



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

**LA PLATA COMO DESINFECTANTE DE LODOS
PROVENIENTES DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES
DOMÉSTICAS MEDIANTE UN PROCESO DE COAGULACIÓN-
FLOCULACIÓN**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRA EN INGENIERÍA

INGENIERÍA AMBIENTAL - AGUA

P R E S E N T A :

PAULINA ARACELI AGUILAR ORTEGA

TUTORA:

DRA. BLANCA ELENA JIMÉNEZ CISNEROS



2006



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dra. Gabriela Moeller Chávez.

Secretario: Dr. Víctor Manuel Luna Pabello.

Vocal: Dra. Blanca Elena Jiménez Cisneros.

1^{er.} Suplente: Dra. María Teresa Orta Ledesma.

2^{do.} Suplente: Dra. Georgina Fernández Villagómez.

Lugar donde se realizó la tesis:

Instituto de Ingeniería, UNAM

TUTORA DE TESIS:
Dra. Blanca Elena Jiménez Cisneros

FIRMA

At mis padres

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Arturo Aguilar Quintero y Celia Ortega Rodríguez, por su amor, guía y apoyo incondicional. Por estar siempre conmigo, por inspirarme y por alentarme a hacer las cosas mejor cada día. Los amo.

A mis hermanos Arturo, Andrés, Alejandra y Celia. Por ser mis mejores amigos. Arturo, gracias por tu ayuda y compañía en tantas desveladas. Ale, gracias por tus oraciones y cariño. Andrés, gracias por escucharme y ayudarme a salir adelante todos los días. Chela, gracias por tu compañía y apoyo de siempre.

A mis sobrinos Brenda, Víctor, Pablo, Fernando y Diego. Por sus ocurrencias y cariño. Ustedes hacen la vida mejor.

A mis tías, tíos, primas y primos por su confianza en mí y por estar ahí cuando más los necesito.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada durante la realización de esta tesis así como a Servicios Industriales Peñoles, S.A. de C. V. (Proyecto 3336, Convenio Industrias Peñoles-UNAM-2003) por el financiamiento para el proyecto.

A mi tutora, la Dra. Blanca Elena Jiménez Cisneros, por su asesoría, enseñanzas y apoyo. A usted mi agradecimiento, admiración y respeto.

A los miembros de mi jurado: Dra. Gabriela Moeller Chávez, Dr. Víctor Manuel Luna Pabello, Dra. Georgina Fernández Villagomez y Dra. María Teresa Orta Ledesma por sus valiosas enseñanzas y observaciones a mi trabajo de tesis.

A Catí por todo lo que me haz enseñado, por todo tu apoyo y sobre todo por ser una amiga tan especial. ¡Gracias!

A Juan Javier Carrillo Sosa por animarme a estudiar la maestría y por sus valiosos consejos.

A Pedro, por tantos momentos compartidos. "I will survive" ¿Recuerdas? ¡Lo logramos!

Al Ing. Víctor Franco por su amistad y preocupación por nosotros.

A mis queridos amigos: Rubén, Moní, Sergio, Karla, Mau, Sílvana, Alma, Jaime, Martín, Viris, Memo, Sandrita, Olí, Iván, Germán, Richard, Judith, Vicky, Tania, Rosario, Vane, Brian, Gaby, Isaura, Don Pedro, Lupita, Sol, Catalina Ferat, Marco, Karina, Leo, Pancho, Oltic, Angel, Tony, Elías, Alma, Rebe, Valdemar y a todos aquellos que, aunque no menciono expresamente, también ocupan un lugar muy importante en mi vida. A todos gracias por hacer mi camino más agradable.

A mis compañeros y profesores de la maestría.

Y a todas las personas que han hecho posible la realización de este sueño ¡Mil gracias!

CONTENIDO

NOTA ACLARATORIA	8
RESUMEN	9
INTRODUCCIÓN	12
OBJETIVO GENERAL	15
METAS	15
HIPÓTESIS	15
Capítulo 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	16
1.1 Lodos Residuales	16
1.1.1 Generación de lodos	16
1.1.2 Tratamiento y manejo de lodos	18
1.1.3 Características de los lodos	19
1.1.3.1 Físicas	20
1.1.3.2 Químicas	21
1.1.3.3 Biológicas	22
1.1.4 Normatividad de lodos y biosólidos	23
1.1.5 Procesos que reducen el contenido de patógenos en los lodos	25
1.2 Plata	27
1.2.1 Generalidades	27
1.2.2 Propiedades desinfectantes	28
1.2.3 Compuestos o formas fisicoquímicas de la plata con mayor efectividad en la desinfección de agua	29
1.2.3.1 Nitrato de plata	30
1.2.3.2 Iones plata electrogenerados	30
1.2.3.3 Plata coloidal	31
1.2.4 Usos y efectividad de la plata como agente desinfectante de agua para uso y consumo humano, agua residual y lodos	31
1.2.4.1 Desinfección de agua para uso y consumo humano	31
1.2.4.2 Desinfección de agua residual	32
1.2.5 Mecanismo de desinfección de la plata	32
1.2.6 Cinética de desinfección de la plata	34
1.3 Cobre	35
1.3.1 Generalidades	35
1.3.2 Propiedades desinfectantes	36
1.3.3 Compuestos o formas fisicoquímicas del cobre con mayor efectividad en la desinfección de agua	37
1.3.3.1 Sulfato de cobre	37
1.3.3.2 Iones cobre electrogenerados	38
1.3.4 Usos y efectividad del cobre como agente desinfectante de agua para uso y consumo humano, agua residual y lodos	38
1.3.4.1 Desinfección de agua para uso y consumo humano	39
1.3.5 Mecanismo de desinfección del cobre	39
1.3.6 Cinética de desinfección del cobre	40
1.4 Agente Sinérgico	41
1.4.1 Generalidades y propiedades desinfectantes	41
1.4.2 Usos y efectividad del agente sinérgico como desinfectante de agua para uso y consumo humano, agua residual y lodos	41

1.4.2.1	Desinfección de agua para uso y consumo humano	42
1.4.2.2	Desinfección de agua residual	42
1.4.2.3	Desinfección de lodos	43
1.4.3	Mecanismo de desinfección del agente sinérgico	43
1.4.4	Cinética de desinfección del agente sinérgico	44
1.5	Efectos Sinérgicos de la Plata con Otros Compuestos	45
1.5.1	Plata-Cobre	45
1.5.1.1	Mecanismo de desinfección de la combinación plata-cobre	46
1.5.1.2	Cinética de desinfección de la combinación plata-cobre	46
1.5.2	Plata-Cobre-Cloro libre	48
1.5.2.1	Mecanismo de desinfección de la combinación plata-cobre-cloro libre	48
1.5.2.2	Cinética de desinfección de la combinación plata-cobre-cloro libre	49
1.5.3	Productos y tecnologías de plata, sola y combinada, disponibles en el mercado	50
Capítulo 2 METODOLOGÍA		52
2.1	Muestreo	52
2.2	Caracterización del lodo crudo	54
2.3	Pruebas de desinfección	55
2.3.1	Cálculo del gradiente de velocidad	56
2.4	Inactivación de altas concentraciones de coliformes fecales y huevos de helmintos con plata	57
2.5	Combinación de la plata con otros compuestos para obtener un efecto sinérgico	58
2.5.1	Plata-cobre	59
2.5.2	Plata-agente sinérgico	60
2.5.3	Plata-cobre-agente sinérgico	61
2.6	Estudios de recrecimiento	61
2.7	Efecto de las dosis óptimas para inactivar huevos de helmintos sobre otros organismos de interés	62
2.8	Cinéticas de desinfección	63
2.9	Estudios complementarios: contenido de metales y distribución del tamaño de partícula	65
2.10	Análisis estadísticos de los datos	66
Capítulo 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN		67
3.1	Caracterización del lodo crudo	67
3.2	Inactivación de altas concentraciones de coliformes fecales y huevos de helmintos con plata	67
3.3	Combinación de la plata con otros compuestos para obtener un efecto sinérgico	70
3.3.1	Coliformes fecales	70
3.3.2	Huevos de helmintos	73
3.4	Estudios de recrecimiento	76
3.5	Efecto de las dosis óptimas para inactivar huevos de helmintos sobre otros organismos de interés	77
3.6	Cinéticas de desinfección	80
3.7	Estudios complementarios: contenido de metales y distribución del tamaño de partícula	81
3.7.1	Contenido de metales	81
3.7.2	Distribución del tamaño de partícula	82

Capítulo 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	84
4.1 Conclusiones	84
4.2 Recomendaciones	86
REFERENCIAS	87
ANEXO I: ANÁLISIS ESTADÍSTICO	97
I.1 Análisis estadístico de los resultados obtenidos en la etapa de inactivación de altas concentraciones de coliformes fecales y huevos de helmintos con plata	97
I.1.1 Coliformes fecales	97
I.1.2 Huevos de helmintos	99
I.2 Análisis estadístico de los resultados obtenidos en la etapa de la combinación de la plata con otros compuestos para obtener un efecto sinérgico	100
I.2.1 Plata-cobre	100
I.2.2 Plata-agente sinérgico	103
I.2.3 Plata-cobre-agente sinérgico	105
I.3 Análisis estadístico de los resultados obtenidos en la etapa de los estudios de recrecimiento	108
I.4 Análisis estadístico de los resultados obtenidos en la etapa del efecto de las dosis óptimas para inactivar huevos de helmintos en otros organismos de interés	111
I.5 Análisis estadístico de los resultados obtenidos en la etapa de determinación de la distribución del tamaño de partícula en el lodo desinfectado con las dosis óptimas para inactivar huevos de helmintos	114
ANEXO II: CINÉTICAS DE DESINFECCIÓN	115
II.1 Plata	115
II.2 Plata-cobre	116
II.3 Plata-agente sinérgico	116
II.4 Plata-cobre-agente sinérgico	118

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	<i>Generación de lodos por diversos procesos de tratamiento de aguas residuales</i>	17
Tabla 1.2	<i>Generación de lodos en diferentes países del mundo</i>	17
Tabla 1.3	<i>Concentraciones típicas de sólidos provenientes de varios procesos y unidades de tratamiento</i>	20
Tabla 1.4	<i>Características de lodos provenientes de diferentes tratamientos de aguas residuales domésticas y lodos</i>	21
Tabla 1.5	<i>Contenido biológico de lodos urbanos crudos de varios países</i>	23
Tabla 1.6	<i>Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos</i>	24
Tabla 1.7	<i>Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos</i>	24
Tabla 1.8	<i>Aprovechamiento de Biosólidos</i>	24
Tabla 1.9	<i>Límites máximos permisibles de microorganismos en biosólidos que establece la US-EPA</i>	25
Tabla 1.10	<i>Procesos que eliminan patógenos en lodos (PFRP) de la US-EPA y su aplicación</i>	26
Tabla 1.11	<i>Aplicaciones de la plata iónica</i>	32
Tabla 1.12	<i>Cinética de desinfección de la plata en bacterias</i>	35
Tabla 1.13	<i>Cinética de desinfección del cobre en virus y bacterias</i>	40
Tabla 1.14	<i>Cinética de desinfección del agente sinérgico aplicado a aguas residuales</i>	45
Tabla 1.15	<i>Cinética de desinfección de la combinación plata-cobre en virus, bacterias, amibas y protozoos</i>	47
Tabla 1.16	<i>Cinética de desinfección de la combinación plata-cobre-cloro libre en virus, bacterias, amibas, bacteriófagos y protozoos</i>	49
Tabla 2.1	<i>Parámetros fisicoquímicos y biológicos empleados para caracterizar el lodo crudo y desinfectado</i>	54
Tabla 2.2	<i>Diseño experimental factorial 2X6 para evaluar el efecto de la plata en coliformes fecales</i>	57
Tabla 2.3	<i>Diseño experimental de un solo factor con dos niveles completamente al azar para evaluar el efecto de la plata en huevos de helmintos</i>	58
Tabla 2.4	<i>Diseño experimental de un solo factor con 6 niveles completamente al azar para evaluar el efecto de la combinación plata-cobre en coliformes fecales</i>	59
Tabla 2.5	<i>Diseño experimental de un solo factor con 5 niveles completamente al azar para evaluar el efecto de la combinación plata-cobre en huevos de helmintos</i>	59
Tabla 2.6	<i>Diseño experimental de un solo factor con 6 niveles completamente al azar para evaluar el efecto de la combinación plata-agente sinérgico sobre coliformes fecales</i>	60
Tabla 2.7	<i>Diseño experimental de un solo factor con 4 niveles completamente al azar para evaluar el efecto de la combinación plata-agente sinérgico sobre huevos de helmintos</i>	60
Tabla 2.8	<i>Diseño experimental de un solo factor con 9 niveles completamente al azar para evaluar el efecto de la combinación plata-cobre-agente sinérgico sobre coliformes fecales y huevos de helmintos</i>	61
Tabla 2.9	<i>Dosis seleccionadas para hacer los estudios de recrecimiento</i>	62
Tabla 2.10	<i>Diseño experimental de un solo factor con dos niveles completamente al azar para evaluar el recrecimiento de coliformes fecales a las 72 h en presencia y ausencia de luz</i>	62

Tabla 2.11	<i>Diseño experimental de un solo factor con 2 niveles para evaluar el efecto de las dosis óptimas para inactivar huevos de helmintos en otros organismos de interés</i>	63
Tabla 2.12	<i>Dosis de plata, plata-cobre, plata-agente sinérgico y plata-cobre-agente sinérgico utilizadas para obtener las correspondientes cinéticas de desinfección</i>	64
Tabla 3.1	<i>Caracterización fisicoquímica y biológica del lodo fisicoquímico crudo</i>	67
Tabla 3.2	<i>Características fisicoquímicas del lodo desinfectado con las dosis óptimas para inactivar huevos de helmintos</i>	75
Tabla 3.3	<i>Efecto de las dosis óptimas para inactivar huevos de helmintos en otros organismos de interés</i>	77
Tabla 3.4	<i>Parámetros cinéticos para el modelo de Hom-Haas</i>	80
Tabla I.1	<i>Análisis de variancia de los resultados de la evaluación del efecto de la plata en coliformes fecales</i>	98
Tabla I.2	<i>Comparación de medias de los resultados de la evaluación del efecto de la dosis de plata en coliformes fecales</i>	98
Tabla I.3	<i>Comparación de medias de los resultados de la evaluación del efecto del tiempo de contacto en coliformes fecales</i>	98
Tabla I.4	<i>Análisis de variancia de los resultados de la evaluación del efecto de la plata en huevos de helmintos</i>	99
Tabla I.5	<i>Prueba t de Dunnett (2-colas) de los resultados de la evaluación del efecto de la plata en huevos de helmintos</i>	100
Tabla I.6	<i>Análisis de variancia de los resultados de la evaluación del efecto de la combinación plata-cobre en coliformes fecales</i>	101
Tabla I.7	<i>Prueba t de Dunnett (2-colas) de los resultados de la evaluación del efecto de la combinación plata-cobre en coliformes fecales</i>	101
Tabla I.8	<i>Análisis de variancia de los resultados de la evaluación el efecto de la combinación plata-cobre en huevos de helmintos</i>	102
Tabla I.9	<i>Prueba t de Dunnett (2-colas) de los resultados de la evaluación del efecto de la combinación plata-cobre en huevos de helmintos</i>	102
Tabla I.10	<i>Análisis de variancia de los resultados de la evaluación del efecto de la combinación plata-agente sinérgico en coliformes fecales</i>	103
Tabla I.11	<i>Prueba t de Dunnett (2-colas) de los resultados para evaluar el efecto de la combinación plata-agente sinérgico en coliformes fecales</i>	104
Tabla I.12	<i>Análisis de variancia de los resultados de la evaluación del efecto de la combinación plata-agente sinérgico en huevos de helmintos</i>	105
Tabla I.13	<i>Prueba t de Dunnett (2-colas) de los resultados de la evaluación del efecto de la combinación plata-agente sinérgico en huevos de helmintos</i>	105
Tabla I.14	<i>Análisis de variancia de los resultados de la evaluación del efecto de la combinación plata-cobre-agente sinérgico en coliformes fecales</i>	106
Tabla I.15	<i>Prueba t de Dunnett (2-colas) de los resultados de la evaluación del efecto de la combinación plata-cobre-agente sinérgico en coliformes fecales</i>	106
Tabla I.16	<i>Análisis de variancia de los resultados de la evaluación del efecto de la combinación plata-cobre-agente sinérgico en huevos de helmintos</i>	107
Tabla I.17	<i>Prueba t de Dunnett (2-colas) de los resultados de la evaluación del efecto de la combinación plata-cobre-agente sinérgico en huevos de helmintos</i>	108
Tabla I.18	<i>Análisis de variancia de los resultados del estudio de recrecimiento de coliformes fecales de lodo desinfectado con 20 mg Ag/g ST</i>	109
Tabla I.19	<i>Análisis de variancia de los resultados del estudio de recrecimiento de coliformes fecales de lodo desinfectado con 20:8 mg Ag-AS/g ST</i>	109

Tabla I.20	Análisis de variancia de los resultados del estudio de recrecimiento de coliformes fecales de lodo desinfectado con 5: 100: 4 mg Ag-Cu-AS/g ST	109
Tabla I.21	Análisis de variancia de los resultados del estudio de recrecimiento de coliformes fecales de lodo desinfectado con 10: 100 mg Ag-Cu/g ST	110
Tabla I.22	Prueba t de Dunnett (2-colas) de los resultados del estudio de recrecimiento de coliformes fecales de lodo desinfectado con 10: 100 mg Ag-Cu/g ST	110
Tabla I.23	Análisis de variancia de los resultados del estudio de recrecimiento de coliformes fecales de lodo desinfectado con 30: 13.3 mg Ag-AS/g ST	110
Tabla I.24	Prueba t de Dunnett (2-colas) de los resultados del estudio de recrecimiento de coliformes fecales de lodo desinfectado con 30: 13.3 mg Ag-AS/g ST	111
Tabla I.25	Análisis de variancia de los resultados de la evaluación del efecto de las dosis óptimas para inactivar huevos de helmintos en otros organismos de interés	112
Tabla I.26	Prueba t de Dunnett (2-colas) de los resultados de la evaluación del efecto de las dosis óptimas para inactivar huevos de helmintos en otros organismos de interés	113
Tabla I.27	Análisis de variancia de los resultados de la determinación de la distribución del tamaño de partícula en el lodo desinfectado con las dosis óptimas para inactivar huevos de helmintos	114

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	<i>Diagrama de flujo de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de San Pedro Atocpan</i>	53
Figura 2.2	<i>Sitio de muestreo. (a) Purga del sedimentador de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de San Pedro Atocpan y (b) colección de muestras de lodo</i>	54
Figura 2.3	<i>Prueba de desinfección de lodo fisicoquímico en un equipo de prueba de jarras</i>	55
Figura 3.1	<i>Inactivación de coliformes fecales con plata</i>	68
Figura 3.2	<i>Inactivación y eliminación de huevos de helmintos con plata</i>	70
Figura 3.3	<i>Inactivación de coliformes fecales con plata-cobre</i>	71
Figura 3.4	<i>Inactivación de coliformes fecales con plata-agente sinérgico</i>	72
Figura 3.5	<i>Inactivación de coliformes fecales con plata-cobre-agente sinérgico</i>	72
Figura 3.6	<i>Inactivación de huevos de helmintos con plata-cobre</i>	74
Figura 3.7	<i>Inactivación de huevos de helmintos con plata-agente sinérgico</i>	74
Figura 3.8	<i>Inactivación de huevos de helmintos con plata-cobre-agente sinérgico</i>	75
Figura 3.9	<i>Recrecimiento de coliformes fecales en presencia y ausencia de luz después de 72h de la desinfección</i>	76
Figura 3.10	<i>Determinación de Salmonella spp., Shigella spp., Vibrio cholerae y Pseudomonas aeruginosa en el lodo fisicoquímico (a) crudo y (b) desinfectado</i>	78
Figura 3.11	<i>Especiación de los géneros de Salmonella spp., Shigella spp., Vibrio cholerae y Pseudomonas aeruginosa mediante el sistema API-20E</i>	79
Figura 3.12	<i>Determinación de bacteriófagos mediante la técnica de la doble capa de agar</i>	79
Figura 3.13	<i>Balance de materia de la plata</i>	81
Figura 3.14	<i>Balance de materia del cobre</i>	81
Figura 3.15	<i>Estimación del contenido de metales después de la desinfección con las dosis óptimas para inactivar huevos de helmintos</i>	82
Figura 3.16	<i>Distribución del tamaño de partícula del lodo crudo y desinfectado con las dosis óptimas para inactivar huevos de helmintos</i>	83
Figura 3.17	<i>Volumen de partículas de 20-80 μm y contenido de huevos de helmintos en función de la dosis de plata-cobre-agente sinérgico aplicada</i>	83
Figura II.1	<i>Cinética de desinfección de coliformes fecales con plata</i>	115
Figura II.2	<i>Cinética de desinfección de coliformes fecales con plata-cobre</i>	116
Figura II.3	<i>Cinética de desinfección de coliformes fecales con dosis altas de plata-agente sinérgico</i>	117
Figura II.4	<i>Cinética de desinfección de coliformes fecales con dosis bajas de plata-agente sinérgico</i>	117
Figura II.5	<i>Cinética de desinfección de coliformes fecales con plata-cobre-agente sinérgico</i>	118

NOTA ACLARATORIA

Esta tesis se desarrolló como parte de un convenio efectuado entre el Instituto de Ingeniería de la UNAM, la Facultad de Química y Servicios Industriales Peñoles S. A. de C. V. Dicho convenio está sujeto a cláusulas de confidencialidad por lo que no toda la información puede ser proporcionada, en particular, la referente a uno de los desinfectantes empleados en la investigación¹. Por ello, se acordó con el Coordinador del Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería de la UNAM que en la redacción de la tesis se utilizara el seudónimo "*agente sinérgico*" (AS) para designar dicho desinfectante. Asimismo, las referencias relacionadas con este reactivo no se incluyen completas, sólo se proporciona el año de publicación (por ejemplo, "*Referencia 1, 2004*").

¹ Para información más detallada contactar al Ing. Ariel González de Servicios Industriales Peñoles:
ariel_gonzalez@penoles.com.mx

RESUMEN

El contenido de patógenos es una de las características más importantes para limitar el manejo y reutilización o depósito de los lodos debido a los problemas sanitarios que éstos pueden ocasionar. Por esta razón, la desinfección es de gran importancia para el tratamiento de los lodos, en especial, para los países en desarrollo ya que sus lodos tienen un alto contenido biológico, particularmente de huevos de helmintos. Por ejemplo, los lodos de México tienen entre 6 y 88 veces más huevos de helmintos que los lodos de Estados Unidos. Hasta el momento, las eficiencias reportadas para aquellos procesos que se utilizan para producir biosólidos clase A a partir de lodos generados en los Estados Unidos son insuficientes para producir biosólidos clase A cuando se aplican a los lodos de México. Por lo tanto, es necesario desarrollar y estudiar otros procesos que permitan resolver esta problemática. Se piensa que el uso de metales puede ser una alternativa de solución ya que la mayoría de ellos son tóxicos para los microorganismos en muy bajas concentraciones, son químicamente estables y proporcionan un efecto residual. Particularmente, la plata se ha usado para desinfectar agua en situaciones desfavorables como guerras y emergencias, y para potabilizar agua residual a bordo de la Estación Espacial Rusa MIR y del transbordador espacial de la NASA. Para aumentar la eficiencia de desinfección y reducir la cantidad adicionada del metal, la plata se combina con otros elementos o compuestos tales como el cobre y el agente sinérgico. En esta tesis se evaluó el uso de la plata, sola o combinada, como desinfectante de lodos fisicoquímicos con alto contenido de coliformes fecales y huevos de helmintos.

El lodo fisicoquímico provino de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas, de la ciudad de México, que trata 35 L/s con un proceso de coagulación floculación con sulfato de aluminio y un polímero aniónico. Se ha reportado (Jiménez *et al.*, 2002) que estos lodos tienen un alto contenido de microorganismos, muchos de ellos patógenos. La caracterización del lodo se hizo en términos de los sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV, % de ST), pH, coliformes fecales y huevos de helmintos. Los desinfectantes empleados fueron soluciones de nitrato de plata, sulfato de cobre pentahidratado y agente sinérgico. Las pruebas de desinfección se llevaron a cabo en un equipo de prueba de jarras bajo las siguientes condiciones: mezcla rápida con un gradiente de velocidad de 758 s^{-1} durante 1 minuto seguida de una mezcla lenta con un gradiente de 387 s^{-1} durante el tiempo de contacto establecido (de 10 a 60 minutos).

En la primera etapa de experimentación, se evaluó la capacidad de la plata para inactivar las altas concentraciones de coliformes fecales y huevos de helmintos contenidas en el lodo. Para ello, se analizó el efecto de 20 y 40 mg Ag/g ST con seis tiempos de contacto (de 10 a 60 minutos) en coliformes fecales. Posteriormente, con base en los resultados obtenidos y en los requerimientos de la NOM-004-SEMARNAT-2002, se evaluó el efecto de 30 y 40 mg Ag/g ST en huevos de helmintos con un tiempo de contacto de 60 minutos, que es el tiempo de contacto mínimo que se requiere para causar un daño efectivo en estos parásitos, según estudios preliminares. En las condiciones estudiadas se logró reducir de 4 a 7.4 log el contenido de coliformes fecales en 10-20 minutos y el 52% y 65% del contenido de huevos de helmintos viables y, el 20 y 25% del contenido de huevos de helmintos totales, respectivamente, en 60 minutos. Sin embargo, no fue posible producir biosólidos clase A.

En la segunda etapa experimental, se analizaron tres combinaciones de plata con otro metal y el agente sinérgico: plata-cobre, plata-agente sinérgico y plata-cobre-agente sinérgico. Para las tres combinaciones, se observó un efecto sinérgico. Asimismo, para casi todas las dosis evaluadas de las tres combinaciones, los coliformes fecales fueron reducidos por debajo del límite de detección (<3 NMP/g ST) a partir de un contenido inicial de 5.75×10^7 NMP/g ST en 60 minutos. En cuanto a los huevos de helmintos, se alcanzaron altas eficiencias de inactivación (90% con 60:600 mg Ag-Cu/g ST y 89% con 60:24 mg Ag-AS/g ST) para las combinaciones plata-cobre y plata-agente sinérgico. Sin embargo, fue imposible producir biosólidos clase A. Esto sólo se logró con la combinación plata-cobre-agente sinérgico con las dosis 10:100:8 y 5:50:13.3 mg Ag-Cu-AS/g ST en 60 minutos. En estas condiciones, se logró reducir por completo el contenido de coliformes fecales (7.76 log) y el de huevos de helmintos viables (215 HH viables/g ST).

La tercera etapa de la experimentación consistió en la realización de los estudios de recrecimiento a las 72 h, en presencia y ausencia de luz. Los estudios sólo se hicieron para aquellas dosis de plata, plata-cobre, plata-agente sinérgico y plata-cobre-agente sinérgico que disminuyeron el contenido de coliformes fecales a menos de 1000 NMP/g ST. En ningún caso se observó recrecimiento, por el contrario, se encontró un efecto desinfectante residual que fue más notable con la combinación plata-cobre.

La cuarta etapa consistió en evaluar el efecto de las dosis óptimas que se encontraron para inactivar huevos de helmintos (10:100:8 y 5:50:13.3 mg Ag-Cu-AS/g ST) en otros

organismos de interés. Con estas dosis se redujo por completo el contenido de bacteriófagos somáticos (4.76 log), bacteriófagos MS (F+) [4.47 log], fagos de *Salmonella typhimurium* (2.71 log), *Salmonella* spp. (4.91 log), *Shigella* spp. (4.25 log), *Pseudomonas aeruginosa* (3.75 log) y *Vibrio cholerae* (2.99 log). En cuanto al contenido de protozoos, no se produjo un cambio estadísticamente significativo, sin embargo se debe tener en cuenta que en este trabajo no se midió la viabilidad de estos organismos.

En la quinta etapa se obtuvieron las constantes de desinfección de la plata, plata-cobre, plata-agente sinérgico y plata-cobre-agente sinérgico con base en coliformes fecales mediante el modelo de Hom-Haas. La inactivación de estas bacterias, en todos los casos, es exponencial y de primer orden con respecto a la dosis. Se encontró que la combinación plata-cobre-agente sinérgico fue la más efectiva para desinfectar lodos fisicoquímicos, aunque no fue la más rápida.

En la sexta etapa se determinó el contenido de plata y cobre, mediante un balance de materia, después de la desinfección y se encontró que para el cobre, se rebasan los límites que establece la NOM-004-SEMARNAT-2002 para biosólidos tipo excelente y bueno en 672%-6,672% y en 234%-2,327%, respectivamente. El contenido de plata en lodos y biosólidos no está regulado, sin embargo, para ambos metales se requiere aplicar un método de recuperación que asegure la utilización del biosólido sin riesgo de contaminación por metales. Asimismo, se determinó la distribución del tamaño de partícula y se comparó con el comportamiento del contenido de huevos de helmintos. No se encontró ninguna relación entre ambos parámetros puesto que no hay un cambio significativo en la distribución del tamaño de partículas durante la desinfección y en el contenido de huevos de helmintos sí lo hay.

Este estudio aporta información importante acerca del uso, como desinfectantes para lodos fisicoquímicos, de la plata, plata-cobre, plata-agente sinérgico y, particularmente, de la combinación plata-cobre-agente sinérgico para producir biosólidos clase A a partir de las altas concentraciones de microorganismos y parásitos que caracterizan a los lodos del país. Sin embargo, aún hacen falta más estudios al respecto, como la realización de pruebas en planta piloto, y un estudio de costos para comprobar la aplicabilidad de este proceso.

INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas asociados con el tratamiento de aguas residuales es la producción de grandes volúmenes de lodos. El tratamiento y depósito de éstos son actividades complejas debido a que (1) están compuestos de las sustancias contaminantes que se remueven del agua residual y (2) tienen un alto contenido de microorganismos patógenos (Metcalf y Eddy, 1991). Esta última característica es de gran importancia para los países en desarrollo ya que el contenido de microorganismos y parásitos en sus lodos es particularmente elevado, tal es el caso de México cuyos lodos contienen entre 10^7 – 10^{10} NMP/g ST de coliformes fecales, 10^6 – 10^8 NMP/g ST de *Salmonella typhi* y 73–177 huevos/g ST de huevos de helmintos (Jiménez *et al.*, 2002) a diferencia de los lodos de países desarrollados como Estados Unidos cuyo contenido es de 10^7 NMP/g ST de coliformes fecales, 10^2 NMP/g ST de *Salmonella* y <2-13 huevos/g ST de huevos de helmintos (Reimers *et al.*, 1986).

En diversos países se han desarrollado regulaciones que definen la calidad de los biosólidos² para evitar que su reúso o depósito dañen la salud de la población y al ambiente. Estados Unidos es uno de los países pioneros en esta materia (Oleszkiewicz y Mavinic, 2002) y su normatividad se ha utilizado como modelo de varios países, entre ellos México. Sin embargo, la normatividad nacional es menos exigente ya que es imposible cumplir con los bajos valores que la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (*United States-Environmental Protection Agency*, US EPA) establece para biosólidos Clase A usando tecnología convencional y accesible dadas las características del lodo generado en el país (Jiménez *et al.*, 2002). De esta manera, la eliminación de microorganismos patógenos, es decir la desinfección, es de gran importancia para el posible reaprovechamiento de los lodos, como biosólidos (en la agricultura, por ejemplo, Horan *et al.*, 2004), o su depósito final.

En la literatura se reportan varios procesos para eliminar microorganismos en lodos, pero sus eficiencias son muy diferentes. Por ello, la US EPA (1993) los clasificó como (1) Procesos que eliminan patógenos (*Processes to Further Reduce Pathogens*, PFRP) y, (2) Procesos que reducen patógenos de manera significativa (*Processes to Significantly Reduce Pathogens*, PSRP). Los PFRPs son procesos que producen

² Lodos que han sido sometidos a procesos de estabilización y que por su contenido de materia orgánica, nutrientes y características adquiridas después de su estabilización, pueden ser susceptibles de aprovechamiento (NOM-004-SEMARNAT-2002; DOF, 2003).

biosólidos Clase A de la US EPA a partir de las concentraciones de microorganismos y parásitos encontradas en los lodos de Estados Unidos. Sin embargo, las eficiencias reportadas para estos procesos son insuficientes para producir biosólidos clase A a partir de las elevadas concentraciones microbiológicas reportadas en el país. Por ello, es necesario desarrollar y estudiar otros procesos que permitan inactivar lodos con alto contenido de microorganismos y parásitos, una necesidad que no sólo concierne a México sino a todos los países en desarrollo.

Existen varias maneras de desinfectar lodos y rara vez se han usado metales, aunque la mayoría de ellos (como plata [Ag] y cobre [Cu], por ejemplo) son tóxicos para los microorganismos en dosis muy pequeñas (Kim *et al.*, 2002). La plata posee propiedades bactericidas³ y bacteriostáticas⁴ por lo que se ha empleado como desinfectante desde el siglo VII a.C. y, después de la Segunda Guerra Mundial se emplea para desinfectar agua en situaciones desfavorables como guerras y emergencias (*National Research Council*, 1980; Craig, 2001). La plata, incluso, se ha utilizado para potabilizar agua residual a bordo de la Estación Espacial Rusa MIR y del transbordador espacial de la NASA (Silver, 2003). En la actualidad, es bien sabido que la plata puede inactivar virus, bacterias, algas, hongos y algunos protozoos (Abad *et al.*, 1994; Rohr *et al.*, 2000; Silver, 2003), pero su efecto en huevos de helmintos aún no se ha establecido. En algunos casos, para aumentar la capacidad de desinfección de la plata y disminuir la dosis aplicada y los costos de desinfección, ésta se combina con otros compuestos o metales tales como el cobre. La plata y el cobre combinados se utilizan para desinfectar agua de albercas, hospitales, industrias y de consumo humano (Craig, 2001). No obstante, el uso de estos dos metales combinados para inactivar huevos de helmintos o para desinfectar lodos no se ha reportado.

En esta tesis, se usó a la plata como el principal reactivo de desinfección por sus excelentes propiedades desinfectantes así como por el hecho de que México es el principal productor de plata a nivel mundial. Además, la variación del precio de los metales hace que los productores de plata busquen nuevos usos para diversificar y hacer más competitivo el mercado, y uno de los considerados es el campo de la ingeniería ambiental. Considerando lo anterior, el objetivo de esta tesis fue evaluar la

³ Agente que destruye bacterias (Pelczar *et al.*, 1982).

⁴ Agente que inhibe el desarrollo de las bacterias sin matarlas (Pelczar *et al.*, 1982).

efectividad de la plata, sola y combinada con cobre y un *agente sinérgico*⁵, para desinfectar lodos fisicoquímicos, caracterizados por un elevado contenido de organismos patógenos, particularmente de huevos de helmintos.

