos iones en el agua, provocando la eliminación de microorganismos coliformes después de 2 horas de tratamiento. En estas condiciones, el nivel de plata en el agua fue de 26.2 mg/L. Las investigaciones de Burrola (2004) y De la Rosa *et al.* (2008) evaluaron el efecto antibacteriano de las zeolitas naturales acondicionadas con plata utilizando bacterias patógenas como un indicador de contaminación fecal del agua. En el estudio de Burrola (2004), utilizó *E. coli* suspendida en agua destilada, dicha suspensión se trató con zeolitas naturales acondicionadas con plata, cobre y zinc, encontró que la eficiencia de desinfección de la zeolita natural modificada con plata (50 mg), mostró una diferencia significativa en el tiempo requerido para llegar a la desinfección total a un tiempo de 2 horas, comparado con 24 horas para cobre y el zinc no ofreció desinfección durante las 24 horas.

Se observó que, en las aguas residuales municipales, debido a la presencia de iones de cloruro pueden reaccionar con iones de plata precipitando como cloruro de plata, causando una disminución de la actividad microbicida de la zeolita plata. Las concentraciones de plata después de la desinfección de aguas residuales son de 2 a 3.5 veces inferior a la cantidad que se encuentra después de la desinfección de la *E. coli* en suspensión en agua destilada. Esta diferencia se debe probablemente a la sustancia química y las propiedades físicas de las aguas residuales, tales como la conductividad, pH, turbidez, nitrógeno amoniacal y cloruros. La concentración de iones de cloruro en las aguas residuales es de aproximadamente 40 mg/L (De La Rosa, 2007).

En el estudio de De la Rosa *et al.* (2008), la desinfección de *E. coli* en suspensión en agua destilada y coliformes totales de aguas residuales se realizó utilizando zeolita natural modificada con plata (ZAg). Este trabajo logró comprobar el efecto microbicida de la ZAg sobre indicadores microbianos como *E. coli* y *S. faecalis*. Propone el uso de ZAg en un sistema de columna empacada como método para la desinfección de aguas residuales no cloradas en flujo continuo.

En el tratamiento del agua residual municipal (ARM), De la Rosa *et al.* (2008) reporta que se logró la desinfección de 30 y 60 mL del agua residual tratada con 100 y 200 mg de ZAg respectivamente, antes de comenzar a observarse supervivencia de *E. coli* en el efluente (punto de quiebre). La total inactivación de la ZAg como agente bactericida, correspondiente a una supervivencia del 100% de *E. coli*, también fue observada a los 180 y 360 mL respectivamente (100 o 200 mg de ZAg).

Actualmente estudios realizados por Guerra *et al.* (2012) han confirmado el efecto bactericida de la plata utilizando como medio de soporte clinoptilolita frente a *E. coli* y *Salmonella typhi*; así mismo, Ferreira *et al.* (2012) obtuvo los mismos resultados utilizando zeolita faujasita frente a las bacterias *E. coli* y *Bacillus subtilis* y las levaduras *Saccharomyces cerevisiae* y *C. albicans*, así mismo Jiraroj *et al.* (2014) utilizando zeolita Linde A frente a *E. coli* y *S. aureus*; sin embargo estos estudios se han llevado a cabo en pruebas de tipo lote.

Se ha determinado el rendimiento del material por la cantidad de plata soportado sobre la zeolita, la distribución en la superficie (microporos y la superficie exterior), el tamaño de las partículas y la dimensión fractal de las partículas metálicas; encontrando que existe plata que no se lixivia de la zeolita durante los experimentos frente a *E. coli* y *S. typhi*; por lo tanto, se concluye que los materiales biocidas pueden ser reutilizados (Guerra *et al.*, 2012).

1.6 Modelado de curvas de ruptura usando ecuaciones no lineales

La noción de modelo surge cuando aparece la necesidad de estudiar de forma específica diversos fenómenos y definir una estrategia para la construcción y la utilización de modelos en el proceso de la investigación. Los modelos han sido una herramienta analítica muy importante puesto que ayudan a responder preguntas acerca de la estructura y del funcionamiento de dichos fenómenos, conocer sus propiedades o explicar su existencia en una porción dada del universo (Chiappa *et al.*, 2009).

Con el fin de obtener los parámetros que describen el proceso de desinfección en un sistema en flujo continuo, se consideró el modelo que Mthombeni *et al.* (2012) aplicó para la desactivación de microbios en el agua potable en un sistema en columna. Se utiliza un modelo sigmoideal no lineal, para ajustar los datos experimentales a dicho modelo y determinar los parámetros que describen al proceso de desinfección en un sistema en columna. Cuando los microorganismos (N_i) pasan a través de un lecho que contiene la zeolita modificada con plata, se obtiene una cantidad de ellos (N_t) a ciertos intervalos de tiempo (t) al graficar N_t como una función de t , genera una curva sigmoidea. La forma general de la ecuación que se emplea para obtener la constante de velocidad de desinfección (k), para un sistema en columna es:

$$N_t = \frac{N_i}{1 + e^{-k(t-t_{50})}} \quad (1)$$

y cuya forma linealizada es:

$$\ln\left(\frac{N_t}{N_i - N_t}\right) = k(t - t_{50}) \quad (2)$$

En donde k (min^{-1}) es la constante de velocidad que es una medida de la inclinación de la pendiente de las curvas de ruptura. El tiempo que se tarda en alcanzar la concentración media (media N_i) del recuento bacteriano se denomina t_{50} (min).

Cuando se opera una columna de lecho fijo, el objetivo es reducir la concentración de un contaminante dado a un valor por debajo de la concentración máxima permisible. Para una masa de lecho dada, el rendimiento está directamente relacionado con el número de volúmenes de lecho procesados antes del punto de ruptura (punto en el que los microorganismos se detecta por primera vez el efluente de la columna). El número de volúmenes de lecho (BV) viene dado por la siguiente ecuación:

$$BV = \frac{\text{volumen de agua en el punto de ruptura (L)}}{\text{volumen de cama del material antimicrobiano (L)}} \quad (8)$$

La velocidad a la que se agota el material antibacteriano indica la frecuencia con que se debe reemplazar el material. La velocidad de agotamiento del material antibacteriano (AER) se define como la masa de material antibacteriano agotado por volumen de agua tratada en el punto de ruptura y se expresa como:

$$AER = \frac{\text{masa de material antimicrobiano (g)}}{\text{volumen de agua tratada (L)}} \quad (9)$$

El bajo valor de AER indica un buen rendimiento del lecho y es el indicador de rendimiento principal para comparar diferentes condiciones de operación.

2 METODOLOGÍA

En la Figura 2.1 se presenta el diagrama de flujo utilizando para evaluar el efecto microbicida de una zeolita acondicionada con plata en un sistema en columna sobre un consorcio de microorganismos incluyendo la recuperación y reuso de la plata residual.

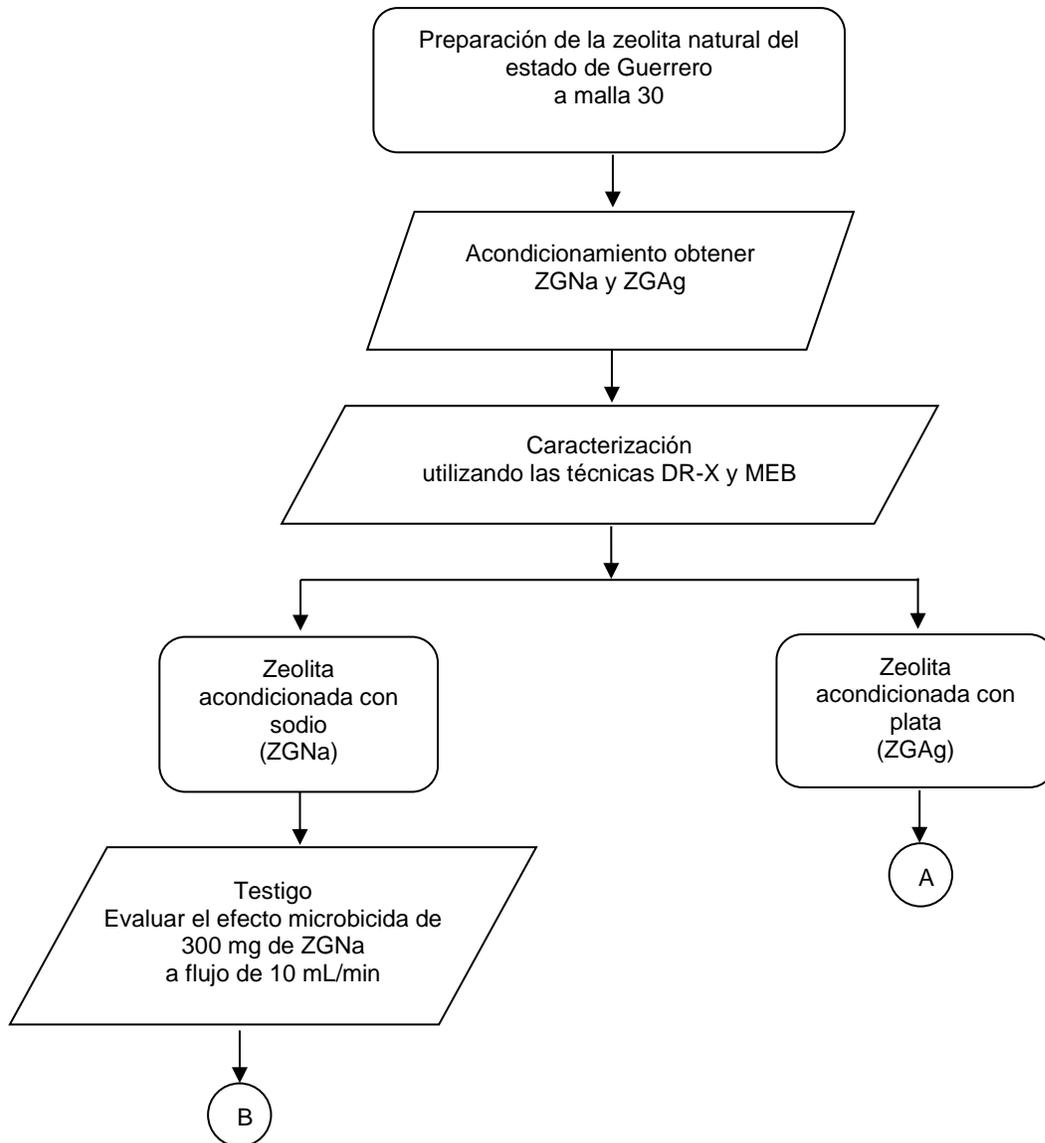


Figura 2.1. Etapas de la investigación

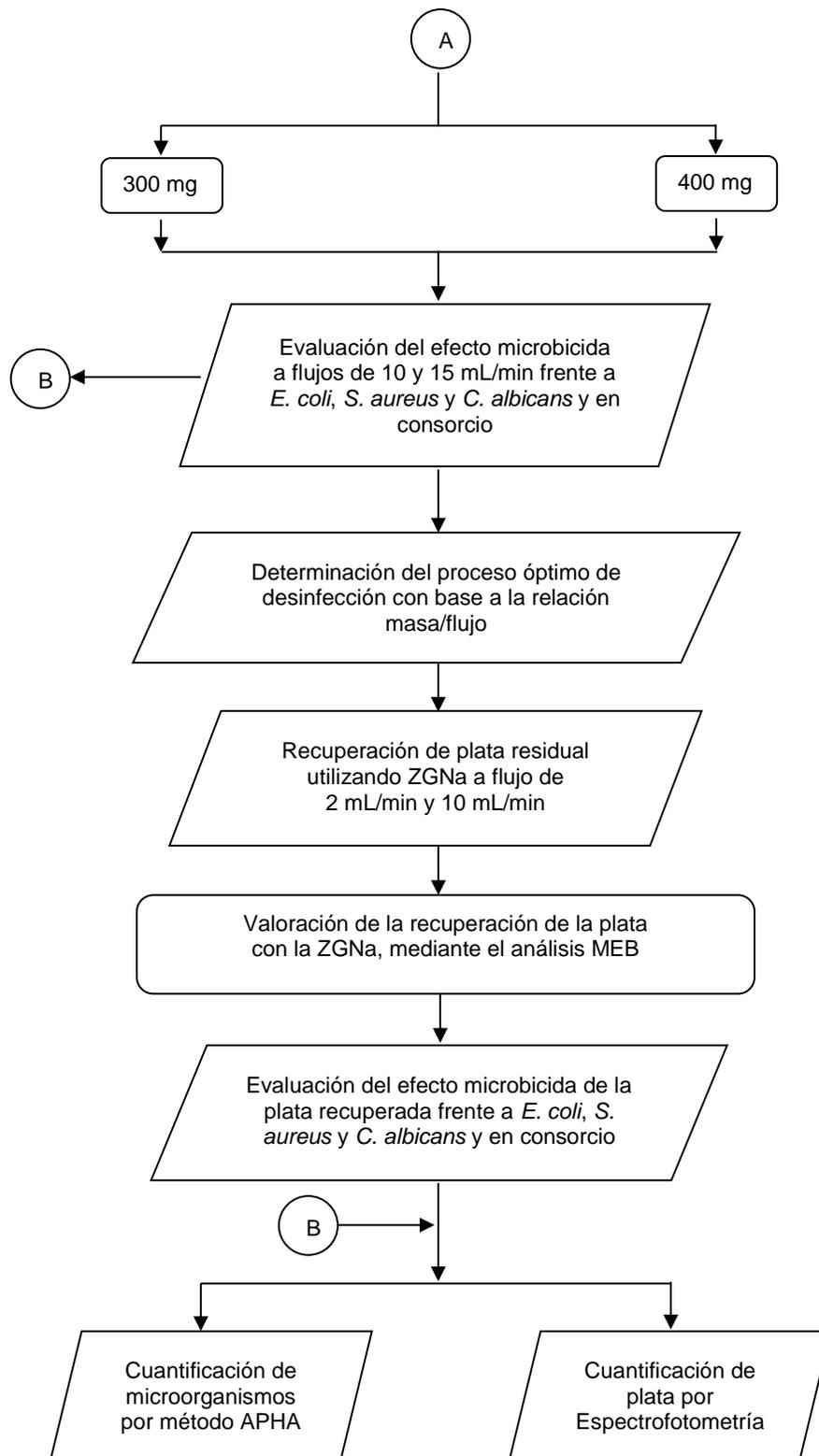


Figura 2.1. Etapas de la investigación (continuación).

2.1 Molienda y tamizado de la zeolita natural

La zeolita natural del estado de Guerrero (ZG) se trituró utilizando una prensa hidráulica Fabrexim y se molió empleando un mortero de ágata, posteriormente se tamizó para utilizar la partícula equivalente a un tamaño malla 30. El material se lavó para la eliminación de polvos y se secó a temperatura ambiente.

2.2 Acondicionamiento de la zeolita natural

Los investigadores Magaña *et al.* (2008); Hernández & Olguín (2007) y Ferreira *et al.* (2012); entre otros, han sugerido que un pre-tratamiento de las rocas zeolíticas puede aumentar sus capacidades de intercambio iónico. Las zeolitas normalmente proveen un número de diferentes ambientes intra-cristalinos para los cationes dentro de su red cristalina. Estos cationes tienen diferentes propiedades de intercambio para cada ambiente y es por esto que se recomienda un pre-tratamiento para mejorar el rendimiento en aplicaciones de intercambio iónico (Díaz *et al.*, 2005).

2.2.1 Con sodio

La muestra equivalente a un tamaño de partícula (malla 30) de la zeolita Guerrero natural (ZG) se colocó en contacto con una solución de NaCl 1 M por un periodo de 12 horas a 90 °C. Este procedimiento se repitió dos veces para después separar el material sólido a 10,000 rpm utilizando una centrífuga Hettich Zentrifugen Universal 32R y se lavaron los sólidos con agua desionizada hasta que los iones de Cl⁻ no fueran detectados con una solución de Ag NO₃. Posteriormente la muestra se secó a 85°C por 5 horas en un horno de secado de circulación forzada Riossa HCF-62, obteniendo la zeolita acondicionada con sodio (ZGNa) (Rivera, 1999).

2.2.2 Con plata

La mitad de la muestra de zeolita Guerrero acondicionada con sodio se suspendió en una solución de AgNO_3 (Kwakyé *et al.*, 2008; Inoue *et al.*, 2008; Lalueza *et al.*, 2011; Inoue & Hamashima, 2012) 0.1 M en reflujo durante 12 horas en la obscuridad. Este procedimiento se repitió dos veces, el material sólido se separó a una velocidad de 10000 rpm en una centrifuga Hettich Zentrifugen Universal 32R, el material fue lavado en agua desionizada y secado a 85°C por 5 horas (Rivera, 1999 y De la Rosa *et al.*, 2008).

2.3 Caracterización de la zeolita natural

Para determinar las características estructurales de la ZG, ZGNa y ZGAg se realizó la caracterización, utilizando las técnicas siguientes:

2.3.1 Difracción de rayos-X

Se utilizó un difractómetro Siemens D5000 acoplado a un tubo de rayos-X con un ánodo de cobre, para conocer el efecto que tiene sobre la zeolita el acondicionamiento en su estructura cristalina, esta técnica se basa en la interacción de un haz de rayos-X a una determinada longitud de onda con una sustancia cristalina y en la interferencia constructiva de las ondas que están en fase y que se dispersan en determinadas direcciones del espacio, conociendo así su estructura (Romero, 2011).

2.3.2. Microscopía electrónica de barrido

Se utilizó un microscopio electrónico JEOL JSM-6610LV en condiciones de 20 kV y 25 Pa, para observar las características texturales y morfológicas de la zeolita. El análisis elemental se llevó a cabo mediante un detector Oxford INCAx-act acoplado al microscopio con base en la espectroscopía de energía dispersiva de rayos-X (EDS), las muestras se depositaron directamente en los soportes y se cubrieron con oro para realizar las observaciones a 2000X, para conocer el porcentaje en peso de la plata presente en la zeolita.

2.4 Preparación de la suspensión de microorganismos

Se utilizaron células de *E. coli* ATCC 25922 (Gram -), *S. aureus* ATCC 6538 (Gram +) y *C. albicans* ATCC 10231 (Gram +) por ser microorganismos patógenos, propagándolos en el medio líquido Luria Bertani (LB), caldo soya tripticaseína (TSB) y caldo Sabouraud dextrosa (SD) respectivamente, para obtener el cultivo de noche.

E. coli, *S. aureus* y *C. albicans* se cultivaron en medio LB, TSB y SD a 36 °C durante 20 horas en baño María (Lab-Line Shak-R-Bath) (cultivo de noche). Los cultivos se lavaron dos veces y se sedimentaron por centrifugación a 10000 rpm utilizando un equipo Hettich Zentrifugen Universal 32R durante 10 min. Con el fin de eliminar Cl⁻ del medio de cultivo.

Se hicieron diluciones de las células de resuspendidas en agua destilada estéril hasta llegar una concentración de 10⁷ UFC/100mL esta muestra se utilizó para preparar el agua problema (De la Rosa *et al.*, 2010).

2.5 Evaluación del efecto microbicida

Se evaluó la capacidad de desinfección y la factibilidad de un tratamiento utilizando ZGAg para la eliminación de microorganismos en solución en un sistema en flujo.

2.5.1 Sobre *E. coli*, *S. aureus* y *C. albicans* en suspensión acuosa

Se utilizó para cada masa una columna de vidrio de 1 cm de diámetro por 40 cm de altura y se colocó 300 y 400 mg de ZGAg (malla 30) sobre un soporte inerte. Se usó agua conteniendo 10^7 UFC/100mL de células de *E. coli*, bombeando a través de la columna a un flujo de 10 mL/min y posteriormente bajo las mismas condiciones se utilizó un flujo de 15 mL/min; de la misma manera este proceso se llevó a cabo utilizando *S. aureus* y *C. albicans*. Se realizó el mismo procedimiento utilizando 300 mg de ZGNa y un flujo de 10 mL/min como testigo.

2.5.2 Sobre un consorcio microbiano en suspensión acuosa

En una columna de vidrio de 1 cm de diámetro por 40 cm de altura se colocó 300 y 400 mg de ZGAg (malla 30) sobre un soporte inerte. Se usó agua conteniendo 10^7 UFC/100mL de un consorcio de células de *E. coli*, *S. aureus*, y *C. albicans* a un flujo de 10 mL/min posteriormente bajo las mismas condiciones se utilizó un flujo de 20 mL/min. Se realizó el mismo procedimiento utilizando 300 mg de ZGNa y un flujo de 10 mL/min como testigo.

2.6 Cuantificación de microorganismos y de plata

Del efluente se tomaron muestras alícuotas de 1 mL y se diluyeron con 30 mL de solución de fosfatos 0.01 M, para filtrarlas a través de una membrana con un tamaño de poro de 0.45 micras, conforme al método APHA (1992); para cuantificar bacterias coliformes totales (*E. coli*), las membranas fueron colocadas sobre paths Millipore que contenían 2 mL de medio de cultivo m-EndoBroth marca Difco y medio TSB marca Difco para el crecimiento de *S. aureus* y *C. albicans*, por separado. Las membranas se incubaron a 36 °C durante 24 horas en una estufa de cultivo Shel Lab LI5. Las colonias de microorganismos se cuantificaron mediante el uso de un contador Sol-Bat-Q-20. Se consideró el logaritmo natural de las unidades formadoras de colonias por 100 mL (Ln UFC/100mL) como lo marca la NOM-127-SSA1-1994, con la finalidad de usarlos en las cinéticas de desinfección. La concentración de microorganismo fue monitoreada durante el proceso de desinfección.

Para determinar la concentración de plata en el efluente se tomaron muestras durante el proceso de desinfección. Después de obtener la muestra del proceso se agregó ácido nítrico concentrado hasta obtener un pH de 3, con el fin de conservar la especie de plata. Para la cuantificación de plata en el efluente se utilizó un espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer 3110 a una λ de 328.1 nm; la concentración de plata se presenta en mg/L y los análisis se hicieron por triplicado.

2.7 Recuperación de la plata residual

Se utilizó una columna de vidrio de 1 cm de diámetro utilizando 300, 400 y 600 mg de zeolita acondicionada con sodio (ZGNa) malla 30 sobre un soporte inerte. Inicialmente se utilizó agua preparada en laboratorio con concentraciones de 0.5, 1, 1.5 y 2 mg/L de plata, rango en el cual se encuentran las muestras provenientes de los efluentes de procesos de desinfección (muestras reales). Estas pruebas se realizaron con el fin de

encontrar las condiciones óptimas masa-flujo para llevar a cabo la recuperación de la plata residual. Posteriormente se utilizó el agua del efluente del inciso 6.5 que contiene la plata residual, a flujos de 2, 5 y 10 mL/min para cada masa de zeolita.

2.8 Determinación de la plata recuperada por la ZGNa

La determinación de capacidad de recuperación de plata residual utilizando ZGNa, se llevó a cabo mediante microscopia electrónica de barrido, utilizando un microscopio electrónico JEOL JSM-6610LV en condiciones de 20 kV y 25 Pa. Las muestras se colocaron en los soportes del equipo y se cubrieron con oro para realizar las observaciones a 2000X. El análisis elemental se llevó a cabo mediante un detector Oxford INCAx-act acoplado al microscopio con base en la espectroscopia de energía dispersiva de rayos-X (EDS), para conocer el porcentaje en peso de plata en la zeolita.

2.9 Evaluación del efecto microbicida de la zeolita acondicionada con la plata recuperada sobre células de *E. coli*, *S. aureus* y *C. albicans* en suspensión acuosa

La evaluación del efecto microbicida sobre el consorcio de células se realizó conforme a lo descrito en el punto 2.5.2, utilizando los parámetros de operación de 400 mg de zeolita Guerrero acondicionada con plata recuperada (ZGAgR) y un flujo de 10 mL/min.

2.10 Modelado de curvas de ruptura usando ecuaciones no lineales

El análisis de los resultados de las pruebas experimentales se ajustó a el modelo de crecimiento logístico descrito en el apartado 1.6, los datos se obtuvieron utilizando el software Origin Pro 8.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización de la zeolita

3.1.1 Difracción de rayos-X

En las figuras 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4 se muestran los resultados del análisis por difracción de rayos-X realizado a la ZG, a la ZGNa y a la ZGAg.

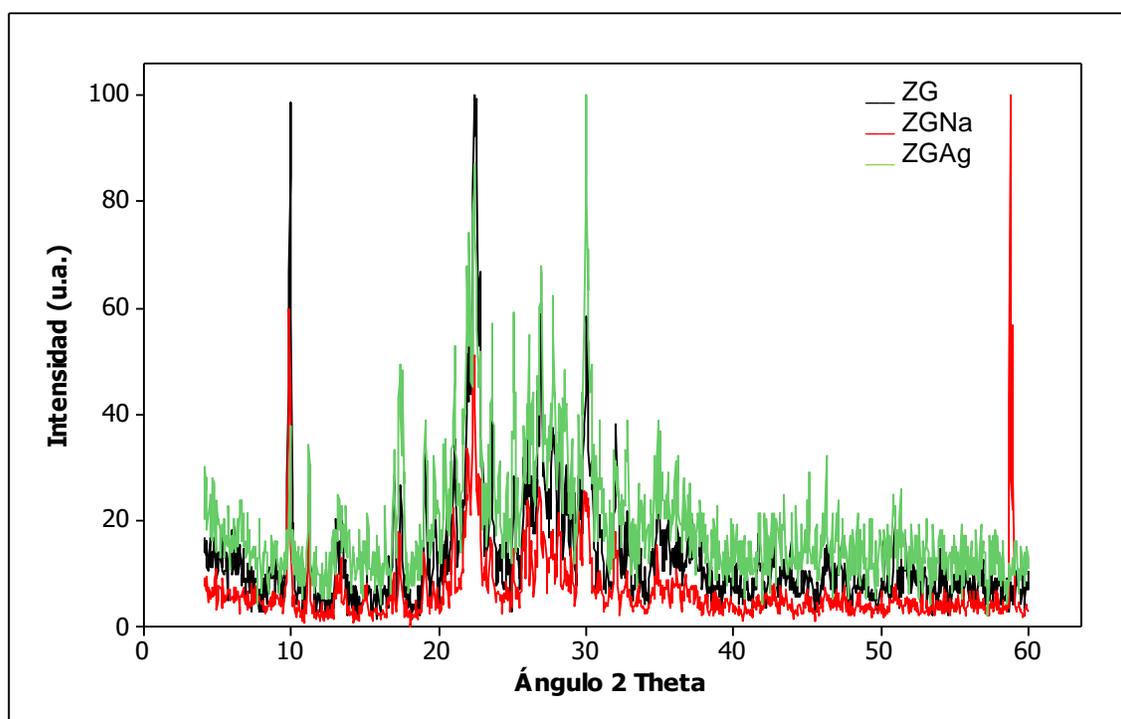


Figura 3.1. Patrones de difracción de rayos-X de las ZG, ZGNa y ZGAg

En la Figura 3.1 se observa que las ZGNa y ZGAg no tuvieron cambios en la estructura cristalina al comparar los patrones de difracción con los de la ZG, debido a que no existe desplazamiento en las reflexiones, solo cambian las intensidades de estas a lo largo del patrón de difracción, debido al intercambio de los iones de la zeolita.

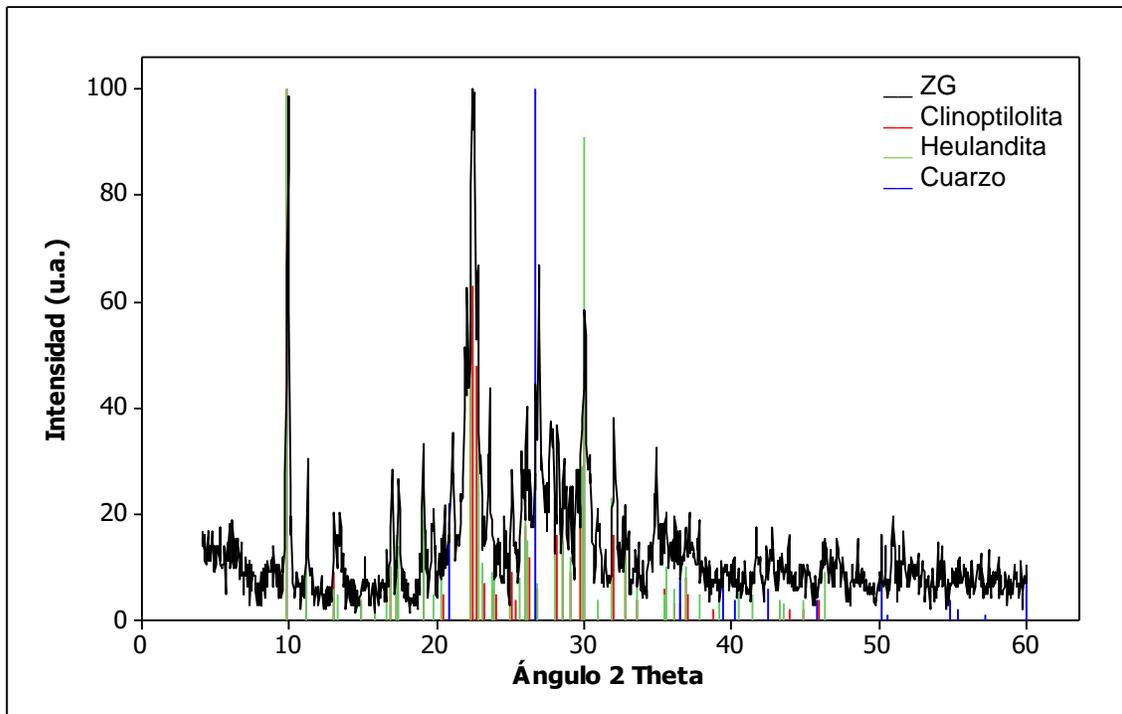


Figura 3.2. Patrón de difracción de rayos-X de la ZG

En las Figuras 3.2, 3.3 y 3.4 las ZG, ZGNa y ZGAg respectivamente se compararon con los patrones de difracción de clinoptilolita, heulandita y cuarzo, dichos patrones se obtuvieron de las tarjetas de referencia del “Joint Committee on powder diffraction standards (JCPDS)” para la clinoptilolita (JCPDS01-072-7919) y la heulandita (JCPDS-ICDD-41-1357), encontrando concordancia con los patrones de difracción de rayos-X de las muestras; confirmando que la clinoptilolita es el componente principal y que no es representativo el contenido de cuarzo (JCPDS 03-065-0466) presente en la zeolita procedente del Estado de Guerrero.

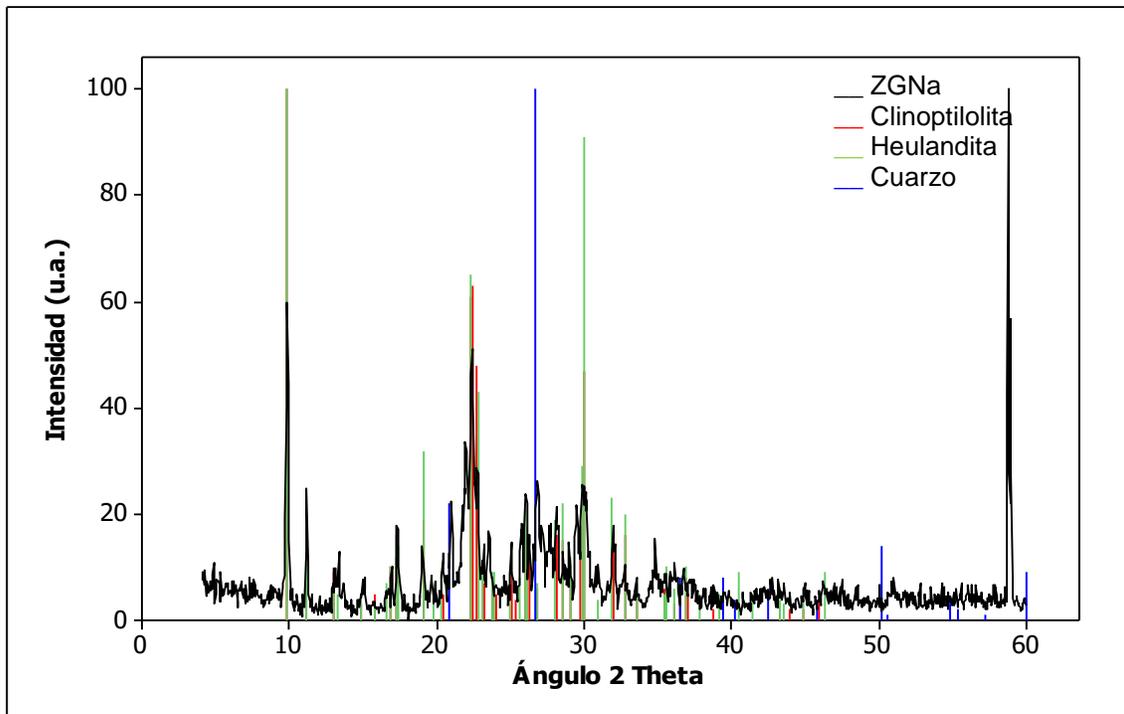


Figura 3.3. Patrón de difracción de rayos-X de la ZGNa

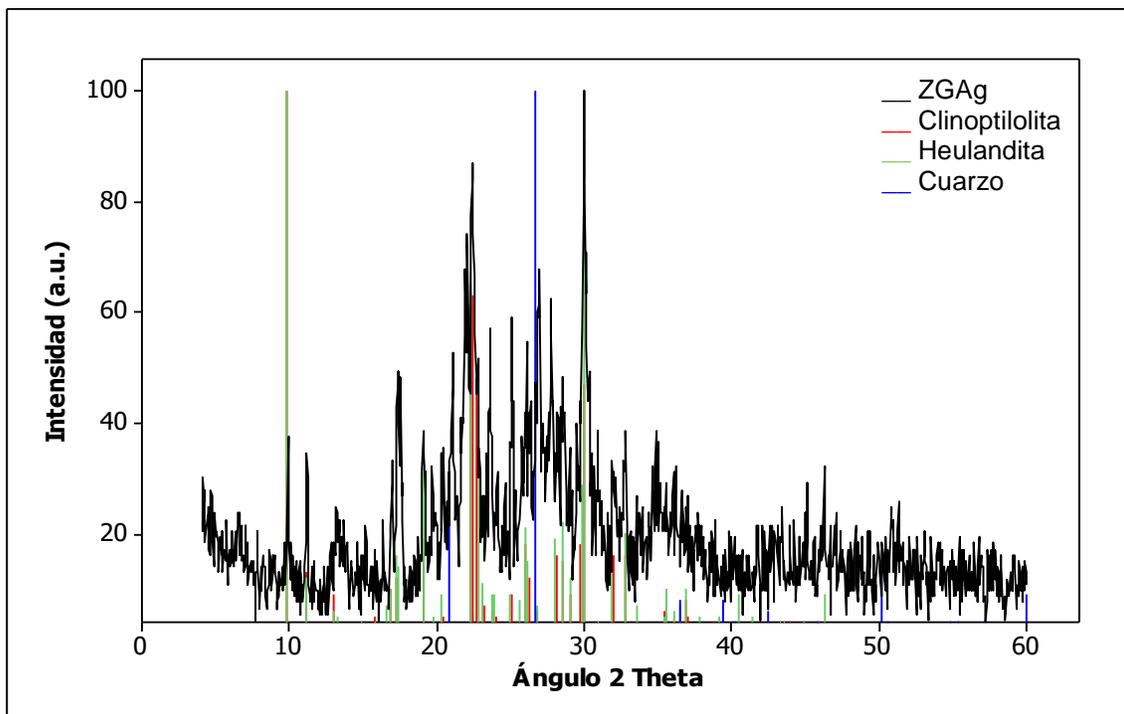


Figura 3.4. Patrón de difracción de rayos-X de la ZGAg

3.1.2 Microscopía electrónica de barrido

La imagen de microscopía electrónica de barrido (MEB) de la ZG (Figura 3.5), muestra que los cristales tienen una forma hexagonal (ataúdes), con aristas definidas y biseladas, resultados similares se determinaron por De la Rosa *et al.* (2008); el espectro de energías (EDS) de este mismo material revela la presencia de O, Na, Mg, Al, Si, K, Ca y Fe (Figura 3.6).

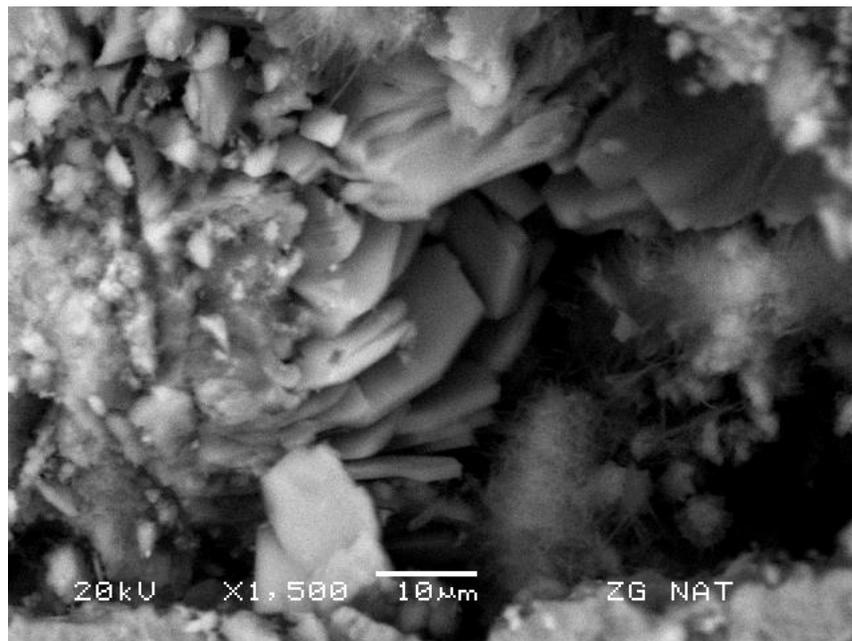


Figura 3.5. Imagen MEB de la ZG

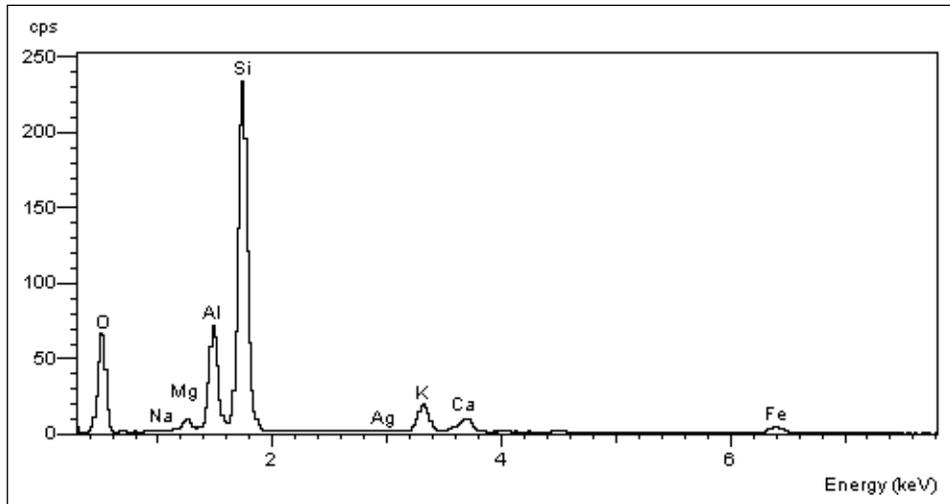


Figura 3.6. Análisis elemental (EDS) de la ZG

En las Figuras 3.7 y 3.8 se muestran la imagen (MEB) y el espectro de energías de la ZGNa.

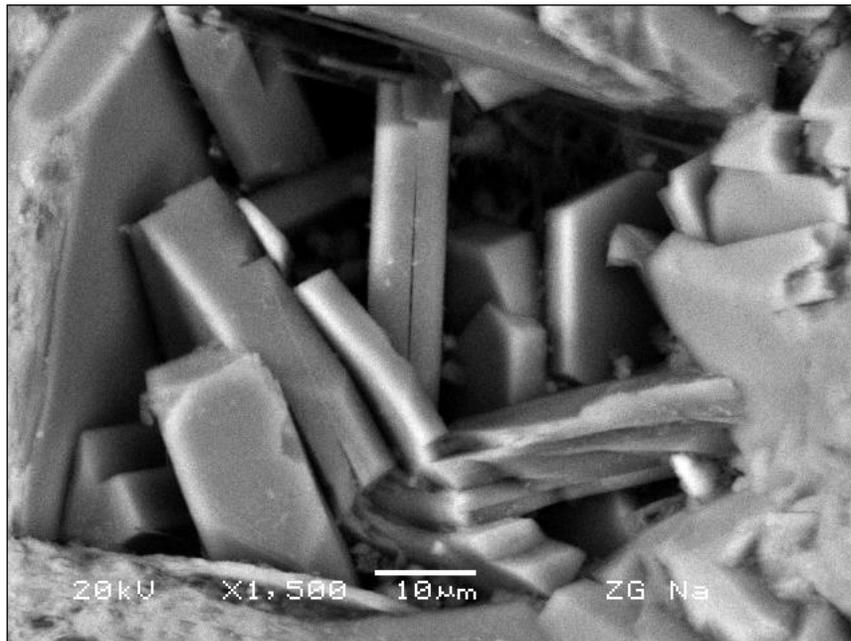


Figura 3.7. Imagen MEB de la ZGNa

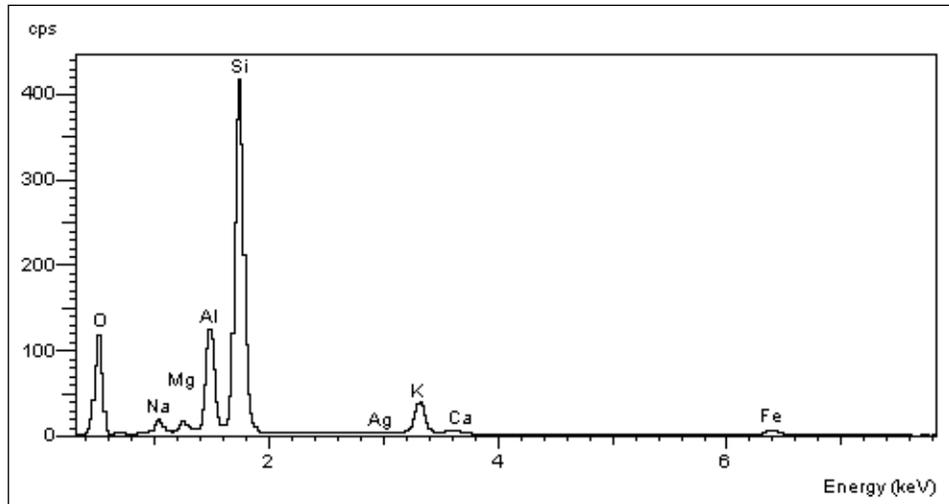


Figura 3.8. Análisis elemental (EDS) de la ZGNa

No se observaron cambios en la morfología de la ZGNa con relación a la ZG, sin embargo, en la ZGAg se observaron pequeñas partículas en la superficie (Rivera, 1999). Como se puede ver en la Figura 3.9, el análisis elemental (EDS) de dichas partículas mostró la presencia de plata (Figura 3.10) (Kwakye *et al.*, 2008). Este es un factor importante para considerar a la ZGAg como agente microbicida.