En el primer capítulo se presentan los fundamentos teóricos que sustentan esta tesis. De manera inicial se proporciona información acerca de la caracterización, generación, manejo, tratamiento y normatividad de lodos. Posteriormente, se presenta información referente a la plata, el cobre y el agente sinérgico como desinfectantes de agua para uso y consumo humano, agua residual y lodos.

En el capítulo dos se detalla la metodología empleada durante la experimentación, misma que se dividió en las siguientes seis etapas:

1. Inactivación de altas concentraciones de coliformes fecales y huevos de helmintos con plata.
2. Combinación de la plata con otros compuestos para obtener un efecto sinérgico.
3. Estudios de recrecimiento.
4. Efecto de la dosis óptima para inactivar huevos de helmintos sobre otros organismos de interés.
5. Cinéticas de desinfección.
6. Estudios complementarios: contenido de metales y distribución del tamaño de partícula.

En el Capítulo tres se presentan los resultados obtenidos en cada una de las etapas de experimentación así como su discusión con base en el correspondiente análisis estadístico. Asimismo, se exponen las posibles causas de dichos resultados. Finalmente, en el capítulo cuatro se presentan las conclusiones y recomendaciones del proyecto.

⁵ Como se menciona en la nota aclaratoria presentada al inicio de esta tesis, la información referente a este reactivo está protegida debido a que está en curso de patente.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar a la plata como desinfectante de lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales domésticas mediante un proceso de coagulación-floculación utilizando a los coliformes fecales y a los huevos de helmintos como variables de respuesta.

METAS

1. Establecer el estado del arte sobre el uso de la plata, el cobre y el agente sinérgico como desinfectantes de agua para uso y consumo humano, agua residual y lodos.
2. Definir la dosis y tiempo de contacto óptimos para la inactivación con plata, sola y combinada con cobre y/o un agente sinérgico, de coliformes fecales y huevos de helmintos en lodos provenientes de un proceso fisicoquímico.
3. Estudiar el posible recrecimiento bacteriano después de la desinfección con plata sola y combinada con cobre y/o un agente sinérgico.
4. Evaluar el efecto de la dosis óptima sobre bacteriófagos somáticos, bacteriófagos MS (F+), fagos de *Salmonella typhimurium*, *Salmonella* spp., *Shigella* spp., *Pseudomonas aeruginosa*, *Vibrio cholerae*, *Giardia* sp. y *Cryptosporidium* sp.
5. Obtener las cinéticas de desinfección de la plata y de cada una de sus combinaciones mediante el modelo de Hom-Haas.
6. Determinar el contenido de plata y cobre después de la desinfección y, en el caso del cobre, compararlo con los límites que establece la NOM-004-SEMARNAT-2002 para biosólidos tipo excelente y bueno.
7. Determinar la existencia de alguna relación entre la distribución del tamaño de partícula y el contenido de huevos de helmintos en el lodo fisicoquímico que permita, en un momento dado, el pronóstico del contenido biológico de los lodos de una manera más rápida.

HIPÓTESIS

La plata sola o combinada con cobre y/o con un agente sinérgico puede eliminar, en las concentraciones y tiempo de contacto requeridos, organismos de interés para cumplir con la normatividad mexicana de lodos (NOM-004-SEMARNAT-2002) para producir biosólidos clase A.

Capítulo 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 Lodos Residuales

Los lodos residuales o lodos son sólidos con un contenido variable de humedad⁶, provenientes del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales, que no han sido sometidos a procesos de estabilización (NOM-004-SEMARNAT-2002; DOF, 2003). En general, el volumen y composición de los lodos dependen del proceso de tratamiento que se aplique al agua así como de la composición de ésta (Méndez, 2003). Esta tesis se enfoca a los lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales. A continuación se presenta información sobre la generación, tratamiento y manejo de lodos a nivel internacional y nacional.

1.1.1 Generación de lodos

La cantidad de lodos producidos por un sistema de tratamiento depende principalmente de su naturaleza. En general, los procesos biológicos producen menor cantidad de lodos que los fisicoquímicos, ello debido a que los primeros se usan para disminuir el contenido de materia orgánica y los segundos para remover sólidos suspendidos, fósforo y algunos metales mediante la adición de reactivos (Jiménez, 2001; Barrios, 2003). La diferencia en la cantidad de lodos producida por los dos tipos de procesos (biológicos y fisicoquímicos) se puede apreciar de manera clara en la Tabla 1.1, en donde se presenta la producción de lodos en base seca (sólidos totales) de diferentes procesos de tratamiento de aguas residuales. Es notable que el Tratamiento Primario Avanzado (TPA) y la remoción de fósforo mediante la adición de cal producen la mayor cantidad de lodos.

De manera adicional, la generación de lodos también depende de otros factores tales como la calidad del agua residual, el grado de dilución con agua de lluvia, las condiciones de operación del proceso de tratamiento y, en su caso, de la dosis de reactivos (Barrios, 2003).

⁶ Los lodos pueden ser sólidos, semisólidos o líquidos dependiendo de su contenido de humedad.

Tabla 1.1 Generación de lodos por diversos procesos de tratamiento de aguas residuales

Proceso	Generación de lodos, kg ST/10 ³ m ³	
	Intervalo	Valor típico
Sedimentación primaria	110-170	150
Lodos activados	70-100	80
Filtro percolador	60-100	70
Remoción de fósforo mediante la adición de cal		
Dosis bajas (350-500 mg/L)	240-400	300
Dosis altas (800-1600 mg/L)	600-1300	800
Tratamiento primario avanzado (TPA)	156-315	*

* Depende de la calidad del agua y de la dosis de reactivo.

Fuente: Adaptado de Metcalf y Eddy, 2003 y Jiménez *et al.*, 1997 y 1998.

En cuanto a la generación de lodos a nivel mundial, la información es escasa y, en algunos casos, prácticamente nula (como en México) o inexistente (como en Sudáfrica; Snyman *et al.*, 1999). Los países que presentan mayor información al respecto son Estados Unidos y la Unión Europea⁷. En la Tabla 1.2 se presenta la producción de lodos de algunos países del mundo. En México, aunque se desconoce la cantidad exacta de lodos generados, se estima que, con el incremento de la capacidad para el tratamiento de aguas residuales para cumplir con la norma ambiental NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1997), la cantidad producida será de aproximadamente 650,000 ton en base seca/año en un futuro próximo (23,430 toneladas base seca/año provienen de las plantas de tratamiento de aguas residuales del Distrito Federal; Barrios *et al.*, 2001; SMA, 2005).

Tabla 1.2 Generación de lodos en diferentes países del mundo

País	Generación de lodos (millones de toneladas base seca/año)	Referencia
Beijing	0.18 ^a	Lee <i>et al.</i> , 2005
Canadá	0.39 ^d	Apedaile, 2001
Estados Unidos	7.6 ^b	US EPA, 1999
Japón	1.8 ^d	Ito <i>et al.</i> , 2001 en Méndez, 2003
México	0.65 ^c	Barrios <i>et al.</i> , 2001
Shangai	0.29 ^a	Lee <i>et al.</i> , 2005
Taiwán	2.8x10 ⁻⁶ (d)	Hsiau y Lo, 2001 en Barrios, 2003
Unión Europea	10.1 ^b	US EPA, 1999

^a 2010; ^b 2005; ^c 2003; ^d 2000

⁷ En la actualidad, la Unión Europea consiste de 25 países miembros, 10 de ellos recién incorporados en marzo de 2004, y se espera que para el 2007 sean 27 países miembros (Europa, el portal de la Unión Europea, 2005).

1.1.2 Tratamiento y manejo de lodos

En varios países del mundo, en forma común, los lodos se descargan al drenaje, se incineran o se usan sin control en la agricultura (Gantzer *et al.*, 2001; Horan *et al.*, 2004). En la actualidad, este enfoque está cambiando debido a que los lodos, por su contenido de materia orgánica y nutrientes, representan una fuente valiosa de carbono, de nutrientes y de micro elementos útiles para suelos deficientes de estos elementos. Se considera que, una vez tratados, los lodos o biosólidos posiblemente son uno de los mejores acondicionadores de suelos destinados a la agricultura (Oleszkiewicz y Mavinic, 2002). Además de estas características, los lodos contienen contaminantes (físicos, químicos y biológicos) que fueron removidos del agua residual, por lo que antes de utilizarlos, es necesario darles un tratamiento. Por esta razón, en la mayoría de las grandes ciudades del mundo se han desarrollado programas de manejo de lodos con el objeto de obtener un beneficio, pero además de disminuir el riesgo a la salud pública y al deterioro ambiental (Barrios, 2003).

En Estados Unidos, en 1998 el 60% de los lodos producidos se aplicaron al suelo (uso benéfico), el 22% se incineró, el 17% se depositó en rellenos sanitarios y el 1% tuvo un depósito no especificado. Se espera que para el 2005, la cantidad de lodos que se destinen a un uso benéfico aumente a 66% (US EPA, 1999).

En la Unión Europea el uso benéfico de los lodos, en comparación con Estados Unidos, es menor. Todavía en algunos países miembros, como Sajonia, está prohibido el empleo de los lodos en la agricultura, sin embargo, se está enfatizando su uso como biosólidos (Iranpour *et al.*, 2004). De manera que, en la Unión Europea el 37% de los lodos producidos se usa en la agricultura, el 11% se incinera, el 40% se deposita en rellenos sanitarios y, hasta antes de 1998, el 6% todavía se vertía al mar; esta práctica está prohibida en la actualidad (Diario Oficial de las Comunidades Europeas, 1998).

En China, sólo una tercera parte de los lodos generados se tratan (Barrios, 2003). En particular, en Beijing, todo el lodo producido se hace composta con la finalidad de aplicarlo al suelo. En Shangai, otra ciudad importante de China, el 78% de los lodos se trata mediante digestión aerobia/anaerobia, secado, incineración o composteo para aplicarlos al suelo y el resto del lodo se deposita en rellenos sanitarios (Lee *et al.*, 2005).

En Canadá, aproximadamente el 43% de los biosólidos se aplica al suelo, el 47% se incinera, el 4% se confina en rellenos sanitarios, y el 6% restante se usa para la recuperación de suelos y otros usos no especificados (Apedaile, 2001). El porcentaje de lodos que se incinera en Canadá es elevado, esto se debe a que la incineración es un tratamiento que reduce de manera significativa la masa de lodos y por consiguiente los costos de transporte y aplicación o depósito, a parte de eliminar por completo los patógenos. Sin embargo, los costos del proceso en sí son considerables (Barrios, 2003) y para un país como México, no representa una opción atractiva en términos beneficio/costo (Méndez, 2003).

En México, el porcentaje de lodos al que se le da un uso benéfico es muy bajo (Cardoso *et al.*, 2000; Jiménez *et al.*, 2002). Además de que la información disponible relacionada con lodos es prácticamente nula. Esta situación hace que sea necesario establecer programas de manejo integral de lodos que permitan su aprovechamiento con un tratamiento previo que reduzca el contenido microbiológico (Barrios, 2003), puesto que la principal preocupación de aplicar el lodo al suelo para los países en desarrollo es el contenido de patógenos y no de metales pesados (Jiménez *et al.*, 2004). A este respecto, se han realizado varios estudios acerca de procesos de tratamiento de lodos residuales con la finalidad de aumentar el uso benéfico de lodos en el país sin riesgo a la salud y al ambiente (Moeller y Torres, 1997; Jiménez *et al.*, 2000; Jiménez *et al.*, 2001; Jiménez *et al.*, 2002; Mijaylova *et al.*, 2002; Moeller y González, 2002).

Para tratar y depositar o reusar de manera adecuada los lodos es necesario conocer sus características físicas, químicas y biológicas, así como la normatividad a la que están sujetos. En las siguientes secciones se tratan dichos temas.

1.1.3 Características de los lodos

Las características de los lodos dependen de la operación unitaria o proceso de tratamiento que los origina (sedimentación primaria, sedimentación secundaria, tratamiento fisicoquímico, etc.), de su edad y del proceso de tratamiento al que se someten (Metcalf y Eddy, 2003). Se clasifican en características físicas, químicas y biológicas.

1.1.3.1 Físicas

La principal propiedad física de los lodos es la concentración de sólidos totales (ST) la cual expresa la relación entre el peso de los sólidos y el peso de la muestra, de acuerdo con la ecuación 1:

$$C = \frac{\text{g de sólidos secos}}{\text{g lodo}} = \frac{\text{g}}{\text{g}} \quad (1)$$

Este número multiplicado por 100 se denomina "porcentaje de sólidos" y es la forma usual de expresar la concentración (Jiménez, 2001). La Tabla 1.3 muestra algunas de las concentraciones típicas de sólidos en lodos provenientes de varias operaciones unitarias y procesos de tratamiento de agua residual y lodos. En general, después de someter los lodos a un tratamiento de estabilización como la digestión aerobia o la anaerobia, el contenido de sólidos disminuye. Esto se debe a que del 30 al 65% de la materia orgánica se estabiliza (esto es, que ya no es putrescible) durante el proceso (WEF y ASCE, 1998). Asimismo, se observa que los lodos son, en su mayoría, agua por lo que a menor cantidad de sólidos, mayor volumen por manejar (Jiménez, 2001) y, por lo tanto, mayores son los costos de transporte y aplicación o depósito.

Tabla 1.3 Concentraciones típicas de sólidos provenientes de varios procesos y unidades de tratamiento

Operación o proceso	Concentración** (% peso/peso)	
	Intervalo	Típico
Sedimentación primaria	5 – 9	6
Sedimentación secundaria		
Lodo activado con sedimentación primaria	0.5 – 1.5	0.8
Lodo de biofiltro	1 – 3	1.5
Digestión aerobia*		
Lodo primario	2.5 – 7	3.5
Mezcla de lodo primario y activado	1.5 - 4	2.5
Digestión anaerobia*		
Lodo primario	2 – 5	4
Mezcla de lodo primario y activado	1.5 – 4	2.5
Espesado por gravedad*		
Lodo primario	5 – 10	8
Mezcla de lodo primario y activado	2 – 8	4

* Procesos de tratamiento de lodos.

** Base seca.

Fuente: Adaptado de Metcalf y Eddy, 2003.

1.1.3.2 Químicas

Las características químicas de los lodos definen las necesidades de tratamiento, las condiciones para su depósito final y posible reúso. Sin embargo, la naturaleza química de los lodos aún no ha sido bien caracterizada debido a su diversidad y a que ha sido poco estudiada.

Tabla 1.4 Características de lodos provenientes de diferentes tratamientos de aguas residuales domésticas y lodos

Tipo de Lodo	Características
Lodo primario	En general es gris, granular y con un olor extremadamente desagradable. En condiciones de operación adecuadas, se digiere con facilidad.
Lodo de precipitación química	Generalmente es de color oscuro, aunque puede ser rojo si contiene mucho hierro o gris oscuro cuando se usa cal para la precipitación. Es ligeramente granular y, en ocasiones, gelatinoso debido al hierro y al aluminio. Posee un olor desagradable, pero en menor grado que el del lodo primario. Presenta una descomposición similar a la del lodo primario, pero a una tasa menor.
Lodos activados	Generalmente son de color café, floculentos y con olor a "tierra mojada". Los lodos tienden a volverse sépticos de manera rápida y adquieren un color oscuro y un olor a putrefacción muy desagradable. Cuando la aireación es deficiente, el lodo se vuelve más claro de lo usual y los flóculos tienden a sedimentar muy lento. Se digieren con facilidad solos o mezclados con lodo primario.
Lodo de filtro percolador	Es de color castaño, floculento y, cuando está fresco, no tiene mal olor. En general, se descompone más lento que otros lodos crudos y se digiere con facilidad.
Digestión aerobia*	El color varía de café a café oscuro, es floculento y posee un olor (no desagradable) que con frecuencia se caracteriza como mohoso. Cuando está bien digerido se desagua con facilidad en lechos de secado.
Digestión anaerobia*	Es de color café oscuro a negro y contiene una cantidad excepcional de gas. Cuando está completamente digerido, tiene un ligero olor a alquitrán caliente o a goma quemada, no desagradable. La digestión del lodo primario produce aproximadamente el doble de metano que la digestión del lodo que proviene de los lodos activados.
Composta*	En general, es de color café oscuro a negro, aunque el color puede variar en función del material que se utiliza para la composta. Posee un olor semejante al de los acondicionadores comerciales para jardines.

* Procesos de tratamiento de lodos.

Fuente: Adaptado de Metcalf y Eddy, 2003.

Entre las principales propiedades químicas se encuentran el olor y la composición química. El olor, en la mayoría de los casos, se debe a la presencia de ácido sulfhídrico, y la composición química, es resultado de la calidad del agua residual que se trata y del proceso que se

aplica. En la composición química se distinguen cinco grupos: (1) metales y cianuros, (2) compuestos orgánicos volátiles, (3) compuestos orgánicos semivolátiles, (4) plaguicidas y BPCs (bifenilos policlorados) y (5) otros (Jiménez, 2001). En general, para los países en desarrollo el contenido de compuestos tóxicos es mucho menor que el de los países desarrollados. Jiménez *et al.* (2004) señalan que el contenido de metales pesados en países en desarrollo es bajo (marcadamente inferior a los límites que establece la US EPA para un posible reaprovechamiento) y no representan un problema para su reúso o depósito. En la Tabla 1.4 se presentan algunas de las características químicas de lodos provenientes de varios procesos de tratamiento de aguas residuales domésticas y lodos. Se puede notar que el olor es una de las características que más cambia cuando los lodos son tratados. El olor es una de las consideraciones estéticas más importantes cuando se aplican biosólidos al suelo por su impacto en la sociedad, aunque no tiene efectos adversos en la salud o el ambiente (WEF y ASCE, 1998).

1.1.3.3 Biológicas

El tipo y cantidad de organismos patógenos (virus, bacterias, protozoos y helmintos) presentes en un lodo dependen, básicamente, del estado epidemiológico de la comunidad de donde provienen (Jiménez, 2001). En la Tabla 1.5 se muestran las concentraciones de organismos reportadas en lodos crudos urbanos de varios países (Gaspard *et al.*, 1997; Méndez, 2003). Es notable que los lodos de México presentan las concentraciones más elevadas junto con los de Ghana respecto de otros países, lo que refleja el bajo nivel de salud de la población.

El contenido de patógenos es una de las propiedades más importantes para limitar el manejo y reutilización o depósito de los lodos, ya que pueden provocar problemas sanitarios; sobre todo, cuando hay posibilidad de contacto directo con la población, como en el caso del manejo de lodos en los países en desarrollo que con frecuencia se hace de forma manual (Jiménez, 2001). Por esta razón, se han desarrollado legislaciones que regulan el contenido de patógenos en varios países, entre ellos México. A continuación se presentan de manera breve los aspectos que contempla la normatividad mexicana.

Tabla 1.5 Contenido biológico de lodos urbanos crudos de varios países

País	Coliformes fecales (NMP/g ST)	<i>Salmonella</i> spp. (NMP/g ST)	Huevos de helmintos (huevos/g ST)	Referencia
Alemania	SD	SD	< 1 ^a	Schuh <i>et al.</i> , 1985 en Gaspard <i>et al.</i> , 1997
Australia	SD	10 ² a 10 ³	SD	Sidhu <i>et al.</i> , 2001 en Méndez, 2003
Estados Unidos	10 ⁷	10 ²	2-13	Reimers <i>et al.</i> , 1986
Francia	10 ³ a 10 ⁷	SD	<1 a 4.5	Gantzer <i>et al.</i> , 2001
Japón	10 ⁵	4	SD	Hays, 1997 y Watanabe, 1997 en Méndez, 2003
Reino Unido	10 ⁴ a 10 ⁶	10 ² a 10 ⁴	< 6	Crewe, 1984 y Michel y Rooksby, 2000 en Méndez, 2003
Ghana	10 ⁴	SD	76	Hall, 2000 en Méndez, 2003
México	10⁷ a 10¹⁰	10⁶ a 10⁸	73-177	Jiménez <i>et al.</i> , 2002

^a Concentración del 70% de las muestras analizadas. Seguimiento de 58 PTAR.

ST: sólidos totales; SD: Sin datos

1.1.4 Normatividad de lodos y biosólidos

La normatividad mexicana (NOM-004-SEMARNAT-2002; DOF, 2003) clasifica a los biosólidos, en función del contenido de microorganismos y parásitos, en tres clases: A, B y C (Tabla 1.6), y con base en el contenido de metales (Tabla 1.7), en dos tipos: excelentes y buenos; así se establece la forma en que los biosólidos pueden ser aprovechados (Tabla 1.8). Los límites máximos permisibles de microorganismos que marca la normatividad mexicana son similares a los que establece la US-EPA (Tabla 1.9) en el apartado 503 del Código de Regulaciones Federales (CFR). La principal diferencia entre las dos legislaciones es la existencia de una clase C en la normatividad mexicana ya que debido al alto contenido de organismos patógenos en los lodos del país (Jiménez *et al.*, 2002) es difícil, en términos económicos, cumplir con las exigencias de la clase A. Por ello, la política actual consiste en reducir en una primera etapa el contenido de microorganismos en el lodo a los límites de las clases B y C, y posteriormente, cuando el nivel de salud de la población aumente por los programas nacionales de salud pública, las concentraciones iniciales en el lodo serán más bajas y entonces será factible obtener biosólidos clase A. De manera alternativa, se considera el desarrollo de procesos que produzcan biosólidos clase A a partir de concentraciones elevadas de microorganismos y parásitos en los lodos.

Tabla 1.6 Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos

Clase	Indicador bacteriológico de contaminación	Patógenos	Parásitos
	Coliformes fecales MNP/g en base seca	<i>Salmonella</i> spp. NMP/g en base seca	Huevos de helmintos/g en base seca
A	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 1 ^a
B	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 10
C	Menor de 2 000 000	Menor de 300	Menor de 35

^a Huevos de helmintos viables

Fuente: NOM-004-SEMARNAT-2002; DOF, 2003

Tabla 1.7 Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos

Contaminante (determinados en forma total)	Excelentes mg/kg en base seca	Buenos mg/kg en base seca
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1 200	3 000
Cobre	1 500	4 300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2 800	7 500

Fuente: NOM-004-SEMARNAT-2002; DOF, 2003

Tabla 1.8 Aprovechamiento de Biosólidos

Tipo	Clase	Aprovechamiento
Excelente	A	<ul style="list-style-type: none"> • Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación • Los establecidos para clase B y C
Excelente o bueno	B	<ul style="list-style-type: none"> • Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación • Los establecidos para clase C
Excelente o bueno	C	<ul style="list-style-type: none"> • Usos forestales • Mejoramientos de suelos • Usos agrícolas

Fuente: NOM-004-SEMARNAT-2002; DOF, 2003

Tabla 1.9 Límites máximos permisibles de microorganismos en biosólidos que establece la US-EPA

Parámetro microbiológico y usos	USEPA 503	
	A	B
Coliformes fecales	< 1000 NMP/g ST	< 2 X 10 ⁶ NMP/g ST
<i>Salmonella</i> spp.	< 3 NMP/4g ST	-
Huevos de helmintos	< 1 huevo/4g ST	-
Usos benéficos	Agricultura	Mejorador de suelos

Fuente: USEPA, 1993

1.1.5 Procesos que reducen el contenido de patógenos en los lodos

Existen diversos procesos que reducen el contenido de microorganismos en los lodos. La US EPA (1993) los clasificó como (1) Procesos que eliminan patógenos (*Processes to Further Reduce Pathogens*, PFRP), es decir, que reducen el contenido hasta niveles por debajo del límite de detección y, (2) Procesos que reducen patógenos de manera significativa (*Processes to Significantly Reduce Pathogens*, PSRP), es decir, que reducen la concentración sin eliminarlos por completo. Los PFRPs son aquellos procesos que producen biosólidos clase A de la US EPA a partir de las concentraciones de organismos encontradas en los lodos de Estados Unidos (10⁷ NMP/g ST de coliformes fecales, 10² NMP/g ST de *Salmonella* spp. y 2-13 huevos de helmintos/g ST; Reimers *et al.*, 1986). Entre estos procesos se encuentran el composteo (a 55 °C o más), el secado con calor, el tratamiento térmico, la digestión aerobia termofílica, la irradiación (rayos beta y gamma) y la pasteurización (WEF y ASCE, 1998; Metcalf y Eddy, 2003). Por su parte, los PSRPs son procesos que producen biosólidos clase B de la US EPA, también a partir de las concentraciones de microorganismos y parásitos de los lodos de Estados Unidos, y son la digestión aerobia mesofílica, el secado con aire, la digestión anaerobia mesofílica y termofílica, el composteo (40–55 °C) y la estabilización con cal.

En la Tabla 1.10 se presentan algunos estudios publicados en la literatura sobre las eficiencias de PFRPs para eliminar virus, bacterias y parásitos en lodos, así como la concentración que se obtendría de estos organismos en los lodos de México al suponer que se aplicaran estos PFRPs con las eficiencias reportadas. Se puede observar que todos ellos,

con excepción de la irradiación (Capizzi y Schwartzbrod, 2001), se han analizado con bajas concentraciones iniciales de microorganismos y parásitos, en particular, de huevos de helmintos (≤ 8 huevos viables/g ST). Asimismo, las eficiencias reportadas para estos procesos son insuficientes para cumplir con los requerimientos de los biosólidos clase A de la NOM y de la US EPA con las características de los lodos de México. Incluso, con la estabilización alcalina mejorada con amoníaco, que aunque no es un proceso clasificado como PFRP presenta una eficiencia alta ($>94\%$) en la reducción del contenido de huevos de helmintos a partir de concentraciones elevadas (90-105 huevos de helmintos viables/g ST), no es posible producir biosólidos clase A (Méndez *et al.*, 2002). Por lo tanto, es necesario desarrollar y estudiar otros procesos que permitan inactivar lodos con alto contenido de organismos patógenos, una necesidad que no sólo concierne a México, sino a todos los países en desarrollo.

Tabla 1.10 Procesos que eliminan patógenos en lodos (PFRP) de la US-EPA y su aplicación

Proceso	Reducción de microorganismos y parásitos	Referencia	Valor estimado de microorganismos y parásitos en los lodos de México considerando la reducción reportada en la literatura
Digestión aerobia termofílica (60-65 °C)	Reducción de alrededor de 4 log de coliformes fecales en 6.7 días.	Zábranská <i>et al.</i> , 2003	10^3 - 10^6 NMP/g ST coliformes fecales.
Digestión aerobia termofílica (48 °C)	Inactivación de 4.5 ± 3.2 a <1 huevo viable/10g ST en 30 días, eficiencia promedio de 78%.	Gantzer <i>et al.</i> , 2001	16-39 huevos de helmintos/g ST.
Tratamiento térmico (80 °C)	Inactivación >3.6 log de <i>E. coli</i> , 8 log de <i>Salmonella choleraesuis</i> y 2 log de bacteriófagos –somáticos y <i>Bacteroides fragilis</i> – en 60 min.	Mocé <i>et al.</i> , 2003	10^4 - 10^7 NMP/g ST coliformes fecales. <i>Salmonella</i> spp. a valores no detectables.
Tratamiento térmico (108 °C)	Inactivación de 9.5 ± 4 a <1 huevo viable/10g ST en 10 horas, eficiencia promedio de 89%.	Gantzer <i>et al.</i> , 2001	8-19.5 huevos de helmintos/g ST.
Irradiación (1000 Gy)	Reducción de un contenido inicial de 88.4 huevos de helmintos viables/g ST a cero, eficiencia de 100%.	Capizzi y Schwartzbrod, 2001	0 huevos de helmintos/g ST. Puede funcionar pero no se ha probado.
Pasteurización (70 °C)	Reducción de 6 log de coliformes fecales, de 8 huevos de helmintos viables a cero en 30 minutos, eficiencia 100%.	Keller <i>et al.</i> , 2004	10 - 10^4 NMP/g ST coliformes fecales, 0 huevos de helmintos/g ST Puede funcionar pero no se ha probado.

Se piensa que el uso de metales puede representar una alternativa de solución para resolver esta problemática ya que la mayoría de ellos posee propiedades desinfectantes con las ventajas de requerir dosis pequeñas, ser químicamente estables y proporcionar efecto residual (Pelczar *et al.*, 1982; Beer, 1999; Craig, 2001). En las siguientes secciones se presenta una revisión bibliográfica de la plata, el cobre y el agente sinérgico (fuerte oxidante que combinado con los metales puede presentar un efecto sinérgico⁸ en la desinfección), en particular, de sus aplicaciones como desinfectantes en el área ambiental.

1.2 Plata

1.2.1 Generalidades

La plata es un elemento metálico que pertenece al grupo Ib de la tabla periódica. Su símbolo es Ag (del latín *argentum*), su número atómico es 47 y su masa atómica es 107.88 uma. Es un metal precioso de color blanco, brillante, dúctil y maleable; además, es un excelente conductor del calor y de la electricidad.

La plata se emplea para acuñar monedas, fabricar resistencias eléctricas, materiales y equipo de laboratorio, etc. La plata se alea fácilmente con la mayoría de los metales. Con el cobre se utiliza para hacer joyería y orfebrería. De manera general, los compuestos de plata tienen un sin número de aplicaciones en galvanotecnia, fotografía, medicina y explosivos, entre otros (Wang *et al.*, 2003).

En la naturaleza, la plata se encuentra como metal libre o combinado con diversos minerales, principalmente con sulfuros, de los cuales la plata se extrae por medio de la fundición con plomo (*Webster's Concise Encyclopedia*, 1996).

La plata forma complejos o precipitados con muchos compuestos orgánicos e inorgánicos tales como cloruros, sulfuros, tiosulfatos y carbón orgánico disuelto (Ratte, 1999 en Wang *et al.*, 2003). Es, además, inalterable en el aire y en el agua, pero fácilmente atacada por gases y líquidos sulfurosos que la oscurecen.

⁸ Sinergia: Acción de dos o más causas cuyo efecto es superior a la suma de los efectos individuales (Real Academia Española, 2001).

1.2.2 Propiedades desinfectantes

Se considera a la plata como el tercer metal descubierto por la humanidad y su uso como desinfectante de agua se remonta a miles de años. Los Griegos (Siglo VII a. C.), los Romanos (Siglo VII a. C.), los Persas (Siglo IV a. C.) y los Aztecas (Siglo XIV d. C.) observaron que al poner líquidos en vasijas de plata su descomposición era mucho más lenta (*National Research Council, 1980; Davies y Etris, 1997; Beer, 1999; Craig, 2001*). La baja solubilidad de este metal sirvió como un mecanismo natural de liberación controlada de plata que adicionaba cantidades trazas al contenido de las vasijas, suficientes para purificar el líquido pero no para causar un sabor desagradable o problemas de salud en los consumidores (*Beer, 1999; Craig, 2001*).

En 1893, von Naegeli realizó la primera investigación sistemática sobre la toxicidad de los metales en bacterias y lo denominó "efecto oligodinámico". Dicho término se refiere a la propiedad que tienen ciertos metales para que en cantidades sumamente pequeñas tengan efectos letales sobre los microorganismos (*National Research Council, 1980; Pelczar et al., 1982*). Von Naegeli consideró a la plata particularmente como muy oligodinámica. La acción de la plata ha sido demostrada en concentraciones incluso menores a 1 ppm (Iáñez, 1998) y ahora, además, se sabe que puede inactivar virus, bacterias, algas, hongos y algunos protozoos (*Abad et al., 1994; Rohr et al., 2000; Silver, 2003*), pero su efecto en helmintos aún no se ha establecido.

Por sus propiedades, la plata se emplea para evitar infecciones en quemaduras, heridas y úlceras (*Silver, 2003*) por medio de artículos antisépticos como vendas y ungüentos (*Pelczar et al., 1982*), así como para prevenir enfermedades como neumonía, tuberculosis, pleuresía, gonorrea, sífilis, osteomielitis, tifus, fiebre tifoidea, úlceras corneales, conjuntivitis e infecciones del tracto urinario, entre otras (Iáñez, 1998; Yu et al., 2003). Asimismo, se utiliza para recubrir catéteres con el objeto de retardar el desarrollo de biopelículas y en productos de higiene como cremas faciales, suplementos de salud de "medicina alternativa", productos de supermercado para desinfectar verduras y en cartuchos para filtrar agua.

La plata, generalmente, no tiene efectos adversos para los humanos. La argiria (coloración grisácea de la piel y de las mucosas) se produce por la ingestión o inhalación prolongadas, de varios meses a años, de compuestos de plata. Y aunque es rara y sólo afecta el aspecto

estético, es irreversible (ATSDR, 1999; Silver, 2003; *Webster's Online Dictionary*, 2004). Reportes de casos de argiria sugieren que es necesario ingerir varios gramos de plata tomada como medicamento en pequeñas dosis por varios meses para observar sus efectos en humanos. Estudios realizados en ratas demuestran que concentraciones de plata de 2.6 g/L en agua de consumo pueden dañar severamente la salud. En cuanto a los efectos por contacto con la piel, prácticamente se carece de toda información. Aunque se conoce que personas que han utilizado cremas para la piel con nitrato de plata o sulfadiazina no han presentado problemas de argiria. En un estudio que se hizo con cerdos de guinea a los que se les aplicó en la piel una solución de nitrato de plata (AgNO_3) con una concentración de 81 mg AgNO_3 /L no se reportó ningún caso de muerte, no obstante, dejaron de subir de peso de manera normal. No se sabe si en humanos se tenga el mismo efecto con una exposición similar (*Webster's Online Dictionary*, 2004).

Por otro lado, desde la Segunda Guerra Mundial se han hecho esfuerzos considerables para explotar el uso de la plata como desinfectante, de manera particular, en los sistemas de suministro de agua potable e industrial, en albercas y hospitales (*National Research Council*, 1980; Craig, 2001).

1.2.3 Compuestos o formas fisicoquímicas de la plata con mayor efectividad en la desinfección de agua

La forma fisicoquímica de la plata más utilizada para desinfectar agua es la iónica. Los iones de plata se pueden obtener de diversas maneras: a partir de sales como el nitrato de plata, por medio de generadores electrolíticos o a partir de una suspensión coloidal (*National Research Council*, 1980; Pelczar *et al.*, 1982).

La plata iónica tiene una acción desinfectante bastante enérgica. Aplicada en agua, además de desinfectarla, la deja libre de sabor y olor (CNA, 2000; Astier *et al.*, 2004). Los iones de plata son químicamente estables y no experimentan reacciones destructivas como es el caso del cloro, de esta manera es fácil mantener una dosis residual efectiva. En forma adicional, no forman subproductos indeseables tales como cloraminas, trihalometanos y cloroformo formados por el cloro (Beer, 1999; Craig, 2001).