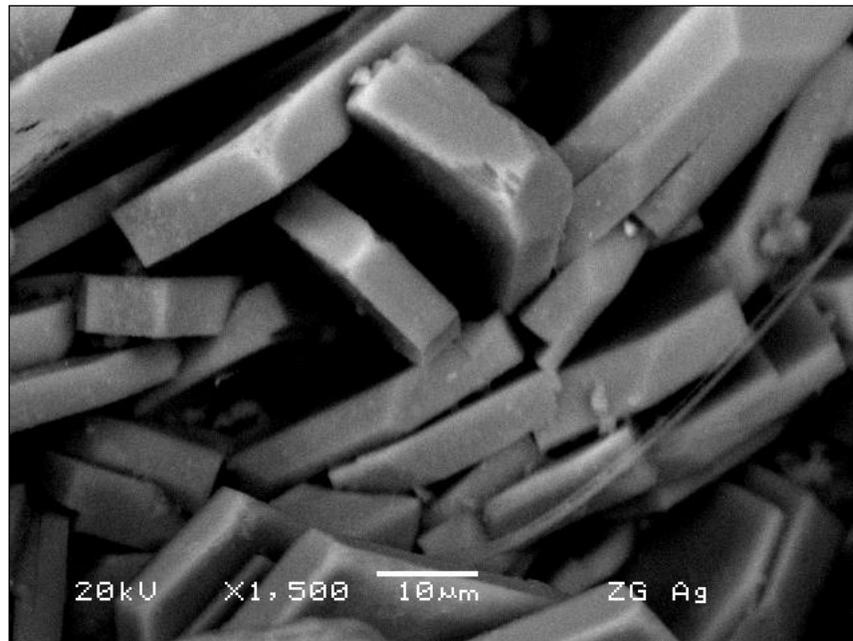


Figura 3.9. Imagen MEB de la ZGAg

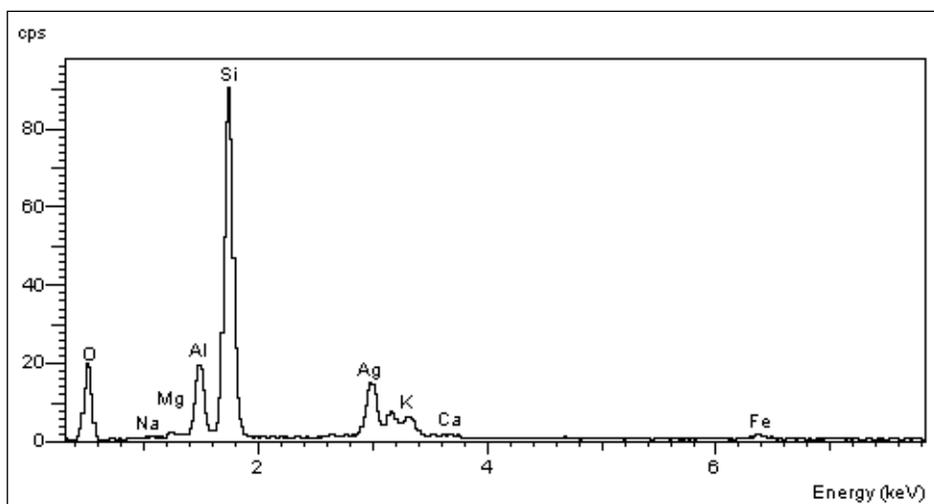


Figura 3.10. Análisis elemental (EDS) de la ZGAg

El análisis elemental (Tabla 3.1) para el caso de la ZG muestra que es una zeolita potásica, debido a que este elemento es mayoritario que el resto de los iones de intercambio. Para la ZGNa se observa que los iones de intercambio fueron principalmente los de calcio, hierro y potasio (58.8, 49.5 y 26.4% de su peso inicial, respectivamente). Se obtuvo un 12.9 % en peso de plata en la ZGAg debido al intercambio de los iones Ag^+ principalmente por iones Na^+ (Magaña, 2008) y Ca^{+2} en un 97.1 y 43.3 %, respectivamente.

Tabla 3.1. Análisis elemental de la roca la roca zeolítica del Estado de Guerrero.

Elemento	% en peso		
	ZG	ZGNa	ZGAg
O	46.52 ± 2.02	49.17 ± 2.51	42.54 ± 1.62
Na	0.05 ± 0.04	2.40 ± 0.49	0.07 ± 0.04
Mg	0.89 ± 0.15	0.91 ± 0.26	0.70 ± 0.25
Al	7.41 ± 1.57	7.11 ± 1.39	6.74 ± 1.05
Si	34.89 ± 2.16	34.23 ± 0.59	31.53 ± 1.04
K	5.15 ± 1.10	3.79 ± 0.79	2.98 ± 1.04
Ca	2.27 ± 0.80	0.98 ± 0.90	0.56 ± 0.17
Fe	2.83 ± 0.31	1.43 ± 0.61	1.96 ± 0.72
Ag	0.00	0.00	12.93 ± 2.79
Total	100.00	100.00	100.00

3.2 Evaluación del efecto microbicida de la zeolita acondicionada con Na y Ag sobre un consorcio de *E. coli*, *S. aureus* y *C. albicans* en suspensión acuosa

Con frecuencia se hace referencia a elementos traza o micronutrientes como el sodio, aunque en la mayoría de los microorganismos no se puede demostrar un requerimiento de sodio existen ciertas bacterias marinas que lo requieren a concentraciones elevadas (Stanier *et al.*, 1992). Esto nos indica que los iones de sodio no ofrecerán un efecto microbicida, por el contrario, se podrían considerar como nutriente ya que estabilizan o activan los compuestos biológicos como enzimas, ribosomas, membranas, entre otros.

3.2.1 Para la ZGNa

En la Tabla 3.2 se muestra que la ZGNa no ofreció efecto microbicida sobre las células de *E. coli*, *S. aureus* y *C. albicans*, este ensayo se realizó como prueba de referencia del proceso de desinfección llevándose a cabo de manera independiente entre microorganismos.

Tabla 3.2. Efecto microbicida de la ZGNa empleando a *E. coli*, *S. aureus* y *C. albicans* como microorganismo de prueba.

t (horas)	V (mL)	300 mg ZGNa - 10 mL/min					
		<i>E. coli</i>		<i>S. aureus</i>		<i>C. albicans</i>	
		UFC	Ln UFC/100mL	UFC	Ln UFC/100mL	UFC	Ln UFC/100mL
Blanco	-	0	0	0	0	0	0
0	0	107000	11.58	70000	11.16	4000	8.29
1	600	3000	8.01	30000	10.31	1000	6.91
2	1200	5000	8.52	10000	9.21	5000	8.52
3	1800	7000	8.85	10000	9.21	10000	9.21
4	2400	2000	7.60	100000	11.51	10000	9.21
5	3000	11000	9.31	50000	10.82	19000	9.85
6	3600	40000	10.60	40000	10.60	29000	10.28

La prueba se realizó en el tiempo en que se obtuvo de desinfección (6 horas) con otros microorganismos (Figura 3.11); un estudio realizado por Rivera (1999), De la Rosa *et al.* (2008), Guerra *et al.* (2012) y Rossainz (2013) encontraron resultados similares para *E. coli*, donde la zeolita libre de plata permitió la reproducción del microorganismo.

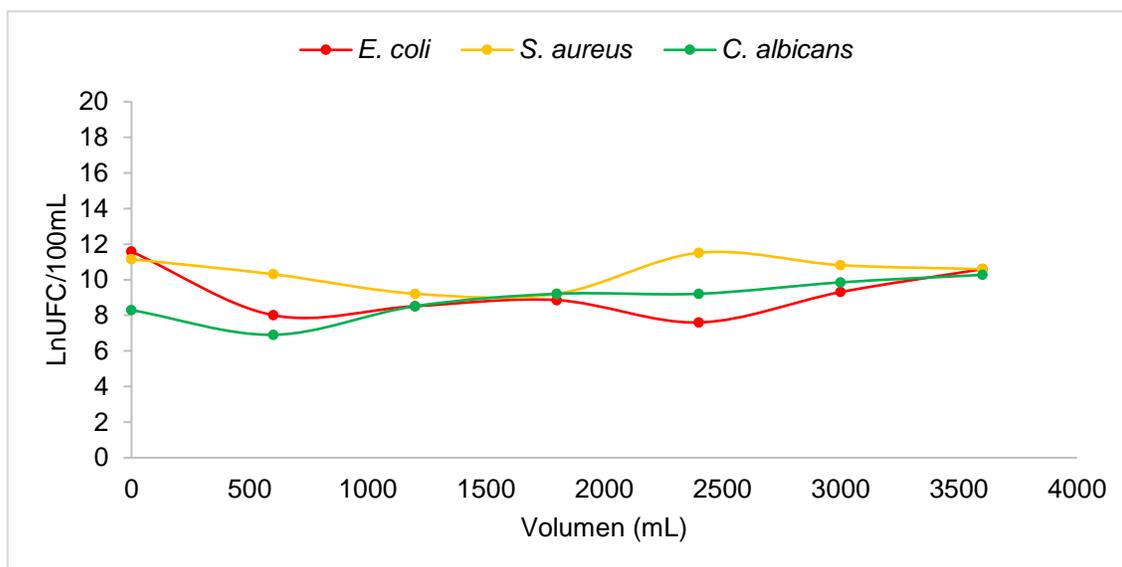


Figura 3.11. Efecto microbicida de la ZGNa sobre *E. coli*, *S. aureus* y *C. albicans*

3.2.2 Para el sistema: 300 mg de ZGAg y 10 mL/min

Al utilizar la *E. coli* como microorganismo de prueba para el proceso de desinfección se observó (Tabla 3.3) el efecto microbicida del 100 % de forma similar a Rivera (1999), De la Rosa *et al.* (2008) durante 5.5 horas, desinfectando 3300 mL de agua.

Tabla 3.3. Efecto microbicida de la ZGAg empleando a *E. coli*
(masa: 300mg y Φ : 10 mL/min)

tiempo (horas)	Volumen (mL)	<i>E. coli</i>		Plata
		300 mg ZGAg - 10mL/min		mg/L
		UFC/mL	LnUFC/100mL	
Blanco	-	0.00	0.00	-
0	0	47333.33	15.37	-
1	600	0	0	1.38
2	1200	0	0	1.11
3	1800	0	0	1.09
4	2400	0	0	1.02
4.5	2700	0	0	0.93
5	3000	0	0	0.86
5.5	3300	0	0	0.88
6	3600	28.67	7.96	0.87
6.5	3900	93	9.14	0.87
7	4200	103.67	9.25	086

En la Figura 3.12 se muestra, que la concentración de plata liberada en el efluente por la ZGAg fue de 1.38 mg/L (0.0128 meq/L), en un tiempo de 60 min (correspondiente a 600 mL de agua), la cual fue decreciendo hasta las 5.5 h, llegando a 0.88 mg/L.

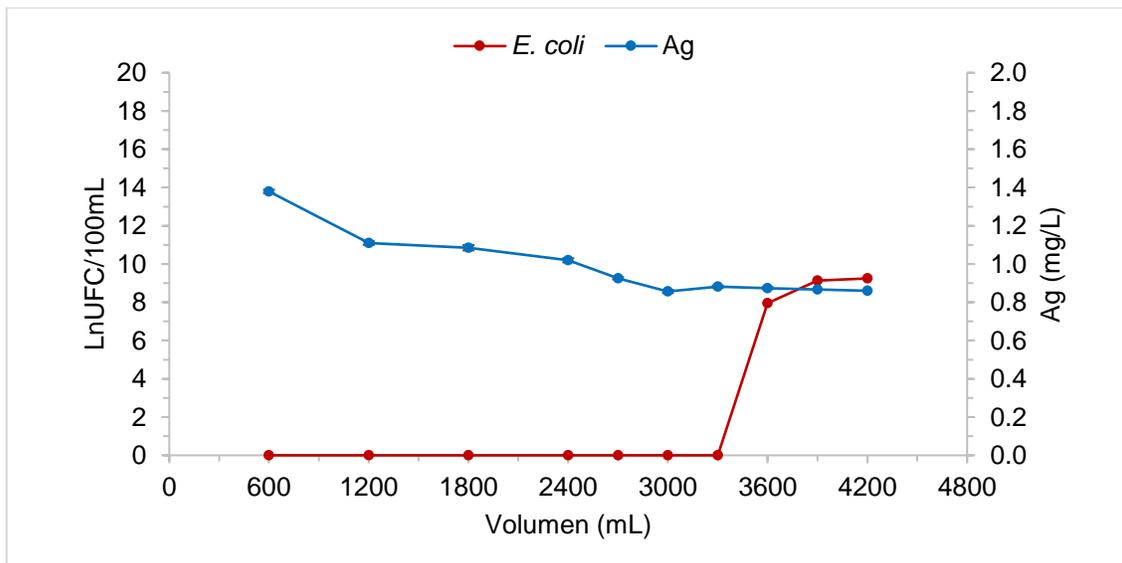


Figura 3.12. Efecto microbicida de la ZGAg sobre *E. coli*
(masa: 300mg y Φ : 10 mL/min)

Debajo de tal concentración de plata, las células de *E. coli* recuperan su crecimiento en un 52 %; respecto a la concentración inicial de microorganismos. Mthombeni *et al.* (2012), mostraron que el punto de ruptura al que las bacterias aparecieron por primera vez en el agua del efluente se alcanzó en condiciones similares a las obtenidos en el presente trabajo. Akhigbe *et al.* (2016) obtuvieron resultados similares frente a *E. coli* y argumentan que detuvieron el proceso, debido a la obstrucción del lecho (formación de biofilm) con pérdida de la eficiencia en la desinfección.

Para el *S. aureus*, se aprecia en la Tabla 3.4, que la desinfección después del proceso en flujo continuo utilizando 300 mg de la ZGAg, fue de 1800 mL. Sin embargo, para el caso del *E. coli*, se desinfectaron 3300 mL de agua, esto es 1.8 veces más, que con respecto a *S. aureus*. Esto significa que *S. aureus* genera una mayor resistencia a la actividad microbicida de la ZGAg con relación a la *E. coli*; probablemente debido a las diferencias en su conformación estructural y fisiológica.

Tabla 3.4. Efecto microbicida de la ZGAg empleando a *S. aureus*
(masa: 300mg y Φ : 10 mL/min)

tiempo (horas)	Volumen (mL)	<i>S. aureus</i>		Plata mg/L
		300 mg ZGAg - 10mL/min		
		UFC/mL	LnUFC/100mL	
Blanco	-	0	0	-
0	0	129000	16.37	-
1	600	0	0	1.93
2	1200	0	0	1.67
3	1800	0	0	1.48
4	2400	124	9.43	1.24
4.5	2700	1246.67	11.73	1.21
5	3000	1250	11.74	1.10
5.5	3300	1556.67	11.96	1.02
6	3600	4233.33	12.96	1.04

En la Figura 3.13 se observa, que con una concentración de plata de 1.93 a 1.48 mg/L (0.0179 a 0.0137 meq/L) en el agua, no existe supervivencia del *S. aureus*. Posteriormente, la concentración de plata en la solución fue disminuyendo hasta

alcanzar una concentración de 1.24 mg/L (0.0115 meq/L), observándose un incremento en la población de *S. aureus* en un 58 %, con respecto al número inicial de colonias.

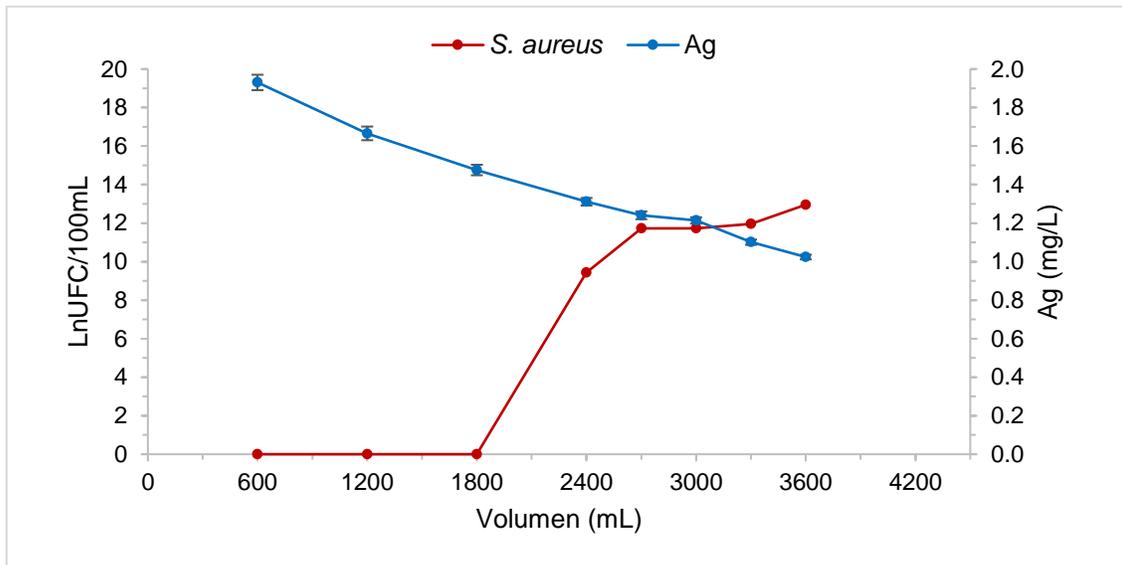


Figura 3.13. Efecto microbicida de la ZGAg sobre *S. aureus*
(masa: 300mg y Φ : 10 mL/min)

Debido a lo mencionado por Akhigbe *et al.* (2016), sobre la formación de biofilm durante el proceso de desinfección y la publicado por Monds & O'Toole (2009), en donde mencionan que este proceso es único en biología, debido a que involucra la actividad coordinada de varios genomas de procariontes relativamente pequeños, en comparación con los grandes genomas eucarióticos, para generar una comunidad funcional multicelular. Este proceso de formación se inicia mediante la unión de células planctónicas a las superficies (Simoes *et al.*, 2007). La adhesión bacteriana se ve afectada por las condiciones ambientales de la red, entre ellas las fuerzas hidráulicas, el régimen desinfectante y el material; así como por las características intrínsecas de las células, como la hidrofobicidad, la carga superficial, la producción de polisacáridos y la motilidad celular (Li & Logan, 2004; Simoes *et al.*, 2010). El *S. aureus* posee las características para formar biofilm, ya que regulan este proceso en respuesta a la señalización célula-célula llamado *Quorum-sensing* (QS), en estafilococos el sistema

QS es llamado agr (gene accesorio regulador), el cual regula procesos que incluyen factores de virulencia, producción de antibióticos y formación de biofilm, este lo utiliza para adherirse y colonizar nuevos sitios, además de protegerlas de la fagocitosis, así como de los antibióticos (Cervantes-Gracia *et al.*, 2014). Dados estos fundamentos hacen suponer, que la resistencia que ofrece el *S. aureus* se debe en parte, a la formación de biofilm en la zeolita.

La Tabla 3.5 muestra que *C. albicans* fue el microorganismo de prueba más resistente a la actividad microbiciada de la ZGAg (para una masa de 300 mg), con relación a *E. coli* y *S. aureus*, ya que no se observaron UFC/100 mL en el efluente, hasta un volumen de 1200 mL, siendo dicho volumen 2.75 y 1.5 veces menor, que con respecto al volumen desinfectado para *E. coli* y *S. aureus*, respectivamente.

Tabla 3.5. Efecto microbiciada de la ZGAg empleando a *C. albicans* (masa: 300 mg y Φ : 10 mL/min).

tiempo (horas)	Volumen (mL)	<i>C. albicans</i>		Plata mg/L
		300 mg ZGAg - 10mL/min		
		UFC/mL	LnUFC/100mL	
Blanco	-	0	0	-
0	0	19000	14.46	-
1	600	0	0	1.21
2	1200	0	0	0.95
2.5	1500	8	6.68	0.85
3	1800	34	8.13	0.84
3.5	2100	410	10.62	0.83
4	2400	166.67	9.72	0.76
4.5	2700	193.33	9.87	0.66
5	3000	700	11.16	0.63

En la Figura 3.14 se observa la concentración de plata dentro del intervalo de 1.21 a 0.85 mg/L (0.0112 a 0.0078 meq/L), presentando una mortandad del 100% sobre la *C. albicans*. Sin embargo, cuando la concentración de plata disminuyó de 0.85 mg/L, la *C. albicans* incrementó su población en un 46 %, considerando la población microbiana inicial (Tabla 3.5).

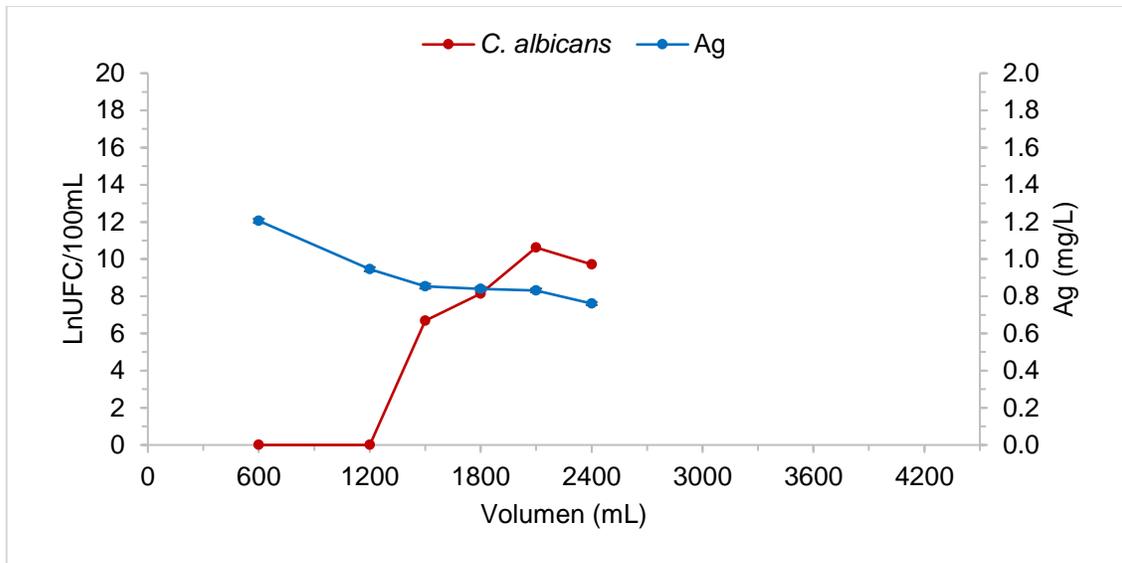


Figura 3.14. Efecto microbicida de la ZGAg sobre *C. albicans*
(masa: 300mg y Φ : 10 mL/min)

Se muestra en la Tabla 3.6 el resultado del proceso de desinfección del agua, utilizando la misma masa de 300 mg de la ZGAg frente al consorcio de microorganismos formado por *E. coli*, *S. aureus* y *C. albicans*, se encontró un comportamiento diferente al observado para los microorganismos de manera individual. En este caso, no se aprecian UFC/100 mL a las 0.83 horas (correspondiente a un volumen de 498 mL) para *E. coli* y *S. aureus* y a hasta las 4 horas (volumen de 2400 mL), no se observó crecimiento de *C. albicans* (Figura 5). En el consorcio de microorganismos, la *E. coli* y el *S. aureus* son igualmente resistentes a la actividad microbicida de la ZGAg. Sin embargo, *C. albicans* es más lábil.

Tabla 3.6. Efecto microbicida de la ZGAg empleando un consorcio microbiano como células de prueba (masa: 300 mg y Φ : 10 mL/min).

tiempo (horas)	Volumen (mL)	300 mg ZGAg - 10mL/min						Plata (mg/L)
		<i>E. coli</i>		<i>S. aureus</i>		<i>C. albicans</i>		
		UFC/mL	LnUFC/100mL	UFC/mL	LnUFC/100mL	UFC/mL	LnUFC/100mL	
Blanco	-	0	0	0	0	0	0	-
0	0	38	15.50	104000	16.16	24333.33	14.70	-
1	600	0	0	0	0	0	0	0.74
2	1200	2.67	5.59	83.33	9.03	0	0	0.54
3	1800	0	0.00	426.67	10.66	0	0	0.47
4	2400	19.67	7.58	171	9.75	0	0	0.49
4.5	2700	5.67	6.34	127.50	9.45	-	-	0.46
5	3000	14.33	7.27	25000	14.37	-	-	0.45
5.5	3300	86.33	9.06	-	-	-	-	0.41
6	3600	105.33	9.26	-	-	-	-	0.41

En la Figura 3.15 muestra el comportamiento contrario al presentado en el tratamiento en forma independiente, este resultado indica el importante papel que tiene la morfología y fisiología de cada microorganismos como lo indica Pardi & Cardozo (2002) y Puerta & Mateos (2010).

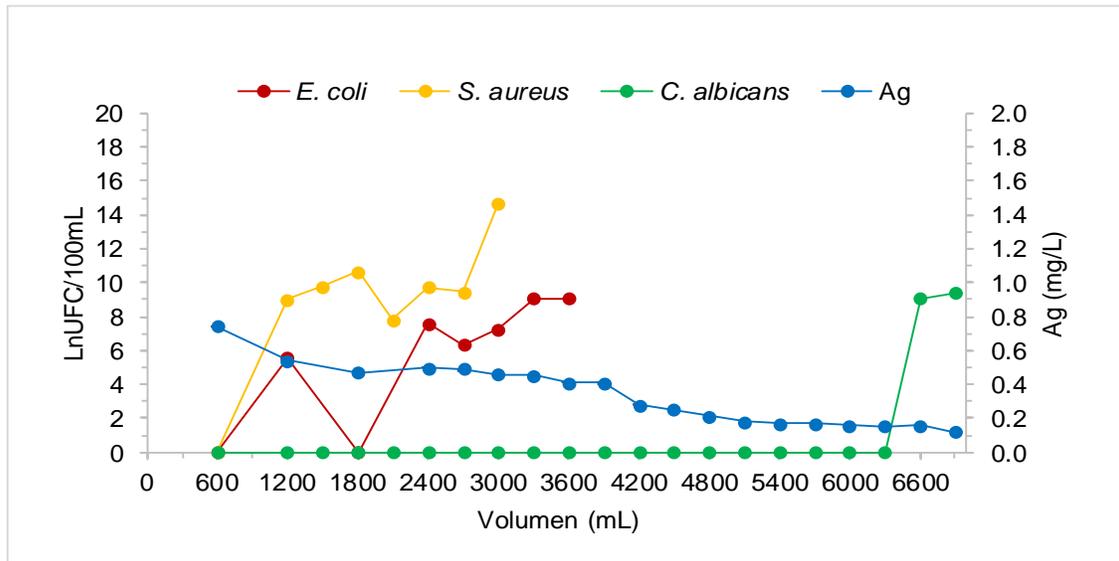


Figura 3.15. Efecto microbicida de la ZGAg sobre un consorcio microbiano (masa: 300mg y Φ : 10 mL/min)

Este cambio en el comportamiento del proceso de desinfección debido al consorcio microbiano, posiblemente se deba a la formación de un biofilm (Simoes *et al.*, 2007) que se ve favorecido en células que presentan una alta adhesión, debido a la producción de polisacáridos (Li & Logan, 2004; Simoes *et al.*, 2010). El proceso bioquímico de formación de biofilm conocido como QS, juega un papel importante en la fijación inicial de las células a las superficies y en el control del crecimiento del biofilm. Los sistemas QS también están involucrados en la síntesis de polisacáridos, adherencia microbiana, división celular y motilidad (Lazar, 2011; Douterelo *et al.*, 2014).

3.2.3 Sistema: 400 mg de ZGAg y 10 mL/min

Cuando la cama de zeolita se incrementa de 300 a 400 mg (Tabla 3.7), no se observan UFC/100 mL de *E. coli* hasta las 7.5 horas, desinfectándose un volumen de agua de 4500 mL. Este volumen es 1.36 veces mayor, que cuando se emplean 300 mg del material zeolítico. La concentración inicial de plata en el efluente, dentro del periodo de desinfección varió entre 1.10 y 0.75 mg/L. Después de las 7.5 horas, la concentración de plata decrece ligeramente a 0.71 mg/L y las células de *E. coli* recuperan su crecimiento en un 70 %, respecto de la concentración inicial.

Comparando los procesos de desinfección utilizando 300 y 400 mg de ZGAg se observa que la vida útil de la columna aumentó con la altura del lecho, teniendo un mayor rendimiento de la columna al utilizar 400 mg de ZGAg (Figura 3.16), resultados similares obtuvieron Mthombeni *et al.* (2012) utilizando perlas de resina modificadas con nanopartículas y Akhigbe *et al.* (2016) al utilizar 1, 2 y 5 mg de zeolita clinoptilolita.

Tabla 3.7. Efecto microbicida de la ZGAg empleando a *E. coli*
(masa: 400mg y Φ : 10 mL/min)

tiempo (horas)	Volumen (mL)	<i>E. coli</i>		Plata (mg/L)
		400 mg ZGAg - 10mL/min		
		UFC/mL	LnUFC/100mL	
Blanco	-	0	0	-
0	0	83333.33	15.94	-
1	600	0	0	1.07
2	1200	0	0	0.99
3	1800	0	0	0.86
4	2400	0	0	0.86
5	3000	0	0	0.88
6	3600	0	0	0.80
6.5	3900	0	0	1.25
7	4200	0	0	0.89
7.5	4500	0	0	0.75
8	4800	686.67	11.14	0.71
8.5	5100	976.67	11.49	0.68
9	5400	16.67	7.42	0.65
9.5	5700	770	11.25	0.60
10	6000	96	9.17	0.53

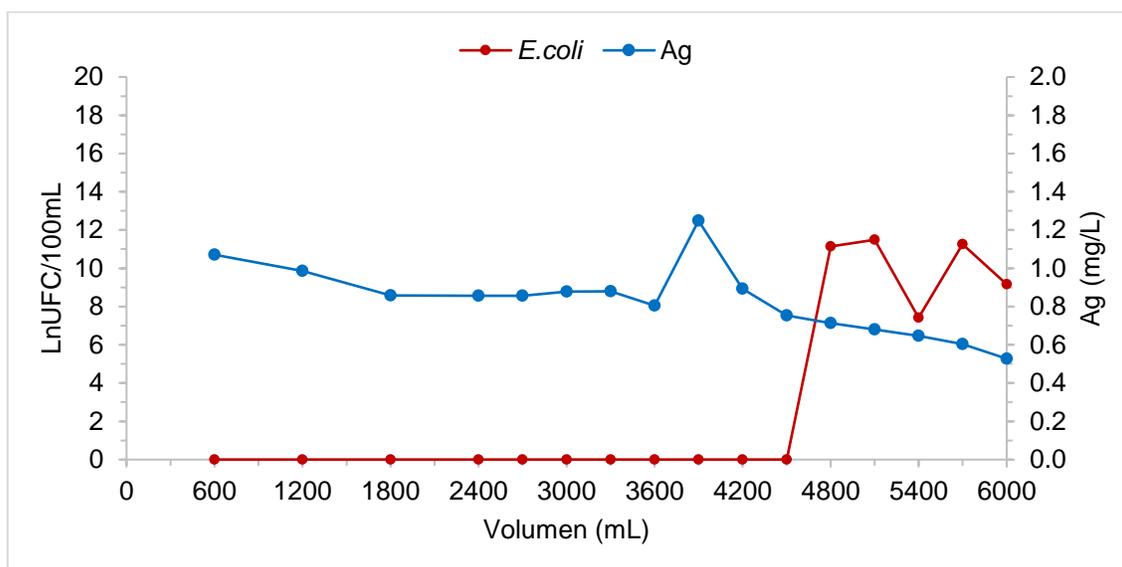


Figura 3.16. Efecto microbicida de la ZGAg sobre *E. coli*
(masa: 400mg y Φ : 10 mL/min)

En la Tabla 3.8 se observa que, para la desinfección del agua por la acción microbicida de 400 mg de la ZGAg frente a *S. aureus*, la concentración de plata inicialmente es menor a la encontrada para una cama de 300 mg.

Tabla 3.8. Efecto microbicida de la ZGAg empleando a *S. aureus*
(masa: 400mg y Φ : 10 mL/min)

tiempo (horas)	Volumen (mL)	<i>S. aureus</i>		Plata mg/L
		400 mg ZGAg - 10mL/min		
		UFC/mL	LnUFC/100mL	
Blanco	-	0	0	-
0	0	198333.33	16.80	-
1	600	0	0	1.29
2	1200	0	0	0.91
3	1800	0	0	1.41
4	2400	0	0	1.17
4.5	2700	0	0	1.10
5	3000	0	0	1.09
5.5	3300	0	0	1.14
6	3600	0	0	1.01
6.5	3900	0	0	1.03
7	4200	165.33	9.71	0.88
7.5	4500	11433.33	13.95	0.90
8	4800	10966.67	13.91	1.03

La Figura 3.17 muestra, que la cantidad de Ag liberada de la ZGAg al efluente no depende necesariamente de la masa inicial del material zeolítico, con la que se empaca la columna. Gonzaga (2013), encontró un comportamiento similar, al utilizar masas de 100 y 200 mg de una zeolita natural acondicionada con plata del Estado de Guerrero.

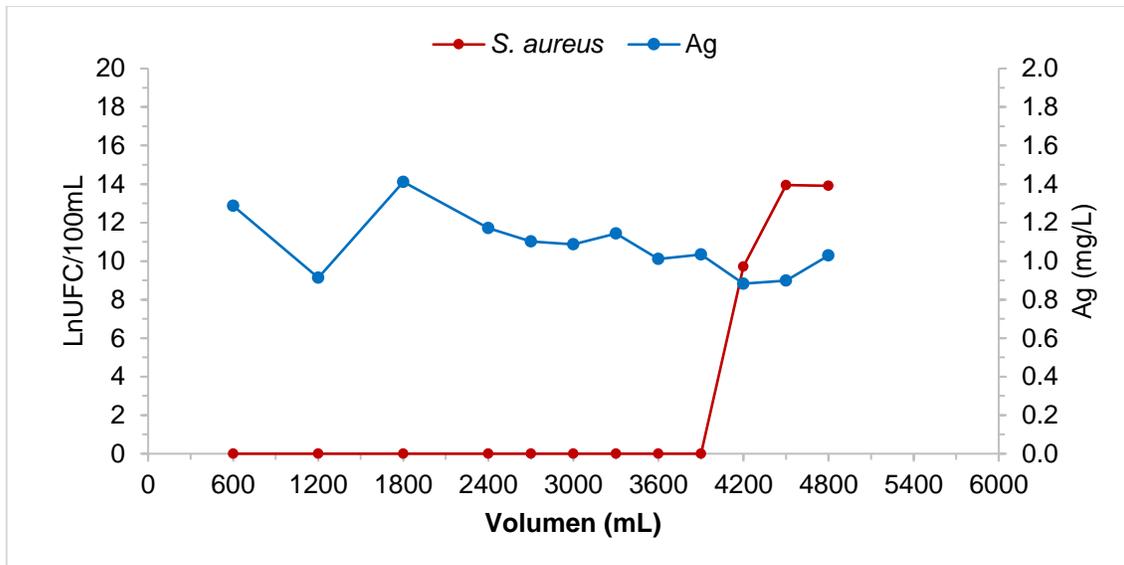


Figura 3.17. Efecto microbicida de la ZGAg sobre *S. aureus*
(masa: 400mg y Φ : 10 mL/min)

Es importante mencionar, que con 400 mg de ZGAg en contacto con *S. aureus*, aumentó 2.16 veces el volumen de agua desinfectada, con respecto a una cama de 300 mg esto corrobora el efecto que se obtiene con el incremento de la masa del lecho del material microbicida descrito por Mthombeni *et al.* (2012) y Akhigbe *et al.* (2016).

La Tabla 3.9 muestra, que al utilizar *C. albicans* el volumen de agua desinfectado fue de 7200 mL (hasta las 12 horas). No existe una gran diferencia en la concentración de plata inicial en el efluente a la encontrada cuando se empaca la columna con una masa de ZGAg de 300 mg., 1.21 y 1.29 respectivamente reforzando lo dicho por Gonzaga (2013) donde para *E. coli* y *S. aureus* asegura que la que la cantidad de Ag liberada de la ZGAg al efluente no depende necesariamente de la masa inicial del material zeolítico.

Tabla 3.9. Efecto microbicida de la ZGAg empleando a *C. albicans*
(masa: 400mg y Φ : 10 mL/min)

tiempo (horas)	Volumen (mL)	<i>C. albicans</i>		Plata
		400 mg ZGAg - 10mL/min		mg/L
		UFC/mL	LnUFC/100mL	
Blanco	-	0	0	-
0	0	28666.67	14.87	-
1	600	0	0	1.29
2	1200	0	0	1.06
3	1800	0	0	1.07
4	2400	0	0	1.03
4.5	2700	0	0	1.00
5	3000	0	0	0.96
5.5	3300	0	0	0.95
6	3600	0	0	1.24
6.5	3900	0	0	0.89
7	4200	0	0	1.53
9	5400	0	0	0.64
10	6000	0	0	0.59
11	6600	0	0	0.56
11.5	6900	0	0	0.54
12	7200	0	0	0.53
12.5	7500	18	7.50	0.51
13	7800	105	9.26	0.50
13.5	8100	725	11.19	0.50

El volumen de agua desinfectada utilizando 400 mg de ZGAg es 6 veces mayor que el obtenido con 300 mg. Este volumen de agua desinfectada se obtuvo en un rango de concentración de plata de 1.29 a 0.53 mg/L este valor de 0.53 mg/L fue el valor más bajo de plata que ofreció efecto microbiano entre los microorganismos utilizados en este estudio (Figura 3.18).

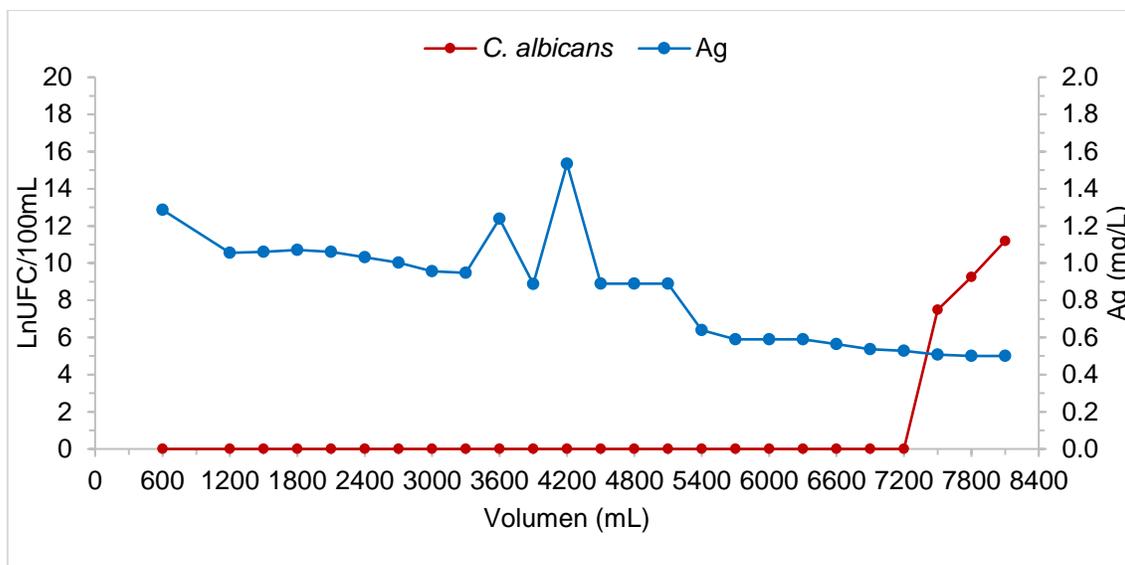


Figura 3.18. Efecto microbicida de la ZGAg sobre *C. albicans*
(masa: 400mg y Φ : 10 mL/min)

Para la desinfección de agua contaminada con el consorcio de microorganismos (Tabla 3.10) se apreció un cambio en el proceder de la desinfección, ya que el volumen de agua desinfectada disminuyo para *E. coli* y *S. aureus* en un 7 y 23 % respectivamente, caso contrario con la *C. albicans* en el cual se incrementó un 4%.

Tabla 3.10. Efecto microbicida de la ZGAg empleando un consorcio microbiano como celulas de prueba (masa: 400mg y Φ : 10 mL/min).

tiempo (horas)	Volumen (mL)	400 mg ZGAg - 10mL/min						Plata mg/L
		<i>E. coli</i>		<i>S. aureus</i>		<i>C. albicans</i>		
		UFC/mL	LnUFC/100mL	UFC/mL	LnUFC/100mL	UFC/mL	LnUFC/100mL	
Blanco	-	0	0	0	0	0	0	-
0	0	38000	15.15	138000	16.44	13000	14.70	-
1	600	0	0	0	0	0	0	1.32
2	1200	0	0	0	0	0	0	1.19
3	1800	0	0	0	0	0	0	9.96
4	2400	0	0	0	0	0	0	4.89
5	3000	0	0	0.33	3.51	0	0	3.65
5.5	3300	0	0	12.33	7.12	0	0	1.12
6	3600	0	0	1	4.61	0	0	2.42
7	4200	138.5	9.54	370	10.52	0	0	1.46
7.5	4500	20.5	7.63	66.67	8.80	0	0	1.24

Tabla 3.10. Efecto microbicida de la ZGAg empleando un consorcio microbiano como células de prueba (masa: 400mg y Φ : 10 mL/min) (continuación).

tiempo (horas)	Volumen (mL)	400 mg ZGAg - 10mL/min						Plata mg/L
		<i>E. coli</i>		<i>S. aureus</i>		<i>C. albicans</i>		
		UFC/mL	LnUFC/100mL	UFC/mL	LnUFC/100mL	UFC/mL	LnUFC/100mL	
7.5	4500	20.5	7.63	66.67	8.80	0.00	0.00	1.24
8	4800	100	9.21	-	-	0.00	0.00	1.08
8.5	5100	153.5	9.64	-	-	0.00	0.00	0.98
9	5400	-	-	-	-	0.00	0.00	0.87
9.5	5700	-	-	-	-	0.00	0.00	0.92
10	6000	-	-	-	-	0.00	0.00	0.83
10.5	6300	-	-	-	-	0.00	0.00	0.68
11	6600	-	-	-	-	0.00	0.00	0.74
11.5	6900	-	-	-	-	0.00	0.00	0.66
12	7200	-	-	-	-	0.00	0.00	0.64
12.5	7500	-	-	-	-	0.00	0.00	0.53
13	7800	-	-	-	-	4.00	5.99	0.52
13.5	8100	-	-	-	-	0.00	0.00	0.50
14	8400	-	-	-	-	0.00	0.00	0.55
14.5	8700	-	-	-	-	122	9.41	0.43
15	9000	-	-	-	-	680	11.13	0.19

La *C. albicans* es el microorganismo menos resistente a la actividad microbicida de la ZGAg, cuando se encuentra en el consorcio microbiano *E. coli* - *S. aureus* - *C. albicans*, en comparación con *E. coli* y *S. aureus* (Figura 3.19).

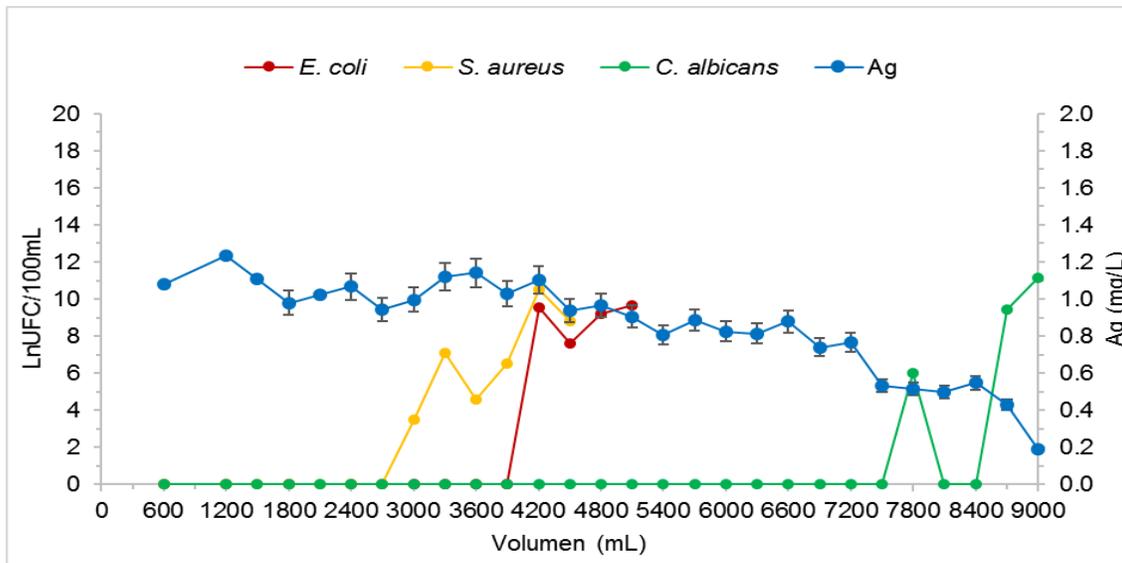


Figura 3.19. Efecto microbicida de la ZGAg sobre un consorcio microbiano (masa: 400mg y Φ : 10 mL/min)

Se observo el mismo patrón de desinfección utilizando 300 mg de ZGAg en el que el microorganismo más sensible al efecto microbiano de la plata fue *C. albicans* seguido de *E. coli* y siendo *S. aureus* el más resistente; como se ha mencionado anteriormente tanto en procesos individuales como en consorcio al aumentar la masa de ZGAg se incrementa el volumen de agua desinfectada (Mthombeni *et al.* 2012; Gonzaga, 2013 y Akhigbe *et al.* 2016). El comportamiento en este proceso de desinfección posiblemente se deba a que las bacterias forman un biofilm en la estructura de la ZGAg principalmente *S. aureus* debido a la capacidad de sintetizar gran cantidad de polisacáridos extracelulares, gracias a su activador agr. Cervantes-García *et al.* (2014) y Mei-Hiu *et al.* (2016) encontraron que a medida que aumenta la densidad de colonias bacterianas, se desencadena una respuesta de detección de QS, lo que da como resultado la síntesis de biosurfactantes por parte de las bacterias, los cuales debilitan la tensión superficial del agua, permitiendo que la bacteria se propague rápidamente; propiciando que este microorganismo sea más resistente al efecto microbicida de la Ag. Por otro parte, el biofilm ya formado es aprovechado por *E. coli* ya que se ha demostrado que los monocultivos pueden adherirse a una superficie, estudios a escala de laboratorio centrados en biofilms de agua potable informaron la incorporación de *E.*

coli en la matriz (Fass *et al.*, 1996; Williams & Braun-Howland, 2003; Abberton *et al.*, 2016) y concluyeron que creció dentro del biofilm. Además, dos estudios independientes del cultivo de biofilm recuperados de sistemas de distribución de agua cuantificaron *E. coli* dentro de biofilms y estimaron que contribuyeron en 0.1% de la comunidad microbiana total de biofilm (Juhna *et al.*, 2007; Mazule *et al.*, 2013). Por su parte *C. albicans* produce varias moléculas de detección de QS que están implicadas en procesos biológicos, cambios morfológicos o formación de biofilm siendo el triptofol uno de las moléculas más importantes (Hassana *et al.*, 2017); las estructuras de biofilm pueden diferir dependiendo de las condiciones de crecimiento, para *C. albicans*, los biofilms maduros se presentan principalmente después de 24-48 horas de formación del biofilm (Uppuluri *et al.*, 2010 y Kaneko *et al.*, 2013), esto nos lleva a suponer que no cuenta con la adhesión suficiente para formar un biofilm en la estructura de la ZGAg además de que el biofilm que pudiera generarse no tiene el tiempo necesario para madurar y proveer a su vez de resistencia a este microorganismo ante el efecto microbiano de la Ag.