1.2.3.1 Nitrato de plata

El nitrato de plata es uno de los compuestos de plata más utilizados para desinfectar (Yi *et al.*, 2003). Es una sal inorgánica que normalmente se presenta como barra moldeada en forma de lápiz denominada cáustico lunar o lápiz cáustico (Luque *et al.*, 2003). Se aplica en concentraciones altas para dañar tejidos de reconstrucción celular y en concentraciones bajas (dilución de 1:1000) para prevenir la conjuntivitis e infecciones gonocócicas⁹ en los ojos de los recién nacidos y para cauterizar hemorragias (Iáñez, 1998; Yi *et al.*, 2003; Mateos, 2004; Wikipedia, 2001). El AgNO_3 es bactericida para la mayoría de los microorganismos, no obstante, por sí solo (a 30 ppb) no inactiva bacterias de vida libre ni bacterias en biopelículas (Armon *et al.*, 2000).

De manera general, el AgNO_3 es inestable y fácilmente se reduce a plata elemental, lo que limita su aplicación. Sin embargo, cuando se combina con algunos complejos de éter tiene un efecto bactericida selectivo para *P. aeruginosa* con una buena estabilidad (Yi *et al.*, 2003).

1.2.3.2 Iones plata electrogenerados

La desinfección con plata iónica generada electrolíticamente consiste en introducir una mínima cantidad de plata en el agua en forma de solución iónica al hacer pasar una débil corriente eléctrica continua a través de electrodos de plata (Astier *et al.*, 2004). La concentración de los iones en la solución se controla al variar el caudal del agua que pasa por la cámara de desinfección así como al modificar la corriente eléctrica en los electrodos. Asimismo, la tasa a la cual los iones de plata se desprenden de la celda es directamente proporcional a la corriente eléctrica que pasa a través de los electrodos (Beer, 1999; Craig, 2001).

⁹ Las infecciones gonocócicas son causadas por *Neisseria gonorrhoeae*, una bacteria que sólo infecta a los humanos y que se transmite habitualmente a través del contacto sexual. En general, es una infección de la uretra o del cuello uterino. También se llama blenorrea, blenorragia o gonorrea. Los niños recién nacidos pueden adquirir infecciones gonocócicas en los ojos durante un parto vaginal si sus madres presentan infección vaginal gonocócica (Organización Médica Colegial de España, 2000; *Kids Health for Parents*, 2004).

1.2.3.3 Plata coloidal

Las soluciones coloidales son una combinación de proteínas con óxido de plata o plata metálica. La plata se encuentra cargada eléctricamente en forma de partículas extremadamente pequeñas que varían de 0.01 a 0.001 μm de diámetro y que están suspendidas en agua destilada (Pelczar *et al.*, 1982; Hansen, 2003). Algunos autores (Brambila *et al.*, 2005) consideran que la plata coloidal es una disolución diluida de nitrato de plata y de algunos compuestos insolubles como el potasio.

La plata puede existir de manera natural en su estado coloidal en forma integral o adsorbida en complejos húmicos, plancton o al interior de microorganismos (Joerger *et al.*, 2000). Su efecto bactericida es función de los iones de plata libres que se desprenden de la solución coloidal.

La plata en el estado coloidal es altamente germicida, pero inofensiva y no tóxica para el humano. Además, es efectiva contra hongos como *Candida*, virus como el herpes y bacterias como estreptococos y estafilococos (Hansen, 2003), razón por la cual se usa en medicina como antiséptico para ojos, oídos, nariz y garganta (Brambila *et al.*, 2005).

1.2.4 Usos y efectividad de la plata como agente desinfectante de agua para uso y consumo humano, agua residual y lodos

La plata se ha usado como desinfectante de agua para uso y consumo humano y de agua residual tratada, sin embargo, no hay publicaciones relativas a su uso en lodos.

1.2.4.1 Desinfección de agua para uso y consumo humano

Las principales aplicaciones de la plata como desinfectante se dan en la producción de agua para uso y consumo humano. Las sales de plata se emplean con frecuencia para desinfectar agua de consumo en situaciones de emergencia, acciones militares o en barcos (Pelkonen *et al.*, 2003). Los iones plata electrogenerados se emplean en los sistemas de distribución de agua caliente de hospitales y hoteles para controlar agentes infecciosos como *Legionella pneumophila* (Landeen *et al.*, 1989; Lin *et al.*, 1996; Kim *et al.*, 2002; Silver, 2003) y

Mycobacterium avium (Lin *et al.*, 1998) y para desinfectar agua de albercas (Cassells *et al.*, 1995; Beer, 1999; CNA, 2000; Craig, 2001).

En 1999, Beer reportó el uso de la plata iónica como base del sistema de suministro de agua de la nave espacial Apolo. En la Tabla 1.11 se muestran algunas de las aplicaciones de la plata iónica en la desinfección de agua.

Tabla 1.11 Aplicaciones de la plata iónica

Aplicación	Observaciones
Desinfección de albercas	Dosis generalmente de 0.15 mg/L
Purificación de agua para usos industriales	Los cloruros, el amoníaco y la materia orgánica interfieren en la desinfección.
Uso doméstico (ejemplo, en filtros)	

Adaptado de: Caceres, 1990 en CNA, 2000.

1.2.4.2 Desinfección de agua residual

El nitrato de plata se ha usado para inactivar microorganismos patógenos en la última etapa del tratamiento de aguas residuales (Droste, 1997 en Rivera *et al.*, 2000). Además, se ha reportado que la plata iónica fue utilizada para potabilizar agua residual a bordo de la estación espacial rusa MIR y en la conexión espacial de la NASA (Silver, 2003).

1.2.5 Mecanismo de desinfección de la plata

De manera general, en concentraciones elevadas, todos los metales pesados coagulan las proteínas, lo que resulta en una muerte rápida de la célula. En concentraciones menores, su acción puede ser más específica (CRC *Handbook of Microbiology*, 1984; Myshkin y Khromova, 2003).

En particular, para que los iones de plata sean tóxicos para las bacterias, éstos deben interactuar de manera directa con las células microbianas. Esta interacción afecta el crecimiento y el metabolismo de las bacterias al interferir con la asimilación de los nutrientes esenciales o alterar las características fisicoquímicas del medio ambiente. Una gran variedad de factores, como la composición de la pared celular y el sistema de transporte, determinan la entrada de los iones a la célula. Posiblemente debido al gran número de puntos de interacción dentro de la célula, muchas reacciones tóxicas son posibles (Martínez, 2003).

Se piensa que el mecanismo más importante de acción tóxica es el envenenamiento de las enzimas ya que los metales más electronegativos, como la plata y el cobre, tienen gran afinidad por los grupos sulfhidrilo ($-SH$), amino ($-NH_2$), carboxilo ($-COOH$) y radicales de fosfato, los cuales, probablemente son los sitios reactivos en muchas enzimas (*CRC Handbook of Microbiology*, 1984; Pedahzur *et al.*, 1997; Iáñez, 1998).

Las proteínas superficiales de la célula, necesarias para el transporte de materiales a través de las membranas celulares, son inactivadas en la medida en que se desnaturalizan (Feng *et al.*, 2000; Craig, 2001). La formación de complejos de iones plata con los grupos sulfhidrilo puede inactivar dichas enzimas superficiales celulares e interferir con la respiración en la membrana celular (Beer, 1999).

Se ha reportado que la plata inhibe los procesos de deshidrogenación. Se forman complejos sulfhidrilo-plata ($S-Ag$) que son muy estables e inhiben la transferencia de hidrógeno, es decir, el sistema de transferencia de energía y bloquea completamente la respiración y la transferencia electrónica. Esto tiene como consecuencia la citólisis y muerte de la célula (*National Research Council*, 1980; Pedahzur *et al.*, 1997).

La plata también inhibe la captación de fosfatos y promueve el flujo de iones potasio, de fosfatos y de otras sustancias. Causa anormalidades en el tamaño, contenido citoplasmático, membrana celular y capas celulares externas de células sensibles (Pedahzur *et al.*, 1997).

Asimismo, los iones plata forman complejos insolubles con el Ácido Desoxirribonucleico (ADN) y el Ácido Ribonucleico (ARN). Se ligan en sitios específicos de las moléculas de ADN (Kim *et al.*, 2002) que han perdido su habilidad para replicarse e interactúan con los grupos tiol en las proteínas, lo que induce a la inactivación de las proteínas de la célula (Jeon *et al.*, 2003). También forman complejos con la riboflavina, un mediador bioquímico en muchas reacciones importantes (CRC Handbook of Microbiology, 1984). Cuando los iones de plata reaccionan con las moléculas de ADN y ARN, se altera la estructura química de las bases orgánicas del microorganismo y se modifica el padrón genético. Esto provoca la interrupción del crecimiento, del metabolismo y de la reproducción de la célula afectada.

Aún no hay una clara concepción de la forma activa de la plata. Algunos autores reportan que es un ión con carga positiva, un ión complejo, o bien una sal, incluso que la plata actúa por la formación de proteínatos (National Research Council, 1980).

1.2.6 Cinética de desinfección de la plata

La desinfección es un proceso que depende, principalmente, del tiempo y de la dosis de desinfectante aplicados (WEF, 1996). Así, la velocidad o cinética de desinfección depende de estas dos variables y del tipo de desinfectante que se emplee.

En la Tabla 1.12 se presentan algunos estudios de la cinética de desinfección de la plata aplicada en agua para eliminar bacterias. De manera general, se puede observar que la bacteria que más se ha empleado para estudiar el efecto desinfectante de la plata es *Escherichia coli*. Sin embargo, aún hacen falta más estudios acerca de la eliminación de esta bacteria con iones plata ya que las velocidades aparentes de desinfección reportadas (2.87 y 1.5 log removidos/h) para *E. coli* por diferentes autores con dosis de nitrato de plata similares (30 y 26.2 ppb, respectivamente) varían en más de 1 log/h entre sí. Por otro lado, de la Tabla también se puede ver que la plata tiene mayor efecto bactericida en *E. coli* que en *S. faecalis* y en *L. pneumophila* y ninguno en bacterias de vida libre y de biopelículas.

Tabla 1.12 Cinética de desinfección de la plata en bacterias

Desinfectante	Microorganismo estudiado	Dosis	Tiempo de contacto	Inactivación (log removidos)	Velocidad aparente de desinfección (log/h)	Referencia
AgNO ₃ (Nitrato de plata)	<i>Escherichia coli</i>	30 ppb	1 h	2.87	2.87	Pedahzur <i>et al.</i> , 1995
		25 ppb	1 h	0.3	0.3	Pedahzur <i>et al.</i> , 1997
		50 ppb		1	1	
	26.2 ppb ⁽¹⁰⁾	2 h	3	1.5	Rivera <i>et al.</i> , 2000	
	<i>Streptococcus faecalis</i>	26.2 ppb ⁽⁹⁾	6 h	3		0.5
Bacterias de vida libre y bacterias en biopelículas	30 ppb	48 h	No hay inactivación	0	Armon <i>et al.</i> , 2000	
AgCl (Cloruro de plata)	<i>Legionella pneumophila</i>	80 ppb	> 24 h	6	0.25	Lin <i>et al.</i> , 1996

1.3 Cobre

1.3.1 Generalidades

El cobre es un elemento químico ubicado en el grupo Ib de la tabla periódica cuyo número atómico es 29, símbolo *Cu* y masa atómica 63.54 uma. Es un metal maleable de color rojo pardo, brillante que se encuentra de manera natural en rocas, suelo, agua, sedimentos y, en concentraciones bajas, en el aire. Abunda en la corteza terrestre en forma de sulfuro, con una concentración promedio de 50 ppm (Real Academia Española, 2001; ATSDR, 2002).

La mayor parte del cobre del mundo se obtiene de los sulfuros minerales como la calcocita (Cu₂S), novelita (CuSO), calcopirita (CuFeS₂), bornita (Cu₅FeS₄) y enargita (Cu₃AsS₄). Los minerales oxidados son la cuprita (Cu₂O), tenorita (CuO), malaquita [Cu₂(CO₃)(OH)₂], azurita [Cu₃(CO₃)₂(OH)₂], crisocola [(Cu,Al)₂H₂Si₂O₅(OH)· nH₂O] y brocantita [Cu₄(OH)₆SO₄] (Lenntech, 2004).

De manera natural, el cobre se encuentra en todas las plantas y animales. Es un micronutriente esencial de todos los seres vivos (ATSDR, 2002); juega una parte vital en el desarrollo y desempeño de los sistemas nervioso y cardiovascular de los seres humanos, así como en la piel, huesos, sistemas inmunológico y reproductivo, incluyendo la transcripción

¹⁰ El contenido de Ag⁺ en la zeolita fue de 86.78%. Se pusieron 100 mL de agua destilada con el microorganismo en contacto con 5 mg de zeolita mineral de plata mexicana. Bajo estas condiciones, la concentración de plata en el agua desinfectada fue de 26.2 µg/L.

genética. Sin embargo, a niveles elevados el cobre puede producir efectos tóxicos (CDA, 2004).

La exposición prolongada a polvo de cobre puede causar irritación en la nariz, boca y ojos, y causar dolor de cabeza, mareos, náuseas e incluso diarrea. En el caso de ingerir agua con niveles altos de cobre se puede presentar vómito, diarrea, dolor de estómago y náuseas. La ingestión de dosis elevadas por periodos prolongados provoca daño al hígado y riñón, e incluso, puede causar la muerte. En la actualidad, no se sabe si el cobre causa cáncer en humanos, sin embargo, la EPA ha determinado no clasificarlo como carcinógeno.

Por otro lado, el cobre es un excelente conductor de calor y electricidad y puede formar aleaciones como el latón o el bronce (Real Academia Española, 2001; ATSDR, 2002).

Los compuestos de cobre se utilizan principalmente en la agricultura, la industria eléctrica (alambres), la galvanoplástica (celdas primarias), la textil (pigmentos y mordentes¹¹) y como catalizadores (Lenntech, 2004).

1.3.2 Propiedades desinfectantes

El cobre, como la mayoría de los metales pesados, posee propiedades desinfectantes y tiene efecto oligodinámico. Los iones de cobre pueden inactivar virus, bacterias, algas y hongos en concentraciones del orden de ppb (CDA, 2004). Sin embargo, la toxicidad del cobre es menor que la de la plata (Umbreit, 1962; Craig, 2001).

La acción bacteriostática del cobre es conocida desde hace muchos años y explica su uso en aleaciones para fabricar tuberías, monedas, manijas de puertas, pasamanos de escaleras, utensilios de cocina y equipo médico (Boletín CNI, 2003). Así, el cobre inhibe el crecimiento de microbios, y proporciona una medida de protección contra gérmenes y bacterias dañinas en varios ambientes (CDA, 2004).

Las sales y compuestos de cobre no tienen aplicación en Bacteriología Médica, pero se emplean en agricultura para el control de hongos y algas (Iáñez, 1998; Mateos, 2004; Pelczar *et al.*, 1982). Se utilizan principalmente como fungicidas protectores, es decir, se

¹¹ Sustancia que se emplea para fijar los colores (Real Academia Española, 2001).

aplican antes de que las esporas de hongos se instalen en plantas, animales o humanos. Entre los compuestos usados para este fin se encuentran el cloruro de cobre, el oxiclورو de cobre, el óxido cúprico, el “caldo bordolés, mezcla bordolesa o mezcla de Burdeos” (combinación de sulfato de cobre e hidróxido cálcico), el quinolinolato de cobre-8, el carbonato de cobre básico, el naftenato de cobre, el sulfato de cobre, el cromato de cobre y el oleato de cobre (Prevención de riesgos laborales, 2004). De éstos el más común y que se fabrica a escala industrial es el sulfato de cobre (II) pentahidratado o azul de vitriolo [$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$] que se reconoce por su color azul verdoso (Real Academia Española, 2001; ATSDR, 2002).

1.3.3 Compuestos o formas fisicoquímicas del cobre con mayor efectividad en la desinfección de agua

En la actualidad, se sabe que el cobre es el único material de los usados comúnmente en las instalaciones termohidrosanitarias que tiene propiedades bacteriostáticas (Boletín CNI, 2003).

De la misma manera que la plata, la forma fisicoquímica del cobre más empleada para desinfectar es la iónica ya que es químicamente estable, no forma subproductos indeseables y conserva un poder desinfectante residual. Los iones cobre se pueden obtener a partir de sales, principalmente sulfato de cobre, o mediante generadores electrolíticos.

1.3.3.1 Sulfato de cobre

El sulfato de cobre¹² se presenta en forma de cristales triclinicos¹³ de color azul intenso (ultramarino). Es lentamente eflorescente¹⁴ en el aire y al calentarse pierde agua de cristalización. El sulfato de cobre es muy soluble en agua, metanol, glicerol y algo soluble en etanol. Se utiliza como desinfectante, mordente, conservador de madera, aditivo en alimentos y fertilizantes, también para pegamentos impermeables de madera, para

¹² El sulfato de cobre pentahidratado también es conocido como sulfato cúprico, vitriolo azul, vitriol romano, piedra azul y caparrosa azul (CEDROSA, 2004; Química del Sur, 2004).

¹³ Dicho de un sistema cristalográfico. De ejes que se cortan en ángulos diferentes, como el de la turquesa (Real Academia Española, 2001).

¹⁴ Eflorescencia: Conversión espontánea en polvo de diversas sales al perder el agua de la cristalización (Real Academia Española, 2001).

intensificar negativos y fotograbado (industria fotográfica) y, en veterinaria, se emplea en casos de deficiencia de cobre en rumiantes. Además, a base del sulfato de cobre se fabrican otras sales de cobre que sirven en soluciones antioxidantes y la pirotecnia (CEDROSA, 2004; Química del Sur, 2004).

En el tratamiento de aguas, el sulfato de cobre se emplea como alguicida (Química del Sur, 2004; Mateos, 2004; DGSPAC, 2004; CEDROSA, 2004) ya que es mucho más activo contra algas y hongos que contra bacterias; 2 ppm en agua son suficientes para impedir el desarrollo de algas (Pelczar *et al.*, 1982; Mateos, 2004).

Por otro lado, estudios continuos y exhaustivos en instalaciones hospitalarias han puesto de manifiesto que de todos los materiales utilizados en las tuberías, el cobre es el más resistente a la colonización de la bacteria *Legionella* (Boletín CNI, 2003).

1.3.3.2 Iones cobre electrogenerados

La obtención de iones cobre mediante dispositivos electrolíticos es la forma más adecuada para controlar las concentraciones del metal disuelto. Los generadores electrolíticos consisten en un cátodo y un ánodo de cobre, o de alguna aleación de cobre, contenidos en una cámara a través de la cual pasa el agua que va a ser desinfectada. Se pasa una corriente eléctrica por los electrodos para ionizar el cobre y que éste se disuelva en el agua. Al igual que en el caso de la plata, la concentración del metal en el agua depende de la intensidad de la corriente así como del flujo del agua (Craig, 2001).

1.3.4 Usos y efectividad del cobre como agente desinfectante de agua para uso y consumo humano, agua residual y lodos

En la actualidad, en el campo de la desinfección de agua, el cobre se utiliza para desinfectar agua de albercas, hospitales, industrias y de consumo humano¹⁵ (Craig, 2001). Con excepción de un estudio en el que se aplicó cobre combinado con plata en agua residual tratada (Martínez; 2003), no se encontraron reportes del uso del cobre para desinfectar agua residual y lodos.

¹⁵ La US EPA (2002a) establece un valor de 1.3 mg/L de cobre en agua para consumo humano y, en México, la Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 2000) establece 2 mg/L de cobre.

1.3.4.1 Desinfección de agua para uso y consumo humano

La ionización de cobre es un método efectivo para reducir el contenido de bacterias así como la formación de incrustaciones en las tuberías y tanques de almacenamiento de agua. Dosis de 0.5 ppm a 0.7 ppm son adecuadas para controlar algas y bacterias en torres de enfriamiento (Roseman, 2004).

En algunos lugares, para desinfectar albercas, durante el periodo de ausencia de bañistas, se utiliza una solución de sulfato de cobre al 10% de producto comercial en polvo, que se introduce directamente a lo largo de las paredes de la piscina. La dosis necesaria es de 250 g de sulfato de cobre por cada 50 m³ de agua. Después de unas horas se deben aspirar los precipitados formados en la alberca (DGSPAC, 2004).

Otra forma de emplear este metal para desinfectar agua, es el uso de tuberías de cobre en los sistemas de distribución de agua potable. Colquhoun *et al.* (1995) demostraron que las tuberías de cobre reducen de manera significativa el contenido de virus. Asimismo, el Instituto *KIWA Water Research* de Holanda realizó un estudio en el que se analizó la proliferación de la bacteria *Legionella* en los sistemas domésticos de distribución de agua durante un año. Los resultados mostraron que el agua conducida por tuberías de cobre contenía los niveles más bajos de concentración de la bacteria en comparación con otros materiales (Boletín CNI, 2003).

1.3.5 Mecanismo de desinfección del cobre

El modo de acción de las sales de cobre sobre las bacterias se ha reportado como un efecto de coagulación. Domek *et al.* (1984) han realizado diversos estudios acerca del mecanismo dañino del cobre sobre las bacterias. Los resultados de estos estudios llevan a la hipótesis de que el daño causado por el cobre es la disminución en el nivel de oxígeno en la célula al atrapar los grupos sulfhidrilos de las enzimas respiratorias en la membrana celular. Posteriormente, Domek *et al.* (1987) desarrollaron más estudios que permitieron corroborar la hipótesis anterior. Por lo tanto, el cobre ataca las enzimas respiratorias en las bacterias, presumiblemente al atrapar los grupos que contienen sulfhidrilos, aminas y carboxilos. También, se piensa que el cobre facilita la hidrólisis o las reacciones de desplazamiento nucleofílicas en cadenas de péptidos o ácidos nucleicos y que es capaz de formar quelatos

con los grupos fosfato lo que resulta en la apertura de las dobles hélices (Beer, 1999; Craig, 2001). En resumen, el cobre desnatura proteínas, altera grupos que forman parte de los centros activos de enzimas y otras proteínas y altera grupos funcionales de ácidos nucleicos, componentes de pared y de membrana celular (Iáñez, 1998).

Por otro lado, el efecto fungicida del cobre es probablemente el resultado de que el cobre se une a la membrana de la célula e interfiere con el transporte de materiales y la actividad exterior de la membrana celular (*CRC Handbook of Microbiology*, 1984).

1.3.6 Cinética de desinfección del cobre

De la Tabla 1.13 se puede notar que los iones cobre provenientes del sulfato de cobre (CuSO_4) mostraron un efecto mayor y más rápido en el virus Polio 1 (0.75 log removidos/h) que los iones liberados de la tubería de cobre (0.2 log removidos/h). Sin embargo, llama la atención que todos los virus estudiados por Timms *et al.* (1995) con la tubería de cobre presentan la misma velocidad aparente de desinfección (0.2 log removidos/h). Este comportamiento puede deberse a alguna propiedad inherente a la tubería de cobre, por ejemplo, un mecanismo electrostático que inicialmente inmoviliza los virus y posteriormente los inactiva.

Tabla 1.13 Cinética de desinfección del cobre en virus y bacterias

Desinfectante	Microorganismo estudiado	Dosis	Tiempo de contacto	Inactivación (log removidos)	Velocidad aparente de desinfección (log/h)	Referencia
Tubería de Cu	Polio 1 ^a	5-20 ppm	24 h	4.7	0.2	Timms <i>et al.</i> , 1995
	Polio 2 ^a					
	Polio 3 ^a					
	Echo 4 ^a					
	Coxsackie B4 ^a					
CuSO_4	Polio 1 ^a		6 h	4.5	0.75	
CuCl	Colifago MS-2 ^a	0.4 ppm	2 h	< 0.5	< 0.25	Straub <i>et al.</i> , 1995
	<i>Escherichia coli</i> ^b	0.4 ppm	1 h	No hubo inactivación	0	
		0.8 ppm				

^a Virus

^b Bacteria

En cuanto al efecto del cobre en bacterias, los iones provenientes del cloruro de cobre (CuCl) no causaron inactivación alguna en *E. coli*, a diferencia de los iones plata que presentan

velocidades aparentes de desinfección de 0.3 a 2.87 log removidos/h para esta bacteria con dosis de 25 a 50 ppb de Ag (Tabla 1.12).

1.4 Agente Sinérgico

1.4.1 Generalidades y propiedades desinfectantes

El agente sinérgico es un fuerte oxidante, muy soluble en agua, biocida de amplio espectro, biodegradable e inocuo para el ambiente (*Referencia 1, 2004; Referencia 2, 2005*). Sus propiedades desinfectantes se reportaron por primera vez en 1902. Ahora, se sabe que tiene la capacidad de inactivar virus, bacterias, hongos, esporas (*Referencia 3, 2004*) y helmintos (*Referencia 4, 2003; Referencia 5, 2003; Referencia 3, 2004*). Se utiliza como desinfectante en diversas industrias como la farmacéutica, la alimenticia, la cervecera, la papelera, la de bebidas y las de lácteos, así como en la agricultura, la lavandería, la veterinaria, los hospitales y la desinfección de playas. Otras aplicaciones son el blanqueo de fibras sintéticas, la polimerización y epoxidación (oxidación de alquenos), la activación para oxidar hidrocarburos y la modificación del almidón (*Referencia 6, 2005*). En el campo ambiental, el agente sinérgico se emplea como desinfectante de agua para uso y consumo humano, agua residual y lodos.

1.4.2 Usos y efectividad del agente sinérgico como desinfectante de agua para uso y consumo humano, agua residual y lodos

En los últimos años, el uso del agente sinérgico como desinfectante de agua para uso y consumo humano y de agua residual ha adquirido gran importancia. Ello, debido principalmente a la creciente evidencia de los efectos adversos de los compuestos clorados (*Referencia 3, 2004; Referencia 7, 2005*). La aplicación del agente sinérgico en lodos para disminuir su contenido de patógenos aún no es muy difundida, sin embargo, existen varios estudios que demuestran su efectividad. A continuación se presentan algunas de las aplicaciones mencionadas.

1.4.2.1 Desinfección de agua para uso y consumo humano

El agente sinérgico se emplea con éxito para desinfectar agua superficial destinada al consumo humano (*Referencia 8, 1997; Referencia 3, 2004*) y sistemas de distribución de agua de hospitales, laboratorios, industrias y consultorios dentales. Ello, con la finalidad de controlar la formación de biopelículas como *Moraxella* spp. y *Flavobacterium* spp. y evitar la presencia de patógenos como *Legionella pneumophila*, *Mycobacterium avium* y *Pseudomonas aeruginosa* (*Referencia 9, 2004; Referencia 7, 2005*). El agente sinérgico presenta la ventaja de formar subproductos con muy baja o ninguna toxicidad o mutagenicidad después de reaccionar con la materia orgánica del agua (*Referencia 8, 1997; Referencia 3, 2004; Referencia 7, 2005*).

1.4.2.2 Desinfección de agua residual

Se ha reportado que en efluentes municipales fisicoquímicos (tratados con sales de hierro o aluminio) se requieren dosis de 2 a 6 mg/L de agente sinérgico y un tiempo de contacto de 60 minutos para disminuir el contenido de coliformes fecales a 1,000 unidades formadoras de colonias (UFC) /100mL¹⁶ (*Referencia 3, 2004*). En efluentes secundarios, por su parte, se han encontrado importantes reducciones de coliformes fecales (de 2.5 a 4 log), coliformes totales (de 3 a 4 log), estreptococos fecales (de 2.5 a 4 log) y *Salmonella*/L (de 0.25 a 2.5 unidades) con dosis del agente sinérgico que varían de 5 a 11.2 ppm y un tiempo de contacto de 10 a 60 minutos (*Referencia 10, 1992; Referencia 11; 1992*). A pesar de presentar estas ventajas (dosis bajas y tiempos de contacto cortos), algunos autores (*Referencia 11, 1992*) han encontrado recrecimiento de bacterias después de emplear 5 ppm del agente sinérgico en un efluente secundario y otros (*Referencia 12, 1998*) en efluentes desinfectados con 10 ppm de agente sinérgico dos días después de ser diluidos con agua de mar.

¹⁶ La US EPA (2002b) recomienda 1000 UFC/100 mL para cuerpos destinados a actividades recreativas de contacto indirecto como canotaje, pesca, paseo en bote de motor, etc. En México, la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 establece un contenido de coliformes fecales de 1000 número más probable (NMP) o UFC/100 mL como límite máximo permisible para la descarga de aguas residuales a aguas y bienes nacionales así como para las descargas vertidas al suelo (uso en riego agrícola; DOF, 1997).

1.4.2.3 Desinfección de lodos

Existen varios estudios que indican que el agente sinérgico es eficiente para disminuir el contenido de patógenos en lodos. En el caso de bacterias, se ha reportado que una dosis de 10 a 1000 ppm de agente sinérgico redujo 5 log de *E. coli* y de estreptococos fecales (Referencia 13, 1989) y que 250 mg/L de agente sinérgico disminuyeron el contenido de *Salmonella* de 4600 NMP/100 mL a menos de 30 NMP/100 mL en un lodo proveniente de lodos activados (Referencia 14, 1984). En cuanto a su efecto en huevos de helmintos, se ha encontrado que 250 mg/L de agente sinérgico pueden matar el 99% de los embriones de los huevos en un lodo digerido (Referencia 15, 1987) y 1000 mg/L inactivan el 100% de los embriones (Referencia 16, 2001). Asimismo, se ha reportado que 1000 mg/L de agente sinérgico redujeron del 94% al 1% la habilidad de eclosionar de huevos de *Taenia saginata* en lodos crudos y digeridos (Referencia 16, 2001). Además, al aplicar el agente sinérgico en las concentraciones requeridas para desinfectar el lodo se reduce el mal olor y se genera un producto seguro, fácil de biodegradar y no tóxico que mejora la estructura del suelo y, con frecuencia, aumenta su capacidad para retener agua (Referencia 14, 1984).

1.4.3 Mecanismo de desinfección del agente sinérgico

El agente sinérgico inhibe varias funciones de la célula tales como la síntesis de la membrana celular y el transporte de materiales a través de ella, la síntesis de proteínas, el metabolismo de los ácidos nucleicos y las reacciones enzimáticas.

De manera específica, el agente sinérgico desnaturaliza componentes importantes de la membrana, produce un despliegue de la cadena polipeptídica lo que provoca que las proteínas se enrollen de forma irregular. Así, la membrana celular se rompe y deteriora; la presión osmótica se incrementa y origina una situación hipotónica¹⁷ de desequilibrio que permite la entrada del agente sinérgico a la célula.

¹⁷ Dicho de una disolución que tiene menor presión osmótica que otra con la que se compara (Real Academia Española, 2001).

Dentro de la célula, el agente sinérgico afecta reacciones metabólicas de óxido reducción que, a su vez, alteran la fosforilación oxidativa, la síntesis de ATP (adenosín trifosfato), el transporte activo y el mantenimiento de los niveles de soluto intracelular. De esta manera, el agente sinérgico provoca un daño global a la célula y en consecuencia su muerte.

También se ha sugerido que el agente sinérgico rompe los enlaces sulfhidrilo (-SH) y sulfuro (S-S) de las enzimas. Puede oxidar enzimas esenciales que controlan funciones metabólicas, como la acetil coenzima A, la cual tiene un grupo -SH. Rompe las cadenas de las bacterias filamentosas, destruye sus puntos de unión y ataca la cubierta de polisacáridos (*Referencia 17, 2004*)

En huevos de helmintos, el agente sinérgico afecta el núcleo (oncosfera o hexacanto) del huevo ya sea que lo inmovilice, provoque coloración oscura, granulación o que evite la aparición de la larva (*Referencia 15, 1987*). También se ha planteado que el agente sinérgico puede dañar los mamelones superficiales y perforar la membrana del huevo lo que provoca la pérdida del material citoplasmático, o bien, la disolución de la capa lipídica de la estructura. Estos efectos se atribuyen a la acción oxidante del agente sinérgico más que a su toxicidad (*Referencia 4, 2003*).

1.4.4 Cinética de desinfección del agente sinérgico

En la Tabla 1.14 se presentan algunos ejemplos de la cinética de desinfección del agente sinérgico en algunos microorganismos que se encuentran en las aguas residuales. Se puede observar que el agente sinérgico presenta velocidades aparentes de desinfección elevadas en prácticamente todos los casos, tanto para bacterias como para fagos¹⁸. Esto indica que el agente sinérgico tiene un efecto desinfectante rápido, sobre todo si se compara con la plata o el cobre cuyas velocidades aparentes de desinfección son de 0.25-2.87 log removidos/h (en bacterias) y de 0.2-0.75 log removidos/h (en virus), respectivamente.

¹⁸ Un fago o bacteriófago es un virus que infecta las bacterias (Real Academia Española, 2001).

Tabla 1.14 Cinética de desinfección del agente sinérgico aplicado a aguas residuales

Microorganismo estudiado	Dosis (ppm)	Tiempo de contacto (minutos)	Inactivación (log removidos)	Velocidad aparente de desinfección (log/h)
Coliformes fecales	5	20	4	12
	400	20	5.2	15.6
	10	30	3.4	6.8
Estreptococos fecales	10	10	3 a 4	18 a 24
Fagos DNA	25	10	5	30
Fagos RNA	25	10	2	12
Fago X174	10	120	4.5	2.25
Fago MS-2	500	120	3.5	1.75

Fuente: Adaptado de Referencia 5, 2003.

1.5 Efectos Sinérgicos de la Plata con Otros Compuestos

El concepto de sinergismo se refiere al hecho de que al combinar dos o más elementos sus efectos son mayores que la suma de los efectos por separado. De tal forma que, la combinación puede disminuir las concentraciones necesarias de cada componente y, en este caso, reducir los riesgos secundarios a la salud asociados con la desinfección (Batterman *et al.*, 2001). Por esta razón, se estudia activamente la combinación de diversos elementos como la plata con otros elementos o compuestos. A continuación se presentan algunas de éstas con plata.

1.5.1 Plata-Cobre

Los iones metálicos de plata y cobre, ya sea adicionados como sales o generados mediante dispositivos electrolíticos, se usan ampliamente para inactivar la bacteria *Legionella pneumophila* en los sistemas (fríos o calientes) de suministro de agua en los hospitales; con mayor aplicación en la recirculación de agua caliente (Landeem *et al.*, 1989; Lin *et al.*, 1996, 1998).

Se ha reportado que las dosis efectivas de los metales son de unos cuantos décimos de 1 mg/L para el cobre y de unos cuantos centésimos de 1 mg/L para la plata. También se encontró que había acumulación de cobre y plata en el fondo de los tanques de agua

caliente, lo que conduce a una exitosa y prolongada inhibición de la multiplicación de *L. pneumophila* (Kim *et al.*, 2002).

Sin embargo, en un estudio realizado por Cassells *et al.* (1995) para inactivar *Naegleria fowleri* (amibas) en agua cruda de pozo con fines recreativos (albercas) se encontró que el efecto de los iones plata-cobre electrogenerados en las amibas fue mínimo.