Se ha podido demostrar que las células de los biofilms pueden resultar entre 10 y 1000 veces más resistentes que las células planctónicas correspondientes a un gran número de antibióticos de amplio espectro (ampicilina, estreptomina, tetraciclinas, gentamicina, entre otros) y de biocidas oxidantes del tipo del cloro, el yodo o el ozono (Stewart & Costerton, 2001; Muller *et al.*, 2007). Las diferentes relaciones entre hongos y bacterias podrían surgir de las diferentes composiciones de especies aisladas de sistemas de agua, contrastes en metodologías, o diferentes mecanismos biológicos que afectan a la relación (Sonigo *et al.*, 2011), los hongos son a menudo colonizadores secundarios de biofilms bacterianos preestablecidas (Paterson & Lima, 2005 y Kinsey *et al.*, 2003).

3.2.4 Sistema: 300 mg de ZGAg y 15 mL/min

En la Tabla 3.11 se muestra que al aumentar el flujo de 10 mL/min a 15 mL/min hay un aumento en la desinfección con ZGAg, obteniendo 3600 mL de agua en un tiempo de 4 horas, el cual es menor al obtenido con 10 mL/min (5 horas).

En la Figura 3.20 se observa que al reducir el efecto bactericida el crecimiento de la *E. coli* alcanza nuevamente un 45% en comparación con la concentración inicial, llegando hasta un 76% durante el proceso. Un efecto similar se obtuvo en el estudio realizado en lote por Milan *et al.* (2001) y en flujo continuo por De la Rosa *et al.* (2008).

Tabla 3.11. Efecto microbicida de la ZGAg empleando a *E. coli*
(masa: 300mg y Φ : 15 mL/min)

tiempo (horas)	Volumen (mL)	<i>E. coli</i>		Plata mg/L
		300 mg ZGAg - 15mL/min		
		UFC/mL	LnUFC/100mL	
Blanco	-	0	0	-
0	0	380000	17.45	-
1	900	0	0	0.94
2	1800	0	0	0.67
2.5	2250	0	0	0.67
3	2700	0	0	0.66
3.5	3150	0	0	0.62
4	3600	0	0	0.66
4.5	4050	26.33	7.88	0.66
5	4500	190	9.85	0.65
5.5	4950	173.33	9.76	0.64
6	5400	5466.67	13.21	0.79

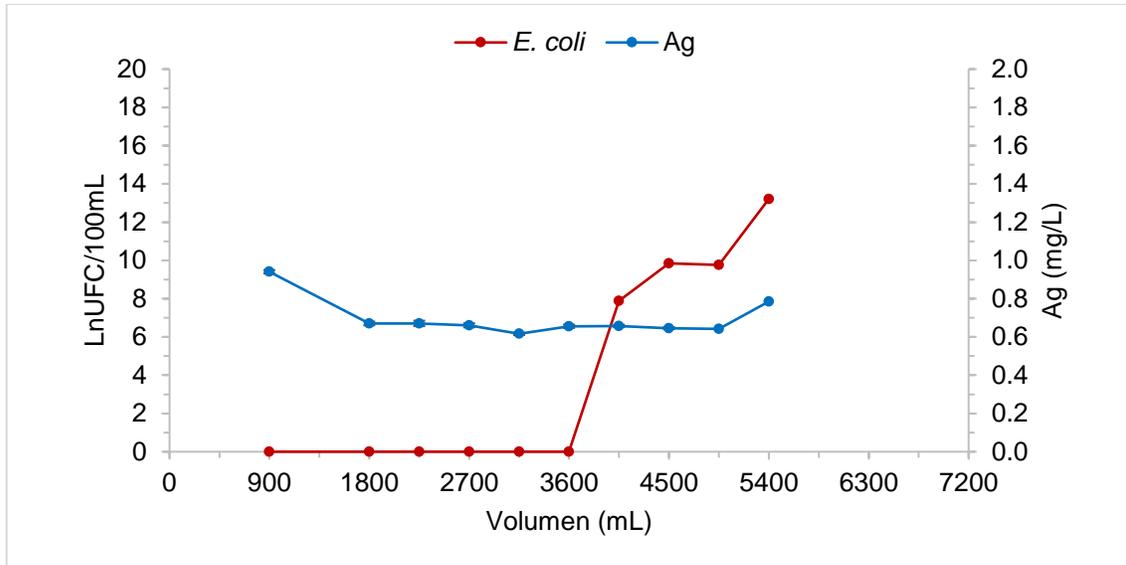


Figura 3.20. Efecto microbicida de la ZGAg sobre *E. coli*
(masa: 300mg y Φ : 15 mL/min)

Para la desinfección de *S. aureus* (Tabla 3.12), se redujo el tiempo a 1 hora y el volumen de agua desinfectada a 900 mL menor al tiempo y volumen con el flujo de 10 mL/min (5 horas y 3000 mL).

Tabla 3.12. Efecto microbicida de la ZGAg empleando a *S. aureus*
(masa: 300mg y Φ : 15 mL/min)

tiempo (horas)	Volumen (mL)	<i>S. aureus</i>		Plata
		300 mg ZGAg - 15mL/min		mg/L
		UFC/mL	LnUFC/100mL	
Blanco	-	0	0	-
0	0	173333.33	16.67	-
1	900	0	0	0.95
2	1800	8.67	6.76	0.77
3	2700	773.33	11.26	0.73
3.5	3150	23400	14.67	0.64
4	3600	11733.33	13.98	0.68
4.5	4050	13200	14.09	0.63
5	4500	30000	14.91	0.67

El efecto microbicida de la ZGAg tiene un menor impacto sobre el *S. aureus* al aumentar el flujo, después de una desinfección del 100% la concentración de microorganismos crece nuevamente hasta un 89% al final del proceso en 2 horas (Figura 3.21). Un efecto similar se obtuvo en el estudio realizado en lote por Milan *et al.* (2001).

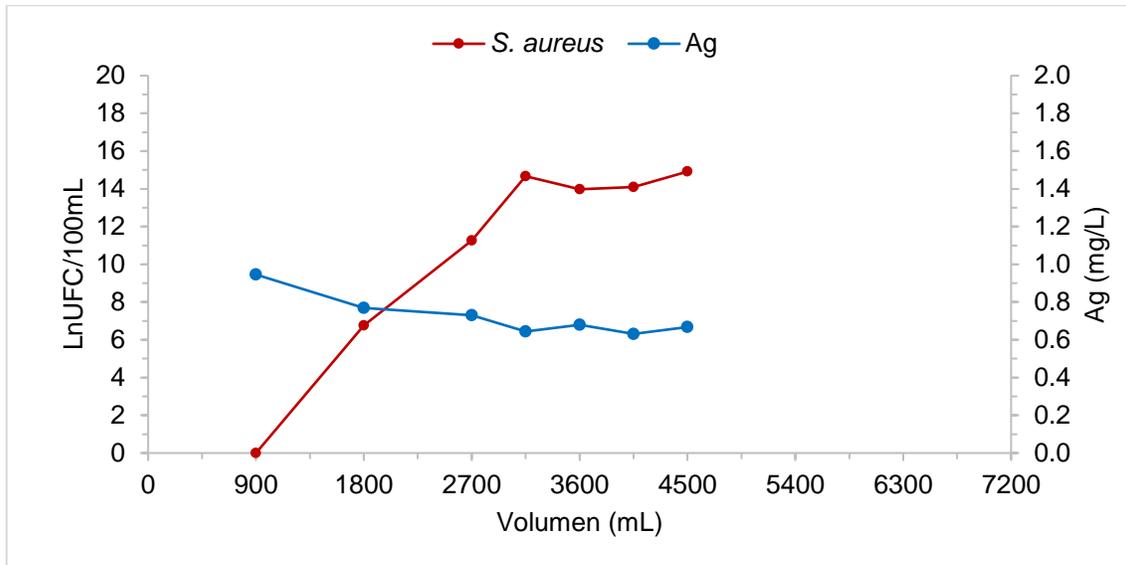


Figura 3.21. Efecto microbicida de la ZGAg sobre *S. aureus*
(masa: 300mg y Φ : 15 mL/min)

Para la *C. albicans* se encontró un tiempo de desinfección de 7 horas (6300 mL), indicando con esto que es el microorganismo fue más sensible al aumentar el flujo a 15 mL/min (Tabla 3.13). Con relación al flujo de 10 mL/min en donde solamente desinfectó 1200 mL en un tiempo de 2 horas.

Tabla 3.13. Efecto microbicida de la ZGAg empleando *C. albicans*
(masa: 300mg y Φ : 15 mL/min)

tiempo (horas)	Volumen (mL)	<i>C. albicans</i>		Plata
		300 mg ZGAg - 15mL/min		mg/L
		UFC/mL	LnUFC/100mL	
Blanco	-	0	0	-
0	0	18666.67	14.44	-
1	900	0	0	0.88
2	1800	0	0	0.79
3	2700	0	0	0.78
4	3600	1	0	0.72
5	4500	0	0	0.64
6	5400	0	0	0.57
7	6300	0	0	0.59
8	7200	71.67	8.88	0.53
9	8100	50	8.52	0.52
10	9000	83.33	9.03	0.52

Este efecto de la microbicida de la ZGAg sobre la *C. albicans* finalizó a un tiempo de 8 horas equivalente a 7200 mL, donde la concentración del microorganismo incrementó hasta un 78% al final del proceso (Figura 3.22).

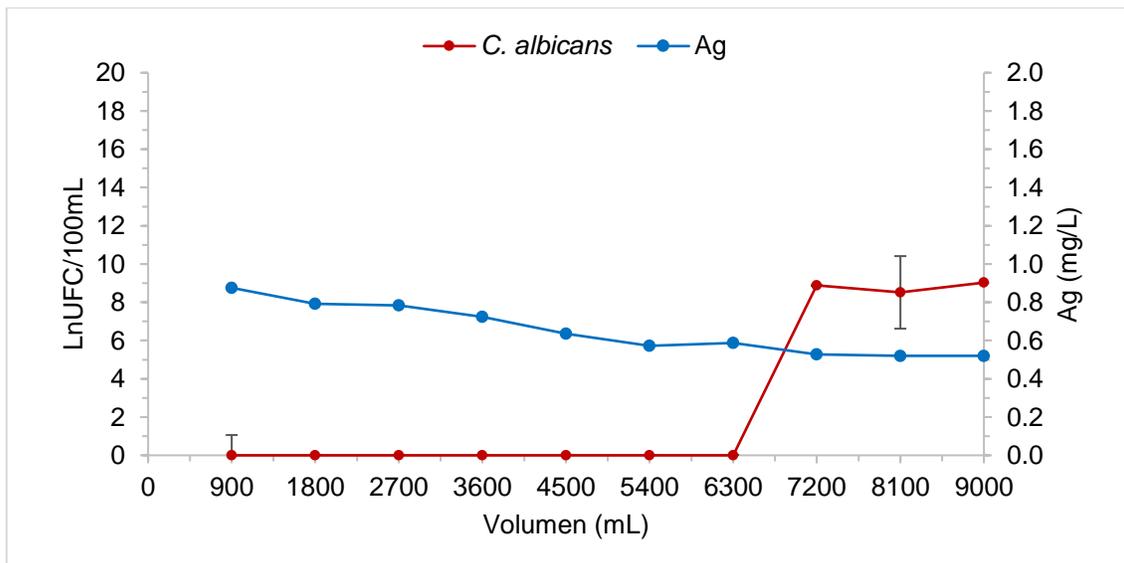


Figura 3.22. Efecto microbicida de la ZGAg sobre *C. albicans*
(masa: 300mg y Φ : 15 mL/min)

Se muestran en la Tabla 3.14 los datos del proceso de desinfección utilizando la ZGAg frente al consorcio de microorganismos, identificando un efecto microbicida del 100% a tiempos de 3.5 horas (3150 mL) para *E. coli*; 1 hora (900 mL) para *S. aureus* y *C. albicans*.

Tabla 3.14. Efecto microbicida de la ZGAg empleando un consorcio microbiano como células de prueba (masa: 300mg y Φ : 15 mL/min).

tiempo (horas)	Volumen (mL)	300 mg ZGAg - 15mL/min						Plata mg/L
		<i>E. coli</i>		<i>S. aureus</i>		<i>C. albicans</i>		
		UFC/mL	LnUFC/100mL	UFC/mL	LnUFC/100mL	UFC/mL	LnUFC/100mL	
Blanco	-	0	0	0	0	0	0	-
0	0	306666.67	17.24	138000	11.84	240000	16.99	-
1	900	0	0	0	0	0	0	0.60
2	1800	0	0	95	9.16	6.67	6.50	0.59
2.5	2250	0	0	3.33	5.81	0	0	0.55
3	2700	0	0	4	5.99	22.33	7.71	0.55
3.5	3150	0	0	134	9.50	11	7	0.57
4	3600	85.67	9.06	760	11.24	5.33	6.28	0.66
4.5	4050	340	10.43	8000	13.59	336.67	10.42	0.70
5	4500	130	9.47	9366.67	13.75	85.33	9.05	0.71
5.5	4950	423.33	10.65	2266.67	12.33	13.33	7.20	0.69
6	5400	603.33	11.01	6033.33	13.31	213.33	9.97	0.69

Con estos resultados se determinó que el proceso de desinfección de la ZGAg frente al consorcio de microorganismos la *C. albicans* y el *S. aureus* presentan mayor sensibilidad al efecto microbicida de la plata, mientras que la *E. coli* ofreció mayor resistencia a tal efecto (Figura 3.23), este comportamiento resulta contrario al determinado en el tratamiento en forma independiente.

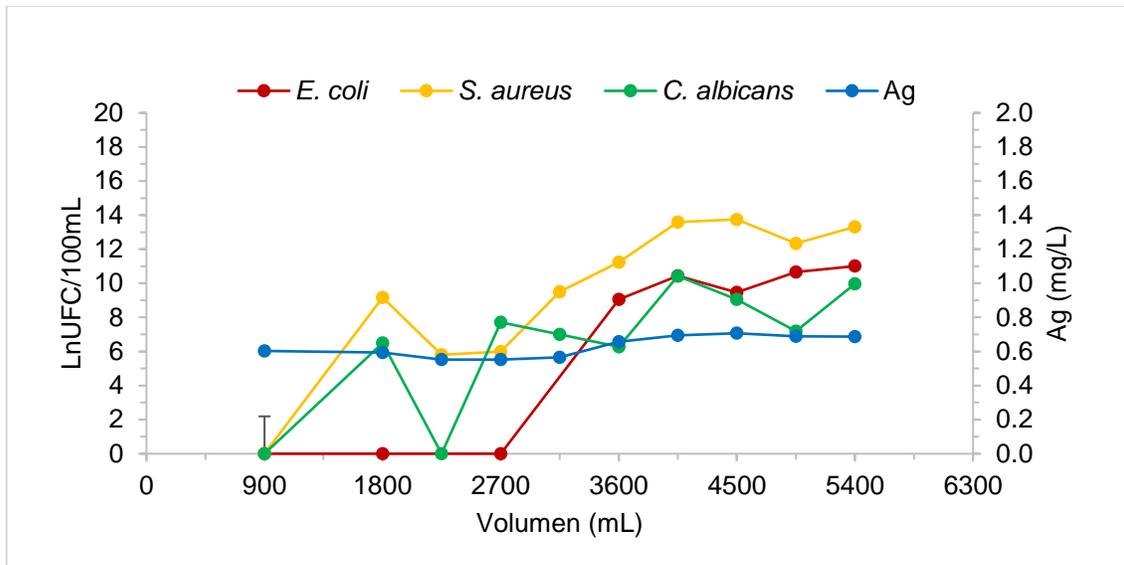


Figura 3.23. Efecto microbicida de la ZGAg sobre un consorcio microbiano (masa: 300mg y Φ : 15 mL/min)

Bajo estas condiciones de 300 mg de ZGAg y 15 mL/min se obtuvieron volúmenes de desinfección mayores lo cual ya se ha descrito con los resultados de este trabajo utilizando 10 mL/min, tal efecto se obtiene con el incremento de la masa del lecho del material microbicida también descrito por Mthombeni *et al.* (2012) y Akhigbe *et al.* (2016). Estas condiciones de operación de la desinfección muestran, que con el aumento del flujo la repetitividad en los resultados es cuestionable ya que para las masas que se manejaron en este trabajo (300 y 400 mg ZGAg) un flujo de 15 mL/min no aseguran un proceso invariable de desinfección. Actualmente en la literatura no se cuenta con información que brinde una base al utilizar flujo de esta dimensión.

3.3 Recuperación de la plata residual utilizando zeolita Guerrero acondicionada con sodio

Los métodos más comunes usados en la recuperación de plata a partir de los desechos fotográficos incluyen reemplazo o sustitución metálica, electrólisis, intercambio iónico y precipitación (Atia, 2005; Cerjan-Stefanović *et al.*, 1991; Pollet *et al.*, 2000).

A partir de las pruebas de desinfección se obtuvieron volúmenes de agua desinfectada pero con plata residual, a estas muestras se les determinó la concentración de Ag (Figura 3.24).

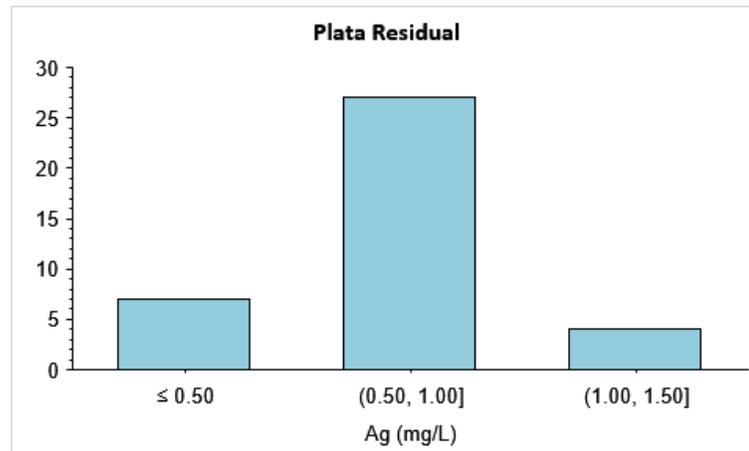


Figura 3.24. Plata residual proveniente de los procesos de desinfección en sistemas en columna.

Posteriormente se realizaron pruebas utilizando agua preparada en laboratorio a concentraciones conocidas de 0.5, 1, 1.5 y 2 mg/L de Ag^+ , tales concentraciones se proponen ya que es el rango en el que se encuentran las muestras reales obtenidas de los procesos de desinfección, la Tabla 3.15 muestra los valores de Ag después de su paso por el lecho de ZGNa.

3.3.1 Recuperación de muestra preparada: 300 y 400 mg de ZGNa a un flujo de 2 mL/min

En la Tabla 3.15 se observa que al final en el volumen de agua se tiene una recuperación de plata de 77.8, 83.4, 84 y 85.8 % utilizando 300 mg y de 80.5, 84.6, 94 y 92 % utilizando 400 mg de ZGNa partiendo de las concentraciones iniciales de 2, 1.5, 1 y 0.5 mg/L de plata respectivamente.

Tabla 3.15. Primer proceso de recuperación de plata en soluciones estándar.

Tiempo (min)	Volumen (mL)	1er Recuperación 300 mg				1er Recuperación 400 mg			
		Concentración de Ag (mg/L)							
		2	1.5	1	0.5	2	1.5	1	0.5
0	0	2.12	1.57	1.06	0.49	1.96	1.5	1	0.41
15	30	0.49	0.18	0.15	0.01	0.79	0.42	0.14	0.05
30	60	0.63	0.29	0.18	0.24	0.67	0.35	0.48	0.06
45	90	0.56	0.23	0.15	0.09	0.57	0.28	0.11	0.03
60	120	0.49	0.28	0.21	0.28	0.67	0.27	0.08	0.03
120	240	0.47	0.24	0.23	0.09	0.46	0.27	0.08	0.03
180	360	0.44	0.29	0.17	0.08	0.4	0.26	0.08	0.03
240	480	0.56	0.29	0.17	0.09	0.34	0.26	0.08	0.02
*Acumulado		0.47	0.26	0.17	0.07	0.39	0.23	0.06	0.04
% Recuperación		77.84	83.44	84.01	85.80	80.10	84.67	94.00	90.24

*Muestra de agua acumulada después del proceso de recuperación

La Figura 3.25 muestra la tendencia de recuperación que se tiene conforme el tiempo utilizando una masa de 400 mg de ZGNa, se observa que la recuperación se mantiene a partir de 2 horas hasta las 6 horas que duró el proceso, esto indica que no es posible un mayor intercambio ionicamente debido a que el sodio disponible está en las cavidades más internas. De la Rosa (2007) obtuvo porcentajes similares en la recuperación de plata residual.

La recuperación total de plata en solución no se obtuvo para todas las concentraciones propuestas por lo cual se realizó un segundo proceso, utilizando las mismas condiciones, 300 y 400 mg de ZGNa a un flujo de 2 mL/min.

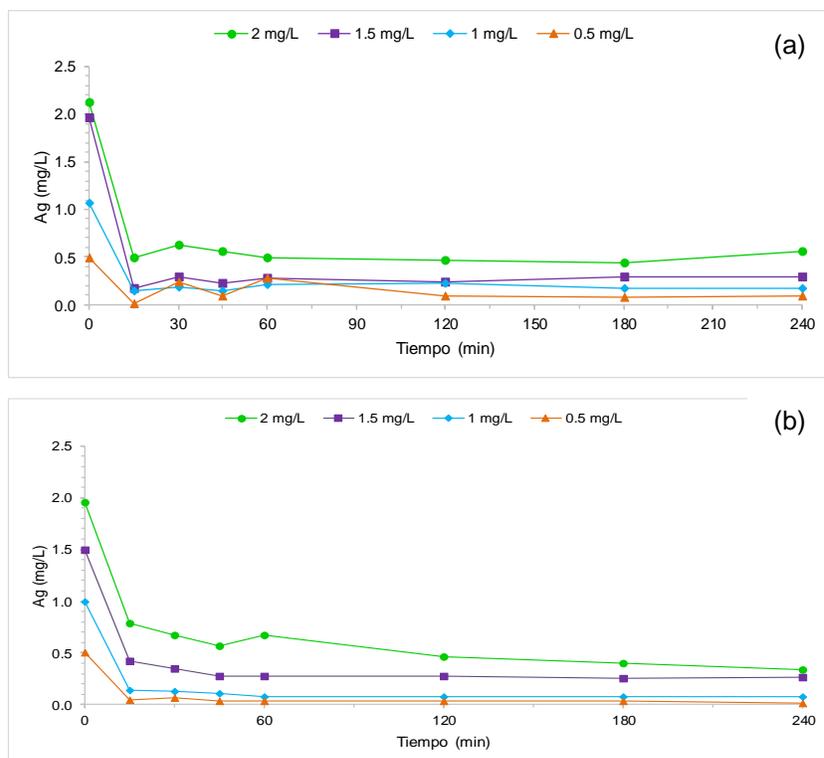


Figura 3.25. Primer proceso de recuperación de plata utilizando masa: 300 (a) y 400 (b) mg de ZGNa y Φ : 2 mL/min.

En la Tabla 3.16 se muestra los resultados de bombear el efluente del primer proceso de recuperación a través de la columna con un nuevo lecho de ZGNa, recuperando un porcentaje de 80.8, 78.7, 79.3 y 76.2 % utilizando 300 mg y 91.9, 100, 100 y 100 % con un lecho de 400 mg; estos porcentajes se obtuvieron a partir de los efluentes del primer proceso de recuperación. Akhigbe *et al.* (2016) obtuvo el 96% de recuperación.

Tabla 3.16. Segundo proceso de recuperación de plata en soluciones estándar.

Tiempo (min)	Volumen (mL)	2da Recuperación 300 mg				2da Recuperación 400 mg			
		Concentración de Ag (mg/L)							
		2	1.5	1	0.5	2	1.5	1	0.5
0	0	0.46	0.27	0.20	0.04	0.37	0.21	0.06	0.04
15	30	0.18	0.09	0.03	0.01	0.05	0.05	0.00	0.00
30	60	0.17	0.12	0.03	0.00	0.03	0.03	0.00	0.00
45	90	0.12	0.06	0.03	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00
60	120	0.09	0.06	0.04	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00
120	240	0.06	0.04	0.04	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00
130	260	0.07	0.04	-	-	-	-	-	-
*Acumulado		0.09	0.06	0.04	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00
% Recuperación		80.81	78.69	79.28	76.19	91.86	100	100	100

*Muestra de agua acumulada después del proceso de recuperación

En la Figura 3.26 se observa el comportamiento de el segundo proceso de recuperación y que las concentraciones propuestas quedan bajo el limite que permite la NOM-127-SSA1-1994.

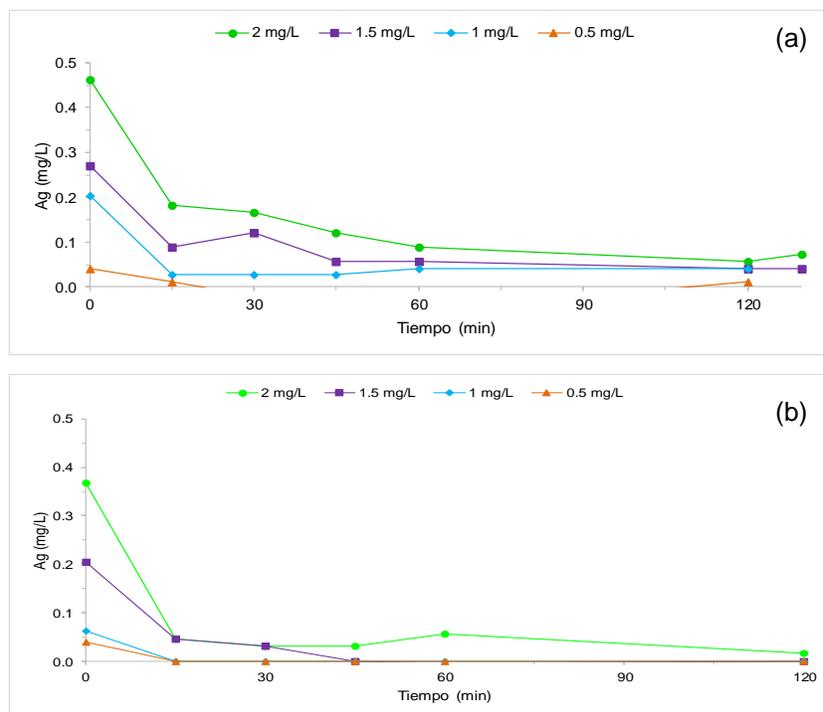


Figura 3.26. Segundo proceso de recuperación de plata utilizando masa: 300 (a) y 400 (b) mg de ZGNa y Φ : 2 mL/min.

3.3.2 Recuperación de muestra preparada: 300 y 400 mg de ZGNa a un flujo de 10 mL/min

Para encontrar el proceso óptimo de recuperación se probó con un flujo más alto y así obtener un mayor volumen de agua tratada, la Tabla 3.17 muestra la recuperación de plata proveniente de una solución preparada en laboratorio; bajo estas condiciones propuestas se probó solo con soluciones de 1 y 0.5 mg/L ya que la cantidad más representativa de muestras reales se encuentran en este rango de concentración.

Tabla 3.17. Primer proceso de recuperación de plata en soluciones estándar 1 y 0.5 mg/L.

Tiempo (min)	Volumen (mL)	1er Rec. 300 mg		1er Rec. 400 mg	
		Concentración de Ag (mg/L)			
		1	0.5	1	0.5
0	0	0.84	0.59	0.99	0.45
15	150	0.57	0.24	0.39	0.26
30	300	0.43	0.23	0.43	0.22
45	450	0.40	0.33	0.41	0.18
60	600	0.40	0.20	0.41	0.23
90	900	0.44	0.23	0.97	0.18
120	1200	0.46	0.23	0.43	0.18
*Acumulado		0.43	0.20	0.41	0.20
% Recuperación		48.42	66.31	58.44	55.75

*Muestra de agua acumulada después del proceso de recuperación

Se observa que, con el aumento del flujo el porcentaje de recuperación de plata residual disminuye considerablemente hasta 48.4 y 66.3 con 300 mg de ZGNa y de 58.4 y 55.7 % con 400 mg de ZGNa, esto cuando se utilizan soluciones con concentraciones de 1 y 0.5 mg/L respectivamente.

La Figura 3.27 muestra que el comportamiento del proceso de recuperación no es el requerido, ya que la concentración de plata en la solución preparada en laboratorio no disminuye como al utilizar un flujo de 2 mL/min, esto debido probablemente a que la

velocidad del flujo no da el tiempo de contacto suficiente para llevar el intercambio iónico entre la plata residual suspendida y la ZGNa.

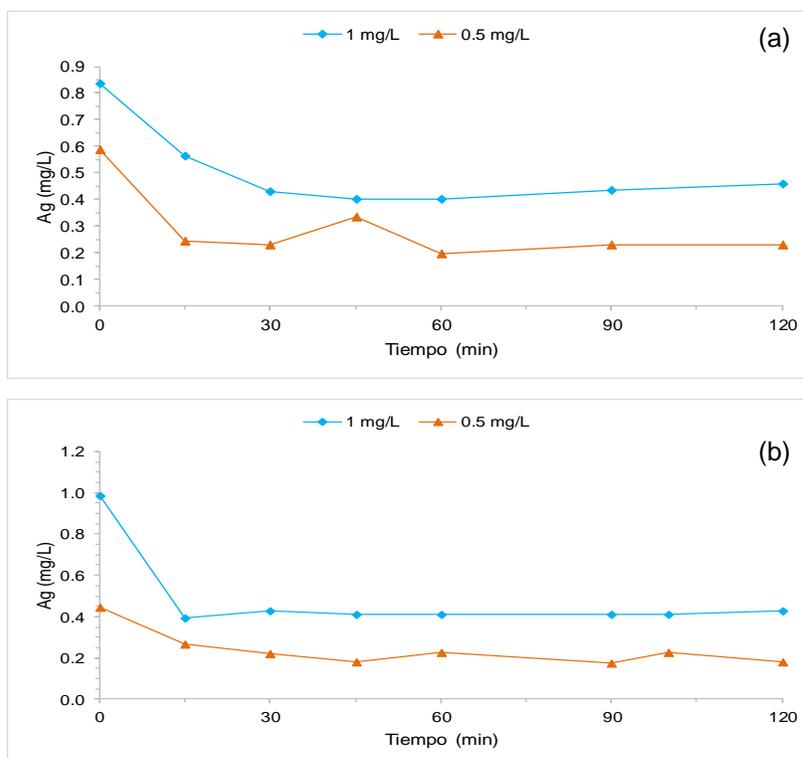


Figura 3.27. Primer proceso de recuperación de plata utilizando masa: 300 (a) y 400 (b) mg de ZGNa y Φ : 10 mL/min.

Bajo estas condiciones de proceso fue necesario dar un segundo proceso de recuperación utilizando lechos nuevos de ZGNa (300 y 400 mg). La Tabla 3.18 muestra los resultados.

Después de pasar la solución efluente del primer proceso de recuperación solo en la concentración de 0.5 mg/L se observa una recuperación cercana a la requerida por la normatividad, nuevamente se especula que debido a la velocidad del flujo no se tiene un tiempo de contacto suficiente para llevar a cabo el intercambio iónico.

Tabla 3.18. Segundo proceso de recuperación de plata en soluciones estándar.

Tiempo (min)	Volumen (mL)	2da Rec. 300 mg		2da Rec. 400 mg	
		Concentración de Ag (mg/L)			
		1	0.5	1	0.5
0	0	0.44	0.22	0.38	0.18
15	150	0.26	0.13	0.15	0.07
30	300	0.25	0.30	0.15	0.89
45	450	0.29	0.12	0.16	0.37
60	600	0.27	0.11	0.23	0.06
75	750	0.27	0.11	0.15	0.11
90	900	0.28	0.12	-	-
*Acumulado		0.31	0.12	0.15	0.07
% Recuperación		28.99	44.12	60.73	59.83

*Muestra de agua acumulada después del proceso de recuperación

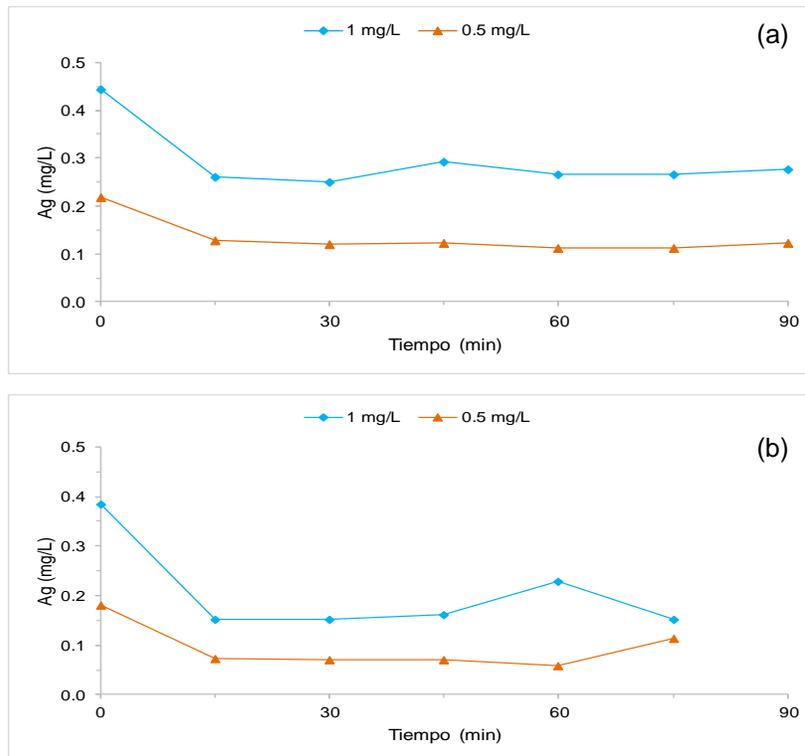


Figura 3.28. Segundo proceso de recuperación de plata utilizando masa: 300 (a) y 400 (b) mg de ZGNa y Φ : 10 mL/min.

La Figura 3.28 muestra el comparativo de la recuperación de plata residual utilizando ambas masas de ZGNa observando mayor recuperación utilizando 400 mg llegando a ser alrededor de la mitad de lo obtenido con 300 mg.

3.3.3 Recuperación de muestra preparada: 400 mg de ZGNa a un flujo de 5 mL/min

La Tabla 3.19 muestra los resultados al utilizar la masa de 400 mg que ha mostrado ser la que recupera el mayor porcentaje de plata residual, utilizando un flujo mayor a las pruebas anteriores llegando a recuperar el 71.4 % en el primer proceso y 85.5 % despues del segundo proceso.

Tabla 3.19. Primer y segundo proceso de recuperación de plata en solución estándar con 400 mg y 5 mL/min

Tiempo (min)	Volumen (mL)	1er Rec. 400 mg	2da Rec. 400 mg
		Concentración de Ag (mg/L)	
		1	
0	0	1.04	0.30
15	150	0.33	0.05
30	300	0.29	0.04
45	450	0.30	0.06
60	600	0.27	0.04
90	900	0.30	0.04
120	1200	0.30	0.06
150	1500	0.30	0.05
180	1800	0.30	-
*Acumulado		0.30	0.04
% Recuperación		71.36	85.51

*Muestra de agua acumulada después del proceso de recuperación

Bajo estas condiciones se encontro una alta recuperación ademas de cumplir con la normatividad al llevar a cabo el primer proceso de recuperación dejo la concentración de 1 en 0.3 mg/L por lo cual se realizó un segundo proceso de recuperación finalizando en 0.04 mg/L (Figura 3.29).

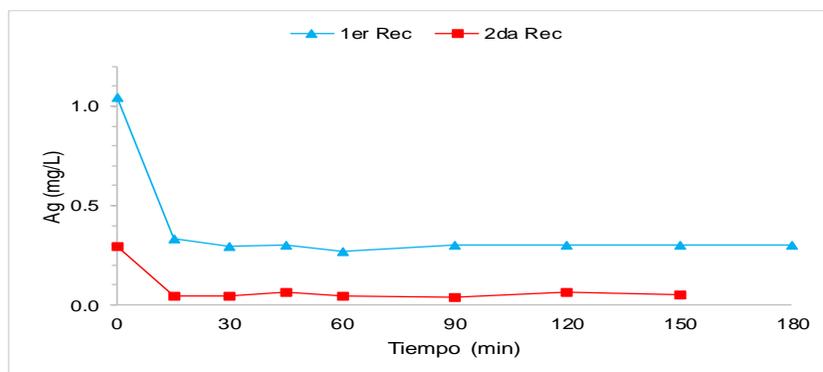


Figura 3.29. Primer y segundo proceso de recuperación de plata utilizando masa: 400 mg de ZGNa y Φ : 5 mL/min

3.3.4 Recuperación de muestra real: 600 mg de ZGNa a un flujo de 5 mL/min

Estas pruebas se realizaron con la finalidad de probar y encontrar las condiciones óptimas para la recuperación de la plata residual. Posteriormente los efluentes provenientes de las pruebas de desinfección se mezclaron entre sí de tal forma que se obtuvieron 3 soluciones con concentraciones de 0.43, 0.61 y 0.87 mg/L de plata. Akhigbe *et al.* (2016) obtuvieron el 98 % de recuperación utilizando masas de 2, 5 y 24 g de zeolita, De la Rosa (2007) obtuvo el 42 % de recuperación utilizando una muestra de agua residual.

Tabla 3.20. Primer y segundo proceso de recuperación de plata de una muestra real.

Tiempo (min)	Volumen (mL)	1er Rec. 600 mg
		Ag (mg/L)
0	0	1.08
15	75	0.42
30	150	0.30
45	225	0.28
60	300	0.24
120	600	0.25
180	900	0.22
240	1200	0.19
300	1500	0.20
360	1800	0.17
420	2100	0.20
480	2400	0.17
540	2700	0.16
600	3000	0.20
660	3300	0.17
720	3600	0.17
780	3900	0.16
840	4200	0.16
900	4500	0.16
960	4800	0.20
1020	5100	0.16
*Acumulado		0.17
% Recuperación		84.64

*Muestra de agua acumulada después del proceso de recuperación

3.3.5 Recuperación de muestra real (0.43 mg/L)

Los resultados obtenidos al buscar las condiciones óptimas de recuperación mostraron que el uso de lechos con masas mayores brinda una alta recuperación de la plata residual, mediante el análisis de tales resultados se propuso y utilizó trabajar con una masa de lecho de 600 mg y un flujo de 5 mL/min.

La Tabla 3.21 muestra los resultados de la recuperación logrados al utilizar la solución con una concentración de 0.43 mg/L de plata residual, obteniendo un 86.9 % de

recuperación, dejando el volumen final acumulado con una concentración de 0.06 mg/L, resultado adecuado ya que la normatividad marca que el valor máximo permisible de ser de 0.05 mg/L.

Tabla 3.21. Proceso de recuperación de plata de una mezcla de 0.43 mg/L.

Mezcla (0.44-0.56)		
Tiempo (min)	Volumen (mL)	Ag (mg/L)
0	0	0.43
15	75	0.06
30	150	0.08
45	225	0.07
60	300	0.06
120	600	0.13
180	900	0.08
240	1200	0.08
300	1500	0.11
*Acumulado		0.06
% Recuperación		86.95

*Muestra de agua acumulada después del proceso de recuperación

3.3.6 Recuperación de muestra real (0.61 mg/L)

Al recuperar la plata residual de una mezcla con una mayor concentración se observa que la eficiencia se mantiene sin cambio considerable, sin embargo, la concentración en el acumulado aumento alcanzando 0.08 mg/L, se considera un valor adecuado en relación con el tiempo en que se logra llegar a esa concentración (Tabla 3.22).

Tabla 3.22. Proceso de recuperación de plata de una mezcla de 0.61 mg/L.

Mezcla (0.61-0.77)		
Tiempo (min)	Volumen (mL)	Ag (mg/L)
0	0	0.61
15	75	0.11
30	150	0.09
45	225	0.07
60	300	0.07
120	600	0.09
180	900	0.07
240	1200	0.07
300	1500	0.09
*Acumulado		0.08
% Recuperación		87.49

*Muestra de agua acumulada después del proceso de recuperación

3.3.7 Recuperación de muestra real (0.87 mg/L)

Finalmente, al utilizar la mezcla de efluentes con la mayor concentración se conserva la tendencia de finalizar el proceso de recuperación con una concentración más elevada en la solución acumulada comparada con los casos anteriores, pero manteniendo la eficiencia que para este proceso fue de 86.7% (Tabla 3.23).

Para cumplir con la normatividad en soluciones con concentraciones a partir de 0.6 mg/L será necesario llevar a cabo un segundo proceso de recuperación utilizando un nuevo lecho de ZGNa.

Tabla 3.23. Proceso de recuperación de plata de una mezcla de 0.87 mg/L.

Mezcla (0.81-1.0)		
Tiempo (min)	Volumen (mL)	Ag (mg/L)
0	0	0.87
15	75	0.14
30	150	0.22
45	225	0.19
60	300	0.17
120	600	0.12
180	900	0.11
240	1200	0.11
300	1500	0.11
*Acumulado		0.12
% Recuperación		86.66

*Muestra de agua acumulada después del proceso de recuperación

En resumen, las condiciones que se proponen para obtener un adecuado porcentaje de recuperación de plata residual brindaron resultados satisfactorios obteniendo un porcentaje promedio de recuperación de 87 % con respecto de la concentración inicial de cada solución. La Figura 3.30 muestra que a los 15 minutos ya se tiene una alta recuperación de la plata y prácticamente se mantiene constante durante el tiempo que dura el proceso, para cumplir la normatividad requerida se necesita tratar la solución en un segundo proceso de recuperación.