Se han aplicado iones plata/cobre generados por medio de electrodos en concentración de 600 µg/L de plata con 1200 µg/L de cobre para la desinfección de agua residual tratada con lodos activados. Esta relación logró abatir, después de 2 horas de tiempo de contacto, en 4 órdenes de magnitud la concentración de coliformes totales (Martínez, 2003), pasando de 10^7 NMP/100mL a menos de 10^3 NMP/100mL.

1.5.1.1 Mecanismo de desinfección de la combinación plata-cobre

Casi todos los signos del metabolismo y la actividad de las bacterias pueden ser afectados por una concentración elevada de iones de plata y cobre. Esto incluye la producción primaria, la metanogénesis, el sistema respiratorio, la motilidad, los ciclos biogeoquímicos y la actividad enzimática (Martínez, 2003).

Los iones plata y cobre atacan la pared celular con carga negativa y alteran la permeabilidad de la pared celular. Esta acción, unida a la desnaturalización de las proteínas, induce el rompimiento de la célula y, por lo tanto, su muerte (Friedman y Dugan, 1968; Bitton y Freihofer, 1978; Slawson *et al.*, 1990 en Lin *et al.*, 1998).

1.5.1.2 Cinética de desinfección de la combinación plata-cobre

En la Tabla 1.15 se presentan algunos ejemplos de la cinética de desinfección de la combinación plata-cobre en varios microorganismos. Cuando se compara el efecto de esta combinación de iones metálicos (20:40 ppb Ag:Cu, por ejemplo) en la bacteria *L. pneumophila* con el efecto causado por la plata sola (80 ppb; Tabla 1.12), es notable que la velocidad aparente de desinfección aumenta de 0.25 log removidos/h a 1.2 log removidos/h. Esto se debe principalmente al efecto sinérgico que se genera al combinar a la plata con el

cobre. De la tabla también se puede observar que los iones plata-cobre provenientes de sales resultaron más eficientes en la reducción del contenido de *L. pneumophila* que los iones electrogenerados. Con una dosis de 20:20 ppb Ag:Cu de sales se obtuvo una velocidad aparente de desinfección de 0.75 log removidos/h, en contraste con una dosis mayor de iones electrogenerados (20:200 ppb Ag:Cu) cuya velocidad aparente de desinfección fue de 0.20 log removidos/h, 3.75 veces menor. Aún no se sabe a que se debe este comportamiento, por lo que todavía hacen falta más estudios al respecto.

En general, cada microorganismo tiene una sensibilidad diferente a la combinación plata-cobre dependiendo de su estructura química y biológica, sin embargo se puede decir que las bacterias y los virus son más sensibles que los protozoos y las amibas a los iones plata-cobre combinados.

Tabla 1.15 Cinética de desinfección de la combinación plata-cobre en virus, bacterias, amibas y protozoos

Desinfectante	Microorganismo estudiado	Dosis	Tiempo de contacto	Inactivación (log removidos)	Velocidad aparente de desinfección (log/h)	Referencia
AgNO ₃ :CuCl ₂	<i>Mycobacterium avium</i> [*]	20:200 ppb	5 días	3	0.025	Lin <i>et al.</i> , 1998
		40:400 ppb	4 días		0.031	
		80:800 ppb	2 días		0.062	
	<i>Legionella pneumophila</i> [*]	20:20 ppb	8 h	6	0.75	Lin <i>et al.</i> , 1996
		40:20 ppb	6.5 h		0.92	
		20:40 ppb	5 h		1.2	
<i>Hartmannella vermiformes</i> ^β	500:5000 ppb	1 h	0.5	0.5	Rohr <i>et al.</i> , 2000	
<i>Tetrahymena pyriformis</i> ^δ	100:1000 ppb	1 h	2	2		
Iones ^α Ag:Cu	<i>Legionella pneumophila</i> [*]	40:400 ppb	24 h	3	0.125	Landeen <i>et al.</i> , 1989
		80:800 ppb [@]	1 h	5	5	Rohr <i>et al.</i> , 2000
		20:200 ppb [@]	24 h	5	0.20	
	<i>Staphylococcus sp.</i> [*]	40:400 ppb	2 min	0.03	0.9	Yahya <i>et al.</i> , 1990
	Coliformes fecales ^{*&}	600:1200 ppb	2 h	4	2	Martínez, 2003
	<i>Naegleria fowleri</i> ^β	80:800 ppb	>72 h	No causa inactivación significativa	0	Cassells <i>et al.</i> , 1995
	Colifago MS-2 [¶]	40:400 ppb	-	-	1.38	Yahya <i>et al.</i> , 1992
Poliovirus [¶]	-		-	0.036		

^α Iones electrogenerados

^{*} Bacterias

^β Amibas

[&] Coliformes fecales en agua residual tratada con lodos activados

[¶] Virus

^δ Protozoario ciliado

[@] Temperatura de 45 °C

1.5.2 Plata-Cobre-Cloro libre

Abad *et al.* (1994) evaluaron el efecto de los iones cobre-plata electrogenerados en combinación con bajos niveles de cloro libre sobre poliovirus en agua de pozo y de la llave. No se encontró una reducción completa del contenido de estos virus patógenos.

Por su parte, Cassells *et al.* (1995) hicieron pruebas con la combinación plata-cobre-cloro libre (80:800 µg/L y 1.0 mg/L, respectivamente) para inactivar *Naegleria fowleri*. Se observó que el tiempo requerido para la inactivación de la amiba disminuyó drásticamente en comparación con la combinación de los metales solos (referido anteriormente, Tabla 1.15). De la misma manera, la velocidad aparente de desinfección de *L. pneumophila* aumentó al aplicar los iones metálicos combinados con cloro. Este comportamiento es probablemente el resultado de los diferentes mecanismos que cada desinfectante emplea para la inactivación de la amiba, lo que sugiere un efecto sinérgico de la combinación de los tres desinfectantes.

1.5.2.1 Mecanismo de desinfección de la combinación plata-cobre-cloro libre

Aún no se ha establecido de manera clara el mecanismo de desinfección de la combinación plata-cobre-cloro libre. No obstante, se sabe que, tanto el cobre como el cloro, reaccionan con las proteínas de la membrana celular y de las enzimas, de esta manera y de forma particular, el cobre perfora la membrana celular (Mateos, 2004; *Algae Bar* TM, 2005). Además, la plata y el cobre interfieren con las enzimas involucradas en la respiración celular y se ligan en sitios específicos al ADN (Landeem *et al.*, 1989). En especial, la plata interfiere con la producción de ADN y acelera la fase de muerte (*Algae Bar* TM, 2005).

En virus, el cobre inactiva macromoléculas biológicas y, se cree, produce radicales hidroxilos que afectan la columna de péptidos¹⁹ de las proteínas de la cápside²⁰ de los viriones²¹. El cloro altera químicamente los nucleocápsides de tal manera que produce viriones no

¹⁹ Un péptido es molécula formada por la unión covalente de dos o más aminoácidos (Real Academia Española, 2001).

²⁰ La cápsida o cápside vírica es una estructura proteica formada por una serie de monómeros llamados capsómeros. En el interior de esta cápside se encuentra el material genético del virus. Puede estar rodeada por una envoltura. Cada capsómero puede estar constituido por una o varias proteínas distintas (Wikipedia, 2001).

²¹ En medicina, microbiología y biología se denomina virión a la partícula vírica morfológicamente completa. Está compuesto por ácido nucleico vírico (ADN o ARN) y proteínas (Wikipedia, 2001).

infecciosos. En cuanto a la plata, los virus presentan diferentes resistencias a este metal debido a que unos tienen una estructura molecular más estable que otros (Abad *et al.*, 1994).

1.5.2.2 Cinética de desinfección de la combinación plata-cobre-cloro libre

Aunque la tasa de desinfección de la plata y el cobre es lenta comparada con la del cloro, cuando se combinan los tres elementos resultan en un efecto microbicida mejorado (Cassells *et al.*, 1995). Cuando los iones plata-cobre se combinan además con un agente oxidante como el cloro, la velocidad aparente de desinfección aumenta aún más (Tabla 1.16). Por ejemplo, la velocidad aparente de desinfección de *L. pneumophila* aumentó de 0.125 log/h (40:400 ppb Ag-Cu; Tabla 1.15) a 148 log/h (40:400ppb:0.4ppm Ag-Cu-Cl) al combinar los iones metálicos con el cloro. Este efecto sinérgico permite disminuir las dosis, tanto de metales como de cloro, y obtener una mejor eficiencia de desinfección en un tiempo menor.

Tabla 1.16 Cinética de desinfección de la combinación plata-cobre-cloro libre en virus, bacterias, amibas, bacteriófagos y protozoos

Microorganismo estudiado	Dosis	Tiempo de contacto	Inactivación (log removidos)	Velocidad aparente de desinfección (log/h)	Referencia
<i>Legionella pneumophila</i> ^α	40:400 ppb:0.4 ppm	1.5 min	3.7	148	Landeen <i>et al.</i> , 1989
<i>Staphylococcus sp.</i> [*]	40:400 ppb:0.3 ppm	2 min	2.4	72	Yahya <i>et al.</i> , 1990
Coliformes fecales ^{&}	200:1200 ppb:1 ppm	2 h	6	3	Martinez, 2003
<i>Naegleria fowleri</i> ^β	80:800 ppb:1 ppm	3.9 min	2	30.77	Cassells <i>et al.</i> , 1995
Adenovirus ^α	70:700 ppb:0.5 ppm	30 min	2.6	5.2	Abad <i>et al.</i> , 1994
Virus de hepatitis A ^α			1.9	3.8	
Rotavirus humanos ^α			1.8	3.6	
Poliovirus ^α		5 min	4	48	
<i>Bacteroides fragilis</i> ^γ		15 min	4	16	
Adenovirus ^α	70:700 ppb:0.2 ppm	30 min	1.6	3.2	
Virus de hepatitis A ^α			1.8	3.6	
Rotavirus humanos ^α			1.4	2.8	
Poliovirus ^α			3.9	7.8	
<i>Bacteroides fragilis</i> ^δ			3	6	

^α Iones electrogenerados

^{*} Bacterias

[&] Coliformes fecales en agua residual tratada con lodos activados

^α Virus

^γ Bacteriófagos

^δ Protozooario ciliado

^β Amibas

Otro ejemplo de la eficiencia de desinfección de la combinación plata-cobre-cloro es *Naegleria fowleri* la cual no presentó inactivación significativa con 80:800 ppb Ag:Cu (Tabla 1.15), sin embargo, cuando a esta combinación se le adicionó 1 ppm de cloro se obtuvo una velocidad aparente de desinfección de 30.77 log/h que representa una inactivación muy rápida (2 log en 3.9 min). Lo mismo pasa con los virus, hay una desinfección más rápida cuando los metales se combinan con el cloro.

1.5.3 Productos y tecnologías de plata, sola y combinada, disponibles en el mercado

Existen varias marcas comerciales de productos y tecnologías de plata que se encuentran disponibles en el mercado. La mayoría de ellas se utilizan para desinfectar agua de consumo humano y verduras. Ejemplos de estos productos son, en México, la marca Microdyn® (Roland S. A.) que es plata coloidal al 0.36% (Silver, 2003) y, en Estados Unidos, la marca Argentia® (solución o spray) que contiene 50 ppm de plata coloidal (*The Nutrition Farm*, 2004).

La plata elemental o ionizada se utiliza como compuesto activo en muchos diferentes filtros de uso doméstico para purificar agua (Park y Jang, 2003; Pelkonen *et al.*, 2003), por ejemplo, en México, la marca Rotoplas® fabrica filtros a base de carbón activado y plata y, en Cuba se han desarrollado filtros cerámicos impregnados con plata coloidal (CITA²² y CENHICA²³, 2002).

Otra marca comercial que se emplea para desinfectar agua de consumo humano es Sanosil®. Este producto utiliza la combinación plata-peróxido de hidrógeno. Pedahzur *et al.*, (2000) consideran que este antiséptico es adecuado para usarse como un desinfectante secundario de larga duración residual para agua potable de buena calidad debido a que posee un efecto bactericida lento y moderado, una estabilidad prolongada y efectividad en concentraciones relativamente bajas (Pedahzur *et al.*, 1995).

²² CITA, Centro de Investigación de Tecnología Apropriada, Camaguey.

²³ CENHICA, Centro Nacional de Hidrología y Calidad de las Aguas, Cuba.

Por otra parte, se han desarrollado varios tipos de materiales inorgánicos (zeolitas, fosfato de calcio, sílica gel y vidrio borosilicato) bañados con plata con la finalidad de proporcionarles propiedades bactericidas. Las zeolitas bañadas con plata poseen ciertas ventajas tales como su alta actividad bactericida y durabilidad química, sin embargo, presentan la desventaja de tener baja fuerza mecánica. El fosfato de calcio y la sílica gel bañados con plata se preparan con facilidad, pero son coloridos y tienen baja actividad bactericida. El vidrio borosilicato bañado con plata es incoloro y tiene una alta actividad antibacteriana, pero tiene poca durabilidad química y también puede liberar ácido bórico, que es una sustancia peligrosa (Kawashita *et al.*, 2003).

Finalmente, la ionización de plata-cobre es una nueva tecnología que se está usando en los hospitales para controlar la bacteria *Legionella pneumophila* en sistemas de agua caliente (Lin *et al.*, 1998), así como para desinfectar albercas, como por ejemplo la marca Poolfresh® que consiste de una celda con dos electrodos de aleación plata-cobre y un circuito electrónico que controla la cantidad de iones metálicos que se adicionan al agua (Gobierno de Chile, Servicio Nacional de Aduanas, 2001).

Capítulo 2 METODOLOGÍA

A continuación se presenta la metodología que se siguió para el muestreo, caracterización y pruebas de desinfección del lodo fisicoquímico así como la de las seis etapas en las que se dividió la experimentación y que se enlistan a continuación.

1. Inactivación de altas concentraciones de coliformes fecales y huevos de helmintos con plata.
2. Combinación de la plata con otros compuestos para obtener un efecto sinérgico.
3. Estudios de recrecimiento.
4. Efecto de las dosis óptimas para inactivar huevos de helmintos sobre otros organismos de interés.
5. Cinéticas de desinfección.
6. Estudios complementarios: contenido de metales y distribución del tamaño de partícula.

2.1 Muestreo

El lodo fisicoquímico provino de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de San Pedro Atocpan ubicada en la Delegación Milpa Alta, al sur de la ciudad de México. La planta de tratamiento colecta las aguas residuales de San Gregorio y del Pueblo de San Pedro Atocpan cuya principal actividad económica es la producción y comercialización de mole²⁴. Las dos poblaciones tienen aproximadamente 15,200 habitantes (INEGI, 2000). La planta trata 35 L/s mediante un proceso de coagulación floculación con 66 mg/L de sulfato de aluminio y 1 mg/L de un polímero aniónico. En la Figura 2.1 se muestra el diagrama de flujo de la planta de tratamiento. Por sus características (contenido de materia orgánica y nutrientes), el agua residual tratada se destina a riego agrícola (CNA, 2004).

La producción de lodos de la planta es de aproximadamente 470 kg en base seca por día. Los lodos son removidos del agua por sedimentación, posteriormente se someten a un proceso de espesamiento y, finalmente, se envían en pipas a la planta de tratamiento de

²⁴ Salsa espesa preparada con diferentes chiles y muchos otros ingredientes y especias (Real Academia Española, 2001).

aguas residuales de Cerro de la Estrella, ubicada en la Delegación Iztapalapa, para su posterior secado y depósito final (Barrios, 2003). Jiménez *et al.* (2002) reportaron que los lodos provenientes de esta planta de tratamiento tienen un alto contenido de microorganismos, muchos de ellos patógenos, por lo que se consideraron adecuados para realizar este trabajo. Los lodos se muestrearon directamente de la purga de los sedimentadores (Figura 2.1 y Figura 2.2a), por lo que para obtener lodo fresco para las pruebas de desinfección fue necesario drenar la línea durante 5 minutos aproximadamente. Las muestras se colectaron en garrafones de plástico (7-10 L; Figura 2.2b).

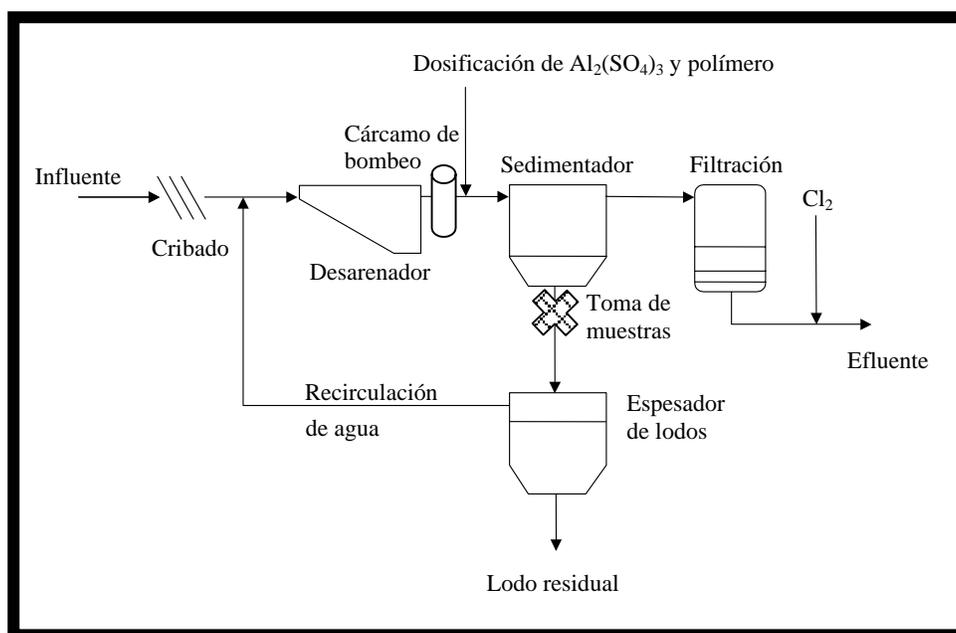


Figura 2.1 Diagrama de flujo de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de San Pedro Atocpan

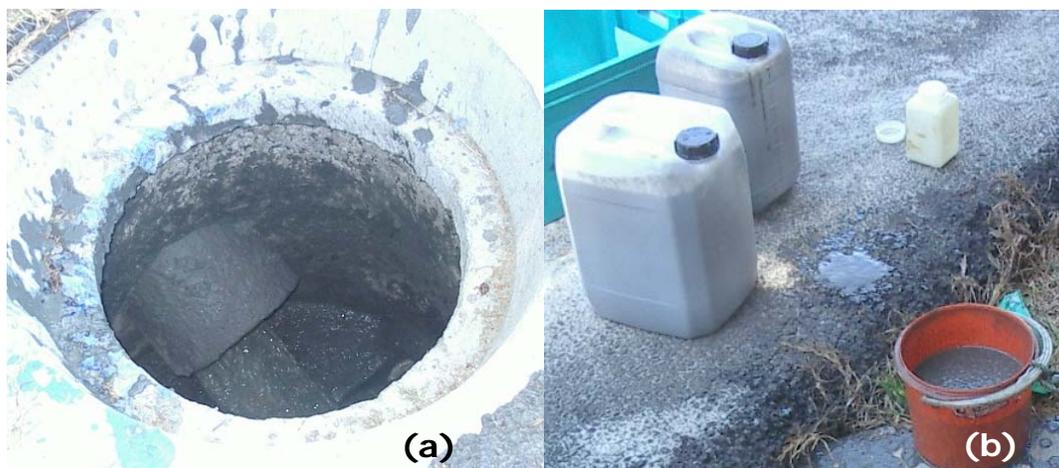


Figura 2.2 Sitio de muestreo. (a) Purga del sedimentador de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de San Pedro Atocpan y (b) colección de muestras de lodo

2.2 Caracterización del lodo crudo

Para caracterizar el lodo crudo y desinfectado se evaluaron los parámetros que se muestran en la Tabla 2.1. Asimismo, se indica de manera breve la importancia de cada parámetro y los métodos de medición utilizados.

Tabla 2.1 Parámetros fisicoquímicos y biológicos empleados para caracterizar el lodo crudo y desinfectado

Característica	Parámetro	Importancia	Método de medición	Referencia
Física	Sólidos totales (ST)	Principal característica física de los lodos. Expresa la relación entre el peso de los sólidos y el peso de la muestra.	2540 G	Jiménez, 2001; APHA <i>et al.</i> , 1998
	Sólidos volátiles (SV, %ST)	Sólidos orgánicos totales presentes en los lodos. Indicador de la atracción de vectores.	2540 G	DOF, 2003; APHA <i>et al.</i> , 1998
Química	pH	Define la relativa condición básica o ácida de los lodos midiendo la actividad de los protones H^+ . Aporta información acerca de otras propiedades de los lodos y de la solubilidad de minerales.	4500- H^+ B	Barrios, 2003; APHA <i>et al.</i> , 1998
Biológica	Coliformes fecales	Indicadores tradicionales de contaminación fecal.	NOM-004-SEMARNAT-2002*	DOF, 2003
	Huevos de helmintos	Parásitos intestinales muy resistentes del hombre, animales y vegetales.	NOM-004-SEMARNAT-2002**	DOF, 2003

* Anexo III de la NOM ** Anexo V de la NOM

2.3 Pruebas de desinfección

Algunos estudios (Lin *et al.*, 1996; Rohr *et al.*, 2000) sugieren que los iones plata y cobre provenientes de sales son más eficientes en la inactivación de bacterias que los iones electrogenerados por lo que para desinfectar el lodo se emplearon soluciones de nitrato de plata (10.22 g Ag/L), sulfato de cobre pentahidratado (100 g Cu/L) y agente sinérgico (20 g AS/L). La desinfección se realizó en un equipo de prueba de jarras de capacidad de 1L (*Kemwater Flocculator 2000*; Figura 2.3) y en todos los casos, el volumen de lodo fue de 0.6L. Al inicio de la prueba se llevó a cabo una mezcla rápida con un gradiente de velocidad de 758 s^{-1} (400 rpm) durante 1 minuto con la finalidad de homogeneizar el lodo con el o los desinfectantes. Posteriormente, siguió una mezcla lenta con un gradiente de 387 s^{-1} (100 rpm) durante el tiempo de contacto establecido (de 10 a 60 minutos) para permitir que se llevara a cabo la desinfección. De manera adicional, se utilizaron agitadores magnéticos para evitar la presencia de zonas muertas en el fondo de las jarras (Figura 2.3). Cada prueba se hizo por duplicado. A continuación se presenta el cálculo del gradiente de velocidad.



Figura 2.3 Prueba de desinfección de lodo fisicoquímico en un equipo de prueba de jarras

2.3.1 Cálculo del gradiente de velocidad

En esta sección se presenta el cálculo de los gradientes de velocidad (G) que corresponden a las condiciones de mezclado empleadas en la desinfección, 400 rpm para la mezcla rápida y 100 rpm para la mezcla lenta. El gradiente de velocidad se calculó a partir de la ecuación de Camp y Stein (1943 en Metcalf y Eddy, 2003):

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} \quad (2)$$

Donde G : gradiente de velocidad promedio, T^{-1} , s^{-1}
 P : requerimientos de potencia, 0.36 y 1.38 W
 μ : viscosidad dinámica²⁵, 4×10^{-3} N·s/m²
 V : volumen del floculador, 6×10^{-4} m³

Los requerimientos de potencia para cada etapa de mezclado se calcularon con la siguiente ecuación:

$$P = V * I \quad (3)$$

Donde V : voltaje, volts (V)
 I : corriente, Ampers (A)

Tanto el voltaje (121.5 volts) como la corriente se midieron en el laboratorio con un multímetro de corriente alterna. El voltaje es constante en cualquier etapa de mezclado y la corriente varía en función de las revoluciones por minuto (rpm) aplicadas. De esta manera, la corriente que gasta un agitador de la prueba de jarras en la mezcla rápida (400 rpm), incluyendo la contribución del agitador magnético, es de 11.4×10^{-3} A y en la mezcla lenta (100 rpm) de 3×10^{-3} A. Al sustituir estos valores en la ecuación (3), se tiene que la potencia requerida para cada etapa de mezclado es:

Mezcla rápida: $P = (121.5 \text{ V})(11.4 \times 10^{-3} \text{ A}) = \mathbf{1.38 \text{ W}}$

Mezcla lenta: $P = (121.5 \text{ V})(3 \times 10^{-3} \text{ A}) = \mathbf{0.36 \text{ W}}$

²⁵ Valor aproximado (MWH, 2005).

Finalmente, al sustituir todos los valores en la ecuación de Camp y Stein (ecuación 2) se tiene que el valor de G para cada etapa de mezclado es:

Mezcla rápida:
$$G = \sqrt{\frac{1.38W}{(4 \times 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2)(6 \times 10^{-4} \text{ m}^3)}} = 758 \text{ s}^{-1}$$

Mezcla lenta:
$$G = \sqrt{\frac{0.36W}{(4 \times 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2)(6 \times 10^{-4} \text{ m}^3)}} = 387 \text{ s}^{-1}$$

2.4 Inactivación de altas concentraciones de coliformes fecales y huevos de helmintos con plata

Esta etapa se desarrolló con la finalidad de determinar la capacidad de la plata para desinfectar lodos con las características propias del país (Jiménez *et al.*, 2002). Por lo que, para evaluar el efecto de la plata en coliformes fecales, se planteó un diseño de experimentos (Tabla 2.2) que consideró dos factores de estudio: la dosis de plata y el tiempo de contacto. Debido a que no se cuenta con información del uso de la plata para desinfectar lodo, se propusieron dos dosis de plata (20 y 40 mg Ag/g ST) y seis tiempos de contacto (de 10 a 60 minutos).

Tabla 2.2 Diseño experimental factorial 2X6 para evaluar el efecto de la plata en coliformes fecales

Factores estudiados		Tratamiento
Dosis de Ag	Tiempo de contacto	
20 mg Ag/g ST	10 min	1
	20 min	2
	30 min	3
	40 min	4
	50 min	5
	60 min	6
40 mg Ag/g ST	10 min	7
	20 min	8
	30 min	9
	40 min	10
	50 min	11
	60 min	12

Variable de respuesta: coliformes fecales

Con base en estos resultados y partiendo del hecho de que para producir biosólidos clase A es necesario cumplir, no sólo con el contenido de coliformes fecales sino también con el de huevos de helmintos, se propuso otro diseño de experimentos (Tabla 2.3) para evaluar el efecto de la plata en estos parásitos. Las dosis aplicadas fueron 30 y 40 mg Ag/g ST y el tiempo de contacto fue de 60 minutos. En estudios preliminares se observó que este tiempo de contacto es el mínimo necesario para causar un daño efectivo en los huevos de helmintos.

Tabla 2.3 Diseño experimental de un solo factor con dos niveles completamente al azar para evaluar el efecto de la plata en huevos de helmintos

Factor estudiado	Tratamiento
Dosis de Ag	
30 mg/g ST	1
40 mg/g ST	2
<i>Variable de respuesta: huevos de helmintos</i>	

2.5 Combinación de la plata con otros compuestos para obtener un efecto sinérgico

En esta etapa se buscó obtener un efecto sinérgico de la plata con otros compuestos para reducir las dosis empleadas de este metal en la desinfección y por lo tanto los posibles riesgos a la salud asociados (en general, los metales en altas concentraciones son tóxicos) y los costos de desinfección (la plata tiene un costo elevado). Así, en este estudio, la plata se combinó con cobre y un agente sinérgico. Se estudió el efecto en coliformes fecales y huevos de helmintos de diferentes dosis de las tres combinaciones siguientes: (1) plata-cobre, (2) plata-agente sinérgico y (3) plata-cobre-agente sinérgico. Ello, con la finalidad de encontrar las dosis óptimas para producir biosólidos clase A a partir de las altas concentraciones de coliformes fecales y huevos de helmintos reportadas en los lodos estudiados, que son característicos del país (Jiménez *et al.*, 2002). Para todas las pruebas se estableció un tiempo de contacto de 60 minutos que, como ya se mencionó, es el tiempo mínimo que se requiere para causar un daño efectivo a los huevos de helmintos.

2.5.1 Plata-cobre

Existen varios estudios (Landeen *et al.*, 1989; Cassells *et al.*, 1995; Lin *et al.*, 1996,1998; Kim *et al.*, 2002) que demuestran el efecto sinérgico de la combinación plata-cobre, sin embargo, no se encontró ninguno de su aplicación para desinfectar lodos. Por esta razón y con base en los resultados de la desinfección con plata (etapa anterior), se aplicaron dosis de plata-cobre en un intervalo muy amplio, para la plata de 5 a 60 mg Ag/g ST y para el cobre de 50 a 600 mg Cu/g ST. En la Tabla 2.4 se muestran las dosis de plata-cobre empleadas y el diseño experimental desarrollado para evaluar su efecto en coliformes fecales (variable de respuesta). Para evaluar el efecto en huevos de helmintos, se hizo un diseño experimental similar (Tabla 2.5). Se analizaron las mismas dosis que para coliformes fecales, excepto 5:50 mg Ag-Cu/g ST, que fue la más baja estudiada (esto de acuerdo con los resultados obtenidos para coliformes fecales).

Tabla 2.4 Diseño experimental de un solo factor con 6 niveles completamente al azar para evaluar el efecto de la combinación plata-cobre en coliformes fecales

Factor estudiado	Tratamiento
Dosis Ag-Cu	
5:50 mg/g ST	1
10:100 mg/g ST	2
20:200 mg/g ST	3
30:300 mg/g ST	4
40:400 mg/g ST	5
60:600 mg/g ST	6
<i>Variable de respuesta: coliformes fecales</i>	

Tabla 2.5 Diseño experimental de un solo factor con 5 niveles completamente al azar para evaluar el efecto de la combinación plata-cobre en huevos de helmintos

Factor estudiado	Tratamiento
Dosis Ag-Cu	
10:100 mg/g ST	1
20:200 mg/g ST	2
30:300 mg/g ST	3
40:400 mg/g ST	4
60:600 mg/g ST	5
<i>Variable de respuesta: huevos de helmintos</i>	

2.5.2 Plata-agente sinérgico

Debido a que no hay referencias que reporten el uso de la combinación plata-agente sinérgico como desinfectante, para esta etapa se conservó el mismo intervalo de las dosis de plata (de 5 a 60 mg Ag/g ST) que se emplearon para la combinación plata-cobre. Asimismo, se consideró la posibilidad de obtener un efecto sinérgico al combinar la plata con el agente sinérgico. La dosis de agente sinérgico (de 1.3 a 24 mg AS/g ST) se eligieron con base en estudios que reportan su aplicación para desinfectar lodos (0.2 a 20 mg AS/g ST; *Referencia 13*, 1989 y *Referencia 16*, 2001). En la Tabla 2.6 y en la Tabla 2.7 se muestran las dosis empleadas y los diseños de experimentos desarrollados para evaluar el efecto de la combinación plata-agente sinérgico en coliformes fecales y huevos de helmintos, respectivamente.

Tabla 2.6 Diseño experimental de un solo factor con 6 niveles completamente al azar para evaluar el efecto de la combinación plata-agente sinérgico sobre coliformes fecales

Factor estudiado	Tratamiento
Dosis Ag-AS	
5: 1.3 mg/g ST	1
10: 4 mg/g ST	2
20: 8 mg/g ST	3
30: 13.3 mg/g ST	4
40: 16 mg/g ST	5
60: 24 mg/g ST	6
<i>Variable de respuesta: coliformes fecales</i>	

Tabla 2.7 Diseño experimental de un solo factor con 4 niveles completamente al azar para evaluar el efecto de la combinación plata-agente sinérgico sobre huevos de helmintos

Factor estudiado	Tratamiento
Dosis Ag-AS	
20: 8 mg/g ST	1
30: 13.3 mg/g ST	2
40: 16 mg/g ST	3
60: 24 mg/g ST	4
<i>Variable de respuesta: huevos de helmintos</i>	

2.5.3 Plata-cobre-agente sinérgico

Con base en los resultados de las etapas anteriores y partiendo de la hipótesis de que al combinar los dos metales con el agente sinérgico se obtiene un efecto sinérgico mayor al obtenido cuando sólo se combinan dos componentes, las dosis estudiadas, en este caso, estuvieron en un intervalo más pequeño: de 5 a 20 mg Ag/g ST para la plata, de 50 a 200 mg Cu/g ST para el cobre y de 4 a 13.3 mg AS/g ST para el agente sinérgico. Las dosis aplicadas se presentan en la Tabla 2.8 así como el diseño de experimentos planteado, el cual considera a los coliformes fecales y los huevos de helmintos como variables de respuesta.

Tabla 2.8 Diseño experimental de un solo factor con 9 niveles completamente al azar para evaluar el efecto de la combinación plata-cobre-agente sinérgico sobre coliformes fecales y huevos de helmintos

Factor estudiado	Tratamiento
Dosis Ag-Cu-AS	
5:100:4 mg/g ST	1
5:100:8 mg/g ST	2
5:200:4 mg/g ST	3
5:200:8 mg/g ST	4
10:100:4 mg/g ST	5
10:100:8 mg/g ST	6
20:200:4 mg/g ST	7
20:200:8 mg/g ST	8
5:50:13.3 mg/g ST	9
<i>Variables de respuesta: coliformes fecales huevos de helmintos</i>	

2.6 Estudios de recrecimiento

Los estudios de recrecimiento se hicieron a las 72 h, en presencia y ausencia de luz y sólo para aquellas dosis de plata, plata-cobre, plata-agente sinérgico y plata-cobre-agente sinérgico que disminuyeron el contenido de coliformes fecales por debajo del límite que establece la NOM-004-SEMARNAT-2002 para biosólidos clase A (<1000 NMP/g ST; Tabla 2.9). Ello, con la finalidad de observar la existencia de recrecimiento de las bacterias después de la desinfección como resultado del posible desarrollo de mecanismos de reparación en las bacterias (foto-reactivación o reparación en ausencia de luz; WEF, 1996;

MWH, 2005) que les permitieran recuperarse, hasta cierto grado, del daño causado por el o los desinfectantes.

En todos los casos, se siguió un diseño experimental de un solo factor (luz) con dos niveles (presencia y ausencia) completamente al azar el cual se muestra en la Tabla 2.10.