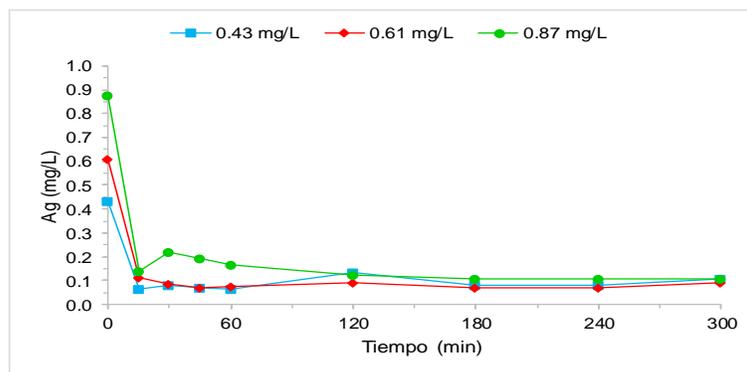


Figura 3.30. Proceso de recuperación en soluciones con diferente concentración de plata residual.

3.4 Evaluación del efecto microbicida de la zeolita acondicionada con la plata recuperada sobre células de *E. coli*, *S. aureus* y *C. albicans* en suspensión acuosa

La zeolita Guerrero acondicionada con plata recuperada (ZGAgR) fue probada frente a los microorganismos de prueba *E. coli*, *S. aureus* y *C. albicans* de forma individual, tales resultados se muestran en la Tabla 3.24, donde se observa que se obtuvo una eliminación máxima de 17 % del microorganismo con respecto de su concentración inicial.

Tabla 3.24. Efecto microbicida de la ZGAgR empleando a *E. coli*
(masa: 400mg y Φ : 10 mL/min)

tiempo (horas)	Volumen (mL)	<i>E. coli</i>		Plata
		400 mg ZGAg - 10mL/min		
		UFC/mL	LnUFC/100mL	mg/L de Ag
Blanco	-	0.00	0.00	-
0	0	206666.67	16.84	-
0.03	20	11900	13.99	0.077
0.08	50	17466.67	14.37	0.049
0.17	100	25000	14.73	0.044
0.25	150	25000	14.73	0.039
0.50	300	25000	14.73	0.024
0.75	450	25000	14.73	0.008
1.00	600	25000	14.73	0.019

Se encontró que la masa de ZGAgR utilizada no ofreció un efecto microbicida sobre *E. coli* ya que la concentración de plata está por debajo de la mínima requerida para ofrecer un efecto microbicida según lo descrito por De la Rosa *et al.* (2010). En la Figura 3.31 se muestra la tendencia que tiene la concentración de plata en el efluente con un valor máximo de 0.077 mg/L que decrece hasta un mínimo de 0.008 mg/L, tal concentración está por debajo de cualquier dato obtenido anteriormente que haya ofrecido un efecto microbicida de 100%.

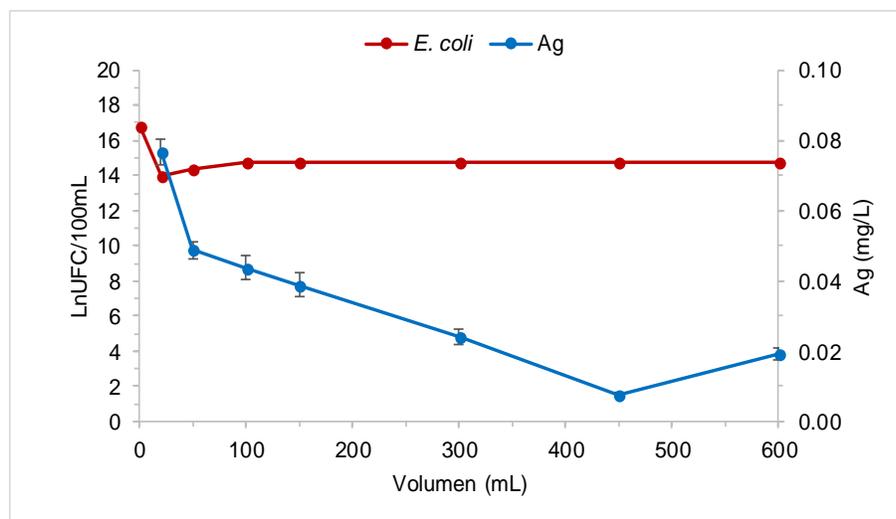


Figura 3.31. Efecto microbicida de la ZGAgR empleando a *E. coli* (masa: 400mg y Φ : 10 mL/min)

La Tabla 3.25 muestra los datos obtenidos del proceso de desinfección donde se observó que la masa utilizada de 400 mg de ZGAgR no ofreció una desinfección total del agua contaminada con *S. aureus*, llegando a una desinfección máxima de 41 % sobre la concentración inicial del microorganismo.

Tabla 3.25. Efecto microbicida de la ZGAgR empleando a *S. aureus* (masa: 400mg y Φ : 10 mL/min)

tiempo (horas)	Volumen (mL)	<i>S. aureus</i>		Plata
		400 mg ZGAg - 10mL/min		
		UFC/mL	LnUFC/100mL	mg/L de Ag
Blanco	-	0.00	0.00	-
0	0	95000.00	16.07	-
0.03	20	126.5	9.45	0.034
0.08	50	160	9.68	0.019
0.17	100	1290	11.77	0.004
0.25	150	12950	14.07	0.039
0.50	300	13900	14.14	0.004

En la Figura 3.32 se muestra la tendencia de la concentración de plata en el efluente donde el valor máximo de plata fue de 0.034 mg/L decreciendo hasta 0.004 mg/L,

comportamiento similar se observó en el proceso frente a *E. coli* donde la concentración de plata no es la necesaria para ofrecer un efecto microbicida de 100% sobre la concentración del microorganismo.

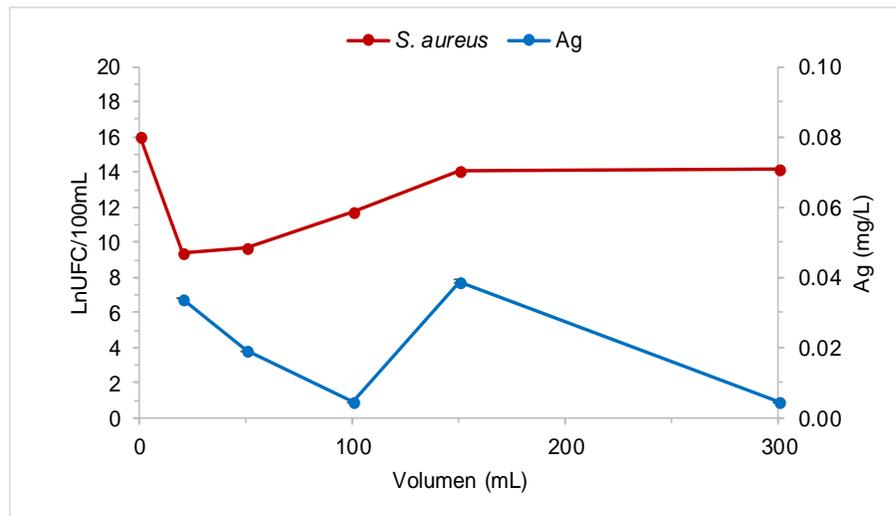


Figura 3.32. Efecto microbicida de la ZGAgR empleando a *S. aureus* (masa: 400mg y Φ : 10 mL/min)

La Tabla 3.26 muestra los datos obtenidos del proceso de desinfección donde se observó que la masa utilizada de 400 mg de ZGAgR no ofreció una desinfección total del agua contaminada con *C. albicans*, llegando a una desinfección máxima de 51 % sobre la concentración inicial del microorganismo a una concentración de plata.

En la Figura 3.33 se muestra la tendencia de la concentración de plata en el efluente donde el valor máximo de plata fue de 0.027 mg/L siendo 0.004 mg/L, el valor mínimo, comportamiento similar se observó en el proceso frente a *E. coli* y *S. aureus* donde la concentración de plata no es suficiente para ofrecer un efecto microbicida de 100% sobre la concentración del microorganismo.

Tabla 3.26. Efecto microbicida de la ZGAgR empleando a *C. albicans*
(masa: 400mg y Φ : 10 mL/min)

tiempo (horas)	Volumen (mL)	<i>C. albicans</i>		Plata
		400 mg ZGAg - 10mL/min		
		UFC/mL	LnUFC/100mL	mg/L
Blanco	-	0.00	0.00	-
0	0	31500.00	14.96	-
0.03	5	30	8.01	0.009
0.08	10	28	7.94	0.004
0.17	15	28	7.94	0.004
0.25	30	11	7.00	0.027
0.50	45	27	7.90	0.017
0.75	60	29.5	7.99	0.004
1.00	90	14	7.24	0.027
2.00	120	28.5	7.96	0.009

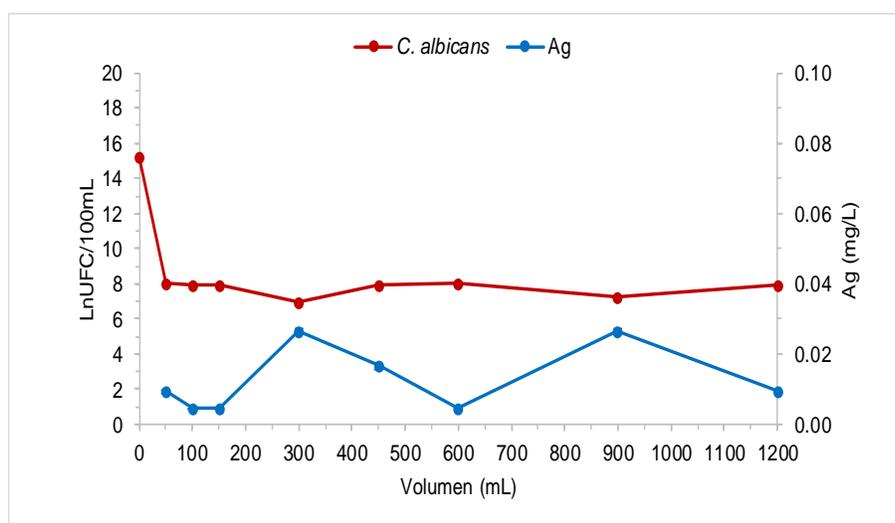


Figura 3.33. Efecto microbicida de la ZGAgR empleando a *C. albicans*
(masa: 400mg y Φ : 10 mL/min)

Actualmente en la literatura no se ha encontrado información que de una base en la reutilización de plata para la desinfección de agua

3.5 Modelado de curvas de ruptura usando ecuaciones no lineales

Los resultados de las pruebas experimentales se ajustaron a el modelo de crecimiento logístico y los parámetros extraídos se presentan en la Tabla 3.27. Los parámetros de tiempo medio de la curva de ruptura (t_{50}) y constante de velocidad de crecimiento (K) indican el comportamiento en la reducción de los microorganismos contaminantes del agua y permiten tener una idea del desplazamiento con respecto al tiempo debido a la presencia de material microbiano en el medio (Rossainz, 2017), tales parámetros incrementan con un aumento de la masa del material antibacteriano (Mthombeni *et al.*, 2012).

Tabla 3.27 Parámetros del modelo logístico que describe la eliminación de microorganismo (masa:300 y 400 mg y ϕ : 10 mL/min).

Microorganismo	Masa: 300 mg			Masa: 400 mg		
	t_{50} (min)	K (min^{-1})	r^2	t_{50} (min)	K (min^{-1})	r^2
<i>E. coli</i>	354.78	0.36	0.99995	741.54	0.32	0.99982
<i>S. aureus</i>	226.62	0.09	0.99504	418.63	0.61	1
<i>C. albicans</i>	144.36	0.15	0.95368	744.37	0.18	0.99131

Como se muestra, al utilizar una masa de 300 mg de ZGAg durante los procesos de desinfección individuales se presentó un mayor efecto microbicida por parte de los iones Ag frente a la concentración de *E. coli* por encima de *S. aureus* y *C. albicans*, así lo muestra su valor de K 0.36, 0.09 y 0.15 respectivamente. Caso contrario se obtuvo al utilizar 400 mg de ZGAg donde el mayor efecto microbicida fue sobre la concentración *S. aureus* por encima de *E. coli* y *C. albicans* dado que su K 0.61, 0.32 y 0.18 respectivamente. El parámetro t_{50} indica el volumen de agua trata con una eliminación de microorganismos del 100% donde el microorganismo que mostro mayor sensibilidad a esta masa fue la *E. coli* al utilizar 300 mg y para 400 mg fue *C. albicans*; al utilizar ambas masas el microorganismo que ofreció mayor resistencia fue *S. aureus*.

La Tabla 3.28 muestra los resultados experimentales ajustados al modelo donde se aprecia una buena coincidencia. Se corrobora que con el aumento de la masa de la

ZGAg se incrementa el volumen de agua desinfectada, dicho volumen dependerá del tipo de microorganismo que este en estudio.

Tabla 3.28 Parámetros del modelo logístico que describe la eliminación de microorganismos en consorcio (masa: 300 y 400 mg y ϕ : 10 mL/min)

Microorganismo	Masa: 300 mg			Masa: 400 mg		
	t ₅₀ (min)	K (min ⁻¹)	r ²	t ₅₀ (min)	K (min ⁻¹)	r ²
<i>E. coli</i>	216.31	0.12	0.9360	405.05	0.18	0.9935
<i>S. aureus</i>	95.11	0.08	0.8386	328.43	0.03	0.8822
<i>C. albicans</i>	640.56	1.28	0.9996	867.94	0.82	0.8262

En el consorcio microbiano, los valores de k muestran que cuando se usa una masa de 300 mg de ZGAg, el microorganismo con la constante de velocidad más alta es *C. albicans*, seguido de *E. coli* y finalmente de *S. aureus*. Se obtuvieron resultados similares cuando la masa se incrementó de 300 a 400 mg de ZGAg. La Tabla 3.28 también muestra que el parámetro t₅₀ es más alto para las levaduras que para las bacterias; *S. aureus* alcanza la mitad de su concentración inicial en el menor tiempo entre los microorganismos de su tipo.

4 CONCLUSIONES

La estructura cristalina de la zeolita del estado de Guerrero no sufrió cambios en su estructura, después del acondicionamiento con la sal de plata.

Al realizar el análisis de microscopía electrónica de barrido, se aprecian cúmulos de plata en la superficie de la zeolita debido a la presencia de Ag^0 .

Para el sistema con una cama zeolítica de 300 mg de ZGAg y un flujo de 10 mL/min el microorganismo que ofrece mayor resistencia al efecto bactericida es la *C. albicans*.

La mayor cantidad de plata liberada al efluente fue de 1.93 mg/L durante el proceso de desinfección del *S. aureus*, utilizando una masa de 300 mg de ZGAg y un flujo de 10 mL/min.

Al aumentar el flujo a 15 mL/min y mantener la cama zeolítica a 300 mg, se incrementó el volumen de agua desinfectada para los casos de *E. coli* y *C. albicans*.

Una masa de 400 mg de ZGNa ofrece mayor recuperación de plata residual en solución preparada en laboratorio a un flujo de 2 mL/min comprada con una masa de 300 mg.

El flujo de 10 mL/min utilizando en la recuperación de plata residual en solución preparada en laboratorio no ofrece una alta recuperación de plata en comparación con un flujo menor.

Las condiciones de 400 mg de ZGNa y 5 mL/min ofrecen la mejor recuperación de plata en una muestra real y el mayor volumen de agua tratada.

La recuperación de plata a partir de una solución de nitrato de plata preparada en laboratorio presenta un mayor porcentaje de recuperación en comparación con la plata procedente de los efluentes de los procesos de desinfección debido a las especies de plata presentes en la solución.

Al utilizar una masa de 600 mg de ZGNa se incrementa el porcentaje de recuperación de plata residual en una muestra real a un flujo de 5 mL/min.

Entre menor sea la concentración de plata en solución mayor será su recuperación cumpliendo así con el límite máximo de 0.05 mg/L.

La ZGAgR no ofrece efecto microbicida sobre *E. coli* y *S. aureus* debido a que la concentración de plata que se detecta no es la suficiente para brindar tal efecto.

Los datos experimentales se ajustan bien a un modelo logístico no lineal que utiliza parámetros para describir un proceso de desinfección en un sistema de columnas; los valores del tiempo medio de la curva de ruptura (t_{50}) también aumentan a medida que aumenta la masa de ZGAg. El parámetro k varió según la masa del agente microbiano en contacto con los microorganismos y el tipo de ellos (bacterias o levaduras).

Con respecto al consorcio microbiano, el ajuste del modelo logístico no lineal y los parámetros t_{50} y k fueron diferentes con respecto a los datos obtenidos para microorganismos específicos, lo que confirma la existencia de una interacción entre microorganismos que modifica el proceso de desinfección basado en ZGAg.

En la formación de biofilm, la bacteria primero se adhiere a una superficie y se ajusta al estado de esta. Si el ambiente es propicio para el crecimiento, la bacteria crecerá en la superficie y se desarrollará dentro de una matriz madura. Debido a este mecanismo el *S. aureus* muestra resistencia al efecto microbicida de la plata.

6 REFERENCIAS

American Public Health Association (APHA). 1992. Standard methods for the examination of water and wastewater. 18 ed. APHA, AWWA, WPCF. Washington.

Abberton C. L., Bereschenko L., van der Wielen P. & Smith C. J. 2016. Survival, Biofilm Formation, and Growth Potential of Environmental and Enteric Escherichia coli in Drinking Water Microcosms. Applied and Environmental Microbiology. 82 (17). 5320-5331.

Akhigbe L., Ouki S., & Saroj D. 2016. Disinfection and removal performance for Escherichia coli and heavy metals by silver-modified zeolite in a fixed bed column. Chemical Engineering Journal. 295. 92–98.

Álvarez Guisasola, F. J. 2009. Manual de tratamientos del agua de consumo humano. Cosejería de Sanidad. Junta de Castilla y León. España.

American Public Health Association (APHA). 2012. Standard methods for examination of water and wastewater. 22nd ed. Washington. American Public Health Association.

Arcos, P., Lilia, S., Navia, Á. De, Mónica, S., Torres, E., Cristina, A., & Prieto, G. 2005. Indicadores microbiológicos de contaminación de las fuentes de agua. 69–79.

Atia, A. A. 2005. Adsorption of silver(I) and gold(III) on resins derived from bithiourea and application to retrieval of silver ions from processed photo films. Hydrometallurgy, 80 (1–2), 98–106.

Baerlocher Ch., McCusker L.B. & Olson D.H. Atlas of Zeolite Framework Types. Sixth Revised Edition 2007. Structure Commission of the International Zeolite Association. Oxford, UK.

Burrola–Aguilar, C. 2004. Cinética del proceso de desinfección del agua al utilizar clinoptilolita natural intercambiada con iones metálicos como microbicida, Dissertation, Universidad Autónoma del Estado de México.

Cavallini, E.R. 2005. Bacteriología General: Principios y Practicas de Laboratorio. Editorial de la Universidad de Costa Rica. Edición 2005. Costa Rica

Cerjan-Stefanović, S., Briški, F., & Kaštelan-Macan, M. 1991. Separation of silver from waste waters by ion-exchange resins and concentration by microbial cells - Silver uptake by microbial cells from treated waste waters after ion exchange. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 339(9), 636–639.

Cervantes-García E., García-González R. & Salazar-Schettino P.M. 2014. Características generales del *Staphylococcus aureus*. *Revista Latinoamericana de Patología Clínica y Medicina de Laboratorio*. 61 (1). 28-40.

Chiappa, X., Galindo, M. & Cervantes, A. 2009. Introducción a los modelos matemáticos de crecimiento con aplicaciones en sistemas biológicos. Primera Edición. UNAM. México.

Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED). 2001. Eliminación de Contaminantes por Fotocatálisis Heterogénea. Editado por Miguel A. Blesa. Madrid. Capítulo 15. 305-315.

Comision Nacional del Agua (CONAGUA). 2015. Estadísticas del agua en México. Edición 2015, (1), 1–5. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>

De la Peña M.E., Ducci J. & Zamora V. 2013. Tratamiento de aguas residuales en México. Banco Interamericano de Desarrollo. Sector de infra-estructura y medio ambiente. Nota técnica IDB-TN-521. 2013.

De la Rosa G.I. 2007. Comportamiento de rocas zeolíticas acondicionadas con plata, en el proceso de desinfección de agua residual de origen municipal. Instituto Tecnológico de Toluca. Tesis de Doctorado. México.

De la Rosa G.I., Olguín G.M.T. & Alcántara D. 2008. Antibacterial behavior of silver-modified clinoptilolite-heulandite rich tuff on coliform microorganisms from wastewater in a column system. *Journal of Environmental Management*. 88 (4). 853-863.

De la Rosa G.I., Olguín G.M.T. & Alcántara D. 2010. Silver-modified Mexican clinoptilolite-rich tuffs with various particle sizes as antimicrobial agents against *Escherichia coli*. *Journal of the Mexican Chemical Society*. 54 (3). 139-142.

Díaz N.M.C., Olguín M.T., Solache R.M., Alarcón H.M.T. & Aguilar E.A. 2005. Characterization and Improvement of Ion Exchange Capacities of Mexican Clinoptilolite-rich Tuffs. *Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry*. 51. 231-240.

Douterelo I., Boxall J.B., Deines P., Sekar R., Fish K.E. & Biggs C.A. 2014. Methodological approaches for studying the microbial ecology of drinking water distribution systems. *Water Research*. 65. 134-156.

Echarri L. 1998. *Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente*. Ed. Teide. Universidad de Navarra. Unidad 8.

Fass S., Dincher M.L., Reasoner D.J., Gatel D. & Block J.C. 1996. Fate of *Escherichia coli* experimentally injected in a drinking water distribution pilot system. *Water Research*. 30 (9). 2215-2221.

Ferreira L., Fonseca A., Bothelo G., Almeida C. & Neves I. 2012. Antimicrobial activity of faujasite zeolites doped with silver. *Microporous and Mesoporous Materials*. 160. 126-132.

Flores C., & Montesillo Cedillo J. L. 2006. El agua en México: lo que todas y todos debemos saber. Cemba, 1–96.

Gonzaga G.V.E. 2013. Interacción del ion amonio con zeolita natural acondicionada con plata y su efecto sobre la desinfección de agua contaminada frente a un consorcio de microorganismos Gram (+) y Gram (-). Instituto Tecnológico de Toluca. Laboratorio de Investigación en Ingeniería Ambiental. Tesis de Maestría. México.

Gordillo E. 2012. Investigación técnica y económica sobre desinfección de aguas residuales por sistemas de oxidación. Departamento de Ingeniería Civil: Ordenación del Territorio, Urbanismo y Medio Ambiente E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos. Tesis de Doctorado. México.