Tabla 2.9 Dosis seleccionadas para hacer los estudios de recrecimiento

Ag	Ag-Cu	Ag-AS	Ag-Cu-AS
20 mg/g ST	10: 100 mg/g ST	20: 8 mg/g ST	5: 100: 4 mg/g ST
40 mg/g ST	20: 200 mg/g ST	30: 13.3 mg/g ST	5: 100: 8 mg/g ST
	30: 300 mg/g ST	40: 16 mg/g ST	5: 200: 4 mg/g ST
	40: 400 mg/g ST	60: 24 mg/g ST	5: 200: 8 mg/g ST
	60: 600 mg/g ST		10: 100: 4 mg/g ST
			10: 100: 8 mg/g ST
			20: 200: 4 mg/g ST
			20: 200: 8 mg/g ST
			5: 50: 13.3 mg/g ST

Tabla 2.10 Diseño experimental de un solo factor con dos niveles completamente al azar para evaluar el recrecimiento de coliformes fecales a las 72 h en presencia y ausencia de luz

Factor estudiado	Tratamiento
Luz	
Presencia	1
Ausencia	2
<i>Variable de respuesta: coliformes fecales</i>	

2.7 Efecto de las dosis óptimas para inactivar huevos de helmintos sobre otros organismos de interés

En esta etapa se evaluó el efecto de las dosis óptimas para inactivar huevos de helmintos (10: 100: 8 y 5: 50: 13.3 mg Ag-Cu-AS/g ST), encontradas en la segunda etapa experimental, en bacteriófagos somáticos, MS (F+), fagos de *Salmonella typhimurium*, *Salmonella* spp., *Shigella* spp., *Vibrio cholerae*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Giardia* sp. y *Cryptosporidium* sp. Estos organismos son representativos de estos grupos de organismos (virus, bacterias patógenas y protozoos) que son de interés por su presencia en los lodos y su naturaleza patógena. En la Tabla 2.11 se muestra el diseño de experimentos planteado.

Tabla 2.11 Diseño experimental de un solo factor con 2 niveles para evaluar el efecto de las dosis óptimas para inactivar huevos de helmintos en otros organismos de interés

Factor estudiado	Tratamiento
Dosis óptima	
10:100:13.3 mg Ag-Cu-AS/g ST	1
5:50:13.3 mg Ag-Cu-AS/g ST	2
VARIABLES DE RESPUESTA: <i>bacteriófagos somáticos</i> <i>bacteriófagos MS (F+)</i> <i>fagos de Salmonella typhimurium</i> <i>Samonella spp.</i> <i>Shigella spp.</i> <i>Pseudomonas aeruginosa</i> <i>Vibrio cholerae</i> <i>Giardia sp.</i> <i>Cryptosporidium sp.</i>	

La determinación de bacteriófagos se hizo mediante la técnica de la doble capa de agar (Adams, 1959) y se utilizaron las cepas huésped de referencia *Escherichia coli C* (ATCC 13706) y *Salmonella typhimurium*. Las bacterias patógenas se determinaron mediante la técnica del número más probable (NMP) seguida de la determinación de las especies de las bacterias mediante el sistema API-20E²⁶ (BioMerieux). Para ello, fue necesario usar medios selectivos de recrecimiento: agar Sulfito Bismuto para *Salmonella spp.*, agar entérico Hektoen para *Shigella spp.*, agar Tiosulfato Citrato Bilis Sacarosa (TCBS) para *Vibrio cholerae* y agar Cetrimida para *Pseudomonas aeruginosa*. Finalmente, la determinación de protozoos se hizo con el método 9711B (APHA *et al.*, 1998).

2.8 Cinéticas de desinfección

La inactivación de microorganismos durante la desinfección es el resultado de una serie de acciones físicas, químicas y bioquímicas que se pueden aproximar mediante una expresión matemática (modelo de cinética de desinfección; WEF, 1996). De manera común, el modelo que se utiliza es el de Chick. Sin embargo, por la naturaleza de los experimentos realizados en esta tesis, fue necesario utilizar un modelo más complejo (modelo de Hom-Hass) que permitiera ajustar mejor los datos obtenidos (MWH, 2005).

²⁶ Metodología rápida, estandarizada y miniaturizada de pruebas bioquímicas que se utiliza para la identificación hasta especie de este tipo de bacterias.

En la Tabla 2.12 se presentan las dosis que se analizaron para obtener las cinéticas de desinfección de la plata, plata-cobre, plata-agente sinérgico y plata-cobre-agente sinérgico. En todos los casos, se analizaron 6 tiempos de contacto (de 10 a 60 minutos).

Tabla 2.12 Dosis de plata, plata-cobre, plata-agente sinérgico y plata-cobre-agente sinérgico utilizadas para obtener las correspondientes cinéticas de desinfección

Ag	Ag-Cu	Ag-AS	Ag-Cu-AS
20 mg/g ST 40 mg/g ST	5:50 mg/g ST 10:100 mg/g ST	1:3 mg/g ST 1:4 mg/g ST 2:4 mg/g ST 2:6 mg/g ST 5:13 mg/g ST 20:8 mg/g ST	1:10:2.66 mg/g ST 5:100:4 mg/g ST

Todas las cinéticas de desinfección se calcularon a partir del modelo de Hom-Hass, el cual es básicamente una regresión lineal de la población microbiana sobreviviente, de la concentración del desinfectante y del tiempo.

$$\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -kC^n t^m \quad (4)$$

Donde N/N_0 : organismos sobrevivientes

k : coeficiente de muerte, variable

C : concentración del desinfectante, mg/L

t : tiempo, minutos

m : constante empírica, adimensional

n : coeficiente de dilución, que es un factor empírico frecuentemente asumido como la unidad, adimensional (Pernitsky *et al.*, 1995 en Méndez, 2003)

Para las combinaciones plata-cobre, plata-agente sinérgico y plata-cobre-agente sinérgico el modelo de Hom-Hass se aplicó con las siguientes modificaciones:

- La concentración C del desinfectante que requiere el modelo se obtuvo con base en el principio matemático que considera que el producto de dos constantes es otra constante. De esta manera, las dosis de los diferentes desinfectantes se multiplicaron entre sí para obtener una sola dosis de la combinación.
- La concentración C del desinfectante se consideró constante.

La ecuación, finalmente, queda de la siguiente manera:

$$\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -k^* t^m \quad (5)$$

Donde $k^* = kC^n$

2.9 Estudios complementarios: contenido de metales y distribución del tamaño de partícula

Aunque en México el contenido de metales en los lodos y biosólidos no representa un problema para su reúso o depósito (Jiménez *et al.*, 2004), no se debe perder de vista que en este trabajo se utilizaron metales para desinfectar el lodo fisicoquímico. Por ello, se consideró importante determinar el contenido de plata y cobre en el lodo desinfectado con las dosis empleadas para producir biosólidos clase A. Para ello, de manera inicial, se determinó el contenido de plata y cobre en el lodo crudo mediante el método 6010B de la EPA (*Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy*) y posteriormente se estimó la cantidad final en el lodo desinfectado de ambos metales mediante un balance de masa. Es importante mencionar que la NOM-004-SEMARNAT-2002 no establece un límite máximo permisible para la plata, sólo para el cobre, entre otros metales.

Otro estudio que se consideró de interés fue la determinación de la distribución del tamaño de partícula. Ello, con la finalidad de observar la existencia de alguna relación con el contenido de huevos de helmintos (partículas de 20 a 80 μm ; Chávez, 2004) que permitiera evaluar de manera más rápida la calidad biológica de los lodos. Para determinar este parámetro se utilizó un equipo Coulter Counter $\text{\textcircled{R}}$ MultisizerTM III.

2.10 Análisis estadísticos de los datos

El análisis estadístico de los datos se hizo mediante el análisis de variancia (ANOVA), comparación de medias y la prueba t de Dunnett de dos colas, la cual considera a uno de los grupos como control y compara al resto de los grupos con respecto a él. Lo que se buscó con esta prueba fue comparar la calidad del lodo desinfectado con respecto a la del lodo crudo (control) y, entonces, observar algún cambio significativo. En todos los casos se utilizó el programa estadístico SPSS versión 12.0.

Capítulo 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización del lodo crudo

El contenido de sólidos totales (4.8-5%) y sólidos volátiles (70.1–73.3%) del lodo fisicoquímico (Tabla 3.1) es similar al de un lodo primario típico (5-9% y 60-80%, respectivamente; Metcalf y Eddy, 2003). El pH (5.34 – 5.47 unidades) es ligeramente ácido debido al contenido de sulfato de aluminio proveniente del tratamiento del agua residual. En cuanto a las características biológicas, la concentración de coliformes fecales (10^6 – 10^7 NMP/g ST) es semejante a la reportada en lodos de países desarrollados (10^7 NMP/g ST), en contraste con el contenido de huevos de helmintos (168 – 215 HH viables/g ST), el cual es aproximadamente 13 a 215 veces mayor que el encontrado en lodos de Estados Unidos (2–13 HH viables/g ST; Reimers *et al.*, 1986) y de Francia (<1–4.5 HH viables/g ST; Gantzer *et al.*, 2001), respectivamente. Cabe mencionar que el contenido de huevos de helmintos encontrado en este estudio es incluso mayor al reportado por Jiménez *et al.* en 2002 (73-177 HH viables/g ST) para lodos de México. Este hecho refleja el bajo nivel de salud de la población local.

Tabla 3.1 Caracterización fisicoquímica y biológica del lodo fisicoquímico crudo

Parámetro	Este estudio	Valores típicos de lodos primarios y de países desarrollados
Sólidos totales (%)	4.8 – 5	5 – 9
Sólidos volátiles (%)	70.1 – 73.3	60 - 80
pH (unidades)	5.34 – 5.47	–
Coliformes fecales (NMP/g ST)	10^6 – 10^7	10^7 *
Huevos de helmintos (HH viables/g ST)	168 – 215	<1-13*

* Datos de países desarrollados como Estados Unidos y Francia (Reimers *et al.*, 1986; Gantzer *et al.*, 2001).

3.2 Inactivación de altas concentraciones de coliformes fecales y huevos de helmintos con plata

Los resultados de esta etapa demuestran que la plata puede inactivar tanto coliformes fecales como huevos de helmintos. En la Figura 3.1 se observa que con 20 mg Ag/g ST se reduce la concentración de coliformes fecales de 7.4 log (2.5×10^7 NMP/g ST) a casi 3 log

(1000 NMP/g ST; límite para biosólidos clase A) en un tiempo de contacto de 10 minutos. Para disminuir la concentración a menos de 1000 NMP/g ST (reducción de 5.1 log) se requirieron 60 minutos. Asimismo, al duplicar la dosis de plata (40 mg Ag/g ST), se encontró que, en 10 minutos, el contenido de coliformes fecales disminuyó a 2 log (<1000 NMP/g ST) y, en 20 minutos, a niveles no detectables (reducción total de 7.4 log). De manera general, los resultados muestran una mayor inactivación de coliformes fecales durante los primeros 10-20 minutos de tiempo de contacto y, en particular, al aumentar la dosis de plata. El análisis de variancia de los datos (Anexo I) indica que la efectividad de la dosis de plata, el tiempo de contacto y la interacción de los dos factores (dosis-tiempo de contacto) sobre los coliformes fecales es diferente. De hecho, la concentración de estas bacterias depende principalmente de la dosis de plata y no del tiempo de contacto ni de la interacción de ambos factores ya que el efecto de estos últimos es despreciable con respecto al de la dosis de plata. La comparación de medias confirmó la existencia de diferencias significativas en el contenido de coliformes fecales debidas a la aplicación de la dosis de plata, lo cual confirma el efecto desinfectante de la plata en términos de coliformes fecales. De manera que a mayor dosis de plata, mayor será la inactivación de coliformes fecales.

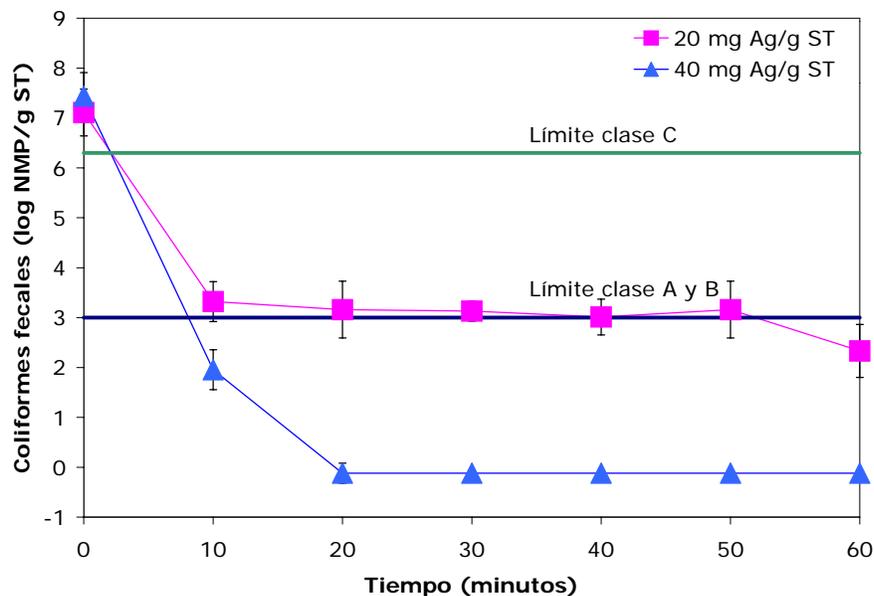


Figura 3.1 Inactivación de coliformes fecales con plata

No hay información disponible de la aplicación de la plata para inactivar coliformes fecales en lodo con la cual se puedan comparar los resultados de esta etapa. Sin embargo, las eficiencias de inactivación de coliformes fecales obtenidas con plata (20 mg Ag/g ST reducen 4-5.1 log y 40 mg Ag/g ST reducen 5-7.4 log) son similares a aquellas reportadas para la digestión aerobia termofílica (a 60-65 °C reduce 4-5 log de coliformes fecales; Záborská *et al.*, 2003) y la pasteurización (a 70 °C reduce 6 log de coliformes fecales; Keller *et al.*, 2004). Estos procesos están clasificados por la US EPA como procesos que eliminan patógenos (PFRPs), es decir, que producen biosólidos clase A a partir de las concentraciones de microorganismos de los lodos de Estados Unidos.

Estos resultados son insuficientes para evaluar si se cumple con los criterios de la NOM-004-SEMARNAT-2002, puesto que, para producir biosólidos clase A es necesario cumplir, no sólo con el contenido de coliformes fecales, si no también con el de huevos de helmintos. En la Figura 3.2 se presentan los resultados del efecto de la plata en estos parásitos. Se puede observar que dosis de plata de 30 y 40 mg Ag/g ST redujeron, en 60 minutos, el 52% y 65% de la concentración inicial de huevos de helmintos viables y el 20 y 25% de los huevos de helmintos totales, respectivamente. Esto indica que la plata es capaz tanto de inactivar como de destruir huevos de helmintos. Sin embargo, debido a la alta concentración inicial de huevos de helmintos (198 HH viables/g ST), las eficiencias obtenidas no fueron suficientes para cumplir con los criterios de la clase A. En este caso, el análisis estadístico (prueba t de Dunnett de dos colas; Anexo I) demostró que hay diferencias significativas en el contenido de huevos de helmintos viables y totales entre la muestra control (lodo crudo) y las muestras del lodo desinfectado, hecho que comprueba que la plata inactiva y destruye huevos de helmintos en lodos.

No se sabe cuál es el mecanismo de acción de la plata para inactivar huevos de helmintos, sin embargo, se piensa que la plata desnaturaliza las enzimas y proteínas superficiales (*CRC Handbook of Microbiology*, 1984; Pedahzur *et al.*, 1997; Iáñez, 1998; Feng *et al.*, 2000; Craig, 2001) de la capa lipoproteica que cubre al huevo, de manera que, bloquea la respiración, la transferencia de materiales, energía y electrones al interior del huevo provocando su inactivación.

A pesar de las altas eficiencias de inactivación de coliformes fecales y de huevos de helmintos obtenidas con la plata, no fue posible producir biosólidos clase A a partir de las

características biológicas del lodo estudiado. Para ello, se necesitarían dosis de plata mayores a 40 mg Ag/g ST, lo que elevaría de manera directa los costos de operación y la cantidad de plata residual en el lodo desinfectado.

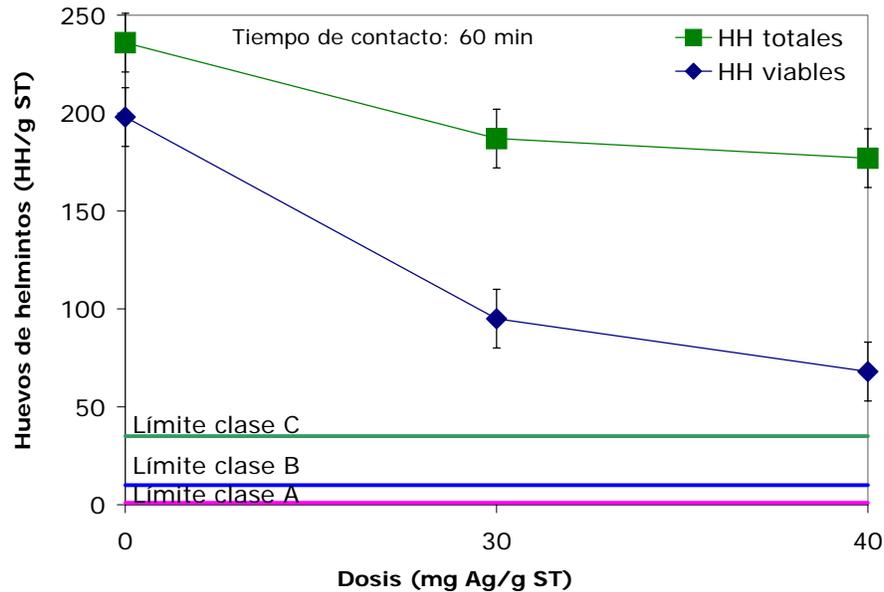


Figura 3.2 Inactivación y eliminación de huevos de helmintos con plata

3.3 Combinación de la plata con otros compuestos para obtener un efecto sinérgico

A continuación se presenta el análisis de los resultados del efecto de las combinaciones plata-cobre, plata-agente sinérgico y plata-cobre-agente sinérgico sobre coliformes fecales y huevos de helmintos.

3.3.1 Coliformes fecales

Para las tres combinaciones y para casi todas las dosis analizadas, los coliformes fecales fueron reducidos por debajo del límite de detección (<3 NMP/g ST) a partir de un contenido inicial de 5.75×10^7 NMP/g ST en 60 minutos. Estos resultados se presentan en la Figura 3.3, la Figura 3.4 y la Figura 3.5. De manera general, se puede observar un aumento en la

eficiencia de desinfección de las tres combinaciones con respecto a la inactivación con plata sola. Ello, como consecuencia del efecto sinérgico que se obtiene al combinar a la plata con el cobre y/o el agente sinérgico.

El efecto sinérgico entre la plata y el cobre ya ha sido reportado por varios autores (Landeem *et al.*, 1989; Lin *et al.*, 1996, 1998; Kim *et al.*, 2002; Martínez, 2003), no así para las combinaciones plata-agente sinérgico y plata-cobre-agente sinérgico. Sin embargo, este comportamiento coincide con el observado por Landeem *et al.* (1989), Yahya *et al.* (1990) y Cassells *et al.* (1995) al combinar a la plata y el cobre con cloro, el cual también es un oxidante.

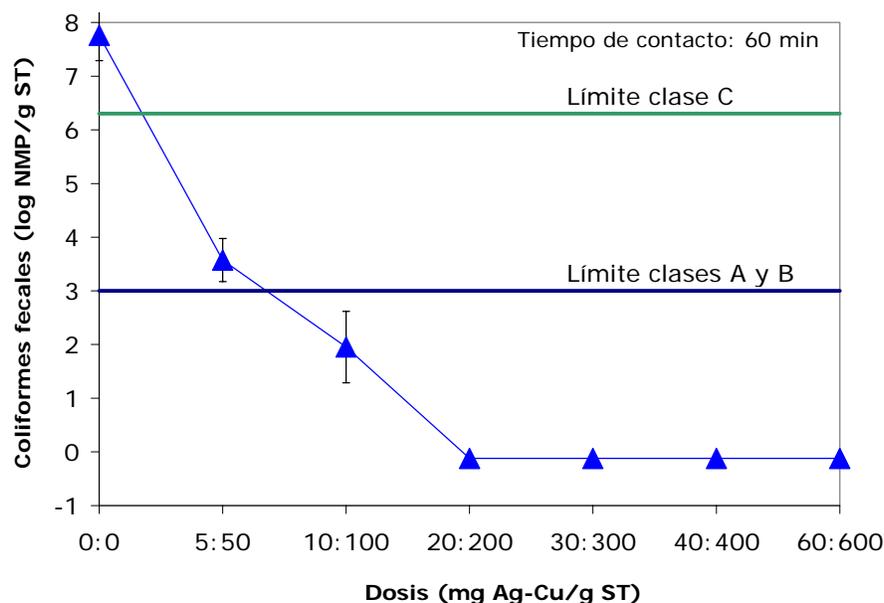


Figura 3.3 Inactivación de coliformes fecales con plata-cobre

Los análisis estadísticos (prueba t de Dunnett de 2 colas, Anexo I) de los resultados de las tres combinaciones indican diferencias significativas para todas las dosis aplicadas al lodo con respecto al lodo crudo, excepto para la combinación plata-agente sinérgico con la dosis de 5:1.3 mg Ag-AS/g ST. Esto demuestra que las tres combinaciones en las condiciones estudiadas, excepto la que ya se mencionó, son efectivas para inactivar coliformes fecales.

Con base en esto, la selección de la dosis, en un momento dado, dependerá de los intereses que se tengan, por ejemplo, el aspecto económico o los requerimientos de la normatividad.

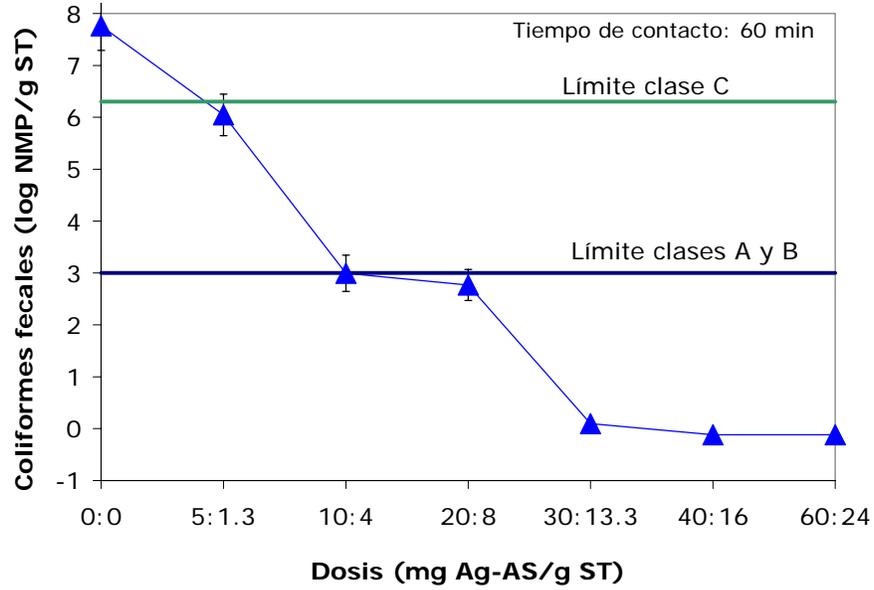


Figura 3.4 Inactivación de coliformes fecales con plata-agente sinérgico

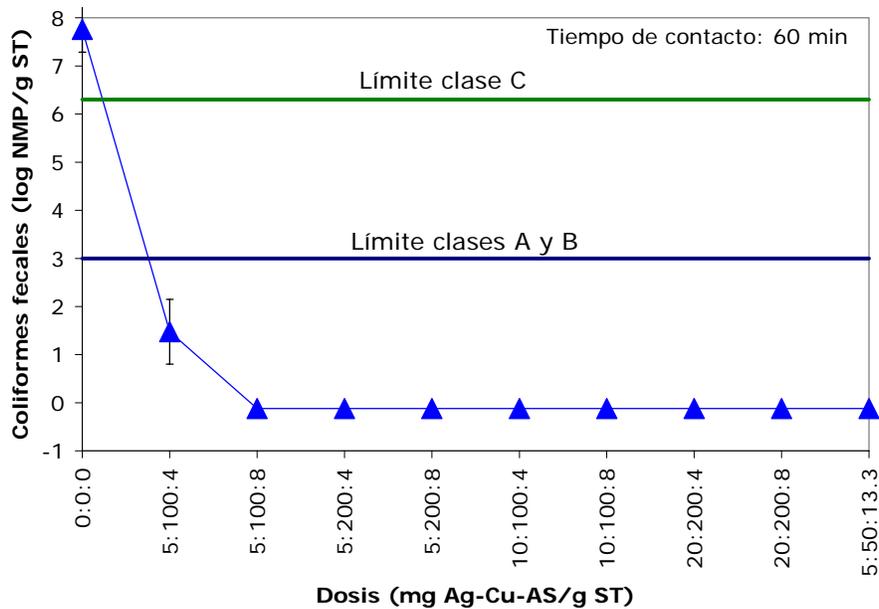


Figura 3.5 Inactivación de coliformes fecales con plata-cobre-agente sinérgico

3.3.2 Huevos de helmintos

En cuanto a los huevos de helmintos, se alcanzaron altas eficiencias de inactivación (90% con 60:600 mg Ag-Cu/g ST y 89% con 60:24 mg Ag-AS/g ST) para las combinaciones plata-cobre (Figura 3.6) y plata-agente sinérgico (Figura 3.7), sin embargo, fue imposible obtener concentraciones menores a 1 HH/g ST. A diferencia de la combinación plata-cobre-agente sinérgico, con la cual, dado su efecto, fue posible producir biosólidos clase A (Figura 3.8).

Se encontraron dos dosis efectivas para este fin: 10:100:8 y 5:50:13.3 mg Ag-Cu-AS/g ST. En estas condiciones, tanto el contenido de coliformes fecales como el de huevos de helmintos fue reducido a niveles no detectables a partir de 5×10^7 NMP/g ST de CF y 215 HH viables/g ST en 60 minutos. Las eficiencias obtenidas para las tres combinaciones, incluyendo aquellas para plata-cobre y plata-agente sinérgico que no pudieron producir biosólidos clase A, son semejantes a las reportadas para el agente sinérgico solo (93%-100%; *Referencia 15, 1987; Referencia 16, 2001*) en lodos biológicos o digeridos (aunque no se indica la concentración inicial de huevos de helmintos ni el tiempo de contacto) y son más elevadas que las reportadas por Méndez *et al.* (2002) con la estabilización alcalina mejorada con amoníaco (reducciones de 6 log de coliformes fecales y 94% de huevos de helmintos).

El análisis estadístico (prueba t de Dunnett de dos colas; Anexo I) de los resultados de la inactivación de huevos de helmintos de las tres combinaciones estudiadas indican que, en todos los casos, existen diferencias significativas en las muestras del lodo desinfectado con respecto al lodo crudo (control), lo cual implica que hay un efecto desinfectante en términos de huevos de helmintos viables.

Se piensa que el posible mecanismo de desinfección de la combinación plata-cobre-agente sinérgico en huevos de helmintos consiste en la ruptura de la capa lipoproteica como consecuencia de las propiedades altamente oxidantes del agente sinérgico, hecho que permite la entrada de los metales al interior del huevo y el daño consecuente de la estructura interna del huevo provocando su inactivación o destrucción.

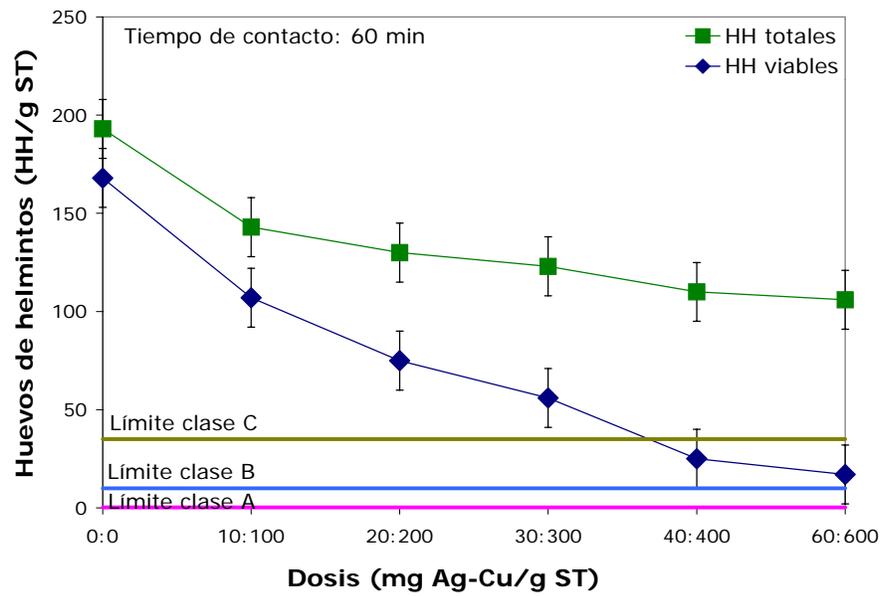


Figura 3.6 Inactivación de huevos de helmintos con plata-cobre

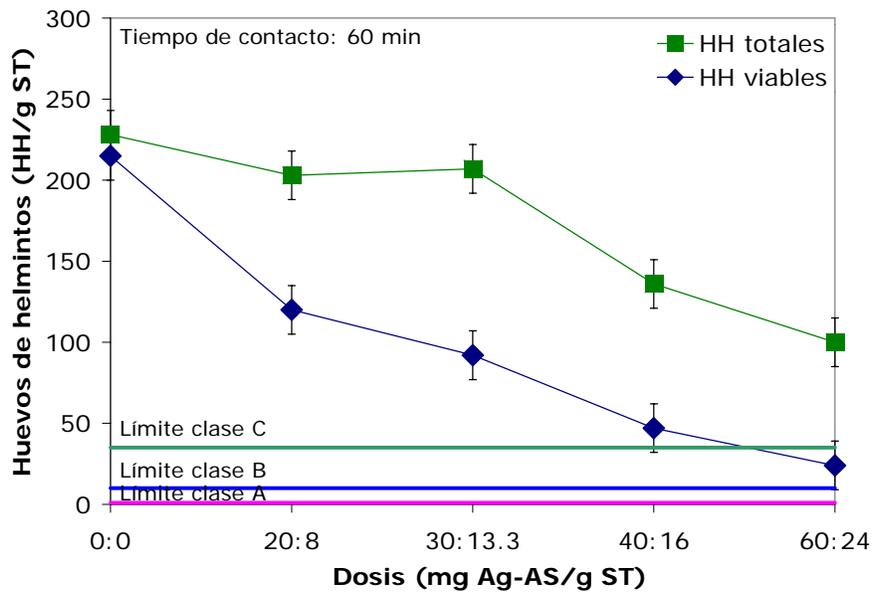


Figura 3.7 Inactivación de huevos de helmintos con plata-agente sinérgico

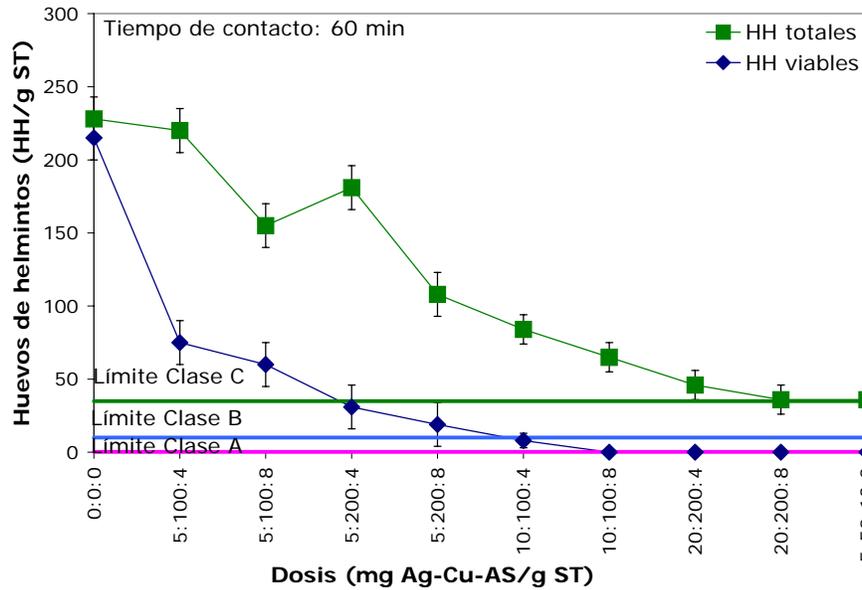


Figura 3.8 Inactivación de huevos de helmintos con plata-cobre-agente sinérgico

En la Tabla 3.2 se presentan las características fisicoquímicas del lodo desinfectado con las dosis óptimas para inactivar huevos de helmintos. El contenido de sólidos volátiles disminuyó 30.75% con 10:100:8 mg Ag-Cu-AS/g ST y 17.04% con 5:50:13.3 mg Ag-Cu-AS/g ST con respecto al contenido inicial del lodo crudo (70.1% de ST). Esta disminución en los sólidos volátiles sugiere cierta estabilización de los lodos durante la desinfección. La NOM-004-SEMARNAT-2002 menciona que para que haya una reducción en la atracción de vectores (indicador de estabilización) debe haber una reducción de al menos 38% de sólidos volátiles, por lo que el lodo fisicoquímico es parcialmente estabilizado durante la desinfección con plata-cobre-agente sinérgico.

Tabla 3.2 Características fisicoquímicas del lodo desinfectado con las dosis óptimas para inactivar huevos de helmintos

Muestra	Sólidos totales (%)	Sólidos volátiles (% de ST)	Reducción de SV (%) durante la desinfección	pH (unidades)
Lodo crudo	5.0 ± 0.1	70.1 ± 0.0	0.0 ± 0.0	5.34 ± 0.01
10:100:8 mg Ag-Cu-AS/g ST	4.4 ± 0.6	48.5 ± 5.8	30.75 ± 8.2	3.76 ± 0.01
5:50:13.3 mg Ag-Cu-AS/g ST	5.1 ± 1.2	58.1 ± 9.2	17.04 ± 13.2	3.99 ± 0.01

3.4 Estudios de recrecimiento

Como se mencionó, los estudios de recrecimiento se desarrollaron sólo para aquellas condiciones que produjeron menos de 1000 NMP/g ST de coliformes fecales. En ningún caso (Figura 3.9), se observó recrecimiento, lo cual indica que para los compuestos estudiados, las bacterias no poseen mecanismos de reparación, en presencia o ausencia de luz. El análisis estadístico (Anexo I) corroboró lo anterior ya que no se encontraron diferencias significativas, excepto para las muestras 10:100 mg Ag-Cu/g ST y 30:13.3 mg Ag-AS/g ST, lo cual sugiere que la combinación de la plata con cobre o con el agente sinérgico, posee un efecto desinfectante residual ya que además de no presentarse recrecimiento, los coliformes fecales, de hecho, decrecieron aún más, de casi 2 log a valores no detectables cuando se utilizó la combinación plata-cobre. Este es un efecto reportado previamente por Craig (2001).

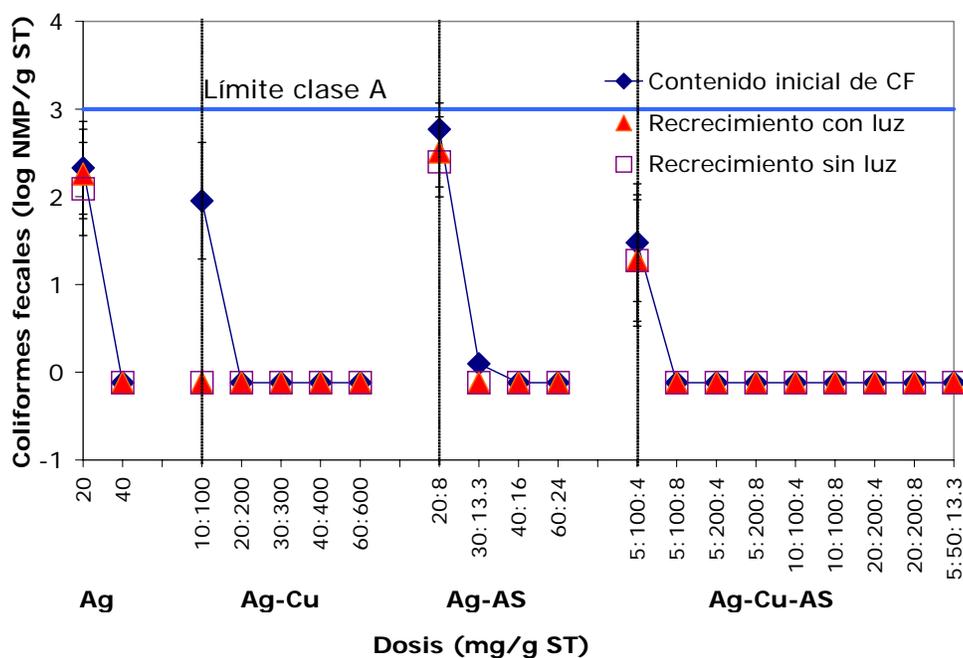


Figura 3.9 Recrecimiento de coliformes fecales en presencia y ausencia de luz después de 72h de la desinfección

3.5 Efecto de las dosis óptimas para inactivar huevos de helmintos sobre otros organismos de interés

Los resultados de esta etapa (Tabla 3.3) demuestran que con 10:100:8 y 5:50:13.3 mg Ag-Cu-AS/g ST) y 60 minutos de tiempo de contacto los bacteriófagos somáticos y MS (F+), fagos de *Salmonella typhimurium*, *Salmonella* spp., *Shigella* spp., *Pseudomonas aeruginosa* y *Vibrio cholerae* fueron completamente eliminados. La Prueba de Dunnett de dos colas (Anexo I) confirma que para estos organismos hay diferencias significativas con respecto al control (lodo crudo), debido al efecto desinfectante de las dosis óptimas para inactivar huevos de helmintos. Sin embargo, el contenido de *Giardia* sp. y *Cryptosporidium* sp. no se redujo a niveles por debajo del límite de detección. En el análisis estadístico (Anexo I) no se encontraron diferencias entre las muestras desinfectadas y el lodo crudo. Esta aparente resistencia de los protozoos a la combinación plata-cobre-agente sinérgico puede deberse a la capacidad que tienen los protozoos de enquistarse, por tiempo indefinido, cuando las condiciones del medio se vuelven adversas. También es importante tener en cuenta la viabilidad de los quistes, es decir, su capacidad para causar enfermedades. En este caso, no se midió viabilidad, por lo que las determinaciones son de protozoos totales.

Tabla 3.3 Efecto de las dosis óptimas para inactivar huevos de helmintos en otros organismos de interés

Organismo		Lodo crudo	Dosis (mg Ag-Cu-AS/g ST)		Especies encontradas*
			10:100:8	5:50:13.3	
Bacteriófagos (UFP/g ST)	Somáticos	5.8×10^4	ND	ND	-
	MS (F+)	3.0×10^4	ND	ND	-
	Fagos de <i>Salmonella typhimurium</i>	5.2×10^2	ND	ND	-
Bacterias (NMP/g ST)	Coliformes fecales	2.4×10^7	ND	ND	<i>Escherichia coli</i>
	<i>Salmonella</i> spp.	8.2×10^4	ND	ND	<i>Salmonella</i> spp.
	<i>Shigella</i> spp.	1.8×10^4	ND	ND	<i>Shigella</i> spp.
	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	5.6×10^3	ND	ND	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>
	<i>Vibrio cholerae</i>	9.9×10^2	ND	ND	<i>Vibrio cholerae</i>
Protozoos (Quistes/g ST)	<i>Giardia</i> sp.	10^2 a 10^3	1 – 15	1 – 13	-
	<i>Cryptosporidium</i> sp.**	10^2 a 10^4	1 – 25	1 – 17	-

* Prueba confirmativa API-20E (BioMerieux); ** ooquistes/g ST; ND: No detectado

Estudios de la remoción de bacteriófagos y *Salmonella* spp., reportan eficiencias más altas (reducción de 2 y 8 log de bacteriófagos y *Salmonella cholerasius*, respectivamente) para

tratamiento térmico a 80 °C (Mocé *et al.*, 2003) y eficiencias más bajas (reducción de 5 log de bacteriófagos) para el composteo a 70 °C (Mignotte *et al.*, 2002) comparados con este estudio. Sin embargo, no es posible comparar de manera directa los resultados puesto que la concentración inicial de los organismos es diferente en cada estudio. Con respecto a *Shigella spp.*, *Pseudomonas aeruginosa* y *Vibrio cholerae*, no hay otros estudios relacionados con su inactivación en lodo con los que se puedan comparar estos resultados.

En la Figura 3.10 se presentan dos fotos de la determinación de bacterias patógenas en el (a) lodo crudo y en el (b) lodo desinfectado con las dosis óptimas para inactivar huevos de helmintos. En el lodo crudo se observa el crecimiento de las bacterias en los diferentes medios selectivos, en contraste con el lodo desinfectado, en cuyo caso no hay crecimiento de bacterias puesto que todas fueron eliminadas durante la desinfección.

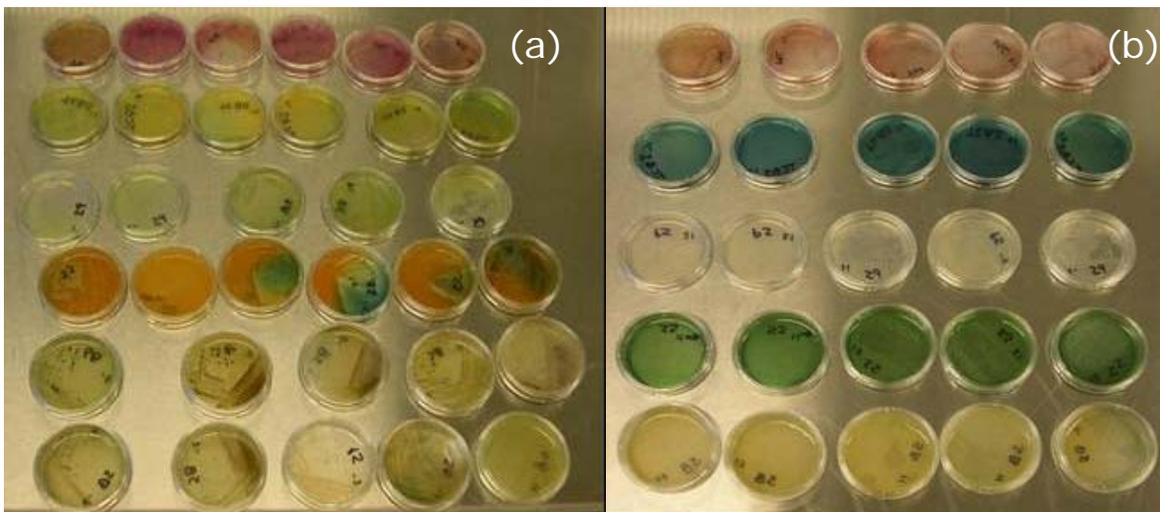


Figura 3.10 Determinación de *Salmonella spp.*, *Shigella spp.*, *Vibrio cholerae* y *Pseudomonas aeruginosa* en el lodo fisicoquímico (a) crudo y (b) desinfectado

En la Figura 3.11 se muestran algunas de las pruebas bioquímicas del sistema API-20E que se hicieron para determinar la especie de las bacterias patógenas estudiadas y en la Figura 3.12 se muestran los medios empleados en la determinación de bacteriófagos así como las cepas utilizadas.



Figura 3.11 Especiación de los géneros de *Salmonella* spp., *Shigella* spp., *Vibrio cholerae* y *Pseudomonas aeruginosa* mediante el sistema API-20E

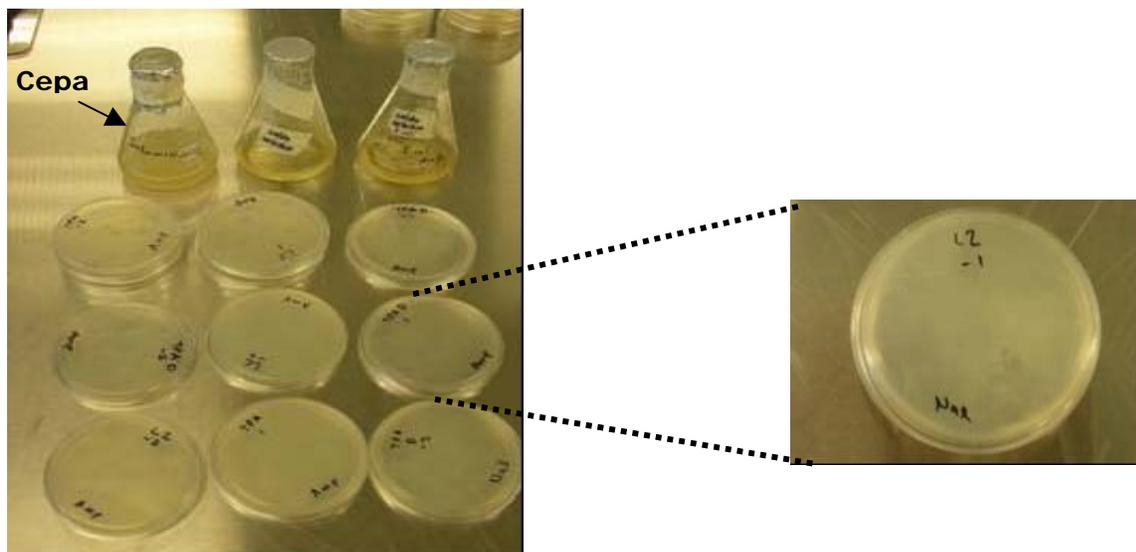


Figura 3.12 Determinación de bacteriófagos mediante la técnica de la doble capa de agar

3.6 Cinéticas de desinfección

En la Tabla 3.4 se resumen las constantes de velocidad de inactivación de coliformes fecales de la plata y de las combinaciones plata-cobre, plata-agente sinérgico y plata-cobre-agente sinérgico. Se puede observar que la plata presentó la mayor velocidad de desinfección (40 mg Ag/g ST; $k^*=10.37$) y la combinación plata-cobre la más baja (10:100 mg Ag-Cu/g ST; $k^*=2.655$). Sin embargo, en general, las constantes de velocidad de inactivación son altas, lo que indica una rápida inactivación de los coliformes fecales, particularmente, con el aumento de la dosis.

En general, en la literatura, se reporta que la plata presenta bajas velocidades aparentes de desinfección (0.3 y 1 log/h con 0.025 y 0.05 mg Ag/L en agua para uso y consumo humano; Pedahzur *et al.* 1997) a diferencia de los resultados obtenidos en este estudio para la desinfección del lodo. Esta alta velocidad de desinfección del lodo que presentó la plata, se atribuye a la dosis empleada, ya que en este estudio es considerablemente mayor a las utilizadas en agua de uso y consumo humano (20 mg Ag/g ST = 1000 mg/L o ppm y 40 mg Ag/g ST = 2000 mg/L).

Tabla 3.4 Parámetros cinéticos para el modelo de Hom-Haas

Muestra	k^*	m	R^2
20 mg Ag/g ST	6.748	0.09712	0.98
40 mg Ag/g ST	10.37	0.1337	0.97
5:50 mg Ag-Cu/g ST	3.851	0.3112	0.92
10:100 mg Ag-Cu/g ST	2.655	0.4743	0.95
1:3 mg Ag-AS/g ST	6.316	0.04425	0.98
1:4 mg Ag-AS/g ST	5.898	0.09618	0.97
2:4 mg Ag-AS/g ST	6.828	0.09044	0.96
2:6 mg Ag-AS/g ST	7.4	0.2153	0.96
5:13 mg Ag-AS/g ST	8.361	0.1905	0.95
20:8 mg Ag-AS/g ST	9.309	0.1622	0.96
1:10:2.66 mg Ag-Cu-AS/g ST	5.359	0.2149	0.97
5:100:4 mg Ag-Cu-AS/g ST	9.309	0.1622	0.96

Las ecuaciones de modelación (Anexo II) indican que la inactivación es exponencial y de primer orden (modelo de Hom-Haas) con respecto a la dosis. Este comportamiento puede tener dos causas: (1) que las partículas "enmascaran" a las bacterias y las protegen del desinfectante o (2) que hay un decremento en las propiedades del desinfectante con el

tiempo. En este último caso, la disminución de las propiedades desinfectantes de la plata, el cobre y el agente sinérgico, puede deberse a que forman complejos con los iones sulfhidrilo que contiene el lodo (los tres tienen gran afinidad por estos iones), de manera que, ya no están disponibles para inactivar a las bacterias.

Es importante mencionar que aunque la combinación plata-cobre-agente sinérgico no es la más rápida, sí es la más efectiva.

3.7 Estudios complementarios: contenido de metales y distribución del tamaño de partícula

3.7.1 Contenido de metales

En la Figura 3.13 y Figura 3.14 se muestran los balances de masa calculados para estimar el contenido final de plata y cobre, respectivamente, en el lodo desinfectado con las dosis efectivas para producir biosólidos clase A.

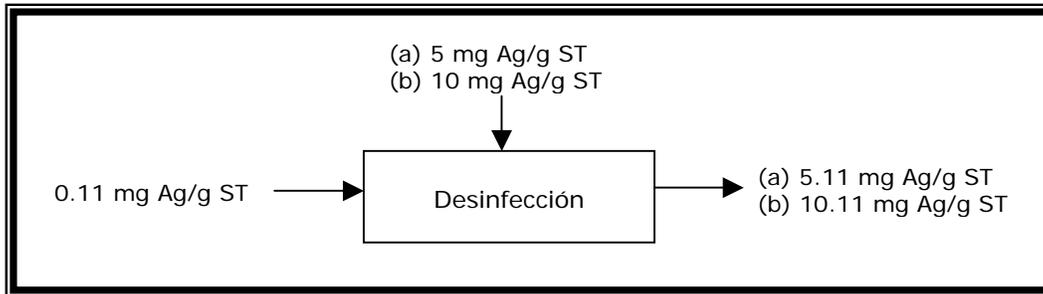


Figura 3.13 Balance de materia de la plata

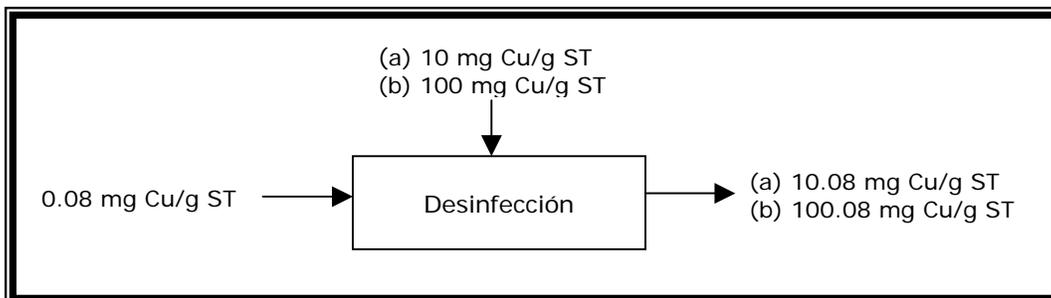


Figura 3.14 Balance de materia del cobre

En la Figura 3.15 se presenta de manera gráfica el aumento en la concentración de los metales después de la desinfección. Es claro que el cobre sobrepasa, de manera considerable, los límites que establece la NOM-004-SEMARNAT-2002 (672-6,672% para biosólidos tipo excelente y 234-2,327% para biosólidos tipo bueno). En el caso de la plata, no hay ninguna regulación a nivel nacional o internacional que establezca un límite en lodos y biosólidos, sin embargo, es necesario para ambos metales aplicar un método de recuperación de plata y cobre después de la desinfección para usar los biosólidos sin ningún riesgo de contaminación por metales. Además, los metales recuperados del lodo desinfectado pueden reutilizarse en la desinfección de otros lodos, con lo cual se reducirían los costos de compra de reactivos.

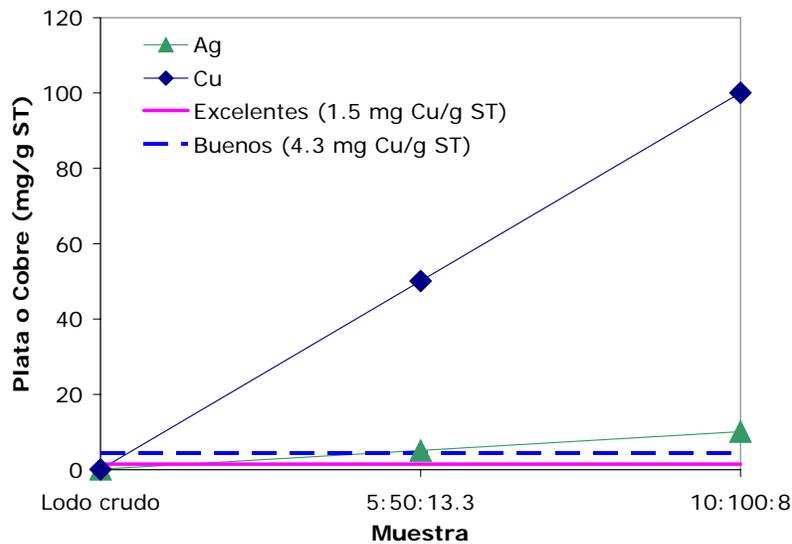


Figura 3.15 Estimación del contenido de metales después de la desinfección con las dosis óptimas para inactivar huevos de helmintos

3.7.2 Distribución del tamaño de partícula

La Figura 3.16 muestra la distribución de tamaño de partícula en volumen del lodo crudo y del desinfectado con las dosis óptimas para inactivar huevos de helmintos (10:100:8 y 5:50:13.3 mg Ag-Cu-AS/g ST). Es claro que dadas las variaciones de las mediciones, no hay un cambio significativo en la distribución del tamaño de partícula después de la desinfección.

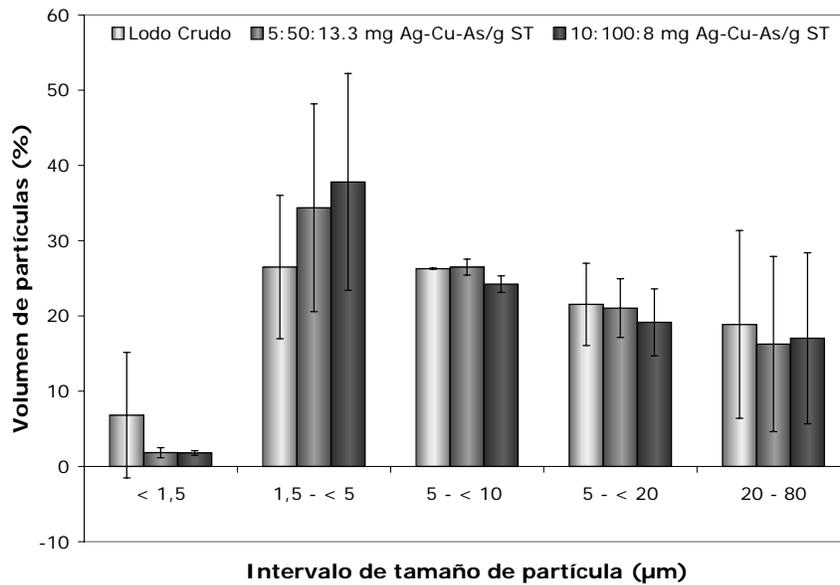


Figura 3.16 Distribución del tamaño de partícula del lodo crudo y desinfectado con las dosis óptimas para inactivar huevos de helmintos

Asimismo, en la Figura 3.17 se muestra el porcentaje en volumen de partículas del lodo crudo y desinfectado para el tamaño de partícula de 20 a 80 μm y el contenido de huevos de helmintos. No se encontró alguna relación entre ambos parámetros ya que el porcentaje de partículas no cambia con la desinfección y el contenido de huevos de helmintos sí.

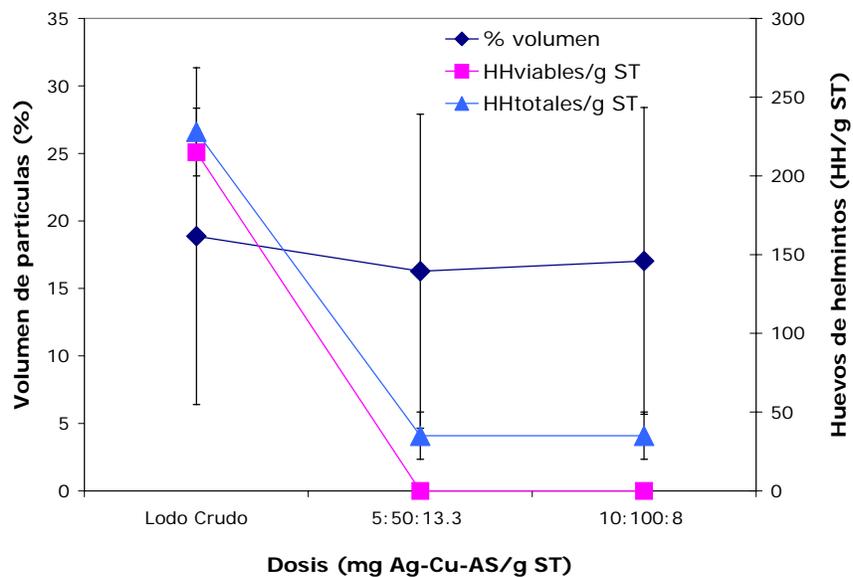


Figura 3.17 Volumen de partículas de 20-80 μm y contenido de huevos de helmintos en función de la dosis de plata-cobre-agente sinérgico aplicada

Capítulo 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

En cuanto al establecimiento del estado del arte del uso de la plata, el cobre y el agente sinérgico como desinfectantes de agua para uso y consumo humano, agua residual y lodos se tiene que:

La plata se ha usado como desinfectante de agua para uso y consumo humano desde la antigüedad y en tiempos más recientes se ha utilizado para desinfectar agua residual, sin embargo, no hay publicaciones relativas a su uso en lodos.

En la actualidad, el cobre se utiliza para desinfectar agua para uso y consumo humano. Con excepción de un estudio en el que se aplicó cobre combinado con plata en agua residual tratada no se encontraron reportes de su uso para desinfectar agua residual y lodos.

En los últimos años, el uso del agente sinérgico como desinfectante de agua para uso y consumo humano y de agua residual ha adquirido gran importancia. Su aplicación en lodos aún no es muy difundida, sin embargo, existen varios estudios que demuestran su efectividad.

Por otro lado, los resultados de esta tesis demuestran que la plata es eficiente para desinfectar lodo fisicoquímico con alto contenido de coliformes fecales y huevos de helmintos. En el caso particular de los huevos de helmintos se encontró que además de inactivarlos, la plata también puede destruirlos. Sin embargo, en las condiciones estudiadas, no fue posible producir biosólidos clase A con plata a partir de las características biológicas del lodo fisicoquímico estudiado, el cual es característico del país.

Con las combinaciones plata-cobre, plata-agente sinérgico y plata-cobre-agente sinérgico se obtuvieron eficiencias altas de inactivación de coliformes fecales y huevos de helmintos, sin embargo, sólo fue posible producir biosólidos clase A con plata-cobre-agente sinérgico. De tal manera que de esta combinación se obtuvieron dos dosis y un tiempo de contacto adecuados para tal propósito.

Dado que las dos dosis recomendadas para producir biosólidos clase A a partir de lodos fisicoquímicos estudiados presentan la misma eficiencia de desinfección, la elección de la dosis dependerá de los costos del proceso. Aunque en esta tesis no se hizo tal estudio, de acuerdo con personal de Servicios Industriales Peñoles, los costos de este método de desinfección compiten con otros procesos de tratamiento de lodos tales como la incineración.

No se observó recrecimiento después de la desinfección en presencia o ausencia de luz para las dosis analizadas de plata y sus combinaciones, por el contrario, se encontró un efecto desinfectante residual que fue más notable con la combinación plata-cobre.

Las dosis recomendadas para producir biosólidos clase A eliminaron por completo bacteriófagos somáticos, bacteriófagos MS (F+), fagos de *Salmonella typhimurium*, *Salmonella* spp., *Shigella* spp., *Pseudomonas aeruginosa* y *Vibrio cholerae* en el lodo fisicoquímico. Sin embargo, no hubo un cambio significativo en el contenido de protozoos (*Giardia* sp. y *Cryptosporidium* sp.). Esta aparente resistencia se atribuye a la capacidad que tienen estos organismos de enquistarse por tiempo indefinido cuando las condiciones del medio se vuelven adversas. Además, estos resultados se basan en la medición de protozoos totales, por lo que se desconoce la viabilidad de dichos organismos.

La inactivación de coliformes fecales con plata, plata-cobre, plata-agente sinérgico y plata-cobre-agente sinérgico es exponencial y de primer orden con respecto a la dosis. En todos los casos la inactivación de bacterias es rápida. Sin embargo, en cuanto a la efectividad para desinfectar lodos fisicoquímicos, la combinación plata-cobre-agente sinérgico fue la mejor, aunque no la más rápida.

El balance de materia del cobre indica que la concentración de este metal en el lodo desinfectado con las dosis óptimas para producir biosólidos clase A sobrepasa los límites que establece la NOM-004-SEMARNAT-2002 para biosólidos tipo excelente y bueno. En el caso de la plata, no hay ninguna regulación a nivel nacional o internacional que establezca un límite en lodos y biosólidos, sin embargo, es necesario para ambos metales aplicar un método de recuperación después de la desinfección que permita cumplir con la normatividad y usar los biosólidos sin ningún riesgo de contaminación por metales. Asimismo, los metales recuperados pueden volver a utilizarse en la desinfección de otros lodos.

No se encontró relación entre la distribución del tamaño de partícula y el contenido de huevos de helmintos en el lodo fisicoquímico puesto que la distribución del tamaño de partícula no cambia de manera significativa durante la desinfección y el contenido de huevos de helmintos sí.

4.2 Recomendaciones

Finalmente, se hacen las siguientes recomendaciones:

- Realizar un estudio de costos para comprobar la viabilidad de la aplicación de las dosis para producir biosólidos clase A a partir de lodo fisicoquímico con alto contenido de patógenos.
- Realizar pruebas en planta piloto que incluyan la aplicación de un método de recuperación de plata y cobre en el lodo desinfectado.

REFERENCIAS

- Abad F. X., Pintó R. M., Díez J. M. and Bosch A. (1994) Disinfection of human enteric viruses in water by copper and silver in combination with low levels of chlorine. *Appl. Environ. Microbiol.*, **60**(7), 2377-2383.
- Adams M. (1959). Bacteriophages. Nueva York (NY). Interscience Pub.
- Algae Bar* TM. (2005) A report on the advantages of using a dual stage method of sanitation. The copper-silver system. [En línea] Patent pending. [Citado 21 octubre 2005] Disponible en World Wide Web: <http://www.algaebar.com/report.html>
- Apedaile E. (2001) A perspective on biosolids management. *Canadian J. Infectious Diseases Medical Microbiol.*, **12**(4), 1-5.
- APHA, AWWA and WEF, American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environmental Federation (1998) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20th Edition, Washington DC, USA.
- Armon R., Laot N., Lev O., Shuval H. and Fattal B. (2000) Controlling biofilm formation by hydrogen peroxide and silver combined disinfectant. *Water Sci. Technol.*, **42**(1-2), 187-192.
- Astier P., Gost J., Redín J. M., Manrique A., Lameiro F. J. and Echeverría J. M. (2004) Programa de minimización de riesgos biológicos asociados a la infraestructura hospitalaria: funciones, actividades, responsabilidades. [En línea] [Citado 8 enero 2004] Disponible en World Wide Web: <http://www.cfnavarra.es/salud/anales/textos/vol23/suple2/suple19a.html>
- ATSDR, Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (1999) Plata. [En línea] Departamento de Salud y Servicios Humanos, División de Toxicología, USA, CAS #7440-22-4 [Citado 28 enero 2004] Disponible en World Wide Web: www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts146.pdf
- ATSDR, Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (2002) ToxFAQs™ para Cobre. [En línea] Departamento de Salud y Servicios Humanos, División de Toxicología, USA, CAS #7440-50-8 [Citado 1 octubre 2004] Disponible en World Wide Web: www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts132.html
- Barrios J. A., Rodríguez A., González A., Jiménez B. and Maya C. (2001) Quality of sludge generated in wastewater treatment plants in Mexico: meeting the proposed regulation. In specialised conference on sludge regulation, treatment, utilization and disposal. International Water Association (IWA)-UNAM-UAM. Acapulco, México. 54-61.
- Barrios J. A. (2003) Estabilización ácida de lodos de plantas de aguas residuales para la producción de biosólidos. Tesis de doctorado, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Batterman S. A., Mancy K. H., Wang S., Zhang L., Warila J, Lev O., Shuval H. and Fattal B. (2001) Evaluation of the efficacy of a new secondary disinfectant formulation using

hydrogen peroxide and silver and the formulation of disinfection by-products resulting from interactions with conventional disinfectants. Presented at the US EPA Research Drinking Water Progress Review, Silver Spring, February, MD, 22-23

- Beer Ch. W. (1999) Recreational water disinfection by copper/silver ions. [En línea] Clear water pool systems [Citado 30 noviembre 1999] 12. Disponible en World Wide Web: <http://www.biophysica.com/microbiology.html>
- Boletín CNI. (2003) Comportamiento ante la Legionela de las tuberías de cobre (según UNICOBRE). [En línea] Boletín CNI No. 33, Noviembre. [Citado 19 octubre 2004] Disponible en World Wide Web: <http://www.cni-instaladores.com/boletines/legionella/Bol33.2.asp>
- Brambila D. B. H., Maya R. B. y Estrada G. D. (2005) Tabla periódica de los elementos [en línea] [Citado 12 mayo 2005] Disponible en World Wide Web: <http://www.prodigyweb.net.mx/degcorp/Quimica/Plata.htm>
- Capizzi B. S. and Schwartzbrod J. (2001) Irradiation of *Ascaris ova* in sludge using an electron beam accelerator. *Water Res.*, **35**(9), 2256-2260.
- Cardoso L., Ramírez E., Escalante V., y Moeller G. (2000) Manejo de lodos residuales en México. XXVII Congreso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Porto Alegre, Brasil. Del 3 al 8 de diciembre.
- Cassells J. M. Yahya M. T., Gerba C. P. and Rose J. B. (1995) Efficacy of a combined system of copper and silver and free chlorine for inactivation of *Naegleria fowleri amoebas* in water. *Water Sci. Technol.*, **31**(5-6), 119-122.
- CDA, *Copper Development Association* (2004) Copper and human health. [En línea] A service of the Copper Development Association for the copper and brass industries in the USA [Citado 15 octubre 2004] Disponible en World Wide Web: <http://copper.org/health/homepage.html>
- CEDROSA (2004) Sulfato de cobre pentahidratado. [En línea] Información técnica [Citado 20 octubre 2004] Disponible en World Wide Web: <http://www.cedrosa.com.mx/info/S865.htm>
- Chávez A. (2004) Optimización del tratamiento primario avanzado vía distribución de tamaño de partícula. Tesis de doctorado, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, Instituto de Ingeniería, UNAM.
- CITA y CENHICA, Centro de Investigación de Tecnología Apropriada, Camaguey y Centro Nacional de Hidrología y Calidad de las Aguas, Cuba. (2002) [en línea] Evaluación de Filtros Artesanales de Cerámica Roja de Bajo Costo como Sistema de Tratamiento de Agua para Comunidades Rurales en Cuba [Citado 10 enero 2004] disponible en World Wide Web: <http://www.elfiltron.com/evaluacion1.doc>
- CNA, Comisión Nacional del Agua, (2000) Desinfección para sistemas de agua potable y saneamiento. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Subdirección General Técnica. Gerencia de Ingeniería Básica y Normas Técnicas. Junio. 31 pp.

- CNA, Comisión Nacional del Agua. (2004) Inventario nacional de plantas de tratamiento de aguas residuales." [En línea] Estudios estadísticos. Agua potable, alcantarillado y saneamiento [Citado 27 mayo 2005]. Disponible en World Wide Web: http://www.cna.gob.mx/eCNA/Espaniol/Publicaciones/InventarioNacional04/pt_general02.pdf
- Colquhoun K. O., Timms S., Maddox A. and Fricker C. R. (1995) Development of a test method for assessing inactivation of viruses by material used in domestic plumbing. *Water Sci. Technol.*, **31**(5-6), 181-184.
- Craig M. W. (2001) Coping with resistance to copper/silver disinfection. *Water Engrg. Management*, **148**(11), 25-27.
- CRC Handbook of Microbiology* (1984) Volumen VI: Growth and Metabolism. Editores: Laskin, A. I., Lechevalier, H. A., 2nd edition, CRC Press, USA, 351-352 pp.
- Davies R. L. and Etris S. F. (1997) The development and functions of silver industrial water purification and disease control. *Catalysis Today*, **36**, 107-14.
- DGSPAC, Dirección General de Salud Pública, Alimentación y Consumo (2004) Manual de mantenimiento para encargados de piscinas. Otros productos de desinfección autorizados. Alguicidas. [En línea] Consejería de Sanidad y Consumo, Comunidad de Madrid. [Citado 19 octubre 2004] Disponible en World Wide Web: http://www.madrid.org/sanidad/salud/medio_ambiente/agua/recreat/menenpis51213.htm
- Diario Oficial de las Comunidades Europeas (1998) Informe especial No. 3/98 Sobre la aplicación por parte de la Comisión de la política y la actuación de la Unión Europea en el ámbito de la contaminación de las aguas, acompañado de las respuestas de la Comisión. [En línea] Capítulo I: Aplicación de las Directivas. Directiva Lodos. C191/10. 18 de junio de 1998 [Citado 21 mayo 2005] Disponible en World Wide Web: <http://www.ucm.es/BUCM/be/legis/doce/es/main/>
- DOF, Diario Oficial de la Federación (1997) Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas residuales en agua y bienes nacionales. Publicada el lunes 6 de enero de 1997.
- DOF, Diario Oficial de la Federación (2000) Modificación a la 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. Publicada el martes 20 de junio.
- DOF, Diario Oficial de la Federación (2003) Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental.- Lodos y biosólidos.- Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Publicada el viernes 15 de agosto.
- Domek M. J., LeChevallier M. W., Cameron S. C. and McFeters G. A. (1984) Evidence for the role of copper in the injury process of coliform bacteria in drinking water. *Appl. Environ. Microbiol.*, **48**(2), 289-293.