Guerra R., Lima E., Viniegra M., Guzmán A. & Lara V. 2012. Growth of *Escherichia coli* and *Salmonella typhi* inhibited by fractal silver nanoparticles supported on zeolites. *Microporous and Mesoporous Materials*. 147. 267-273.

Guimarães J.R. & Nour E.A.A. 2001. "Tratando nossos esgotos: processos que imitam a natureza. *Química Nova na Escola-Cadernos Temáticos*". Edición especial-Febrero, 19-30.

Hassan R.Y.A., El-Attar R.O., Hassan H.N.A., Ahmed M.A. & Khaled E. 2017. Carbon nanotube-based electrochemical biosensors for determination of *Candida albicans*'s quorum sensing molecule. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 244. 565-570.

Hernández B.N.A. & Olguín M.T. 2007. Elemental composition variability of clinoptilolite-rich tuff after the treatment with acid phosphate solutions. *Hydrometallurgy*. 89. 374-378.

Hrenovic J., Milenkovic J., Ivankovica T., & Rajic N. 2012a. Antibacterial activity of heavy metal-loaded natural zeolite. *J. Hazard. Mater.* 201-202. 260-264.

Hrenovic J., Milenkovic J., Daneu N., Matonickin K.R. & Rajic N. 2012b. Antimicrobial activity of metal oxide nanoparticles supported onto natural clinoptilolite. *Chemosphere.* 88. 1103-1107.

Inoue Y. & Hamashima H. 2012. Electrochemical Analysis of the Redox State of Silver Contained in Antibacterial Material. *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology.* 3. 136-139.

Inoue Y., Kogure M., Matsumoto K., Hamashima H., Tsukada M., Endo K. & Tanaka T. 2008. Light irradiation is a factor in the bactericidal activity of silver-loaded zeolite. *Chemical & Pharmaceutical Bulletin.* 56. 692-694.

James S.H., Gunnar F.N. & Bruce A. F. 2007. Silver. En Gunnar F.N., Bruce A.F., Monica N. y Lars F. *Handbook on the toxicology of metals.* 809-814. EE. UU.

Jiraroj D., Tungasmita S. & Tungasmita D.N. 2014. Silver ions and silver nanoparticles in zeolite A composites for antibacterial activity. *Powder Technology.* 264. 418-422.

Juhna T., Birzniece D., Larsson S., Zulenkovs D., Sharipo A., Azevedo N.F., Menard-Szczebara F., Castagnet S., Feliars C. & Keevil C.W. 2007. Detection of *Escherichia coli* in biofilms from pipe samples and coupons in drinking water distribution networks. *Applied and Environmental Microbiology.* 73. 7456–7464.

Kanafani Z.A. & Fowler V.G. 2006. *Staphylococcus aureus* infections: new challenges from an old pathogen. *Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica.* 24. 182-193.

Kaneko Y., Miyagawa S., Takeda O., Hakariya M., Matsumoto S., Ohno H. & Miyazakia Y. 2013. Real-time microscopic observation of *Candida* biofilm development and effects due to micafungin and fluconazole. *Antimicrobial Agents Chemotherapy*. 57(5). 226-2230.

Keller, L. & Surette, M.G. (2006) Communication in bacteria: an ecological and evolutionary perspective. *Nat. Rev. Microbiol.* 4, 249–258

Kinsey G., Paterson R. & Kelley J. 2003. Filamentous fungi in water systems. In *Handbook of water and wastewater microbiology*. D. Mara and N. Horan (eds.). Academic Press. London, UK.

Kwakye B., Williams C., Kenward M. & Radecka I. 2008. Antimicrobial action and efficiency of silver-loaded zeolite X. *Journal of Applied Microbiology*. 104. 1516-1524.

Lalueza P., Monzón M., Arruebo M. & Santamaría J. 2011. Bactericidal effects of different silver containing materials. *Materials Research Bulletin*. 46. 2070-2076.

Lasa I., del Pozo L., Penadés J & Leiva J. Biofilms bacterianos e infección. *An. Sist. Sanit. Navar.* 28(2). 163-175.

Lazar V. 2011. Quorum sensing in biofilms – How to destroy the bacterial citadels or their cohesion/power? *Anaerobe*. 17(6). 280-285.

Leyva R.R. 2004. Eliminación de contaminantes en aguas. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. México. 112-120.

Leyva R.R., Medellín C N.A., Guerrero C R.M., Berber M.M.S., Aragón P.A. & Jacobo A.A. 2005. Intercambio iónico de plata (I) en solución acuosa sobre clinoptilolita. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. 21 (4). 193-200.

Li B. & Logan B.E. 2004. Bacterial adhesion to glass and metaloxide surfaces. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. 36. 81-90.

Magaña S., Quintana P., Aguilar D., Toledo J., Ángeles C., Cortés M., León L., Freile Y., López T. & Torres R. 2008. Antibacterial activity of montmorillonites modified with silver. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical. 281. 192-199.

Mezule L., Larsson S. & Juhna T. 2013. Application of DVC-FISH method in tracking Escherichia coli in drinking water distribution networks. Drinking Water Engineering and Science. 6. 25–31.

Mei-Hiu L., Wan-Ju K., Chao-Chin L. & Meng-Wei Y. 2016. Modulation of Staphylococcus aureus spreading by water. Nature Scientific Reports. 6. 25233. Publicado en línea doi: 10.1038/srep25233

Mensa J., Soriano A., Llinares P., Barberán J., Montejo M., Salavert M., Alvarez R.L., Maseda E., Moreno A., Pasquau J., Gómez J., Parra J., Candel J., Ramón A.J., García J.E., Marco F., Soy D. Grau S., Arias J., Fortún F., Aristides de A.C. & Picazo J. 2013. Guía de tratamiento antimicrobiano de la infección por *Staphylococcus aureus*. Revista Española de Quimioterapia. 26 (Suppl. 1). 1-84

Milan Z., De las Pozas C., Cruz M., Borja R., Sanchez E., Ilangovan K., Espinosa Y. & Luna B. 2001. The removal of bacteria by modified natural zeolites. *Journal and Environmental Science and Health, Part A Toxic and Hazardous Substances and Environmental Engineering*. 36.1073–1087.

Monds, R. D., & O'Toole, G. A. (2009). The developmental model of microbial biofilms: ten years of a paradigm up for review, *Trends in Microbiology*. 17. 73-87.

Muller P., Guggenheim B. & Schmidlin P. R. 2007. Efficacy of gasiform ozone and photodynamic therapy on a multispecies oral biofilm in vitro. *European Journal of Oral Sciences*. 115. 77-80.

Mthombeni N.H., Mpenyana-Monyatsi L., Onyango M.S., & Momba M. N. B. 2012. Breakthrough analysis for water disinfection using silver nanoparticles coated resin beads in fixed-bed column. *Journal of Hazardous Materials*. 217-218. 133-140.

Mumpton, F. 1960. Clinoptilolite Redefined. *The American Mineralogist*. 45. 351-369.

Nazar J. 2007. Biofilms bacterianos. *Rev. Otorrinolaringol. Cir. Cabeza Cuello*. 67(1) 161-172.

Niira R., Yamamoto T., Uchida M. & Fukuoka Y. Japón. US4938955 A

Norma Oficial Mexicana NOM-041-SSA1-1993. Bienes Y Servicios. Agua Purificada Envasada. Especificaciones Sanitarias. *Diario Oficial de la Federación*. México

Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. *Diario Oficial de la Federación*. México

Olea B.D. 1995. Presencia de *Candida albicans* y su relación con los valores de CD4+ en pacientes con infección por VIH. Facultad de Medicina. Universidad de Granada. Tesis doctoral. Granada.

Olguín G.M.T. 2004. Zeolitas características y propiedades. Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares. México.

Organización Mundial de la Salud (OMS). 2006. Colaboremos por la salud. Informa sobre la salud en el mundo. Ediciones de la OMS. Ginebra.

Pancorbo, F.F.J. 2009. Procedimientos electro-físicos cobre/plata para la desinfección del agua. Montajes e instalaciones: Revista técnica sobre la construcción e ingeniería de las instalaciones. 39. N.A. 436. 26-35.

Pardi G. & Cardozo E.I. 2002. Algunas consideraciones sobre *Candida albicans* como agente etiológico de candidiasis bucal. Acta Odontológica Venezolana. 40 (1). 9-17.

Paterson R.R.M. & Lima N. 2005. Fungal contamination of drinking wáter. In Water Encyclopedia. Lehr, J., Keeley, J., Lehr, J. and Kingery, III. T.B. (eds.). John Wiley and Sons. New York.

Pavón T.B., Campos E. & Olguín M.T. 2000. Remoción de níquel, cadmio y zinc del agua, utilizando clinoptilolita heulandita. Ciencia Ergo Sum. 7. 251-258.

Pérez A.G. 2007. Química II Un enfoque constructivista. Parson Education, Universidad Autónoma de México. México.

Pollet, B., Lorimer, J. P., Phull, S. S. & Hihn, J. Y. 2000. Sonoelectrochemical recovery of silver from photographic processing solutions. Ultrasonics Sonochemistry, 7(2), 69–76.

Pontón J., Moragues M.A., Gené J., Guarro J. & Quindós G. 2002. *Candida albicans* (Robin) Berkhout. Revista Iberoamericana de Micología. Primera edición. 25-26.

Puerta G.A. & Mateos R.F. 2010. Enterobacterias. Medicine. 10 (51). 3426-3431.

Reynolds K.A. 2002. Tratamiento de aguas residuales en Latinoamérica: Identificación del problema. Agua Latinoamérica. 2 (5). 1-4.

Rivera G.M. 1999. Propiedad Antibacteriana de la Clinoptilolita Intercambiada con Plata, frente a *Escherichia coli* y *Streptococcus faecalis*. Universidad Autónoma del Estado de México. Tesis de Maestría. México.

Rivera G.M., Olguín M.T., García S.I., Alcántara D. & Rodríguez F.G. 2000. Silver supported on natural Mexican zeolite as an antibacterial material. Microporous Mesoporous Mater. 39. 431-444.

Rodríguez F.G. & Rodríguez I.I. 2004. Eliminación de metales tóxicos mediante zeolitas naturales. Universidad de La Habana. Cuba. 225-230.

Romero A.M. 2011. Evaluación del efecto de la modificación de la superficie de una zeolita natural mexicana para la remoción de iones Pb^{+2} , Cu^{2+} y degradación de fenol. Universidad michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Facultad de Ingeniería Química. Tesis de Maestría. México.

Rosabal C., Rodríguez F.G., Bogdanchikova N., Bosch P., Alvaros M. & Lara V.H. 2005. Comparative study of natural and synthetic clinoptilolites containing silver in different states. Microporous and Mesoporous Material. 86. 249-255.

Rossainz C.L.G. 2013. Influencia de Componentes Indicadores de Contaminación del Agua Residual Proveniente de una Planta Tratadora del Valle de Toluca Sobre la Actividad Microbiana de la Clinoptilolita Acondicionada con Plata Frente a *E. Coli*. Instituto Tecnológico de Toluca. Laboratorio de Investigación en Ingeniería Ambiental. Tesis de Maestría. México.

Salcedo, I., Andrade, J. A., Quiroga, J. M., & Nebot, E. 2007. Photoreactivation and dark repair in UV-treated microorganisms: Effect of temperature. *Applied and Environmental Microbiology*, 73(5), 1594–1600.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2012. Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio estadísticas ambientales. Indicadores clave y desempeño ambiental. Edición 2012. México.

Shaller W. T. 1932. The Mordenite-Ptilolite Group; Clinoptilolite, A new Species. *The American Mineralogist*. 17. 128-134

Silk N. & Ciruna K. 2005. *A practitioner's Guide to Freshwater Biodiversity Conservation*. Island Press. Washington, DC.

Simoës L.C., Simoës M., Oliveira R. & Vieira, M.J. 2007. Potential of the adhesion of bacteria isolated from drinking water to materials. *Journal of Basic Microbiology* 47. 174-183.

Simoës L.C., Simoës M. & Vieira M.J. 2010. Influence of the diversity of bacterial isolates from drinking water on resistance of biofilms to disinfection. *Applied Environmental Microbiology*. 76. 6673-6679.

Sonigo P., De Toni A. & Reilly K. 2011. A review of fungi in drinking water and the implications for human health. Department for Environment Foods and Rural Affairs. 33. 1-107

Spiro T.G. & Stigliani W.M. 2004. Química medioambiental. Pearson-Prentice Hall. 2a edición. ISBN 84-205-3905-8. 339 y 348.

Stainer Y. R., Villanueva R. J. & Guerrero R. 1992. Microbiología. Barcelona, España. Reverte.

Stewart, P. S. & Costerton, J. W. 2001. Antibiotic resistance of bacteria in biofilms. Lancet 358. 135-138.

Teresa, M., & Sánchez, O. 2008. Subproductos de la desinfección del agua por el empleo de compuestos de cloro . Efectos sobre la salud, 342, 335–342.

Top A. & Ülkü S. 2004. Silver, zinc and copper exchange in a Na-clinoptilolite and resulting effect on antibacterial activity. Applied Clay Science. 27. 13-19.

United States Environmental Protection Agency (USEPA). 1980. Ambient Water Quality Criteria for Silver. EPA 440/5–80-071. Washington D.C.

Uppuluri P., Chaturvedi A.K., Srinivasan A., Banerjee M., Ramasubramaniam A.K., Köhler J.R., Kadosh D. & Lopez-Ribot J.L. 2010. Dispersion as an important step in the *Candida albicans* biofilm developmental cycle. PLOS Pathogens. 6 (3).

Velázquez M.M.E. 2005. Surgimiento y diseminación de *Staphylococcus aureus* meticilinoresistente. Salud Pública de México. 47. 381-387.

Vidal J.E., Canizález R.A., Gutiérrez J.J. & Navarro G.F. 2007. Patogénesis molecular, epidemiología y diagnóstico de *Escherichia coli* enteropatógena. Salud Pública de México. 49. 376-386.

Wester P.O. 1971. Trace element balances in two cases of pancreatic insufficiency. Acta Medica Scandinavica.190(3). 155–161.

Williams M.M. & Braun-Howland E.B. 2003. Growth of *Escherichia coli* in model distribution system biofilms exposed to hypochlorous acid or monochloramine. Applied Environmental Microbiology. 69. 5463–5471.

Whittaker R.H. 1969. New concepts of kingdoms of organisms. Science New York. 163. 150-160.

World Health Organization (WHO). 2002. Silver and silver compounds: environmental aspects. Editorial HWO Library Cataloguing. Ginebra. 4-20.

A.- Artículo científico publicado



Desalination and Water Treatment

www.deswater.com

doi: 10.5004/dwt.2018.22780

(2018) 1–10

Silver-modified clinoptilolite-heulandite-rich tuff as microbicide agent in a column system for specific microorganisms and consortium from a deionized water suspension

V.E. Gonzaga-Galeana^a, I. De-La-Rosa-Gómez^a, M.T. Olguin^{b,*}

^aLaboratorio de Investigación en Ingeniería Ambiental, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Toluca, Av. Tecnológico s/n., Col. Agrícola Bellavista, C.P. 52149 Metepec, Estado de México, Mexico, emails:

enrique.gonzaga@live.com.mx (V.E. Gonzaga-Galeana), kivolalarosa@yahoo.com (I. De-La-Rosa-Gómez) **AQ1**

^bDepartamento de Química, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Carretera México-Toluca s/n, La Marquesa, Ocoyoacac, Estado de México C.P. 52750, Mexico, Tel. +5553297200 Ext. 12265; email: teresa.olguin@inin.gob.mx

Received 12 March 2018; Accepted 12 July 2018

abstract

The pathogen microorganism found in water causes several diseases in the human being and it is essential finding alternatives for water disinfection especially for regions which not count with purified water distribution systems. The natural zeolites modified with metals have been investigated for this purpose. However, few works have been considered a consortium of microorganisms and packed column systems. Therefore, the microbicide effect of silver-modified clinoptilolite-heulandite-rich tuff (ZGAg) on a specific microorganisms or microorganism consortium composed by *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, and *Candida albicans* in a continuous system was investigated considering the characteristics of each microorganism, the complexity of microorganism systems (individual species or consortium), and the height of the natural zeolite bed (mass of the microbicide agent). The release of silver from the silver-modified clinoptilolite-heulandite-rich tuff after the disinfection processes in the continuous system was also considered in this work. The natural zeolite of 30 mesh particle size from Guerrero (Mexico) was modified with silver using an AgNO_3 solution. Unmodified and silver-modified natural zeolites were characterized by scanning electron microscopy, X-ray energy dispersive spectroscopy, and X-ray diffraction. Microbial cultures from the American Type Culture Collection were acquired for the disinfection experiments. The obtained disinfection breakthrough curves were analyzed to obtain different parameters (among them breakpoint, disinfected water volume, and disinfection process kinetics). It was found that the disinfected water volume was higher for *E. coli* than *S. aureus* and *C. albicans* for both 300 and 400 mg of ZGAg and the volume varied depending on the mass of the microbicide zeolitic material. The resistance of the microorganism to the microbicide zeolitic material was changed when the microorganisms are in a consortium. The disinfection experimental data were well fitted to a nonlinear logistic model and the mass of the ZGAg and the type of microorganism affect the t_{50} and k parameters.

Keywords: Silver-modified-clinoptilolite-heulandite; Disinfection; Continuous system; Microbial consortium

B.- Presentación en congreso



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CELAYA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



AMIDIQ

La Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química A.C.

Nuevas tecnologías y tendencias en la Ingeniería Química

Otorga el presente

RECONOCIMIENTO

a:

VÍCTOR ENRIQUE GONZAGA GALEANA, ISAÍAS DE LA ROSA GÓMEZ Y MA.
TERESA OLGUIN GUTIERREZ

Por la presentación del trabajo:

EFFECTO BACTERICIDA DE LA ZEOLITA GUERRERO ACONDICIONADA CON
PLATA FRENTE A UN CONSORCIO DE MICROORGANISMOS EN UN SISTEMA EN
FLUJO CONTINUO

Título: Quetzalcóatl
Diseño: Aurelio Agustín Rojas Robledo, Pintor
Ejecución: Raúl Solís Medina, Escultor
Colaboradores: Macedonio López, Beatriz Adriana Rodríguez Andrade, Cecilia Rangel Mexicano, Dulce María Elizabeth Contreras Orduña, Alejandro Lemus Ortiz
Fecha: 24 de Agosto de 2015
Mural ubicado en la Unidad de Convivencia Estudiantil del Campus II del Instituto Tecnológico de Celaya

XXXVII Encuentro Nacional de la AMIDIQ

Puerto Vallarta, Jalisco, México, del 3 al 6 de mayo de 2016



Dr. Mauricio Sales Cruz
PRESIDENTE DE AMIDIQ



Dr. Pedro Alberto Quintana Hernandez
PRESIDENTE DEL COMITÉ ORGANIZADOR



Dr. Jesús Alberto Ochoa Tapia
PRESIDENTE DEL COMITÉ TÉCNICO

ANEXOS

Anexo 1 Comprobación de la formación de biofilm

Para comprobar la formación de un biofilm se realizó un hisopado, donde a la ZGAg utilizada en un proceso de desinfección se le paso suavemente un hisopo de algodón estéril por la parte superior del lecho zeolítico (Figura1, a) para enseguida realizar una siembra en agar de soya tripticaseina (Figura1, b), posteriormente se realizó una tinción de Gram para la identificación del microorganismo que se pretende encontrar en el biofilm (Figura1, d). Estas pruebas se realizaron utilizando solamente ZGAg proveniente de un proceso de desinfección frente a *S. aureus*, debido a que fue el microorganismo que ofreció mayor resistencia al efecto microbicida de la plata y que con base en la bibliografía consultada, propicia con facilidad la formación de biofilm.

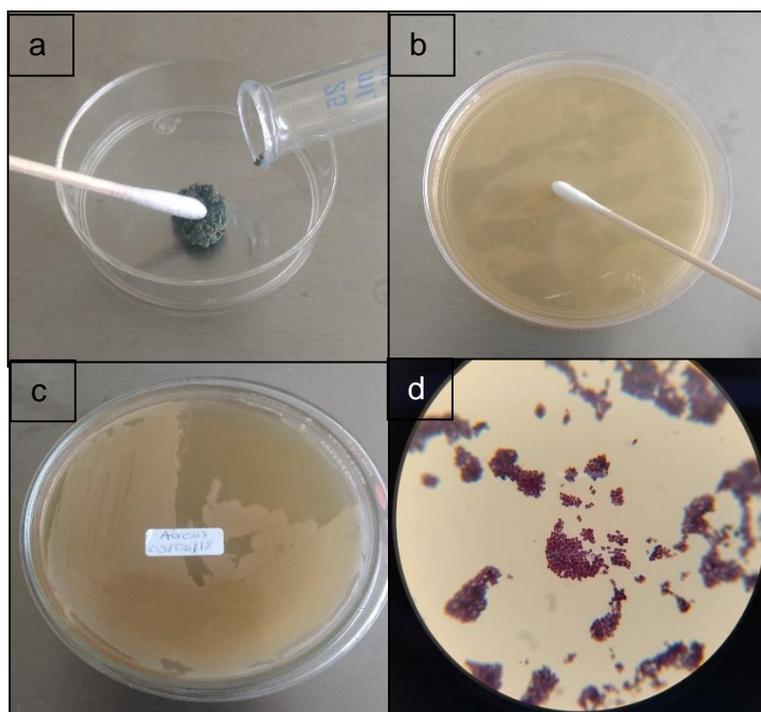


Figura 3.20. Identificación de biofilm en la estructura de la ZGAg. Hisopado (a), siembra en TSA (b), incubación (c) y tinción de Gram (d).

Lasa *et al.* (2005) y Nazar (2007) y exponen que *S. aureus* formar biopelículas, las cuales tienen una constitución compleja caracterizadas por células que están adheridas a un substrato vivo o inerte, esto se relaciona directamente con el aumento de la resistencia antimicrobiana. Esta matriz actúa como una barrera física y química que imposibilita la llegada de concentraciones adecuadas de antibiótico a la bacteria.

Hasta el momento no se tiene información bibliográfica de la comprobación de formación de biofilm en materiales zeolíticos, por lo que estas pruebas se hicieron con base en las técnicas de identificación de microorganismos usadas durante la elaboración de este proyecto.