- Domek M. J., Robbins J. E., Anderson M. E. and McFeters G. A. (1987) Metabolism of *Escherichia coli* injured by copper. *Can. J. Microbiol.*, **33**(1), 57-62.
- Europa, el portal de la Unión Europea. [En línea] [Citado 11 octubre 2005] Disponible en World Wide Web: http://europa.eu.int/index_es.htm
- Feng Q. L., Wu J. and Chen G. Q. (2000) A mechanistic study of the antibacterial effect of silver ions on *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*. John Wiley & Sons J Inc., 662-668.
- Gantzer C., Gaspard P., Gálvez L., Huyard A., Dumouthier N. and Schwartzbrod J. (2001) Monitoring of bacterial and parasitological contamination during various treatment of sludge. *Water Res.*, **35**(16), 3763-3770.
- Gaspard P., Wiart J. and Schwartzbrod J. (1997) Parasitological contamination of urban sludge used for agricultural purposes. *Waste Management Res.*, **15**, 429-436.
- Gobierno de Chile, Servicio Nacional de Aduanas (2001) Dictamen de Clasificación No. 29. [En línea] Dictamen del 23 de abril [Citado 10 octubre 2004] Disponible en World Wide Web: http://www.aduana.cl/p4_principal/antialone.html?page=http://www.aduana.cl/p4_principal/site/artic/20041014/pags/20041014092655.html
- Hansen L. D. (2003) Plata coloidal: descubriendo un nuevo producto excitante de los '90. [En línea] Los coloidales y sus usos [Citado 8 enero 2004] en World Wide Web: http://www.mantra.com.ar/contenido/zona1/frame_coloide.html
- Horan N. J., Fletcher L., Betmal S. M., Wilks S. A. and Keevil C. W. (2004) Die-off of enteric bacterial pathogens during mesophilic anaerobic digestion. *Water Res.*, **38**(5), 1113-1120.
- Iañez E. (1998) Acción de los agentes químicos sobre las bacterias. [En línea] Curso de Microbiología General [Citado 19 noviembre 2003]. Disponible en World Wide Web: http://www.ugr.es/~eianez/Microbiologia/19_Micro.htm#metal
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Censo de Población 2000. Disponible en World Wide Web: <http://www.inegi.gob.mx/>
- Iranpour R., Cox H. H. J., Kearney R. J., Clark J. H., Pincince A. B. and Daigger G. T. (2004) Regulations for biosolids land application in U.S. and European Union. *J. Residuals Sci. Technol.*, **1**(4), 209-222.
- Jeon H-J., Yi S-C. and Oh S-G. (2003) Preparation and antibacterial effects of Ag-SiO₂ thin films by sol-gel method. *Biomaterials*, **24**, 4921-4928.
- Jiménez B., Muñoz A. M. y Barrios, J. A. (1997) Estudio para fundamentar le propuesta de norma oficial mexicana en materia de tratamiento y disposición de lodos provenientes de plantas de tratamiento de agua residuales municipales. Informe final elaborado para la Comisión Nacional del Agua. Instituto de Ingeniería, UNAM. Proyecto 8313, 107 páginas.

- Jiménez B., Barrios J. A. y Garciapiña T. (1998) Apoyo para la integración del documento "Factibilidad de reúso de biosólidos provenientes de un TPA estabilizados con cal en Ciudad Juárez". Informe final elaborado para la Universidad de las Naciones Unidas. Proyecto 8386, 39 páginas.
- Jiménez B., Barrios J. A. and Maya C. (2000) Class B biosolids production from wastewater sludge with high pathogenic content generated in an advanced primary treatment. *Water Sci. Technol.*, **42**(9), 103-110.
- Jiménez B. (2001) La Contaminación Ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada. Limusa, Colegio de Ingenieros Ambientales de México, A. C., Instituto de Ingeniería de la UNAM y FEMISCA, México, 284-308 pp.
- Jiménez B., Maya C. and Salgado G. (2001) The elimination of helminth ova, faecal coliforms, *Salmonella* and protozoan cysts by various physicochemical processes in wastewater and sludge. *Water Sci. Technol.*, **43**(12), 179-182.
- Jiménez B., Maya C., Sánchez E., Romero A., Lira L. and Barrios J. A. (2002) Comparison of the quantity and quality of the microbiological content of sludge in countries with low and high content of pathogens. *Water Sci. Technol.*, **46**(10), 17-24.
- Joerger R., Klaus T., Pettersson J. and Granqvist C. G. (2000) Digestion method for silver accumulated in microorganisms. *Fresenius J. Anal. Chem.*, **366**, 311-312.
- Kawashita M., Toda S., Kim H-M., Kokubo T. and Masuda N. (2003) Preparation of antibacterial silver-doped silica glass microspheres. *J. Biomedical Materials Res.*, **66A**(2), 266-274.
- Keller R., Passamani F. R. F., Cassini S. T. and Goncalves F. R. (2004) Disinfection of sludge using lime stabilization and pasteurization in a small wastewater treatment plant. *Water Sci. Technol.*, **50**(1), 13-17.
- Kids Health for Parents* (2004) [en español] Las infecciones por gonococos [en línea] *The Nemours Foundation*, [Citado 13 enero 2004] disponible en World Wide Web: kidshealth.org/parent/en_espanol/infecciones/gonococcal_esp_p2.html - 44k - 12 Ene 2004
- Kim B. R., Anderson J. E., Mueller S. A., Gaines W. A. and Kendall A. M. (2002) Literature review –efficacy of various disinfectants against *Legionella* in water systems. *Water Res.*, **36**, 4433-4444.
- Landeen L. K., Yahya M. T. and Gerba C. P. (1989) Efficacy of copper/silver ions & reduced levels of free chlorine in inactivation of *Legionella pneumophila*. *Appl. Environ. Microbiol.*, **55**, 3045-3050.
- Lee D. J., Spinosa L., He P. J. and Chen T. B. (2005) Sludge production and management processes: case study in China. In Specialised conference on management of residues emanating from water and wastewater treatment. International Water Association (IWA). UNAM. Johannesburg, South Africa. 9-12 August.

- Lenntech (2004) Cobre (Cu). Propiedades químicas y efectos sobre la salud y el medio ambiente. [En línea] Lenntech agua residual & purificación del aire Holding B. V. [Citado 19 octubre 2004] Disponible en World Wide Web: <http://www.lenntech.com/espanol/tabla-peiodica/Cu.htm>
- Lin Y-S. E., Vidic R. D., Stout J. E. and Yu V. L. (1996) Individual and combined effects of copper and silver ions on inactivation of *Legionella pneumophila*. *Water Res.*, **30**(8), 1905-1913.
- Lin Y-S. E., Vidic R. D., Stout J. E., McCartney C. A. and Yu V. L. (1998) Inactivation of *Mycobacterium avium* by copper and silver ions. *Water Res.*, **32**(7), 1997-2000.
- Luque I., López G., Tarradas C., Borge C., Arenas A., Maldonado A., Astorga R., Huerta B. y Perea A. (2003) Sensibilidad in vitro de cepas de *Streptococcus suis* frente a diferentes desinfectantes y antisépticos. [En línea] Departamento de Sanidad Animal. Facultad de Veterinaria de Córdoba. [Citado 8 enero 2004] Disponible en World Wide Web: <http://www.exopol.com>
- Martínez M. E. (2003) Desinfección de efluentes secundarios mediante la ionización de plata y cobre para su reutilización en sistemas de enfriamiento. Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, Campus Morelos, Tesis de Maestría en Ingeniería, 11-83 pp.
- Mateos P. F. (2004) Control de las poblaciones microbianas: esterilización y desinfección. [En línea] Departamento de Microbiología y Genética. Facultad de Farmacia. Universidad de Salamanca. [Citado 10 octubre 2004] Disponible en World Wide Web: <http://www.atl-gestion.com/Asepsia%20y%20desinfeccion.htm>
- Méndez J. M., Jiménez B. E. and Barrios J. A. (2002) Improved alkaline stabilization of municipal wastewater sludge. *Water Sci. Technol.*, **46**(10), 139-146.
- Méndez J. (2003) Efecto del amoníaco en la estabilización alcalinas de lodos. Tesis de doctorado, Programa de Maestría y Doctorado, Instituto de Ingeniería, UNAM, 13-14.
- Metcalf & Eddy, Inc. (1991) Wastewater Engineering. Treatment, disposal and reuse. 3rd Edition, McGraw-Hill Publishing Company, USA. 765,766 pp.
- Metcalf & Eddy, Inc. (2003) Wastewater Engineering. Treatment and reuse. 4th Edition, McGraw-Hill, USA. 1447-1465, 1485 pp.
- Mignotte B., Gantzer C. and Schwartzbrod L. (2002) Evaluation of bacteriophages during the treatment of sludge. *Water Sci. Technol.*, **46**(10), 189-194.
- Mijaylova P. N., Moeller G. C., Ramírez E. C. and Cardoso L. V. (2002) Characterization and dewaterability and stabilized sludge using different treatment methods. *Water Sci. Technol.*, **46**(10), 123-130.

- Mocé L. L., Muniesa M., Pimenta V. H., Lucena F. and Jofre J. (2003) Survival of bacterial indicator species and bacteriophages after thermal treatment of sludge and sewage. *Appl. Environ. Microbiol.*, **69**(3), 1452-1456.
- Moeller G. and Torres L. G. (1997) Rheological characterization of primary and secondary sludges treated by both aerobic and anaerobic digestion. *Bioresource Technol.*, **61**(3), 207-211.
- Moeller G. C. and González S. M. (2002) Two combined techniques to enhance anaerobic digestion of sludge. *Water Sci. Technol.*, **46**(10), 167-172.
- MWH, Montgomery Watson Harza, Firm (2005) Water treatment. Principles and design 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc. USA. 1042-1061, 1136, 1661 pp.
- Myshkin A. E. and Khromova V. S. (2003) Peculiar features of the aggregation effect of silver (I) ion on hemoglobin. *Biochimica et Biophysica Acta*, **1651**, 124-129.
- National Research Council (1980) Drinking water and health. Chapter II: The Disinfection of Drinking Water. Volume 2. USA. 102-106 pp.
- Oleszkiewicz J. A. and Mavinic D. S. (2002) Wastewater biosolids: an overview of processing, treatment, and management. *J. Environ. Eng. Sci.* **1**, 75-88.
- Organización Médica Colegial de España (2000) Diccionario Ilustrado de Términos Médicos. [En línea] Mediciclopedia, [Citado 13 enero 2004]. Disponible en World Wide Web: <http://www.iqb.es/Diccio/G/Go.htm>
- Park S-J. and Jang Y-S. (2003) Preparation and characterization of activated carbon fibers supported with silver metal for antibacterial behaviour. *J. Colloid Interface Sci.*, **261**, 238-243.
- Pedahzur R., Lev O., Fattal B. and Shuval H. I. (1995) The interaction of silver ions and hydrogen peroxide in the inactivation of *E. coli*: a preliminary evaluation of a new long acting residual drinking water disinfectant. *Water Sci. Technol.*, **31**(5-6), 123-129.
- Pedahzur R., Shuval H. I. and Ulitzur S. (1997) Silver and hydrogen peroxide as potential drinking water disinfectants: their bactericidal effects and possible modes of action. *Water Sci. Technol.*, **35**(11-12), 87-93.
- Pedahzur R., Katezenelson D., Barnea N., Le O., Shuval H. I., Fattal B. and Ulitzur S. (2000) The Efficacy of long-lasting residual drinking water disinfectants based on hydrogen peroxide and silver. *Water Sci. Technol.*, **42**, 293-298.
- Pelczar Jr. M. J., Reid R. D. and Chan E. C. S. (1982) Microbiología. 2a edición en español, McGraw-Hill, México, 395-397 y 790 pp.
- Pelkonen K. H. O., Heinonen-Tanski H. and Hänninen O. O. P. (2003) Accumulation of silver from drinking water into cerebellum and musculus soleus in mice. *Toxicology*, **186**, 151-157.

Prevención de riesgos laborales (2004) Fungicidas. [En línea] Glosario. [Citado 19 octubre 2004] Disponible en World Wide Web: <http://www.balearweb.net/abtprl/GLOSARIO/FUNGICIDAS.htm>

Química del Sur (2004) Sulfato de cobre. [En línea] [Citado 20 octubre 2004] Disponible en World Wide Web: <http://www.quimicadelsur.cl/sulfato%20de%20cobre.htm>

Real Academia Española (2001) Diccionario de la Lengua Española. [En línea] Vigésima segunda edición [Citado 24 septiembre 2004] disponible en World Wide Web: <http://www.rae.es>

Referencia 1, 2004.

Referencia 2, 2005.

Referencia 3, 2004.

Referencia 4, 2003.

Referencia 5, 2003.

Referencia 6, 2005.

Referencia 7, 2005.

Referencia 8, 1997.

Referencia 9, 2004.

Referencia 10, 1992.

Referencia 11, 1992.

Referencia 12, 1998.

Referencia 13, 1989.

Referencia 14, 1984.

Referencia 15, 1987.

Referencia 16, 2001.

Referencia 17, 2004.

Reimers R. S., Mcdonell D. B., Little M. D., Bowman D. D., Englande S. J. and Henriques W. D. (1986) Effectiveness of wastewater sludge treatment processes to inactivate parasites. *Water Sci. Technol.*, **18**, 397-405.

Rivera G. M., Olguin M. T., García S. I., Alcántara D. and Rodríguez F. G. (2000) Silver supported on natural mexican zeolite as an antibacterial material. **39**, 431-444.

- Rohr U., Weber S., Selenka F. and Wilhelm M. (2000) Impact of silver and copper on the survival of amoebae and ciliated protozoa in vitro. *Int. J. Hyg. Environ. Health*, **203**, 87-89.
- Roseman J. H. (2004) Innovative methods in wastewater disinfection. [En línea] Markel Corporation. Aqua ion plus technologies. [Citado 21 octubre 2005] Disponible en World Wide Web: <http://www.markelcorporation.com/new5.html>
- Silver S. (2003) Bacterial silver resistance: molecular biology and uses and misuses of silver compounds. *FEMS Microbiol. Reviews.*, **27**, 341-353.
- SMA (2005) Secretaría del Medio Ambiente. Manejo ambiental de los residuos provenientes de desazolve del sistema de drenaje del Distrito Federal y de las presas, así como de plantas de tratamiento de aguas residuales. Gobierno del Distrito Federal, Secretaría del Medio Ambiente, Dirección de proyectos de agua, suelo y residuos.
- Snyman H. G., Terblanch J. S. and Van der Westhuizen J. L. (1999) Management of land disposal and agricultural reuse of sewage sludge within the framework of the current South African guidelines. Proceedings of the IAWQ Specialized Conference on disposal and utilization of sewage sludge: treatment methods and application modalities. *International Association on Water Quality*. Atenas, Grecia, 39-39 pp.
- Straub T. M., Gerba C. P., Zhou X., Price R. and Yahya M. T. (1995) Synergistic inactivation of *Escherichia coli* and MS-2 coliphage by chloramines and cupric chloride. *Water Res.*, **29**(3), 811-818.
- The Nutrition Farm* (2004) [En línea] Argentia®. USA [Citado 19 octubre 2005] Disponible en World Wide Web: <http://nutritionfarm.com/products/PRODUCTS/ARGENTIA.HTM>
- Timms S., Colquhoun K. O. Slade J. and Fricker C. R. (1995) Domestic plumbing materials and their effect on viruses. *Water Sci. Technol.* **32**(1), I-III.
- Umbreit W. W. (1962) Modern Microbiology. W. H. Freeman and Company, USA, 239-240 pp.
- US EPA (1993) Standards for the use and disposal of sewage sludge, 40 CFR Part 503. Final rules. *Fed. Register* **58**, 9248-9415.
- US EPA (1999) Biosolids generation, use, and disposal in the United States. Office of Solid Waste. EPA-530-R-99-009.
- US EPA (2002a) List of drinking water contaminants and maximum contaminant levels. [En línea] National Primary Drinking Water Regulations [Citado 10 febrero 2005] Disponible en World Wide Web: <http://www.epa.gov/safewater/mcl.html#mcls>
- US EPA (2002b) Implementation guidance for ambient water quality criteria for bacteria. [En línea] Office of Water (4305T) EPA-823-B-02-003 [Citado 10 febrero 2005] Disponible en World Wide Web: <http://www.epa.gov/waterscience/standards/bacteria/bacteria.pdf>

- Wang J., Huang C. P. and Pirestani D. (2003) Interactions of silver with wastewater constituents. *Water Res.*, **37**, 4444-4452.
- Webster's Concise Encyclopedia* (1996) Definition of silver. Interactive Encyclopedia multimedia.
- Webster's Online Dictionary* (2004) [en línea] The Rosetta Edition, Specialty Definition: Argyria [Citado 25 junio 2004]. Disponible en World Wide Web: <http://www.websters-online-dictionary.org/definition/english/ar/argyria.html>
- WEF, Water Environment Federation (1996) Wastewater disinfection. Manual of practice FD-10. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data. USA. 48-59 pp.
- WEF and ASCE, Water Environment Federation and American Society of Civil Engineers (1998) Design of municipal wastewater treatment plants. WEF Manual of practice 8. ASCE Manual and report on engineering practice No. 76. Chapter 17: Introduction to solids management and Chapter 22: Stabilization. Volume 3. 4th Edition, Library of Congress Cataloging-in-Publication Data. USA. 17-1 a 17-37 y 22-1 a 22-226 pp.
- Wikipedia (2001) La enciclopedia libre. [En línea] En español. [Citado 8 enero 2004] Disponible en World Wide Web: <http://es.wikipedia.org/wiki/Portada>
- Yahya M. T., Landeen L. K., Mavia C., Messina S. M., Kutz R. S. and Gerba C. P. (1990) Disinfection of bacteria in water systems by using electrolytically generated copper, silver and reduced levels of free chlorine. *Can. J. Microbiol.*, **36**, 109-116.
- Yahya M. T., Straub T. M. and Gerba C. P. (1992) Inactivation of coliphage MS-2 and poliovirus by copper, silver and chlorine. *Can. J. Microbiol.*, **38**, 430-435.
- Yi Y., Wang Y. and Liu H. (2003) Preparation of new crosslinked chitosan with crown ether and their adsorption for silver ion for antibacterial activities. *Carbohydrate Polymers*, **53**, 425-430.
- Yu D-G., Teng M-Y., Chou W-L. and Yang M-C. (2003) Characterization and inhibitory effect of antibacterial PAN-based hollow fiber loaded with silver nitrate. *J. Membrane Sci.*, **225**(1-2), 115-123.
- Zábranská J., Dohányos M., Jeníček P., Růžičková H. and Vránová A. (2003) Efficiency of autothermal thermophilic aerobic digestion and thermophilic anaerobic digestion of municipal wastewater sludge in removing *Salmonella* spp. and indicator bacteria. *Water Sci. Technol.*, **47**(7), 151-156.

ANEXO I: ANÁLISIS ESTADÍSTICO

I.1 Análisis estadístico de los resultados obtenidos en la etapa de inactivación de altas concentraciones de coliformes fecales y huevos de helmintos con plata

I.1.1 Coliformes fecales

El análisis estadístico se realizó a partir de las siguientes hipótesis.

$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_i = 0$ es decir, los efectos de la dosis de plata y el tiempo de contacto (tratamientos) en los coliformes fecales (variable de respuesta) contenidos en el lodo fisicoquímico son estadísticamente nulos (iguales a cero).

$H_A: \tau_i \neq 0$ para algún i , es decir, al menos un efecto de la aplicación de los tratamientos es diferente de cero.

Para determinar estadísticamente si hubo efectos en el contenido de coliformes fecales en el lodo fisicoquímico por la aplicación de las dosis de plata y los tiempos de contacto, se hizo el análisis de variancia (ANOVA; Tabla I.1). De la tabla se puede observar (valores de la media cuadrática y F) que existen diferencias en el contenido de coliformes fecales, principalmente debido a la dosis de plata y, en menor grado, al tiempo de contacto y a la interacción de ambos factores (dosis y tiempo de contacto). El valor de significación en todos los casos es menor que 0.05, lo cual indica que al menos hay un par de tratamientos que son diferentes entre sí. De tal manera que, la hipótesis nula, se rechaza y para verificar cuáles son los tratamientos que son diferentes, se aplicó una comparación de medias con respecto a la dosis de plata (Tabla I.2) y otra con respecto al tiempo de contacto (Tabla I.3). En el caso de la comparación de medias con base en la dosis de plata (Tabla I.2), se obtuvo una significación menor que 0.05, lo cual implica un cambio significativo en los coliformes fecales debido a la dosis de plata. Por el contrario, en la comparación de medias con respecto al tiempo de contacto, se obtuvo una significación mucho mayor que 0.05 lo que indica que no hay efectos en el contenido de coliformes fecales debidos al tiempo de contacto.

Tabla I.1 Análisis de variancia de los resultados de la evaluación del efecto de la plata en coliformes fecales

Pruebas de los efectos inter-sujetos

Fuente	Suma de cuadrados tipo III	Grados de libertad	Media cuadrática	F	Significación
Modelo corregido	55.234 ^(a)	11	5.021	44.116	0.000
Intersección	63.148	1	63.148	554.799	0.000
Dosis	46.844	1	46.844	411.561	0.000
Tiempo	5.420	5	1.084	9.523	0.001
Dosis * Tiempo	2.970	5	0.594	5.219	0.009
Error	1.366	12	0.114		
Total	119.748	24			
Total corregida	56.600	23			

^a R cuadrada = 0.976 (R cuadrada corregida = 0.954)

Tabla I.2 Comparación de medias de los resultados de la evaluación del efecto de la dosis de plata en coliformes fecales

		Suma de cuadrados	gl ^a	Media cuadrática	F	Significación
Coliformes fecales * Dosis de plata	Entre grupos (combinados)	46.844	1	46.844	105.637	0.000
	Dentro de grupos	9.756	22	0.443		
	Total	56.600	23			

^a gl: grados de libertad

Tabla I.3 Comparación de medias de los resultados de la evaluación del efecto del tiempo de contacto en coliformes fecales

		Suma de cuadrados	gl ^a	Media cuadrática	F	Significación
Coliformes fecales * Tiempo de contacto	Entre grupos (combinados)	5.420	5	1.084	0.381	0.855
	Dentro de grupos	51.180	18	2.843		
	Total	56.600	23			

^a gl: grados de libertad

I.1.2 Huevos de helmintos

El análisis estadístico se realizó a partir de las siguientes hipótesis.

$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_i = 0$ es decir, los efectos de las dosis de plata (tratamientos) en el contenido de huevos de helmintos (variable de respuesta) del lodo fisicoquímico son estadísticamente nulos (iguales a cero).

$H_A: \tau_i \neq 0$ para algún i , es decir, al menos un efecto de la aplicación de los tratamientos es diferente de cero.

Para determinar estadísticamente si hubo efectos significativos en el contenido de huevos de helmintos por las dosis de plata aplicadas al lodo, se hizo un análisis de variancia de los resultados obtenidos (Tabla I.4). Se puede observar que para los huevos de helmintos viables y totales, la significación es menor que 0.05, por lo que el valor de la F cae en zona de rechazo y entonces la hipótesis nula no se acepta, esto es que al menos dos tratamientos son diferentes entre sí. Para determinar cuáles son los tratamientos que son diferentes, se hizo la prueba t de Dunnett de dos colas (Tabla I.5). Se encontró que todos los tratamientos (dosis de plata aplicadas) tuvieron un efecto significativo en el contenido de huevos de helmintos viables y totales con respecto al lodo crudo.

Tabla I.4 Análisis de variancia de los resultados de la evaluación del efecto de la plata en huevos de helmintos

		Suma de cuadrados	gl*	Media cuadrática	F	Significación
Huevos de helmintos viables	Entre grupos	18825.333	2	9412.667	96.048	0.002
	Dentro de grupos	294.000	3	98.000		
	Total	19119.333	5			
Huevos de helmintos totales	Entre grupos	3988.000	2	1994.000	20.347	0.018
	Dentro de grupos	294.000	3	98.000		
	Total	4282.000	5			

*gl: grados de libertad

Tabla I.5 Prueba t de Dunnett (2-colas) de los resultados de la evaluación del efecto de la plata en huevos de helmintos

Variable dependiente	(I) Dosis de plata	(J) Dosis de plata	Diferencia entre medias (I-J)	Error estándar	Significación	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
Huevos de helmintos viables	30	0	-103.000(*)	9.899	0.003	-141.28	-64.72
	40	0	-130.000(*)	9.899	0.002	-168.28	-91.72
Huevos de helmintos totales	30	0	-49.000(*)	9.899	0.026	-87.28	-10.72
	40	0	-59.000(*)	9.899	0.016	-97.28	-20.72

* La diferencia de medias es significativa al nivel 0.05.

^a La prueba t de Dunnett considera a uno de los grupos como control, y compara al resto contra él.

I.2 Análisis estadístico de los resultados obtenidos en la etapa de la combinación de la plata con otros compuestos para obtener un efecto sinérgico

I.2.1 Plata-cobre

- *Coliformes fecales*

El análisis estadístico se realizó a partir de las siguientes hipótesis.

$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_i = 0$ es decir, los efectos de las dosis de plata-cobre (tratamientos) en los coliformes fecales (variable de respuesta) del lodo fisicoquímico son estadísticamente nulos (iguales a cero).

$H_A: \tau_i \neq 0$ para algún i , es decir, al menos un efecto de la aplicación de los tratamientos es diferente de cero.

En la Tabla I.6 se presenta el análisis de variancia que se hizo para determinar la existencia de algún cambio significativo en el contenido de coliformes fecales debido a la aplicación de varias dosis de la combinación plata-cobre al lodo fisicoquímico. El valor de significación es menor que 0.05, lo que indica que la hipótesis nula se rechaza puesto que al menos dos tratamientos son diferentes entre sí. Al igual que en los casos anteriores, se aplicó la prueba t de Dunnett (Tabla I.7) para encontrar los tratamientos que son diferentes. Se puede

observar que todos los tratamientos (dosis de plata-cobre) causaron un cambio significativo en el contenido de coliformes fecales con respecto al lodo crudo.

Tabla I.6 Análisis de variancia de los resultados de la evaluación del efecto de la combinación plata-cobre en coliformes fecales

	Suma de cuadrados	gl*	Media cuadrática	F	Significación
Entre grupos	106.834	6	17.806	88.284	0.000
Dentro de grupos	1.412	7	0.202		
Total	108.246	13			

* gl: grados de libertad

Tabla I.7 Prueba t de Dunnett (2-colas) de los resultados de la evaluación del efecto de la combinación plata-cobre en coliformes fecales

(I) Dosis de plata-cobre	(J) Dosis de plata-cobre	Diferencia entre medias (I-J)	Error estándar	Significación	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
250	0	-4.19000(*)	0.44909	0.000	-5.6859	-2.6941
1000	0	-5.81000(*)	0.44909	0.000	-7.3059	-4.3141
4000	0	-7.88000(*)	0.44909	0.000	-9.3759	-6.3841
9000	0	-7.88000(*)	0.44909	0.000	-9.3759	-6.3841
16000	0	-7.88000(*)	0.44909	0.000	-9.3759	-6.3841
36000	0	-7.88000(*)	0.44909	0.000	-9.3759	-6.3841

* La diferencia entre medias es significativa a un nivel de 0.05.

^a La prueba t de Dunnett considera a un grupo como control, y compara al resto de los grupos con respecto a él.

- **Huevos de helmintos**

El análisis estadístico se realizó a partir de las siguientes hipótesis.

$H_0: T_1=T_2=\dots=T_i=0$ es decir, los efectos de las dosis de plata-cobre (tratamientos) en el contenido de huevos de helmintos (variable de respuesta) del lodo fisicoquímico son estadísticamente nulos (iguales a cero).

$H_A: T_i \neq 0$ para algún i , es decir, al menos un efecto de la aplicación de los tratamientos es diferente de cero.

En la Tabla I.8 se presenta el análisis de variancia que se hizo para observar la existencia de algún cambio significativo en el contenido de huevos de helmintos por la aplicación de diferentes dosis de la combinación plata-cobre (tratamientos) al lodo. El valor de la significación (menor que 0.05) indica que al menos un par de tratamientos son diferentes, por lo que la hipótesis nula se rechaza. La prueba t de Dunnett (Tabla I.9) indica que todos los tratamientos aplicados (dosis de plata-cobre) provocaron un cambio significativo en el contenido de huevos de helmintos viables y totales con respecto al lodo crudo.

Tabla I.8 Análisis de variancia de los resultados de la evaluación el efecto de la combinación plata-cobre en huevos de helmintos

		Suma de cuadrados	gl*	Media cuadrática	F	Significación
Huevos de helmintos viables	Entre grupos	31794.667	5	6358.933	64.887	0.000
	Dentro de grupos	588.000	6	98.000		
	Total	32382.667	11			
Huevos de helmintos totales	Entre grupos	10117.667	5	2023.533	20.648	0.001
	Dentro de grupos	588.000	6	98.000		
	Total	10705.667	11			

* gl: grados de libertad

Tabla I.9 Prueba t de Dunnett (2-colas) de los resultados de la evaluación del efecto de la combinación plata-cobre en huevos de helmintos

Variable dependiente	(I) Dosis de plata-cobre	(J) Dosis de plata-cobre	Diferencia entre medias (I-J)	Error estándar	Significación	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
Huevos de helmintos viables	1000	0	-61.000(*)	9.899	0.003	-94.54	-27.46
	4000	0	-93.000(*)	9.899	0.000	-126.54	-59.46
	9000	0	-112.000(*)	9.899	0.000	-145.54	-78.46
	16000	0	-143.000(*)	9.899	0.000	-176.54	-109.46
	36000	0	-151.000(*)	9.899	0.000	-184.54	-117.46
Huevos de helmintos totales	1000	0	-50.000(*)	9.899	0.008	-83.54	-16.46
	4000	0	-63.000(*)	9.899	0.003	-96.54	-29.46
	9000	0	-70.000(*)	9.899	0.001	-103.54	-36.46
	16000	0	-83.000(*)	9.899	0.001	-116.54	-49.46
	36000	0	-87.000(*)	9.899	0.000	-120.54	-53.46

* La diferencia entre medias es significativa a un nivel de 0.05.

^a La prueba t de Dunnett considera a un grupo como control, y compara al resto de los grupos con respecto a él.

I.2.2 Plata-agente sinérgico

- *Coliformes fecales*

El análisis estadístico se realizó a partir de las siguientes hipótesis.

$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_i = 0$ es decir, los efectos de las dosis de plata-agente sinérgico (tratamientos) en los coliformes fecales (variable de respuesta) del lodo fisicoquímico son estadísticamente nulos (iguales a cero).

$H_A: \tau_i \neq 0$ para algún i , es decir, al menos un efecto de la aplicación de los tratamientos es diferente de cero.

Para determinar estadísticamente la existencia de un cambio significativo en el contenido de coliformes fecales debido a la aplicación de las dosis de plata-agente sinérgico (tratamientos) se hizo un análisis de variancia que se presenta en la Tabla I.10. El valor de la significación (menor que 0.05) indica que por lo menos un par de tratamientos es diferente, por lo tanto se rechaza la hipótesis nula de que los efectos de los tratamientos son nulos. De la prueba t de Dunnett (Tabla I.11) se puede observar que todos los tratamientos, con excepción de uno (la dosis más baja que corresponde a 5:1.3 mg Ag-AS/g ST), tuvieron un efecto significativo en el contenido de coliformes fecales con respecto al lodo crudo.

Tabla I.10 Análisis de variancia de los resultados de la evaluación del efecto de la combinación plata-agente sinérgico en coliformes fecales

	Suma de cuadrados	gl*	Media cuadrática	F	Significación
Entre grupos	119.080	6	19.847	35.455	0.000
Dentro de grupos	3.918	7	0.560		
Total	122.998	13			

* gl: grados de libertad

Tabla I.11 Prueba t de Dunnett (2-colas) de los resultados para evaluar el efecto de la combinación plata-agente sinérgico en coliformes fecales

(I) Dosis de plata-agente sinérgico	(J) Dosis de plata-agente sinérgico	Diferencia entre media (I-J)	Error estándar	Significación	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
7	0	-1.71000	0.74818	0.199	-4.2022	0.7822
40	0	-4.77000(*)	0.74818	0.002	-7.2622	-2.2778
160	0	-4.99000(*)	0.74818	0.001	-7.4822	-2.4978
399	0	-7.66000(*)	0.74818	0.000	-10.1522	-5.1678
640	0	-7.88000(*)	0.74818	0.000	-10.3722	-5.3878
1440	0	-7.88000(*)	0.74818	0.000	-10.3722	-5.3878

* La diferencia entre medias es significativa a un nivel de 0.05.

^a La prueba t de Dunnett considera a un grupo como control, y compara al resto de los grupos con respecto a él.

- **Huevos de helmintos**

El análisis estadístico se realizó a partir de las siguientes hipótesis.

$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_i = 0$ es decir, los efectos de las dosis de plata-agente sinérgico (tratamientos) en el contenido de huevos de helmintos (variable de respuesta) del lodo fisicoquímico son estadísticamente nulos (iguales a cero).

$H_A: \tau_i \neq 0$ para algún i , es decir, al menos un efecto de la aplicación de los tratamientos es diferente de cero.

En la Tabla I.12 se presenta el análisis de variancia que se hizo para determinar estadísticamente la existencia de un efecto significativo en el contenido de huevos de helmintos debido a las dosis de plata-agente sinérgico aplicadas al lodo. De acuerdo con el valor de la significación (menor que 0.05), es claro que la hipótesis nula se rechaza puesto que hay, al menos, un par de tratamientos que son diferentes entre sí. Asimismo, con base en los resultados de la prueba t de Dunnett (Tabla I.13) todos los tratamientos (dosis de plata-agente sinérgico) aplicados tuvieron un efecto significativo en los huevos de helmintos viables. En cuanto a los huevos de helmintos totales, sólo dos tratamientos tuvieron efecto significativo, que fueron las dosis más elevadas que se aplicaron (40:16 y 60:24 mg Ag-AS/g ST).

Tabla I.12 Análisis de variancia de los resultados de la evaluación del efecto de la combinación plata-agente sinérgico en huevos de helmintos

		Suma de cuadrados	gl*	Media cuadrática	F	Significación
Huevos de helmintos viables	Entre grupos	44546.400	4	11136.600	113.639	0.000
	Dentro de grupos	490.000	5	98.000		
	Total	45036.400	9			
Huevos de helmintos totales	Entre grupos	23525.600	4	5881.400	60.014	0.000
	Dentro de grupos	490.000	5	98.000		
	Total	24015.600	9			

* gl: grados de libertad

Tabla I.13 Prueba t de Dunnett (2-colas) de los resultados de la evaluación del efecto de la combinación plata-agente sinérgico en huevos de helmintos

Variable dependiente	(I) Dosis de plata-agente sinérgico	(J) Dosis de plata-agente sinérgico	Diferencia entre medias (I-J)	Error estándar	Significación	Intervalo de confianza al 95%		
						Límite inferior	Límite superior	
Huevos de helmintos viables	160	0	-95.000(*)	9.899	0.001	-129.41	-60.59	
	399	0	-	9.899	0.000	-157.41	-88.59	
	640	0	123.000(*)	-	9.899	0.000	-202.41	-133.59
	1440	0	168.000(*)	-	9.899	0.000	-225.41	-156.59
				191.000(*)	-	9.899	0.000	-225.41
Huevos de helmintos totales	160	0	-25.000	9.899	0.141	-59.41	9.41	
	399	0	-21.000	9.899	0.225	-55.41	13.41	
	640	0	-92.000(*)	9.899	0.001	-126.41	-57.59	
	1440	0	-	9.899	0.000	-162.41	-93.59	
				128.000(*)	-	9.899	0.000	-162.41

* La diferencia entre medias es significativa a un nivel de 0.05.

^a La prueba t de Dunnett considera a un grupo como control, y compara al resto de los grupos con respecto a él.

I.2.3 Plata-cobre-agente sinérgico

- *Coliformes fecales*

El análisis estadístico se realizó a partir de las siguientes hipótesis.

H_0 : $T_1=T_2=\dots=T_i=0$ es decir, los efectos de las dosis de plata-cobre-agente sinérgico (tratamientos) en los coliformes fecales (variable de respuesta) del lodo fisicoquímico son estadísticamente nulos (iguales a cero).

$H_A: T_i \neq 0$ para algún i , es decir, al menos un efecto de la aplicación de los tratamientos es diferente de cero.

El análisis de variancia (Tabla I.14) hecho para determinar estadísticamente la existencia de algún cambio significativo en el contenido de coliformes fecales debido a la aplicación de las dosis de plata-cobre-agente sinérgico, indica que, de acuerdo con el valor de la significación (menor que 0.05), hay al menos un par de tratamientos que son diferentes entre sí. La prueba t de Dunnett (Tabla I.15) señala que todos los tratamientos aplicados provocaron un cambio significativo en el contenido de coliformes fecales con respecto al lodo crudo, por lo que la hipótesis nula se rechaza. Esto demuestra que la combinación plata-cobre-agente sinérgico tiene un efecto desinfectante sobre los coliformes fecales contenidos en el lodo fisicoquímico.

Tabla I.14 Análisis de variancia de los resultados de la evaluación del efecto de la combinación plata-cobre-agente sinérgico en coliformes fecales

	Suma de cuadrados	gl*	Media cuadrática	F	Significación
Entre grupos	111.322	6	18.554	367.650	0.000
Dentro de grupos	0.656	13	0.050		
Total	111.978	19			

* gl: grados de libertad

Tabla I.15 Prueba t de Dunnett (2-colas) de los resultados de la evaluación del efecto de la combinación plata-cobre-agente sinérgico en coliformes fecales

(I) Dosis de plata-cobre-agente sinérgico	(J) Dosis de plata-cobre-agente sinérgico	Diferencia entre media (I-J)	Error estándar	Significación	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
2000	0	-6.28500(*)	0.22465	0.000	-6.9378	-5.6322
3325	0	-7.88000(*)	0.22465	0.000	-8.5328	-7.2272
4000	0	-7.88000(*)	0.18342	0.000	-8.4130	-7.3470
8000	0	-7.88000(*)	0.19455	0.000	-8.4453	-7.3147
16000	0	-7.88000(*)	0.22465	0.000	-8.5328	-7.2272
32000	0	-7.88000(*)	0.22465	0.000	-8.5328	-7.2272

* La diferencia entre medias es significativa a un nivel de 0.05.

^a La prueba t de Dunnett considera a un grupo como control, y compara al resto de los grupos con respecto a él.

- **Huevos de helmintos**

El análisis estadístico se realizó a partir de las siguientes hipótesis.

H_0 : $\tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_i = 0$ es decir, los efectos de las dosis de plata-cobre-agente sinérgico (tratamientos) en el contenido de huevos de helmintos (variable de respuesta) del lodo fisicoquímico son estadísticamente nulos (iguales a cero).

H_A : $\tau_i \neq 0$ para algún i , es decir, al menos un efecto de la aplicación de los tratamientos es diferente de cero.

En la Tabla I.16 se presenta el análisis de variancia realizado para determinar la existencia de un cambio estadísticamente significativo en el contenido de huevos de helmintos viables y totales debido a la aplicación de las dosis de plata-cobre-agente sinérgico. El valor de la significación (menor que 0.05) indica que por lo menos un par de tratamientos son diferentes entre sí. De tal manera que, se rechaza la hipótesis nula de que los efectos de los tratamientos son nulos. Los resultados de la prueba t de Dunnett se muestran en la Tabla I.17. Es notable que todos los tratamientos provocaron un efecto significativo, con respecto al lodo crudo, en el contenido de huevos de helmintos viables y totales, con excepción de uno (dosis 5:100:4 mg Ag-Cu-AS/g ST) para los huevos de helmintos totales. Estos resultados indican un efecto desinfectante de la combinación plata-cobre-agente sinérgico en cuanto a huevos de helmintos se refiere.

Tabla I.16 Análisis de variancia de los resultados de la evaluación del efecto de la combinación plata-cobre-agente sinérgico en huevos de helmintos

		Suma de cuadrados	gl*	Media cuadrática	F	Significación
Huevos de helmintos viables	Entre grupos	77239.800	6	12873.300	46.920	0.000
	Dentro de grupos	3566.750	13	274.365		
	Total	80806.550	19			
Huevos de helmintos totales	Entre grupos	89056.800	6	14842.800	14.943	0.000
	Dentro de grupos	12913.000	13	993.308		
	Total	101969.800	19			

* gl: grados de libertad

Tabla I.17 Prueba t de Dunnett (2-colas) de los resultados de la evaluación del efecto de la combinación plata-cobre-agente sinérgico en huevos de helmintos

Variable dependiente	(I) Dosis de plata-cobre-agente sinérgico	(J) Dosis de plata-cobre-agente sinérgico	Diferencia entre medias (I-J)	Error estándar	Significación	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
Huevos de helmintos viables	2000	0	-140.000(*)	16.564	0.000	-188.13	-91.87
	3325	0	-215.000(*)	16.564	0.000	-263.13	-166.87
	4000	0	-182.000(*)	13.524	0.000	-221.30	-142.70
	8000	0	-205.250(*)	14.345	0.000	-246.93	-163.57
	16000	0	-215.000(*)	16.564	0.000	-263.13	-166.87
	32000	0	-215.000(*)	16.564	0.000	-263.13	-166.87
Huevos de helmintos totales	2000	0	-8.000	31.517	1.000	-99.58	83.58
	3325	0	-192.000(*)	31.517	0.000	-283.58	-100.42
	4000	0	-88.000(*)	25.733	0.020	-162.77	-13.23
	8000	0	-141.500(*)	27.294	0.001	-220.81	-62.19
	16000	0	-182.000(*)	31.517	0.000	-273.58	-90.42
	32000	0	-192.000(*)	31.517	0.000	-283.58	-100.42

* La diferencia entre medias es significativa a un nivel de 0.05.

^a La prueba t de Dunnett considera a un grupo como control, y compara al resto de los grupos con respecto a él.

I.3 Análisis estadístico de los resultados obtenidos en la etapa de los estudios de recrecimiento

Es importante mencionar que para esta etapa no se analizaron los resultados de las dosis que redujeron el contenido de coliformes fecales por debajo del límite de detección (<3 NMP/g ST) puesto que éstos no sufrieron ningún cambio durante las 72 h que duró el estudio, en presencia o ausencia de luz.

El análisis estadístico se realizó a partir de las siguientes hipótesis.

$H_0: T_1 = T_2 = \dots = T_i = 0$ es decir, los efectos de la exposición del lodo desinfectado a la presencia y ausencia de luz durante 72 horas (tratamientos) sobre los coliformes fecales (variable de respuesta) son estadísticamente nulos (iguales a cero).

$H_A: T_i \neq 0$ para algún i , es decir, al menos un efecto de la aplicación de los tratamientos es diferente de cero.

Los correspondientes análisis de variancia de los resultados del recrecimiento de las muestras de lodo desinfectado con 20 mg Ag/g ST (Tabla I.18), 20:8 mg Ag-AS/g ST (Tabla I.19) y 5:100:4 mg Ag-Cu-AS/g ST (Tabla I.20), indican que no hay cambio significativo en el contenido de coliformes fecales después de 72 h en presencia o ausencia de luz, puesto que el valor de la significación es mayor que 0.05. De esta manera la hipótesis nula de que los efectos de los tratamientos son nulos se acepta. Esto indica que no hay recrecimiento de coliformes fecales para las condiciones analizadas, debido a un efecto desinfectante residual de la plata, plata-agente sinérgico y plata-cobre-agente sinérgico.

Tabla I.18 Análisis de variancia de los resultados del estudio de recrecimiento de coliformes fecales de lodo desinfectado con 20 mg Ag/g ST

	Suma de cuadrados	gl*	Media cuadrática	F	Significación
Entre grupos	0.059	2	0.030	0.108	0.901
Dentro de grupos	0.822	3	0.274		
Total	0.881	5			

* gl: grados de libertad

Tabla I.19 Análisis de variancia de los resultados del estudio de recrecimiento de coliformes fecales de lodo desinfectado con 20:8 mg Ag-AS/g ST

	Suma de cuadrados	gl*	Media cuadrática	F	Significación
Entre grupos	0.144	2	0.072	0.056	0.947
Dentro de grupos	3.873	3	1.291		
Total	4.017	5			

* gl: grados de libertad

Tabla I.20 Análisis de variancia de los resultados del estudio de recrecimiento de coliformes fecales de lodo desinfectado con 5:100:4 mg Ag-Cu-AS/g ST

	Suma de cuadrados	gl*	Media cuadrática	F	Significación
Entre grupos	0.056	2	0.028	0.056	0.946
Dentro de grupos	1.493	3	0.498		
Total	1.549	5			

* gl: grados de libertad

En cuanto al análisis de variancia de los resultados de los estudios de recrecimiento del lodo desinfectado con 10:100 mg Ag-Cu/g ST (Tabla I.21) y 30:13.3 mg Ag-AS/g ST (Tabla I.23)

se puede observar que sí hay un cambio significativo, debido a los tratamientos, en el contenido de coliformes fecales (significación menor a 0.05). En la Tabla I.22 y la Tabla I.24 se presentan los resultados de la prueba t de Dunnett de dos colas para las dos dosis analizadas, respectivamente. En ellas, se puede observar que todos los tratamientos (presencia y ausencia de luz) producen un cambio en el contenido de coliformes fecales durante las 72 h de estudio. Sin embargo, este cambio es una reducción en el contenido de coliformes fecales, por lo que se tiene un efecto residual desinfectante de las dosis 10:100 mg Ag-Cu/g ST y 30:13.3 mg Ag-AS/g ST.

Tabla I.21 Análisis de variancia de los resultados del estudio de recrecimiento de coliformes fecales de lodo desinfectado con 10:100 mg Ag-Cu/g ST

	Suma de cuadrados	gl*	Media cuadrática	F	Significación
Entre grupos	5.713	2	2.857	19.397	0.019
Dentro de grupos	0.442	3	0.147		
Total	6.155	5			

*gl: grados de libertad

Tabla I.22 Prueba t de Dunnett (2-colas) de los resultados del estudio de recrecimiento de coliformes fecales de lodo desinfectado con 10:100 mg Ag-Cu/g ST

(I) Presencia/ Ausencia de luz	(J) Presencia/ Ausencia de luz	Diferencia entre medias (I-J)	Error estándar	Significación	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
Presencia de luz	Sin tratamiento	-2.07000(*)	0.38375	0.021	-3.5538	-0.5862
Ausencia de luz	Sin tratamiento	-2.07000(*)	0.38375	0.021	-3.5538	-0.5862

* La diferencia entre medias es significativa a un nivel de 0.05.

^a La prueba t de Dunnett considera a un grupo como control, y compara al resto de los grupos con respecto a él.

Tabla I.23 Análisis de variancia de los resultados del estudio de recrecimiento de coliformes fecales de lodo desinfectado con 30:13.3 mg Ag-AS/g ST

	Suma de cuadrados	gl*	Media cuadrática	F	Significación
Entre grupos	0.065	2	0.032	121.000	0.001
Dentro de grupos	0.001	3	0.000		
Total	0.065	5			

* gl: grados de libertad

Tabla I.24 Prueba t de Dunnett (2-colas) de los resultados del estudio de recrecimiento de coliformes fecales de lodo desinfectado con 30:13.3 mg Ag-AS/g ST

(I) Presencia/ Ausencia de luz	(J) Presencia/ Ausencia de luz	Diferencia entre medias (I-J)	Error estándar	Significación	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
Presencia de luz	Sin tratamiento	-0.22000(*)	0.01633	0.001	-0.2831	-0.1569
Ausencia de luz	Sin tratamiento	-0.22000(*)	0.01633	0.001	-0.2831	-0.1569

* La diferencia entre medias es significativa a un nivel de 0.05.

^a La prueba t de Dunnett considera a uno de los grupos como control, y compara al resto de los grupos con respecto a él.

I.4 Análisis estadístico de los resultados obtenidos en la etapa del efecto de las dosis óptimas para inactivar huevos de helmintos en otros organismos de interés

El análisis estadístico se realizó a partir de las siguientes hipótesis.

$H_0: T_1=T_2=\dots=T_i=0$ es decir, los efectos de las dosis óptimas para inactivar huevos de helmintos (tratamientos) sobre bacteriófagos somáticos, bacteriófagos MS (F+), fagos de *Salmonella typhimurium*, *Salmonella* spp., *Shigella* spp., *Pseudomonas aeruginosa*, *Vibrio cholerae*, *Giardia* sp. y *Cryptosporidium* sp. (variables de respuesta) son estadísticamente nulos (iguales a cero).

$H_A: T_i \neq 0$ para algún i , es decir, al menos un efecto de la aplicación de los tratamientos es diferente de cero.

El análisis de variancia (Tabla I.25) de los resultados de esta etapa indica que sólo para las variables de respuesta *Giardia* sp. y *Cryptosporidium* sp., no hubo un cambio significativo debidos a los tratamientos (dosis óptimas para inactivar huevos de helmintos) ya que el valor de la significación es mayor que 0.05 en los dos casos. Por lo que la hipótesis nula se rechaza para las variables de respuesta *Giardia* sp. y *Cryptosporidium* sp. La prueba t de Dunnett (Tabla I.26) corrobora que ninguno de los tratamientos provocó un cambio estadísticamente significativo en el contenido de ambos protozoos. Es decir, sólo para los protozoos, no hubo un efecto desinfectante con las dosis analizadas.

Tabla I.25 Análisis de variancia de los resultados de la evaluación del efecto de las dosis óptimas para inactivar huevos de helmintos en otros organismos de interés

		Suma de cuadrados	gl ⁺	Media cuadrática	F	Sig. **
Bacteriófagos somáticos	Entre grupos	4485333333	2	2242666666	210.250	0.001
	Dentro de grupos	32000000	3	10666666		
	Total	4517333333	5			
Bacteriófagos MS (F+)	Entre grupos	1200000000	2	600000000	225.000	0.001
	Dentro de grupos	8000000	3	2666666		
	Total	1208000000	5			
Fagos de <i>Salmonella typhimurium</i>	Entre grupos	360533	2	180266	2704.000	0.000
	Dentro de grupos	200	3	67		
	Total	360733	5			
Coliformes fecales	Entre grupos	884083281146667	2	442041640573333	216.510	0.001
	Dentro de grupos	6125000000000	3	2041666666667		
	Total	890208281146667	5			
<i>Salmonella</i> spp.	Entre grupos	8965167147	2	4482583573	1680.969	0.000
	Dentro de grupos	8000000	3	2666667		
	Total	8973167147	5			
<i>Shigella</i> spp.	Entre grupos	431963520	2	215981760	80.993	0.002
	Dentro de grupos	8000000	3	2666667		
	Total	439963520	5			
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Entre grupos	41801984	2	20900992	348.350	0.000
	Dentro de grupos	180000	3	60000		
	Total	41981984	5			
<i>Vibrio cholerae</i>	Entre grupos	1304794	2	652397	611.622	0.000
	Dentro de grupos	3200	3	1067		
	Total	1307994	5			
<i>Giardia</i> sp.	Entre grupos	392409	2	196204	1.453	0.362
	Dentro de grupos	405170	3	135057		
	Total	797579	5			
<i>Cryptosporidium</i> sp.	Entre grupos	33855377	2	16927688	1.036	0.455
	Dentro de grupos	49005416	3	16335138		
	Total	82860793	5			

* gl: grados de libertad **Sig.: Significación

Tabla I.26 Prueba t de Dunnett (2-colas) de los resultados de la evaluación del efecto de las dosis óptimas para inactivar huevos de helmintos en otros organismos de interés

Variable dependiente	(I) Dosis de AgCuAS	(J) Dosis de AgCuAS	Diferencia entre medias (I-J)	Error estándar	Sig.**	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
Bacteriófagos somáticos	3325	0	- 5.800000000000 000E+04 ^(a)	- 3.2659863237 10904E+03	0.001	- 7.06279657625 8790E+04	- 4.53720342374 1200E+04
	8000	0	- 5.800000000000 000E+04 ^(a)	- 3.2659863237 10904E+03	0.001	- 7.06279657625 8790E+04	- 4.53720342374 1200E+04
Bacteriófagos MS (F+)	3325	0	- 3.000000000000 000E+04 ^(a)	- 1.6329931618 55452E+03	0.001	- 3.63139828812 9397E+04	- 2.36860171187 0604E+04
	8000	0	- 3.000000000000 000E+04 ^(a)	- 1.6329931618 55452E+03	0.001	- 3.63139828812 9397E+04	- 2.36860171187 0604E+04
Fagos de <i>Salmonella typhimurium</i>	3325	0	- 5.200000000000 000E+02 ^(a)	- 8.1649658092 77260E+00	0.000	- 5.51569914406 4690E+02	- 4.88430085593 5300E+02
	8000	0	- 5.200000000000 000E+02 ^(a)	- 8.1649658092 77260E+00	0.000	- 5.51569914406 4690E+02	- 4.88430085593 5300E+02
Coliformes fecales	3325	0	- 2.574999924000 000E+07 ^(a)	- 1.4288690166 23521E+06	0.001	- 3.12747342611 3222E+07	- 2.02252642188 6778E+07
	8000	0	- 2.574999924000 000E+07 ^(a)	- 1.4288690166 23521E+06	0.001	- 3.12747342611 3222E+07	- 2.02252642188 6778E+07
<i>Salmonella</i> spp.	3325	0	- 8.199924000000 000E+04 ^(a)	- 1.6329931618 55452E+03	0.000	- 8.83132228812 9390E+04	- 7.56852571187 0600E+04
	8000	0	- 8.199924000000 000E+04 ^(a)	- 1.6329931618 55452E+03	0.000	- 8.83132228812 9390E+04	- 7.56852571187 0600E+04
<i>Shigella</i> spp.	3325	0	- 1.799924000000 000E+04 ^(a)	- 1.6329931618 55452E+03	0.003	- 2.43132228812 9397E+04	- 1.16852571187 0604E+04
	8000	0	- 1.799924000000 000E+04 ^(a)	- 1.6329931618 55452E+03	0.003	- 2.43132228812 9397E+04	- 1.16852571187 0604E+04
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	3325	0	- 5.599240000000 000E+03 ^(a)	- 2.4494897427 83178E+02	0.000	- 6.54633743219 4090E+03	- 4.65214256780 5900E+03
	8000	0	- 5.599240000000 000E+03 ^(a)	- 2.4494897427 83178E+02	0.000	- 6.54633743219 4090E+03	- 4.65214256780 5900E+03
<i>Vibrio cholerae</i>	3325	0	- 9.892400000000 000E+02 ^(a)	- 3.2659863237 10905E+01	0.000	- 1.11551965762 5879E+03	- 8.62960342374 1200E+02
	8000	0	- 9.892400000000 000E+02 ^(a)	- 3.2659863237 10905E+01	0.000	- 1.11551965762 5879E+03	- 8.62960342374 1200E+02
<i>Giardia</i> sp.	3325	0	- 5.430000000000 000E+02	- 3.6750056689 29868E+02	0.361	- 1.96394427731 2009E+03	- 8.77944277312 0080E+02
	8000	0	- 5.420000000000 000E+02	- 3.6750056689 29868E+02	0.362	- 1.96294427731 2009E+03	- 8.78944277312 0080E+02
<i>Cryptosporidium</i> sp.	3325	0	- 5.041000000000 000E+03	- 4.0416752302 31478E+03	0.451	- 2.06681739597 7086E+04	- 1.05861739597 7086E+04
	8000	0	- 5.037000000000 000E+03	- 4.0416752302 31478E+03	0.451	- 2.06641739597 7086E+04	- 1.05901739597 7086E+04

* La diferencia entre medias es significativa a un nivel de 0.05.

** Sig.: Significación.

^a La prueba t de Dunnett considera a uno de los grupos como control, y compara al resto de los grupos con respecto a él.

I.5 Análisis estadístico de los resultados obtenidos en la etapa de determinación de la distribución del tamaño de partícula en el lodo desinfectado con las dosis óptimas para inactivar huevos de helmintos

El análisis estadístico se realizó a partir de las siguientes hipótesis.

$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_i = 0$ es decir, los efectos de las dosis óptimas para inactivar huevos de helmintos (tratamientos) en la distribución del tamaño de partícula de tamaño de 20-80 μm (variable de respuesta) son estadísticamente nulos (iguales a cero).

$H_A: \tau_i \neq 0$ para algún i , es decir, al menos un efecto de la aplicación de los tratamientos es diferente de cero.

El análisis de variancia de estos resultados (Tabla I.27) indica que no hay un cambio significativo en la distribución del tamaño de partícula (% volumen) debida a los tratamientos (dosis óptimas para inactivar huevos de helmintos). El valor de la significación es mayor que 0.05 por lo que la hipótesis nula se acepta, es decir, las dosis óptimas para inactivar huevos de helmintos no tienen un efecto significativo en la distribución del tamaño de partícula. Al retomar que estas dosis sí producen un efecto significativo en el contenido de huevos de helmintos, es claro que, en lodo, la distribución del tamaño de partícula no se relaciona con el contenido de huevos de helmintos.

Tabla I.27 Análisis de variancia de los resultados de la determinación de la distribución del tamaño de partícula en el lodo desinfectado con las dosis óptimas para inactivar huevos de helmintos

	Suma de cuadrados	gl*	Media cuadrática	F	Significación
Entre grupos	9.394	2	4.697	0.034	0.967
Dentro de grupos	416.553	3	138.851		
Total	425.946	5			

* gl: grados de libertad

ANEXO II: CINÉTICAS DE DESINFECCIÓN

A continuación se presentan de manera gráfica y con sus respectivas ecuaciones, los modelos de desinfección obtenidos mediante el modelo de Hom-Haas para la desinfección de lodo fisicoquímico con plata, plata-cobre, plata-agente sinérgico y plata-cobre-agente sinérgico en términos de coliformes fecales.

II.1 Plata

En la Figura II.1 se presentan las cinéticas de desinfección obtenidas para la desinfección con plata (20 y 40 mg Ag/g ST). En los dos casos, los resultados experimentales presentan una buena aproximación al modelo (coeficientes de correlación elevados: de 0.9778 para 20 mg Ag/g ST y 0.9745 para 40 mg Ag/g ST). También, se encontró que al aumentar la dosis de plata, aumenta la velocidad de desinfección

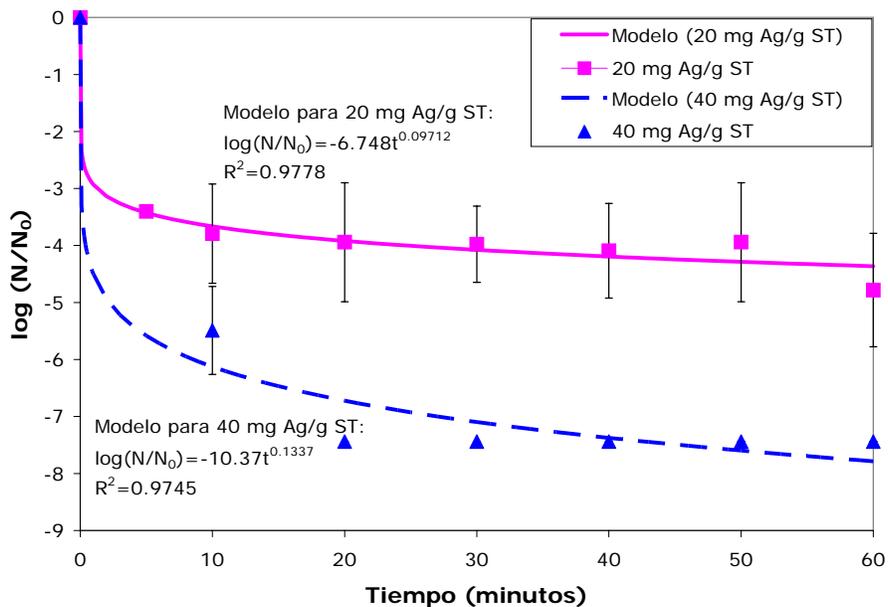


Figura II.1 Cinética de desinfección de coliformes fecales con plata

II.2 Plata-cobre

En Figura II.2 se presentan las cinéticas de desinfección obtenidas para la combinación plata-cobre. En este caso también se obtuvieron altos coeficientes de correlación (0.9191 para 5:50 mg Ag-Cu/g ST y 0.9545 para 51:100 mg Ag-Cu/g ST) de los datos experimentales con el modelo. En este caso no se observó un cambio muy notable en la velocidad de desinfección con respecto al incremento de la dosis y, de hecho, esta es la combinación que presenta la más baja velocidad de inactivación de coliformes fecales con respecto a las de la plata, plata-agente sinérgico y plata-cobre-agente sinérgico.

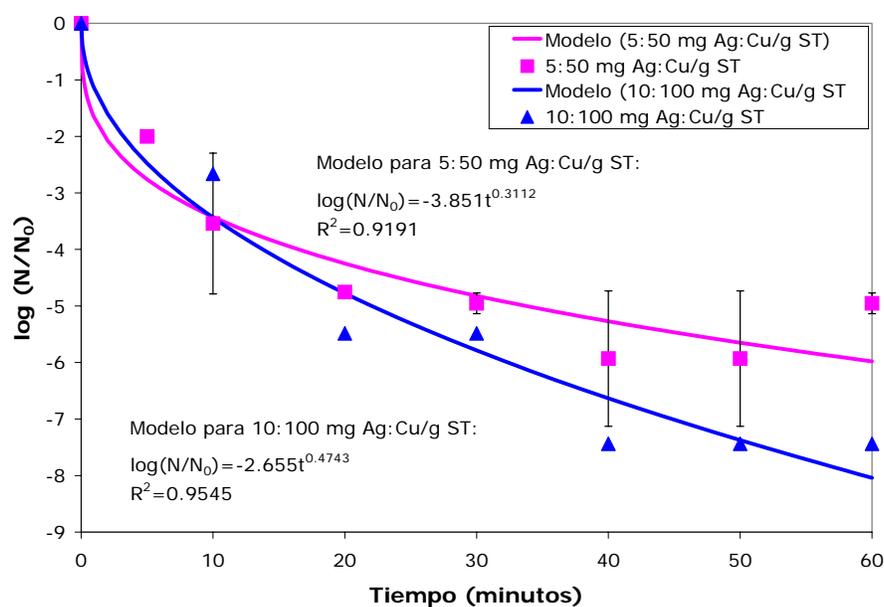


Figura II.2 Cinética de desinfección de coliformes fecales con plata-cobre

II.3 Plata-agente sinérgico

Para esta combinación, se observaron dos patrones de comportamiento diferentes en las cinéticas de desinfección con respecto a la dosis empleada. Aunque no es muy clara la diferencia entre dosis altas y dosis bajas, se puede decir que en cuanto mayor es la dosis de plata-agente sinérgico, más rápida es la inactivación de coliformes fecales. En la Figura II.3 se presentan las cinéticas de desinfección para dosis elevadas y en la Figura II.4 las cinéticas para dosis bajas. En este caso, también se presentaron coeficientes de correlación elevados entre los datos experimentales y el modelo.

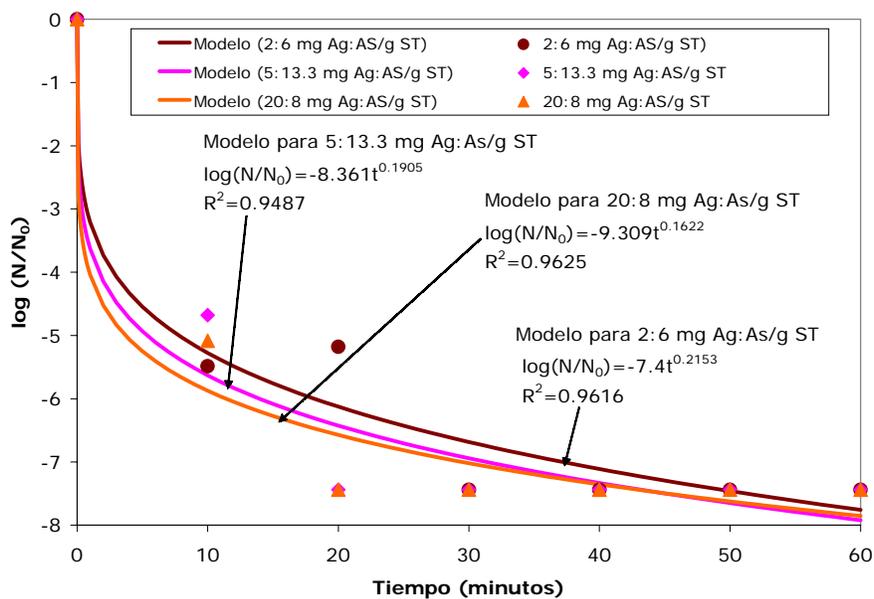


Figura II.3 Cinética de desinfección de coliformes fecales con dosis altas de plata-agente sinérgico

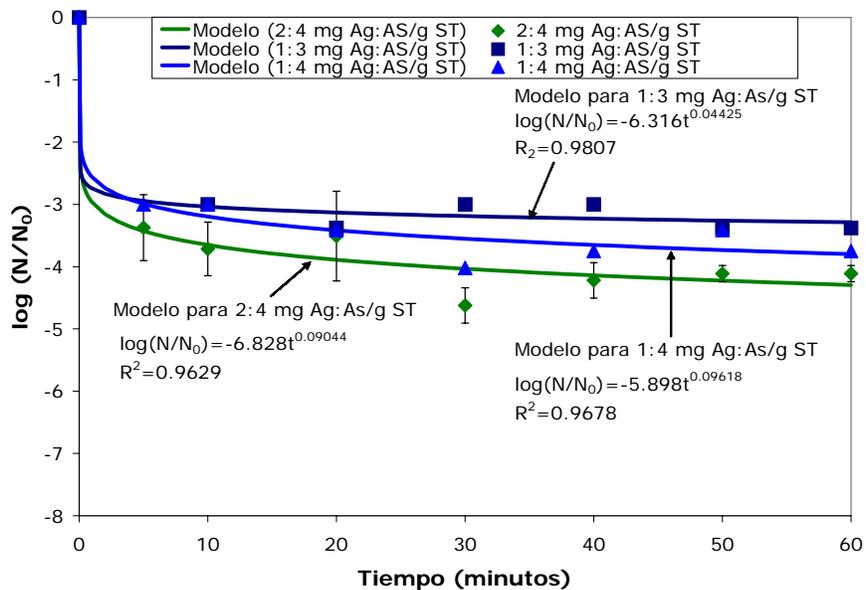


Figura II.4 Cinética de desinfección de coliformes fecales con dosis bajas de plata-agente sinérgico

II.4 Plata-cobre-agente sinérgico

Finalmente, en la Figura II.5 se presentan las cinéticas de desinfección obtenidas para la combinación plata-cobre-agente sinérgico. Al igual que en los casos anteriores, los coeficientes de correlación entre los datos experimentales y el modelo son elevados (0.9598 para 1:10:2.66 mg Ag-Cu-AS/g ST y 0.9625 para 5:100:4 mg Ag-Cu-AS/g ST) y la velocidad de desinfección aumenta en función de la dosis de desinfectantes aplicadas. De acuerdo con los valores de las constantes k^* (como se discute en la sección de resultados de esta tesis), esta combinación de desinfectantes no es la más rápida, pero sí la más efectiva para desinfectar lodo fisicoquímico con elevadas concentraciones de coliformes fecales y huevos de helmintos.

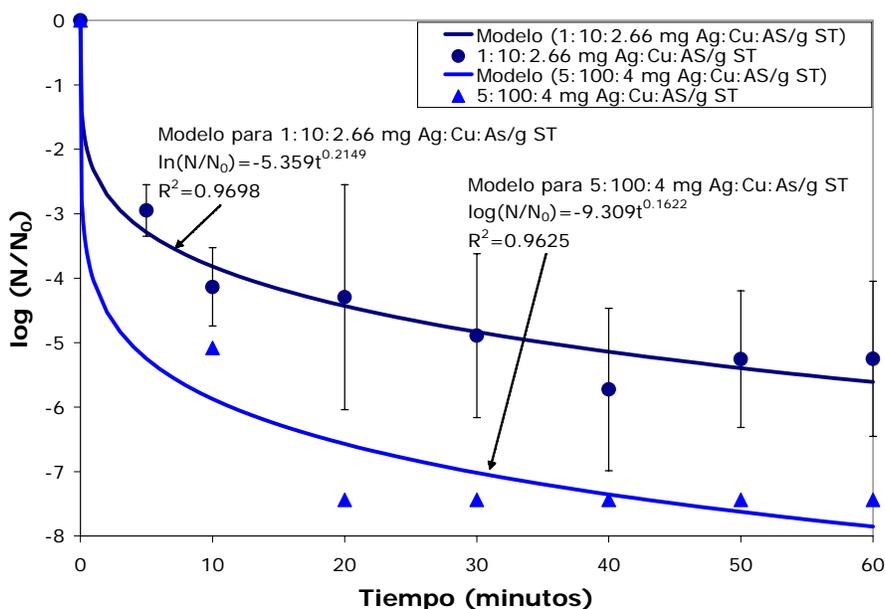


Figura II.5 Cinética de desinfección de coliformes fecales con plata-cobre-agente sinérgico